



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DAMSWELLING – MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS

Relatório de avaliação final do projeto do P2I/LNEC 2013-2020



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DAMSWELLING – MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS

Relatório de avaliação final do projeto do P2I/LNEC 2013-2020

Lisboa • outubro 2023

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 348/2023 – DBB/NO

Título

DAMSWELLING – MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS

Relatório de avaliação final do projeto do P2I/LNEC 2013-2020

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

José Carlos Piteira Gomes

Investigador Auxiliar, Núcleo de Observação

António Lopes Batista

Investigador-Coordenador, Diretor do Departamento

Ivo Miguel Figueiredo Dias

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

João Conde Silva

Investigador Auxiliar, Núcleo de Observação

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 348/2023

Proc. 0403/1102/20677, 0401/1102/2067701, 0402/1102/2067702

DAMSWELLING - MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS

Relatório de avaliação final do projeto do P2I/LNEC 2013-2020

Resumo

Neste relatório apresenta-se, de forma sucinta, a descrição de toda a atividade de investigação realizada no âmbito do projeto DamSwelling, integrado no P2I/LNEC 2013-2020. Os resultados da atividade desenvolvida são analisados e avaliados, relativamente aos objetivos inicialmente previstos, através de algumas métricas.

Palavras-chave: DamSwelling / Barragens de betão / Reações expansivas / Modelação estrutural

DAMSWELLING - MODELLING OF THE STRUCTURAL BEHAVIOUR OF CONCRETE DAMS AFFECTED BY SWELLING REACTIONS

Report of the final assessment of the P2I/LNEC 2013-2020 project

Abstract

This report briefly presents a description of all research activity carried out within the scope of the DamSwelling project, included in the P2I/LNEC 2013-2020. The results of the developed activity are analysed and evaluated in relation to the initial goals through some metrics.

Keywords: DamSwelling / Concrete dams / Swelling reactions / Structural modelling

Índice

1	Introdução	1
2	Atividade desenvolvida.....	3
2.1	Considerações gerais	3
2.2	Síntese das atividades realizadas	5
2.2.1	Desenvolvimento das tarefas do projeto	5
2.2.2	Elaboração de programas de investigação	7
2.2.3	Elaboração de teses de doutoramento.....	8
2.2.4	Elaboração de dissertações de mestrado	8
2.2.5	Organização da 16 th ICAAR no LNEC.....	9
2.2.6	Candidaturas a financiamentos externos	10
2.2.7	Outras atividades	10
2.3	Aplicações em estudos por contrato.....	11
2.4	Breve apreciação da atividade desenvolvida	12
3	Divulgação de resultados	13
3.1	Programas de investigação	13
3.2	Coordenação de atas de congressos	13
3.3	Dissertações de mestrado	13
3.4	Artigos em revistas científicas	13
3.5	Artigos em revistas de divulgação técnica.....	13
3.6	Palestras por convite em eventos técnico-científicos	14
3.7	Publicações em eventos técnico-científicos	14
3.7.1	Comunicações em congressos nacionais	14
3.7.2	Comunicações em congressos internacionais	15
3.8	Sessões em seminários e reuniões técnico-científicas	16
3.9	Relatórios e outras publicações do LNEC	18
3.9.1	Relatórios de estudos por contrato	18
3.9.2	Outros documentos.....	19
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	20
4.1	Indicadores de desempenho do projeto	20
4.2	Recursos humanos mobilizados	21
4.3	Financiamento	21
5	Considerações finais.....	23
	ANEXO Ficha do projeto DamSwelling	25

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Dissertações de mestrado concluídas no âmbito do projeto, apresentadas na FCT/UNL	8
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho em termos de publicações.....	20
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos ao projeto, em número de horas	21
Quadro 4.3 – Afetação de recursos humanos ao projeto, prevista e concretizada	21

1 | Introdução

O projeto de investigação *Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão afetadas por reações expansivas*, com o acrónimo DamSwelling, integrado no Plano de Investigação e Inovação do LNEC 2013-2020 (P2I/LNEC 2013-2020), cuja ficha de definição se apresenta no Anexo, pretendeu dar seguimento aos estudos de investigação antes enquadrados no projeto de investigação do PIP/LNEC 2009-2012 intitulado *Deterioração e reabilitação de barragens de betão e alvenaria*, processo nº 0403/112/17717, no que se refere ao estudo e modelação dos efeitos estruturais em barragens das reações expansivas do betão de origem interna. O projeto desenvolveu-se no Departamento de Barragens de Betão (DBB), tendo ficado sediado no Núcleo de Observação (NO), envolvendo o setor da Chefia e o Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas (NMMR). Fora do DBB contou-se com a colaboração, num período inicial, do Núcleo de Tecnologias da Informação em Engenharia Civil (NTIEC).

O projeto DamSwelling teve enquadramento na matriz programática da Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020 (E2I 2013-2020), inserindo-se no eixo E1 (Património construído) e na temática T8 (Desenvolvimento de competências e transferência de conhecimentos), bem como, secundariamente, no eixo E4 (Risco e segurança) e na temática T2 (Novas tecnologias).

O projeto foi submetido para aprovação no dia 23 de dezembro de 2015, através da informação nº 576 do DBB, propondo como data de início 1 de janeiro de 2016 e uma duração de 48 meses (até ao final de 2019). A apreciação da comissão de acompanhamento dos projetos do P2I/LNEC 2013-2020 foi emitida, favoravelmente, em 7 de julho de 2016. O Conselho Diretivo do LNEC aprovou o projeto em 15 de julho de 2016, tendo-lhe sido atribuído o número de processo 0403/112/20677, que foi mais tarde atualizado para 0403/1102/20677.

O tema de investigação do projeto tem particular interesse para o DBB, dado que cerca de um terço das 60 grandes barragens de betão portuguesas com acompanhamento continuado do LNEC estão afetadas por reações expansivas do betão. Os aspetos químicos e físicos das reações nas estruturas de betão têm sido objeto de estudo no Departamento de Materiais (DM), através de projetos de investigação versando essas vertentes. Também houve uma interação significativa com o Departamento de Estruturas (DE), designadamente no apoio a estudos de obras de betão armado pré-esforçado afetadas por esta patologia.

Dado o interesse na continuidade do trabalho desenvolvido após o projeto do PIP/LNEC 2009-2012 na temática em apreço, no presente relatório serão considerados alguns trabalhos desse âmbito, realizados entre 2013 e 2015, bem como os levados a efeito na extensão do prazo do projeto até aos últimos meses de 2023.

A equipa de investigação do projeto foi efetivamente constituída pelos seguintes investigadores (referem-se as categorias atuais, que em alguns casos são diferentes daquelas que tinham em 2016): Investigador Auxiliar (IA) José Piteira Gomes, do DBB/NO, coordenador do projeto;

Investigador-Coordenador (IC) António Lopes Batista, do DBB/Chefia; IA Ivo Miguel Figueiredo Dias, do DBB/NMMR; e IA João Conde Silva, do DBB/NO. A equipa inicial do projeto era ainda composta pela Investigadora Principal (IP) Noemi Leitão, do DBB/NO, que se desvinculou por iniciativa própria logo no começo, e pelo Bolseiro de Iniciação à Investigação Científica (BIIC) João Miguel Arsénio Rico, do NTIEC, que iniciou os trabalhos da sua tese de doutoramento e assim não pode dar contributos ao projeto. O BIIC João Pinto Coelho, também do NTIEC, participou no início em atividades do projeto relacionadas com a paralelização do programa de cálculo automático de elementos finitos, mas desvinculou-se em maio de 2017, na sequência do término da sua bolsa no LNEC. O IA João Conde Silva colaborou no projeto até ao final de 2018, tendo a partir daí sido redefinida a sua área de investigação.

Ao contrário do que aconteceu com os outros projetos de investigação do DBB integrados no P2I/LNEC 2013-2020, no projeto DamSwelling não foi emitido um relatório de progresso intercalar, em 2018. Tal deveu-se ao facto de então estarem em redefinição as condições de prosseguimento do projeto, de que resultou um maior envolvimento do IA Ivo Figueiredo Dias e o direcionamento do então BIIC João Conde Silva para o projeto do P2I/LNEC 2013-2020 DamConcrete – *Caracterização experimental e modelação numérica das propriedades reológicas do betão de barragens*. Disto resultou, nos anos seguintes, uma interação entre os projetos DamSwelling e DamConcrete, com resultados interessantes, mobilizando os IA Carlos Serra e João Conde Silva, como adiante se verá. Pode assim considerar-se que o desenvolvimento do projeto teve duas fases distintas, a primeira até 2018 e a segunda desde então. Nesta segunda fase, com o maior envolvimento do IA Ivo Figueiredo Dias foi ainda potenciada uma interação assinalável com desenvolvimento do projeto do P2I/LNEC 2013-2020 CoMatFail - *Técnicas avançadas para modelação numérica de processos de fratura material. Aplicações práticas e desenvolvimento de um programa de elementos finitos*, também com resultados muito positivos.

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Considerações gerais

O projeto de investigação pretendeu dar um contributo no melhoramento das ferramentas de análise do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a processos expansivos de origem interna, através da consideração de: i) conhecimentos da área de engenharia de materiais, para melhor definição da ação expansiva, em função das reações presentes e dos diferentes tipos de agregados; ii) uma resolução integrada dos problemas térmico, higrométrico e estrutural; iii) métodos de resolução dos sistemas de equações mais adequados na análise não linear, eventualmente com recurso à programação em paralelo; e iv) modelos de comportamento dos materiais alinhados com o observado em ensaios e nas próprias obras.

Existem, essencialmente, dois tipos de reações expansivas no betão: a reação álcalis-sílica (RAS), em que se desenvolve um gel sílico-alcalino, expansivo, resultante da reação entre os álcalis do cimento, a água e a sílica (com estrutura cristalina “mal” organizada) dos agregados; e a reação sulfática interna (RSI), em que temperaturas elevadas nas idades iniciais dão origem à formação de etringite secundária (DEF) que, na presença de água, é expansiva.

As principais evidências estruturais das reações expansivas são, em barragens: i) nas juntas, o fecho generalizado, o esmagamento de preenchimentos, os deslizamentos entre blocos, em particular os desalinhamentos no coroamento; ii) nos vãos (condutas, orifícios e descarregadores), a ovalização de condutas, o fecho e a distorção de orifícios e o encravamento de comportas; iii) a fendilhação superficial, difusa e generalizada, devida à heterogeneidade local, e linear, bem como à resposta estrutural global a deformações impostas; e iv) os produtos da reação, com formação de geles que podem exsudar nas superfícies aparentes, em geral em cavidades, fendas e juntas.

