



SAMUEL ALEXANDRE BRANCO GOMES FERRA

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE GRANDES VARIAÇÕES
SAZONAIS DE TEMPERATURA E DE TENSÃO NO
DESENVOLVIMENTO DAS EXPANSÕES DO BETÃO
EM BARRAGENS.

APLICAÇÃO À BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – ESTRUTURAS

Universidade NOVA de Lisboa

Janeiro, 2022

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE GRANDES VARIAÇÕES SAZONAIS DE TEMPERATURA E DE TENSÃO NO DESENVOLVIMENTO DAS EXPANSÕES DO BETÃO EM BARRAGENS.

APLICAÇÃO À BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO

SAMUEL ALEXANDRE BRANCO GOMES FERRA

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Orientador: Doutor Ivo Figueiredo Dias, Investigador Auxiliar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Coorientadores: Doutor António Lopes Batista, Professor Associado Convidado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa; Investigador Principal com Habilitação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Doutor António Manuel Pinho Ramos, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogais: Doutor Corneliu Cismasiu, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Doutor Ivo Figueiredo Dias, Investigador Auxiliar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – ESTRUTURAS

Universidade NOVA de Lisboa
Janeiro, 2022

Estudo da influência de grandes variações sazonais de temperatura e de tensão no desenvolvimento das expansões do betão em barragens. Aplicação à barragem do Covão do Meio.

Copyright © Samuel Alexandre Branco Gomes Ferra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

*À minha irmã
e aos meus pais*

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação enquadrou-se no âmbito do acolhimento proporcionado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), mais concretamente no Departamento de Barragens de Betão (DBB), que proporciona todas as condições e apoios necessários aos estudantes que escolhem esta instituição para terminarem o seu ciclo de estudos.

Esta oportunidade de trabalho foi canalizada através do Professor António Lopes Batista, que acreditou nas minhas capacidades, tendo-se mostrado sempre disponível para ajudar naquilo que foi necessário.

Agradeço ao Investigador Ivo Figueiredo Dias, por todos os conhecimentos e rigor transmitidos, pela paciência e preocupação demonstrada e por sempre se disponibilizar para me ajudar nos momentos de maior aflição.

Agradeço também à EDP, concessionária da barragem do Covão do Meio, a autorização concedida, através do LNEC, para a utilização de toda a informação técnica disponível sobre a obra.

Concluir esta etapa também não teria sido possível sem a presença e ajuda de todos os meus amigos, que se mantiveram próximos, apesar das circunstâncias nem sempre terem sido favoráveis para tal. Aos meus colegas de curso, em especial, à Beatriz, ao Bruno e ao João, por todos os momentos de companheirismo, amizade e entreaajuda, que ajudaram a superar as dificuldades do curso e que certamente não nos esqueceremos tão cedo.

Agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, em particular ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) e ao seu corpo docente e não docente, a disponibilidade e preocupação demonstradas, bem como todos os momentos de transmissão de conhecimentos, de esforço e dedicação, que me moldaram na pessoa que sou hoje.

À Igreja Viva Assembleia de Deus, do Casal do Marco, aos seus pastores e a todos os que congregam neste local, que sempre se preocuparam e me incentivaram durante este percurso.

Por último, deixo o meu maior sentimento de gratidão à minha família, aos meus pais e à minha irmã, a quem dedico este trabalho, por todos os esforços que sempre fizeram por mim, pelas palavras de incentivo e pelo amor incondicional que sempre me deram.

RESUMO

Em Portugal existe um número muito significativo de barragens de betão afetadas por reações expansivas de origem interna (cerca de um terço das grandes barragens com observação continuada), nomeadamente por reações álcalis-agregado e reações sulfáticas. Estas reações ocorrem entre os minerais presentes nos agregados e os constituintes da pasta de cimento e resultam na formação de produtos expansivos, como geles silico-alcalinos e etringite retardada, respetivamente, que aumentam de volume ao absorverem água, originando a deterioração do betão. Se as reações forem severas, podem conduzir à depreciação significativa das propriedades mecânicas do betão, ao aparecimento de fendilhação generalizada e à diminuição das condições de segurança das obras.

O desenvolvimento das expansões é condicionado pela temperatura e humidade interna do betão e pelo estado de tensão instalado. Os abaixamentos das albufeiras nas estiagens podem aumentar as taxas de expansão, devido ao aumento da temperatura no paramento de montante (que fica exposto à temperatura do ar e à radiação solar) e à diminuição das tensões de compressão. Com esta dissertação pretende-se contribuir para melhorar o conhecimento sobre a importância destes fatores na evolução das expansões, que atualmente ainda é muito limitado, usando como caso de estudo a barragem do Covão do Meio, cuja albufeira esvazia no verão e está cheia no inverno.

A análise apoiou-se em modelos numéricos, baseados no método de elementos finitos, para representar o comportamento térmico e estrutural da barragem, e também o desenvolvimento do processo expansivo, considerando a evolução das propriedades dos materiais e das principais ações. Os modelos foram calibrados e validados, através da comparação dos resultados da observação com os valores calculados, e usados para interpretar o comportamento da obra, estabelecer cenários de evolução do seu comportamento futuro, e avaliar o efeito da descida sazonal do nível da albufeira no desenvolvimento das expansões e nos seus efeitos estruturais, que se verificou serem significativos.

Palavas chave: Expansões do betão; Barragens; Comportamento estrutural e térmico; Método dos elementos finitos; Influência de variações sazonais do nível da albufeira; Barragem do Covão do Meio.

ABSTRACT

In Portugal there is a very relevant number of concrete dams affected by swelling reactions of internal origin (about one third of the large dams with continued monitoring), namely by alkali-aggregate and sulphate reactions. These reactions occur between the minerals of the aggregates and the constituents of the cement paste and result in the formation of expansive products, such as silica-alkaline gels and retarded ettringite, respectively, which increase in volume as they absorb water, causing concrete deterioration. If the reactions are severe, they can lead to a significant depreciation of the mechanical properties of the concrete, to the appearance of generalized cracking and to a reduction in the safety conditions.

The expansions growth is influenced by the temperature and internal humidity of the concrete and by its stress state. Seasonal lowering of the reservoirs can increase expansion rates, due to the increase in temperature on the upstream face (which is exposed to air temperature and solar radiation) and the decrease of the compressive stresses. The main goal of this dissertation is to contribute for improving the knowledge about the importance of these factors in the structural expansion's evolution (which is currently still very limited), using as a case study the Covão do Meio dam, whose reservoir is empty in summer and full in winter.

The analysis has used numerical models, based on the finite element method, to model the thermal and structural behavior of the dam, and also the development of the swelling process, considering the evolution of the materials properties and of the main actions. The models were calibrated and validated, by comparing the monitoring results with the computed values, and used to interpret the dam behavior, to establish evolution scenarios for its future behavior, and to evaluate the influence of the seasonal reservoir lowering in the development of the concrete swelling process and on the related structural effects, which were found to be significant.

Keywords: Concrete swelling; Dams; Structural and thermal behavior; Finite elements method; Influence of seasonal lowering of reservoir level; Covão do Meio dam.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XIX
ÍNDICE DE TABELAS	XXV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA DAS BARRAGENS E TIPO DE BARRAGENS DE BETÃO	1
1.2. REAÇÕES EXPANSIVAS DO BETÃO EM BARRAGENS	2
1.2.1. Aspectos gerais	2
1.2.2. Reações álcalis-sílica	3
1.2.3. Reações sulfáticas internas	5
1.2.4. Reações álcalis-carbonato	6
1.2.5. Efeitos estruturais	6
1.3. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	9
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	10
2 MODELOS E MÉTODOS DE ANÁLISE DE BARRAGENS DE BETÃO SUJEITAS A EXPANSÕES	11
2.1. ASPETOS GERAIS	11
2.2. MODELAÇÃO TÉRMICA	12
2.3. MODELAÇÃO ESTRUTURAL	13
2.4. MODELAÇÃO DA AÇÃO EXPANSIVA	14
3 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO	17
3.1. CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM	17
3.2. SISTEMA DE OBSERVAÇÃO	19
3.3. EVIDÊNCIAS DO PROCESSO EXPANSIVO E ESTUDOS ANTERIORES SOBRE A OBRA	21

4	INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO.....	23
4.1.	ASPETOS GERAIS	23
4.2.	MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	24
4.3.	MODELAÇÃO TÉRMICA.....	25
4.3.1.	Ações térmicas	25
4.3.2.	Propriedades térmicas do betão	27
4.3.3.	Resultados do modelo térmico	27
4.4.	MODELAÇÃO DA AÇÃO EXPANSIVA.....	31
4.4.1.	Propriedades expansivas do betão.....	31
4.4.2.	Resultados do modelo de ação expansiva.....	33
4.5.	MODELAÇÃO ESTRUTURAL	34
4.5.1.	Ações estruturais	34
4.5.2.	Propriedades mecânicas dos materiais.....	35
4.5.3.	Resultados do modelo estrutural	36
4.5.4.	Estado de tensão na barragem.....	48
5	INFLUÊNCIA DO NÍVEL DA ALBUFEIRA NAS EXPANSÕES E NOS SEUS EFEITOS ESTRUTURAIS	59
5.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	59
5.2.	RESULTADOS DOS MODELOS TÉRMICOS E ESTRUTURAL PARA OS CENÁRIOS A E B.....	60
5.2.1.	Temperaturas	60
5.2.2.	Deslocamentos	61
5.2.3.	Expansões livres e estruturais.....	63
6	PREVISÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO	67
6.1.	ASPETOS GERAIS	67
6.2.	PREVISÃO DA EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES ATÉ 2040	67
6.3.	DESLOCAMENTOS RADIAIS.....	69
6.4.	DESLOCAMENTOS VERTICAIS	70
6.5.	ESTADO DE TENSÃO.....	72
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
7.1.	VALIDAÇÃO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS.....	75
7.2.	PREVISÃO DO COMPORTAMENTO FUTURO.....	76
7.3.	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA TENSÃO NO DESENVOLVIMENTO DAS EXPANSÕES ...	77

7.4.	PRINCIPAIS CONTRIBUTOS E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	78
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - ESQUEMA DOS MECANISMOS QUÍMICOS DAS REAÇÕES ÁLCALIS-SÍLICA (ADAPTADO DE (THOMAS ET AL., 2013)).....	3
FIGURA 1.2 - RESULTADOS DE ENSAIOS DE EXPANSÃO LIVRE REALIZADOS COM TEMPERATURAS DE 23°C E 38°C (ADAPTADO DE (LARIVE, 1998)).....	4
FIGURA 1.3 - INFLUÊNCIA DA HUMIDADE RELATIVA INTERNA DO BETÃO NO DESENVOLVIMENTO DAS EXPANSÕES, OBTIDA EM ENSAIOS LABORATORIAIS (ADAPTADA DE (POYET, 2003))	5
FIGURA 1.4 - FENDILHAÇÃO DIFUSA, DO TIPO CRAQUELÊ, NO PISO DO COROAMENTO DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO (À ESQUERDA) E FENDILHAÇÃO LINEAR NO PISO DO COROAMENTO DA BARRAGEM DE SANTA LUZIA (À DIREITA).....	7
FIGURA 1.5 - DESLOCAMENTOS IRREVERSÍVEIS EM JUNTAS DE CONTRAÇÃO NO COROAMENTO: NA BARRAGEM DE MIRANDA, NA GUARDA DE MONTANTE, COM ESMAGAMENTO DE BORDOS, EM 2018 (À ESQUERDA), E NA BARRAGEM DA FONTANA (EUA), TAMBÉM NA GUARDA DE MONTANTE, EM 2013 (À DIREITA)	7
FIGURA 1.6 - COMPORTAS COM GUIAS LATERAIS AJUSTADAS E ZONAS DE AMARRAÇÃO REFORÇADAS COM PRÉ-ESFORÇO, NA BARRAGEM DE HIWASSEE (À ESQUERDA) E ENCURVADURA DE GUARDAS EM VÃO DA BARRAGEM DE HUNDERFOSSEN, NA NORUEGA (À DIREITA) (BATISTA, 2021)	7
FIGURA 1.7 - ASPETO AMARELADO DO BETÃO DA BARRAGEM DO ALTO CEIRA (BLOCO QUE ESTÁ NO CAMPUS DO LNEC, FOTOGRAFADO EM 2020) (À ESQUERDA) E HASTEAL DE UMA GALERIA COM BETÃO DETERIORADO SUPERFICIALMENTE NA BARRAGEM DE BEMPOSTA, EM 2013 (À DIREITA).....	8
FIGURA 1.8 - EFLORESCÊNCIAS/EXSUDAÇÕES DE GEL DA REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA EM GALERIAS DA BARRAGEM DO CABRIL (ESCALA EM CENTÍMETROS) (ADAPTADO DE (BATISTA, 2021)).....	8
FIGURA 1.9 - VISTA DE BICAS NO PARAMENTO DE JUSANTE PARA COLETAR REPASSES PELAS FENDAS DO BETÃO NA BARRAGEM DO ALTO CEIRA, EM 2012 (À ESQUERDA), E NA BARRAGEM DE PETI (BRASIL), EM 2011 (À DIREITA).....	8
FIGURA 2.1 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DESENVOLVIMENTO DAS EXPANSÕES, PARA $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$. 15	
FIGURA 2.2 - INFLUÊNCIA DO CAMPO DE TENSÕES NO PROCESSO EXPANSIVO (ADAPTADO DE (BATISTA, 2021))	16
FIGURA 3.1 - BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO. PLANTA, ALÇADO PLANIFICADO DE JUSANTE DA ABÓBADA E CORTE PELO BLOCO MAIS ALTO DA ABÓBADA (ADAPTADO DE (LNEC, 2006)).....	18
FIGURA 3.2 - ALÇADO DE JUSANTE COM A LOCALIZAÇÃO DOS FIOS DE PRUMO, EXTENSÓMETROS DE VARAS E PONTOS OBJETO DA REDE DE TRIANGULAÇÃO (ADAPTADO DE (LNEC, 2006))	19

FIGURA 3.3 - PLANTA COM A LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS, EXTENSÓMETROS DE VARAS E MARCAS DE NIVELAMENTO (À ESQUERDA) E CORTES TRANSVERSAIS DAS JUNTAS D, F E G COM A LOCALIZAÇÃO DOS FIOS DE PRUMO E EXTENSÓMETROS DE VARAS (À DIREITA) (ADAPTADO DE (LNEC, 2006)).....	20
FIGURA 3.4 - ALÇADO DE JUSANTE E CORTES TRANSVERSAIS DAS JUNTAS D, F E G COM A LOCALIZAÇÃO DAS BASES DE ALONGÂMETRO, MEDIDORES DE MOVIMENTOS DE JUNTAS E TERMÓMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA (ADAPTADO DE (LNEC, 2006))	20
FIGURA 3.5 - ALÇADO PLANIFICADO DE JUSANTE DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO COM A IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS CAROTES EXTRAÍDOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS (LNEC, 2013A, 2013B, 2015)	22
FIGURA 4.1 – VISTAS DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DO CONJUNTO BARRAGEM-FUNDAÇÃO (EM CIMA) E APENAS DA BARRAGEM (EM BAIXO)	24
FIGURA 4.2 - TEMPERATURAS DIÁRIAS OBSERVADAS, MÍNIMAS, MÁXIMAS E MÉDIAS, ENTRE 2000 E 2018.....	25
FIGURA 4.3 - ONDA TÉRMICA ANUAL MÉDIA DO AR CALCULADA A PARTIR DAS TEMPERATURAS REGISTADAS ENTRE 2000 E 2004 (LNEC, 2006)	26
FIGURA 4.4 - ONDAS TÉRMICAS DA ÁGUA DA ALBUFEIRA A DIFERENTES PROFUNDIDADES.....	26
FIGURA 4.5 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA ANUAL MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA DA ÁGUA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE	27
FIGURA 4.6 – VISTAS DE JUSANTE E CORTES TRANSVERSAIS COM A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO CORPO DA BARRAGEM EM ÉPOCA FRIA (EM CIMA) E ÉPOCA QUENTE (EM BAIXO)	28
FIGURA 4.7 - ALÇADO DE JUSANTE COM A IDENTIFICAÇÃO E A LOCALIZAÇÃO DOS TERMÓMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA (ADAPTADO DE (LNEC, 2006)).....	29
FIGURA 4.8 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS CALCULADAS E OBSERVADAS NOS TERMÓMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA LOCALIZADOS NOS BLOCOS BC E DE.....	30
FIGURA 4.9 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS CALCULADAS E OBSERVADAS NOS TERMÓMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA LOCALIZADOS NO BLOCO GH.....	31
FIGURA 4.10 – ZONAMENTO ADOTADO PARA O POTENCIAL EXPANSIVO DO BETÃO DA ABÓBADA	32
FIGURA 4.11 – REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES LIVRES, PARA A TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DE 20°C.....	33
FIGURA 4.12 - EXPANSÕES LIVRES CALCULADAS, EM DEZEMBRO DE 2020. VISTA DO PARAMENTO DE MONTANTE (EM BAIXO), JUSANTE (EM CIMA) E CORTE TRANSVERSAL NO BLOCO EF	33
FIGURA 4.13 - NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO (A AZUL) E ESTIMADO (A CINZENTO).....	34
FIGURA 4.14 - FUNÇÃO DE FLUÊNCIA DE BAŽANT E PANULA ESTIMADA PARA O BETÃO DA BARRAGEM, PARA TRÊS IDADES DE CARGA (À ESQUERDA) E FUNÇÃO DE RELAXAÇÃO ESTIMADA PARA O BETÃO DA BARRAGEM AS MESMAS IDADES DE CARGA, ASSIM COMO A CURVA DE EVOLUÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (À DIREITA).....	35
FIGURA 4.15 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS E CALCULADOS DO PONTO CORRESPONDENTE À BASE DE LEITURA DO FIO DE PRUMO 1, À COTA 1653,90 M, ENTRE 2000 E 2019	37

FIGURA 4.16 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS (INCLUI MÉTODOS GEODÉSICOS) E CALCULADOS DO PONTO CORRESPONDENTE À BASE DE LEITURA DO FIO DE PRUMO 2, À COTA 1653,90 M, ENTRE 1985 E 2019	37
FIGURA 4.17 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS ATRAVÉS DE MÉTODOS GEODÉSICOS E CALCULADOS, NO PONTO CORRESPONDENTE AO ALVO CD53B, À COTA 1653,0 M, ENTRE 1985 E 2019	38
FIGURA 4.18 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS ATRAVÉS DE MÉTODOS GEODÉSICOS E CALCULADOS, NO PONTO CORRESPONDENTE AO ALVO CD43B, À COTA 1643,0 M, ENTRE 1985 E 2019	38
FIGURA 4.19 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS ATRAVÉS DE MÉTODOS GEODÉSICOS E CALCULADOS, NO PONTO CORRESPONDENTE AO ALVO DE43B, À COTA 1643,0 M, ENTRE 1985 E 2019.....	39
FIGURA 4.20 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS ATRAVÉS DE MÉTODOS GEODÉSICOS E CALCULADOS, NO PONTO CORRESPONDENTE AO ALVO EF53B, À COTA 1653,0 M, ENTRE 1985 E 2019.....	39
FIGURA 4.21 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS ATRAVÉS DE MÉTODOS GEODÉSICOS E CALCULADOS, NO PONTO CORRESPONDENTE AO ALVO EF43B, À COTA 1643,0 M, ENTRE 1985 E 2019.....	40
FIGURA 4.22 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS ATRAVÉS DE MÉTODOS GEODÉSICOS E CALCULADOS, NO PONTO CORRESPONDENTE AO ALVO FG53B, À COTA 1653,0 M, ENTRE 1985 E 2019.....	40
FIGURA 4.23 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS ATRAVÉS DE MÉTODOS GEODÉSICOS E CALCULADOS, NO PONTO CORRESPONDENTE AO ALVO FG43B, À COTA 1643,0 M, ENTRE 1985 E 2020	41
FIGURA 4.24 - DESLOCAMENTOS RADIAIS OBSERVADOS ATRAVÉS DE MÉTODOS GEODÉSICOS E CALCULADOS, NO PONTO CORRESPONDENTE AO ALVO GH53B, À COTA 1653,0 M, ENTRE 1985 E 2020	41
FIGURA 4.25 - DESLOCAMENTOS TANGENCIAIS OBSERVADOS E CALCULADOS DO PONTO CORRESPONDENTE À BASE DE LEITURA DO FIO DE PRUMO 1, À COTA 1653,90 M, ENTRE 1999 E 2019	42
FIGURA 4.26 - DESLOCAMENTOS TANGENCIAIS OBSERVADOS E CALCULADOS DO PONTO CORRESPONDENTE À BASE DE LEITURA DO FIO DE PRUMO 2, À COTA 1653,90 M, ENTRE 1999 E 2019	42
FIGURA 4.27 - DEFORMADAS VERTICAIS DO COROAMENTO, CALCULADA E OBSERVADA, ENTRE 1983 E 2019 43	
FIGURA 4.28 - EXTENSÕES MÉDIAS VERTICAIS, CALCULADAS E OBSERVADAS, ENTRE 1983 E 2019	43
FIGURA 4.29 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO AB DO COROAMENTO, À COTA 1653,90 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1982 E 2019.....	44
FIGURA 4.30 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO BC DO COROAMENTO, À COTA 1653,90 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1982 E 2019.....	44
FIGURA 4.31 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO CD DO COROAMENTO, À COTA 1653,90 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1982 E 2019	45
FIGURA 4.32 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO DE DO COROAMENTO, À COTA 1653,90 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1982 E 2019.....	45
FIGURA 4.33 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO EF DO COROAMENTO, À COTA 1653,90 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1982 E 2019.....	46
FIGURA 4.34 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO FG DO COROAMENTO, À COTA 1653,90 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1982 E 2019.....	46
FIGURA 4.35 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO GH DO COROAMENTO, À COTA 1653,90 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1982 E 2019	47

FIGURA 4.36 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO HI DO COROAMENTO, À COTA 1653,90 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1982 E 2019.....	47
FIGURA 4.37 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PONTO CORRESPONDENTE AO EXTENSÓMETRO DE FUNDAÇÃO 3.13, À COTA 1613,0 M, OBSERVADOS E CALCULADOS ENTRE 1998 E 2020.....	48
FIGURA 4.38 - CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DA ABÓBADA (AMPLIADA 2000 VEZES) DEVIDA AO PESO PRÓPRIO DO BETÃO. VISTA DE JUSANTE EM PERSPETIVA E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF	49
FIGURA 4.39 - TENSÕES PRINCIPAIS NA ABÓBADA DEVIDAS À AÇÃO DO PESO PRÓPRIO DO BETÃO. REPRESENTAÇÃO NOS PARAMENTOS DE JUSANTE (EM CIMA) E DE MONTANTE (EM BAIXO).....	50
FIGURA 4.40 - CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DA ABÓBADA (AMPLIADA 1000 VEZES) DEVIDA À PRESSÃO HIDROSTÁTICA ($H=1653,7$ M). VISTA DE JUSANTE EM PERSPETIVA E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF	51
FIGURA 4.41 - TENSÕES PRINCIPAIS NA ABÓBADA DEVIDAS À AÇÃO DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA ($H=1653,7$ M). REPRESENTAÇÃO NOS PARAMENTOS DE JUSANTE (EM CIMA) E MONTANTE (EM BAIXO).....	51
FIGURA 4.42 - VARIAÇÕES DE TEMPERATURA CORRESPONDENTES AO AQUECIMENTO DA ABÓBADA ENTRE 12 DE JANEIRO DE 2020 E 12 DE JULHO DE 2020. VISTA DE JUSANTE EM PERSPETIVA E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF.....	52
FIGURA 4.43 - CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DA ABÓBADA (AMPLIADA 250 VEZES) DEVIDA AO AQUECIMENTO DA BARRAGEM ENTRE 12 DE JANEIRO DE 2020 E 12 DE JULHO DE 2020. VISTA DE JUSANTE EM PERSPETIVA E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF	53
FIGURA 4.44 - TENSÕES PRINCIPAIS DEVIDAS AO AQUECIMENTO DA ABÓBADA ENTRE 12 DE JANEIRO DE 2020 E 12 DE JULHO DE 2020. REPRESENTAÇÃO NOS PARAMENTOS DE JUSANTE (EM CIMA) E MONTANTE (EM BAIXO).....	53
FIGURA 4.45 - VARIAÇÕES DE TEMPERATURA CORRESPONDENTES AO ARREFECIMENTO DA ABÓBADA ENTRE 12 DE JULHO DE 2019 E 12 DE JANEIRO DE 2020. VISTA DE JUSANTE EM PERSPETIVA E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF.....	54
FIGURA 4.46 - CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DA ABÓBADA (AMPLIADA 250 VEZES) DEVIDA AO ARREFECIMENTO DA BARRAGEM ENTRE 12 DE JULHO DE 2019 E 12 DE JANEIRO DE 2020. VISTA DE JUSANTE EM PERSPETIVA E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF	54
FIGURA 4.47 - TENSÕES PRINCIPAIS DEVIDAS AO ARREFECIMENTO DA ABÓBADA ENTRE 12 DE JULHO DE 2019 E 12 DE JANEIRO DE 2020. REPRESENTAÇÃO NOS PARAMENTOS DE JUSANTE (EM CIMA) E MONTANTE (EM BAIXO).....	55
FIGURA 4.48 - CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DA ABÓBADA (AMPLIADA 100 VEZES) DEVIDA À AÇÃO DAS EXPANSÕES EM 2020. VISTA DE JUSANTE EM PERSPETIVA E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF	56
FIGURA 4.49 - TENSÕES PRINCIPAIS NA ABÓBADA DEVIDAS À AÇÃO DAS EXPANSÕES, EM 2020. REPRESENTAÇÃO NOS PARAMENTOS DE JUSANTE (EM CIMA) E MONTANTE (EM BAIXO).....	56
FIGURA 4.50 - CONFIGURAÇÃO DEFORMADA (AMPLIADA 100 VEZES) DA ABÓBADA DEVIDA À AÇÃO CONJUNTA DO PESO PRÓPRIO, PRESSÃO HIDROSTÁTICA E EXPANSÕES NO INÍCIO DE 2020. VISTA DE JUSANTE EM PERSPETIVA E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF	57

FIGURA 4.51 - TENSÕES PRINCIPAIS NA ABÓBADA DEVIDAS ÀS AÇÕES DO PESO PRÓPRIO, PRESSÃO HIDROSTÁTICA E EXPANSÕES, NO INÍCIO DE 2020. REPRESENTAÇÃO NOS PARAMENTOS DE JUSANTE (EM CIMA) E MONTANTE (EM BAIXO)	58
FIGURA 5.1 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NO CORPO DA ABÓBADA NO CENÁRIO B. VISTA DE JUSANTE E CORTE TRANSVERSAL PELO BLOCO EF	60
FIGURA 5.2 -EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO ANO, PARA OS CENÁRIOS A E B, NO PONTO CORRESPONDENTE AO TERMÓMETRO T22, À COTA 1643,90 M	60
FIGURA 5.3 - EVOLUÇÃO DO DESLOCAMENTO RADIAL, PARA OS CENÁRIOS A E B, NO PONTO CORRESPONDENTE À BASE DE LEITURA SUPERIOR DO FIO DE PRUMO 2, À COTA DE 1653,90 M.....	61
FIGURA 5.4 - EVOLUÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS, PARA OS CENÁRIOS A E B, NO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO DE.....	61
FIGURA 5.5 - EXPANSÕES LIVRES CALCULADAS PARA O CENÁRIO B, EM DEZEMBRO DE 2020. ALÇADOS DOS PARAMENTOS DE JUSANTE (EM CIMA) E DE MONTANTE (EM BAIXO) E CORTE TRANSVERSAL NO BLOCO EF	63
FIGURA 5.6 – EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES LIVRES EM PONTOS À COTA 1651,0 M (JUSANTE E MONTANTE), PARA OS CENÁRIOS A E B, DESDE O PRIMEIRO ENCHIMENTO ATÉ AO FINAL DE 2020 (À ESQUERDA) E DURANTE 2020 (À DIREITA).....	63
FIGURA 5.7 - EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES LIVRES EM PONTOS À COTA 1632,0 M (JUSANTE E MONTANTE), PARA OS CENÁRIOS A E B, DESDE O PRIMEIRO ENCHIMENTO ATÉ AO FINAL DE 2020 (À ESQUERDA) E DURANTE 2020 (À DIREITA).....	64
FIGURA 5.8 - EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES ESTRUTURAIS TANGENCIAIS E VERTICAIS EM PONTOS À COTA 1651,0 M (MONTANTE), PARA OS CENÁRIOS A E B, DESDE O PRIMEIRO ENCHIMENTO ATÉ AO FINAL DE 2020 (À ESQUERDA) E DURANTE 2020 (À DIREITA)	64
FIGURA 5.9 - EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES ESTRUTURAIS TANGENCIAIS E VERTICAIS EM PONTOS À COTA 1651,0 M (JUSANTE), PARA OS CENÁRIOS A E B, DESDE O PRIMEIRO ENCHIMENTO ATÉ AO FINAL DE 2020 (À ESQUERDA) E DURANTE 2020 (À DIREITA).....	65
FIGURA 5.10 - EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES ESTRUTURAIS TANGENCIAIS E VERTICAIS EM PONTOS À COTA 1632,0 M (MONTANTE), PARA OS CENÁRIOS A E B, DESDE O PRIMEIRO ENCHIMENTO ATÉ AO FINAL DE 2020 (À ESQUERDA) E DURANTE 2020 (À DIREITA)	65
FIGURA 5.11 - EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES ESTRUTURAIS TANGENCIAIS E VERTICAIS EM PONTOS À COTA 1632,0 M (JUSANTE), PARA OS CENÁRIOS A E B, DESDE O PRIMEIRO ENCHIMENTO ATÉ AO FINAL DE 2020 (À ESQUERDA) E DURANTE 2020 (À DIREITA).....	65
FIGURA 6.1 - CURVAS ESTIMADAS DE EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES LIVRES ATÉ 2040, NAS TRÊS ZONAS CONSIDERADAS, CONSIDERANDO CENÁRIOS OTIMISTA E PESSIMISTA (A TRAÇO INTERROMPIDO ESTÁ O PROLONGAMENTO DO CENÁRIO BASE CONSIDERADO ATÉ 2020)	68
FIGURA 6.2 - DESLOCAMENTOS RADIAIS PREVISTOS ATÉ 2040 NO PONTO CORRESPONDENTE À BASE DE LEITURA DO FIO DE PRUMO 1, À COTA 1653,90 M, E VALORES OBSERVADOS ATÉ 2020	69
FIGURA 6.3 - DESLOCAMENTOS RADIAIS PREVISTOS ATÉ 2040 NO PONTO CORRESPONDENTE À BASE DE LEITURA DO FIO DE PRUMO 2, À COTA 1653,90 M, E VALORES OBSERVADOS ATÉ 2020	69

FIGURA 6.4 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS PREVISTOS ATÉ 2040, PARA OS CENÁRIOS OTIMISTA E PESSIMISTA NO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO NO BLOCO AB, BC E CD, E VALORES OBSERVADOS ATÉ 2020.....	70
FIGURA 6.5 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS PREVISTOS ATÉ 2040, PARA OS CENÁRIOS OTIMISTA E PESSIMISTA NOS PONTOS CORRESPONDENTES ÀS MARCAS DE NIVELAMENTO NOS BLOCOS DE, EF E FG, E VALORES OBSERVADOS ATÉ 2020.....	71
FIGURA 6.7 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS PREVISTOS ATÉ 2040, PARA OS CENÁRIOS OTIMISTA E PESSIMISTA NO PONTO CORRESPONDENTE À MARCA DE NIVELAMENTO NO BLOCO GH E HI, E VALORES OBSERVADOS ATÉ 2020.....	72
FIGURA 6.8 - TENSÕES PRINCIPAIS NO PARAMENTO DE JUSANTE DEVIDAS AO PESO PRÓPRIO, À PRESSÃO HIDROSTÁTICA E ÀS EXPANSÕES EM 2040, PARA UM CENÁRIO OTIMISTA (EM CIMA) E PESSIMISTA (EM BAIXO).....	73
FIGURA 6.9 - TENSÕES PRINCIPAIS NO PARAMENTO DE MONTANTE DEVIDAS AO PESO PRÓPRIO, À PRESSÃO HIDROSTÁTICA E ÀS EXPANSÕES EM 2040, PARA UM CENÁRIO OTIMISTA (EM CIMA) E PESSIMISTA (EM BAIXO).....	73

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 4.1 - VALORES DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES HARMÔNICAS UTILIZADAS PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES DA ALBUFEIRA.....	27
TABELA 4.2 - PARÂMETROS DAS CURVAS DE EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES LIVRES, PARA A TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DE 20°C	32
TABELA 5.1 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS PARA OS VÁRIOS CENÁRIOS CONSIDERADOS E QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DA DIMINUIÇÃO DAS TENSÕES DE CONFINAMENTO E DO AUMENTO DA TEMPERATURA NO BETÃO	62
TABELA 5.2 - DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS PARA OS VÁRIOS CENÁRIOS E QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DA DIMINUIÇÃO DAS TENSÕES E DO AUMENTO DA TEMPERATURA NO BETÃO	62
TABELA 6.1 - PARÂMETROS DAS CURVAS DE EVOLUÇÃO DAS EXPANSÕES LIVRES, PARA OS CENÁRIOS PESSIMISTA E OTIMISTA.....	68

INTRODUÇÃO

1.1. Importância das barragens e tipo de barragens de betão

O papel das barragens é, desde há muito tempo, fundamental para o bem-estar das sociedades. Começando por ser simples barreiras de pedra e terra, mais tarde de alvenaria, as barragens tiveram, nos últimos séculos, um enorme processo de evolução. Na atualidade, estas estruturas, na sua maioria de aterro ou de betão, destinam-se a um melhor aproveitamento dos recursos hídricos, contribuindo para o abastecimento de água às populações, para o regadio e para a mitigação dos efeitos de situações extremas de cheias ou de longos períodos de seca. Para além do armazenamento de água e da regulação do caudal dos rios, as barragens são cruciais para a produção de energia elétrica sem emissões de carbono.

As barragens são classificadas, em geral, relativamente ao material constituinte, às formas estruturais, à capacidade de armazenamento de água e à sua finalidade. Segundo a ICOLD (*International Commission on Large Dams*), as grandes barragens são aquelas que têm mais de 15 m de altura, medidos desde o ponto mais baixo da fundação até ao coroamento, ou com altura entre 5 e 15 m, mas um volume de albufeira superior a 3 hectómetros cúbicos.

No que toca às barragens de betão, existem, 4 tipos estruturais, designadamente:

- Barragens gravidade – o equilíbrio estático da obra, sujeita às forças atuantes, é garantido pelo seu peso próprio; têm um perfil aproximadamente triangular, podendo ser aligeiradas com a introdução de um vazamento junto à base (para diminuir o volume de betão e aliviar as subpressões na fundação); este tipo estrutural é adequado em vales largos com boas fundações;
- Barragens de contrafortes – são constituídas por elementos estruturais triangulares, transversais ao eixo, designados por contrafortes, que dão apoio, do lado de montante, a elementos que garantem a obstrução do vale (lajes, arcos ou espessamentos do próprio contraforte); assim consegue-se reduzir o volume de betão e diminuir as subpressões nas fundações; este tipo de solução é adequada em vales largos de topografia suave com elevações relativamente baixas;

- Barragens abóbada – são implantadas em vales estreitos, com curvatura simples em planta ou dupla curvatura, quando o maciço rochoso de fundação é de boa qualidade; quando o vale é largo pode recorrer-se ao uso de várias abóbadas apoiadas em contrafortes, sendo esta solução designada por abóbadas múltiplas; o funcionamento estrutural é em arco;
- Barragens arco-gravidade – são adequadas em vales de largura intermédia, têm curvatura em planta, sendo um misto de gravidade e abóbada; podem ser aliviadas com vazamentos.

1.2. Reações expansivas do betão em barragens

1.2.1. Aspetos gerais

As expansões de origem interna do betão resultam, essencialmente, de dois tipos de reações químicas entre os constituintes do betão: as reações álcalis-agregado (RAA) e as reações sulfáticas internas (RSI).

As RAA ocorrem entre alguns constituintes reativos dos agregados e os iões hidroxilo (OH^-) e alcalinos (potássio K^+ e sódio Na^+) do ligante, ou de outros constituintes do betão. Estas reações podem ser de dois tipos, consoante o tipo de constituinte reativo dos agregados:

- reações álcalis-carbonato (RAC), que envolvem certos calcários dolomíticos;
- reações álcalis-sílica (RAS) e álcalis-silicato, em que intervêm agregados contendo formas de sílica amorfa ou mal cristalizada e certos minerais siliciosos reativos aos álcalis.

Por outro lado, as RSI estão associadas à formação de etringite secundária ou retardada, geralmente causada pela libertação tardia dos sulfatos inicialmente contidos na matriz cimentícia, devida ao aquecimento excessivo do betão durante a cura.

A RAS e a RSI provocam efeitos estruturais semelhantes. No caso da RAS, a expansão dos geles gera pressões internas na estrutura do betão que causam a degradação da sua estrutura interna.

Sendo a água o reagente necessário à ocorrência destas reações, as estruturas hidráulicas (barragens, centrais, túneis, etc.) são particularmente suscetíveis, mas também podem ocorrer no betão de outras estruturas não protegidas, nomeadamente em pontes, viadutos, muros de suporte e maciços de fundação, desde que a humidade interna do betão seja elevada (por exemplo, devido à presença de água das chuvas).

Em Portugal, as barragens de Pracana e do Alto do Ceira foram, na década de 1980, os primeiros casos onde foram identificadas as reações expansivas internas do betão, predominantemente de RAS. Mais tarde, já no início deste século, foi identificado o primeiro caso onde

predomina a RSI, a barragem de Fagilde. Atualmente existem em Portugal 20 barragens afetadas por esta patologia (Batista, 2021), mas existe também um número significativo de estruturas de betão de pontes e viadutos que estão seriamente afetadas.

1.2.2. Reações álcalis-sílica

As reações álcalis-silicato, também conhecidas como reações álcalis-sílica de expansão lenta e retardada, são mais raras que as reações álcalis-sílica (RAS), tendo apenas como diferença o constituinte reativo do agregado, que na reação álcalis-sílica é a sílica livre e na reação álcalis-silicato é a sílica dos sistemas siliciosos polifásicos (presente, por exemplo, nos granitos) (Silva, 2010). Estas reações conduzem à formação de um gel higroscópico sílico-alcálico, a partir da sílica deformada em soluções muito alcalinas, que expande quando entra em contacto com água (Figura 1.1). Assim que os geles absorvem a água, desenvolvem-se expansões internas que resultam em tensões de tração no interior do betão, que provocam fendilhação (Silva, 2006).