Os processos de deterioração em apreço são, em geral, lentos, desenvolvendo-se com taxas anuais de expansão que, no caso português, têm valores máximos de cerca de 150×10^{-6} . Em muitos casos de RAS, os seus efeitos estruturais só são aparentes ao fim de 20 ou mais anos, mas a deterioração devida à RSI pode ocorrer logo nos primeiros anos. O desenvolvimento das expansões começa, em regra, por comprometer a funcionalidade, mas pode mesmo afetar a segurança das obras ao fim de alguns anos. As análises estruturais das obras envolvem assim períodos de tempo consideráveis, em regra o período passado e, frequentemente, também um período posterior de uma ou duas décadas, para simular os efeitos esperados, na perspetiva de melhor apoiar as decisões relacionadas com a gestão das obras e, eventualmente, com a necessidade de intervenções de menor ou maior monta.

A análise do comportamento estrutural de barragens sujeitas a estes processos de deterioração, principalmente após a ocorrência de fendilhação, necessita de representações refinadas da geometria das obras, a que correspondem malhas de cálculo com muitos graus de liberdade e a resolução de grandes sistemas de equações. As discretizações no domínio do tempo, considerando

muitos anos de análise, são também muito pesadas, pois exigem a resolução dos sistemas de equações muitas vezes.

Nestas condições, apresentam-se, de seguida, os desenvolvimentos mais importantes previstos na ficha de definição do projeto:

- Melhorar a representação matemática da ação expansiva;
- Estudar a anisotropia do processo expansivo devida ao estado de tensão, considerando diferentes modelos para a sua representação;
- Melhorar os métodos de resolução dos sistemas de equações na análise não linear, recorrendo, eventualmente, à programação em paralelo;
- Consideração de diferentes modelos de comportamento do material em diferentes fases de cálculo, em função da evolução dos efeitos estruturais das expansões.

No início do projeto existia um código computacional, baseado no método dos elementos finitos, que teve desenvolvimentos consideráveis na década de 2000, no âmbito da tese de doutoramento do IA José Piteira Gomes, mas que nos anos seguintes não teve evoluções relevantes, pelo facto de os investigadores adstritos ao projeto terem estado muito envolvidos nos estudos de apoio ao projeto, construção e primeiro enchimento das albufeiras das barragens do Baixo Sabor e Feiticeiro. Face aos desenvolvimentos pretendidos, o código computacional deveria ser melhorado para permitir a simulação, de forma adequada, de ação expansiva nos domínios dos comportamentos materiais viscoelástico e não linear por ocorrência de fendilhação. Pretendia-se que fosse robusto e rápido, para permitir superar as limitações dos programas existentes e responder, em tempo útil, às muitas solicitações de entidades externas, designadamente nos estudos relativos às barragens de Santa Luzia, Fratel e Fagilde, em Portugal, e Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil).

Como adiante será descrito, nos primeiros anos de desenvolvimento do projeto continuaram as tarefas de melhoramento do código computacional existente, designadamente nos aspetos relacionados com a representação matemática da ação expansiva e com a paralelização do cálculo relativo à resolução dos sistemas de equações. Constatou-se que, neste último aspeto, haveria sempre uma grande dependência da engenharia informática. Dado que se pretendia também resolver, de uma forma consistente, o problema da não linearidade material, decidiu-se, a partir de 2018, apostar num novo código computacional de elementos finitos (CoMat), que tinha, até então, vindo a ser desenvolvido no âmbito do projeto do P2I/LNEC 2013-2020 *CoMatFail - Técnicas avançadas para modelação numérica de processos de fratura material. Aplicações práticas e desenvolvimento de um programa de elementos finitos*, usando abordagens mais modernas de programação, com ênfase na modularidade do código fonte e na eficiência computacional.

A adoção do código computacional CoMat na análise de estruturas de betão afetadas por expansões obrigou à redefinição dos objetivos iniciais do seu desenvolvimento, que foram reorientados e alargados. Nos últimos anos foi incorporado no código muito conhecimento já disponível no LNEC (no âmbito da temática em apreço), quer pela adaptação de algumas subrotinas do programa anterior,

quer pela implementação no novo código de metodologias desenvolvidas no LNEC, designadamente em teses de doutoramento realizadas no DBB.

O melhoramento das capacidades de modelação numérica permitirá: i) uma melhor interpretação do comportamento observado das obras e a realização de prognósticos melhor sustentados; ii) estabelecer melhores ligações entre a informação obtida por via experimental e a utilizada na modelação numérica, potenciando uma maior colaboração com o DM; iii) compreender as causas das discrepâncias normalmente verificadas entre os resultados dos ensaios laboratoriais de expansibilidade e as expansões efetivamente observadas em obra; iv) realizar estudos de avaliação do comportamento e da segurança de barragens de betão sujeitas a este tipo de processos de deterioração; v) estudar a adequabilidade de diferentes soluções de reabilitação de obras degradadas; e vi) realizar estudos de avaliação do desempenho das tecnologias usadas em obras reabilitadas.

2.2 Síntese das atividades realizadas

2.2.1 Desenvolvimento das tarefas do projeto

No ponto 6 do Anexo consta o plano de trabalhos proposto na ficha de definição do projeto. Como referido, este plano de trabalhos prevaleceu, genericamente, até 2023, com adaptações resultantes do atrás descrito.

Descreve-se sumariamente, de seguida, a atividade realizada em cada tarefa, sendo assinalados os desvios da atividade desenvolvida relativamente ao plano inicial.

A atividade 1 (representação matemática da ação expansiva), que comportava sete tarefas, teve desenvolvimentos relevantes, mas houve tarefas que carecem de realização, designadamente: i) na tarefa T1.1, respeitante à consideração de uma nova lei de desenvolvimento da RAS, em que a reação pode ou não esgotar-se, os algoritmos foram parcialmente implementados; ii) na tarefa T1.2 foi concluída através da implementação da lei de desenvolvimento da RSI segundo a formulação de Renaud Pierre Martin; iii) quanto à tarefa T1.3, respeitante à simulação dos efeitos macroscópicos resultantes da ocorrência simultânea das duas reações expansivas (RAS e RSI), foi desenvolvido trabalho relevante; iv) as tarefas T1.4 (realização de testes de comparação dos resultados do modelo de simulação da ação expansiva com resultados experimentais obtidos laboratorialmente no Departamento de Materiais) e T1.5 (implementação de um modelo termo-higrométrico que considere as ações térmica e higrométrica de modo integrado e que inclua leis de evolução da porosidade para simular o efeito do dano devido à ação expansiva) foram redefinidas; e v) não foi possível elaborar os artigos descritos nas tarefas T1.6 e T1.7.

Na atividade 2 (otimização do cálculo estrutural) foram conseguidos resultados relevantes em alguns aspetos, mas houve outros em que não foi possível avançar. Refere-se que: i) na tarefa T2.1 estão em fase de implementação os algoritmos para consideração dos efeitos do confinamento nas expansões, designadamente o baseado na formulação desenvolvida por Joaquín Liaudat; ii) na tarefa

T2.2 não foi necessária a definição de estados de referência no cálculo estrutural, já que se conseguiram utilizar relações constitutivas na análise não linear, através de modelos de dano, em toda a gama de tensões e deformações; iii) a tarefa T2.3 (consideração de métodos de convergência mais estáveis no cálculo não linear) foi terminada; iii) na tarefa T2.4, respeitante ao recurso à programação em paralelo para redução dos tempos de cálculo [CN1, CI1], acabou por se seguir um outro caminho, uma vez que o código computacional CoMat, que incorpora o solver *Pardiso* (biblioteca numérica de alto desempenho para resolução de sistemas de equações em paralelo em sistemas de memória partilhada), permitiu reduzir eficazmente os tempos de cálculo; e, iv) face ao descrito, não houve condições para elaborar o artigo referido na tarefa T2.5.

No que respeita à atividade 3 (análise do comportamento estrutural de barragens sujeitas a reações expansivas) aponta-se que: i) tem vindo a ser realizado o tratamento da informação relativa à monitorização, inspeção e ensaios de barragens afetadas por reações expansivas (tarefa T3.1) [AC1, CN2, CN3, CI2, CI5, CI6, CI11, CI12]; ii) na tarefa T3.2 houve desenvolvimentos muito importantes no que respeita aos estudos de análise do comportamento das barragens de Fagilde [DM1, CN6, CI4], Bemposta [DM2, CN5, CI13, CI18] e Covão do Meio [DM3, CN7, CI14], no âmbito específico do projeto DamSwelling, e das barragens de Cahora Bassa [CI3, CI7, CI9, CI15, R1, R4, R8], Peti [R5, R6, R7], Fratel e Santa Luzia (estes dois últimos em curso), realizados na sequência de contratos com os respetivos donos de obra; iii) tem sido feita a compilação de elementos sobre intervenções realizadas em muitas barragens, em Portugal e no estrangeiro, com vista à realização de estudos de avaliação de diferentes técnicas de reabilitação de barragens degradadas por reações expansivas (tarefa T3.3) [PI1]; e iv) não foi possível dar forma aos artigos referidos nas tarefas T3.4 e 3.5.

Em termos de divulgação de resultados, pode notar-se que não foram escritos os artigos científicos previstos, mas foi apresentado um número considerável de comunicações em congressos nacionais [CN1 a CN7] e internacionais [CI1 a CI18]. Foi também significativa a realização de palestras por convite [PL1 a PL3] e de sessões em seminários e reuniões técnico-científicas, tanto em Portugal como no estrangeiro [S1 a S15].

Referem-se, de seguida, os desenvolvimentos conseguidos, essencialmente a partir de 2018, em função da redefinição de tarefas, de necessidades dos estudos de investigação e por contrato, e de opções estratégicas:

- i) em resultado da discussão interna do tema em apreço, foi concluído em 2021 um programa de investigação, adiante referido, que permitiu um avanço significativo dos conhecimentos em muitas matérias e apontou caminhos para a investigação futura neste domínio;
- ii) os desenvolvimentos incorporados no novo código computacional permitem resolver, de forma eficiente, os grandes sistemas de equações lineares, em cada passo de cálculo, que decorrem da consideração de discretizações refinadas (da ordem de 100 mil graus de liberdade), bem como o problema não linear, associado ao comportamento do betão fendilhado (modelo de dano, considerando ainda a fluência e a relaxação do betão), à cedência das armaduras (modelo elasto-plástico) e à abertura e deslizamento das superfícies de descontinuidade (modelo de Mohr–Coulomb);

- iii) estão disponíveis, nesse novo código computacional, diferentes tipos de elementos de volume (hexaédricos de 27, 20 e 8 pontos nodais e tetraédricos de 10 e 4 pontos nodais), elementos de junta e elementos lineares, todos compatíveis com os elementos de volume, permitindo assim a representação de descontinuidades naturais, construtivas e induzidas, com elementos de junta, e a simulação de armaduras e cabos, com elementos lineares;
- iv) na tarefa T1.4, a realização de estudos comparativos entre os resultados do modelo de simulação da ação expansiva e os resultados de ensaios laboratoriais e da observação contínua das obras foram genericamente obviados porque têm vindo a ser melhorados os procedimentos experimentais e também tem sido possível, na modelação, considerar parâmetros mais representativos das condições reais dos provetes e das próprias obras;
- v) está em fase adiantada de implementação um modelo termo-higrométrico (tarefa 1.5) que considera as ações térmica e higrométrica de modo integrado, admitindo diferentes mecanismos de transporte de água no betão, sendo o dano interno no betão calculado em função da magnitude das próprias expansões e da resposta estrutural ao conjunto de ações a que a obra está sujeita;
- vi) na tarefa 1.5 foi desenvolvida uma metodologia para a interpolação das grandezas conhecidas num número reduzido de pontos para domínios de estudo tridimensionais, com particularização para os casos de barragens abóbada e de barragens gravidade, que tem interesse no tratamento de resultados da monitorização, designadamente de grandezas escalares (temperatura, humidade interna e expansões), vectoriais e tensoriais [CN4, CI8]; e
- vi) para além da sua utilização em barragens de betão no DBB, o novo código computacional tem vindo a ser aplicado, no DE, à análise do comportamento ao longo do tempo de estruturas de betão armado pré-esforçado, com resultados muito promissores, designadamente no que respeita à representação matemática das expansões devidas à RSI, à consideração dos efeitos de confinamento introduzidos pelas armaduras e à simulação do comportamento elastoplástico das próprias armaduras.