Refere-se que a RAS se desenvolve quando se verificam as seguintes condições:

- i) a solução intersticial do betão apresenta uma alcalinidade elevada;
- ii) os agregados contêm elevadas concentrações de sílica reativa;
- iii) a humidade interna do betão é elevada.



Figura 1.1 - Esquema dos mecanismos químicos das reações álcalis-sílica (adaptado de (Thomas et al., 2013))

A portlandite é a principal responsável pela presença de álcalis no betão, proveniente, em geral, do óxido de sódio (Na_2O) e do óxido de potássio (K_2O). Apesar disto, os álcalis também podem encontrar-se na água de amassadura, nas adições (cinzas volantes, escórias granuladas moídas, pozolanas naturais, etc.) e nos agregados com minerais ricos em álcalis, como os feldspatos e as micas, ou ainda de origens externas, como os sais descongelantes (Silva, 2010).

A sílica (SiO_2) presente nos agregados de betão pode ser tanto mais reativa quanto mais fina e mais desordenada for a sua estrutura cristalina. No caso de rochas ígneas, a sílica é, em

geral, menos reativa que a das rochas sedimentares ou metamórficas. Em geral, a proporção de sílica reativa é um fator que permite quantificar a reatividade dos agregados.

A temperatura condiciona significativamente a velocidade das reações. À temperatura ambiente as reações álcalis-agregado podem demorar alguns anos para se desenvolverem e várias dezenas de anos até alcançarem a expansão máxima, enquanto para temperaturas elevadas as reações manifestam-se mais cedo.

Segundo estudos realizados por Larive (Larive, 1998), relativos à influência da temperatura no desenvolvimento de expansões livres em provetes de betão constituído por agregados grossos e finos de natureza calcária dolomítica, observou-se que para uma temperatura de 38°C as deformações iniciaram-se pouco tempo depois da cura do betão, enquanto nos provetes sujeitos a uma temperatura de 23°C as deformações ocorreram mais lentamente.

Como se pode observar na Figura 1.2, as expansões máximas observadas, para as duas temperaturas, são semelhantes.

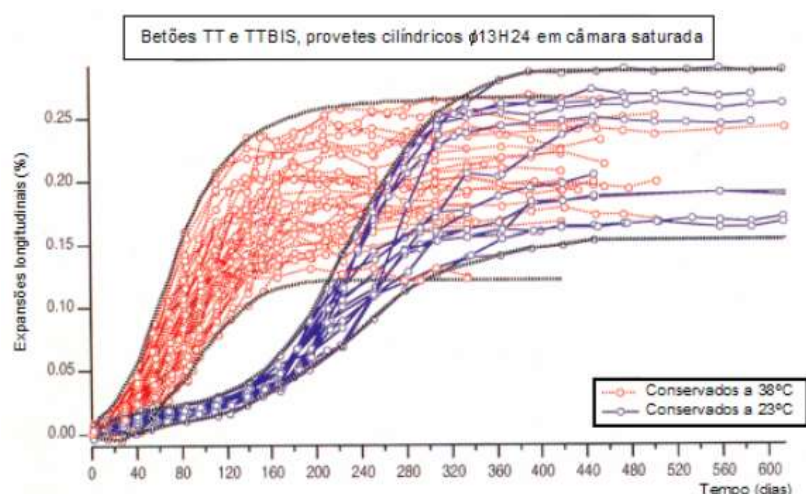


Figura 1.2 – Resultados de ensaios de expansão livre realizados com temperaturas de 23°C e 38°C (adaptado de (Larive, 1998))

Nas estruturas de betão afetadas por RAS verifica-se, através de medições de humidade relativa interna, que a humidade relativa interna é superior a 80% para profundidades superiores a 10 cm, quaisquer que sejam as condições climatéricas exteriores, à exceção de climas desérticos (Silva, 2010).

Em ensaios de expansibilidade, em condições de temperatura padrão, obtiveram-se expansões pequenas para humidades relativas internas de 59%, mas significativas para valores maiores que 76% (Figura 1.3). Quando a humidade relativa interna é maior que 60% a 70%, as expansões crescem com o aumento da humidade. As variações de temperatura, inerentes aos ciclos de molhagem e secagem, também representam um fator potenciador do desenvolvimento da RAS.

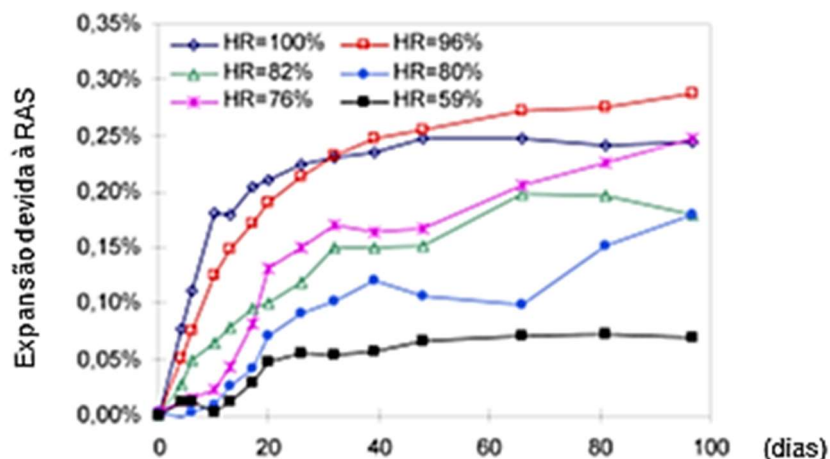


Figura 1.3 - Influência da umidade relativa interna do betão no desenvolvimento das expansões, obtida em ensaios laboratoriais (adaptada de (Poyet, 2003))

Devido às semelhanças entre as reações álcalis-sílica e álcalis-silicato, por norma, utiliza-se o termo RAS para os dois tipos de reações químicas.

1.2.3. Reações sulfáticas internas

A RSI ocorre entre os compostos do cimento que contêm alumina e os sulfatos de outros constituintes do betão ou de outros compostos que, por alteração, possam originar sulfatos ou aluminatos, com formação de etringite secundária ou retardada, assim designada em contraponto à etringite primária, formada nas primeiras etapas da hidratação do cimento, que, sendo também expansiva, não provoca danos no betão, por este ter, nesta fase, capacidade para acomodar essas expansões.

A formação de etringite secundária está geralmente associada, à ocorrência de temperaturas elevadas durante a cura do betão, algo que se verifica, por exemplo, em estruturas maciças de grande dimensão, como acontece nas barragens de betão ou no caso de peças de betão pré-fabricadas, em que é necessário efetuar tratamentos térmicos para aceleração da cura e do endurecimento, sobrepondo-se ao calor de hidratação do cimento.

As principais causas responsáveis pela RSI são:

- i) a elevada temperatura inicial durante a presa do betão;
- ii) o elevado teor em álcalis do cimento, pois os iões alcalinos Na^+ e K^+ aumentam a solubilidade da etringite, que através da acumulação de sulfatos livres em solução, permite a recristalização de etringite potencialmente expansiva; e
- iii) os elevados teores de C_3A (maior que 8%) e de SO_3 (maior que 2,6%) (Silva, 2010).

O papel da humidade é fundamental no desenvolvimento da RSI, quer pela intervenção no processo de transferência como na formação dos produtos de reação. Concluiu-se, através de ensaios realizados por Martin (Martin, 2010), que para este tipo de reação ocorrer é necessário que a humidade relativa interna seja elevada (entre 95% a 98%).

1.2.4. Reações álcalis-carbonato

A reação álcalis-carbonato (RAC) dá-se quando os iões hidroxilos e alcalinos da pasta de cimento reagem com certos calcários dolomíticos argilosos, originando um processo denominado por desdolomitização, que consiste na substituição do magnésio presente por cálcio, através de um processo geoquímico de decomposição (Silva, 2010).

Este processo, apesar de ser expansivo, não se encontra relacionado com a formação de geles, mas sim com a decomposição do carbonato pela absorção da água dos minerais argilosos que ficam expostos (Silva, 2010). Refere-se, contudo, que este tipo de reação ocorre com menor frequência, tendo pouca expressão em Portugal.

1.2.5. Efeitos estruturais

As reações expansivas provocam efeitos estruturais que podem ser identificados através da inspeção visual das superfícies e pela análise dos resultados obtidos pelos sistemas de observação instalados.

À escala macroscópica, as principais evidências dos efeitos das expansões nas barragens são as seguintes:

- i) a fendilhação superficial do tipo *craquelê* nos paramentos, por vezes acompanhada por delaminação do betão e formação de pequenas crateras (Figura 1.4);
- ii) a fendilhação orientada, normalmente junto da inserção, a jusante;
- iii) o fecho generalizado das juntas de contração e deslizamentos entre blocos (em particular os desalinhamentos no coroamento), às vezes acompanhado por esmagamento e delaminação de bordos (Figura 1.5)
- iv) o desalinhamento de peças e respetivas fixações, e o fecho e ovalização das seções de condutas e orifícios, o que pode conduzir, por exemplo, ao encravamento de comportas (Figura 1.6);
- v) a coloração amarela das superfícies de betão afetadas por RAS (Figura 1.7);
- vi) a eflorescência do gel nas superfícies aparentes, em geral em cavidades (Figura 1.8), fendas e juntas;
- vii) a passagem de água pelas fendas (Figura 1.9) e a rotura de armaduras (estas ocorrências verificam-se em estados mais avançados das reações expansivas).



Figura 1.4 - Fendilhação difusa, do tipo *craquelê*, no piso do coroamento da barragem do Covão do Meio (à esquerda) e fendilhação linear no piso do coroamento da barragem de Santa Luzia (à direita)



Figura 1.5 - Deslocamentos irreversíveis em juntas de contração no coroamento: na barragem de Miranda, na guarda de montante, com esmagamento de bordos, em 2018 (à esquerda), e na barragem da Fontana (EUA), também na guarda de montante, em 2013 (à direita)



Figura 1.6 - Comportas com guias laterais ajustadas e zonas de amarração reforçadas com pré-esforço, na barragem de Hiwassee (à esquerda) e encurvadura de guardas em vão da barragem de Hunderfossen, na Noruega (à direita) (Batista, 2021)



Figura 1.7 – Aspeto amarelado do betão da barragem do Alto Ceira (bloco que está no campus do LNEC, fotografado em 2020) (à esquerda) e hasteal de uma galeria com betão deteriorado superficialmente na barragem de Bem-posta, em 2013 (à direita)

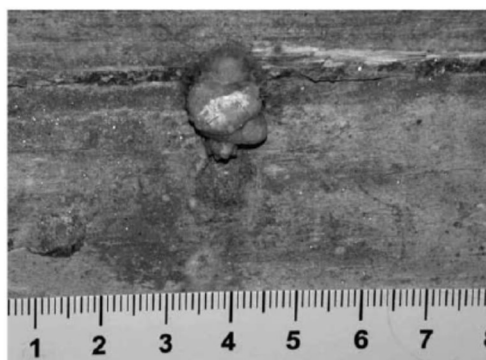
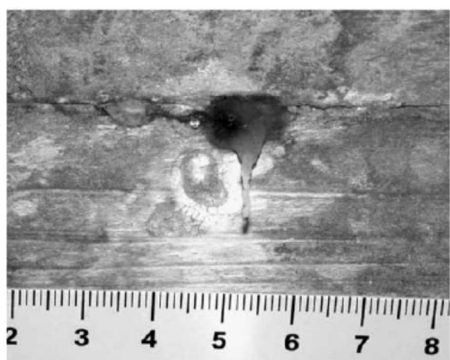


Figura 1.8 – Eflorescências/exsudações de gel da reação álcalis-sílica em galerias da barragem do Cabril (escala em centímetros) (adaptado de (Batista, 2021))



Figura 1.9 – Vista de bicas no paramento de jusante para coletar repasses pelas fendas do betão na barragem do Alto Ceira, em 2012 (à esquerda), e na barragem de Peti (Brasil), em 2011 (à direita)

O aumento de volume da estrutura devido às expansões reflete-se na progressividade das seguintes grandezas, cuja evolução, no caso das grandes barragens, é monitorizada através dos sistemas de observação:

- i) nos deslocamentos relativos entre blocos, designadamente no fecho das juntas de contração e nos deslocamentos diferenciais verticais para cima dos blocos mais al-

tos relativamente aos blocos mais baixos e nos deslocamentos diferenciais horizontais para montante dos blocos do fundo do vale (mais altos) relativamente aos blocos das encostas;

- ii) nos deslocamentos absolutos, verticais para cima e radiais para montante (exceto nas barragens de contrafortes);
- iii) nas extensões e tensões do betão.

1.3. Motivação e objetivos da dissertação

Existem atualmente um número elevado de barragens afetadas por reações químicas expansivas de origem interna. Este fenómeno, que se verifica a nível nacional e internacional, contribui para a degradação do betão e para diminuição das condições de segurança estrutural e hidráulica.

Algumas destas obras estão sujeitas a grandes variações sazonais de temperatura, humidade interna e tensões em zonas significativas do seu corpo, o que pode potenciar o processo de desenvolvimento das expansões.

A presente dissertação visa melhorar, recorrendo à modelação numérica, o conhecimento acerca do impacto de alguns destes fatores no desenvolvimento do processo expansivo em barragens abóbada, tendo sido usado como caso de estudo a barragem do Covão do Meio, localizada a elevada altitude na serra da Estrela, cuja albufeira está cheia no inverno e vazia no verão. O betão da barragem está sujeito a um processo expansivo de moderada intensidade, do tipo álcalis-sílica.

O trabalho foi dividido em duas fases com objetivos específicos diferentes.

A primeira fase tem como objetivo desenvolver modelos numéricos, nas vertentes térmica e estrutural, e verificar a sua validade para simular e interpretar o comportamento observado da obra, através da comparação dos resultados da observação com os calculados com os modelos.

Na segunda fase pretende-se usar os modelos desenvolvidos para:

- Simular o comportamento da obra considerando que a albufeira se mantém a um nível elevado durante toda a sua vida. A comparação deste cenário com a situação real, permite avaliar a influência da descompressão da estrutura e do aumento da temperatura do betão, associados aos abaixamentos da albufeira, no desenvolvimento das expansões e dos seus efeitos estruturais.
- Prever, com base em cenários de evolução futura das expansões, o comportamento da obra para um horizonte temporal de 20 anos.

1.4. Organização da dissertação

A dissertação está organizada em 7 capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução sobre as barragens, os tipos de barragens de betão, as reações expansivas do betão nestas obras, a motivação, os objetivos da dissertação e a sua organização.

De seguida, no segundo capítulo, referem-se os modelos e métodos de análise de barragens de betão sujeitas a expansões que foram usados neste trabalho, salientando-se os aspetos relacionados com a modelação térmica, estrutural e da ação expansiva.

No terceiro capítulo apresentam-se as características da barragem do Covão do Meio e do seu sistema de observação, bem como uma síntese dos principais estudos relacionados com o comportamento estrutural da obra e com o desenvolvimento do processo expansivo no betão.

No quarto capítulo é apresentada a análise e a interpretação do comportamento observado da barragem, que se apoiou nos resultados da observação estrutural e em modelação numérica.

No quinto capítulo avalia-se a influência das variações sazonais de temperatura e de tensões no betão, associadas à descida do nível da albufeira durante o verão, no desenvolvimento das expansões.

No sexto capítulo realiza-se, com base em dois cenários de evolução das expansões, a previsão do comportamento da barragem para um horizonte temporal de 20 anos.

Por fim, no sétimo capítulo apresentam-se as considerações finais do trabalho realizado, incluindo os principais contributos e perspetivas para desenvolvimentos futuros.

MODELOS E MÉTODOS DE ANÁLISE DE BARRAGENS DE BETÃO SUJEITAS A EXPANSÕES

2.1. Aspetos gerais

Neste capítulo apresentam-se os fundamentos teóricos dos modelos utilizados no LNEC para a análise do comportamento estrutural e térmico de barragens de betão ao longo do tempo e na modelação das expansões de origem interna do betão.

A análise térmica é realizada em regime transiente, pelo que são calculadas as temperaturas no betão ao longo do tempo, considerando a evolução das temperaturas nas fronteiras e a radiação solar.

A modelação estrutural considera as características viscoelásticas do betão e a evolução das principais ações, que correspondem ao peso próprio do betão, à pressão hidrostática, às variações de temperatura e às expansões.

A modelação da ação expansiva é realizada considerando que o seu desenvolvimento ao longo do tempo pode ser simulado através de curvas do tipo sigmoide, com forma semelhante às observadas em ensaios, considerando a influência da temperatura e do estado de tensão no betão.

Os modelos são resolvidos nas vertentes térmica e estrutural através do método dos elementos finitos, considerando as equações diferenciais necessárias à análise do comportamento estrutural e térmico de meios contínuos. Na vertente estrutural são consideradas as equações de equilíbrio, de compatibilidade e as relações constitutivas, sendo possível calcular deslocamentos em cada ponto nodal da malha de elementos finitos e as tensões e as extensões nos pontos de *Gauss*. Na vertente térmica é resolvida a equação de condução de calor, sendo obtidas as temperaturas nos nós da malha.

2.2. Modelação térmica

A distribuição de temperaturas no corpo de uma barragem é calculada com um programa de cálculo automático, baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido no LNEC (LNEC, 2012), que resolve o problema de condução de calor em regime transiente, formulado através da lei de *Fourier*,

$$k \frac{\partial^2 T(x_i, t)}{\partial x_i^2} + Q(x_i, t) - \rho c \frac{\partial T(x_i, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

onde Q representa a quantidade de calor gerada ou cedida por unidade de tempo e por unidade de volume, k é a condutividade térmica, c é o calor específico, T representa a temperatura, t o tempo e ρ a massa específica.

Neste estudo não foram considerados os efeitos da geração e libertação do calor de hidratação do betão, pelo que foi considerada a equação de *Fourier* na seguinte forma:

$$\frac{\partial T(x_i, t)}{\partial t} - h^2 \frac{\partial^2 T(x_i, t)}{\partial x_i^2} = 0 \quad (2.2)$$

em que,

$$h^2 = \frac{k}{\rho c} \quad (2.3)$$

é a difusibilidade térmica do betão, a única propriedade que rege o fenómeno difusivo. Nas superfícies exteriores do modelo, em contacto com o ar e com a água, foram consideradas transferências de calor por convecção (condições de *Neumann*), de acordo com a seguinte lei de Newton:

$$q = h_c (T_w - T_a) \quad (2.4)$$

onde q representa o fluxo de calor normal à superfície, T_w é a temperatura da superfície, T_a a temperatura do fluido em contacto com a superfície e h_c o coeficiente de convecção.

Nas superfícies em contacto com o ar foi ainda considerado o efeito da radiação solar através de um fluxo de calor prescrito, que depende do coeficiente de absorção do betão a (assume valores entre 0,5 e 0,65) e da irradiância incidente I_α .

$$q = a I_\alpha \quad (2.5)$$

A irradiância corresponde ao fluxo de energia radiante incidente numa superfície por unidade de área, depende da época do ano, da hora do dia e da orientação da superfície exposta, e pode ser determinada através da equação,

$$I_\alpha = \frac{I_h}{\cos Z} \cos \alpha \quad (2.6)$$

em que I_h é a irradiância incidente sobre uma superfície horizontal, Z o ângulo formado pela linha vertical do local (zénite) e a linha que liga ao sol e α é o ângulo formado pela radiação incidente e a normal à superfície.

No programa de cálculo utilizado (LNEC, 2012) o valor de I_h é calculado utilizando a função (2.7) ajustada às medições de radiação efetuadas na estação actinométrica do Porto,

$$I_h = q_0 \cos Z e^{(A+B \cos Z)} \quad (2.7)$$

sendo $A=-1,1259$ e $B=0,957455$ constantes resultantes do referido ajuste, e $q_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ corresponde à irradiância solar incidente a uma superfície perpendicular ao eixo Terra-Sol, situada no topo da atmosfera.

Os ângulos Z e α dependem da posição geográfica, do dia do ano e da hora do dia e podem ser calculados com expressões que podem ser consultadas em (LNEC, 2012).

2.3. Modelação estrutural

A modelação estrutural realizou-se com recurso a um programa de cálculo automático, baseado no método de elementos finitos, que está a ser desenvolvido no LNEC a partir de outros anteriores (Batista, 1998; Oliveira, 2000, Dias, 2012), em que são consideradas as equações de equilíbrio e de compatibilidade e as relações constitutivas. A formulação de elementos finitos pode ser consultada, por exemplo, em (Batista, 1998).

As ações foram consideradas de forma incremental, sendo as ações da água das variações de temperatura e das expansões discretizadas ao longo do tempo.

O comportamento do betão foi representado por um modelo viscoelástico linear com maturação, que tem em conta a variação da sua deformabilidade ao longo do tempo, bem como as deformações de fluência associadas às cargas aplicadas e a relaxação das tensões devidas a deformações impostas, como é o caso das ações térmica e expansiva.

Considerou-se uma função de fluência de Bažant e Panula (Bažant & Panula, 1978), que corresponde à deformação no instante t devida a uma carga unitária constante aplicada no instante t_0 , sendo definida por,

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_0} (1 + \varphi_1(t_0^{-m} + \alpha)(t - t_0)^n) \quad (2.8)$$

onde, n, φ_1, m, α e E_0 são parâmetros que variam consoante as características do betão e dos seus constituintes.

Por motivos computacionais, a função de fluência, $J(t, t_0)$, é aproximada por uma série de exponenciais reais (série de Dirichlet), que representa a deformação de um corpo de Hooke e de uma cadeia de corpos Kelvin dispostos em série.

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i(t_0)} \left(1 - e^{-\frac{(t-t_0)E_i(t_0)}{\eta_i}} \right) \quad (2.9)$$

A aproximação da função de fluência através de séries de *Dirichlet* possibilita realizar a análise estrutural no tempo, sem necessidade de memorização de toda a história de carga, sendo o sistema de equações lineares do método dos elementos finitos resolvido em todos os

intervalos de tempo, atualizando as solicitações exteriores, a matriz de rigidez global e os vetores que armazenam a história de carga (Batista, 1998).

2.4. Modelação da ação expansiva

A modelação das ações expansivas é uma tarefa complexa, pois resulta da integração de fenómenos físicos e químicos, que sucedem ao nível microscópico, em variáveis macroscópicas essenciais para os modelos matemáticos de análise do comportamento estrutural e de avaliação das condições de segurança das obras (Piteira Gomes, 2007).

O desenvolvimento das reações álcali-sílica dependem fundamentalmente dos seguintes fatores: i) da química do processo associada à composição do betão; ii) da temperatura; iii) da humidade relativa; iv) do campo de tensões; e v) do tempo.

Tendo em conta a expansão a longo prazo $\varepsilon_{exp,\infty}$ e que os efeitos da temperatura g_T , da humidade interna do betão g_H e das tensões de confinamento g_σ podem ser considerados de forma desacoplada, a evolução das expansões ao longo do tempo pode ser representada pela seguinte expressão,

$$\varepsilon_{exp}(H, T, \sigma, t) = \varepsilon_{exp,\infty} \xi_{exp}(t) g_H(H) g_T(T) g_\sigma(\sigma) \quad (2.10)$$

em que ξ_{exp} é uma função que representa o desenvolvimento da cinética da reação expansiva, variando desde 0, para o instante inicial (t_0) quando a reação ainda não se iniciou ($\xi_{exp}(t_0) = 0$), e 1, a longo prazo, quando a reação se esgota ($\xi_{exp}(t_\infty) = 1$). Neste trabalho a função ξ_{exp} tem a forma exponencial do tipo sigmoide, com forma semelhante às curvas obtidas em ensaios,

$$\xi_{exp}(t) = 1 - e^{-\frac{t^n}{\beta}} \quad (2.11)$$

em que,

$$\beta = \frac{n}{n-1} (t_{hs})^n \quad (2.12)$$

sendo t o tempo (em dias), t_{hs} a idade (em dias) correspondente ao ponto de inflexão da curva e n um número real.

Na equação (2.10) o produto $\varepsilon_{exp,\infty} \xi_{exp}$ representa a expansão livre¹ (independentes do estado de tensão) em determinadas condições de referência de humidade e temperatura,

$$\varepsilon_{exp,livre,ref}(t) = \varepsilon_{exp,\infty} \xi_{exp}(t) \quad (2.13)$$

sendo a expansão livre $\varepsilon_{exp,livre}$, que depende da humidade e temperatura, dada por,

¹ O conceito de expansões livres refere-se às expansões que ocorrem sem restrição física, como é o caso das expansões medidas em provetes laboratoriais e nos extensómetros corretores instalados nas obras.

$$\varepsilon_{exp,livre}(H,T,t) = \varepsilon_{exp,\infty} \xi_{exp}(t) g_H(H) g_T(T) \quad (2.14)$$

De acordo com a discussão apresentada em (Batista, 2021) sobre os mecanismos de transporte no betão em barragens, sendo a barragem do Covão do Meio uma abóbada relativamente delgada, considera-se que existirá sempre disponibilidade de água no volume do betão para alimentar as reações expansivas, exceto nas faixas muito superficiais junto aos paramentos, durante as épocas secas. Por esta razão, considerou-se unitária a função associada à humidade interna do betão ($g_H \approx 1$).

Esta simplificação tem a vantagem de dispensar a elaboração de um modelo higrométrico para determinação da humidade interna do betão, para o qual não se dispõe de qualquer tipo de elementos de observação para o validar.

O efeito térmico foi tido em conta recorrendo à expressão (2.15),

$$g_T(T) = e^{6000\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \quad (2.15)$$

em que T_{ref} representa a temperatura de referência e T a temperatura do ponto em análise, em Kelvin.

Na Figura 2.1 representa-se graficamente a função $g_T(T)$ para a temperatura de referência de 20°C, observando-se um efeito de aceleração quando a temperatura é maior que a temperatura de referência ($g_T(T) > 1$) e de desaceleração, no caso contrário ($g_T(T) < 1$).

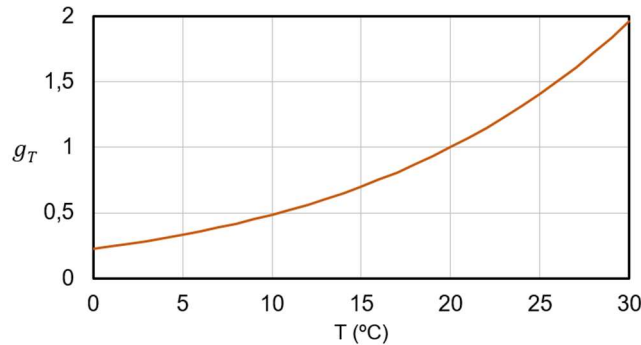


Figura 2.1 - Influência da temperatura no desenvolvimento das expansões, para $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ ²

A expressão (2.10) pode ser reescrita tendo em conta as expansões livres (2.14) e os efeitos das tensões de confinamento, em que $0 < g_\sigma \leq 1$,

$$\varepsilon_{exp}(H,T,\sigma,t) = \varepsilon_{exp,livre}(H,T,t) g_\sigma(\sigma) \quad (2.16)$$

As expansões que efetivamente ocorrem em obra, designadas por expansões estruturais, resultam de restrições ao desenvolvimento das expansões livres devido ao efeito de confinamento proporcionado pelas tensões de compressão instaladas, de acordo com a equação (2.16). No programa de cálculo utilizado o fator g_σ é determinado através de uma curva exponencial, ajustada no LNEC (Figura 2.2) aos resultados experimentais obtidos por Larive

² Neste trabalho foi considerada a temperatura de referência de 20°C, por ser este o valor usado em ensaios.

(Larive, 1998) e Clayton (Clayton et al., 1990). O fator g_σ foi considerado de forma independente nas três direções principais de tensão.

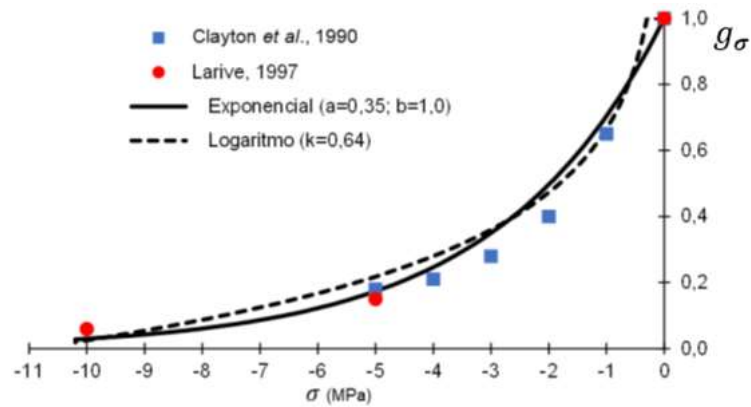


Figura 2.2 - Influência do campo de tensões no processo expansivo (adaptado de (Batista, 2021))

A modelação da ação expansiva foi realizada com o mesmo programa usado na modelação estrutural, sendo o fator g_σ avaliado no instante de cálculo n , a partir das tensões calculadas no instante $n-1$.

CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO

3.1. Características da barragem

A barragem do Covão do Meio localiza-se na serra da Estrela, a uma altitude de 1650 m, na ribeira de Loriga, na bacia do rio Mondego. Trata-se de uma abóbada esbelta com 28 m de altura máxima acima da fundação, erguida sobre um maciço granítico, com espessura que varia entre 1,8 m no coroamento e 6,8 m na base da consola central.

Na encosta da margem esquerda a barragem é dotada de um descarregador de cheias, constituído por um perfil gravidade com cerca de 170 m de desenvolvimento e uma altura máxima acima da fundação de 13 m (Figura 3.1), que possibilita a descarga de um caudal máximo de 40 m³/s. A crista da soleira situa-se à cota 1653,70 m. O descarregador é desprovido de comportas e de sistema de dissipação de energia.

O nível de pleno armazenamento (NPA) da albufeira situa-se à cota 1653,7 m, a que corresponde uma capacidade de armazenamento de cerca de 1,4 hm³, para uma área inundada de 0,9 km². O nível de máxima cheia (NMC) está à cota 1653,9 m. A bacia hidrográfica da albufeira tem uma área de apenas 4,8 km².

A obra, projetada pelo Eng.º Laginha Serafim, foi construída entre 1949 e 1953. As betonagens realizaram-se em duas fases: a primeira, entre agosto e outubro de 1950, até cerca de metade da altura da abóbada, e a segunda, em 1953, após dois anos de interrupção, até à conclusão da obra. No betão utilizado na construção da barragem foram usados agregados graníticos e dosagens de cimento com valores variáveis entre 250 kg/m³ e 300 kg/m³ (LNEC, 2006).

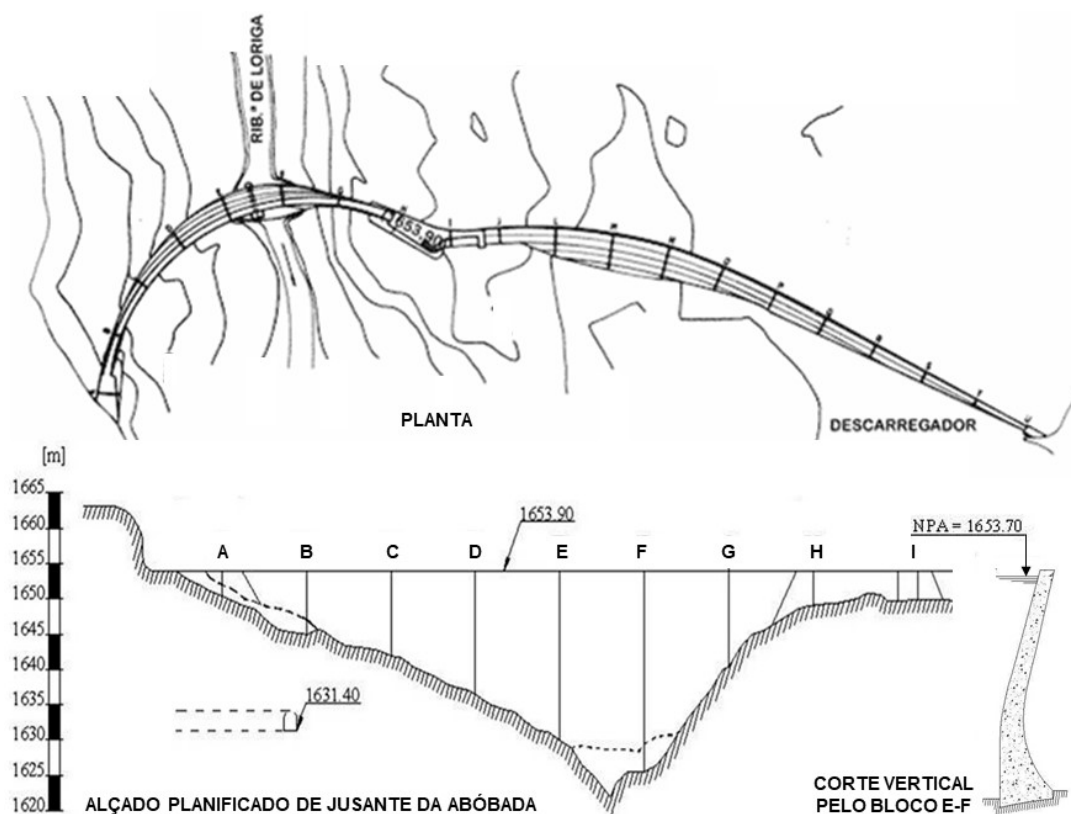


Figura 3.1 - Barragem do Covão do Meio. Planta, alçado planificado de jusante da abóbada e corte pelo bloco mais alto da abóbada (adaptado de (LNEC, 2006))

A barragem não dispõe de sistema próprio de produção de energia elétrica, sendo a água armazenada na albufeira derivada, através de um túnel, para a albufeira da barragem da Lagoa Comprida. O túnel em pressão, aproximadamente à cota 1630 m, tem 2350 m de comprimento e 60 cm de diâmetro. A água armazenada na albufeira é usada, nos meses de inverno, para a produção de energia hidroelétrica. No início do verão a água é usada na rega dos campos de Loriga, ficando a albufeira vazia, normalmente, durante o período compreendido entre junho e novembro (LNEC, 2019).

A barragem e a sua albufeira localizam-se num vale escavado pelo glaciador de Loriga, sendo o maciço rochoso constituído por granito porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico. Junto ao descarregador de cheias, para além do granito, é possível identificar enclaves de xisto alongados segundo a direção N 50° E. Existem 14 falhas na zona da superestrutura, tendo sido descartada a possibilidade de comprometerem o funcionamento da barragem (EDP, 1988).

3.2. Sistema de observação

A observação da barragem foi feita até 1960 através de campanhas de observação geodésica e de inspeções regulares. Devido ao bom comportamento da barragem e às menores exigências regulamentares da época, a observação da barragem foi interrompida até 1981. Em outubro de 1983, com a albufeira vazia, foi realizado o levantamento das fendas dos paramentos da barragem, que apresentavam maior evolução em juntas de betonagem (não coincidentes com a junta fria entre fases de construção), muitas delas com a presença de carbonato de cálcio do lado de jusante (LNEC, 1986). A partir de 1984, retomou-se a realização das campanhas de observação geodésica regulares.

O sistema de observação foi reformulado em 1996, passando-se a monitorizar as seguintes grandezas: nível de água na albufeira, temperaturas do ar e da água, temperaturas do betão, deslocamentos absolutos (usando métodos geodésicos, fios de prumo e extensómetros de varas) e relativos (medidores de movimentos de juntas e bases de alongâmetro) e subpressões e caudais drenados na fundação (Figuras 3.2 a 3.4).

Devido às dificuldades no acesso à obra durante o inverno, optou-se, em 2000, por instalar um sistema de recolha automática de dados (RAD), facilitando a medição do nível de água da albufeira, temperaturas do ar e da água, temperaturas do betão e deslocamentos absolutos (duas bases dos fios de prumo e um extensómetro de varas) e relativos (três medidores de movimentos de juntas na junta F).

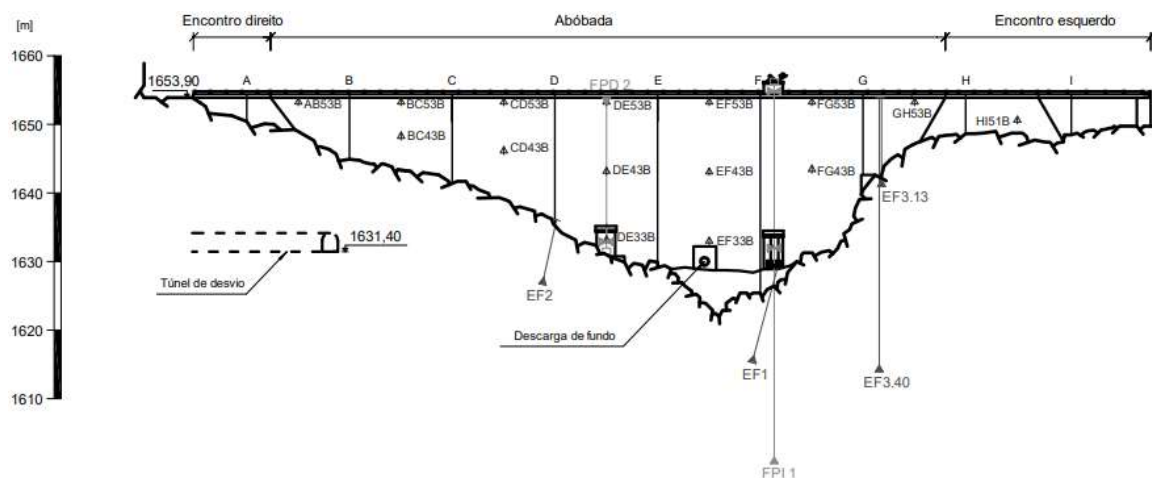


Figura 3.2 - Alçado de jusante com a localização dos fios de prumo, extensómetros de varas e pontos objeto da rede de triangulação (adaptado de (LNEC, 2006))

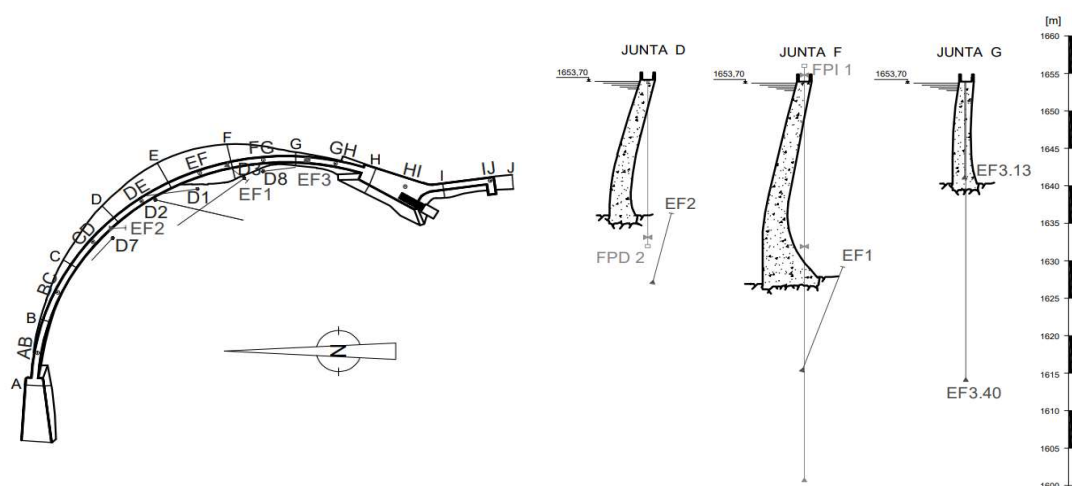


Figura 3.3 - Planta com a localização dos drenos, extensómetros de varas e marcas de nivelamento (à esquerda) e cortes transversais das juntas D, F e G com a localização dos fios de prumo e extensómetros de varas (à direita) (adaptado de (LNEC, 2006))

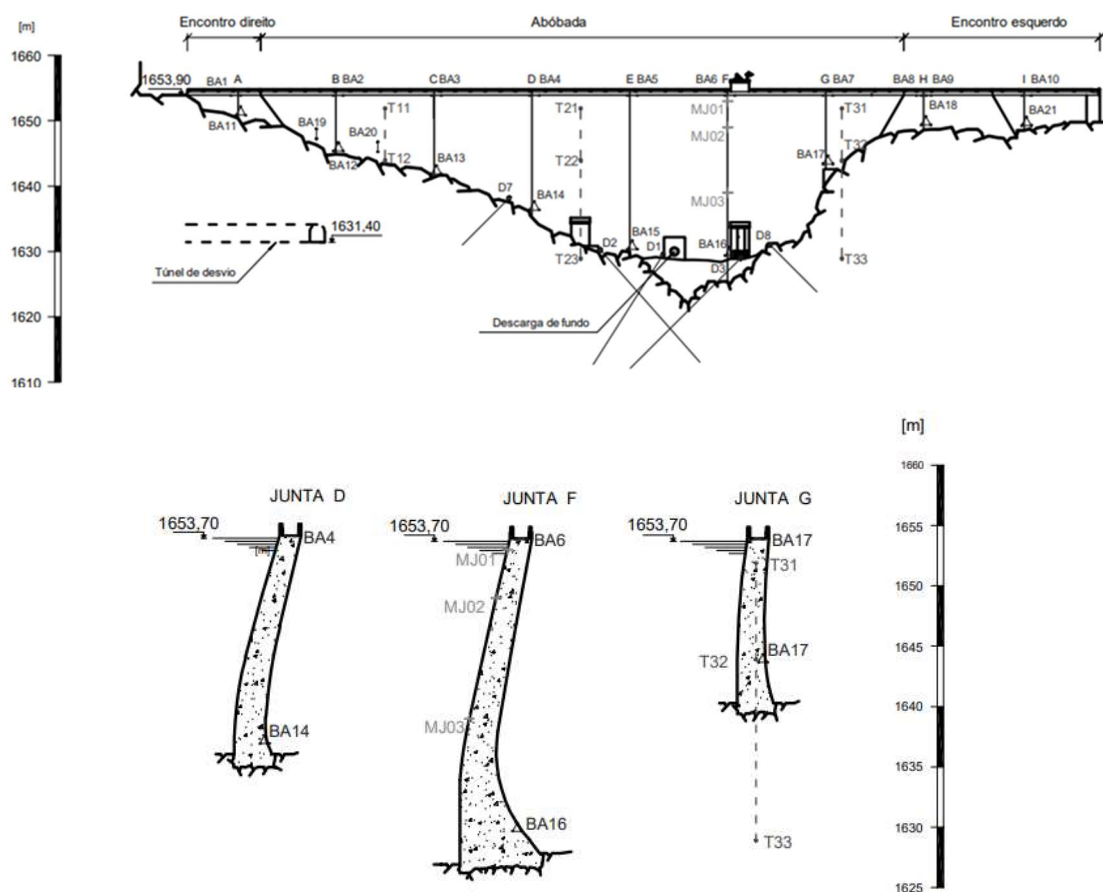


Figura 3.4 - Alçado de jusante e cortes transversais das juntas D, F e G com a localização das bases de alongâmetro, medidores de movimentos de juntas e termómetros de resistência elétrica (adaptado de (LNEC, 2006))

3.3. Evidências do processo expansivo e estudos anteriores sobre a obra

Na década de 1990 surgiram as primeiras evidências da existência de reações expansivas no betão da barragem, tendo sido observada progressividade nos deslocamentos do coroamento, verticais para cima e radiais para montante, e nos deslocamentos relativos em juntas de contração. A fendilhação aparente apresenta uma evolução significativa desde 1983, sendo mais evidente no coroamento, do tipo *craquelê*, e nas zonas dos rins, linear em juntas de betonagem ou paralela à superfície de inserção na fundação.

Entre 1984 e 2018, o coroamento do bloco mais alto da barragem (bloco EF) sofreu deslocamentos verticais ascendentes, irreversíveis, de cerca de 18 mm, a que correspondem uma extensão vertical acumulada média de cerca de 640×10^{-6} nos últimos 34 anos e uma taxa de aumento de cerca de 32×10^{-6} /ano nos últimos 5 anos (Batista, 2021).

Em 2005 foi realizado no LNEC um estudo de análise e interpretação do comportamento observado da obra, com recurso a um modelo de elementos finitos da abóbada e fundação, analisado em regime elástico linear, considerando as principais ações, designadamente o peso próprio do betão, a pressão hidrostática no paramento de montante, as variações de temperatura e uma estimativa das expansões. Os resultados obtidos permitiram concluir que: i) os deslocamentos progressivos, radiais para montante e verticais para cima, bem como os movimentos relativos de juntas de contração, também progressivos, eram compatíveis com o desenvolvimento de um processo expansivo de origem interna do betão, então de magnitude moderada; e ii) as fendas existentes nos rins da abóbada eram devidas ao processo expansivo, pelo que deveria ser acompanhada a sua evolução.

Tendo em conta as evidências da existência de reações expansivas no betão da barragem, o dono de obra e o LNEC concordaram em realizar um estudo de caracterização das reações expansivas e o seu nível de desenvolvimento, assim como das propriedades mecânicas do betão da obra. Assim, em setembro de 2011 foram extraídas amostras de betão de 8 locais do corpo da barragem (Figura 3.5), para a realização de ensaios laboratoriais (químicos, mineralógicos, microestruturais, mecânicos e de expansibilidade residual). Recolheram-se ainda alguns blocos de pedra granítica de um local a montante, na margem direita, julgando-se serem semelhantes aos usados no betão da barragem, para análise química. Os ensaios tiveram início em 2012 e decorreram durante cerca de 3 anos (LNEC, 2013a, 2013b, 2015).

Os resultados dos ensaios químicos de determinação do teor de sílica solúvel revelaram que, em meio alcalino, existe uma libertação lenta e progressiva da sílica a longo prazo. A partir dos resultados da análise petrográfica verificou-se que os agregados possuíam minerais potencialmente fornecedores de álcalis e formas de sílica consideradas reativas aos álcalis. Nos ensaios de expansibilidade residual, devida à RSI, observaram-se valores negativos de extensões, descartando-se assim um potencial de reatividade aos sulfatos internos.

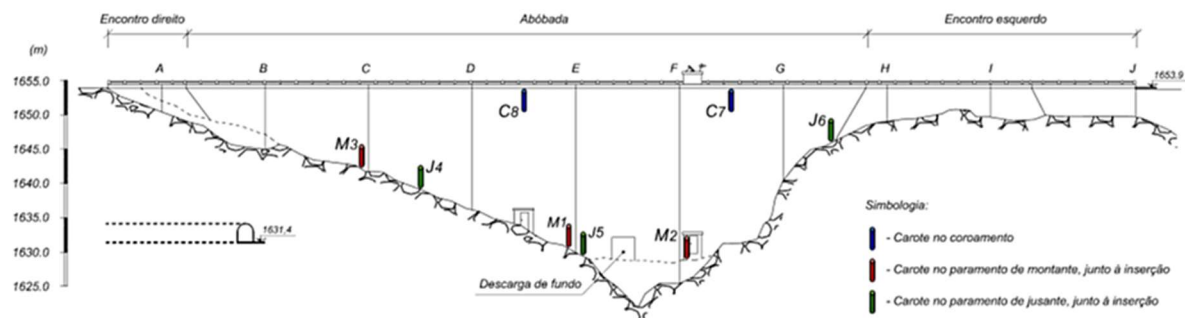


Figura 3.5 - Alçado planificado de jusante da barragem do Covão do Meio com a identificação e localização dos carotes extraídos para realização dos ensaios laboratoriais (LNEC, 2013a, 2013b, 2015)

Em relação à RAS confirmou-se que, na generalidade, a reatividade residual era moderada, existindo ainda algum potencial expansivo. Foi obtida uma taxa anual média de expansão residual de 76×10^{-6} /ano no ensaio acelerado (Batista, 2021).

Relativamente aos resultados dos ensaios mecânicos, mais concretamente aos ensaios de determinação da resistência à compressão, foram obtidas, para provetes “sãos”, resistências médias de 31,7 MPa, do lado de montante, 40,6 MPa, no coroamento, e 47,0 MPa, do lado de jusante. Para os provetes sujeitos a ensaios de reatividade residual, obtiveram-se resistências médias de 43,6 MPa, do lado de montante, 45,2 MPa, no coroamento, e 50,7 MPa, do lado de jusante. Os valores de resistências obtidos variam consoante o local de amostragem, fenómeno que pode ser relacionado com as diferentes dosagens de cimento que foram utilizadas na obra (LNEC, 2015).

Nos ensaios mecânicos de perda de rigidez, o módulo de elasticidade apresentou um valor médio de 25,0 GPa, para provetes “sãos”, e um valor médio de 24,7 GPa, para os provetes que foram submetidos previamente a ensaios de reatividade residual.

Os provetes “sãos” apresentam valores do módulo de elasticidade genericamente baixos e com elevada dispersão, mas não sofreram depreciação com os ensaios de expansão acelerada.

A partir dos resultados destes ensaios laboratoriais concluiu-se que o betão da barragem estava afetado pela RAS, existindo um potencial remanescente para a reação evoluir no tempo, sendo esta tendência confirmada pelos resultados da observação contínua da obra (Batista, 2021).

INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO

4.1. Aspetos gerais

Neste capítulo apresenta-se a interpretação do comportamento observado da barragem do Covão do Meio, que foi efetuada com apoio de modelos numéricos baseados no método de elementos finitos, que permitem analisar os comportamentos estrutural e térmico da barragem e considerar os efeitos da ação expansiva. Os fundamentos teóricos em que se apoiou a análise foram apresentados no Capítulo 2.

Na análise térmica calculou-se a distribuição de temperaturas no corpo da barragem ao longo do tempo, tendo sido consideradas as temperaturas do ar e a radiação solar, nas zonas emersas dos paramentos, e da água, nas zonas imersas. Adotou-se uma discretização horária no domínio do tempo, de modo a ter também em conta a variação ao longo do dia do fluxo de calor proveniente da radiação solar.

Na modelação da ação expansiva foram tidos em consideração os campos de temperatura obtidos na análise térmica, assim como o efeito de confinamento proporcionado pelas tensões de compressão. Considerou-se ainda que a humidade interna existente no betão seria suficiente para a reação expansiva ocorrer sem limitações.

No modelo estrutural a barragem e o maciço de fundação foram considerados como meios contínuos (as juntas de contração da barragem estão genericamente fechadas devido aos efeitos das expansões), homogéneos e isotrópicos. Para o betão foi usado um modelo constitutivo viscoelástico com maturação, para ter em conta os efeitos diferidos (fluência e relaxação), enquanto para o maciço de fundação foi considerado um modelo elástico linear. Relativamente às ações, consideraram-se os efeitos do peso próprio, da pressão hidrostática, das variações de temperatura no corpo da barragem (determinadas com o modelo térmico) e das expansões, tendo sido adotada uma discretização semanal no domínio do tempo.

Salienta-se que os resultados obtidos com os modelos térmico e estrutural foram comparados com os valores observados, o que permitiu validar os modelos numéricos, calibrar a ação expansiva e interpretar o comportamento da obra e os efeitos estruturais das expansões.

4.2. Malha de elementos finitos

Nas análises efetuadas, térmica e estrutural, utilizou-se a mesma malha de elementos finitos, elaborada no âmbito de um estudo anterior do LNEC sobre o comportamento e as condições de segurança da obra (LNEC, 2006). A malha é formada por elementos finitos do tipo cubo, isoparamétricos, com funções de forma do segundo grau e 20 pontos nodais nos vértices e a meio das arestas, totalizando 1848 elementos, dos quais 736 correspondem ao corpo da barragem e 1112 à fundação (Figura 4.1). Refere-se, ainda, que a integração numérica se realizou através da utilização de 27 pontos de integração de *Gauss*.

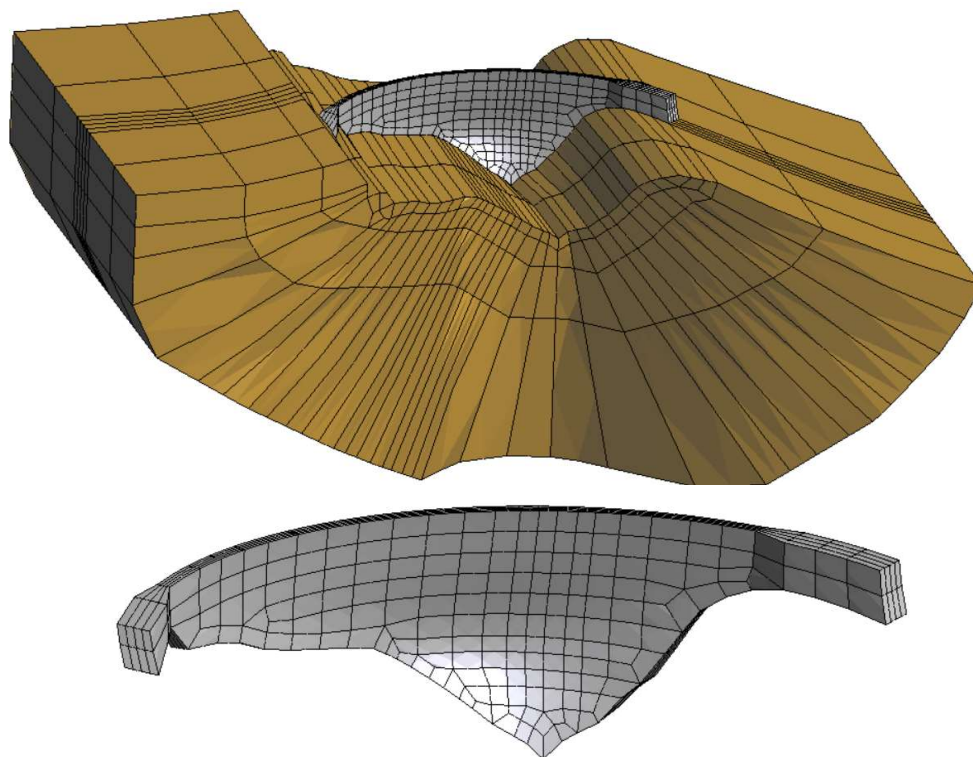


Figura 4.1 – Vistas da malha de elementos finitos do conjunto barragem-fundação (em cima) e apenas da barragem (em baixo)

4.3. Modelação térmica

4.3.1. Ações térmicas

4.3.1.1. Temperatura do ar

Na Figura 4.2 apresenta-se a evolução da temperatura média mensal do ar no local da barragem, entre 2000 e 2018, obtida a partir das temperaturas máximas e mínimas diárias observadas no termómetro instalado no abrigo existente no coroamento da abóbada.

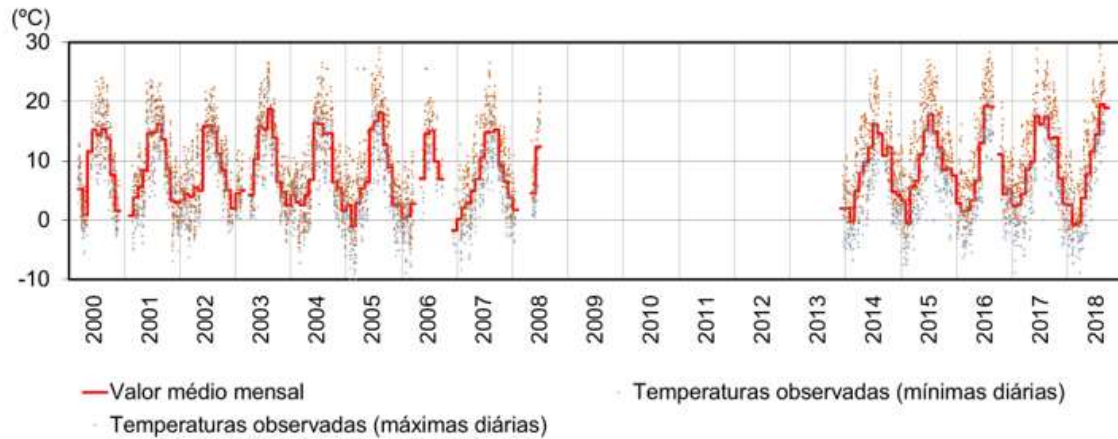


Figura 4.2 - Temperaturas diárias observadas, mínimas, máximas e médias, entre 2000 e 2018

Apesar de no período entre meados de 2008 e finais de 2013 não existirem valores observados, verifica-se que existe uma variação acentuada da temperatura entre a época quente e fria, registando-se valores máximos nos meses de julho e agosto e os mínimos nos meses de dezembro e janeiro.

No modelo térmico admitiu-se que as temperaturas do ar e da água podem ser aproximadas por funções harmónicas de período anual (Silveira, 1961), com a forma,

$$T(t) = T_m + S_a \cos \left(\frac{2\pi}{365} (t - \phi) \right) \quad (4.1)$$

onde t representa o tempo em dias, decorrido desde o início do ano, T_m representa a temperatura média anual, S_a é a semi-amplitude e ϕ é o número de dias desde o início do ano até à data em que ocorre a máxima temperatura anual.

No presente trabalho foi usada a função representada graficamente na Figura 4.3, que foi ajustada pelo LNEC (LNEC, 2006) através do método dos mínimos quadrados às temperaturas observadas na obra entre 2000 e 2004. A curva é caracterizada por uma temperatura média anual de 12,85°C, uma semi-amplitude de 11,8°C e uma desfasagem de 188,36 dias.

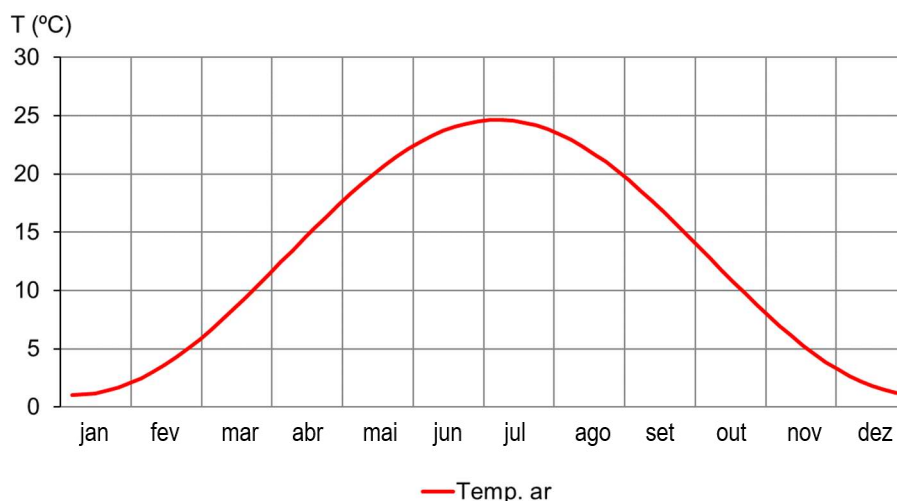


Figura 4.3 - Onda térmica anual média do ar calculada a partir das temperaturas registadas entre 2000 e 2004 (LNEC, 2006)

4.3.1.2. Temperatura da água

Tal como para a temperatura do ar, a temperatura da água foi considerada no modelo através de funções harmónicas, para diferentes profundidades, tendo sido usadas as funções ajustadas no trabalho realizado pelo LNEC em 2006, com base nos valores observados entre 2000 e 2004 em 3 termómetros instalados no paramento de montante, na junta F, às cotas 1652,1 m, 1643,9 m e 1636,1 m. Os parâmetros das funções são apresentados na Tabela 4.1 e a sua representação gráfica consta da Figura 4.4.

Na Figura 4.5 representa-se a variação da temperatura média, mínima e máxima da água em função da profundidade, verificando-se que a temperatura média e a amplitude diminuem em profundidade.

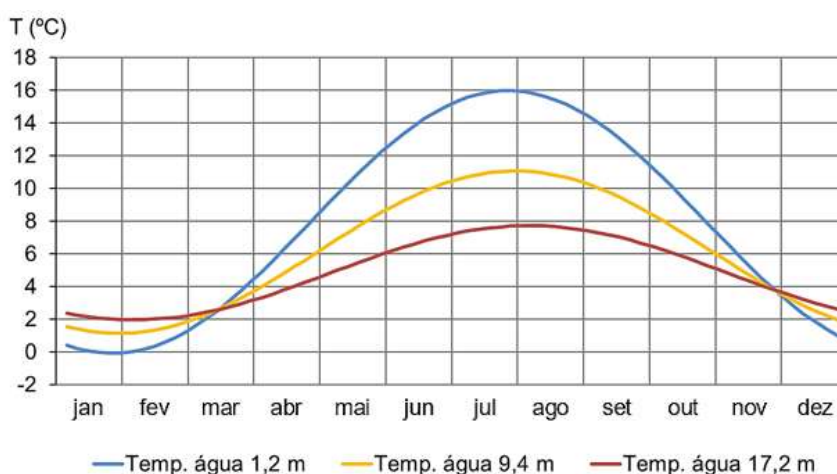


Figura 4.4 - Ondas térmicas da água da albufeira a diferentes profundidades

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros das funções harmónicas utilizadas para diferentes profundidades da albufeira

Profundidade (m)	T_m (°C)	S_a (°C)	ϕ (dias)
1,2	7,96	8,03	208,49
9,4	6,12	4,96	211,56
17,2	4,86	2,88	218,06

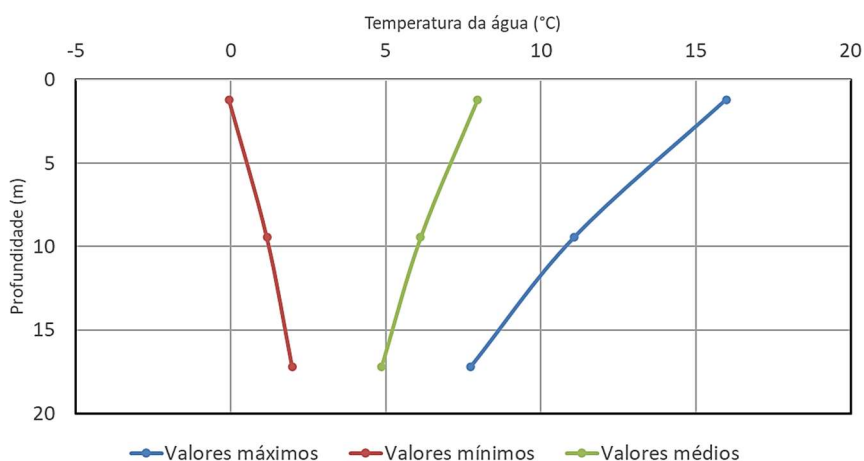


Figura 4.5 - Variação da temperatura anual mínima, média e máxima da água em função da profundidade

4.3.2. Propriedades térmicas do betão

Não havendo ensaios específicos, foram consideradas as seguintes propriedades térmicas para o betão: coeficiente de dilatação linear $\alpha_c = 11 \times 10^{-6} / ^\circ C$, condutividade térmica $k = 2,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, calor específico $c = 920 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ e coeficiente de convecção $h_c = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Estes valores correspondem a valores médios do betão de barragens.

4.3.3. Resultados do modelo térmico

Na Figura 4.6 apresentam-se os resultados da análise térmica, em vistas de jusante e cortes, relativos a uma época fria (31 de dezembro de 2019, às 00:00h) e a uma época quente (7 de junho de 2020, às 00:00h).

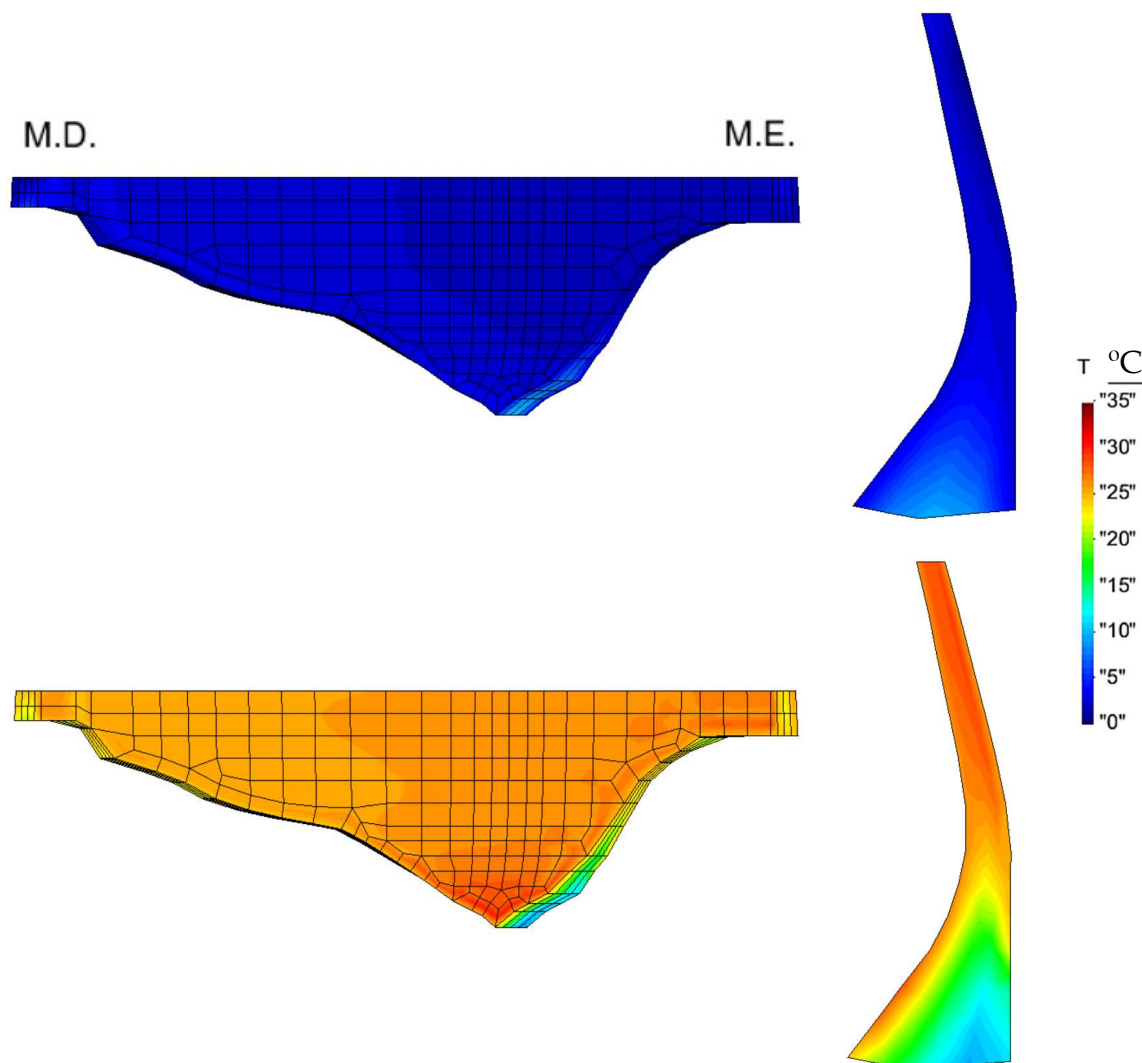


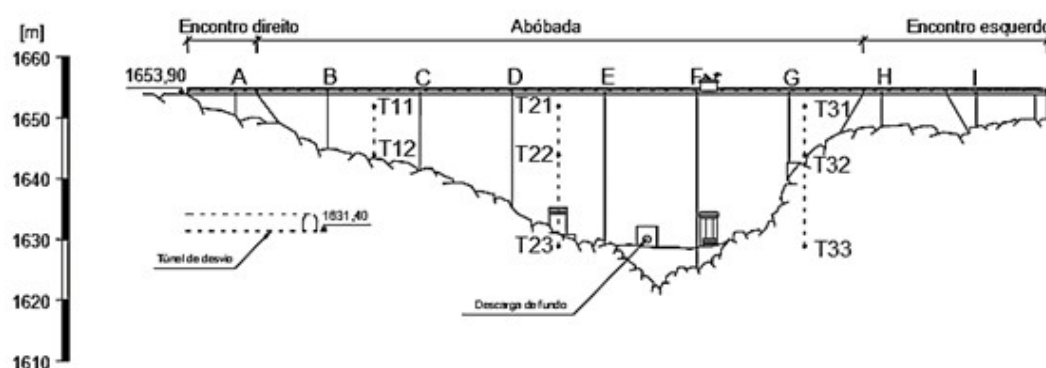
Figura 4.6 - Vistas de jusante e cortes transversais com a distribuição de temperaturas no corpo da barragem em época fria (em cima) e época quente (em baixo)

Em época fria, calcularam-se no perfil da barragem temperaturas de cerca de 5°C, exceto no interior da barragem, na zona próxima da fundação, em que as temperaturas são mais elevadas, devido à maior espessura do perfil nessa zona. Não se obtiveram gradientes relevantes na direção montante-jusante por, nesta altura do ano, as temperaturas do ar e da água serem bastante próximas.

Em época quente, devido à descida do nível de água na albufeira ambos os paramentos estão sujeitos à temperatura do ar e à radiação solar, pelo que se verificam, na parte superior do perfil, temperaturas da ordem de 25°C, próximas da temperatura média do ar. Na parte inferior do perfil, que permanece imersa, existe um gradiente térmico significativo na direção montante-jusante, com temperaturas de cerca de 25°C a jusante e de cerca de 15°C a montante.

A temperatura do betão e do maciço é observada em 8 termómetros de resistência eléctrica (Figura 4.7), instalados em furos feitos a partir de jusante, sensivelmente a meia espessura

da abóbada, exceto os termómetros T31, T32 e T33, que foram instalados no furo do extensómetro de fundação vertical EF3. As temperaturas observadas foram comparadas com os valores calculados, de modo a validar o modelo térmico.



Designação	Localização	Cota
T1.1	Bloco BC	1651,90m
T1.2	Bloco BC	1643,90m
T2.1	Bloco DE	1651,90m
T2.2	Bloco DE	1643,90m
T2.3	Bloco DE	1628,90m
T3.1	Bloco GH	1651,90m
T3.2	Bloco GH	1643,90m
T3.3	Bloco GH	1628,90m

Figura 4.7 - Alçado de jusante com a identificação e a localização dos termómetros de resistência elétrica (adaptado de (LNEC, 2006))

Nas Figuras 4.8 e 4.9 apresenta-se comparação entre os valores observados e os valores calculados das temperaturas do betão da barragem. Verifica-se que existe, no geral, um bom ajuste entre os resultados do cálculo e da monitorização, exceto no termómetro T33 (que está no maciço de fundação), onde a temperatura média calculada está acima dos valores observados, e nos termómetros T23 e T32, em que se notam ligeiras diferenças nas amplitudes calculadas e observadas. A partir de 2014 não existem valores observados no termómetro T22, eventualmente devido a uma avaria do equipamento.

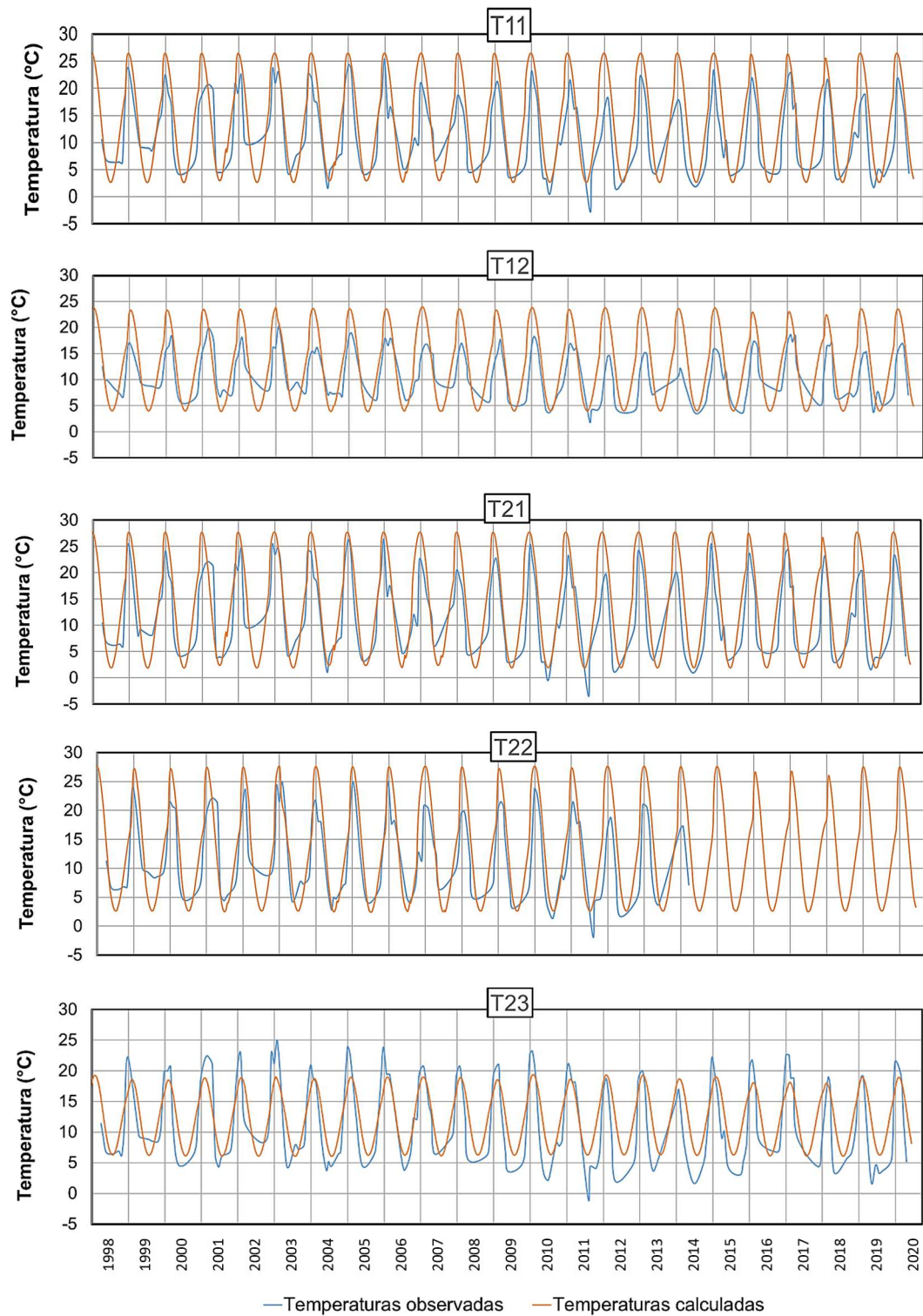


Figura 4.8 – Comparação entre as temperaturas calculadas e observadas nos termômetros de resistência elétrica localizados nos blocos BC e DE

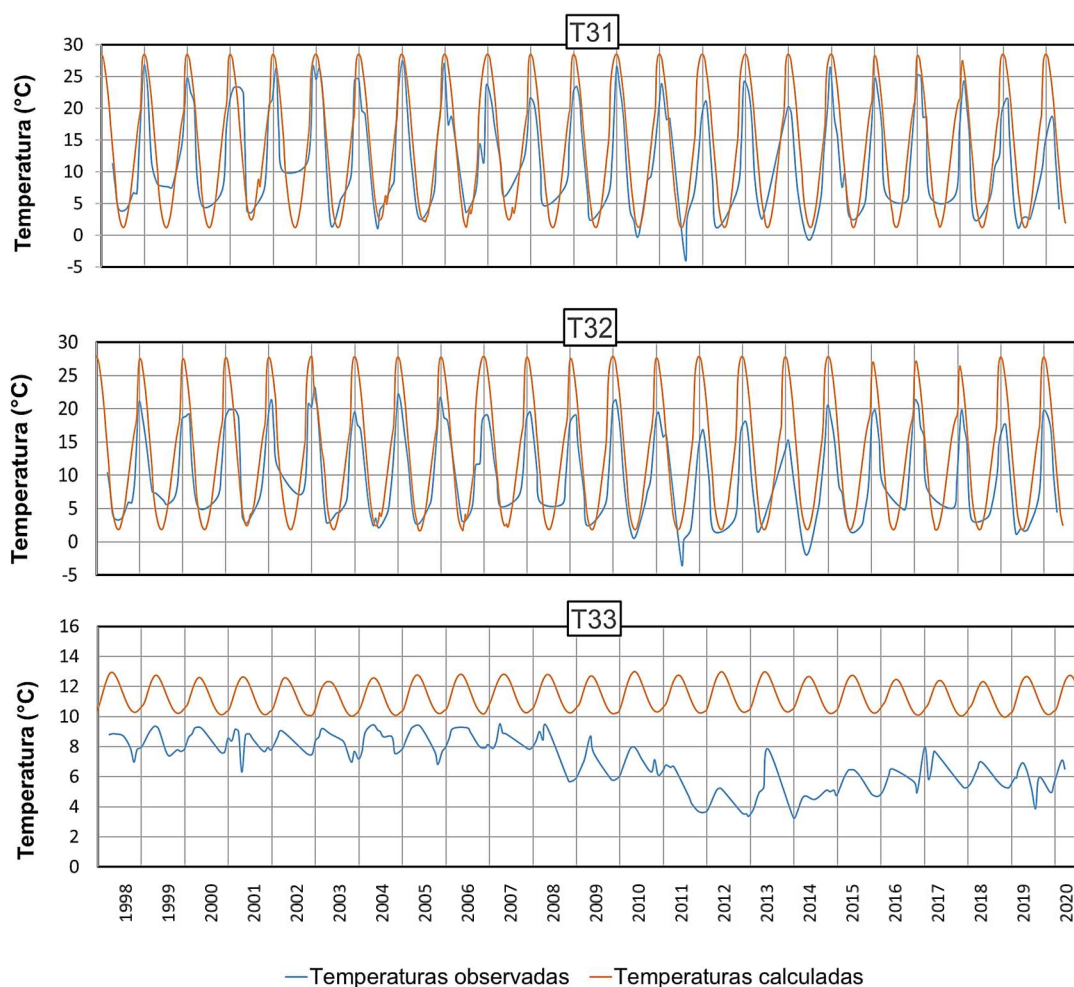


Figura 4.9 – Comparação entre as temperaturas calculadas e observadas nos termómetros de resistência elétrica localizados no bloco GH

4.4. Modelação da ação expansiva

4.4.1. Propriedades expansivas do betão

Na modelação da ação expansiva foram consideradas curvas de evolução das expansões livres para a temperatura de referência de 20°C, cujos parâmetros foram estimados a partir dos resultados dos estudos físico-químicos realizados no LNEC, dos deslocamentos verticais obtidos nos nivelamentos de precisão do coroamento e dos resultados da modelação estrutural. Foram ainda considerados os campos de temperatura e de tensões, o que permitiu representar, respetivamente, a heterogeneidade das expansões livres (as zonas com temperaturas médias mais elevadas têm mais expansões) e a anisotropia das expansões estruturais (as direções mais comprimidas têm menos expansões).