Refere-se ainda que, em estreita ligação com o projeto DamConcrete, foram iniciados estudos numéricos, usando o método das partículas, de simulação do comportamento do betão até à rotura para a ação expansiva, à escala dos provetes, considerando a viscoelasticidade e o dano à tração e ao corte [CI16].

2.2.2 Elaboração de programas de investigação

Como referido, foi concluído em abril de 2021 um programa de investigação intitulado *Deterioração e reabilitação de barragens afetadas por reações expansivas internas do betão*, pelo IC António Lopes Batista [PI1]. Este documento fez uma síntese dos conhecimentos e aponta caminhos para o prosseguimento da investigação neste domínio, tendo em consideração as características do LNEC como organismo público ligado à segurança de infraestruturas.

2.2.3 Elaboração de teses de doutoramento

Com financiamento da FCT, ao abrigo da bolsa de doutoramento com referência 2020.05091.BD, a Eng^a Cláudia Folgado Santos está a realizar os trabalhos de doutoramento no LNEC, sob o tema *Efeitos estruturais das reações expansivas de origem interna em pontes de betão*, sob orientação do IPH Luís Oliveira Santos, do IC António Lopes Batista e do IA Ivo Figueiredo Dias. O acolhimento é no DE, estando inscrita na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), onde o IC António Lopes Batista é professor convidado.

Refere-se que nesta tese estão a ser utilizados os recentes desenvolvimentos computacionais, já mencionados, possibilitando que a discretização do betão seja feita com elementos de volume e as armaduras com elementos lineares, pelo que é possível considerar, de forma integrada, o comportamento viscoelástico do betão e os comportamentos não lineares do betão e do aço, permitindo a cabal obtenção dos efeitos do confinamento.

Prevê-se a conclusão da tese num horizonte de cerca de dois anos [R3].

2.2.4 Elaboração de dissertações de mestrado

No âmbito do projeto foram concluídas três dissertações de mestrado sobre aspetos importantes do comportamento de barragens de betão afetadas por RAS e DEF (Quadro 2.1), que consideraram como casos de estudo as barragens de Fagilde, Bemposta e Covão do Meio [DM1 a DM3]. As dissertações foram apresentadas na FCT/UNL.

Quadro 2.1 – Dissertações de mestrado concluídas no âmbito do projeto, apresentadas na FCT/UNL

Aluno de mestrado	Título da dissertação	Data das provas	Orientadores	Arguente	Classificação
Samuel Pereira Almeida e Sousa	Análise do comportamento estrutural de barragens afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem de Fagilde	2016-12-16	José Piteira Gomes António Lopes Batista	Mário Silva	18
Rodolfo Pereira Basílio Trigo Rebelo	Estudo do comportamento estrutural de barragens arco-gravidade afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem de Bemposta	2021-02-03	Ivo Figueiredo Dias António Lopes Batista	Corneliu Cismasiu	17
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	2022-01-25	Ivo Figueiredo Dias António Lopes Batista	Corneliu Cismasiu	17

Atendendo aos objetivos dos estudos realizados no âmbito das três dissertações, e ainda que para a barragem de Fagilde foi a primeira abordagem de análise estrutural e que nos casos das barragens de Bemposta e do Covão do Meio apenas há fendilhação em zonas muito localizadas, constatou-se que os resultados obtidos com os modelos desenvolvidos interpretaram bem os resultados da observação das obras, tendo sido adequados no cálculo dos campos de temperatura, humidade interna do betão e deslocamentos. Além disso, os modelos estruturais utilizados, que tinham em conta o comportamento viscoelástico do betão, permitiram identificar as zonas fendilhadas.

No caso da dissertação que usou a barragem de Fagilde como caso de estudo, fez-se uma primeira abordagem de análise desta obra, que está sujeita a um processo de deterioração do betão devido à

DEF. Como a obra é de média dimensão, o sistema de observação é reduzido, assentando essencialmente na medição de deslocamentos por métodos geodésicos, pelo que os resultados da monitorização são espaçados no tempo. Assim, no estudo tiveram de ser feitas algumas hipóteses simplificativas, mas os resultados conseguidos podem considerar-se satisfatórios.

No estudo do comportamento estrutural de barragens arco-gravidade afetadas por expansões, considerou-se como caso de estudo a barragem de Bemposta, concluindo-se que o tipo de comportamento é próximo do exibido pelas barragens abóbada.

No estudo da influência de grandes variações sazonais de temperatura e de tensão no desenvolvimento das expansões do betão em barragens, usou-se a barragem do Covão do Meio como caso de estudo, já que é a barragem portuguesa em que se verificam, de forma mais acentuada, maiores amplitudes dos fatores referidos. O estudo permitiu quantificar a influência significativa desses fatores na resposta estrutural.

Nos estudos das barragens de Bemposta e do Covão do Meio foram considerados dois cenários de evolução futura das ações expansivas, um otimista e outro pessimista, para avaliação das implicações na segurança das obras.

Os resultados dessas dissertações deram origem a três comunicações em congressos nacionais [CN5 a CN7] e a outras três em congressos internacionais [CI4, CI13, CI14].

Estão em curso os trabalhos de uma dissertação de mestrado, também a apresentar na FCT/UNL, sobre a caracterização da fendilhação difusa em barragens afetadas por expansões, usando o método LPC47 com apoio de fotografia digital, com aplicação à barragem de Pracana. Os trabalhos de campo foram realizados em fevereiro de 2023. Devido a condicionamentos de ordem pessoal do mestrando Stelvio Carvalho, os trabalhos foram suspensos durante alguns meses, prevendo-se que possam ser concluídos no próximo ano. Este trabalho está também a ser realizado no âmbito do projeto ImEngine - *Imagens numéricas: aplicações à engenharia*, do DBB.

2.2.5 Organização da 16th ICAAR no LNEC

Embora tal não estivesse explicitamente previsto no projeto, foi no seu âmbito que o DBB colaborou na organização da *16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, realizada no LNEC em 2022.

Começou-se com a elaboração da candidatura do LNEC à organização do evento [D1], que foi apresentada pelo IC António Lopes Batista na 15th ICAAR, realizada em São Paulo (Brasil) em 2016 [AS5], tendo saído vencedora, em confronto com as candidaturas do IFSTTAR (França) e da Universidade do Colorado (EUA).

As atividades de organização do evento foram partilhadas com o DM, o DE e a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. A conferência estava inicialmente agendada para junho de 2020, mas, devido às consequências da pandemia provocada pelo coronavírus SARS-Cov-2 (vulgo Covid19) que assolou o mundo no início de 2020, foi duas vezes adiada, tendo sido concretizada, em

formato presencial, de 31 de maio a 2 de junho de 2022 (por estes motivos ficou com a designação final de ICAAR 2020-2022). As atas da conferência foram publicadas em dois volumes [ED1].

O IC António Lopes Batista foi o *chairman* da conferência e integrou a comissão organizadora e a comissão científica. O IA José Piteira Gomes pertenceu à comissão científica. O IA Carlos Serra, que também desenvolveu algumas tarefas neste projeto, integrou a comissão organizadora. Os membros da comissão organizadora tiveram reuniões com periodicidade aproximadamente mensal, documentadas por notas, entre janeiro de 2018 e junho de 2022. Os membros da comissão científica fizeram a revisão de várias comunicações. O IA José Piteira Gomes deu ainda apoio à preparação e acompanhamento da visita técnica a pontes e barragens afetadas por expansões de origem interna do betão, na zona centro de Portugal, realizada após a conferência.

2.2.6 Candidaturas a financiamentos externos

No âmbito dos projetos DamSwelling e DamConcrete, no concurso promovido pela FCT em 2017 foi submetida a candidatura do projeto *Lifetime assessment of key concrete infrastructures behaviour affected by swelling processes combining meso and macroscale modelling*, elaborada pelo LNEC (DBB e DM) e pela Universidade do Minho, mas que não foi selecionada para financiamento.

Em março de 2022 foi apresentada a candidatura do mestre José Alexandre a uma bolsa no âmbito do Programa Doutoral em Engenharia Civil da FCT, com o tema *Análise dos efeitos estruturais de expansões do betão em barragens. Modelos e métodos para consideração da influência do confinamento e da depreciação das propriedades do betão*, que também não foi selecionada para financiamento.

2.2.7 Outras atividades

No âmbito do projeto houve diversas interações com o Eng.º Robin Charlwood durante a sua liderança na preparação do novo boletim da ICOLD (International Commission on Large Dams) *A management of expansive chemical reactions in concrete dams & hydroelectric projects*, com versão provisória publicada em 2019.

Foi organizada pelo DM e pelo DBB a sessão técnica *Proteção e reparação de estruturas de betão submersas*, que decorreu no dia 6 de dezembro de 2017, no âmbito das atividades deste e de outros projetos de investigação.

Em junho de 2023 foi realizada uma visita específica à barragem de Pracana com o dono de obra (EDP) e o Eng.º Robin Charlwood, no âmbito da discussão de caminhos no sentido de monitorizar a evolução da humidade interna no betão, que se julga ser preponderante no desenvolvimento diferencial das expansões na obra.