Numa primeira tentativa de calibração da ação expansiva, considerou-se que o betão teria as mesmas propriedades expansivas em toda a abóbada. Esta abordagem revelou-se não ser a mais adequada, já que não reproduzia bem os deslocamentos da barragem, nomeadamente os observados nos blocos da margem esquerda, que são maiores do que os deslocamentos dos blocos da margem direita.

De forma a obter um melhor ajuste entre os deslocamentos observados e calculados em toda a abóbada, realizou-se um zonamento da estrutura, tendo sido consideradas 3 zonas (Figura 4.10), com potencial expansivo menor nos blocos da margem direita (MD-E), intermédio nos blocos EF e FG e maior nos blocos da margem esquerda (G-ME), uma vez que os deslocamentos verticais observados por nivelamentos de precisão são maiores nos blocos do lado da margem esquerda.

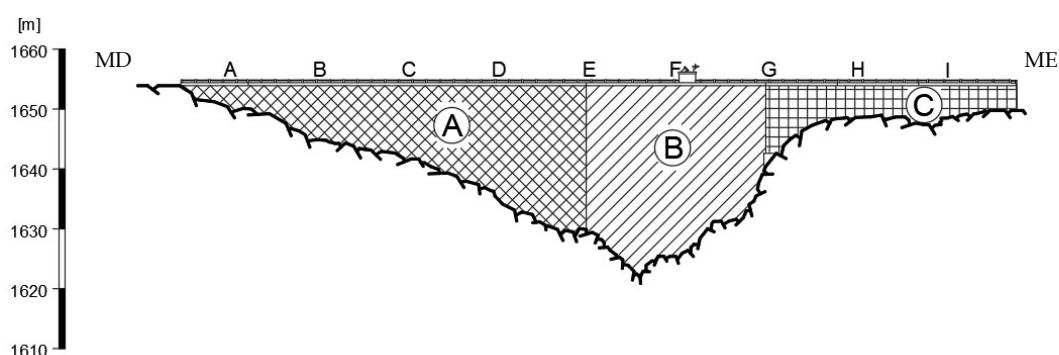


Figura 4.10 - Zonamento adotado para o potencial expansivo do betão da abóbada

Na Figura 4.11 representam-se graficamente as curvas de evolução das expansões livres, para a temperatura de referência de 20°C, adotadas para a ação expansiva e na Tabela 4.2 apresentam-se os seus parâmetros.

Tabela 4.2 - Parâmetros das curvas de evolução das expansões livres, para a temperatura de referência de 20°C

Parâmetro	Zona A	Zona B	Zona C
n	3,6	3,6	3,6
t_{hs} (dias)	22000	22000	22000
ε_{∞} ($\times 10^{-6}$)	1200	2000	2800

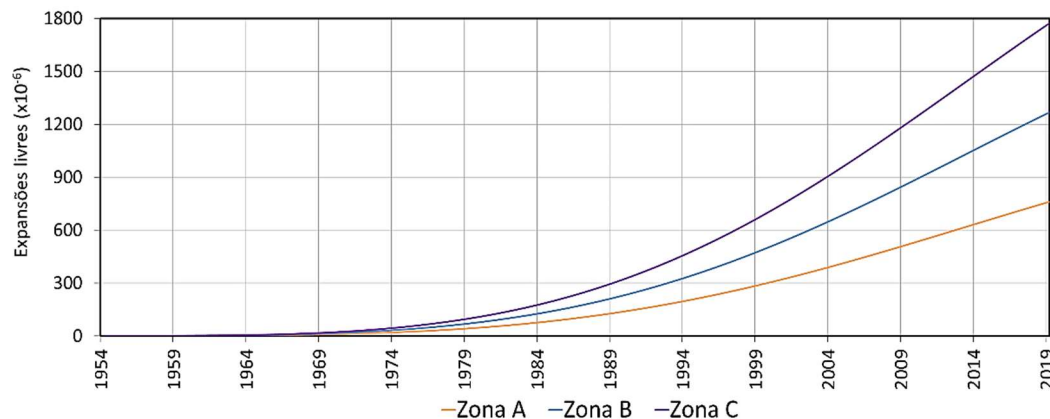


Figura 4.11 – Representação das curvas de evolução das expansões livres, para a temperatura de referência de 20°C

4.4.2. Resultados do modelo de ação expansiva

Na Figura 4.12 representam-se as expansões livres calculadas em dezembro de 2020. Os resultados mostram a heterogeneidade no desenvolvimento do processo expansivo, resultante do zonamento adotado e da distribuição de temperatura na barragem. No ponto A, representado na Figura 4.12, obtiveram-se expansões livres de cerca de 1700×10^{-6} , no paramento de jusante, e de cerca de 1300×10^{-6} , no paramento de montante. Verifica-se que as expansões livres são mais elevadas junto do paramento de jusante devido à sua temperatura média ser mais elevada.

M.D.

M.E.

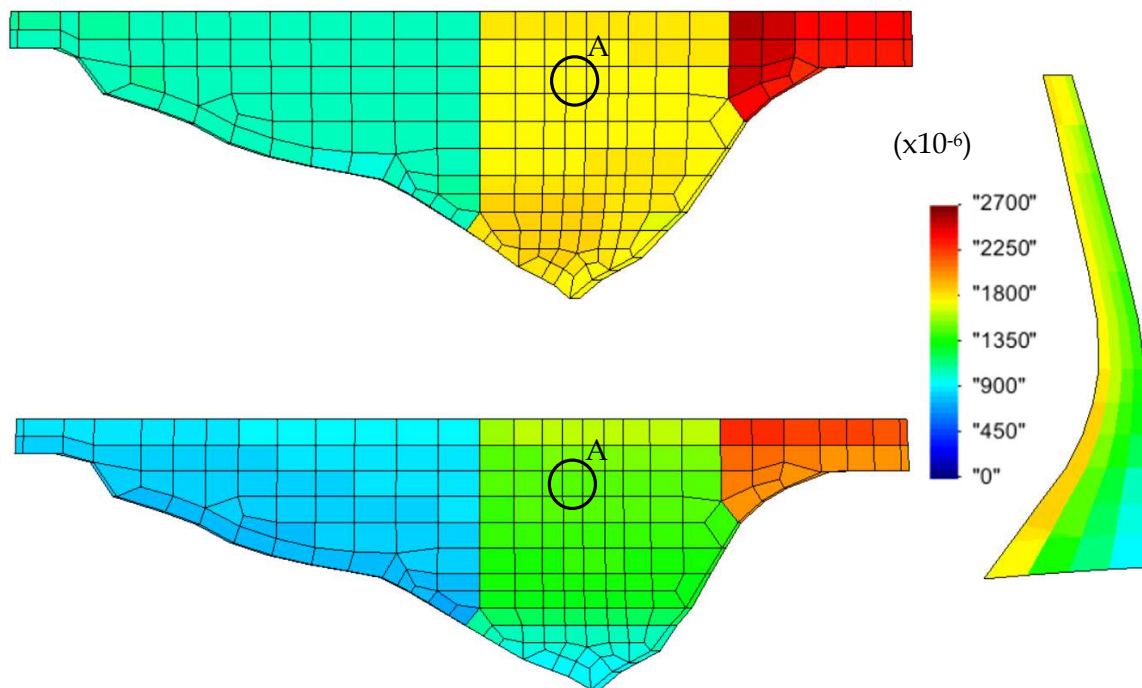


Figura 4.12 - Expansões livres calculadas, em dezembro de 2020. Vista do paramento de montante (em baixo), jusante (em cima) e corte transversal no bloco EF

4.5. Modelação estrutural

4.5.1. Ações estruturais

4.5.1.1. Peso próprio

Considerou-se o peso próprio da barragem aplicado instantaneamente na fase inicial do cálculo, através de forças mássicas verticais, para um peso volúmico do betão de 24 kN.m^{-3} .

4.5.1.2. Nível de água no reservatório

A evolução do nível da albufeira só é conhecida desde 1994. A partir desta data também existem alguns períodos sem registos, mas são geralmente inferiores a 1 ano. Os registos disponíveis evidenciam que, em regra, a albufeira é explorada a uma cota elevada durante a época fria, sendo esvaziada durante a época estival.

No cálculo estrutural é necessário conhecer o nível da albufeira de acordo com a discretização semanal adotada no domínio do tempo, pelo que foi estimado o nível da albufeira nos períodos em que não existem registos. Tendo em conta as particularidades da exploração da albufeira da barragem do Covão do Meio, foram calculadas as datas médias em que ocorrem as descidas e subidas do nível, as durações médias dessas variações e as cotas médias do nível, tendo estes valores sido usados para estimar o nível da albufeira nos períodos em que não existem registos (Figura 4.13). Com esta metodologia estimou-se que, em termos médios, a subida do nível ocorre entre 4 de novembro e 12 de dezembro e a descida ocorre entre 8 de junho e 1 de julho).

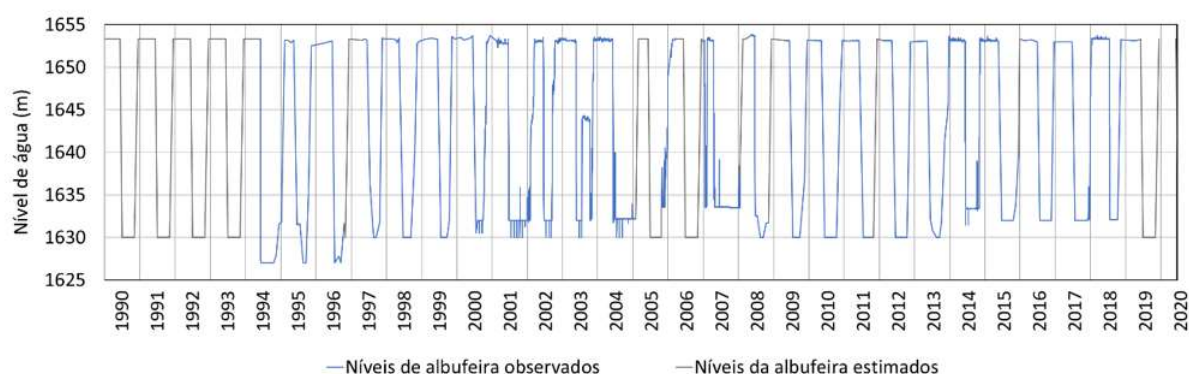


Figura 4.13 - Nível de água observado (a azul) e estimado (a cinzento)

Devido aos seus reduzidos valores, os efeitos provocados pelas subpressões na fundação foram desprezados. No cálculo da pressão hidrostática sobre o paramento de montante considerou-se para a água do reservatório um peso volúmico de 10 kN.m^{-3} .

4.5.1.3. Variações de temperatura e expansões livres no betão

Na análise estrutural consideraram-se as ações correspondentes às variações de temperatura do betão e às expansões, que foram calculadas com os modelos térmico e da ação expansiva apresentados, respetivamente, nos itens 4.3.3 e 4.4.2.

4.5.2. Propriedades mecânicas dos materiais

Neste trabalho foi usada a função de fluência do betão da barragem que foi estimada no estudo anterior do LNEC (LNEC, 2006),

$$J(t, t_0) = \frac{1}{25} \left(1 + 2,64(t_0^{-0,441} + 0,042)(t - t_0)^{0,168} \right) (\text{GPa}^{-1}) \quad (4.2)$$

que se encontra representada na Figura 4.14, à esquerda, para as idades de carga de 6 meses, 1 ano e 5 anos. Na Figura 4.14, à direita, apresenta-se a correspondente função de relaxação de tensões, para idades de carga semelhantes, bem como, a traço interrompido, a curva de evolução do módulo de elasticidade. O maciço de fundação foi considerado com um comportamento elástico linear caracterizado por um módulo de elasticidade $E_f = 20 \text{ GPa}$. Considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,2 para o betão e para o maciço de fundação.

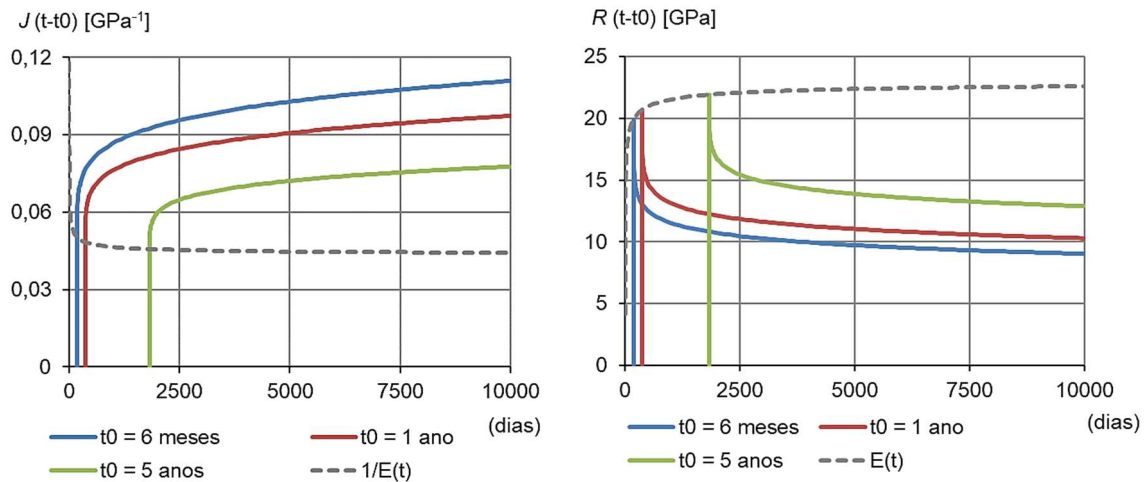


Figura 4.14 - Função de fluência de Bažant e Panula estimada para o betão da barragem, para três idades de carga (à esquerda) e função de relaxação estimada para o betão da barragem as mesmas idades de carga, assim como a curva de evolução do módulo de elasticidade (à direita)

4.5.3. Resultados do modelo estrutural

4.5.3.1. Aspetos gerais

Apresentam-se os deslocamentos horizontais e verticais calculados com o modelo estrutural e a sua comparação com os resultados da monitorização de fios de prumo e por métodos geodésicos (planimetria no caso dos deslocamentos horizontais e nivelamentos no caso dos deslocamentos verticais). As representações das figuras são compostas por dois gráficos: no primeiro comparam-se os resultados observados e calculados, sendo que os calculados incluem os efeitos da ação conjunta do peso próprio, pressão hidrostática, variações de temperatura e expansões do betão, bem como os seus efeitos diferidos; no segundo apresentam-se novamente os resultados calculados, mas fazendo-se a representação separada da resposta devida a cada uma das ações.

Como o alvo de geodesia (DE53B) se encontra próximo da base de coordenómetro do fio de prumo 2, à cota 1653,90 m, estes resultados foram representados no mesmo gráfico.

Salienta-se que os dados de observação apenas se encontram disponíveis desde 1999, porém o cálculo foi efetuado a partir do primeiro enchimento da albufeira, de modo considerar todo o historial de carga e os efeitos da fluência e da relaxação.

4.5.3.2. Deslocamentos radiais

Nas Figuras 4.15 e 4.16 apresentam-se os deslocamentos radiais dos pontos correspondentes às bases de leitura do fio de prumo 1, localizado no bloco FG, entre 2000 e 2019 e do fio de prumo 2, localizado no bloco DE, entre 1985 e 2019. Da Figura 4.17 à 4.24 apresentam-se os deslocamentos radiais dos pontos correspondentes aos alvos geodésicos, entre 1985 e 2019.

Constata-se, em geral, uma boa concordância entre os valores calculados e observados. A partir da década de 1970, o comportamento da obra deixou de ser reversível, devido aos efeitos das expansões. Inicialmente o efeito das variações térmicas era predominante (com uma amplitude de cerca de 20 mm, no ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo 1, à cota 1653,90 m), situação que se foi alterando ao longo do tempo, passando o comportamento da barragem a ser dominado pela ação das expansões com cerca de 45 mm, no final de 2019.

Destaca-se, ainda, que os deslocamentos elásticos provocados pela pressão hidrostática ocorrem para jusante e são da mesma ordem de grandeza dos deslocamentos devidos aos efeitos diferidos.

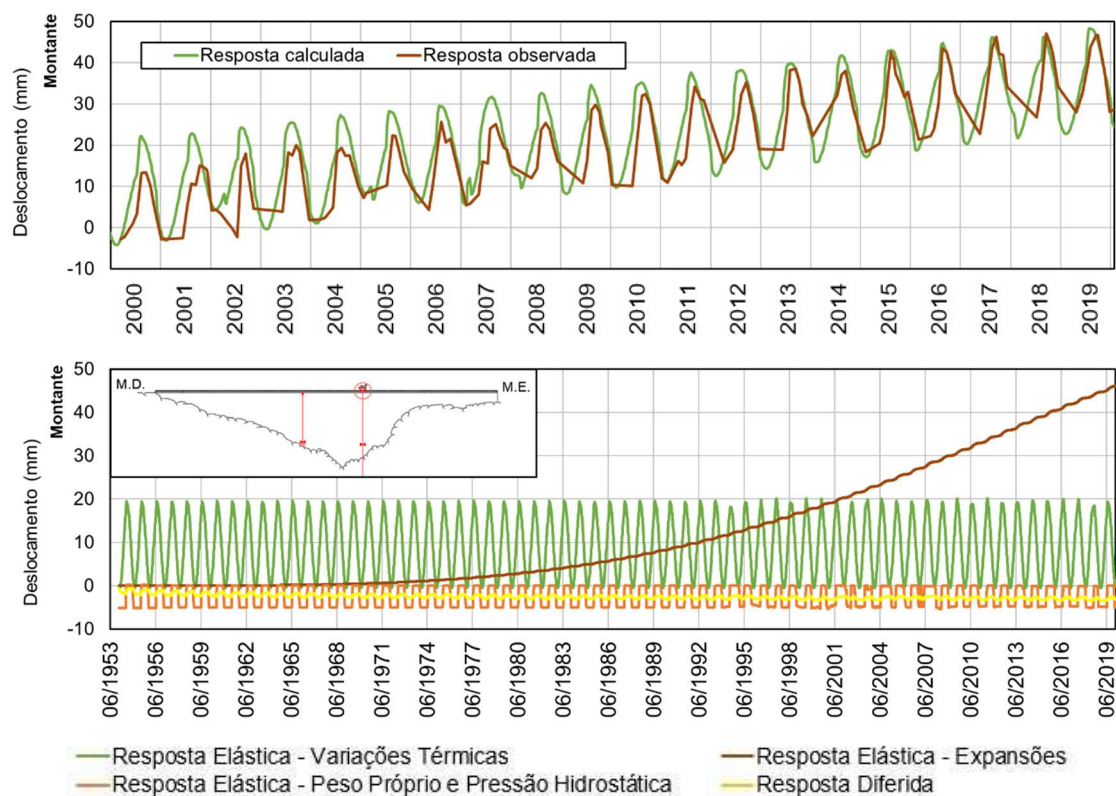


Figura 4.15 - Deslocamentos radiais observados e calculados do ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo 1, à cota 1653,90 m, entre 2000 e 2019

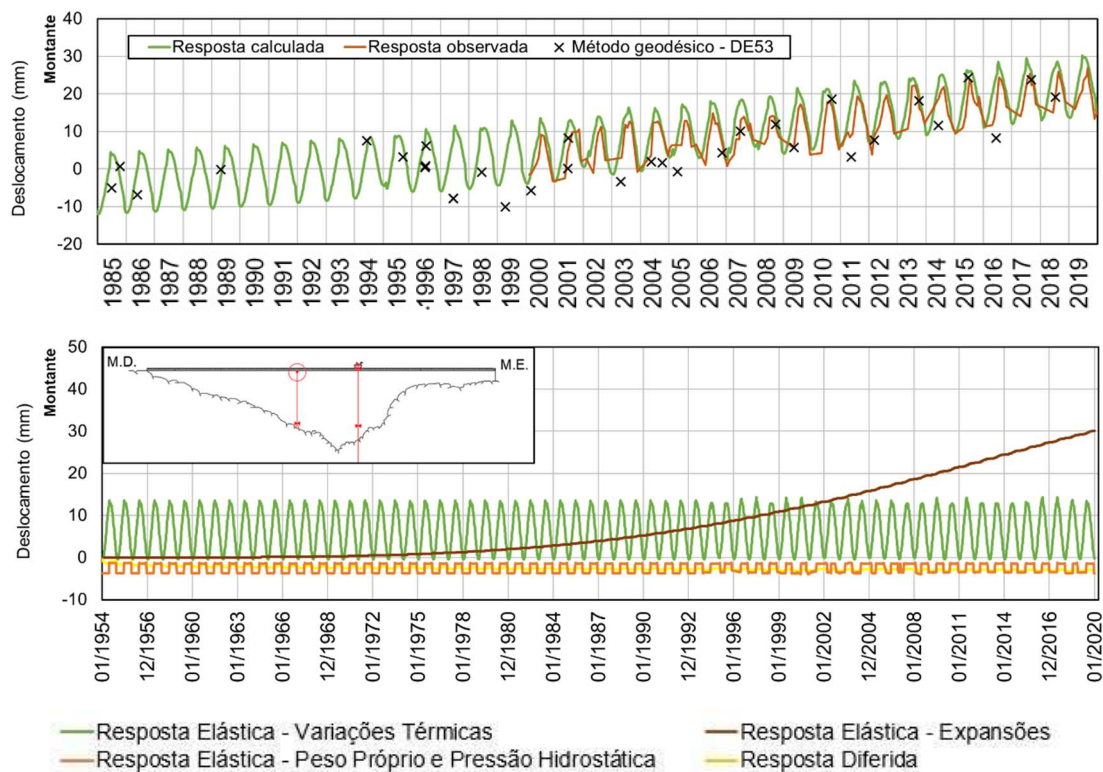


Figura 4.16 - Deslocamentos radiais observados (inclui métodos geodésicos) e calculados do ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo 2, à cota 1653,90 m, entre 1985 e 2019

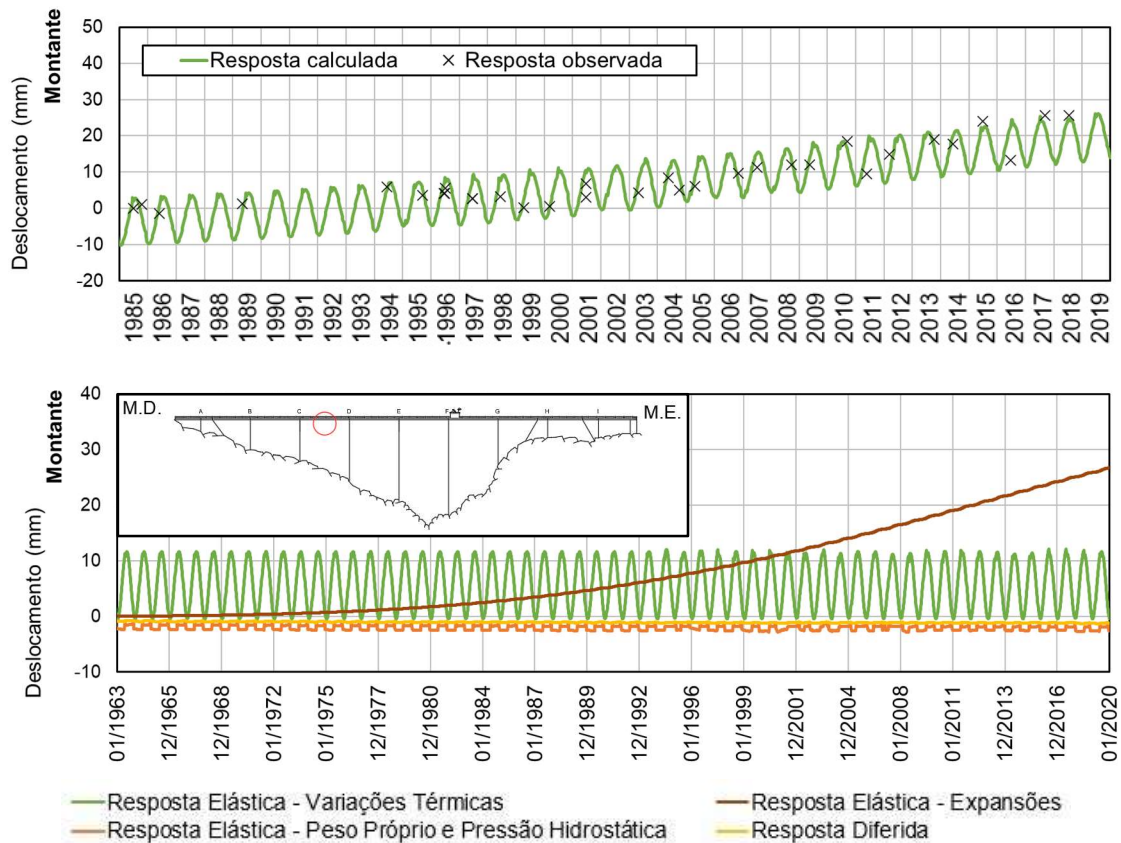


Figura 4.17 - Deslocamentos radiais observados através de métodos geodésicos e calculados, no ponto correspondente ao alvo CD53B, à cota 1653,0 m, entre 1985 e 2019

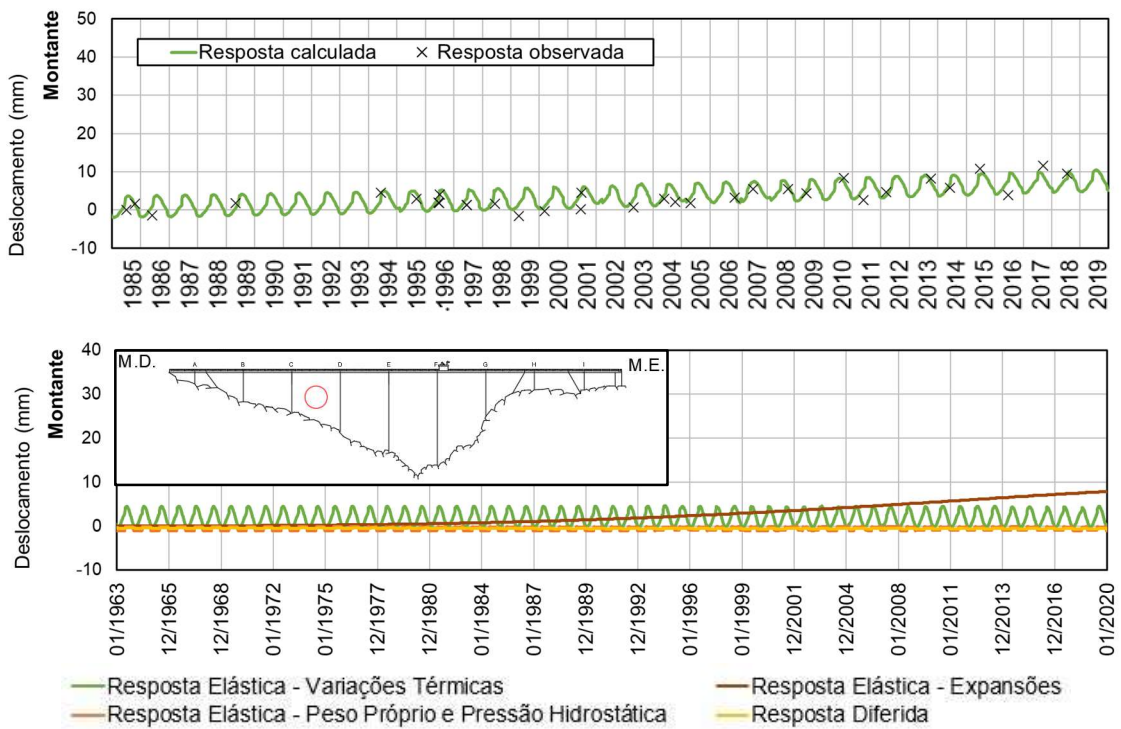


Figura 4.18 - Deslocamentos radiais observados através de métodos geodésicos e calculados, no ponto correspondente ao alvo CD43B, à cota 1643,0 m, entre 1985 e 2019

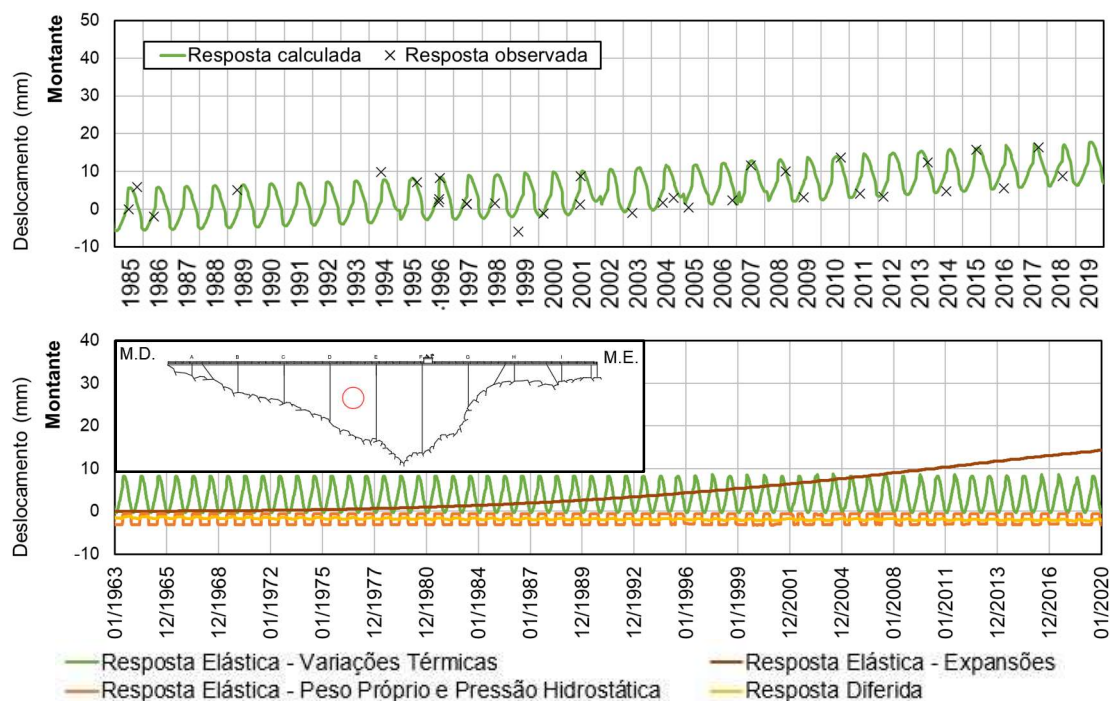


Figura 4.19 - Deslocamentos radiais observados através de métodos geodésicos e calculados, no ponto correspondente ao alvo DE43B, à cota 1643,0 m, entre 1985 e 2019

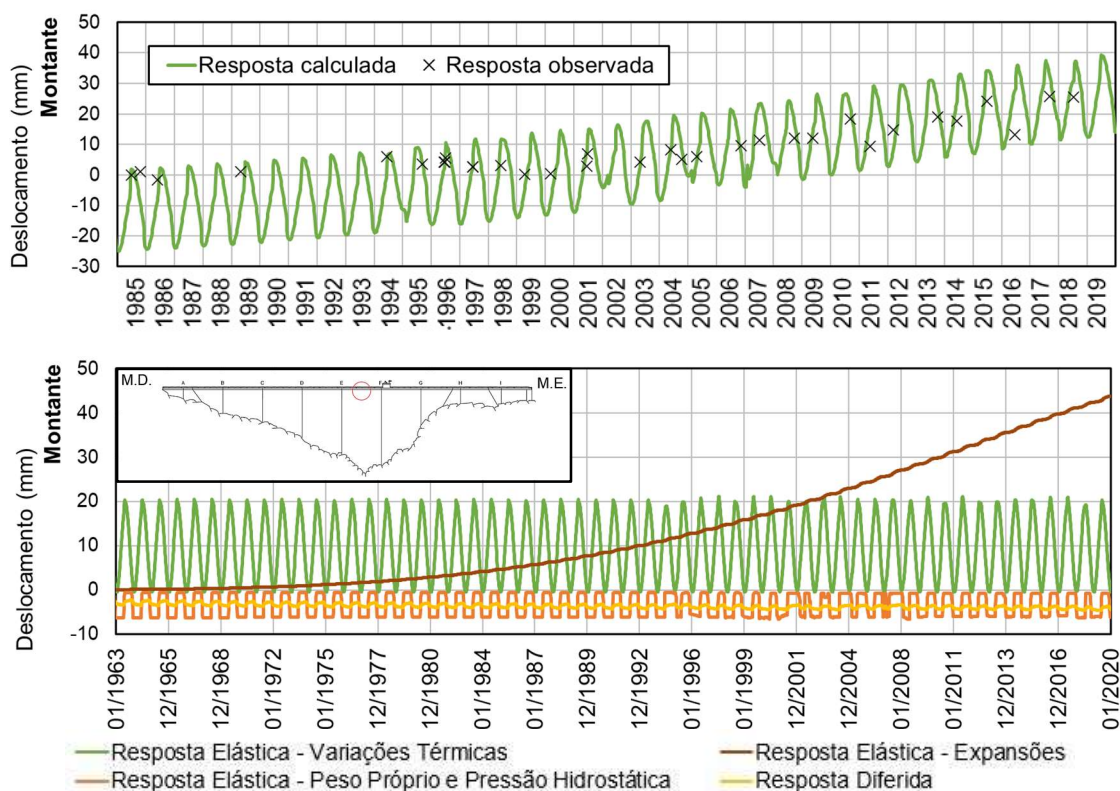


Figura 4.20 - Deslocamentos radiais observados através de métodos geodésicos e calculados, no ponto correspondente ao alvo EF53B, à cota 1653,0 m, entre 1985 e 2019

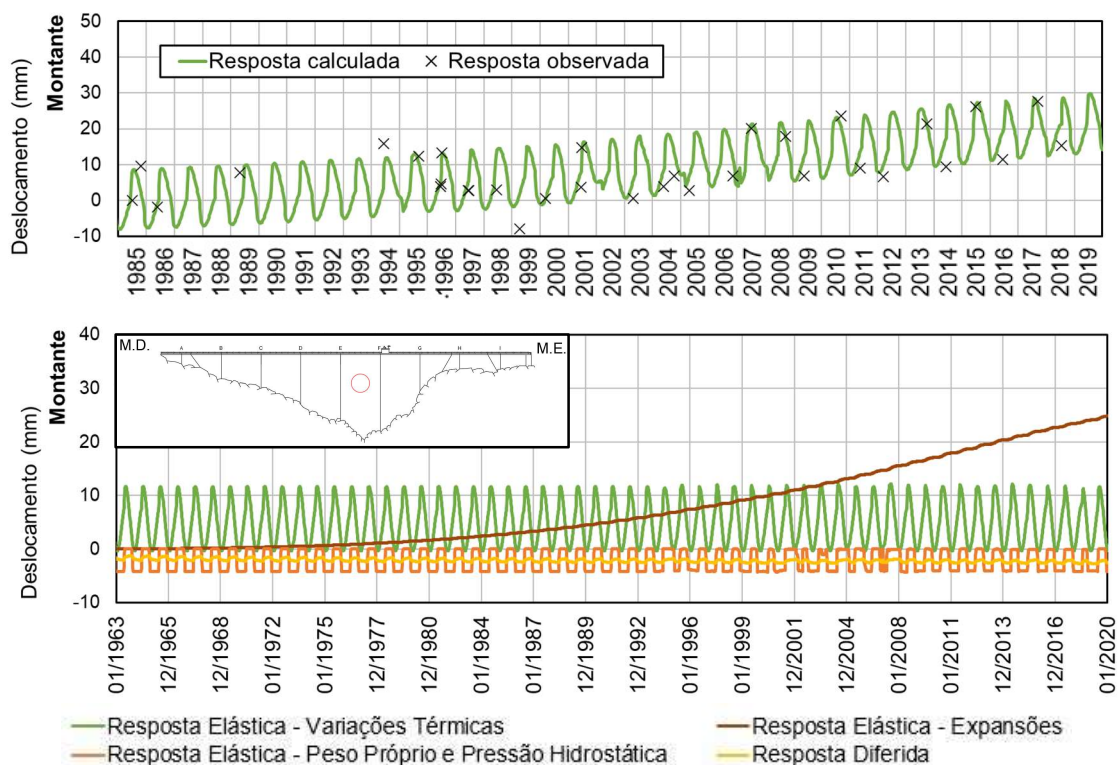


Figura 4.21 - Deslocamentos radiais observados através de métodos geodésicos e calculados, no ponto correspondente ao alvo EF43B, à cota 1643,0 m, entre 1985 e 2019

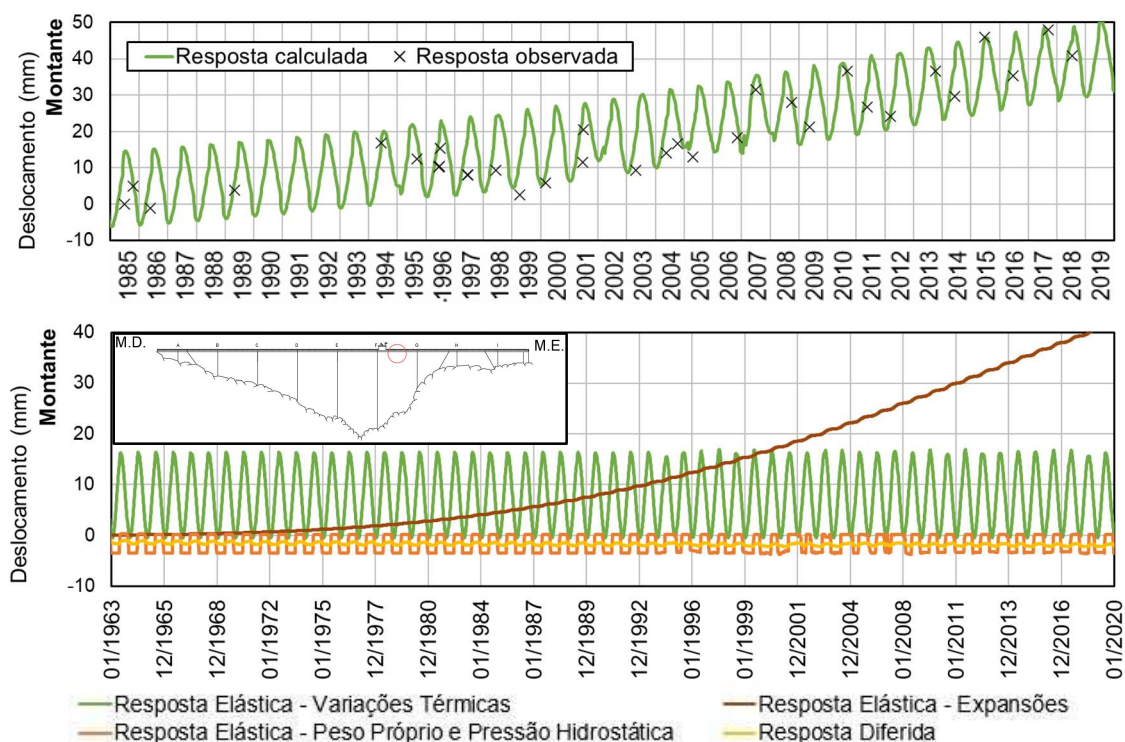


Figura 4.22 - Deslocamentos radiais observados através de métodos geodésicos e calculados, no ponto correspondente ao alvo FG53B, à cota 1653,0 m, entre 1985 e 2019

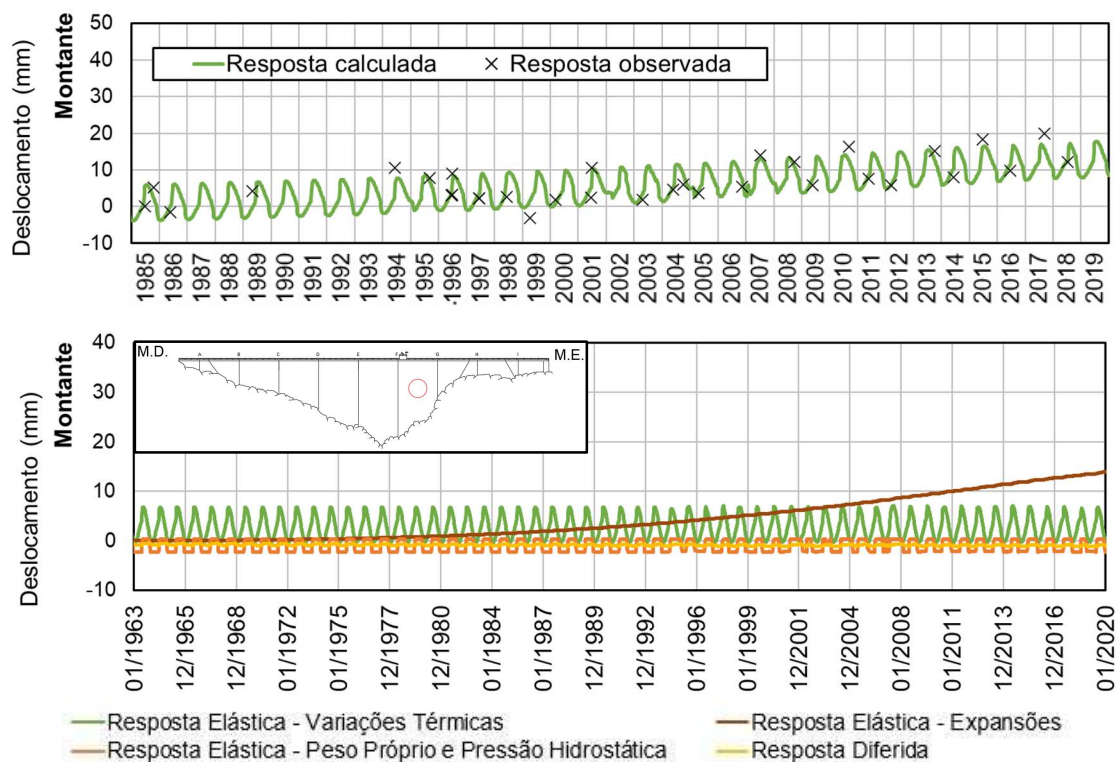


Figura 4.23 - Deslocamentos radiais observados através de métodos geodésicos e calculados, no ponto correspondente ao alvo FG43B, à cota 1643,0 m, entre 1985 e 2020

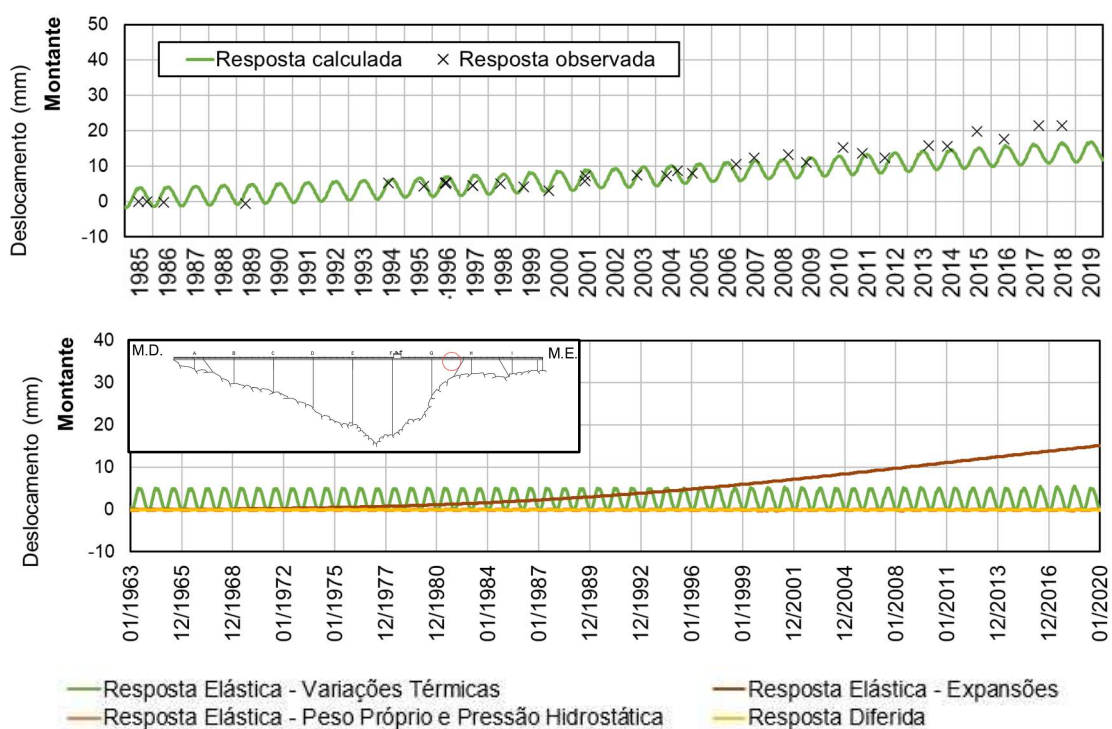


Figura 4.24 - Deslocamentos radiais observados através de métodos geodésicos e calculados, no ponto correspondente ao alvo GH53B, à cota 1653,0 m, entre 1985 e 2020

4.5.3.3. Deslocamentos tangenciais

Na Figura 4.25 e 4.26 apresentam-se os deslocamentos tangenciais dos pontos correspondentes às bases de leitura do fio de prumo 1 e 2, entre 1999 e 2019. Verifica-se, para ambos os casos, que os deslocamentos tangenciais são reduzidos e que o ajuste entre os valores calculados e os observados é aceitável.

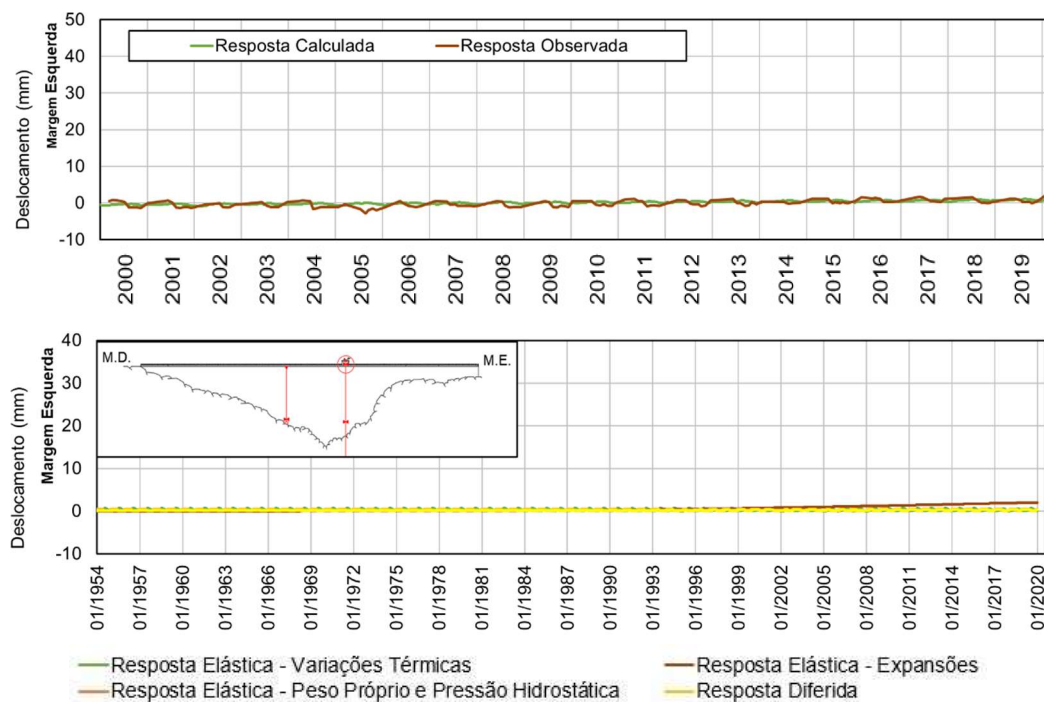


Figura 4.25 - Deslocamentos tangenciais observados e calculados do ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo 1, à cota 1653,90 m, entre 1999 e 2019

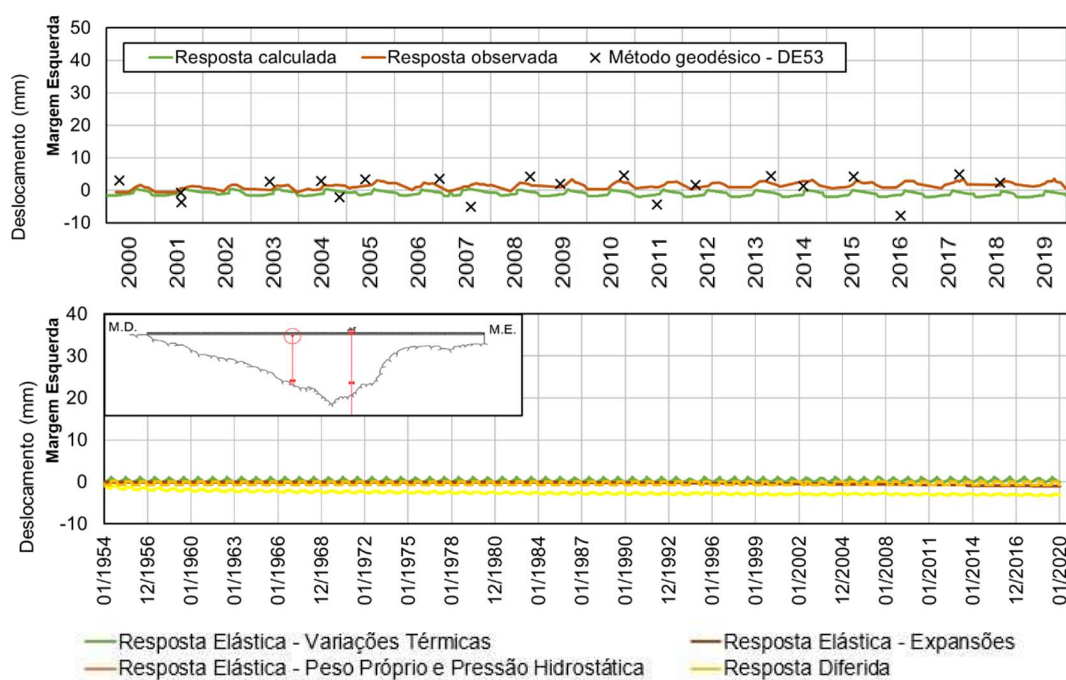


Figura 4.26 - Deslocamentos tangenciais observados e calculados do ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo 2, à cota 1653,90 m, entre 1999 e 2019

4.5.3.4. Deslocamentos verticais

Na Figura 4.27 representam-se as deformadas verticais do coroamento, calculada e observada, entre 1983 e 2019, e na Figura 4.28 as extensões médias verticais³ no mesmo período, verificando-se uma boa concordância entre resultados. Os deslocamentos verticais e as correspondentes expansões no betão são consideravelmente maiores nos blocos da margem esquerda.

Nas Figuras 4.29 à 4.36 e na Figura 4.37 representa-se a evolução dos deslocamentos verticais nas 8 marcas de nivelamento situadas no coroamento da barragem, à cota 1653,90 m, e no extensómetro de fundação instalado no bloco EF da margem esquerda, comparando-se os valores calculados com os valores observados. As marcas de nivelamento estão localizadas nos blocos AB, BC, CD, DE, EF, FG, GH e HI, existindo dados de observação desde 1983 até 2019.

O ajuste obtido foi também razoável, confirmando-se que os deslocamentos verticais se devem, principalmente, à ação expansiva.

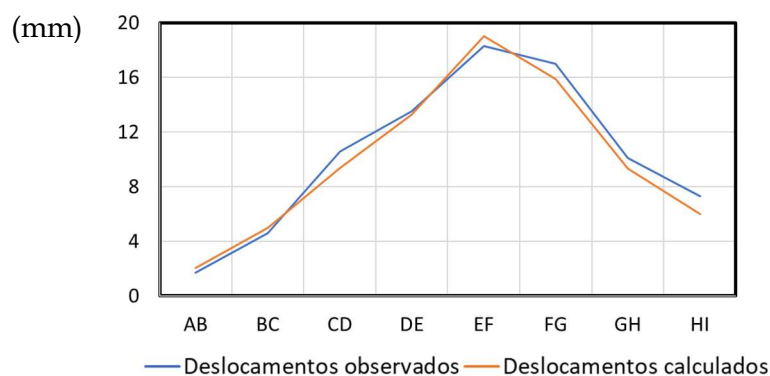


Figura 4.27 - Deformadas verticais do coroamento, calculada e observada, entre 1983 e 2019

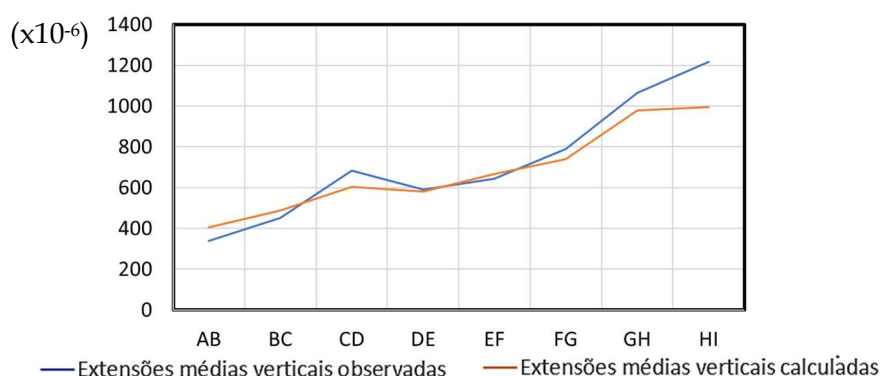


Figura 4.28 - Extensões médias verticais, calculadas e observadas, entre 1983 e 2019

³ Estes valores foram calculados dividindo os deslocamentos verticais pela altura média do bloco. Refere-se que as extensões médias verticais são próximas das expansões livres médias nos blocos, uma vez que os deslocamentos verticais se devem, essencialmente, à ação expansiva, e que a restrição estrutural nesta direção é pequena.

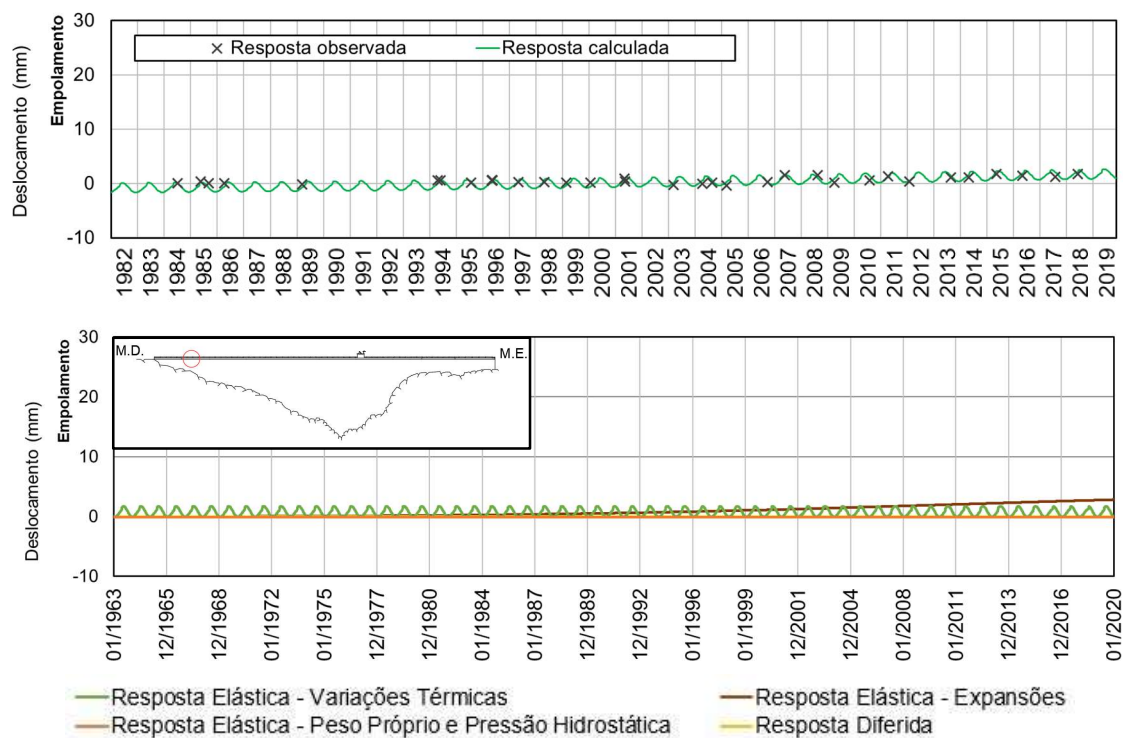


Figura 4.29 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente à marca de nivelamento AB do coroamento, à cota 1653,90 m, observados e calculados entre 1982 e 2019

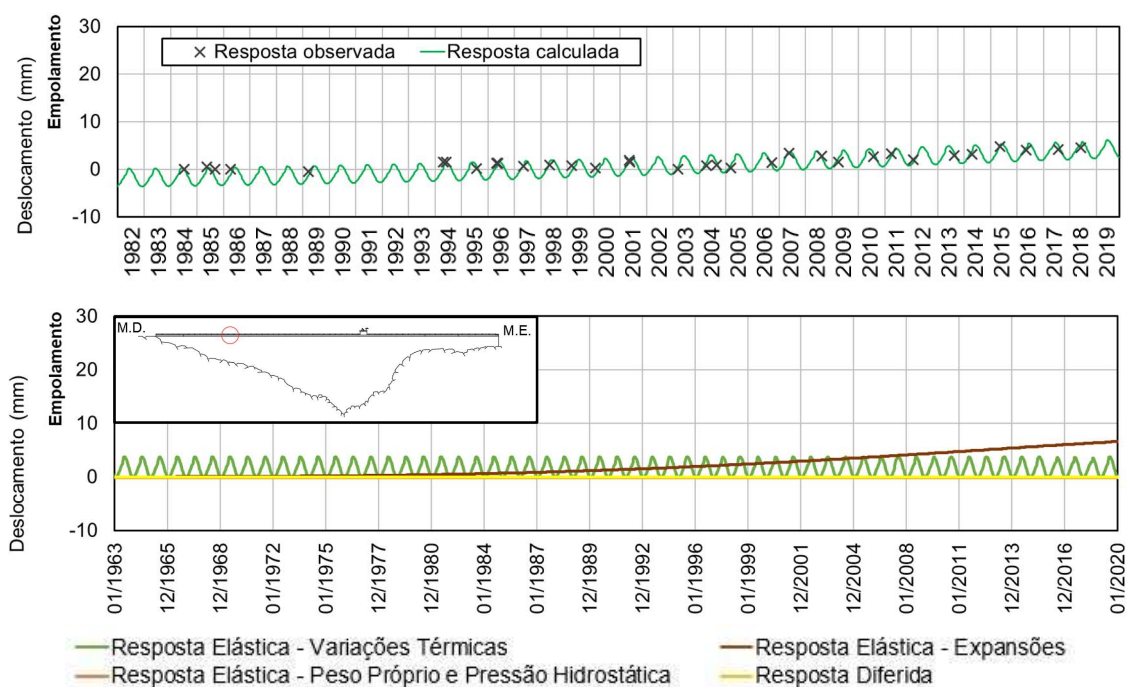


Figura 4.30 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente à marca de nivelamento BC do coroamento, à cota 1653,90 m, observados e calculados entre 1982 e 2019

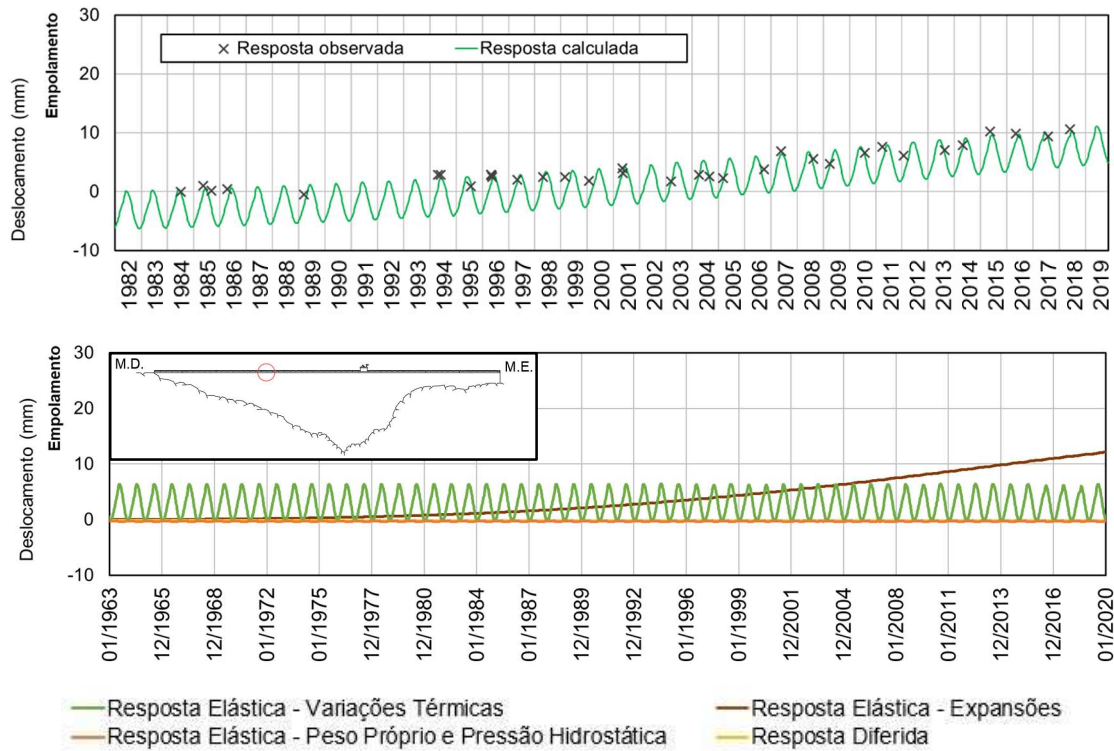


Figura 4.31 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente à marca de nivelamento CD do coroamento, à cota 1653,90 m, observados e calculados entre 1982 e 2019

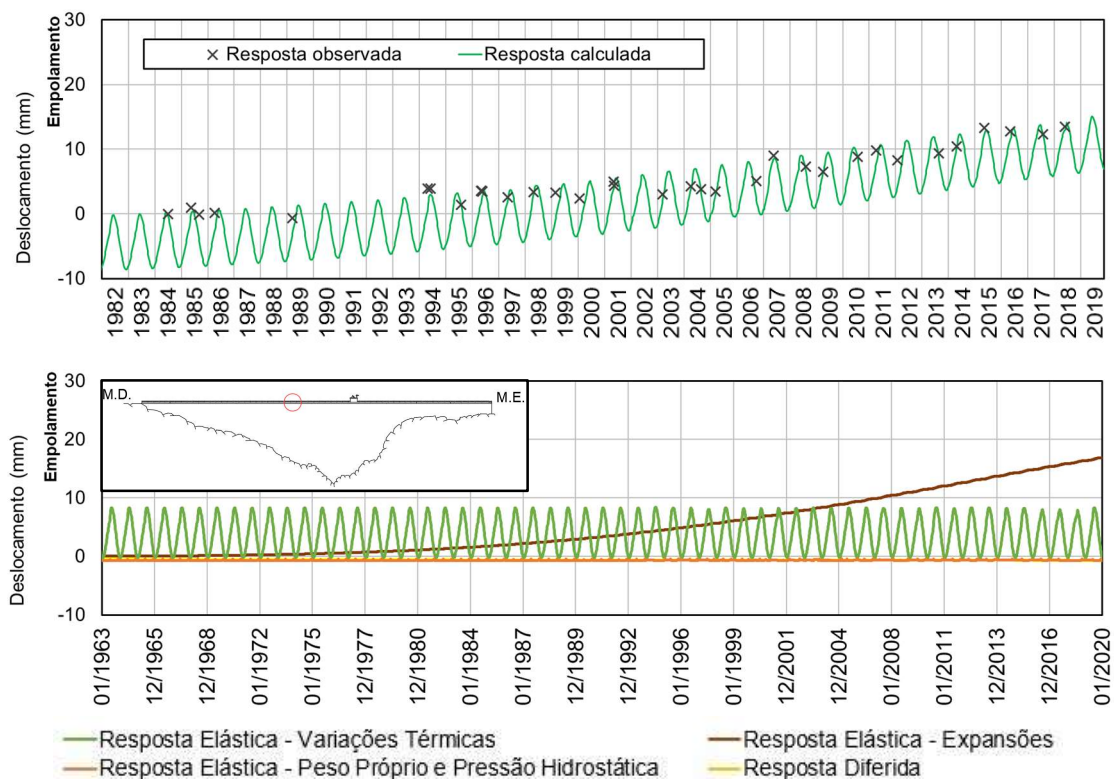


Figura 4.32 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente à marca de nivelamento DE do coroamento, à cota 1653,90 m, observados e calculados entre 1982 e 2019

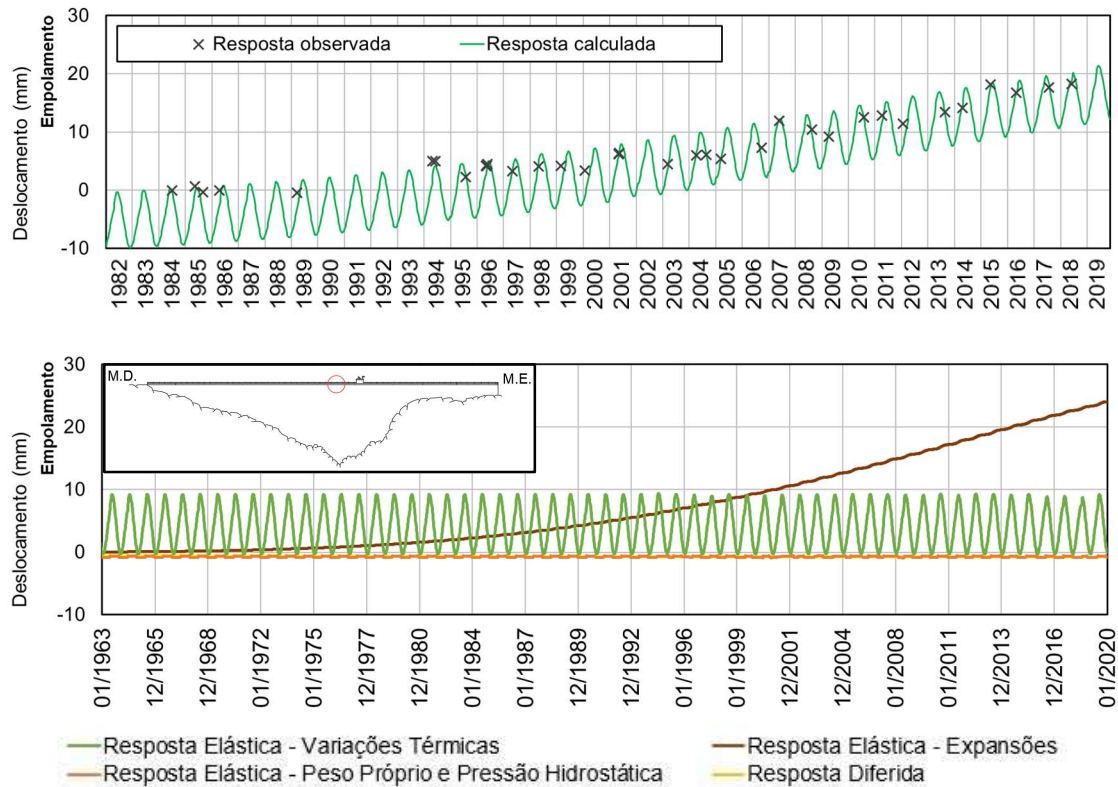


Figura 4.33 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente à marca de nivelamento EF do coroamento, à cota 1653,90 m, observados e calculados entre 1982 e 2019

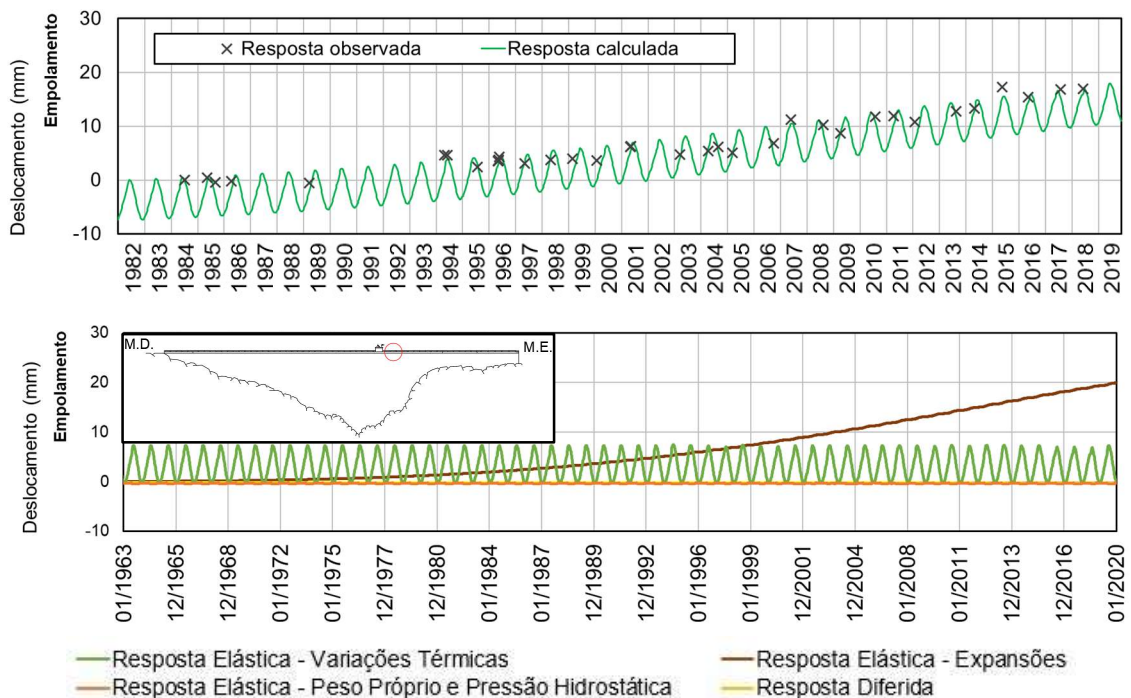


Figura 4.34 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente à marca de nivelamento FG do coroamento, à cota 1653,90 m, observados e calculados entre 1982 e 2019

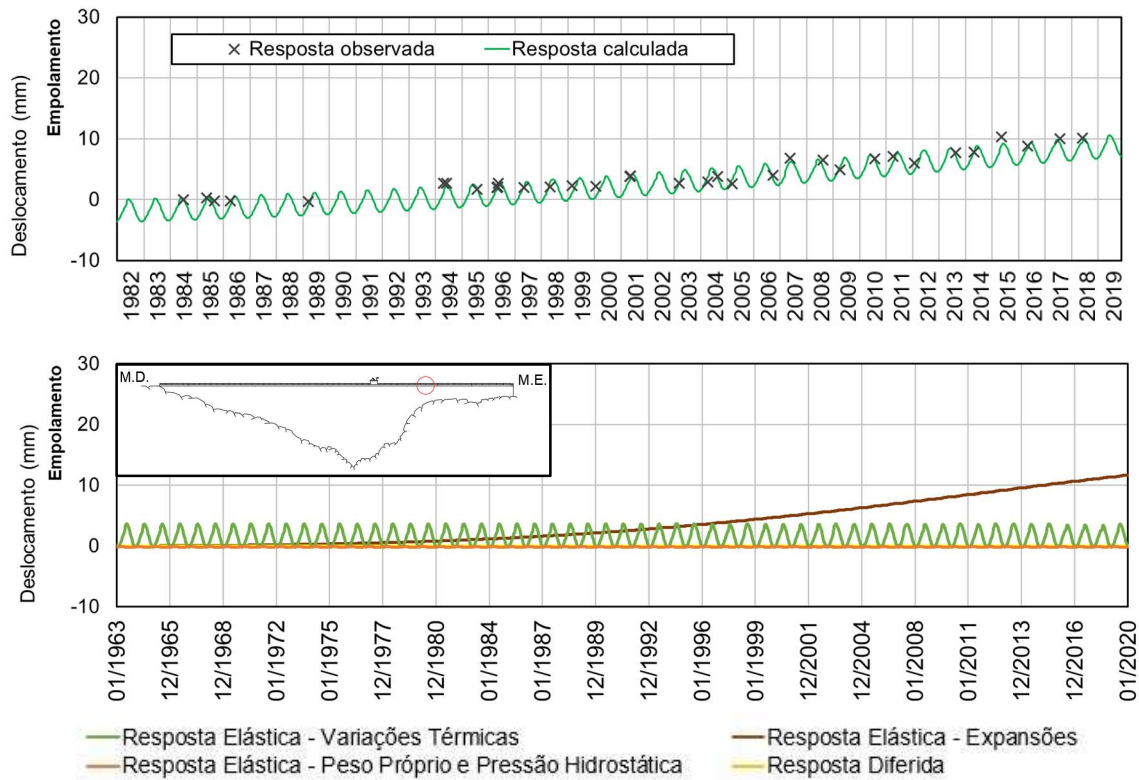


Figura 4.35 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente à marca de nivelamento GH do coroamento, à cota 1653,90 m, observados e calculados entre 1982 e 2019

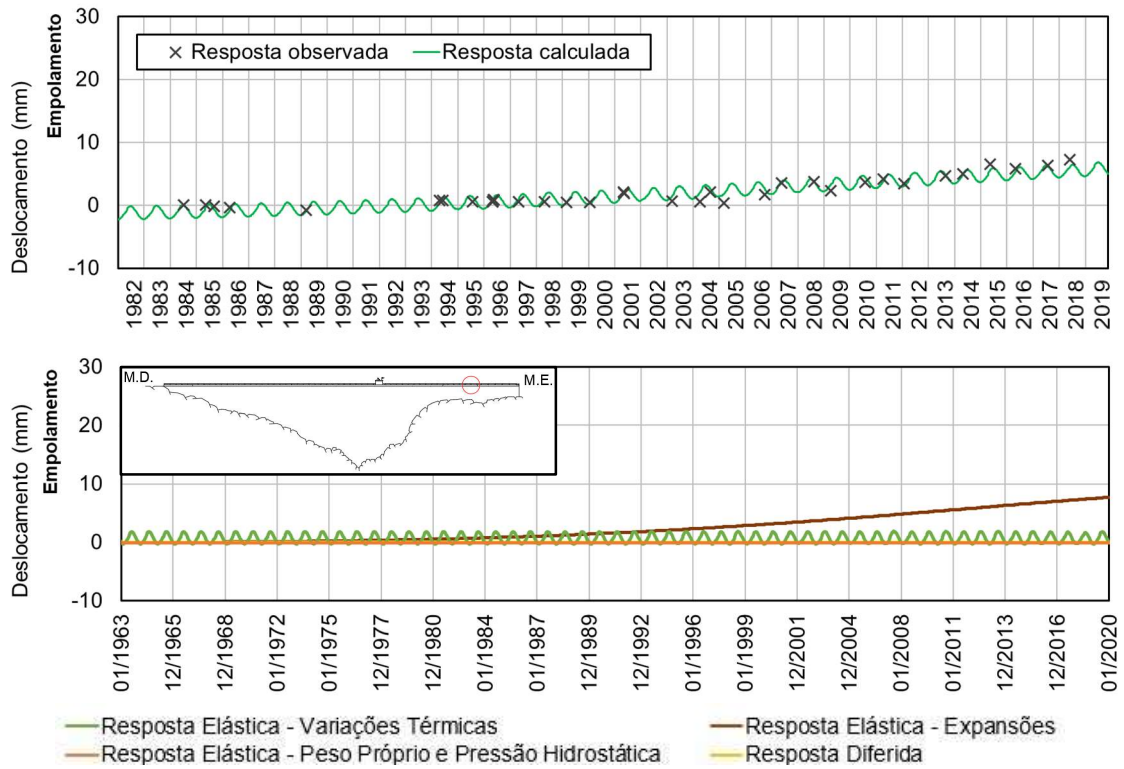


Figura 4.36 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente à marca de nivelamento HI do coroamento, à cota 1653,90 m, observados e calculados entre 1982 e 2019

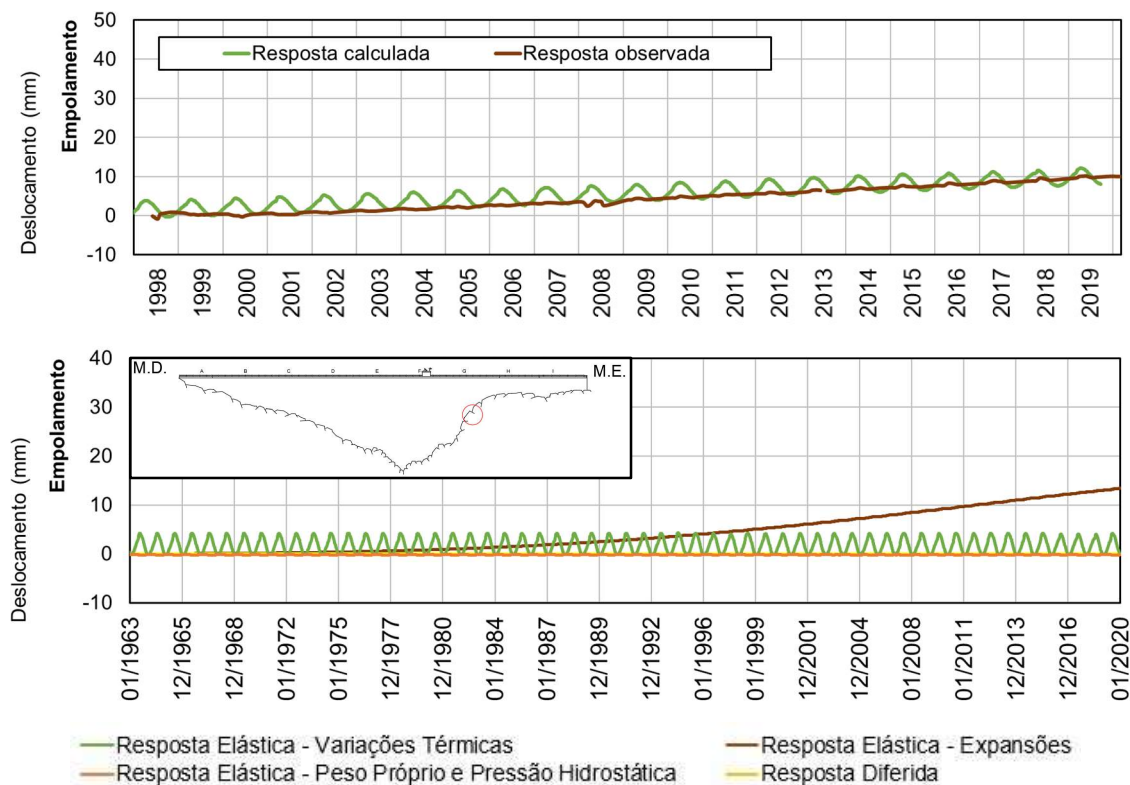


Figura 4.37 - Deslocamentos verticais do ponto correspondente ao extensômetro de fundação 3.13, à cota 1613,0 m, observados e calculados entre 1998 e 2020

4.5.4. Estado de tensão na barragem

4.5.4.1. Aspetos gerais

O estado de tensão no corpo da barragem é devido às diferentes ações, pelo que foram consideradas as parcelas instantânea e diferida para todas elas, exceto para as variações de temperatura, onde se optou por um cálculo elástico, devido aos reduzidos efeitos diferidos resultantes.