2.3 Aplicações em estudos por contrato

Os desenvolvimentos computacionais conseguidos no projeto permitiram obter excelentes resultados na realização de um conjunto de estudos por contrato, em que a ação expansiva condiciona o comportamento das obras, designadamente:

- i) para a barragem de Cahora Bassa, em Moçambique, a pedido da Hidroeléctrica de Cahora Bassa (HCB), em 2017 fez-se a atualização do estudo de análise e interpretação do comportamento observado, incluindo as estruturas salientes do descarregador de meio-fundo [R1], em 2021 levou-se a efeito o estudo de interpretação e previsão do comportamento estrutural, tendo em consideração, em particular, os resultados de ensaios do betão realizados no DM nos anos anteriores [R4], e em 2002 concluiu-se o estudo de análise da estabilidade dos encontros e da fundação da barragem, tendo em conta, entre outras ações, as expansões do betão da abóbada [R8];
- ii) para a barragem da Chicamba, em Moçambique, a pedido da Electricidade de Moçambique (EDM) e com suporte financeiro parcial do Instituto Camões, em 2019 foi realizada a inspeção e o diagnóstico da obra, após o ciclone Idai, que incluiu a interpretação do comportamento observado, requerendo a consideração da ação expansiva, embora de forma simplificada [R2, C110];
- iii) em 2020 foi emitido o relatório do estudo de avaliação do comportamento estrutural de um troço do cais do terminal de contentores do porto de Lomé, no Togo, cujo betão mostrou um alto potencial de expansão residual devido à presença de DEF, em que o DBB apoiou o DE na modelação estrutural [R3, C117]; neste estudo foi considerada, pela primeira vez, a discretização das armaduras, embora de uma forma simplificada, e foram estudados dois cenários de evolução da ação expansiva, um moderado e outro severo, com início em 2013 e final em 2025;
- iv) para a barragem de Peti, no Brasil, a pedido da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), concluiu-se em 2021 o estudo de interpretação e previsão do comportamento estrutural e avaliação das condições de segurança [R5, R6], com consideração da ação expansiva determinada a partir dos campos térmicos e higrométricos prováveis, bem como dos comportamentos viscoelástico e físico não linear do betão (através de um modelo de dano), o que permitiu a captura numérica dos padrões de fendilhação existentes em 2019 e realizar uma previsão do comportamento até 2029; e em 2022 fez-se o estudo de avaliação da segurança sísmica, tendo em consideração o elevado grau de deterioração do betão [R7]; e
- v) em 2023, a pedido dos Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Viseu (SMAS-Viseu), com moderação da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), acompanhou-se o desenvolvimento do trabalho e emitiu-se um parecer sobre o estudo de alternativas para a reabilitação da barragem de Fagilde [R9].

Na sequência de contratações específicas da EDP, estão em curso estudos de análise e interpretação do comportamento das barragens do Fratel e de Santa Luzia, ambas afetadas por expansões do betão.

Em conjunto com o DM e o DE, o DBB tem vindo a participar no estudo de avaliação do comportamento estrutural de viadutos de um troço da autoestrada A85 em França, concessionado à empresa Vinci Autoroutes, em que o betão está afetado por RSI. O estudo está praticamente concluído, tendo sido já apresentados ao dono de obra, informalmente, os principais resultados.

2.4 Breve apreciação da atividade desenvolvida

Devido às circunstâncias referidas na introdução deste documento, a equipa efetiva de projeto foi, durante a maior parte da sua vigência, constituída apenas por três elementos da carreira de investigação, pelo que teve uma dimensão mais reduzida do que a prevista inicialmente. No ponto 4.2, relativo aos recursos humanos mobilizados no projeto, poderá notar-se que, em termos médios, a afetação real dos elementos efetivos da equipa de projeto foi de cerca de 74% da prevista inicialmente. Estes aspetos tiveram influência no desenvolvimento das atividades e tarefas do projeto.

A atividade desenvolvida decorreu dentro do âmbito geral previsto no projeto. Houve, como referido, a redefinição do conteúdo de algumas tarefas e a não concretização de outras, designadamente as relacionadas com a produção de artigos científicos.

A redefinição mais importante prendeu-se com o abandono progressivo do código computacional antigo e a adoção e desenvolvimento do novo código computacional CoMat, que está a ser plenamente utilizado nos estudos realizados desde 2020. Refere-se que a aposta no novo programa implicou, desde 2018, um volume de trabalho significativo, uma vez que o novo programa não dispunha, inicialmente, das ferramentas numéricas necessárias para a análise de estruturas afetadas por expansões do betão de origem interna, tendo estas sido gradualmente incorporadas, quer adaptando algumas rotinas do programa anterior, quer implementando em novas rotinas as metodologias entretanto desenvolvidas. Considera-se que a opção tomada foi acertada, tendo em conta os ganhos obtidos em termos de eficiência computacional e as vantagens associadas à modularidade do código, que melhoraram a sua organização e facilitam o seu desenvolvimento futuro.

Outras atividades relevantes, que não estavam previstas na ficha do projeto, foram: i) a elaboração de um programa de investigação no âmbito da temática em apreço; e ii) a organização da *16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, realizada no LNEC em 2022.

Foram concluídas as três dissertações de mestrado previstas e o número de comunicações em eventos técnico-científicos superou largamente as previsões.

Refere-se que foi muito significativo o número de estudos por contrato realizados no âmbito da temática em apreço, cuja realização beneficiou muito com os desenvolvimentos computacionais conseguidos no projeto.

3 | Divulgação de resultados

3.1 Programas de investigação

[PI1] Batista, A.L. – **Deterioração e reabilitação de barragens afetadas por reações expansivas internas do betão**. Programas de Investigação e de Formação Pós-Graduada apresentados para obtenção do título de Habilitado para o Exercício de Funções de Coordenação de Investigação Científica, LNEC, Lisboa, abril de 2021.

3.2 Coordenação de atas de congressos

[ED1] Batista, A.L.; Santos Silva, A.; Fernandes, I.; Oliveira Santos, L.; Custódio, J.; Serra, C. **Proceedings of the 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**. Volumes I e II, Lisboa, 2022.

3.3 Dissertações de mestrado

[DM1] Sousa, S.P.A. – **Análise do comportamento estrutural de barragens afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem de Fagilde**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, dezembro de 2016.

[DM2] Rebelo, R. – **Estudo do comportamento estrutural de barragens arco-gravidade afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem da Bemposta**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, fevereiro de 2021.

[DM3] Ferra, S. – **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**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, janeiro de 2022.

3.4 Artigos em revistas científicas

[AC1] Piteira Gomes, J.; Silva Matos, D.; Batista, A.L.; Ferreira, J.I. – **Structural behavior of Pracana dam 30 years after rehabilitation due to severe ISR-ASR damage**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE), Série III, N. 15, pp. 85-94, março de 2021.

3.5 Artigos em revistas de divulgação técnica

[AD1] Oliveira Santos, L.; Piteira Gomes, J.; Xu, M. – **Monitorização e preservação. Monitorização dos efeitos estruturais das reações expansivas do betão**. Revista Construção Magazine, Nº 95, janeiro/fevereiro 2020.

[AD2] Batista, A.L.; Lamas, L.; Dias, I.F.; Gomes, J.P. – **Efeitos estruturais das expansões de origem interna do betão em barragens. Comprovação de tensões de compressão através de ensaios *in situ***. Revista Construção Magazine, Nº 107, janeiro/fevereiro de 2022.

[AD3] Custódio, J.; Batista, A.L.; Oliveira Santos, L. – **Reações expansivas no betão – prevenção, mitigação e segurança estrutural**. Revista Construção Magazine, Nº 115, maio/junho de 2023.

3.6 Palestras por convite em eventos técnico-científicos

[PL1] Batista, A.L. – **Acompanhamento dos processos de deterioração das barragens portuguesas afetadas por reações expansivas do betão**. Encontro Nacional Reabilitar e Betão Estrutural 2020, Lisboa, 2021.

[PL2] Batista, A.L. – **Deterioration processes of dams affected by concrete swelling reactions. The Portuguese experience in monitoring and rehabilitation**. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2020-2022), Volume II, Lisboa, 2022.

[PL3] Pina, C.; Dias, I.F. – **Numerical modelling of concrete dams affected by swelling reactions**. Congress on Numerical Methods in Engineering – CMN2022, Las Palmas de Gran Canaria, Espanha, 2022.

3.7 Publicações em eventos técnico-científicos

3.7.1 Comunicações em congressos nacionais

[CN1] Coelho, J.; Piteira Gomes, J.; Silva, A. – **Paralelização de um programa de elementos finitos tridimensional. Aplicação ao caso da análise do comportamento estrutural de uma barragem ao longo do tempo**. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa, 2014.

[CN2] Piteira Gomes, J., Batista, A.L., Silva, J.C. – **Avaliação dos efeitos do processo de deterioração do betão da barragem de Fagilde - Parte 1 – Caracterização do estado da obra**. II^o Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão, LNEC, Lisboa, setembro de 2016.

[CN3] Piteira Gomes, J., Batista, A.L., Silva, J.C. – **Avaliação dos efeitos do processo de deterioração do betão da barragem de Fagilde - Parte 2 – Análise do comportamento observado e recomendações de mitigação**. II^o Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão, LNEC, Lisboa, setembro de 2016.

[CN4] Piteira Gomes, J.; Batista, A.L. – **Metodologia para interpolação em todo o domínio de grandezas monitorizadas num número discreto de pontos de barragens de betão utilizando malhas de elementos finitos**. Encontro Nacional Reabilitar e Betão Estrutural 2020, Lisboa, 2021.

[CN5] Rebelo, R.; Dias, I.F.; Batista, A.L. – **Identificação e modelação dos efeitos das expansões do betão na barragem da Bemposta**. Encontro Nacional Reabilitar e Betão Estrutural 2020, Lisboa, 2021.

[CN6] Piteira Gomes, J.; Batista, A.L.; Sousa, S. – **Observação e análise dos efeitos estruturais das expansões do betão na barragem de Fagilde**. Encontro Nacional Reabilitar e Betão Estrutural 2020, Lisboa, 2021.

[CN7] Ferra, S.; Dias, I.F.; Batista, A.L. – **Interpretação e previsão do comportamento estrutural da barragem do Covão do Meio, afetada por expansões do betão**. 6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 2022.

3.7.2 Comunicações em congressos internacionais

[CI1] Coelho, J.; Silva, A.I.; Piteira Gomes, J. – **Parallelization of a tridimensional finite element program for structural behaviour analysis**. Euro-Par 2014: Parallel Processing Workshops, UP, Porto, 2014.

[CI2] Batista, A.L.; Piteira Gomes, J. – **Characteristic behaviour of the portuguese large concrete dams built with granite aggregates and affected by ASR**. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR 2016), São Paulo, Brasil, julho de 2016.

[CI3] Batista, A.L.; Fernandes, E.C.; Tembe, I.M. – **Comprehensive assessment of the Cahora Bassa dam's concrete swelling process**. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR 2016), São Paulo, Brasil, julho de 2016.

[CI4] Piteira Gomes, J., Batista, A.L., Sousa, S.P.M. – **Swelling effects in Fagilde dam (Portugal). First approach to structural analysis and interpretation**. Swelling concrete in dams and hydraulic structures (DSC 2017), Civil Engineering and geomechanics series, ISTE-Wiley, junho de 2017.

[CI5] Custódio, J., Ferreira, J.I., Silva, A.S., Ribeiro, A.B., Batista, A.L. – **The diagnosis and prognosis of ASR and ISR in Miranda dam, Portugal**. Swelling concrete in dams and hydraulic structures (DSC 2017), Civil Engineering and geomechanics series, ISTE-Wiley, junho de 2017.

[CI6] Custódio, J.; Camelo, A.; Bettencourt Ribeiro, A.; Silva, P.F.; Batista, A.L. – **Evaluating specific measures to minimize concrete swelling reactions in recent Portuguese dam construction**. 26th International Congress on Large Dams (ICOLD), Q101-R46, Viena, 2018.