A representação do campo de tensões na barragem é realizada através de tensões principais nos paramentos de jusante e montante, em alçados.

Para facilitar a interpretação do comportamento estrutural da barragem, apresentam-se também as deformadas da barragem para as várias ações, através de uma vista em perspetiva e de um corte transversal do bloco EF.

4.5.4.2. Campo de tensões devido ao peso próprio

Na Figura 4.38 apresenta-se a configuração deformada da barragem (ampliada 2000 vezes) devida ao peso próprio do betão. Os deslocamentos observados são verticais, com sentido descendente. Devido à assimetria da abóbada, os maiores deslocamentos ocorrem na zona central da obra, com valores máximos da ordem de 3,0 mm, em módulo.

Na Figura 4.39 representam-se as tensões principais nos paramentos de jusante e de montante da estrutura para a ação do peso próprio do betão. As tensões de compressão máximas ocorrem na zona da inserção da fundação, no paramento de montante, do lado da margem esquerda, com valores de cerca de 0,6 MPa. Em relação às tensões de tração, ocorrem a meia altura no paramento de montante e junto à inserção a jusante, sendo máximas a jusante, na margem esquerda, com valores da ordem de 0,2 MPa.

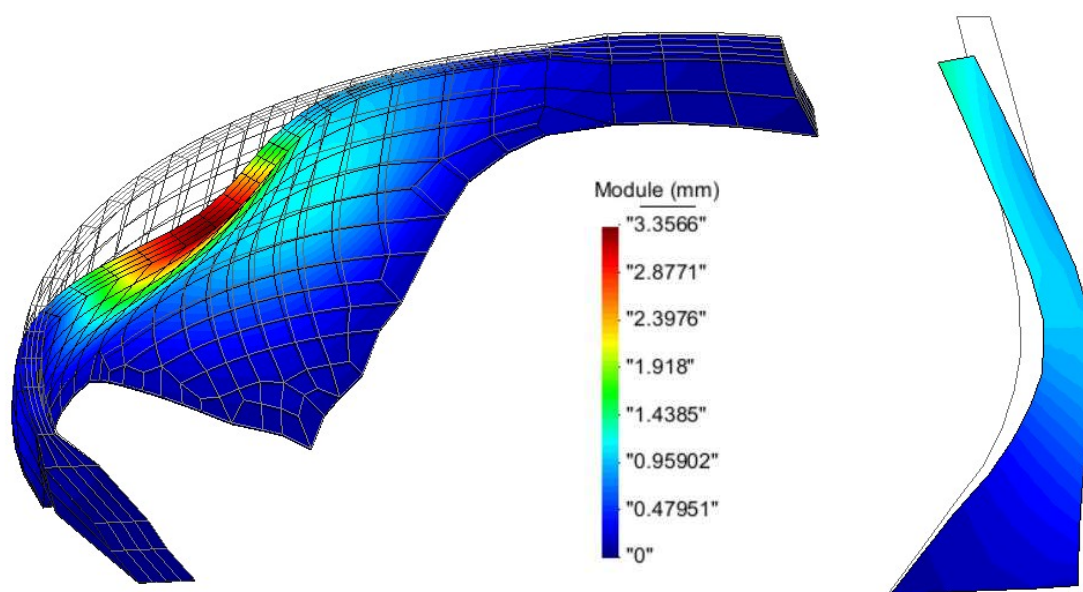


Figura 4.38 - Configuração deformada da abóbada (ampliada 2000 vezes) devida ao peso próprio do betão. Vista de jusante em perspectiva e corte transversal pelo bloco EF

M.D.

M.E.

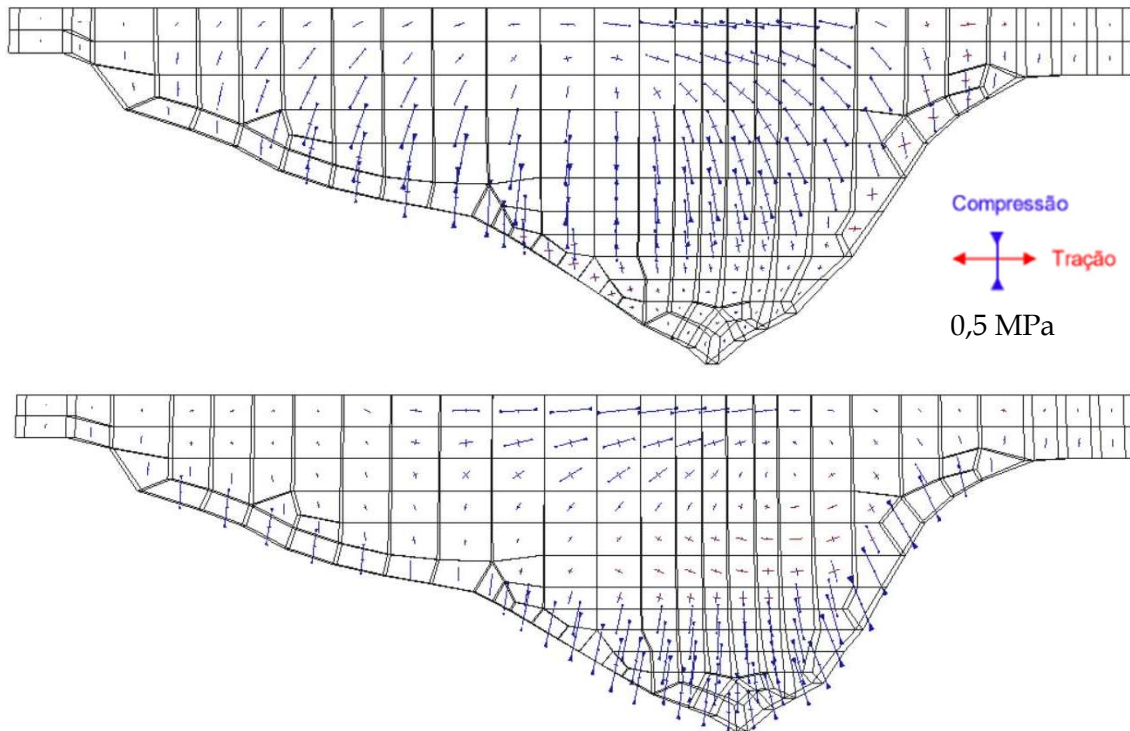


Figura 4.39 - Tensões principais na abóbada devidas à ação do peso próprio do betão. Representação nos paramentos de jusante (em cima) e de montante (em baixo)

4.5.4.3. Campo de tensões devido à pressão hidrostática

Na Figura 4.40 apresenta-se a deformada (ampliada 1000 vezes) da barragem devida à ação da pressão hidrostática no paramento de montante, para a albufera no nível de pleno armazenamento (NPA=1653,7 m). Os deslocamentos máximos situam-se na zona central da barragem, junto ao coroamento, com valores da ordem de 10 mm para jusante.

Na Figura 4.41 representam-se as tensões principais devidas à ação da pressão hidrostática, verificando-se que ocorrem tensões de tração verticais a meia altura do paramento de jusante e no paramento de montante, na zona de inserção na fundação, com valores máximos na margem direita de cerca de 2,0 MPa. Relativamente às tensões de compressão, verifica-se que existem compressões na direção dos arcos, aproximadamente horizontais, em ambos os paramentos, com valores próximos de 1,7 MPa na zona central, a meia altura, e tensões normais à fundação a jusante, na zona de inserção, com valores máximos de 2,2 MPa, na margem direita.

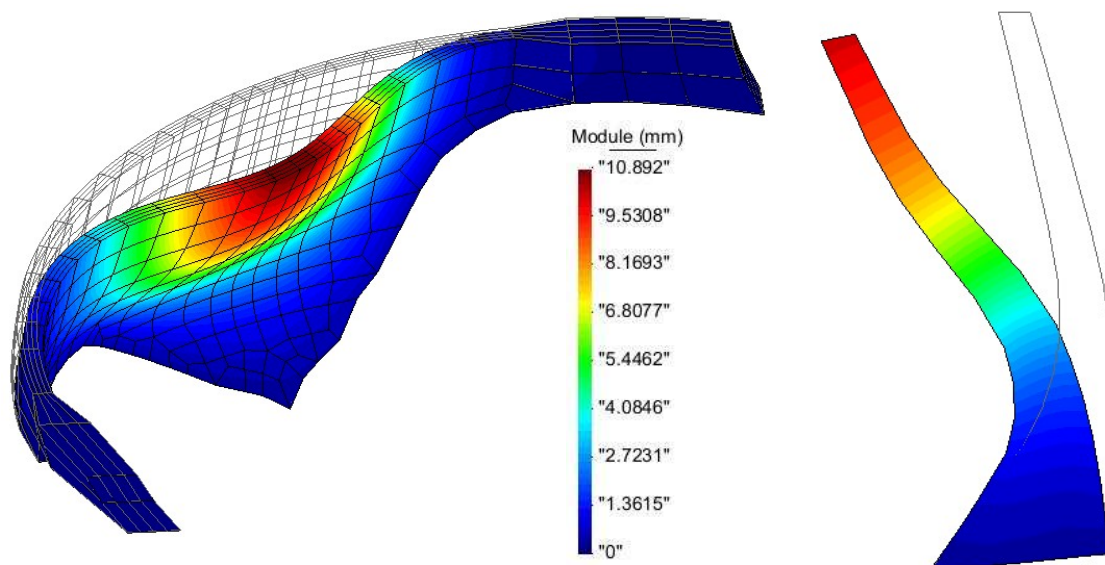


Figura 4.40 - Configuração deformada da abóbada (ampliada 1000 vezes) devida à pressão hidrostática ($h=1653,7$ m). Vista de jusante em perspectiva e corte transversal pelo bloco EF

M.D.

M.E.

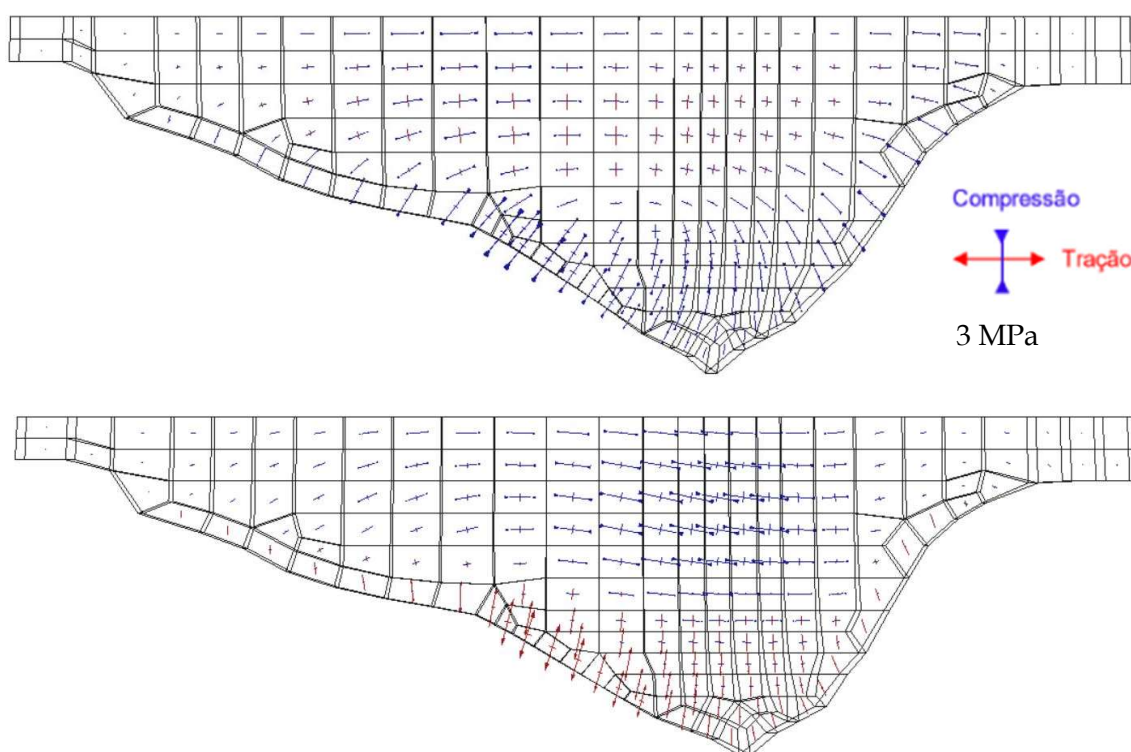


Figura 4.41 - Tensões principais na abóbada devidas à ação da pressão hidrostática ($h=1653,7$ m). Representação nos paramentos de jusante (em cima) e montante (em baixo)

4.5.4.4. Campo de tensões devido às variações de temperatura

Na Figura 4.42 representam-se as variações de temperatura correspondentes ao aquecimento da barragem, entre épocas fria (7 de janeiro de 2020) e quente (12 de julho de 2020), e nas Figuras 4.43 e 4.44 representam-se, respetivamente, a deformada (ampliada 250 vezes) da estrutura e as tensões principais devidas a esse aquecimento. O estado de tensão é, na generalidade, de compressão, verificando-se que as tensões de compressão máximas ocorrem perto da inserção na fundação, nas margens esquerda e direita, sendo da ordem de 5,6 MPa, no paramento de montante, e de 4,1 MPa, no paramento de jusante. As tensões de tração máximas ocorrem junto à inserção a jusante, nas margens esquerda e direita, com valores de cerca de 3,8 MPa, sendo perpendiculares à inserção. Refere-se que o aquecimento da obra se traduz num aumento de volume da estrutura, pelo que as tensões devidas ao aquecimento têm orientação e sentido semelhantes às originadas pela ação expansiva.

Na Figura 4.45 representam-se as variações de temperatura devidas ao arrefecimento da estrutura, entre épocas quente (14 de julho de 2019) e fria (7 de janeiro de 2020), e na Figura 4.46 a respetiva deformada (ampliada 250 vezes), verificando-se deslocamentos máximos de cerca de 22 mm. Na Figura 4.47 representam-se as tensões principais resultantes do arrefecimento, que são predominantemente de tração em ambos os paramentos, com valores máximos de cerca de 5,6 MPa, no paramento de montante, na zona da inserção. As tensões de compressão máximas ocorrem no paramento de jusante, junto da inserção, com valores da ordem de 3,8 MPa em ambas as margens.

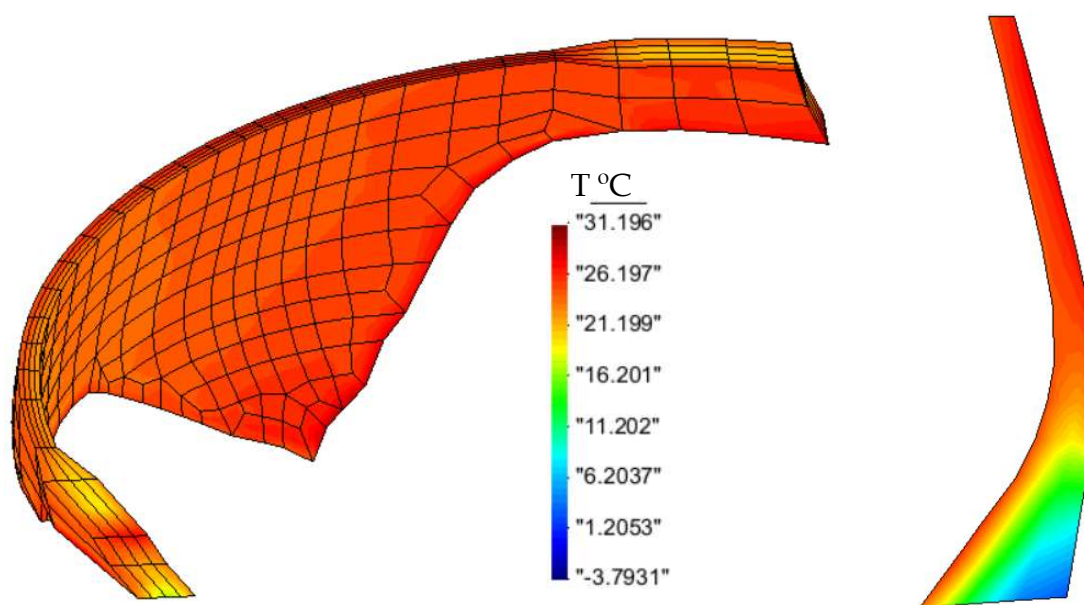


Figura 4.42 - Variações de temperatura correspondentes ao aquecimento da abóbada entre 12 de janeiro de 2020 e 12 de julho de 2020. Vista de jusante em perspectiva e corte transversal pelo bloco EF

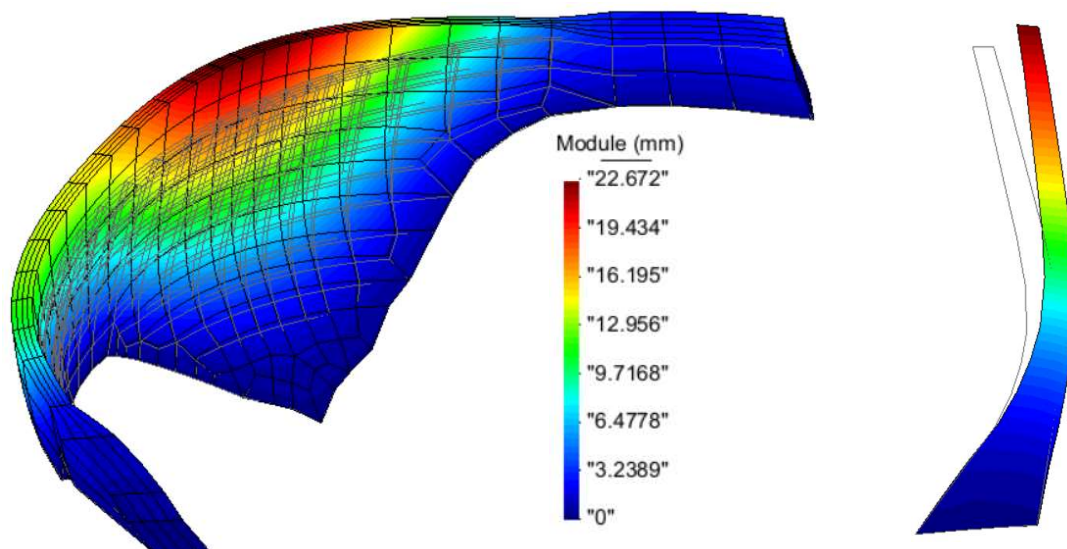


Figura 4.43 - Configuração deformada da abóbada (ampliada 250 vezes) devida ao aquecimento da barragem entre 12 de janeiro de 2020 e 12 de julho de 2020. Vista de jusante em perspectiva e corte transversal pelo bloco EF

M.D.

M.E.

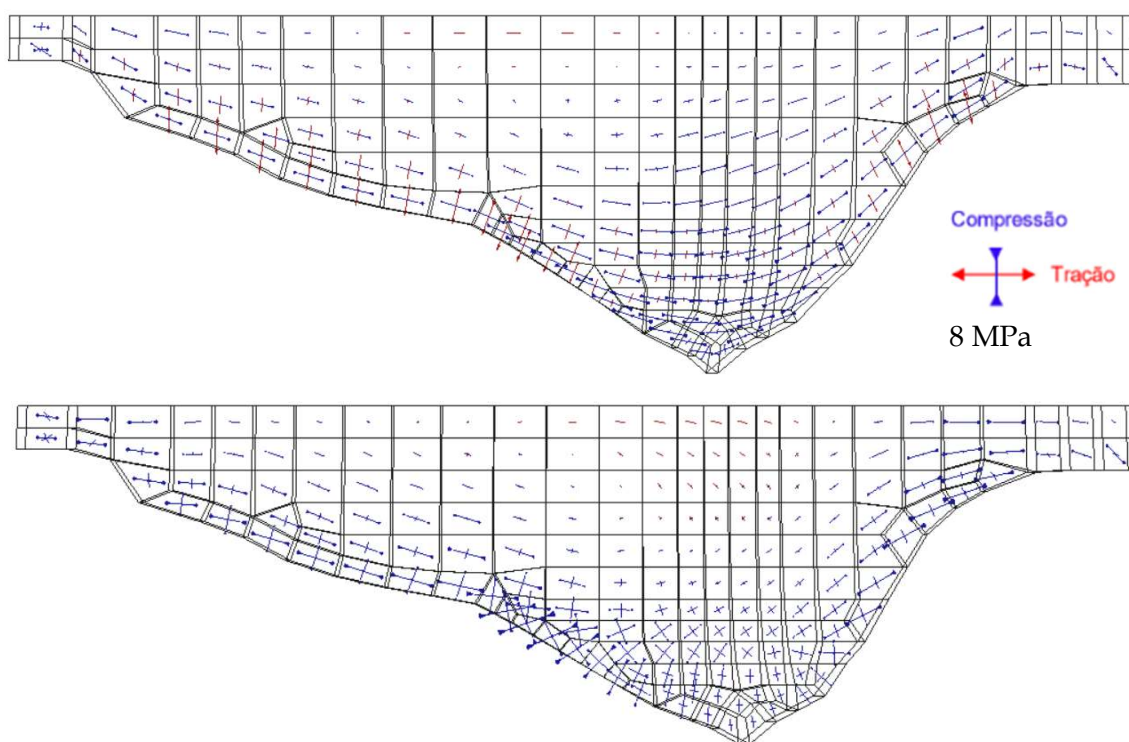


Figura 4.44 - Tensões principais devidas ao aquecimento da abóbada entre 12 de janeiro de 2020 e 12 de julho de 2020. Representação nos paramentos de jusante (em cima) e montante (em baixo)

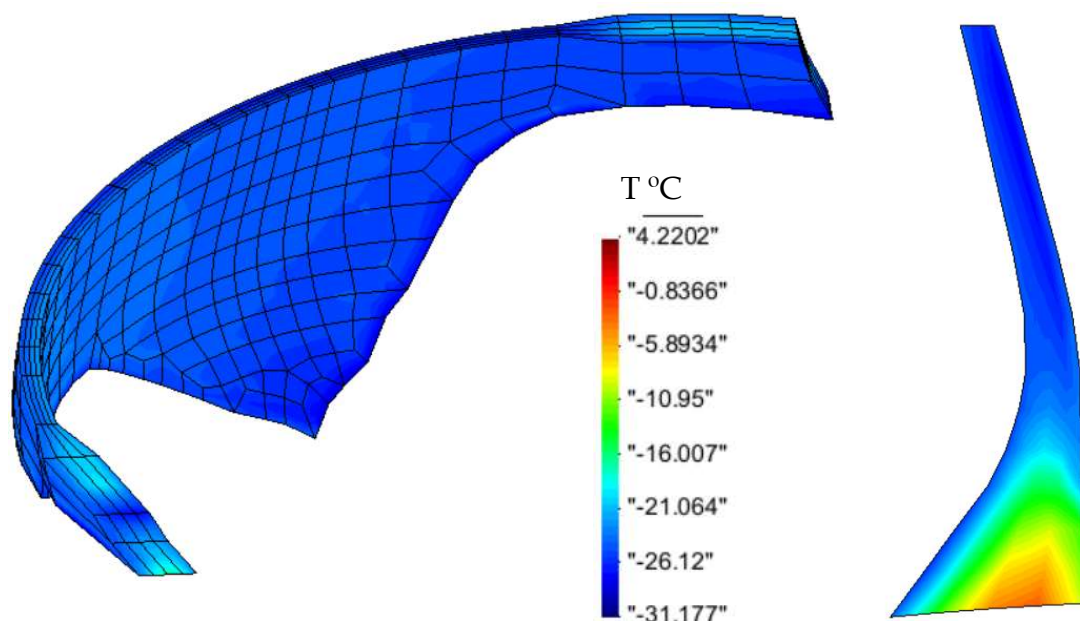


Figura 4.45 - Variações de temperatura correspondentes ao arrefecimento da abóbada entre 12 de julho de 2019 e 12 de janeiro de 2020. Vista de jusante em perspectiva e corte transversal pelo bloco EF

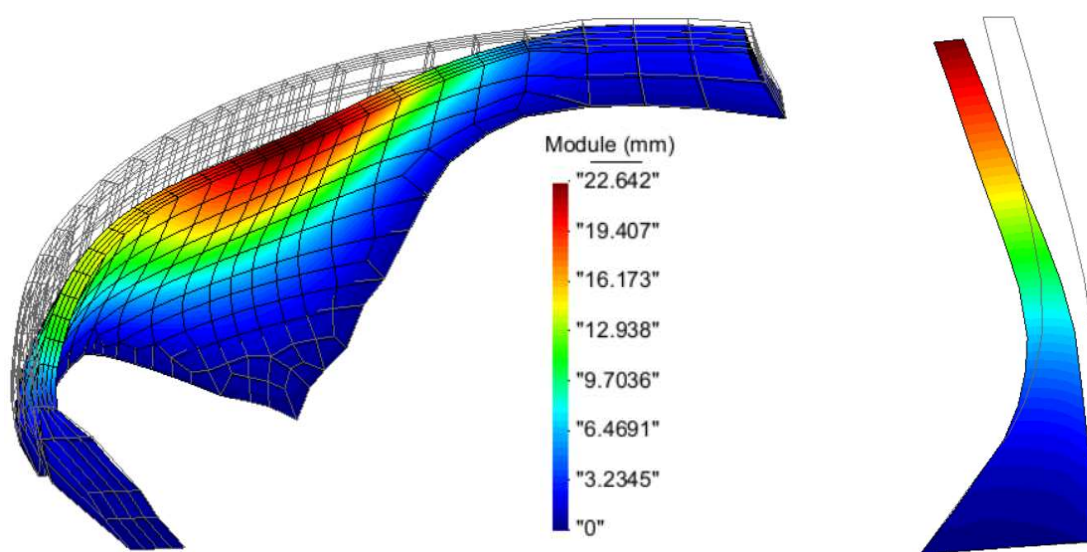


Figura 4.46 - Configuração deformada da abóbada (ampliada 250 vezes) devida ao arrefecimento da barragem entre 12 de julho de 2019 e 12 de janeiro de 2020. Vista de jusante em perspectiva e corte transversal pelo bloco EF

M.D.

M.E.

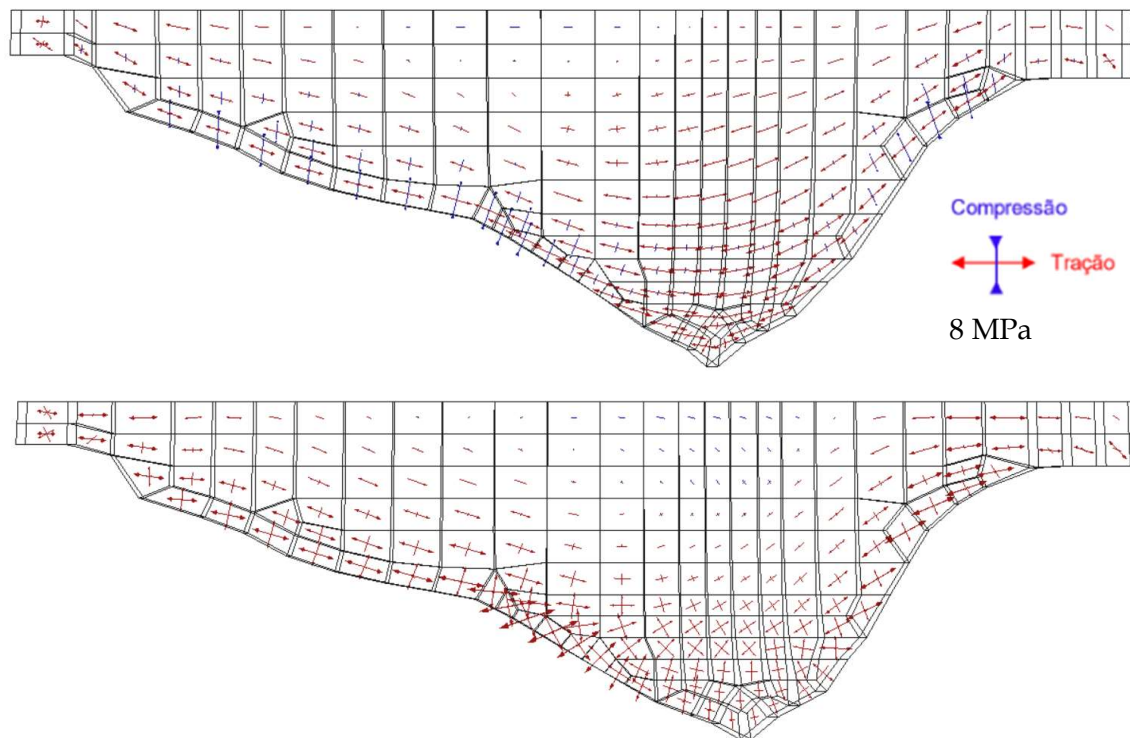


Figura 4.47 - Tensões principais devidas ao arrefecimento da abóbada entre 12 de julho de 2019 e 12 de janeiro de 2020. Representação nos paramentos de jusante (em cima) e montante (em baixo)

4.5.4.5. Campo de tensões devido à ação das expansões

Na Figura 4.48 e na Figura 4.49 representam-se, respetivamente, a configuração deformada (ampliada 100 vezes) e as tensões principais geradas pela ação das expansões, no início de 2020.

Como seria de esperar, devido ao aumento de volume da estrutura provocado pelas expansões, verificam-se deslocamentos verticais de empolamento e horizontais para montante, com valores de cerca de 54,0 mm, em módulo, na zona central da barragem.

O estado de tensão é predominantemente de compressão, com valores máximos de 9,6 MPa junto do encontro da margem esquerda. As tensões de tração são perpendiculares à inserção e apresentam valores máximos, a jusante, de cerca de 7,1 MPa, próximo do encontro da margem esquerda, e cerca de 5,2 MPa na margem direita. Verifica-se ainda a ocorrência de trações no fecho dos arcos a montante, com valores máximos de cerca de 2,7 MPa junto ao coroamento.

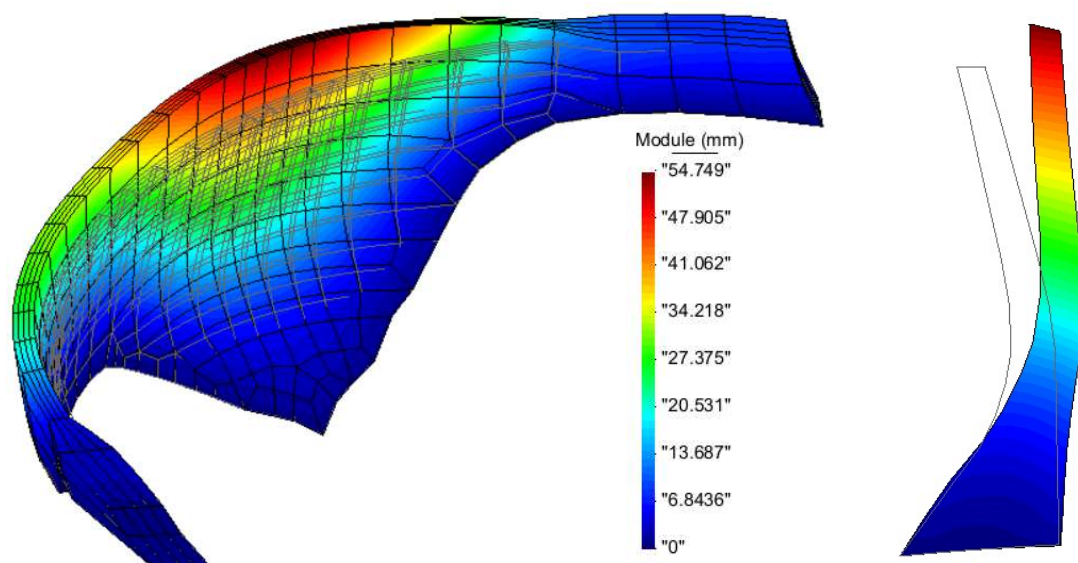


Figura 4.48 - Configuração deformada da abóbada (ampliada 100 vezes) devida à ação das expansões em 2020. Vista de jusante em perspectiva e corte transversal pelo bloco EF

M.D.

M.E.

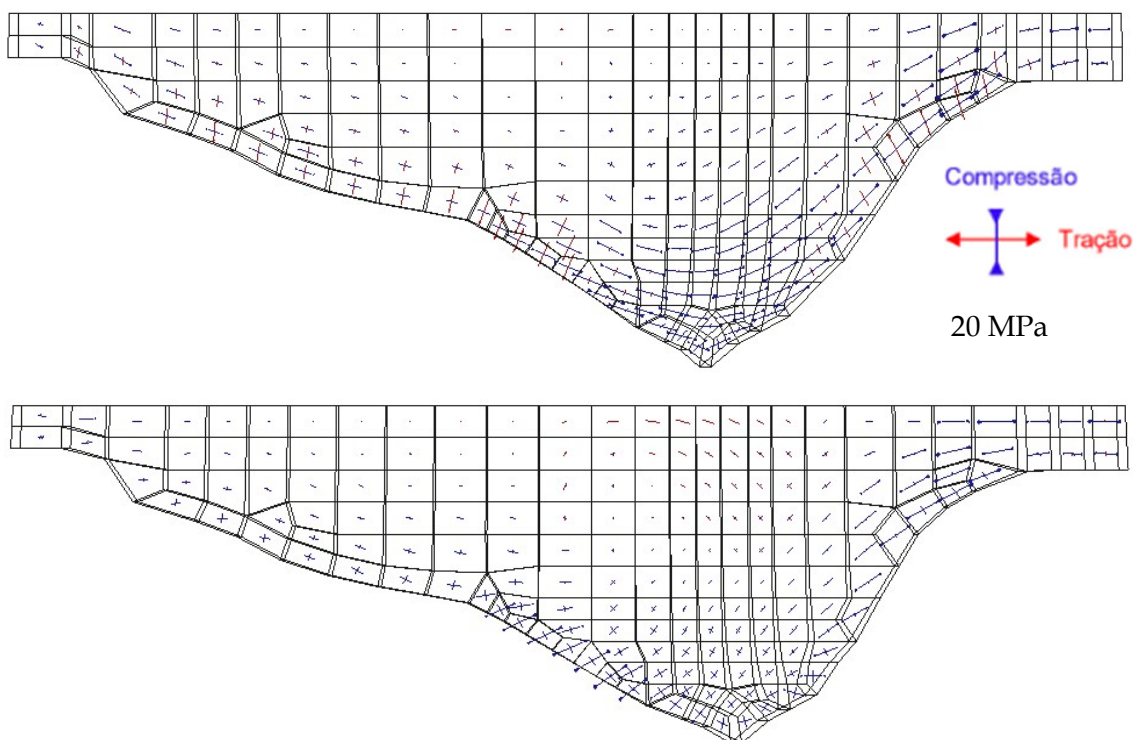


Figura 4.49 - Tensões principais na abóbada devidas à ação das expansões, em 2020. Representação nos paramentos de jusante (em cima) e montante (em baixo)

4.5.4.6. Campo de tensões devido às ações do peso próprio, pressão hidrostática e expansões

Na Figura 4.50 e na Figura 4.51 representam-se, respetivamente, a configuração deformada (ampliada 100 vezes) e as tensões principais devido à ação conjunta do peso próprio, da pressão hidrostática e das expansões, no início de 2020.

Os deslocamentos verticais de empolamento e horizontais para montante observados na deformada evidenciam a relevância que a ação expansiva tem no comportamento da estrutura, verificando-se deslocamentos, na zona central da barragem, com valores da ordem de 46,0 mm, em módulo.

O estado de tensão devido a este conjunto de ações é predominantemente de compressão, verificando-se que as maiores compressões são paralelas à inserção, da ordem de 9,8 MPa, junto ao encontro da margem esquerda, a jusante. As tensões de tração máximas (cerca de 5,6 MPa) também ocorrem próximo do encontro da margem esquerda a jusante, mas são perpendiculares à inserção. Na margem direita as trações máximas são cerca de 3,6 MPa.

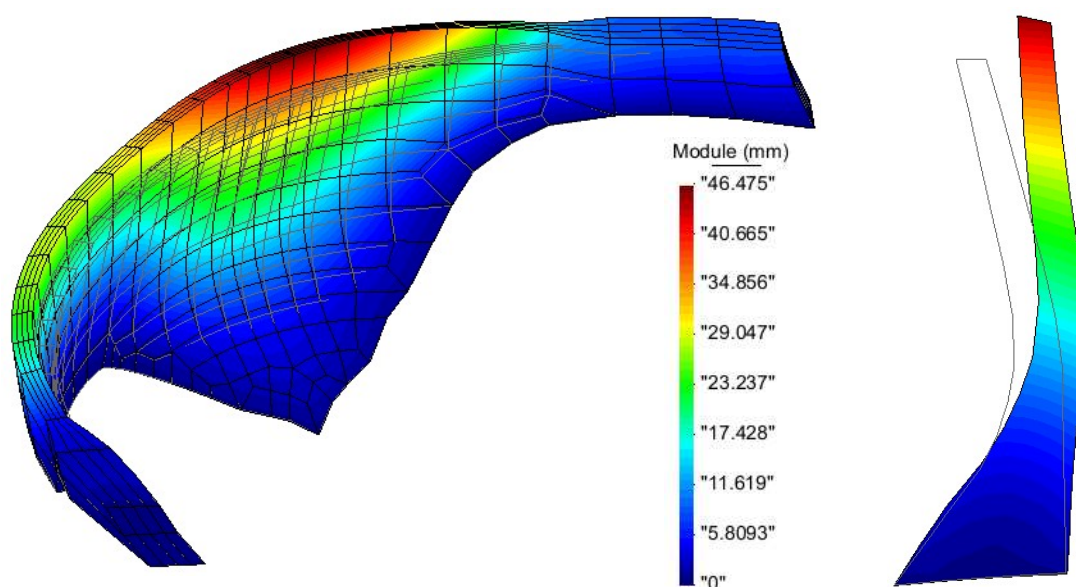


Figura 4.50 - Configuração deformada (ampliada 100 vezes) da abóbada devida à ação conjunta do peso próprio, pressão hidrostática e expansões no início de 2020. Vista de jusante em perspetiva e corte transversal pelo bloco EF

M.D.

M.E.

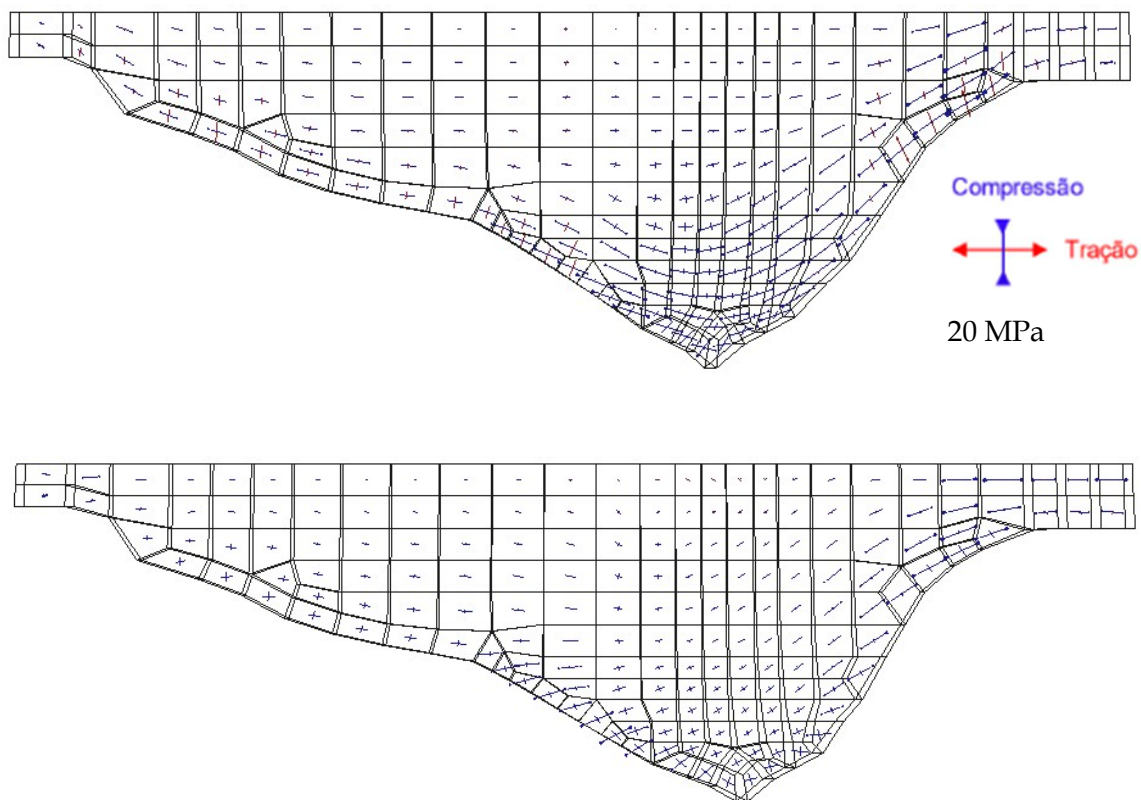


Figura 4.51 - Tensões principais na abóbada devidas às ações do peso próprio, pressão hidrostática e expansões, no início de 2020. Representação nos paramentos de jusante (em cima) e montante (em baixo)

INFLUÊNCIA DO NÍVEL DA ALBUFEIRA NAS EXPANSÕES E NOS SEUS EFEITOS ESTRUTURAIS

5.1. Considerações gerais

Com vista a aumentar o conhecimento sobre a influência de grandes variações sazonais de temperatura e de tensão no betão, associadas à descida do nível da albufeira durante períodos significativos do ano, no desenvolvimento das expansões e dos seus efeitos estruturais, utilizou-se a barragem do Covão do Meio como caso de estudo.

A albufeira do Covão do Meio tem um regime sazonal de exploração, estando cheia no inverno e vazia no verão. Esta situação particular pode potenciar o desenvolvimento do processo expansivo durante o verão, pelas seguintes razões cumulativas:

- 1) Efeito do aumento da temperatura do betão - com o esvaziamento da albufeira durante a época quente, o paramento de montante da barragem fica exposto a maiores temperaturas e à radiação solar;
- 2) Efeito da diminuição das tensões de confinamento - o esvaziamento da albufeira conduz à descompressão da estrutura, nomeadamente na direção dos arcos, o que incrementa o desenvolvimento das expansões estruturais nesta direção.

Para estudar a influência destes fatores na barragem, foi considerado um cenário (designado por cenário B) em que a albufeira se mantém a uma cota elevada, próxima do NPA (1653,3 m), durante toda a vida da obra.

Com base neste cenário B foram realizados novos cálculos térmico e estrutural ao longo do tempo. No cálculo térmico foram consideradas as ações térmicas já definidas em 4.3.1, admitindo que a albufeira se mantém à cota 1653,3 m. No cálculo estrutural foram tidas em conta as ações do peso próprio do betão, da pressão hidrostática (com a albufeira sempre à cota 1653,3 m), as ações expansivas definidas no ponto 2.4 e o campo de temperaturas obtido no cálculo térmico relativo a este novo cenário.

Os resultados obtidos neste cenário são comparados com a situação que efetivamente ocorreu, apresentada no capítulo 4, designada neste capítulo por cenário A.

5.2. Resultados dos modelos térmicos e estrutural para os cenários A e B

5.2.1. Temperaturas

Na Figura 5.1 apresenta-se, numa vista de jusante e em corte, os resultados do cálculo térmico em época quente para o cenário B.

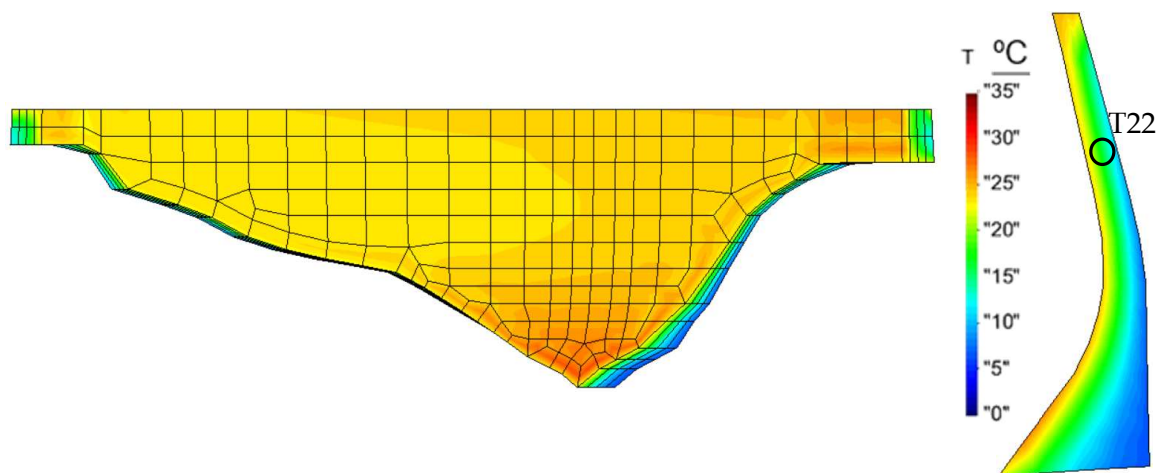


Figura 5.1 - Distribuição de temperaturas no corpo da abóbada no cenário B. Vista de jusante e corte transversal pelo bloco EF

Obteve-se um gradiente de temperatura significativo entre os paramentos de jusante (mais quente) e de montante (mais frio), o que contrasta com os resultados obtidos para o cenário A (Figura 4.6), em que a temperatura era muito semelhante nos dois paramentos.

Na Figura 5.2 apresenta-se a evolução da temperatura ao longo do ano no ponto correspondente à posição do termómetro T22 (identificada no corte transversal da Figura 5.1), para os cenários A e B. Verifica-se que a variação sazonal da temperatura no betão neste ponto, localizado a meia espessura do perfil, é muito mais significativa no cenário A (aproximadamente 10°C maior que a variação que ocorre no cenário B). Como esperado, as diferenças surgem a partir de junho, com a descida do nível da albufeira.

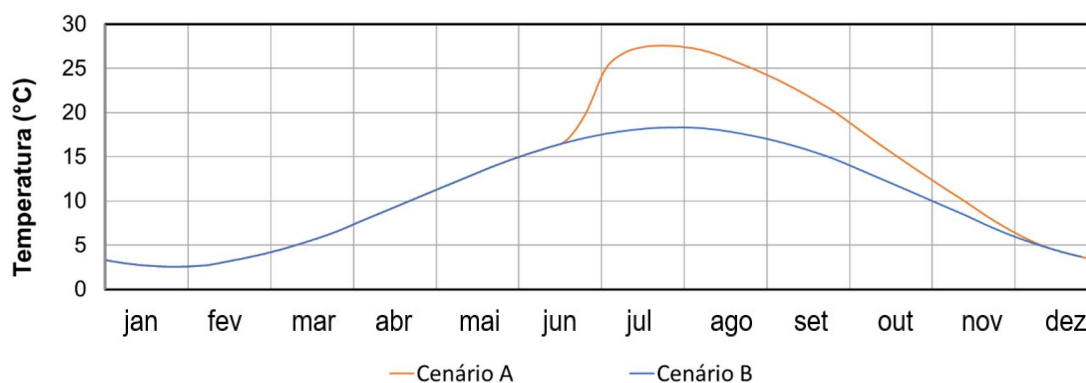


Figura 5.2 -Evolução da temperatura ao longo do ano, para os cenários A e B, no ponto correspondente ao termómetro T22, à cota 1643,90 m

5.2.2. Deslocamentos

Nas Figuras 5.3 e 5.4 representa-se, respetivamente, a evolução dos deslocamentos radial e vertical, para os cenários A e B, em pontos correspondentes à base de leitura superior do fio de prumo 2 e à marca de nivelamento DE, verificando-se que os deslocamentos radiais e verticais calculados para o cenário A são, respetivamente, cerca de 35% e 20% superiores aos deslocamentos calculados para o cenário B, no final de 2019.

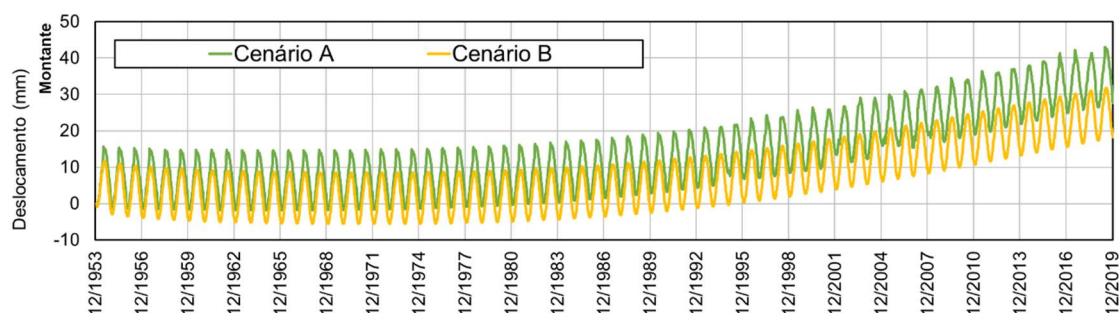


Figura 5.3 - Evolução do deslocamento radial, para os cenários A e B, no ponto correspondente à base de leitura superior do fio de prumo 2, à cota de 1653,90 m

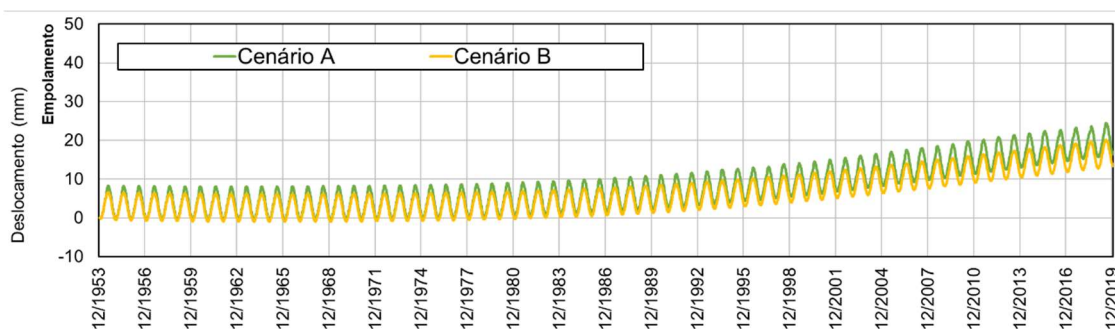


Figura 5.4 - Evolução dos deslocamentos verticais, para os cenários A e B, no ponto correspondente à marca de nivelamento DE

Para separar a influência das tensões de confinamento da influência da variação da temperatura nos deslocamentos da obra, foi realizado um cálculo estrutural adicional para o cenário B (mantendo a albufera à cota 1653,3 m), em que se consideraram as expansões livres calculadas no cenário A (este cenário é designado por B*).

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam-se os deslocamentos obtidos para os diversos cenários, em pontos correspondentes aos dispositivos de observação instalados na obra, nomeadamente fios de prumo, extensómetros de fundação, tacos de nivelamento e marcas de geodesia, bem como a quantificação, relativamente aos deslocamentos calculados, dos efeitos de diminuição das tensões de confinamento e de aumento da temperatura no betão.

Tabela 5.1 – Deslocamentos verticais para os vários cenários considerados e quantificação dos efeitos da diminuição das tensões de confinamento e do aumento da temperatura no betão

	Cenário A	Cenário B*	Cenário B	Efeito da diminuição do confinamento (A - B*)		Efeito do aumento da temperatura (B* - B)		Efeito do confinamento e temperatura
	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	%
AB	2,8	2,8	2,5	0,0	-0,6	0,4	12,3	11,7
BC	6,6	6,6	6,0	0,0	-0,1	0,7	9,7	9,6
CD	12,1	12,0	10,8	0,2	1,4	1,2	9,7	11,1
DE	16,9	16,4	14,6	0,5	2,9	1,9	10,9	13,8
EF	24,1	23,4	20,3	0,6	2,7	3,2	13,1	15,8
FG	19,9	19,8	17,4	0,1	0,7	2,4	12,1	12,8
GH	11,7	11,8	10,3	-0,1	-0,9	1,5	13,0	12,1
HI	7,7	7,7	6,5	0,0	0,1	1,2	15,3	15,4
3.13	13,4	13,5	11,9	0,1	0,9	1,6	12,3	13,2

Tabela 5.2 - Deslocamentos horizontais para os vários cenários e quantificação dos efeitos da diminuição das tensões e do aumento da temperatura no betão

	Cenário A	Cenário B*	Cenário B	Efeito da diminuição do confinamento (A - B*)		Efeito do aumento da temperatura (B* - B)		Efeito do confinamento e temperatura
	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	%
FPI1	46,1	40,4	38,4	5,7	12,3	2,0	4,3	16,7
FPD2	30,1	26,7	26,0	3,3	11,1	0,7	2,4	13,5
CD53B	27,5	26,3	25,5	1,1	4,1	0,8	3,0	7,2
CD43B	8,1	7,3	6,4	0,8	9,7	0,9	11,4	21,1
DE53B	30,7	27,6	26,8	3,1	10,1	0,9	2,9	12,9
DE43B	14,7	12,0	10,3	2,7	18,5	1,7	11,6	30,1
EF53B	45,0	38,2	36,2	6,8	15,1	2,0	4,5	19,6
EF43B	25,5	20,0	15,7	5,5	21,6	4,3	16,9	38,5
FG53B	42,9	38,8	37,7	4,1	9,5	1,1	2,6	12,1
FG43B	14,3	11,7	9,2	2,6	17,9	2,5	17,9	35,8

Verifica-se, como esperado, que os deslocamentos calculados são até cerca de 40% maiores no cenário A do que no cenário B. Nos deslocamentos verticais esta diferença deve-se principalmente ao efeito da temperatura do betão (entre 10% e 15%) e, em menor medida, ao efeito do confinamento (menos de 3%), uma vez que as compressões verticais devidas à pressão hidrostática estão limitadas a zonas localizadas junto à inserção, a jusante. Por outro lado, nos deslocamentos radiais as diferenças encontradas resultam do efeito de confinamento (até 22%) e da temperatura (até 18%).

5.2.3. Expansões livres e estruturais

Na Figura 5.5 apresentam-se as expansões livres calculadas para o cenário B, que são menores que as calculadas para o cenário A (apresentadas no ponto 4.4.2), principalmente nas zonas próximas do paramento de montante, sendo esta diferença justificada pela menor temperatura média do betão nestas zonas da obra, já que o nível da albufeira mantém-se a uma cota elevada.

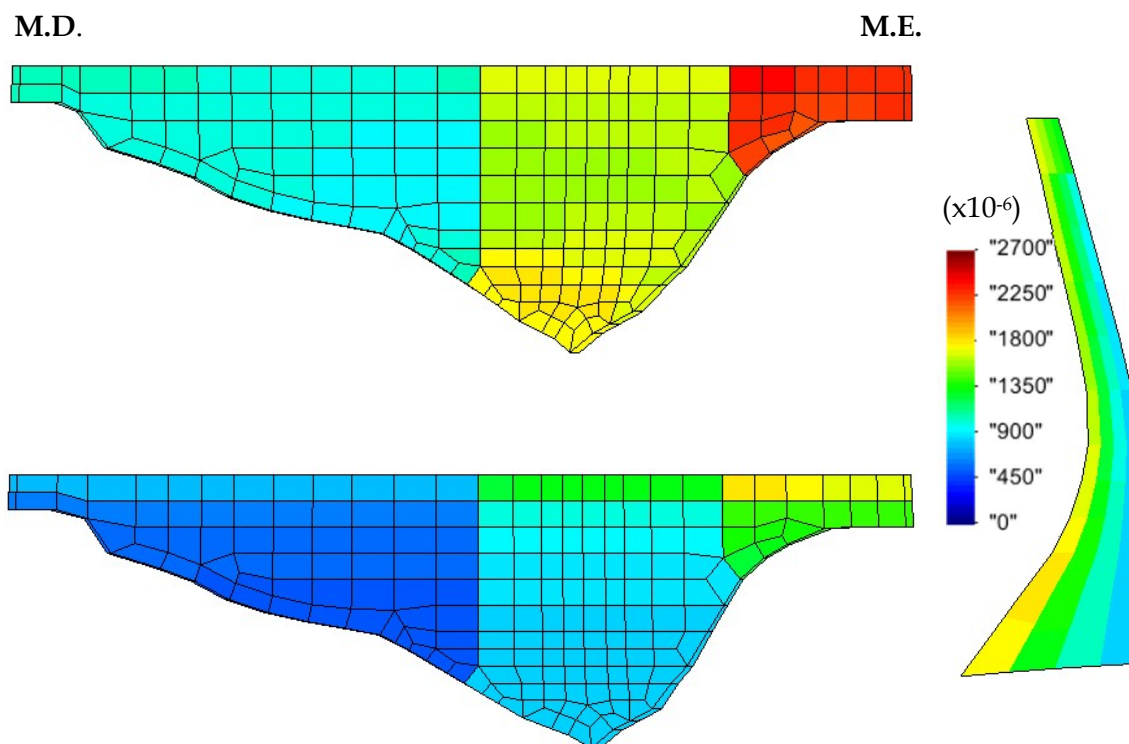


Figura 5.5 - Expansões livres calculadas para o cenário B, em dezembro de 2020. Alçados dos paramentos de jusante (em cima) e de montante (em baixo) e corte transversal no bloco EF

Nas Figuras 5.6 e 5.7 apresenta-se a evolução das expansões livres, desde o primeiro enchimento da albufeira até 2020 e durante o ano de 2020, em 4 pontos situados na junta E, dos quais dois estão próximos do coroamento, à cota 1651,0 m, a montante e a jusante, e os outros dois estão juntos da inserção, à cota 1632,0 m, também a montante e a jusante.

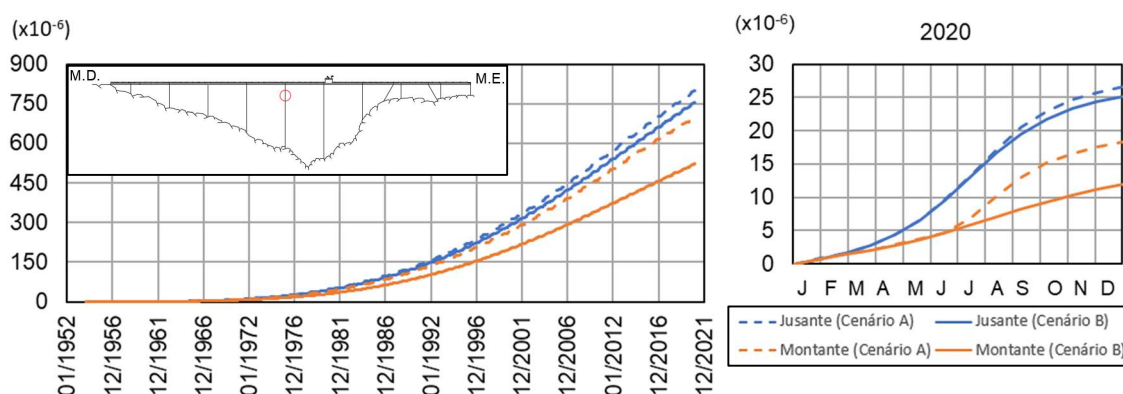


Figura 5.6 - Evolução das expansões livres em pontos à cota 1651,0 m (jusante e montante), para os cenários A e B, desde o primeiro enchimento até ao final de 2020 (à esquerda) e durante 2020 (à direita)

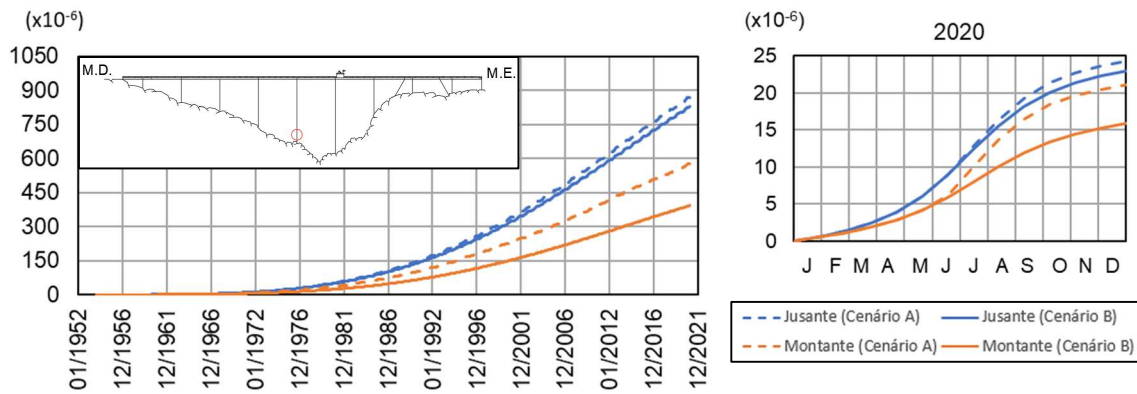


Figura 5.7 - Evolução das expansões livres em pontos à cota 1632,0 m (jusante e montante), para os cenários A e B, desde o primeiro enchimento até ao final de 2020 (à esquerda) e durante 2020 (à direita)

De um modo geral, no paramento de jusante calcularam-se expansões livres semelhantes para os dois cenários, enquanto nos pontos do paramento de montante as expansões livres são menores no cenário B (devido à menor temperatura desse paramento), verificando-se que durante 2020 ocorrem diferenças da ordem de 5×10^{-6} (cerca de 25%).

Nas Figuras 5.8 à 5.11 apresenta-se a evolução das expansões estruturais nos 4 pontos situados na junta E, anteriormente referidos, desde o primeiro enchimento da albufera até 2020 e durante o ano de 2020, para os cenários A e B* (as expansões livres são iguais nestes dois cenários, o que permite avaliar de forma independente a influência das tensões de confinamento na evolução das expansões estruturais).

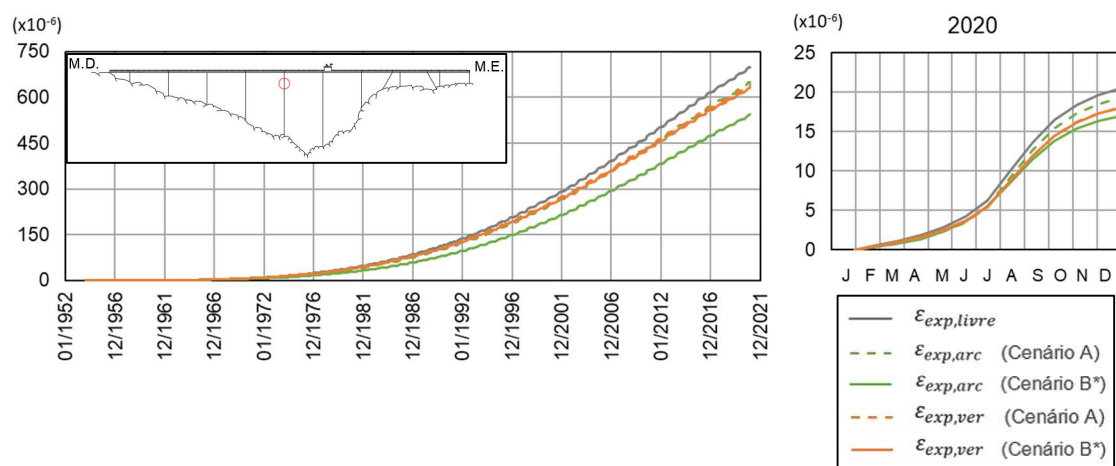


Figura 5.8 - Evolução das expansões estruturais tangenciais e verticais em pontos à cota 1651,0 m (montante), para os cenários A e B, desde o primeiro enchimento até ao final de 2020 (à esquerda) e durante 2020 (à direita)

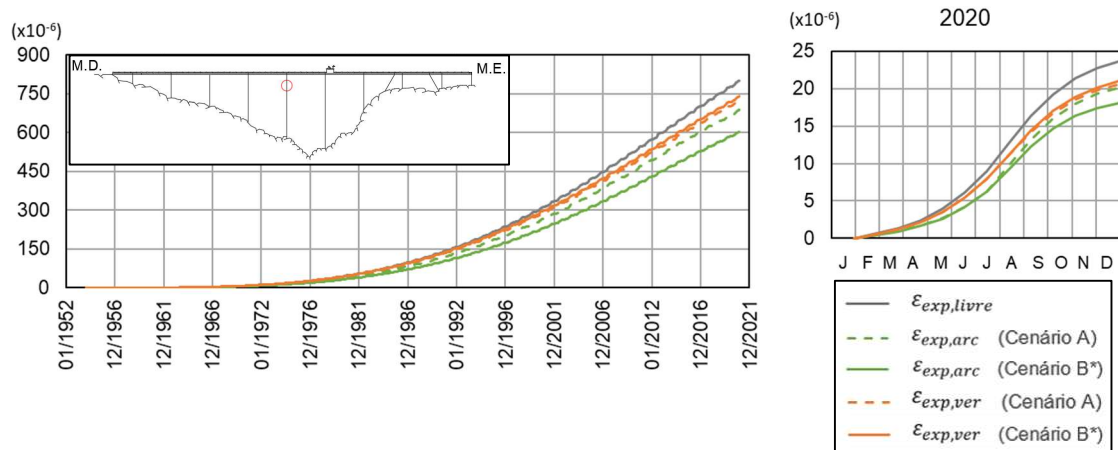


Figura 5.9 - Evolução das expansões estruturais tangenciais e verticais em pontos à cota 1651,0 m (jusante), para os cenários A e B, desde o primeiro enchimento até ao final de 2020 (à esquerda) e durante 2020 (à direita)

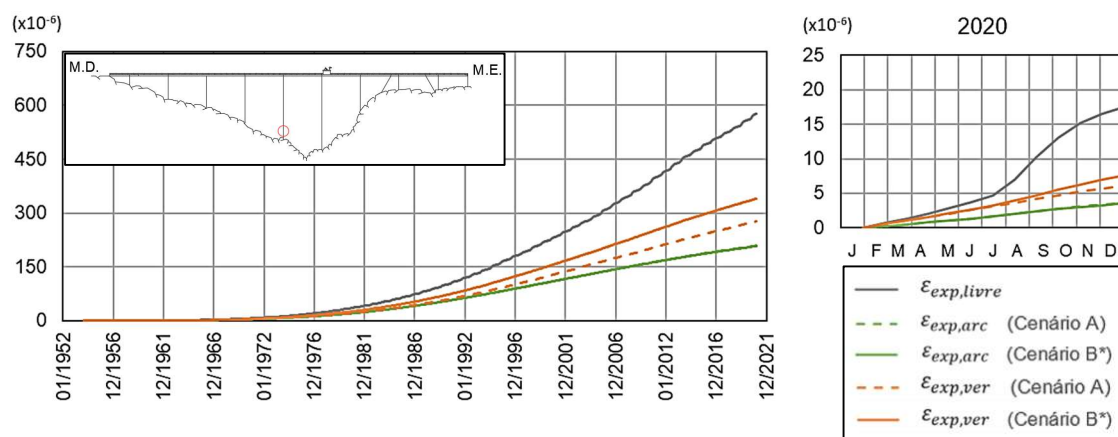


Figura 5.10 - Evolução das expansões estruturais tangenciais e verticais em pontos à cota 1632,0 m (montante), para os cenários A e B, desde o primeiro enchimento até ao final de 2020 (à esquerda) e durante 2020 (à direita)

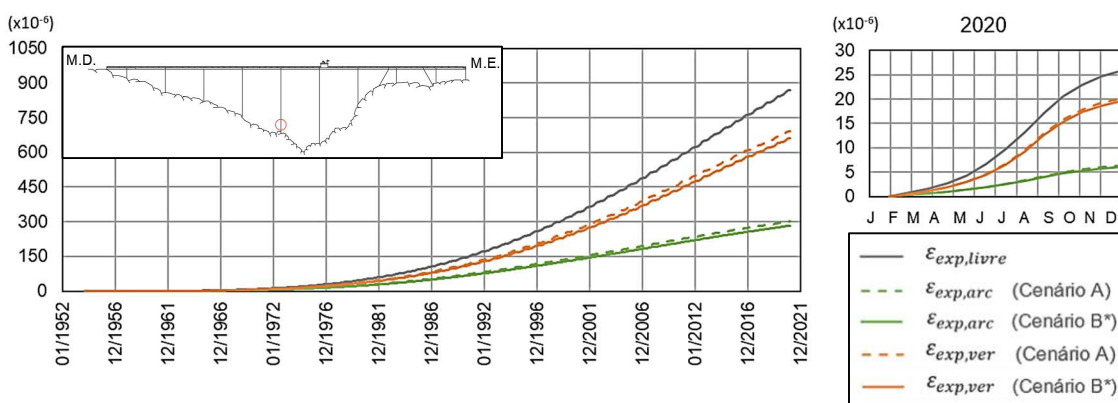


Figura 5.11 - Evolução das expansões estruturais tangenciais e verticais em pontos à cota 1632,0 m (jusante), para os cenários A e B, desde o primeiro enchimento até ao final de 2020 (à esquerda) e durante 2020 (à direita)

Verifica-se, nos pontos à cota 1651,0 m, que as expansões na direção dos arcos ($\epsilon_{exp,arc}$) são menores no cenário B*, devido ao efeito de confinamento proporcionado pelos efeitos da pressão hidrostática, que permanece constante ao longo do tempo, restringindo a evolução das expansões estruturais nesta direção. Relativamente às expansões verticais ($\epsilon_{exp,ver}$), como

a pressão hidrostática não provoca tensões verticais de compressão em zonas significativas da obra, obtiveram-se curvas semelhantes para ambos os cenários, que são muito próximas das expansões livres.

Para o ponto junto à fundação a montante, verifica-se que as expansões verticais são superiores no cenário B* (quando a albufeira permanece a uma cota elevada), o que resulta de a pressão hidrostática provocar trações verticais no pé de montante, que aliviam as compressões originadas pelo peso próprio, observando-se um efeito de descompressão nesta zona localizada da obra. Para a mesma cota, a jusante, obteve-se um efeito contrário, sendo as expansões no cenário A superiores às obtidas no cenário B*. Refere-se, contudo, que para este ponto as diferenças entre cenários são reduzidas, uma vez que o confinamento nesta zona é condicionado pelas compressões instaladas devido ao peso próprio e às próprias expansões. Relativamente às expansões nos arcos, verifica-se que são muito semelhantes entre cenários (uma vez que nesta zona da obra não existem tensões significativas na direção dos arcos devidas à pressão hidrostática). Verifica-se, no entanto, que existe um efeito muito significativo na restrição das expansões livres nesta direção, que se deve, essencialmente, às compressões paralelas à inserção devidas à ação das próprias expansões.

PREVISÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO

6.1. Aspetos gerais

No seguimento da análise e interpretação do comportamento observado da barragem do Covão do Meio, entendeu-se ser útil realizar a previsão do comportamento para um horizonte temporal de 20 anos, tendo em conta que se trata de um caso diferente no que respeita ao regime de exploração da albufeira. Por outro lado, existem muitas incertezas no que toca à evolução das expansões do betão.

Em relação aos materiais, adotaram-se, para a previsão do comportamento, as propriedades mecânicas e térmicas anteriormente referidas (pontos 4.3.2 e 4.5.2).

Relativamente às ações, foram consideradas as mesmas aproximações para a temperatura do ar e da água (4.3.1). A evolução do nível da albufeira até 2040 foi estimada com a metodologia proposta em 4.5.1.2. As expansões futuras foram estimadas com base em dois cenários de evolução, um otimista e um pessimista.

6.2. Previsão da evolução das expansões até 2040

Como já referido, o betão da obra apresenta taxas significativas de evolução das expansões, parecendo razoável admitir que prossigam no futuro.

Com efeito, através dos estudos referidos no ponto 3.3, confirmou-se, por via de ensaios experimentais, que ainda subsiste um potencial remanescente de expansão do betão, embora não se conheça a magnitude deste potencial a longo prazo.

Assim, para balizar o comportamento futuro da obra até 2040, consideraram-se dois cenários de desenvolvimento das expansões, um otimista, em que se assumiu que as expansões estabilizam num horizonte temporal de médio prazo, e um pessimista, em que se considerou que o potencial remanescente de expansão tem maior expressão.

A estimativa das expansões até 2040 foi realizada com base nas curvas de expansões livres (para a temperatura de referência de 20°C) e no zonamento usados para interpretar o comportamento da obra até 2020, mas admitindo que a partir dessa data as curvas correspondentes aos cenários pessimista e otimista divergem em cerca de $\pm 20\%$ até 2040. Na Figura 6.1 representam-se graficamente as curvas adotadas e na Tabela 6.1 apresentam-se os seus parâmetros.