[CI7] Batista, A.L.; Dias, I.F.; Piteira Gomes, J.; Carvalho, E.F.; Tembe, I.M. – **Updating of the behaviour analysis and interpretation of Cahora Bassa dam (Mozambique) considering the mid-bottom spillway structures**. Third International Dam World Conference, Foz do Iguaçu (Brasil), 2018.

[CI8] Piteira Gomes, J.; Batista, A.L.; Casaca, J. – **Methodology for the spatial interpolation of continuum physical quantities in a finite domain based on discrete samples. Application to arch dams**. Third International Dam World Conference, Foz do Iguaçu (Brasil), 2018.

[CI9] Lamas, L.; Gomes, J.P.; Carvalho, E.F.; Batista, A.L.; Matsinhe, B. – **Measurement of in situ stresses in the concrete of the Cahora Bassa dam**. 87th ICOLD Annual Meeting, Ottawa, 2019.

[CI10] Dias, I.F.; Batista, A.L.; Campira, J. – **Preliminary identification of the structural effects of concrete swelling in Chicamba dam (Mozambique)**. Fourth International Dam World Conference, Webinar, Lisboa, 2020 e 2021.

[CI11] Piteira Gomes, J.; Silva Matos, D.; Batista, A.L.; Ferreira, J.I. – **Structural behavior of Pracana dam 30 years after rehabilitation due to severe ISR-ASR damage**. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2020-2022), Volume I, Lisboa, 2022. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE), nº 15, Série III, março de 2021.

[CI12] Piteira Gomes, J.; Cunha, J.G.; Batista, A.L.; Almeida, F. – **Monitoring and assessment of the structural effects due to ASR in Santa Luzia dam (Portugal)**. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2020-2022), Volume I, Lisboa, 2022.

[CI13] Dias, I.F.; Batista, A.L.; Rebelo, R. – **Prediction of the structural behavior of Bemposta dam (Portugal), affected by concrete swelling**. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2020-2022), Volume II, Lisboa, 2022.

[CI14] Dias, I.F.; Batista, A.L.; Ferra, S. – **Influence of temperature and stress field seasonal variations in the development of concrete swelling in dams. Application to the case of Covão do Meio dam (Portugal)**. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2020-2022), Volume II, Lisboa, 2022.

[CI15] Dias, I.F.; Batista, A.L.; Carvalho, E.F. – **Analysis, interpretation and prediction of the structural behavior of Cahora Bassa dam (Mozambique), affected by concrete swelling**. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2020-2022), Volume II, Lisboa, 2022.

[CI16] Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. – **Numerical simulation of concrete swelling using mesoscale detailed 2D particle models taking into account aging viscoelasticity and damage**. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2020-2022), Volume II, Lisboa, 2022.

[CI17] Xu, M.; Santos, C.F.; Piteira Gomes, J.; Custódio, J.; Oliveira Santos, L. – **Prediction of the structural effects of expansive reactions on a concrete structure in a marine environment**. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2020-2022), Volume II, Lisboa, 2022.

[CI18] Gorga, R.V.; Sanchez, L.; Martín-Pérez, B.; Noël, M.; Dias, I.F.; Batista, A.L. – **Two approaches for FE assessment of ASR-affected dams**. 91st ICOLD Annual Meeting, Gotemburgo, 2023.

3.8 Sessões em seminários e reuniões técnico-científicas

[S1] Batista, A.L.; Piteira Gomes, J. – **The Portuguese large concrete dams affected by swelling processes**. ICOLD 2013 Post Tour & Workshop B4, Southeastern US Dams with Alkali-Aggregate Reactions, International Workshop on Managing AAR in Dams, Fontana, USA, 20 de agosto de 2013.

[S2] Batista, A.L.; Piteira Gomes, J. – **As barragens portuguesas afetadas por reações expansivas do betão**. Comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha, LNEC, Lisboa, 8 de outubro de 2013.

[S3] Batista, A.L.; Piteira Gomes, J. – **Diagnóstico e reabilitação de barragens afetadas por reações expansivas do betão**. Seminário Barragens no espaço CPLP: experiências, soluções e desafios, Maputo, Moçambique, 17 e 18 de novembro de 2014.

[S4] Piteira Gomes, J.; Batista, A.L. – **Structural modelling and analysis of concrete dams affected by swelling processes**. Seminário Modelling of concrete dams, Second International Dam World Conference, Lisboa, 20 de abril de 2015.

[S5] Batista, A.L.; Santos Silva, A. – **Portuguese application to host the XVI International conference on on alkali aggregate reaction in concrete in 2020 (ICAAR-2020) at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC), in Lisbon**. Reunião do comité internacional da ICAAR, São Paulo (Brasil), 7 de julho de 2016.

[S6] Batista, A.L. – **Barragem de Cahora Bassa. Breve resenha dos estudos realizados pelo LNEC no âmbito da análise dos efeitos estruturais das reações expansivas de origem interna do betão**. Reunião HCB, LTu e LNEC, 20 de março de 2017.

[S7] Piteira Gomes, J.; Batista, A.L. – **Structural modelling and analysis of concrete structures affected by swelling processes**. Rencontre Scientifique et Technique sur les RGIB de l'ASFAS. IFFSTAR, Champs sur Marne, Paris, 31 de março de 2017.

[S8] Batista, A.L., Lamas, L.N., Ribeiro, A.B., Melo, J.F. – **Barragem de Cahora Bassa. Estudos em curso relativos a aspetos da segurança estrutural e hidráulica**. 8º Encontro Técnico-Científico dos Laboratórios de Engenharia Civil da CPLP - Parcerias para a Capacitação, Lisboa, LNEC, 22 de maio de 2017.

[S9] Batista, A.L.; Gomes, J.P.; Melo, J.F. – **Barragem de Cahora Bassa. Síntese dos resultados disponíveis dos 4 estudos em curso no LNEC**. Reunião de coordenação HCB-LTu-LNEC realizada na visita trimestral de abril de 2018, Songo, 11 de abril de 2018.

[S10] Piteira Gomes, J. – **Apresentação do comportamento estrutural da barragem de Pracana**. 18º Curso de Exploração e Segurança de Barragens, Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Lisboa, 20 a 30 de maio de 2019.

[S11] Piteira Gomes, J. – **Sistemas de monitorização dos efeitos das reações expansivas em barragens**. Ação de formação para a Hidroelétrica de Cahora Bassa (HCB), LNEC, Lisboa, fevereiro de 2020.

[S12] Piteira Gomes, J. – **Modelação estrutural das reações expansivas e dos seus efeitos em barragens**. Ação de formação para a Hidroelétrica de Cahora Bassa (HCB), LNEC, Lisboa, fevereiro de 2020.

[S13] Dias, I.F.; Batista, A.L. – **Resultados do estudo A - Análise e interpretação do comportamento observado da barragem de Cahora Bassa**. Workshop sobre os resultados dos

estudos do LNEC de 2016-2021 sobre aspetos de segurança da barragem de Cahora Bassa, Songo, 11 a 14 de outubro de 2021.

[S14] Batista, A.L.; Lamas, L.; Dias, I.F.; Custódio, J.; Melo, J.F. – **Barragem de Cahora Bassa. Principais questões de segurança e estudos do LNEC. Síntese.** Workshop sobre os resultados dos estudos do LNEC de 2016-2021 sobre aspetos de segurança da barragem de Cahora Bassa, Songo, 11 a 14 de outubro de 2021.

[S15] Piteira Gomes, J. – **Apresentação do comportamento estrutural da barragem de Pracana.** 19º Curso de Exploração e Segurança de Barragens, Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Lisboa, 9 a 19 de maio de 2022.

3.9 Relatórios e outras publicações do LNEC

3.9.1 Relatórios de estudos por contrato

[R1] Batista, A.L.; Dias, I.F.; Piteira Gomes, J. – **Barragem de Cahora Bassa. Atualização do estudo de análise e interpretação do comportamento observado, incluindo as estruturas salientes do descarregador de meio-fundo.** Relatório 40/2017, fevereiro de 2017.

[R2] Dias, I.F.; Batista, A.L.; Franco, A.B. – **Barragem da Chicamba. Inspeção e diagnóstico de maio de 2019 (após o ciclone Idai) e interpretação do comportamento observado.** Relatório 43/2020, fevereiro de 2020.

[R3] Xu, M.; Santos, C.F.; Oliveira Santos, L.; Piteira Gomes, J. – **Lomé Container Terminal. Effects of swelling reactions on the structural behaviour of the quay wall.** Relatório 147/2020, abril de 2020.

[R4] Dias, I.F.; Batista, A.L. – **Barragem de Cahora Bassa. Interpretação e previsão do comportamento estrutural.** Relatório 36/2021, fevereiro de 2021.

[R5] Dias, I.F.; Piteira Gomes, J.; Tavares de Castro, A. – **Barragem de Peti. Interpretação e previsão do comportamento estrutural e avaliação das condições de segurança.** Relatório 356/2021, novembro 2021.

[R6] Tavares de Castro, A.; Piteira Gomes, J.; Dias, I.F. – **Barragem de Peti. Estudos complementares de avaliação das condições de segurança estrutural.** Relatório 357/2021, novembro 2021.

[R7] Lemos, J.V.; Carvalho, A.M.; Dias, I.F. – **Barragem de Peti. Estudos de avaliação da segurança sísmica.** Relatório 228/2022, julho 2022.

[R8] Lamas, L.; Pereira, R.; Jeremias, F.T.; Lemos, J.V.; Batista, A.L.; Dias, I.F. – **Barragem da Cahora Bassa. Estudo da estabilidade dos encontros e da fundação. Relatório final.** Relatório 373/2022, dezembro de 2022.

[R9] Batista, A.L.; Viseu, T.; Muralha, J.; Lemos, J.V. – **Barragem de Fagilde. Parecer sobre o estudo de alternativas para a reabilitação da obra.** Relatório 33/2023, janeiro de 2023.

3.9.2 Outros documentos

[D1] Batista, A.L.; Silva, A.S. – **Portuguese application to host the XVI International Conference on Alkali Aggregate-Reaction in Concrete in 2020 (ICAAR-2020) at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC), in Lisbon.** LNEC. Lisboa, 2016.

4 | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento

4.1 Indicadores de desempenho do projeto

No Quadro 4.1 apresentam-se os indicadores de desempenho do projeto, designadamente em termos de publicações, previstas na ficha inicial e as realizadas entre 2016 e 2023. O quadro inclui ainda uma primeira coluna com os resultados da investigação obtidos nesta temática no período 2013-2015.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho em termos de publicações

Indicadores	Realizado no período de 2013 a 2015, antes da submissão do projeto	Total previsto no projeto (2016 a 2019, 4 anos)	Realizado entre julho de 2016 e outubro de 2023 (cerca de 7 anos)
Programas de investigação	-	-	1
Dissertações de mestrado	-	3	3
Artigos em revistas nacionais	-	1	1
Artigos em revistas internacionais	-	4	-
Artigos em revistas de divulgação técnica	-	-	3
Comunicações em congressos nacionais	1	16	6
Comunicações em congressos internacionais	1	-	17
Palestras por convite	-	-	3
Sessões em seminários, reuniões e cursos	4	-	11
Relatórios de estudos por contrato com forte incorporação dos desenvolvimentos do projeto	-	-	9
Outros documentos	-	-	1

Foram concretizadas três dissertações de mestrado, como previsto. Como referido, não foi possível elaborar os artigos previstos em revistas internacionais. O número de comunicações em eventos nacionais também foi menor que o previsto. Contudo, foi elaborado um grande número de comunicações para eventos internacionais. Realça-se ainda a elaboração de um programa de investigação e a realização de um grande número de estudos por contrato com forte incorporação de resultados do projeto, sendo que a maioria desses estudos tiveram uma dimensão e complexidade assinaláveis.

4.2 Recursos humanos mobilizados

No Quadro 4.2 apresenta-se, para os quatro investigadores adstritos ao projeto, o número de horas anuais que foram imputadas no processo do projeto, entre julho de 2016 e o final de setembro de 2023.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos ao projeto, em número de horas

Investigador	Horas de trabalho, entre 2016 e 2023, e totais								
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	TOTAL
José Piteira Gomes	184	346	365	170	297	194	299	229	2084
António Lopes Batista	84	30	90	70	421	336	225	150	1406
Ivo Figueiredo Dias	-	-	140	10	247	371	399	114	1281
João Conde Silva	250	403	582	-	-	-	-	-	1235

No Quadro 4.3 apresentam-se, para os recursos humanos dedicados ao projeto, a afetação percentual inicialmente prevista, os anos dedicados ao projeto, os meses de trabalho correspondentes à previsão inicial, os meses de trabalho extrapolados face ao tempo efetivo no projeto, os meses de trabalho imputados ao projeto e a concretização percentual face ao previsto inicialmente.

Quadro 4.3 – Afetação de recursos humanos ao projeto, prevista e concretizada

Investigador	Afetação percentual prevista	Anos de afetação ao projeto	Meses de trabalho			Concretização percentual
			Previsto para os primeiros 4 anos	Extrapolação da previsão para o tempo efetivo de afetação ao projeto	Imputados ao projeto	
José Piteira Gomes	30%	7	14,4	25,2	13,5	54%
António Lopes Batista	10%	7	4,8	8,4	9,1	108%
Ivo Figueiredo Dias	15%	7	7,2	12,6	8,3	66%
João Conde Silva	40%	2,5	19,2	12,0	8,0	67%

A concretização percentual foi inferior à prevista, exceto no caso do IC António Lopes Batista, devido a ter elaborado o programa de investigação durante a vigência do projeto. Em termos médios, para os quatro elementos a concretização foi de cerca de 74% relativamente à prevista inicialmente, que se pode considerar, no contexto dos condicionamentos do LNEC, um valor genericamente bom.

4.3 Financiamento

Como referido em 2.2.6, tentou obter-se financiamento externo com candidaturas à FCT, através de um projeto em 2017 e de uma bolsa de doutoramento em 2022, mas nenhuma teve sucesso. Ao

invés, a realização de dissertações de mestrado e de estudos por contrato no âmbito da temática do projeto potenciaram o desenvolvimento de metodologias e de ferramentas numéricas, que muito contribuíram para o avanço dos conhecimentos e para a boa execução das dissertações e dos estudos.

5 | Considerações finais

O projeto de investigação *Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão afetadas por reações expansivas*, com o acrónimo DamSwelling, do P2I 2013-2020, pretendeu dar seguimento aos estudos de investigação antes enquadrados no projeto de investigação *Deterioração e reabilitação de barragens de betão e alvenaria*, do PIP/LNEC 2009-2012, nos aspetos relacionados com o estudo e a modelação dos efeitos estruturais em barragens das reações expansivas do betão de origem interna.

O tema de investigação do projeto tem particular interesse para o DBB, dado que cerca de um terço das 60 grandes barragens de betão portuguesas com acompanhamento continuado do LNEC estão afetadas por reações expansivas do betão. Houve uma grande interação com o DM, no que toca aos aspetos químicos e físicos das reações expansivas, e com o DE, no que respeita ao apoio a estudos de obras de betão armado pré-esforçado afetadas por esta patologia.

Houve condicionamentos ao desenvolvimento das tarefas do projeto, alguns dos quais relacionados com a desvinculação do projeto de elementos da equipa inicial, por motivos diversos. A partir de 2018 a equipa ficou reduzida a três investigadores, mas considera-se, pelo exposto no presente documento, que os resultados do projeto são francamente positivos.

Como algumas das tarefas não foram concluídas, propõe-se que o projeto prossiga no próximo ciclo de investigação do LNEC, tirando também partido do programa de investigação concluído em 2021. Em síntese, o prosseguimento do projeto deverá incidir sobre os seguintes aspetos:

- a) Melhoramento da modelação numérica dos processos de fendilhação (formação e propagação das fendas) e da afetação da rigidez e da resistência do betão, ao longo do tempo;
- b) Melhoramento da modelação numérica de descontinuidades (existentes ou a introduzir) e de elementos laminares e lineares (chapas, mantas e armaduras, passivas e ativas), em toda a gama de deformações;
- c) Consideração da heterogeneidade do betão e da sua influência na evolução das expansões e dos processos de degradação; e
- d) Aprofundamento da modelação dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão.

Pretende-se que continue a existir uma grande interação com o DM e o DE, para que se possa dispor de ferramentas numéricas potentes para estudar todo o tipo de estruturas de betão afetadas por expansões de origem interna, incluindo o apoio a intervenções de reabilitação.

Lisboa, LNEC, outubro de 2023

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas



Luís Nolasco Lamas

O Chefe do Núcleo de Observação



António Tavares de Castro

O Diretor do Departamento de Barragens de Betão



António Lopes Batista

AUTORIA



José Piteira Gomes
Investigador Auxiliar



António Lopes Batista
Investigador-Coordenador



Ivo Figueiredo Dias
Investigador Auxiliar



João Conde Silva
Investigador Auxiliar

ANEXO

Ficha do projeto DamSwelling

FICHA DE PROJETO DE I&D&I 2013-2020

1 - Dados Gerais

1.1 Identificação do projeto

Designação	Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão afetadas por reações expansivas
Acrónimo	DamSwelling
Unidade Departamental proponente	DBB
Setor	NO
Investigador Responsável	José Carlos Piteira Gomes
Duração (meses)	48
Data de início (ano-mês-dia)	15/07/2016

1.2 Inserção na matriz programática da E2I (indicar par(es) (Eixo programático, Temática prioritária))

Par principal (obrigatório)	E1, T8
Par secundário (opcional)	E1, T2

1.3 Entidades intervenientes

Entidade coordenadora	LNEC
Parceiros internos	DBB/NO; DBB/NMMR; DBB/CH; NTIEC
Parceiros externos	
Entidade externa interessada	EDP
Financiamento externo (S/N)	N

1.4 Resumo

Atualmente existe um número considerável de estruturas em betão nas quais ocorrem processos de deterioração, provocados pelos efeitos de reações expansivas de origem interna, devidos à utilização de agregados com constituintes reativos em soluções fortemente básicas, como é o caso da solução intersticial do betão. Nas barragens, estruturas essenciais para a atividade humana, a deterioração do betão só foi identificada após a manifestação das suas consequências nefastas, durante a fase de serviço. Há casos de obras em que as expansões atingiram uma intensidade que provocou danos significativos, deixando de preencher as condições de funcionalidade e de segurança previstas quando da sua conceção.

Estes processos de deterioração do betão, devidos a reações álcalis-agregado (RAA) e reações sulfáticas internas (RSI), ocorrem com alguma frequência e dão origem à formação de produtos expansivos que, devido à baixa resistência do betão à tração, provocam fissuração e conseqüente depreciação das suas propriedades mecânicas. As RAA distinguem-se em reações álcalis-silica (RAS) e reações álcalis-carbonato (RAC). A iniciação e o desenvolvimento destes processos facilitam a infiltração de água para o interior da massa de betão, conduzindo à sua aceleração, conforme tem sido observado num elevado número de estruturas e confirmado laboratorialmente.

Sendo as barragens estruturas de grande valor económico e de risco potencial elevado, e tendo em conta as vantagens que se podem obter do prolongamento da vida útil destas estruturas, é essencial estudar o seu comportamento bem como os efeitos da evolução do processo de deterioração ao longo do tempo, de modo que nunca esteja comprometida a funcionalidade e se possa assegurar a durabilidade e a segurança em todas as fases da vida destas obras.

2 - Fundamentação

(síntese do estado da arte, identificação de problemas por resolver, motivações internas e/ou externas)

Existe atualmente um número considerável e crescente de estruturas em betão, em Portugal e no mundo, nas quais ocorrem processos de deterioração provocados pelos efeitos de reações expansivas de origem interna, devido à utilização de agregados com constituintes reativos em soluções fortemente básicas, como é o caso da pasta de cimento intersticial do betão. Nestas estruturas, a maioria construídas entre 1940 e 1980, muitas delas com uma importância significativa para a sociedade, tais como pontes, túneis, barragens, portos e pavimentos rodoviários e aeroportuários, a deterioração do betão é evidenciada através da manifestação das suas consequências nefastas, designadamente através de fendilhação com padrão característico. Há casos de obras em que as expansões atingiram uma intensidade que provocou danos significativos, deixando de preencher os requisitos de funcionalidade e de segurança previstas quando da sua conceção, especialmente as que estiveram expostas a ambientes agressivos.

Os processos de deterioração do betão em apreço são devidos a reações álcalis-agregado (RAA) e a reações sulfáticas internas (RSI). As reações deste tipo são alimentadas por água e dão origem à formação de produtos expansivos nas orlas dos agregados que, devido à baixa resistência do betão à tração, provocam a sua fissuração e a consequente depreciação das suas propriedades mecânicas [Larive,1998; Multon, 2003]. A iniciação e o desenvolvimento destes processos facilitam o acesso de água para o interior da massa de betão, conduzindo à aceleração da degradação, conforme tem sido observado num elevado número de estruturas e também confirmado laboratorialmente. Devido à sua maior exposição à água, as estruturas hidráulicas são das mais suscetíveis. Entre elas destaca-se o caso das barragens, em que o betão é aplicado em grandes massas, o que potencia o agravamento dos efeitos das expansões.

A realidade tem mostrado que estes processos de deterioração são particularmente gravosos nas barragens de betão. Em Portugal existem atualmente cerca de duas dezenas de obras afetadas, cerca de um terço do total das grandes barragens de betão que têm um acompanhamento continuado pelo LNEC. Estas estruturas, que têm uma importância estratégica e económica, justificam a realização de estudos de investigação que contribuam para aprofundar o conhecimento dos fenómenos expansivos e dos seus efeitos, para permitir a exploração das estruturas existentes com níveis de desempenho aceitáveis e a definição de medidas de mitigação nas obras novas e naquelas que é necessário intervencionar. Os estudos deverão ainda permitir uma melhor adequação dos sistemas de observação à gestão das obras, o que contribui para o aumento da vida útil e para a redução dos custos nas intervenções.

A quantificação da deterioração ocorrida em grandes barragens de betão, induzida pelas reações químicas expansivas internas, a partir da sua observação (monitorização e inspeção), bem como a avaliação das condições de funcionalidade e de segurança das obras e o prognóstico do seu comportamento e do tempo de vida útil remanescente, constituem aspetos fundamentais na gestão deste tipo de infraestruturas que ainda não se encontram cabalmente resolvidos [Bérube et al, 2005]. A manutenção e a reabilitação deste tipo de estruturas é muito importante na garantia da sustentabilidade das sociedades, no que respeita ao abastecimento de água, à irrigação, à produção de energia elétrica e ao controlo de cheias, evitando-se assim novas construções, que são onerosas em várias vertentes.

No Departamento de Barragens de Betão (DBB) do LNEC têm vindo a ser desenvolvidas metodologias de: i) observação e inspeção das obras com vista à quantificação preliminar das próprias expansões e dos seus efeitos macroscópicos nas estruturas; e ii) de análise dos efeitos estruturais, recorrendo a modelação matemática através do método dos elementos finitos, considerando a simulação do desenvolvimento das expansões a partir das condições intrínsecas do betão (composição), ambientais (térmicas e higrométricas) e mecânicas, bem como a representação dos aspetos físicos relevantes do comportamento dos materiais (fluência/relaxação e fendilhação). As ferramentas numéricas já disponíveis têm sido aplicadas com sucesso na resolução de casos em que a viscoelasticidade baliza o comportamento das obras, mas nos casos em que estão envolvidos processos de fratura essas ferramentas são usadas ainda com muitas limitações [Capra, 1997; Saouma, 2006; Grimal, 2007; Gomes, 2008]. Pretende-se, com o desenvolvimento do presente projeto de investigação, superar este tipo de constrangimentos.

O acompanhamento do comportamento das barragens portuguesas, imposto ao LNEC por atribuições regulamentares para as obras de maior risco e importância, exige, para que seja feito de forma criteriosa e abrangente, a disponibilidade das capacidades de cálculo atrás enunciadas [Batista, 1998; Oliveira, 2000]. Acresce ainda que o LNEC tem vindo a ter solicitações em número crescente para a realização de estudos de

grandes barragens estrangeiras afetadas por esta patologia, tendo a capacidade de resposta sido condicionada pelas limitações referidas. Assim, considera-se prioritária a superação das atuais limitações, a que o presente projeto pretende dar resposta.

3 - Objetivos

(indicar para além dos objetivos científicos do projeto, os objetivos do investigador responsável e das entidades envolvidas)

Com o projeto pretende-se dar um contributo significativo no melhoramento do desempenho das ferramentas de análise do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a processos expansivos de origem interna, através da: i) incorporação de conhecimentos da área de engenharia de materiais para melhor definição da ação expansiva, em função das reações presentes e dos diferentes tipos de agregados; ii) consideração, numa solução integrada, a resolução dos problemas térmico, higrométrico e estrutural; iii) consideração de métodos de resolução dos sistemas de equações lineares mais adequados na análise não linear; iv) inclusão da possibilidade de recomeçar o cálculo a partir de qualquer fase; v) consideração de diferentes modelos de comportamento material em distintas fases de evolução das expansões; e vi) do recurso à programação em paralelo para reduzir significativamente os tempos de cálculo.

Os processos de deterioração em apreço são, em geral, lentos, desenvolvendo-se com taxas anuais de expansão que, no caso português, atingem incrementos de extensão máximos de cerca de 150×10^{-6} . Os seus efeitos estruturais só são visíveis ao fim de 20 ou mais anos, podendo comprometer a funcionalidade e a segurança das obras entre uma e três décadas mais tarde [ICOLD, 1991; CSA, 2000]. As análises estruturais necessárias envolvem assim longos períodos de tempo, comportando o período conhecido de vida das obras e, frequentemente, também um período posterior, de uma ou duas décadas, para simular os efeitos esperados, na perspetiva da decisão da necessidade de intervenções.

A análise do comportamento estrutural de barragens sujeitas a estes processos de deterioração, principalmente após a ocorrência de fendilhação, envolve representações refinadas da geometria das obras, a que correspondem malhas de cálculo de alguma dimensão e a resolução de grandes sistemas de equações. As discretizações no domínio do tempo, considerando muitos anos de análise, são também muito pesadas, pois exigem a resolução desses grandes sistemas de equações muitas vezes.

Face ao descrito, apresentam-se, de seguida, os aspetos fundamentais a abordar no projeto:

- Introduzir maior rigor na representação matemática da ação expansiva;
- Estudo da influência da utilização de diferentes algoritmos na representação da anisotropia do processo expansivo devida ao estado de tensão;
- Consideração de métodos de resolução dos sistemas de equações lineares mais adequados na análise não linear;
- Consideração de diferentes modelos de comportamento material em diferentes fases de cálculo através da definição de estados de referência;
- Recurso à programação em paralelo para reduzir os tempos de cálculo.

O principal objetivo do projeto é a obtenção de uma ferramenta de cálculo computacional para análise do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a processos expansivos, que permita a simulação, de forma adequada, deste tipo de ação nos domínios dos comportamentos materiais viscoelástico e não linear por ocorrência de fendilhação. Pretende-se que seja uma ferramenta robusta e rápida, para permitir superar as limitações dos códigos disponíveis e responder, em tempo útil, às muitas solicitações de entidades externas, designadamente nos estudos em curso relativos às barragens de Santa Luzia, Fratel e Fagilde, em Portugal, e Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil).

Os objetivos da equipa de investigação adstrita e das entidades envolvidas são os seguintes: i) melhorar a representação matemática da ação expansiva, para permitir uma melhor interpretação do comportamento observado e a realização de prognósticos melhor sustentados; ii) estabelecer melhores ligações entre a informação obtida por via experimental e a utilizada na modelação numérica, através de uma maior colaboração com o Departamento de Materiais; iii) compreender as causas das discrepâncias normalmente verificadas entre os resultados dos ensaios laboratoriais de expansibilidade e as expansões efetivamente medidas em obra; iv) realizar estudos de avaliação do comportamento e da segurança de barragens de betão sujeitas a estes processos de deterioração; v) estudar a adequabilidade de diferentes soluções de reabilitação

de obras degradadas; e vi) realizar estudos de avaliação do desempenho das tecnologias usadas em obras reabilitadas.

4 - Contribuições inovadoras

(indicar as contribuições para o reforço dos conhecimentos, das competências e/ou dos recursos experimentais do LNEC)

Como referido, o projeto de investigação tem por objetivo melhorar as ferramentas numéricas para a análise do comportamento de barragens de betão sujeitas a reações expansivas e reforçar os conhecimentos e as competências da equipa de investigação, no sentido de aumentar a sua capacidade de resposta nos estudos em curso, bem como para outros que se perspetivam.

O trabalho proposto inclui o melhoramento da representação matemática da ação expansiva, nomeadamente para contemplar a possibilidade da reação álcalis-agregado se esgotar ou não consoante o tipo de agregado do betão e incluir a ocorrência de reações sulfáticas internas [Kchakech, 2015]. Prevê-se que estes melhoramentos possam contribuir para a simulação dos efeitos macroscópicos resultantes da ocorrência simultânea das duas reações, embora, numa primeira fase, sem considerar as suas interações. Prevê-se também a integração, num modelo de análise termo-higrométrico, dos efeitos das ações térmica e higrométrica, que incluía leis de evolução das propriedades dos materiais que permitam simular o efeito do dano devido à ação expansiva e suas consequências na evolução do processo de deterioração do betão. Relativamente ao cálculo estrutural, prevê-se a paralelização de tarefas para reduzir tempos de cálculo. Prevê-se também o desenvolvimento de um novo algoritmo para melhor consideração das tensões de confinamento na restrição das expansões.

5 - Metodologia

(descrição da abordagem e dos métodos teóricos e/ou experimentais a utilizar)

Apresentam-se, de seguida, breves descrições da abordagem e dos métodos a utilizar em cada uma das três principais tarefas previstas.

Atividade 1. Ação expansiva

Tarefa 1.1. Consideração de uma nova lei de desenvolvimento da reação álcalis-agregado em que a reação pode ou não esgotar-se, recorrendo sempre que possível à resolução das equações diferenciais que regem o comportamento de cada um destes fenómenos, em alguns casos de forma acoplada; quando tal não for possível recorrer-se-á a leis experimentais obtidas laboratorialmente;

Tarefa 1.2. Inclusão de uma lei de desenvolvimento dos efeitos macroscópicos da reação sulfática interna, recorrendo à resolução de uma equação diferencial que traduza a cinética desta reação;

Tarefa 1.3. Simulação dos efeitos macroscópicos resultantes da ocorrência simultânea das duas reações expansivas, testando a influência de cada uma das reações em casos reais;"

Tarefa 1.4. Implementação de um novo modelo termo-higrométrico que considere as ações térmica e higrométrica de modo integrado, incluindo leis de evolução da porosidade no tempo para simular o efeito do dano devido à ação expansiva que permita mostrar a influência da fendilhação na aceleração do processo de deterioração.

Tarefa 1.5. Submissão de um artigo científico em revista internacional com as características do modelo de geração da ação expansiva e os principais resultados obtidos.

Atividade 2. Otimização do cálculo estrutural

Tarefa 2.1. Desenvolvimento de um novo algoritmo de cálculo do incremento de extensões devidas ao processo expansivo, considerando o confinamento devido ao estado de tensão;

Tarefa 2.2. Inclusão de estados de referência no cálculo estrutural, para possibilitar o reinício da análise a partir de qualquer fase;

Tarefa 2.3. Consideração de métodos de resolução dos sistemas de equações lineares mais adequados na análise não linear;

Tarefa 2.4. Paralelização do programa de cálculo estrutural, recorrendo a ferramentas PETSc que utilizam protocolos MPI para a comunicação entre processadores;

Tarefa 2.5. Submissão de um artigo científico em revista internacional que evidencie as melhorias na velocidade de processamento e na estabilidade numérica na resolução de sistemas mal condicionados.

Atividade 3. Análise do comportamento estrutural de barragens sujeitas a reações expansivas

Tarefa 3.1. Tratamento da informação relativa à monitorização, inspeção e ensaios;

Tarefa 3.2. Realização dos estudos de análise do comportamento das barragens de Santa Luzia, Fagilde e Peti (Brasil), desde o primeiro enchimento das respetivas albufeiras até à atualidade;

Tarefa 3.3. Simulação de tecnologias de reabilitação em barragens degradadas por reações expansivas e avaliação da eficácia das medidas de reabilitação;

Tarefa 3.4. Submissão de um artigo científico em revista internacional com a comparação dos resultados de monitorização contínua e dos resultados numéricos no estudo do comportamento de barragens.

Tarefa 3.5. Submissão de um artigo científico em revista internacional com os resultados de um estudo de análise de soluções de reabilitação de barragens sujeitas a processos de deterioração por reações expansivas.

Bibliografia

Batista, A.L. – “Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada”. Tese de doutoramento (elaborada no LNEC), IST, Lisboa, 1998.

Bérubé, M.A., Smaoui, N., Bissonnette, B., Fournier, B. – “Outil d’évaluation et de gestion des ouvrages d’art affectés de reactions alcalis-silice (RAS)”. Études et Recherches en Transport. Étude réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec, 2005.

Capra, B. – “Modélisation des effets mécaniques induits par les reactions alcalis-granulats”. PhD Thesis, École Normale Supérieure de Cachan, 1997.

Coussy, O. – “Mechanics of porous continua”. Ed. J Wiley and Sons, 1995.

CSA International – “Guide to the Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali-Aggregate Reaction”. General Instruction No.1, A864-00, pp. 116, 2000.

Faria, R., Oliver, J. – “A Rate Dependent Plastic-Damage Constitutive Model for Large Scale Computations in Concrete Structures”. Centro Internacional de Metodos Numericos en Ingenieria. Monografia CIMNE Nº. 17, Enero 1993.

Faria, R., Oliver, J., Cervera, M. – “A strain-Based Plastic Visco-Damage Model for Massive Concrete Structures”. Int. Journal Solids Structures, Vol. 35, Nº.14, pp. 1533-1558, 1998.

Gomes, J.C. - "Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a reações expansivas". Tese de doutoramento (elaborada no LNEC), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008.

Grimal, E. - "Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton". Ph.D. Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2007.

ICOLD (International Commission on Large Dams) – “Alkali-aggregate reaction in concrete dams”. Boletim nº 79, Paris, 1991.

Kchakech, B. - "Etude de l'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la Réaction Sulfatique Interne". Ph.D. Thesis, Université Paris-Est, Paris, 2015

Larive, C. – “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 Nacional de Ponts et Chaussées, Paris, 1998.

Multon, S. – “Évaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l’alcali-réaction sur des structures modèles”. PhD Thesis (préparée au LCPC), Université de Marne-la-Vallée, 2003

Oliveira, S.B. – “Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano”. Tese de doutoramento (elaborada no LNEC), FEUP, Porto, 2000.

Saouma, V., Perotti, L. - "Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions". ACI Materials Journal 05/2006; 103(3):194-202.

Saouma, V., Martin R., Hariri-Ardebili, M., Katayama, T. - "A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction". Cement and Concrete Research 12/2014; cemconres 2014.

Ulm, F.J., Coussy, O., Kefei, L., Larive, C. – "Thermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structures". Journal of Engineering Mechanics, March 2000.

6 - Plano de trabalhos

Atividade	Designação da atividade	Tarefa	Designação da tarefa	1º semestre	2º semestre	3º semestre	4º semestre	5º semestre	6º semestre	7º semestre	8º semestre
1	Representação matemática da ação expansiva	T1.1	Consideração de uma nova lei de desenvolvimento da reação álcalis-agregado em que a reação pode ou não esgotar-se								
		T1.2	Inclusão da lei de desenvolvimento da reação sulfática interna								
		T1.3	Simulação dos efeitos macroscópicos resultantes da ocorrência simultânea das duas reações expansivas (reação álcalis-silica e reação sulfática)								
		T1.4	Realização de testes de comparação dos resultados do modelo de simulação da ação expansiva com resultados experimentais obtidos laboratorialmente no Departamento de Materiais								
		T1.5	Implementação de um modelo termo-higrométrico que considere as ações térmica e higrométrica de modo integrado e que inclua leis de evolução da porosidade para simular o efeito do dano devido à ação expansiva								
		T1.6	Submissão de um artigo científico em revista internacional com os resultados das comparações efetuadas na tarefa 1.4.								
		T1.7	Submissão de um artigo científico em revista internacional com as características do modelo de geração da ação expansiva e os principais resultados obtidos.								

2	Otimização do cálculo estrutural	T2.1	Desenvolvimento de um novo algoritmo para consideração dos efeitos do confinamento nas expansões										
		T2.2	Consideração de estados de referência no cálculo estrutural										
		T2.3	Consideração de métodos de convergência mais estáveis no cálculo não linear										
		T2.4	Recurso à programação em paralelo para redução dos tempos de cálculo.										
		T2.5	Submissão de um artigo científico em revista internacional que evidencie os melhoramentos na velocidade de processamento e na estabilidade numérica na resolução de sistemas mal condicionados.										
3	Análise do comportamento estrutural de barragens sujeitas a reações expansivas	T3.1	Tratamento da informação relativa à monitorização, inspeção e ensaios										
		T3.2	Realização dos estudos de análise do comportamento das barragens de Santa Luzia, Fagilde e Peti (Brasil) desde o primeiro enchimento das respetivas albufeiras até à atualidade										
		T3.3	Realização de estudos de avaliação de diferentes tecnologias de reabilitação de barragens degradadas por reações expansivas										
		T3.4	Submissão de um artigo científico em revista internacional com a comparação dos resultados da monitorização contínua e dos resultados de modelos numéricos para a avaliação do comportamento de barragens.										
		T3.5	Submissão de um artigo científico em revista internacional com os resultados de um estudo de análise de soluções de reabilitação de barragens sujeitas a processos de deterioração por reações expansivas.										

7 - Equipa de trabalho

Nome	Categoria	Setor/Entidade	Tarefas	Afetação ao projeto (%)
José Carlos Piteira Gomes	IA	DBB/NO	Coordenação	30%
António Lopes Batista	IP	DBB/Chefia		10%
Noemi Alejandra Schclar Leitão	IP	DBB/NO		15%
Ivo Miguel Figueiredo Dias	BPD	DBB/NMMR		15%
João Miguel Arsénio Rico	BIIC	NTIEC		30%
João Conde Silva	BIIC	DBB/NO		40%

IA – Investigador Auxiliar

IP – Investigador Principal

BPD – Bolseiro de Pós-Doutoramento

BIIC – Bolseiro de Iniciação à Investigação Científica

8 - Resultados expetáveis

Resultados por atividade/tarefa	Descrição
<i>(descrever os resultados esperados por atividade e/ou tarefas)</i>	
Atividade 1. Representação matemática da ação expansiva	
T1.1	<i>A nova lei de desenvolvimento da reação álcalis-agregado deverá permitir considerar situações em que a reação pode ou não esgotar-se, consoante a natureza siliciosa dos agregados e a possibilidade destes também fornecerem ou não álcalis à solução.</i>
T1.2	<i>A lei de desenvolvimento da reação sulfática interna deverá permitir obter uma história de extensões, no domínio do tempo, correspondente aos efeitos macroscópicos deste tipo de reação, tendo em conta a sua cinética específica.</i>
T1.3	<i>Simulação dos efeitos macroscópicos resultantes da ocorrência simultânea das duas reações expansivas (reação álcalis-sílica e reação sulfática).</i>
T1.4	<i>Realização de testes de comparação dos resultados do modelo de simulação da ação expansiva com resultados experimentais obtidos laboratorialmente pelo Departamento de Materiais.</i>
T1.5	<i>Mostrar a influência da fendilhação na aceleração do processo de deterioração, recorrendo a um novo modelo termo-higrométrico que considere as ações térmica e higrométrica de modo integrado, incluindo leis de evolução da porosidade no tempo para simular o efeito do dano devido à ação expansiva.</i>
T1.6	<i>Apresentação de comunicações a congressos nacionais e internacionais</i>
T1.7	<i>Apresentação de um artigo científico em revista internacional com os resultados das comparações efetuadas na tarefa 1.4.</i>
T1.8	<i>Apresentação de um artigo científico em revista internacional que mostre as características do modelo de geração da ação expansiva e evidencie as diferenças no desenvolvimento das extensões quando devidas a reações álcalis-agregado e a reações sulfáticas internas, bem como em várias combinações destas reações, para diferentes situações ambientais.</i>

Atividade 2. Otimização dos procedimentos de cálculo estrutural	
T2.1	<i>O novo algoritmo de restrição dos incrementos de expansão por ação do estado de tensão deverá ser testado em diferentes situações, para avaliação do seu desempenho e análise da compatibilidade física da anisotropia induzida.</i>
T2.2	<i>O programa de cálculo estrutural deverá permitir o reinício do cálculo a partir de uma qualquer fase já anteriormente calculada.</i>
T2.3	<i>Os métodos de convergência a considerar no cálculo não linear deverão permitir a obtenção de soluções estáveis em menos iterações. A convergência deve ser obtida mesmo para sistemas mal condicionados.</i>
T2.4	<i>A programação em paralelo terá de reduzir o tempo de cálculo significativamente. Prevê-se a utilização do "cluster" do LNEC Medusa.</i>
T2.5	<i>Apresentação de comunicações a congressos nacionais e internacionais</i>
T2.6	<i>Apresentação de um artigo científico em revista internacional que evidencie as melhorias em termos de otimização do cálculo estrutural.</i>
Atividade 3. Análise do comportamento estrutural de barragens sujeitas a reações expansivas	
T3.1	<i>Realização dos estudos de análise do comportamento das barragens de Santa Luzia, Fagilde e Peti (Brasil) desde o primeiro enchimento das respetivas albufeiras até à atualidade</i>
T3.2	<i>Realização de estudos de avaliação das tecnologias de reabilitação de barragens degradadas por reações expansivas</i>
T3.3	<i>Apresentação de comunicações a congressos nacionais e internacionais</i>
T3.4	<i>Apresentação de um artigo científico em revista internacional com a comparação dos resultados da monitorização contínua e dos resultados de modelos numéricos para a avaliação do comportamento de barragens de betão.</i>
T3.5	<i>Apresentação de um artigo científico em revista internacional com os resultados de um estudo de análise de soluções de reabilitação de barragens sujeitas a processos de deterioração por reações expansivas.</i>

Outros resultados	Quantidade
Teses	
<i>mestrado</i>	3
<i>doutoramento</i>	
<i>outras</i>	
Artigos em revista	
<i>nacional</i>	1
<i>internacional</i>	4
Comunicações	16

9 - Recursos humanos

Grupo	Esforço (h*m)	Valor €
1	0,00	0,00
2	33,60	191.520,00
3	33,60	117.600,00
4	0,00	0,00
<i>TOTAL</i>	67,20	309.120,00

10 - Despesas correntes

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
			0,00
			0,00
<i>TOTAL</i>			0,00

11 – Equipamentos

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
Computador portátil	1	1.600,00	1.600,00
			0,00
<i>TOTAL</i>			1.600,00

12 - Orçamento

Designação	Estimativa de custo €	Financiamento externo €	Financiamento LNEC €
Recursos humanos	309.120		309.120
Despesas correntes	0		0
Equipamentos	1.600		1.600
Gastos gerais	309.440		309.440
Total	620.160	0	620.160



www.lnec.pt

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt www.lnec.pt