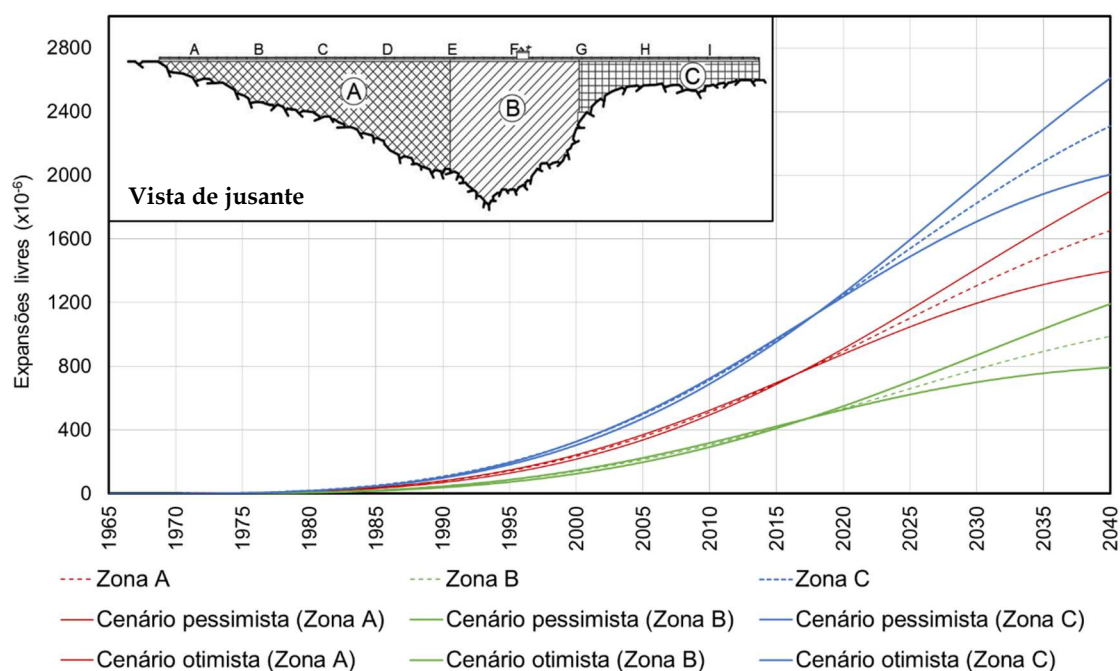


Figura 6.1 - Curvas estimadas de evolução das expansões livres até 2040, nas três zonas consideradas, considerando cenários otimista e pessimista (a traço interrompido está o prolongamento do cenário base considerado até 2020)

Tabela 6.1 - Parâmetros das curvas de evolução das expansões livres, para os cenários pessimista e otimista

Zona	A		B		C	
Cenário	Pessimista	Otimista	Pessimista	Otimista	Pessimista	Otimista
n	3,7	3,7	3,75	3,8	3,65	3,8
t_{hs} (dias)	24000	19800	24600	19100	24000	20000
ε_{∞} ($\times 10^{-6}$)	2600	1500	1700	825	3600	2150

Com base nos modelos térmicos e estrutural apresentados no capítulo 4 e na estimativa da evolução das ações, obteve-se a resposta da abóbada, em termos de deslocamentos e de tensões, para os dois cenários. Nos pontos seguintes apresentam-se os deslocamentos radiais e verticais calculados, bem como os campos de tensões.

6.3. Deslocamentos radiais

Nas Figuras 6.2 e 6.3 representam-se os deslocamentos radiais calculados, em pontos correspondentes às bases de leitura dos fios de prumo, entre 1999 e 2040, para os cenários pessimista e otimista, incluindo-se ainda os valores observados até 2020.

Na base de leitura do fio de prumo 1, à cota 1653,90 m, o deslocamento em 2040 é da ordem de 80 mm, para o cenário pessimista, e de 50 mm, para o cenário otimista. Como termo de comparação, em 2020, os deslocamentos observados nesta base foi de cerca de 40 mm.

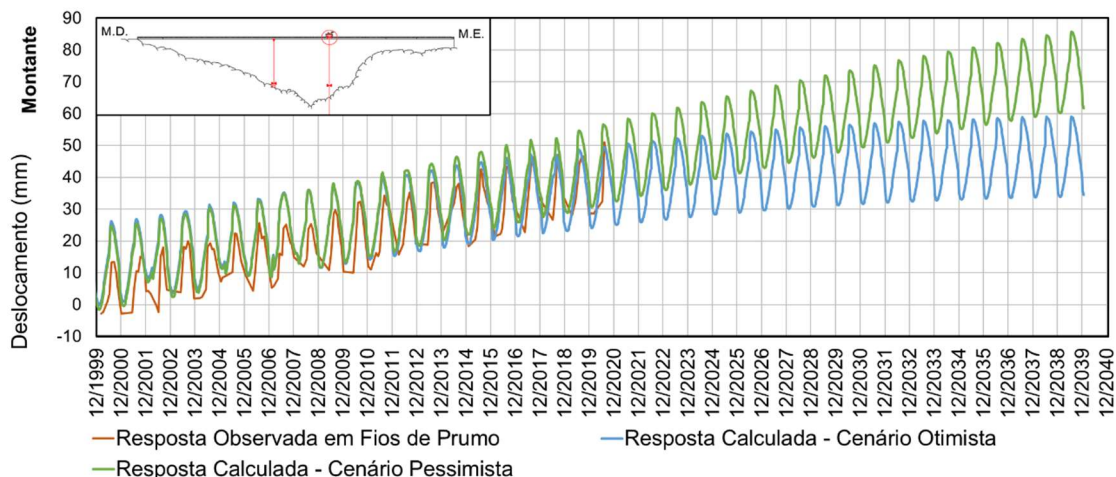


Figura 6.2 - Deslocamentos radiais previstos até 2040 no ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo 1, à cota 1653,90 m, e valores observados até 2020

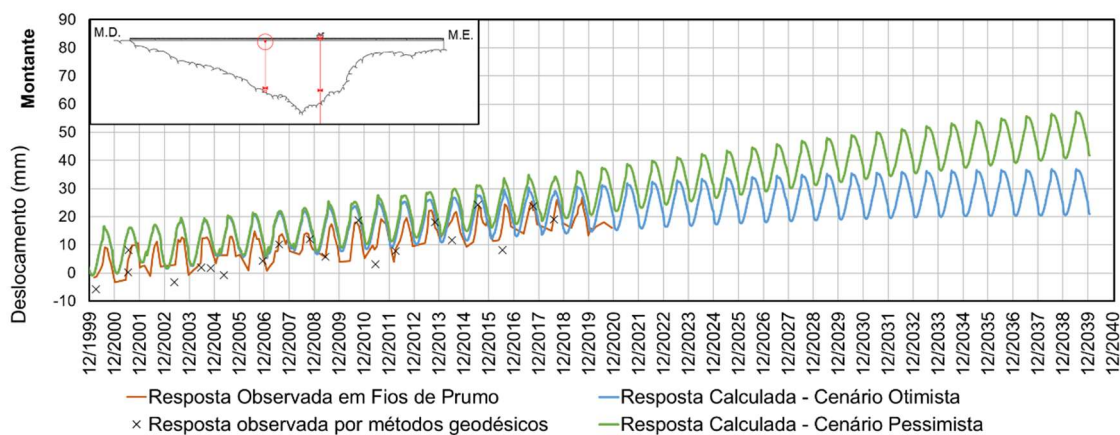


Figura 6.3 - Deslocamentos radiais previstos até 2040 no ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo 2, à cota 1653,90 m, e valores observados até 2020

6.4. Deslocamentos verticais

Nas Figuras 6.4 à 6.6, representa-se a evolução dos deslocamentos verticais calculados no coroamento, em pontos correspondentes às marcas de nivelamento de cada bloco, entre 1982 e 2040, para os cenários pessimista e otimista, bem como os deslocamentos observados até 2020. Os maiores deslocamentos previstos são nos blocos centrais da abóbada, designadamente nos blocos EF e FG, com valores entre 30 mm (cenário otimista) e 40 mm (cenário pessimista) em 2040.

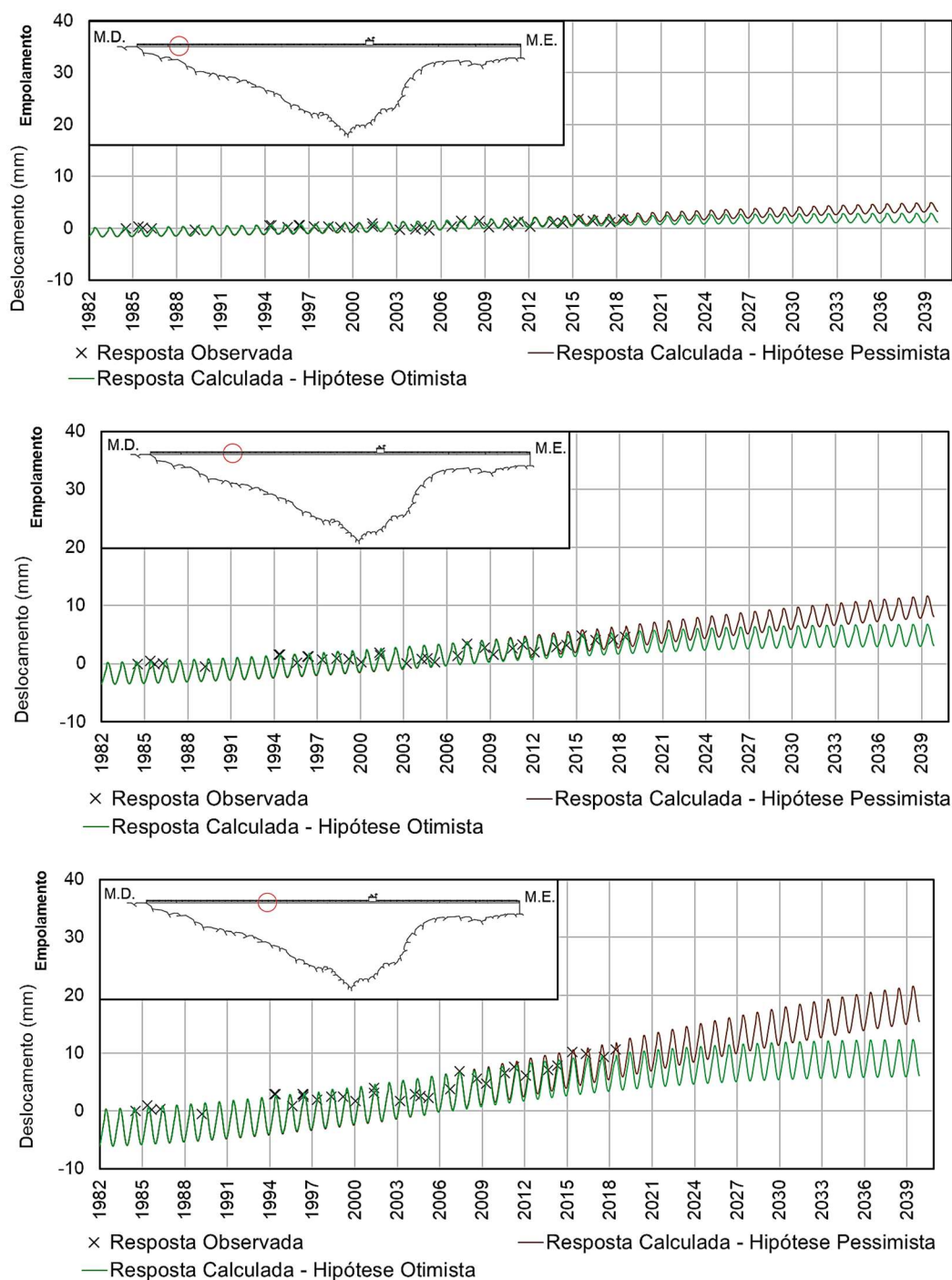


Figura 6.4 - Deslocamentos verticais previstos até 2040, para os cenários otimista e pessimista no ponto correspondente à marca de nivelamento no bloco AB, BC e CD, e valores observados até 2020

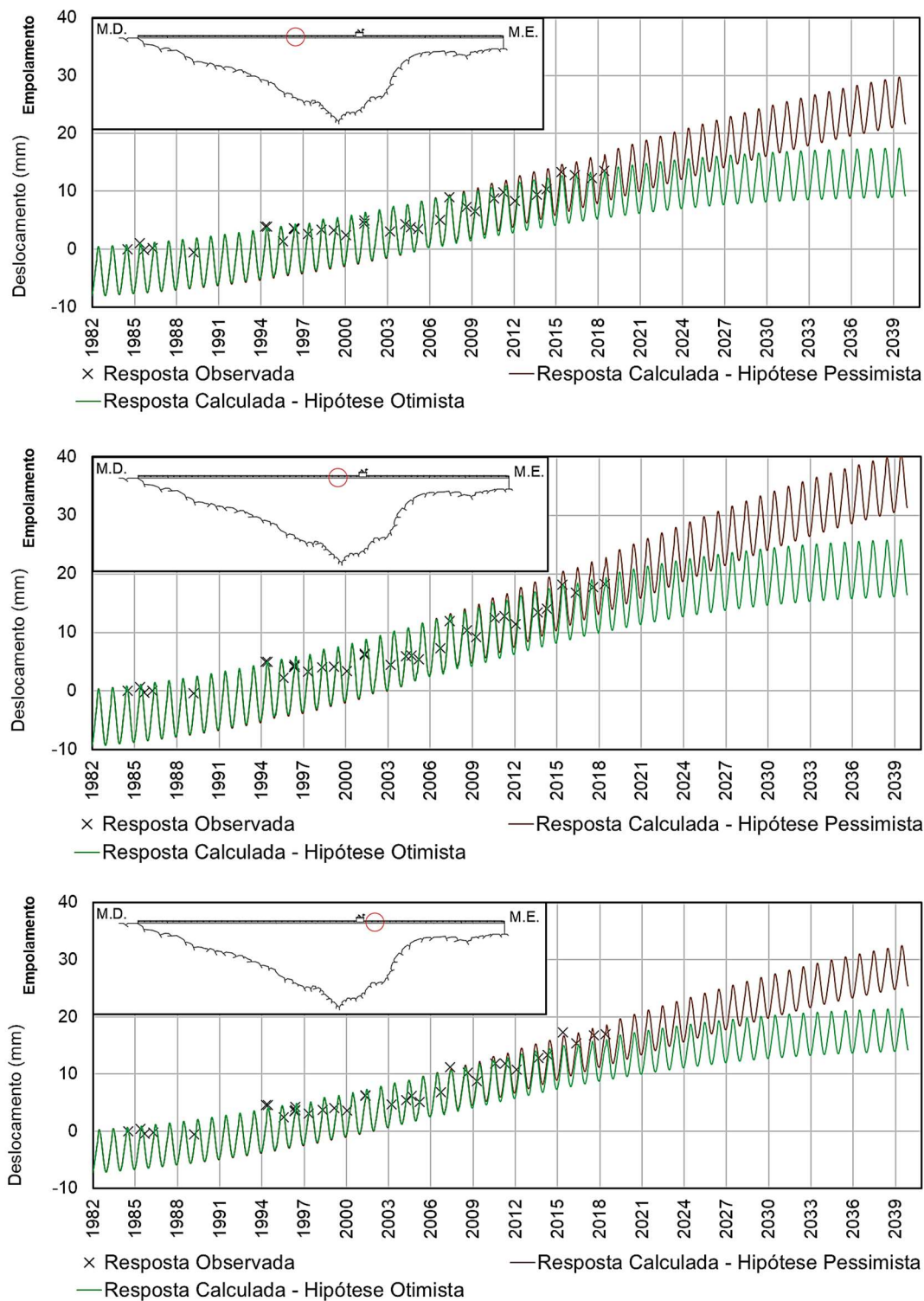


Figura 6.5 - Deslocamentos verticais previstos até 2040, para os cenários otimista e pessimista nos pontos correspondentes às marcas de nivelamento nos blocos DE, EF e FG, e valores observados até 2020

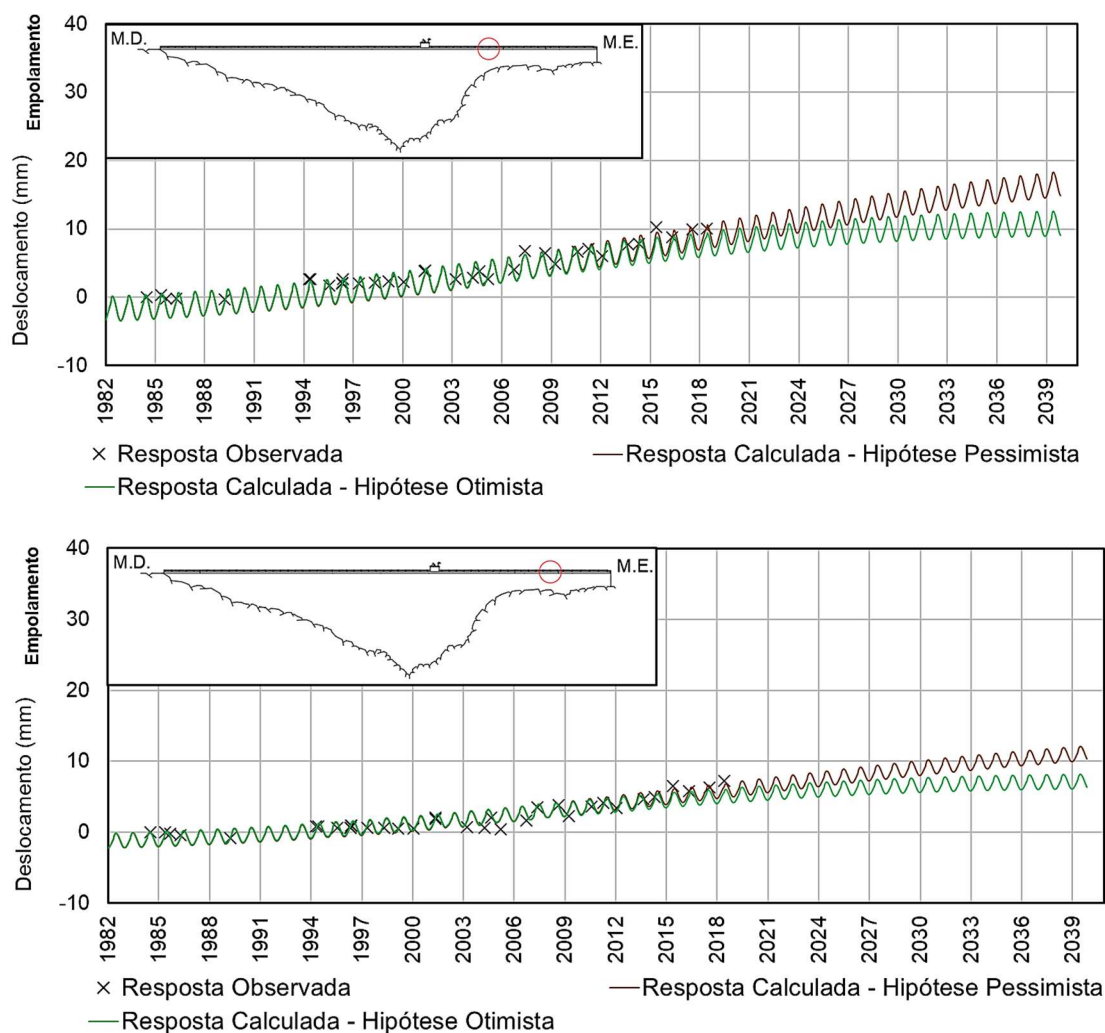


Figura 6.6 - Deslocamentos verticais previstos até 2040, para os cenários otimista e pessimista no ponto correspondente à marca de nivelamento no bloco GH e HI, e valores observados até 2020

6.5. Estado de tensão

Representam-se nas Figuras 6.8 e 6.9, para os cenários otimista e pessimista, as tensões principais nos paramentos, em 2040, devida à ação conjunta do peso próprio, pressão hidrostática e expansões.

As tensões de compressão mais relevantes localizam-se do lado da margem esquerda, junto à inserção, sendo máximas no paramento de jusante, com valores entre 10,6 MPa e 14,1 MPa, para os cenários otimista e pessimista, respetivamente.

No paramento de montante, as compressões mais significativas ocorrem, também, do lado da margem esquerda, com valores entre 9,1 MPa e 11,9 MPa, para os cenários otimista e pessimista, respetivamente.

Em relação às tensões de tração, os valores máximos foram calculados no paramento de jusante, junto à inserção, com valores entre 6,9 MPa, para o cenário otimista, e 9,8 MPa, para o cenário pessimista.

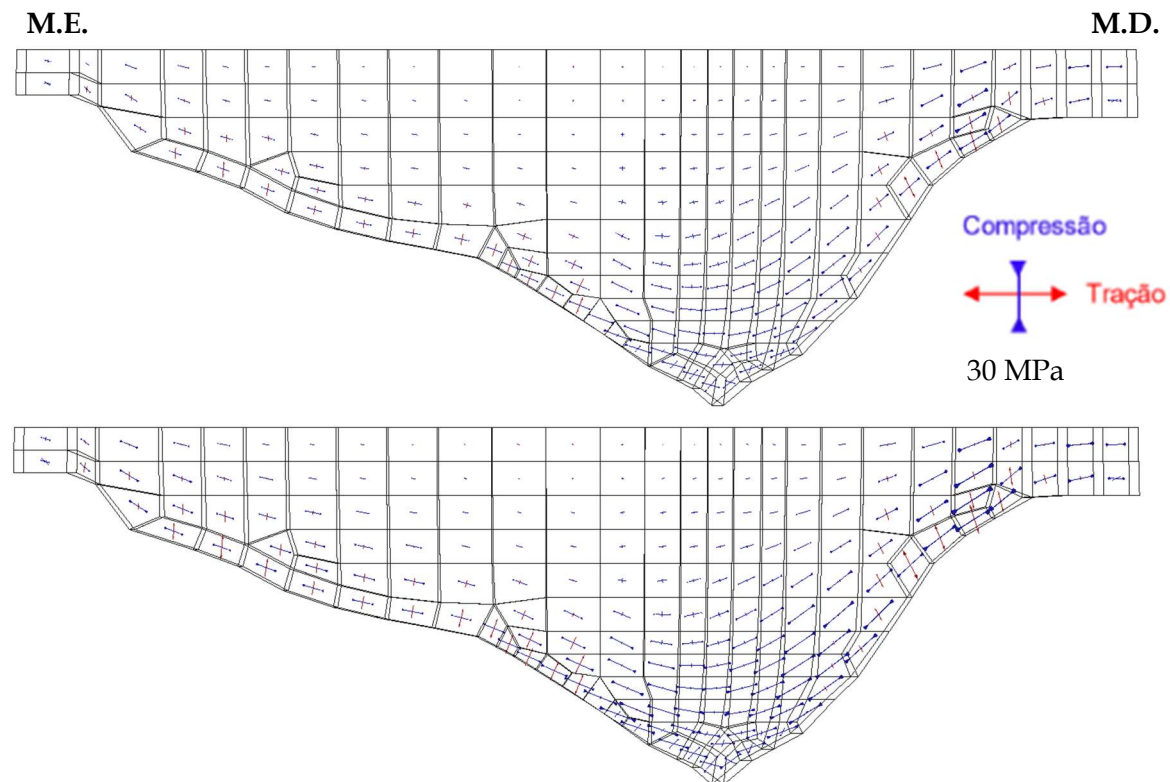


Figura 6.7 - Tensões principais no paramento de jusante devidas ao peso próprio, à pressão hidrostática e às expansões em 2040, para um cenário otimista (em cima) e pessimista (em baixo)

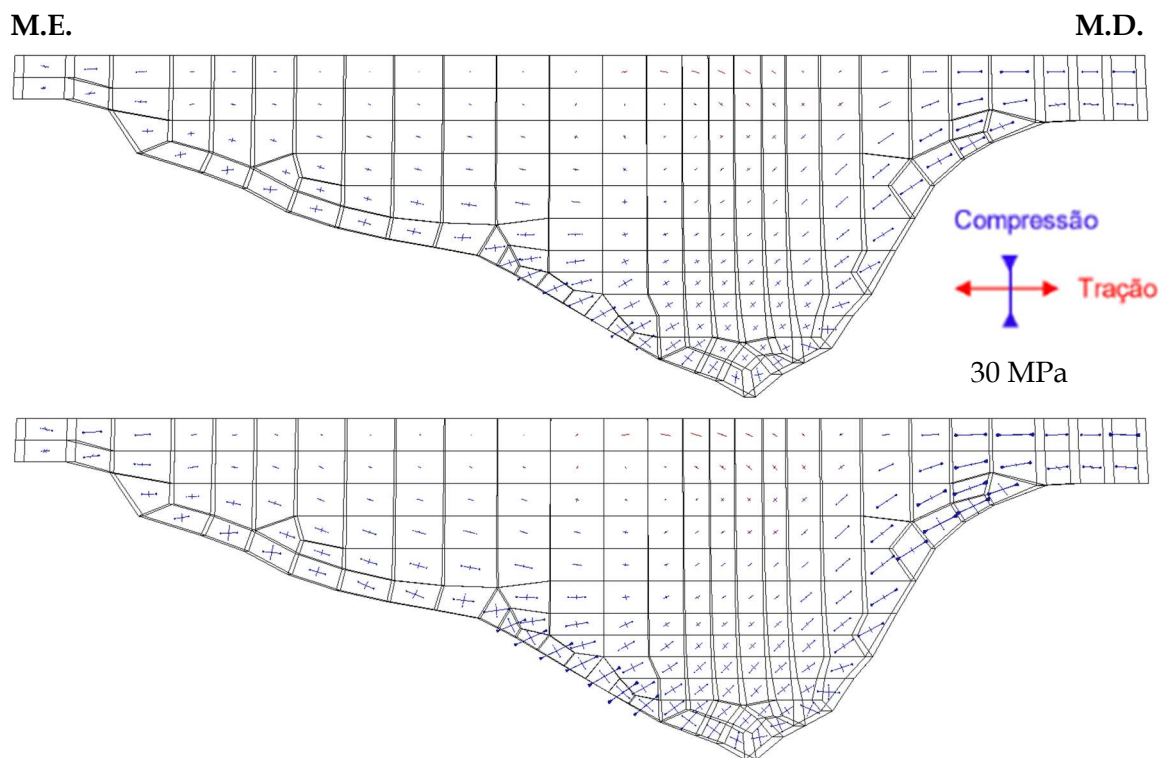


Figura 6.8 - Tensões principais no paramento de montante devidas ao peso próprio, à pressão hidrostática e às expansões em 2040, para um cenário otimista (em cima) e pessimista (em baixo)

(página deliberadamente deixada em branco)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Validação dos modelos desenvolvidos

O estudo da influência das variações sazonais de temperatura e de tensão no desenvolvimento das reações expansivas de origem interna do betão foi realizado através de um caso de estudo, relativo à barragem do Covão do Meio, na serra da Estrela, cuja albufeira esvazia todos os anos na estiagem.

Numa primeira fase dos estudos interpretou-se comportamento observado da barragem, recorrendo a modelação, térmica e estrutural, através do método de elementos finitos, e à modelação da ação expansiva.

O modelo térmico possibilitou calcular o campo de temperaturas no corpo da barragem ao longo do tempo, tendo em conta as temperaturas do ar e da água e da radiação solar nas fronteiras.

O modelo estrutural permitiu calcular a evolução dos campos de deslocamentos e tensões, considerando: i) as principais ações, designadamente o peso próprio do betão, a pressão hidrostática, as variações de temperatura e as expansões; e ii) o comportamento viscoelástico do betão, para ter em conta os efeitos diferidos, nomeadamente a fluência para cargas aplicadas e a relaxação de tensões para deformações impostas.

O modelo da ação expansiva teve em conta a influência dos campos de temperatura e tensões no betão, tendo-se considerado, simplificadamente, que a humidade interna do betão era sempre suficiente para que as reações expansivas ocorressem sem limitações. Esta opção é admissível para o corpo da barragem, a menos das zonas muito próximas dos paramentos, que secam durante o período estival; tem a vantagem de dispensar a utilização de um modelo higrométrico, para o qual não existem dados da observação para a sua validação.

Esta abordagem afigura-se adequada em obras com fendilhação reduzida e limitada a zonas localizadas da estrutura, como é o caso da barragem do Covão do Meio. Para obras com fendilhação mais expressiva seria necessário adotar modelos constitutivos não lineares para representar o comportamento do betão fendilhado, usando, por exemplo, modelos de dano.

A validação dos modelos utilizados foi feita através da comparação entre os valores observados e calculados, tendo-se verificado um bom ajuste nos períodos em que se dispõe de dados da monitorização, designadamente de deslocamentos observados (últimos 20 anos, no caso dos fios de prumo, e últimos 40 anos, no caso da geodesia).

Os resultados da análise permitiram concluir que o comportamento da obra é muito influenciado pela ação expansiva, tanto nos deslocamentos como nas tensões. Em 2020, os deslocamentos radiais são para montante, sendo a parcela das expansões de 54 mm e a parcela da pressão hidrostática de 10 mm, mas para jusante. Os deslocamentos verticais correspondem a empolamentos do coroamento, com valores de cerca de 20 mm na zona central da abóbada, sendo o seu aumento crescente no tempo bem representado por uma curva do tipo sigmoide.

Tendo em conta o efeito conjunto do peso próprio, da pressão hidrostática e das expansões, obtiveram-se, no início de 2020, tensões de compressão máximas, paralelas à inserção, de cerca de 10 MPa junto ao encontro da margem esquerda, a jusante. Na mesma zona, as compressões devidas às variações térmicas (correspondentes ao aquecimento da obra) são de cerca de 4,0 MPa e têm orientação semelhante, o que resulta em compressões máximas no betão de cerca de 14 MPa. As trações máximas calculadas, de cerca de 10 MPa, ocorrem também nesta zona e são devidas às ações do peso próprio, das expansões e do aquecimento da obra. São valores muito elevados, muito superiores à resistência à tração estimada para o betão da barragem, que é de cerca de 4 MPa, que justificam a fendilhação localizada, orientada, existente nesta zona da obra. Nos blocos da margem direita também existem trações significativas, da ordem de 8 MPa, que também justificam a fendilhação localizada aí existente.

7.2. Previsão do comportamento futuro

A previsão do comportamento da obra, para um horizonte temporal de 20 anos, foi feita de modo a balizar o comportamento futuro da obra, tendo-se recorrido a dois cenários de evolução da ação expansiva, um otimista, onde as expansões estabilizam a médio prazo, e um pessimista, em que o potencial remanescente de expansão é mais significativo.

Em 2040, para as ações do peso próprio, pressão hidrostática, variações térmicas (aquecimento) e expansões, estimaram-se tensões de compressão máximas compreendidas entre 15 MPa, para o cenário otimista, e 18 MPa, para o cenário pessimista junto do encontro da margem esquerda, a jusante. Considerando os resultados dos ensaios, que se resumiram no ponto 3.3, a resistência média à compressão do betão da barragem será da ordem de 40 MPa, pelo que as tensões máximas calculadas estarão compreendidas entre 38% e 45% dessa resistência média. São já valores relevantes, principalmente caso o pior cenário se venha a concretizar.

Prevê-se que a fendilhação estrutural possa aumentar em extensão e abertura, devido a redistribuições de tensões, já que teoricamente as tensões de tração continuaram a aumentar até 2040 (para o conjunto de ações mais desfavorável, peso próprio, aquecimento e expansões,

calcularam-se tensões de tração perpendiculares à inserção, junto ao encontro esquerdo, a jusante, com valores máximos entre 12 MPa, para o cenário otimista, e 15 MPa, para o cenário pessimista).

7.3. Influência da temperatura e da tensão no desenvolvimento das expansões

Os modelos desenvolvidos revelaram-se, adequados para simular e interpretar o comportamento observado da obra, pelo que foram também usados para estudar a influência dos campos de temperatura e tensão no betão no desenvolvimento das expansões.

A barragem do Covão do Meio tem a particularidade da sua albufera esvaziar no verão, o que potencia o aumento das taxas de expansão neste período, devido, por um lado, ao aumento da temperatura no paramento de montante (que fica exposto à temperatura do ar e à radiação solar) e, por outro lado, à diminuição das tensões de compressão devidas à pressão hidrostática.

Os modelos utilizados, permitem ter em conta a influência destes dois fatores (temperatura e confinamento), tendo sido explorados num cenário hipotético, em que o nível da albufera se mantém a um nível elevado durante todo o ano. Os resultados obtidos neste cenário e a sua comparação com a situação real da obra, permitiram retirar algumas conclusões sobre a influência destes dois fatores no desenvolvimento das expansões e nos seus efeitos estruturais.

O impacto na evolução das expansões livres e estruturais é significativo. As expansões livres aumentam consideravelmente nas faixas próximas do paramento de montante (devido ao aumento da temperatura deste paramento), enquanto as expansões estruturais aumentam de forma significativa nas zonas em que a restrição das expansões depende apenas das compressões devidas à pressão hidrostática.

Os deslocamentos que ocorrem em obra são até cerca de 40% superiores aos que ocorreriam caso a albufera fosse explorada a um nível próximo do NPA (constante ao longo do tempo), verificando-se que:

- O aumento médio dos deslocamentos verticais no coroamento deve-se essencialmente ao efeito da temperatura (estimado em cerca de 13%), o que era esperado uma vez que a pressão hidrostática apenas provoca compressões verticais com significado em zonas localizadas da obra (junto à inserção, a jusante);
- O aumento médio dos deslocamentos radiais é condicionado pela descompressão da estrutura (cerca de 10% no coroamento e cerca de 17% à cota 1643,0 m) e, em menor medida, pela temperatura (cerca de 3% no coroamento e cerca de 14% à cota 1643,0 m), o que se deve ao facto das compressões nos arcos, devidas à pressão hidrostática, restringirem significativamente as expansões estruturais nesta direção.

7.4. Principais contributos e perspetivas de desenvolvimentos futuros

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação pretendeu dar uma contribuição no estudo do comportamento estrutural de barragens afetadas por reações expansivas sujeitas a grandes variações sazonais do nível da albufeira, já que este assunto específico não tinha ainda sido abordado de forma sistemática. De facto, sabe-se que as grandes variações sazonais do nível das albufeiras podem potenciar e aumentar o desenvolvimento das expansões nas barragens, mas esses efeitos ainda não tinham sido quantificados. Este trabalho, como primeira abordagem ao tema, permitiu realizar essa quantificação para a barragem do Covão do Meio, que é um caso de estudo adequado para o fim em vista.

Refere-se, no entanto, que os resultados obtidos e as conclusões daí retiradas dependem dos modelos utilizados, nomeadamente da forma como é tida em consideração a influência da temperatura e das tensões de confinamento, que são aspetos ainda sob intensa investigação, particularmente no que respeita às metodologias para representar o efeito de confinamento proporcionado pelo estado de tensão (Batista, 2021).

Neste estudo as expansões estruturais foram restringidas considerando a lei de Larive, de forma independente nas três direções. Esta simplificação poderá ser melhorada em trabalhos futuros, considerando, por exemplo, que as expansões possam ser, em parte, transferidas das direções mais comprimidas para as direções menos comprimidas ou tracionadas, tal como sugerem os resultados de alguns ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bažant, Z. P., & Panula, L. (1978). **Practical prediction of time-dependent deformations of concrete.** *Matériaux et Construction*, 11(5): 307-316.

Clayton, N., Currie, R. J., & Moss, R. M. (1990). **The effects of alkali-silica reaction on the strength of prestressed concrete beams.** *The Structural Engineer*, 68, N. 15, p. 287-292.

Dias, I.F. (2012). **Strain injection techniques in numerical modeling of propagating material failures.** Tese de doutoramento. Universidade Politécnica da Catalunha (UPC), Barcelona, Espanha.

EDP (1988). **Geologia e Geotecnia do Local da Barragem e da Albufeira do Covão do Meio (Serra da Estrela).** J. M. Coteló Neiva.

Gomes, J. P. (2007). **Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a reações expansivas.** Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Larive, C. (1998). **Apports combinés de l'experimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques.** Ph.D. Thesis, École National de Ponts et Chaussées, Paris.

LNEC (1986). **A observação no controlo da segurança das barragens de betão portuguesas.** Relatório 302/1986 - DB/NO, Lisboa.

LNEC (2006). **Barragem do covão do meio. Análise do comportamento e avaliação das condições de segurança.** Relatório, NMMF/NO, Lisboa.

LNEC (2012). **Análise térmica de barragens de betão: Ações térmicas ambientais.** Relatório 185/2012, DBB/NMMF, Lisboa.

LNEC (Santos Silva, A.; Custódio, J.; Costa, D.) (2013a). **Barragem do Covão do Meio. Avaliação do estado de degradação do betão com base nos resultados dos ensaios laboratoriais realizados em 2012.** Relatório 62/2013, DM/NMM/NPC, Lisboa.

LNEC (Costa, D.) (2013b). **Caracterização petrográfica de amostras de betão retiradas da barragem do Covão do Meio. Observações preliminares.** Nota técnica 38/2013, DM/NPC, Lisboa.

LNEC (Custódio, J.; Santos Silva, A.; Costa, D.) (2015). **Barragem do Covão do Meio. Avaliação do estado de degradação do betão com base nos resultados dos ensaios laboratoriais.** Relatório final. Relatório 310/2015, DM/NBPC, Lisboa.

LNEC (2019). **Barragem do Covão do Meio. Inspeção à estrutura e ao sistema de observação efetuada em junho de 2019.** Nota Técnica 48/2020, DBB/NO. Lisboa.

Batista, A. (1998). **Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóboda.** Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Batista, A. (2021). **Gestão estrutural e reabilitação de barragens afetadas por reações expansivas internas do betão.** LNEC, Lisboa.

Batista, A., & Piteira Gomes, J. (2016). **Characteristic behaviour of the Portuguese large concrete dams built with granite aggregates and affected by ASR.** Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete.

Martin, R. P. (2010). **Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la réaction sulfatique interne du béton.** Tese de doutoramento, Université Paris-Est, Paris, França.

Oliveira, S. (2000). **Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulação de dano.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Piteira Gomes, J. (2007). **Modelação do Comportamento Estrutural de Barragens Sujeitas a Reações Expansivas.** Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Poyet, S. (2003). **Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints para la réaction alcali-silice: approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable.** Tese de doutoramento, Université de Marne-La-Vallée, Paris, França.

Silva, A. S. (2006). **Degradação do betão por reações álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção.** Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Silva, A. S. (2010). **Workshop - "As reações expansivas internas no betão - Prevenção dos riscos e gestão das estruturas afetadas".** Encontro Nacional de Conservação e Reabilitação de Estruturas.

Silveira, A. F. (1961). **As variações de temperatura nas barragens.** Tese de especialista, Memória no177, LNEC, Lisboa.

Thomas, M. D. A., Fournier, B., & Folliard, K. J. (2013). **Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book.** U.S Department of transportation. Federal Highway Administration, Washington, EUA.



2022

SAMUEL ALEXANDRE
BRANCO GOMES FERRA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE GRANDES VARIAÇÕES SAZONAIS DE
TEMPERATURA E DE TENSÃO NO DESENVOLVIMENTO DAS EXPANSÕES
DO BETÃO EM BARRAGENS. APLICAÇÃO À BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO