



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

**DAMSWELLING-II – MODELAÇÃO DOS EFEITOS
DAS EXPANSÕES DO BETÃO EM BARRAGENS,
PARA APOIO À GESTÃO E REABILITAÇÃO DAS OBRAS**

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC 2021/2027



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DAMSWELLING-II – MODELAÇÃO DOS EFEITOS DAS EXPANSÕES DO BETÃO EM BARRAGENS, PARA APOIO À GESTÃO E REABILITAÇÃO DAS OBRAS

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC 2021/2027

Lisboa • junho 2026

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 234/2026 – DBB/NMMR

Título

**DAMSWELLING-II – MODELAÇÃO DOS EFEITOS DAS EXPANSÕES DO BETÃO
EM BARRAGENS, PARA APOIO À GESTÃO E REABILITAÇÃO DAS OBRAS**

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC 2021/2027

Autoria

António Lopes Batista

Investigador-Coordenador, Diretor do Departamento

Ivo Figueiredo Dias

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

Carlos Serra

Investigador Auxiliar, Núcleo de Observação

Nuno Monteiro Azevedo

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 234/2026

Proc. 0402/1102/24150

DAMSWELLING-II - MODELAÇÃO DOS EFEITOS DAS EXPANSÕES DO BETÃO EM BARRAGENS, PARA APOIO À GESTÃO E REABILITAÇÃO DAS OBRAS

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC 2021/2027

Resumo

Descreve-se a atividade de investigação realizada no projeto DamSwelling-II até ao final de 2025, no âmbito da modelação dos efeitos das expansões do betão em barragens, para apoio à gestão e reabilitação das obras. Os resultados das diferentes atividades são analisados e avaliados, face aos objetivos inicialmente previstos.

Palavras-chave: Projeto DamSwelling-II / Barragens de betão / Expansões de betão / Efeitos estruturais / Modelação

DAMSWELLING-II – MODELLING THE EFFECTS OF CONCRETE SWELLING IN DAMS, TO SUPPORT THE STRUCTURAL MANAGEMENT AND REHABILITATION

Progress report of the P2I/LNEC 2021/2027 project

Abstract

This report describes the research activity carried out in the DamSwelling-II project up to the end of 2025, focusing on modelling the effects of concrete swelling in dams to support the management and rehabilitation of these structures. The results of the different activities are analysed and evaluated, considering the initially planned objectives.

Keywords: DamSwelling-II project / Concrete dams / Concrete swelling / Structural effects / Modelling

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto de investigação	1
1.2	Objetivos gerais e específicos do projeto	2
1.2.1	Objetivos gerais	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Alargamento do âmbito do projeto	3
1.3.1	Tipos de reações expansivas e efeitos estruturais no betão	3
1.3.2	Extensão do projeto às estruturas afetadas pela RSI	4
1.4	Duração e equipa do projeto	4
1.5	Conteúdo e organização do relatório	5
2	Atividade desenvolvida	6
2.1	Contextualização	6
2.2	Descrição da atividade desenvolvida	7
2.2.1	Atividade 1 - Modelação numérica da depreciação das propriedades do betão, incluindo a fendilhação	7
2.2.2	Atividade 2 - Modelação numérica de descontinuidades e de elementos laminares e lineares	7
2.2.3	Atividade 3 - Modelação da anisotropia das expansões estruturais	7
2.2.4	Atividade 4 - Influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural	8
2.2.5	Atividade 5 - Modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes	8
2.2.6	Atividade adicional – Módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção	9
2.2.7	Outras atividades	9
2.3	Aplicações a estudos por contrato	9
2.4	Apreciação geral da atividade desenvolvida	10
2.5	Ajuste das atividades e reformulação do projeto	11
3	Divulgação de resultados e participação em eventos técnico-científicos	12
3.1	Considerações iniciais	12
3.2	Publicações em livros, revistas e congressos	12
3.2.1	Artigos em revistas internacionais	12
3.2.2	Palestras/comunicações em encontros internacionais	12
3.2.3	Comunicações em encontros internacionais	12
3.2.4	Comunicações em encontros nacionais	13
3.3	Organização e docência de ações de formação internacionais	13
3.4	Relatórios de estudos por contrato	13
3.5	Publicações com afinidade ao projeto, de outros autores	14
3.6	Participação em eventos técnico-científicos	14
3.6.1	Participação em comissões organizadoras	14
3.6.2	Participação em comissões científicas	14
3.6.3	Participação em eventos	15
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	16
4.1	Indicadores de desempenho	16
4.2	Recursos humanos mobilizados	17
4.3	Financiamento externo	18

5	Considerações finais	19
5.1	Desenvolvimento do projeto	19
5.2	Principais desenvolvimentos expetáveis	19
ANEXOS		21
ANEXO I	Ficha de projeto	23
ANEXO II	Ficha de autoavaliação do projeto	53
ANEXO III	Ficha de reformulação do projeto	67

Índice de quadros

Quadro 1.1 – Temas prioritários de investigação no DBB, aprovados na 78ª reunião da CCD/DBB, em 26 de setembro de 2023	1
Quadro 1.2 – Equipa e afetação de tempo ao projeto	4
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho (publicações e outros produtos)	16
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos ao projeto em 2024 e 2025	17
Quadro 4.3 – Comparação das afetações de recursos humanos ao projeto em 2024 e 2025, previstas e realizadas	17

1 | Introdução

1.1 Enquadramento do projeto de investigação

O projeto “DamSwelling-II - Modelação dos efeitos das expansões do betão em barragens, para apoio à gestão e reabilitação das obras”, em curso no Departamento de Barragens de Betão (DBB), está integrado no Plano de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC e tem enquadramento na Estratégia de Investigação e Inovação 2021-2027 (E2I 21-27), com o tema principal “Construção”, com os desafios “Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído” e “Preservação e reabilitação do património construído, natural e cultural”, e como tema secundário “Alterações climáticas”, com o desafio “Adaptação e proteção de pessoas, infraestruturas e atividades às alterações climáticas”.

No Quadro 1.1 apresenta-se a lista dos temas prioritários de investigação do DBB, definidos na 78ª reunião da Comissão Científica Departamental (CCD/DBB), realizada em 26 de setembro de 2023.

Quadro 1.1 – Temas prioritários de investigação no DBB, aprovados na 78ª reunião da CCD/DBB, em 26 de setembro de 2023

Tema	Áreas científicas	Título
1	Mecânica das Rochas	Metodologias de ensaio, observação, análise do comportamento e avaliação da segurança de obras em maciços rochosos
2	Barragens Mecânica das Rochas	Desenvolvimento de modelos de análise estrutural, térmica e hidromecânica de obras de betão, de alvenaria e em maciços rochosos
3	Barragens	Metodologias automáticas de observação e de controlo da segurança de barragens de betão e de alvenaria
4	Barragens	Análise do comportamento e avaliação da segurança de barragens de betão e de alvenaria e suas fundações
5	Barragens	Caracterização do comportamento dinâmico e análise sísmica de barragens de betão e de alvenaria
6	Barragens	Deterioração e reabilitação de barragens de betão e de alvenaria
7	Engenharia Geográfica	Métodos geodésicos de monitorização automática de obras de engenharia civil
8	Engenharia Geográfica	Imagens digitais e informação georreferenciada para apoio a estudos de engenharia civil

O projeto DamSwelling-II enquadra-se em três temas prioritários de investigação do DBB, “Desenvolvimento de modelos de análise estrutural, térmica e hidromecânica de obras de betão, de alvenaria e em maciços rochosos”, “Análise do comportamento e avaliação da segurança de barragens de betão e de alvenaria e suas fundações” e “Deterioração e reabilitação de barragens de betão e de alvenaria”. Envolve valências e investigadores do Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas (NMMR), do Núcleo de Observação (NO) e da Direção do DBB, mas está formalmente sediado no NMMR.

Seguindo a sequência de aprovação de programas e projetos de investigação, após a elaboração das fichas dos projetos, o painel de apreciação dos projetos propostos no Departamento de Barragens de

Betão, constituído por Luís Lamas, Juan Mata e Luís Oliveira Santos, procedeu à sua análise. No dia 22 de março de 2024 a CCD/DBB ratificou as fichas de apreciação.

O projeto DamSwelling-II foi submetido para aprovação em 27 de março de 2024, através da informação n.º 94/2024 do DBB (registo nº 2838), propondo como data de início 1 de janeiro de 2024 e uma duração de 48 meses. O Conselho Diretivo do LNEC aprovou o projeto em 1 de abril de 2024, tendo-lhe sido atribuído o número de processo 0402/1102/24150. O presente relatório considera toda a atividade desenvolvida em 2024 e 2025 (alguns resultados foram publicados no início de 2026), sendo os indicadores apresentados respeitantes a este período.

1.2 Objetivos gerais e específicos do projeto

1.2.1 Objetivos gerais

O LNEC tem sido solicitado para a realização de estudos de análise e interpretação do comportamento observado e avaliação da segurança de barragens e de outras estruturas de betão (em particular de pontes) afetadas por expansões do betão. No DBB, os estudos mais significativos referem-se às barragens de Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil), que terminaram em 2021, e à barragem de Santa Luzia, concluído no final de 2025. O projeto pretende contribuir para o melhoramento das capacidades numéricas neste âmbito, dando continuidade ao projeto DamSwelling e a algumas vertentes dos projetos CoMatFail e DamConcrete do P2I/LNEC 2013-2020. Pretende-se melhorar as capacidades numéricas para o estudo do comportamento, segurança e intervenções nas obras, bem como as capacidades de modelação dos efeitos das expansões à escala dos provetes de betão.

Os desenvolvimentos do projeto permitirão apoiar a gestão dos processos de deterioração associados a esta patologia, através de uma adequada programação de eventuais ações corretivas ao longo do tempo. Esta abordagem terá um impacto económico considerável nas obras, através da otimização da afetação de recursos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do projeto estão associados à resolução dos problemas atrás referidos, para as estruturas afetadas por expansões do betão. Pretende-se o melhoramento das capacidades numéricas nos seguintes domínios:

- a) Modelação numérica dos processos de fendilhação (formação e propagação das fendas) e dos seus efeitos na rigidez e na resistência do betão, ao longo do tempo;
- b) 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;
- d) Modelação dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala, considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão.

Os estudos de aplicação das metodologias desenvolvidas consideram estruturas simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e barragens de betão afetadas por expansões do betão, para avaliação do desempenho das ferramentas numéricas melhoradas.

Na concretização dos objetivos específicos conta-se com o apoio dos parceiros internos e externos, designadamente: i) nos estudos de casos simples, são utilizados resultados de ensaios e de análises provenientes do Departamento de Materiais (DM), do Departamento de Estruturas (DE) e da Universidade de Ottawa; e ii) nos estudos envolvendo barragens de betão, serão considerados elementos provenientes da observação de obras da EDP, Engie Douro, Electricidade de Moçambique (EDM) e Hidroeléctrica de Cahora Bassa (HCB).

1.3 Alargamento do âmbito do projeto

1.3.1 Tipos de reações expansivas e efeitos estruturais no betão

As principais reações químicas de origem interna do betão, que geram expansões, são a reação álcali-silica (RAS) e a reação sulfática interna (RSI).

Na RAS desenvolve-se um gel sílico-alcálico, expansivo, resultante da reação entre os álcalis do cimento e a sílica (com estrutura cristalina “mal” organizada) dos agregados, tendo a água como reagente.

A RSI ocorre entre os compostos do cimento contendo alumina e outros constituintes do betão contendo sulfatos ou outros compostos que, por alteração, possam originar sulfatos ou aluminatos, com formação de etringite secundária. A formação de etringite pode ser também devida à elevada subida da temperatura nas primeiras idades do betão, em resultado de tratamentos térmicos para aceleração da presa e do endurecimento (caso das peças pré-fabricadas) ou apenas resultante da geração do calor de hidratação do cimento, mais comum nos betões em massa ou com grandes dosagens de cimento, e da presença de sulfatos em quantidade suficiente. Nos casos em que resulta da elevação da temperatura do betão, a etringite é designada por retardada (também referida muitas vezes por DEF, do inglês *delayed ettringite formation*). Na presença de água esta etringite é expansiva.

A RAS e a RSI têm evidências estruturais semelhantes. As pressões internas geradas na estrutura do betão provocam expansões e a degradação dessa estrutura interna. A evidência mais característica destes fenómenos é a fendilhação difusa, do tipo craquelê, que ocorre devido à heterogeneidade do betão à escala da dimensão dos agregados e à menor expansão do betão superficial relativamente ao substrato. A RAS e a RSI conduzem à depreciação das propriedades de rigidez e de resistência do betão, com consequências diretas no desempenho e na durabilidade das estruturas.

Na RAS e na RSI a água tem um papel preponderante. Assim, as estruturas hidráulicas (barragens, centrais, túneis, etc.) são muito suscetíveis à ocorrência desta patologia, que também se manifesta em outras estruturas não protegidas, designadamente em pontes, viadutos, muros de suporte e maciços de fundação.

A RAS é claramente dominante nas barragens de betão estudadas no DBB, pelo que os investimentos de investigação têm sido direcionados para os efeitos deste tipo de reação, contemplando a modelação das deformações livres geradas pela RAS e os principais fatores que influenciam a magnitude e a cinética.

1.3.2 Extensão do projeto às estruturas afetadas pela RSI

No âmbito do apoio do DBB ao DE, na realização de estudos de modelação do comportamento de estruturas de betão armado pré-esforçado afetadas por expansões, onde a RSI pode ser dominante, e na orientação das teses de doutoramento dos bolseiros do DE Cláudia Santos e Afonso Anjos, foi necessário modelar as extensões livres geradas pela DEF. Assim, foi desenvolvido um módulo computacional para a modelação do comportamento térmico na fase de construção, tendo em conta a libertação do calor de hidratação do cimento, já que o potencial de expansão depende das temperaturas atingidas nesse período.

Este aspeto vai ser contemplado, naturalmente, na ficha de reformulação do projeto.

1.4 Duração e equipa do projeto

A duração prevista do projeto é, como referido, de quatro anos. Do Quadro 1.1 constam a equipa do projeto, constituída por investigadores do DBB, e as afetações de tempo previstas inicialmente.

Quadro 1.2 – Equipa e afetação de tempo ao projeto

Equipa do projeto	Categoria	Afetação total de tempo, em meses
António Lopes Batista	Investigador-Coordenador (IC)	6,00
Ivo Figueiredo Dias	Investigador Auxiliar (IA)	7,80
José Piteira Gomes	Investigador Auxiliar (IA)	5,40
Carlos Serra	Investigador Auxiliar (IA)	3,60
Nuno Monteiro Azevedo	Investigador Auxiliar (IA)	1,08
Aluno de doutoramento	Bolseiro LNEC de doutoramento (BI)	48,00
Aluno de mestrado 1	Bolseiro LNEC de investigação (BI)	-
Aluno de mestrado 2	Bolseiro LNEC de investigação (BI)	-

Apesar dos esforços feitos nesse sentido, ainda não foi possível agregar ao projeto um aluno de doutoramento e dois alunos de mestrado. Por outro lado, o IA José Piteira Gomes aposentou-se em meados de 2025. O IA Hugo Fernandes, que ingressou recentemente no DBB, passará a ter afetação ao projeto na proposta de reformulação.

O projeto beneficiou, naturalmente, com as interações que têm vindo a ser realizadas com o DE, atrás referidas.

Referem-se os apoios: i) à Universidade de Ottawa, na tese de doutoramento de Rodrigo Gorga, recentemente concluída, e no diagnóstico dos efeitos das expansões na barragem de Bemposta; ii) à

EDP, nos estudos de análise, interpretação e previsão do comportamento da barragem de Santa Luzia, e na definição dos trabalhos da reabilitação da obra; e iii) à Engie Douro, nos estudos de modelação dos efeitos das expansões na barragem de Bemposta. Estes apoios proporcionaram interações muito frutuosas com as referidas entidades.

1.5 Conteúdo e organização do relatório

Este relatório apresenta o progresso das atividades no âmbito do projeto DamSwelling-II, em 2024 e 2025, referindo os principais desenvolvimentos e as adaptações para a concretização dos objetivos estabelecidos. Apresentam-se os elementos de divulgação dos resultados, os indicadores de desempenho e a distribuição dos recursos humanos do LNEC.

O documento está estruturado em 5 capítulos, incluindo a presente introdução (capítulo 1) e as considerações finais (capítulo 5). No capítulo 2 descrevem-se as atividades propostas no projeto, os respetivos desenvolvimentos desde 2024, a apreciação da atividade desenvolvida e ainda as perspetivas de cumprimento do plano de trabalhos. No capítulo 3 são listadas as publicações realizadas no âmbito do projeto e de estudos afins. No capítulo 4 são apresentados os indicadores de desempenho, a afetação dos recursos humanos e as possibilidades de financiamento externo.

No Anexo I encontra-se a ficha de projeto aprovada pelo Conselho Diretivo, no Anexo II apresenta-se a ficha de autoavaliação, conforme previsto na E2I 21-27, e no Anexo III apresenta-se a ficha de reformulação do projeto.

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Contextualização

Dado que existem muitas obras, em Portugal e no mundo, afetadas por reações expansivas do betão de origem interna, o LNEC tem sido solicitado, nos últimos anos, para a realização do diagnóstico e do prognóstico destas obras. No caso das barragens, em Portugal cerca de um terço das obras têm esta patologia. Os efeitos estruturais das expansões do betão são normalmente identificados e acompanhados através da observação (compreendendo a monitorização, a inspeção e os ensaios, laboratoriais e de campo). A avaliação estrutural desses efeitos apoia-se em estudos de análise e interpretação do comportamento observado, para se conhecerem as condições de funcionalidade e de segurança das obras, bem como apoiar os donos de obra na programação das intervenções a realizar.

Os estudos de análise e interpretação do comportamento observado, avaliação das condições de segurança e de apoio às intervenções nas obras, recorrem à modelação numérica, normalmente realizada à escala das obras, recorrendo ao método dos elementos finitos. Contudo, há fenómenos, ao nível da escala dos provetes de betão, que podem ser modelados recorrendo ao método dos elementos discretos aplicados a modelos de partículas para apoio à interpretação de resultados de ensaios experimentais e de resultados de observação e previsão do comportamento do betão a longo prazo, tendo em consideração este tipo de deterioração. A modelação dos fenómenos expansivos na macroescala envolve a resolução dos problemas térmico e higrométrico no betão e do problema estrutural, com necessidade de consideração da viscoelasticidade e da fendilhação do betão e do comportamento não linear de descontinuidades estruturais e de elementos laminares e lineares. Assim, exige-se uma análise de comportamento das obras em regime não linear e dependente do tempo.

O projeto pretende o prosseguimento dos estudos dos efeitos da deterioração de barragens sujeitas a expansões do betão de origem interna, realizados no âmbito do projeto DamSwelling (P2I 2013-2020), alargando o seu âmbito à modelação à escala dos provetes de betão e à realização de estudos de adequação de soluções de reabilitação das obras. Tem duas vertentes principais, uma relacionada com a modelação dos efeitos estruturais das expansões tendo em conta os fenómenos químicos, térmicos e higrométricos envolvidos, na meso e na macroescala, e outra relativa à avaliação do impacto das intervenções possíveis nas obras, designadamente a proteção e a regeneração do betão, bem como o reforço e as modificações estruturais.

Estava previsto que o projeto se desenvolvesse, essencialmente, através de cinco atividades principais. Contudo, devido a condicionamentos de vária ordem e a necessidades decorrentes do apoio ao DE, atrás descritos, das cinco atividades, quatro tiveram um avanço assinalável e uma um avanço limitado. Houve uma atividade adicional, não prevista inicialmente, relacionada com o apoio ao DE, que teve um grande desenvolvimento. Nos pontos seguintes detalham-se estes aspetos.

2.2 Descrição da atividade desenvolvida

2.2.1 Atividade 1 - Modelação numérica da depreciação das propriedades do betão, incluindo a fendilhação

A atividade 1 compreende as seguintes quatro tarefas: modelação numérica da diminuição da rigidez ao longo do tempo; modelação numérica da diminuição da resistência ao longo do tempo; modelação numérica da fendilhação; e realização de estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão.

Pretende-se a implementação numérica da depreciação da rigidez e da resistência do betão ao longo do tempo, devida aos diferentes tipos de expansão, incluindo os processos de fendilhação (formação e propagação das fendas), e dispor de capacidade de simular a redução da rigidez e da resistência do betão, em conjunto com a fendilhação.

Já está disponível a simulação da fendilhação, através de modelos de dano, à qual foi acoplada a depreciação da rigidez do betão ao longo do tempo, devida à magnitude das expansões. A implementação da depreciação da resistência do betão poderá ser realizada seguindo uma abordagem semelhante.

Os desenvolvimentos conseguidos foram aplicados em estudos sobre as barragens do Covão do Meio (CI1), Bemposta (CI2) e Santa Luzia (R6).

2.2.2 Atividade 2 - Modelação numérica de descontinuidades e de elementos laminares e lineares

A atividade 2 está dividida nas seguintes três tarefas: modelação numérica do comportamento das descontinuidades; modelação numérica de elementos laminares e lineares; e realização de estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão.

Pretende-se a implementação numérica de descontinuidades (existentes ou a introduzir) e de elementos laminares e lineares (chapas, mantas e armaduras, passivas e ativas) nos códigos computacionais de elementos finitos, em toda a gama de deformações, para melhorar as capacidades para simular o comportamento das descontinuidades e de elementos laminares e lineares.

Foram implementados os modelos numéricos para representar as descontinuidades e os elementos lineares, em toda a gama de deformações. Prevê-se a implementação, a curto prazo, dos elementos laminares.

Os desenvolvimentos conseguidos foram aplicados em estudos de pontes (CN1, CI3), de tabuleiros de viadutos em França e em estudos da barragem de Santa Luzia (R6).

2.2.3 Atividade 3 - Modelação da anisotropia das expansões estruturais

A atividade 3 compreende as seguintes três tarefas: estudo dos modelos numéricos disponíveis para consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao

confinamento; integração nos modelos numéricos dos métodos para consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento; e realização de estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão.

Pretende-se modelar a anisotropia das expansões estruturais devida aos efeitos do confinamento proporcionado pelo campo de tensões, no betão em massa, e por armaduras passivas e ativas, nas estruturas de betão armado e pré-esforçado, considerando as diferentes alternativas para ter em conta os efeitos do confinamento nas expansões estruturais: (independência do comportamento nas três direções e consideração da dependência entre as três direções pelos métodos do LNEC, Saouma e Perotti, e Liaudat) e testar a sua influência nas estruturas.

Das quatro alternativas referidas, estão já implementadas duas (independência do comportamento nas três direções e consideração da dependência nas três direções pelo método do LNEC), tendo-se obtido bons resultados com a sua utilização nos estudos das barragens de Cahora Bassa (Moçambique), Peti (Brasil), Pracana, Covão do Meio (CI1), Bemposta (CI2), Fratel (R3) e Santa Luzia (R6). Prevê-se a implementação, a curto prazo, das restantes duas alternativas.

2.2.4 Atividade 4 - Influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural

A atividade 4 está dividida nas seguintes três tarefas: estudo das distribuições de probabilidade que melhor se ajustam à representação da variabilidade espacial das expansões; estudos de aplicação para simulação da fendilhação difusa de estruturas de betão em massa e de betão armado; e estudos de aplicação para avaliação da influência da heterogeneidade das expansões no comportamento e degradação de barragens de betão.

A heterogeneidade das expansões do betão tem uma grande influência no comportamento e na deterioração das obras. Essa heterogeneidade pode ser considerada através de campos aleatórios gerados a partir de distribuições de probabilidades. Pretende-se estudar a evolução dos processos de degradação local e global das obras, para avaliar a influência da heterogeneidade das expansões do betão, tendo em consideração os padrões de fendilhação difusa e linear nas estruturas.

Foram já realizados estudos, considerando campos aleatórios, para a magnitude das expansões, gerados a partir de distribuição de probabilidades, para avaliação da degradação local de lajes, armadas e não armadas, com bons resultados (CI4). Pretende-se estender esta abordagem a casos de grandes obras.

2.2.5 Atividade 5 - Modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes

A atividade 5 compreende as seguintes três tarefas: recolha bibliográfica e estudo dos fenómenos envolvidos à escala dos provetes; implementação numérica e validação dos modelos constitutivos de cada um dos tipos de reação expansiva; e realização de estudos aplicados a ensaios de provetes de betão.

Pretende-se o prosseguimento da modelação numérica dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala, recorrendo aos resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão, usando o método dos elementos discretos aplicados a modelos de partículas, considerando o comportamento viscoelástico e não-linear, para avaliação e interpretação dos padrões de fendilhação entre a pasta de cimento e os agregados e nos próprios agregados.

Foi aprofundado o estudo dos mecanismos físicos e químicos dos fenómenos envolvidos ao nível da mesoescala e validado o modelo constitutivo para os principais tipos de reações expansivas (RAS e RSI), mas ainda não foi possível avançar para os desenvolvimentos numéricos aplicados a ensaios. Esta atividade será reformulada tendo em consideração o tempo e os meios disponíveis.

2.2.6 Atividade adicional – Módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção

No contexto do apoio a estudos e teses de doutoramento a decorrer no DE, estenderam-se à DEF as metodologias antes desenvolvidas para a RAS. Esta atividade destinou-se a dar resposta aos desafios colocados pelos estudos envolvendo tabuleiros de obras com vigas pré-fabricadas afetadas por DEF, obrigando ao desenvolvimento de um módulo computacional para resolver o problema térmico na fase de construção, tendo em conta a libertação do calor de hidratação do cimento, dado que o potencial de expansão associado à DEF depende das temperaturas atingidas pelo betão na fase de cura.

Este módulo computacional tem também sido utilizado em estudos de simulação da fase de construção de barragens de betão (R2).

2.2.7 Outras atividades

O IA Ivo Dias e o IC António Lopes Batista integram as equipas de orientação das teses de doutoramento dos bolsiros Cláudia Santos e Afonso Anjos, do DE.

O IC António Lopes Batista e o IA Carlos Serra pertenceram à comissão organizadora da 5th International Dam World Conference (DamWorld 2025), realizada no LNEC na semana iniciada em 14 de abril de 2025.

Assinala-se ainda a organização e a realização de uma ação de formação de âmbito internacional, intitulada “Course 2 - Dams affected by concrete swelling reactions: diagnosis, prediction and rehabilitation”, previamente à DamWorld 2025, no dia 13 de abril de 2025, no LNEC, que reuniu um conjunto de especialistas nacionais e estrangeiros (AF1).

Refere-se ainda a participação do IC António Lopes Batista na elaboração do relatório da RILEM TC-ARM: Alkali-aggregate reaction mitigation, que será concluído a curto prazo.

2.3 Aplicações a estudos por contrato

As ferramentas numéricas desenvolvidas têm tido uma ampla aplicação em estudos específicos de obras afetadas por expansões do betão, designadamente na análise e interpretação do comportamento

da barragem de Fratel (R3) e na avaliação da segurança e no apoio à definição das obras de reabilitação da barragem de Santa Luzia (R6). Têm também sido utilizadas no estudo em curso no DE para a Cofiroute, de análise dos efeitos da formação de etringite retardada em vigas pré-fabricadas de tabuleiros de passagens superiores na autoestrada A85, em França, que está em fase de conclusão.

A realização deste tipo de estudos tem obrigado à realização de outras tarefas de diferentes índoles, mas com grande afinidade com a temática em apreço (R1, P1, P2, P3).

O conhecimento acumulado tem sido muito útil: i) no acompanhamento continuado do comportamento das barragens afetadas por expansões do betão, em particular para as barragens de Santa Luzia (R4), Fratel, Pracana, Covão do Meio, Fagilde, Miranda, Picote e Bemposta (R7), em Portugal, e Chicamba, em Moçambique; e ii) no diagnóstico da condição estrutural de barragens de betão deterioradas, de que é exemplo a barragem de Idanha (R5).

2.4 Apreciação geral da atividade desenvolvida

Nos dois primeiros anos do projeto foram conseguidos importantes desenvolvimentos, no sentido de melhorar as capacidades de modelação e análise de estruturas afetadas por expansões do betão. Destacam-se os seguintes aspetos:

- a) a consideração da depreciação da rigidez do betão devido às expansões;
- b) a implementação de elementos finitos lineares, que permitem a consideração dos efeitos das armaduras e do pré-esforço;
- c) a implementação de elementos finitos de junta, que permitem a representação das juntas de contração das barragens, da superfície de inserção na fundação e de cortes estruturais;
- d) o desenvolvimento de um módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão; e
- e) a realização de estudos, considerando campos aleatórios gerados a partir de distribuição de probabilidades, para avaliação da fendilhação local de lajes, armadas e não armadas.

Estes desenvolvimentos permitem realizar análises numéricas com maior abrangência, tendo sido aplicados em teses de doutoramento em curso e em estudos por contrato recentes, anteriormente referidos.

Os resultados alcançados tiveram um impacto muito relevante na capacidade de modelação de estruturas afetadas por expansões do betão. Estes avanços permitem realizar análises de melhor qualidade e apoiar de forma mais eficiente os donos de obra na avaliação do desempenho e da segurança de estruturas afetadas, apoiando as decisões de gestão das infraestruturas e a adoção das melhores soluções de reabilitação, promovendo a segurança e a durabilidade das obras e a melhoria da eficiência, desempenho e sustentabilidade da sua exploração.

Os desenvolvimentos do projeto têm sido divulgados à comunidade técnica e científica através da realização de cursos (AF1), da publicação de artigos em revista (AI1, AI2), da apresentação de comunicações em conferências nacionais (CN1) e internacionais (CI1 a CI7), e da realização de palestras em encontros internacionais (PI1).

2.5 Ajuste das atividades e reformulação do projeto

O projeto precisa de ser ajustado em alguns aspetos, pelo que se apresenta uma nova ficha. A reformulação proposta está relacionada com três aspetos: i) a consideração de uma nova atividade, praticamente já concretizada, sobre o desenvolvimento do módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão; ii) a aposentação, em 2025, do IA José Piteira Gomes, um dos elementos da equipa inicial do projeto; iii) o ajuste da atividade 5, que teve poucos desenvolvimentos; e iv) o reforço da equipa do projeto com o IA Hugo Fernandes, que ingressou no DBB/NO em setembro de 2025, com vista ao desenvolvimento das tarefas previstas na atividade 5, no âmbito da sua formação na temática em apreço.

Como já referido, ainda não foi possível mobilizar para o projeto um aluno de doutoramento e dois alunos de mestrado. Será dada continuidade à procura desses alunos, sem os quais o desenvolvimento de algumas atividades (principalmente a atividade 4) poderá ficar comprometido.

3 | Divulgação de resultados e participação em eventos técnico-científicos

3.1 Considerações iniciais

Listam-se as publicações de índole científica e técnica e a participação nos eventos técnico-científicos dos membros da equipa do projeto, em 2024 e 2025.

No caso dos estudos de aplicação, também se incluem estudos afins realizados.

3.2 Publicações em livros, revistas e congressos

3.2.1 Artigos em revistas internacionais

- AI1 - CUSTÓDIO, J., MATA, J., SERRA, C., RIBEIRO, A. B., TAVARES DE CASTRO, A., BATISTA, A. L., 2025 – **Insights into the diagnosis and prognosis of the alkali–silica reaction (ASR) in concrete dams, highlighting the case of the demolished Alto Ceira dam in Portugal.** *Buildings*, 15(3), 460, <https://doi.org/10.3390/buildings15030460>.
- AI2 - DIAS, I.F.; BATISTA, A.L., 2025 – **Modelling of concrete swelling effects in dams, considering the influence of temperature, humidity, stress field, viscoelasticity and cracking.** *Magazine of Concrete Research*, Vol. 77 No. 15-16, pp. 839–856, doi: <https://doi.org/10.1680/jmacr.24.00385>.

3.2.2 Palestras/comunicações em encontros internacionais

- PI1 - BATISTA, A.L., 2025 – **Deterioration of dams affected by concrete swelling. The role of observation and modelling in safety control and rehabilitation.** 5th International Dam World Conference (DamWorld 2025), 14 a 17 de abril de 2025, LNEC, Lisboa.

3.2.3 Comunicações em encontros internacionais

- CI1 - DIAS, I.F.; BATISTA, A.L., 2024 – **Analysis and interpretation of the structural behavior of Covão do Meio dam, affected by concrete swelling, considering concrete visco-elasticity and cracking.** 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2024), 18 a 24 de maio de 2024, Ottawa, Canadá.
- CI2 - GORGA, R.V.; SANCHEZ, L.F.M.; MARTÍN-PÉREZ, B.; NOËL, M.; DIAS, I.F.; BATISTA, A.L., 2024 – **Two approaches for FE assessment of ASR affected dams.** 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2024), 18 a 24 de maio de 2024, Ottawa, Canadá.
- CI3 - SANTOS, C.; NUZZO, M.; DIAS, I.F.; MIN, X.; OLIVEIRA SANTOS, L.; BATISTA, A.L., 2024 – **Swelling effects in a reinforced concrete pier of Foz do Dão bridge (Portugal). First**

- approach for modelling and behaviour interpretation.** 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2024), 18 a 24 de maio de 2024, Ottawa, Canadá.
- CI4 - DIAS, I.F.; SANTOS, C.F.; BATISTA, A.L.; SANTOS, L.O., 2024 – **Numerical tests for interpreting diffuse map cracking in laminar elements affected by concrete expansions.** Resumo, Congress on Numerical Methods in Engineering (CMN2024), 4 a 6 de setembro de 2024, Aveiro.
- CI5 - SILVA, J.C.; SERRA, C., 2024 – **Monitoring internal swelling reactions in concrete dams.** 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2024), 4 a 6 de setembro de 2024, Salerno, Itália.
- CI6 - HENRIQUES, M.J.; DIAS, I.F.; ROQUE, D.; GONÇALVES, A., 2025 – **A 3D point cloud model of Santa Luzia dam and its contribution for improving the finite element mesh.** 5th International Dam World Conference (DamWorld 2025), 14 a 17 de abril de 2025, LNEC, Lisboa.
- CI7 - CUNHA, J.; GOMES, A.; MATA, J.; BATISTA, A.L.; DIAS, I.F.; SALAZAR, F., 2025 – **Long-term behaviour analysis of Santa Luzia dam affected by concrete swelling reactions using machine learning techniques.** International Symposium on "Common Challenges, Shared Future, Better Dams" do 28th ICOLD Congress e 93rd Annual Meeting, 16 a 23 de maio de 2025, Chengdu, China.

3.2.4 Comunicações em encontros nacionais

- CN1 - SANTOS, C.; DIAS, I.F.; SANTOS, L.O.; BATISTA, A.L., 2024 – **Modelação dos efeitos das expansões do betão num pilar da ponte da Foz Dão.** Encontro Nacional de Betão Estrutural (BE2024), 13 a 15 de novembro de 2024, Porto.

3.3 Organização e docência de ações de formação internacionais

- AF1 - BATISTA, A.L.; CHULLIAT, O.; SANTOS SILVA, A.; CUSTÓDIO, J.; DIAS, I.F.; CHARLWOOD, R.; GRIMAL, É., 2025 – **Course 2 - Dams affected by concrete swelling reactions: diagnosis, prediction and rehabilitation.** 5th International Dam World Conference (DamWorld 2025), 13 de abril de 2025, LNEC, Lisboa.

3.4 Relatórios de estudos por contrato

- R1 - LNEC (BATISTA, A.L.; PITEIRA GOMES, J.; MATA, J.; DIAS, I.F.), 2024 – **Barragem de Santa Luzia. Compilação e tratamento dos deslocamentos horizontais observados por métodos geodésicos entre 1942 e 1984.** LNEC – Proc. 0402/1201/23528. Relatório 102/2024 – DBB/NO.
- R2 - LNEC (DIAS, I.F.; BATISTA, A.L.), 2025 – **Barragem da Cova do Leão. Análise térmica e estrutural da fase de construção do trecho de betão.** LNEC – Proc. 0402/1201/24704. Relatório 257/2025 – DBB/NMMR.
- R3 - LNEC (PITEIRA GOMES, J.; BATISTA, A.L.; SERRA, C.), 2025 – **Barragem de Fratel. Análise, interpretação e previsão do comportamento estrutural, considerando as expansões do betão de origem interna.** LNEC – Proc. 0403/1201/04499. Relatório 310/2025 – DBB/NO.

- R4 - LNEC (DIAS, I.F.; VITÓRIA, H.; RESENDE, C.), 2025 – **Barragem de Santa Luzia. Resultados da inspeção de fevereiro de 2025 e apreciação do comportamento estrutural**. LNEC – Proc. 0403/1201/06618. Relatório 373/2025 – DBB/NO.
- R5 - LNEC (BATISTA, A.L.; OLIVEIRA, R.), 2026 – **Barragem de Idanha. Inspeção da estrutura e mapeamento de ocorrências significativas, na estiagem de 2025**. LNEC – Proc. 0403/1201/24645. Relatório 37/2026 – DBB/NO.
- R6 - LNEC (DIAS, I.F.; BATISTA, A.L.), 2026 – **Barragem de Santa Luzia. Análise, interpretação e previsão do comportamento estrutural**. LNEC – Proc. 0402/1201/23528. Relatório 55/2026 – DBB/NMMR.
- R7 - LNEC (BATISTA, A.L.; BRUM, H.), 2026 – **Barragem de Bemposta. Resultados da inspeção de fevereiro de 2025 e apreciação do comportamento estrutural**. LNEC – Proc. 0403/1201/00951. Relatório 90/2026 – DBB/NO.

3.5 Publicações com afinidade ao projeto, de outros autores

- P1 - LNEC (PERNETA, H.), 2024 – **Barragem de Santa Luzia. Levantamento geométrico da fendilhação aparente no coroamento e numa faixa acessível do paramento de jusante**. LNEC – Proc. 0403/1201/2352701. Nota técnica 5/2024 – DBB/NO.
- P2 - LNEC (ROQUE, D.; HENRIQUES, M.J.), 2024 – **Barragem de Santa Luzia. Mapeamento de ocorrências nos paramentos por processamento digital de imagens**. LNEC – Proc. 0404/1201/23527. Relatório 69/2024 – DBB/NGA.
- P3 - ROQUE, D.; HENRIQUES, M.J., 2025 – **Pathology mapping in concrete dams through digital photogrammetry and image processing**. 5th International Dam World Conference (DamWorld 2025), 14 a 17 de abril de 2025, LNEC, Lisboa.

3.6 Participação em eventos técnico-científicos

3.6.1 Participação em comissões organizadoras

Como referido, o IC António Lopes Batista e o IA Carlos Serra integraram a comissão organizadora da 5th International Dam World Conference (DamWorld 2025), realizada no LNEC em 2025.

3.6.2 Participação em comissões científicas

O IC António Lopes Batista integrou a comissão científica da ICAAR 2024, da DamWorld 2025 (14 a 17 de abril de 2025, Lisboa) e da Concrete Solutions 2025 (16 a 18 de junho de 2025, em Lisboa). Pertence às comissões científicas do 7th fib congress 2026, que decorrerá em Lisboa em junho de 2026, e da ICAAR 2028, a realizar na Argentina.

O IA Ivo Dias pertence à comissão científica do congresso Numerical Methods in Engineering, a realizar em julho de 2026, em Gijón.

3.6.3 Participação em eventos

O IC António Lopes Batista e o IA Ivo Figueiredo Dias participaram na 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR 2024), de 18 a 24 de maio de 2024, em Ottawa, Canadá.

O IA Ivo Figueiredo Dias participou no Congress on Numerical Methods in Engineering (CMN2024), de 4 a 6 de setembro de 2024, em Aveiro.

O IC António Lopes Batista e os IA Nuno Monteiro Azevedo e Carlos Serra participaram na 5th International Dam World Conference (DamWorld 2025), de 13 a 17 de abril de 2025, em Lisboa.

4 | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento

4.1 Indicadores de desempenho

No Quadro 4.1 apresentam-se os indicadores de desempenho do projeto, designadamente em termos de publicações e outros produtos previstos na ficha inicial e as realizadas.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho (publicações e outros produtos)

Indicadores		Total previsto no projeto (4 anos)	Realizado em 2024 e 2025 (2 anos)
Publicações	Relatórios científicos	4	3 (*)
	Livros		
	Capítulos de livros		
	Artigos em revistas internacionais	5	2
	Artigos em revista nacionais	2	
Comunicações	Comunicações em congressos internacionais	6	7
	Comunicações em congressos nacionais	6	1
Organização de seminários e conferências	Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados	1	1
	Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados	1	
Formação avançada	Teses de doutoramento	1	2 (#)
	Dissertações de mestrado	2	
	Outros documentos de formação avançada		1
Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão	Especificações LNEC		
	Informações Técnicas LNEC		
	Guias		
	Normas de aplicação		
	Outros documentos		
Outros	Modelos		
	Aplicações computacionais	2	2
	Instalações piloto		
	Protótipos laboratoriais		
	Relatórios de estudos por contrato com afinidade		4
	Publicações com afinidade, de outros autores		3

(*) Foram considerados como relatórios científicos os relativos aos estudos das barragens da Cova do Leão (R2), Fratel (R3) e Santa Luzia (R6), por incorporarem uma componente científica significativa, desenvolvida no âmbito do projeto

(#) Teses de doutoramento em curso no DE

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, em 2024 e 2025.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos ao projeto em 2024 e 2025

Equipa do projeto	Horas de trabalho		
	2024	2025	Total
António Lopes Batista	163	180	343
Ivo Figueiredo Dias	387	486	873
José Piteira Gomes	126	103	229
Carlos Serra	-	-	-
Nuno Monteiro Azevedo	-	-	-

No Quadro 4.3 apresentam-se os recursos humanos do LNEC dedicados ao projeto em 2024 e 2025, designadamente os meses de trabalho previstos (metade do total para quatro anos) e efetivamente imputados.

Quadro 4.3 – Comparação das afetações de recursos humanos ao projeto em 2024 e 2025, previstas e realizadas

Equipa do projeto	Meses de trabalho	
	Previsto para 4 anos	Realizado em 2024 e 2025 (2 anos)
António Lopes Batista	6,00	2,3
Ivo Figueiredo Dias	7,80	5,8
José Piteira Gomes	5,40	1,5
Carlos Serra	3,60	0
Nuno Monteiro Azevedo	1,08	0

Considerando que o tempo total previsto de trabalho para dois anos é de 11,9 meses (metade do total previsto para quatro anos), e o tempo imputado ao projeto foi de 9,6 meses em 2024 e 2025, há um desvio de afetação, para menos, de cerca de 20%. Atendendo à aposentação do IA José Piteira Gomes em meados de 2025 e à não afetação de tempo dos IA Carlos Serra e Nuno Monteiro Azevedo, devido a razões atendíveis, os desvios das afetações previstas e realizadas podem ser considerados normais face ao desenvolvimento efetivo das diferentes atividades.

Espera-se que o ajuste e a reformulação do projeto permitam o avanço no desenvolvimento das atividades com menor taxa de concretização, através da afetação dos investigadores a elas adstritos.

4.3 Financiamento externo

O projeto tem sido financiado exclusivamente pelo LNEC. No sentido de obter financiamento externo, foi submetida, em março de 2026, a candidatura ao concurso de projetos de IC&DT em todos os domínios científicos 2025, promovido pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), em parceria com o Departamento de Estruturas do LNEC, a EDP e a Infraestruturas de Portugal (IP), do projeto InfraSwelling, intitulado *Numerical modelling of concrete swelling effects in critical infrastructure for management and rehabilitation* (Modelação numérica dos efeitos das expansões de betão em infraestruturas críticas, para apoio à gestão e reabilitação das obras), sendo Ivo Figueiredo Dias o investigador responsável.

Está prevista a constituição de uma parceria de investigação entre o LNEC e a EDP, que permitirá a utilização do *software* desenvolvido no LNEC pela EDP. Case se confirme, esta iniciativa permitirá, por um lado, garantir financiamento complementar para o desenvolvimento do projeto e do *software* e, por outro lado, melhorar a transferência de conhecimento para o meio técnico.

5 | Considerações finais

5.1 Desenvolvimento do projeto

Pode considerar-se, genericamente, que o desenvolvimento do projeto tem decorrido com normalidade, com a exceção da atividade 5, que teve menores avanços que o previsto.

Assinala-se a realização de uma atividade não prevista inicialmente, que consistiu na extensão para a DEF das metodologias antes desenvolvidas para a RAS, no que respeita à avaliação do potencial de expansão e da cinética da reação. Esta atividade foi motivada pela colaboração com o DE, para dar resposta a estudos por contrato envolvendo tabuleiros de obras de vigas pré-fabricadas afetadas por DEF. Tal obrigou ao desenvolvimento de um módulo computacional para resolver o problema térmico na fase de construção, tendo em conta a libertação do calor de hidratação do cimento, dado que as expansões associadas à DEF dependem muito das temperaturas atingidas pelo betão na fase de cura. Este módulo computacional tem também sido utilizado em estudos de simulação da fase de construção de barragens de betão.

Refere-se o apreciável desenvolvimento das aplicações computacionais previstas, em particular dos códigos de elementos finitos para a resolução dos problemas térmico, higrométrico e estrutural.

Em termos de divulgação científica, considera-se que os resultados são positivos, com um bom número de artigos em revista e de comunicações em eventos científicos. Refere-se ainda a realização de um curso internacional no LNEC, que reuniu alguns dos melhores especialistas do mundo nesta matéria.

Apresenta-se no Anexo III o ajuste e a reformulação do projeto, face às necessidades do LNEC e às condicionantes de mobilização de recursos humanos.

5.2 Principais desenvolvimentos expetáveis

O ajuste do projeto considera os aspetos prioritários a desenvolver, designadamente: i) a implementação dos modelos de expansão associados à DEF e o acoplamento entre a RAS e a DEF; ii) a implementação de modelos mais sofisticados para representar os efeitos do confinamento nas expansões estruturais; iii) a avaliação da influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural de barragens; e iv) a integração dos resultados de modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes, utilizando modelos de partículas, nos modelos estruturais macroscópicos, para permitir uma melhor consideração da redução da rigidez e da resistência.

Lisboa, LNEC, junho de 2026

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Observação

Assinado por: **António Luís Henriques Tavares de**

Castro

Num. de Identificação: 05399290

Data: 2026.06.03 10:40:17+01'00'

António Tavares de Castro

O Chefe do Núcleo de Modelação e
Mecânica das Rochas

Assinado por: **Luís Manuel Nolasco Lamas**

Num. de Identificação: 04884922

Data: 2026.06.03 12:13:43+01'00'

Luís Lamas

O Diretor do Departamento de Barragens de Betão

Assinado por: **António Lopes Batista**

Num. de Identificação: 03847091

Data: 2026.06.02 15:49:15+01'00'

António Lopes Batista

AUTORIA

Assinado por: **António Lopes Batista**

Num. de Identificação: 03847091

Data: 2026.06.02 15:47:06+01'00'

António Lopes Batista
Investigador-Coordenador

Assinado por: **Ivo Miguel Baixinho Figueiredo**
Dias

Num. de Identificação: 11890884

Data: 2026.06.02 16:10:08+01'00'

Ivo Figueiredo Dias
Investigador Auxiliar

Assinado por: **Carlos Luís de Oliveira Macedo**
Serra

Num. de Identificação: 12071781

Data: 2026.06.02 16:41:18+01'00'

Carlos Serra
Investigador Auxiliar

Assinado por: **Nuno Miguel Monteiro Azevedo**

Num. de Identificação: 10282051

Data: 2026.06.03 10:18:23+01'00'

Nuno Monteiro Azevedo
Investigador Auxiliar

ANEXOS

ANEXO I

Ficha de projeto



Estratégia de Investigação
e Inovação do LNEC 21-27

FICHA DE PROJETO

MODELAÇÃO DOS EFEITOS DAS EXPANSÕES DO BETÃO EM BARRAGENS, PARA APOIO À GESTÃO E REABILITAÇÃO DAS OBRAS (DAMSWELLING-II)

Versão da ficha 1 | Tuesday/01/23



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ENQUADRAMENTO

A Estratégia de Investigação e Inovação 2021-2027 (E2I 21-27) estabelece a orientação estratégica para a atividade de investigação e inovação do LNEC para o período de 2021 a 2027. A E2I 21-27 está estruturada com base num ciclo de inovação e investigação com as seguintes etapas: motivação, temas, desafios, tipo de resultados, valor acrescentado e conectividade.

A E2I 21-27 é concretizada através do Plano de Investigação e Inovação que comporta: (i) Projetos de investigação, que têm um objeto de investigação específico e os aspetos de inovação claramente definidos, e (ii) Programas de investigação, que estabelecem linhas de investigação mais amplas nos quais se inserem vários projetos de investigação.

Os projetos e programas de investigação são descritos em fichas de projeto de investigação e em fichas de programa de investigação. A apreciação destas fichas de programa e projeto é apresentada numa ficha de apreciação. A monitorização e avaliação dos projetos e programas tem com base uma ficha de autoavaliação preenchida pelo investigador responsável a meio e no fim do projeto.

FICHA DE PROJETO

Modelação dos efeitos das expansões do betão em barragens, para apoio à gestão e reabilitação das obras

Investigador responsável

António Lopes Batista e Ivo Figueiredo Dias

Departamento de Barragens de Betão

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Av. do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

(Versão de julho de 2022)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO

- 1.1 DADOS GERAIS
- 1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES
- 1.3 RESUMO

2. FUNDAMENTAÇÃO

- 2.1 ESTADO DA ARTE
- 2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER
- 2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS
- 2.4 MOTIVAÇÃO

3. TEMAS E OBJETIVOS

- 3.1 TEMAS E DESAFIOS
- 3.2 OBJETIVO GERAL DO PROJETO
- 3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROJETO

4. METODOLOGIA

- 4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL
- 4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

5. EQUIPA

6. PLANO DE TRABALHOS

7. CRONOGRAMA

8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

- 8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROJETO
- 8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROJETO
- 8.3 ESTRATÉGIA DE DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE
- 8.4 PRODUTOS PREVISTOS

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

- 10.1 RECURSOS HUMANOS
- 10.2 DESPESAS CORRENTES
- 10.3. EQUIPAMENTO
- 10.4 ORÇAMENTO

A.1 CONTRIBUIÇÃO PARA OS INDICADORES DA E2I

A.2 CICLO DE INVESTIGAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 DADOS GERAIS

<i>Título do projeto</i>	Modelação dos efeitos das expansões do betão em barragens, para apoio à gestão e reabilitação das obras
<i>Acrónimo do projeto</i>	DamSwelling-II
<i>Unidade Departamental</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Setor</i>	Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas
<i>Investigador responsável</i>	António Lopes Batista e Ivo Figueiredo Dias
<i>Data de início</i>	01/01/2024
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Versão da ficha</i>	1
<i>Data da ficha</i>	23/01/2024

1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES

<i>Unidade operativa coordenadora</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Parceiros internos</i>	Departamento de Estruturas Departamento de Materiais
<i>Parceiros externos</i>	Universidade de Ottawa EDP
<i>Entidades financiadoras</i>	FCT Horizonte Europa EDP
<i>Entidades externas interessadas</i>	EDP Engie Douro HCB EDM
<i>Breve descrição do interesse das entidades externas</i>	As entidades gestoras de barragens de betão afetadas por expansões de origem interna têm muito interesse no conhecimento proporcionado pelo acompanhamento dos processos de deterioração das obras, incluindo a modelação do comportamento observado e a avaliação do desempenho, para garantirem a funcionalidade, a segurança e a durabilidade, programarem atempadamente as intervenções a realizar e ainda conseguirem melhores condições nas apólices de seguros.

1.3 RESUMO

Dado que existem muitas obras, em Portugal e no mundo, afetadas por reações expansivas do betão de origem interna, o LNEC tem sido solicitado, nos últimos anos, para a realização do diagnóstico e do prognóstico destas obras. No caso das barragens, em Portugal cerca de um terço das obras têm esta patologia. Os efeitos estruturais das expansões do betão são normalmente identificados e acompanhados através da observação (compreendendo a monitorização, a inspeção e os ensaios, laboratoriais e de campo). A avaliação estrutural desses efeitos apoia-se em estudos de análise e interpretação do comportamento, para se conhecerem as condições de funcionalidade e de segurança das obras, bem como apoiar os donos de obra na programação das intervenções a realizar.

Os estudos de análise e interpretação do comportamento observado, avaliação das condições de segurança e de apoio às intervenções nas obras, recorrem à modelação numérica, normalmente realizada à escala das obras, recorrendo ao método dos elementos finitos. Contudo, há fenómenos, ao nível da escala dos provetes de betão, que podem ser modelados, com vantagem, recorrendo ao método dos elementos discretos aplicados a modelos de partículas. A modelação dos fenómenos expansivos na macroescala envolve a resolução dos problemas térmico e higrométrico no betão e do problema estrutural, com necessidade de consideração da viscoelasticidade e da fendilhação do betão e do comportamento não linear de descontinuidades estruturais e de elementos laminares e lineares. Assim, exige-se uma análise de comportamento das obras em regime não linear e dependente do tempo.

O projeto pretende o prosseguimento dos estudos dos efeitos da deterioração de barragens sujeitas a expansões do betão de origem interna, realizados no âmbito do projeto DamSwelling (P2I 2013-2020), alargando o seu âmbito à modelação à escala dos provetes de betão e à realização de estudos de adequação de soluções de reabilitação das obras. Terá duas vertentes principais, uma relacionada com a modelação dos efeitos estruturais das expansões tendo em conta os fenómenos químicos, térmicos e higrométricos envolvidos, na meso e na macroescala, e outra relativa à avaliação do impacto das intervenções possíveis nas obras, designadamente a proteção e a regeneração do betão, bem como o reforço e as modificações estruturais.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 ESTADO DA ARTE

Em Portugal há cerca de seis dezenas de grandes barragens de betão com observação continuada, sendo que cerca de um terço estão afetadas por reações expansivas de origem interna do betão. Uma delas, a barragem do Alto Ceira, foi mesmo substituída em 2013, já que não era viável a sua reabilitação. Há três que apresentam valores médios das extensões acumuladas no tempo superiores a 1000×10^{-6} (Pracana, Santa Luzia e Fagilde). A barragem de Pracana sofreu importantes obras de reabilitação na década de 1980. Atualmente apenas a barragem de Fagilde apresenta taxas de expansão anuais superiores a 100×10^{-6} . Nas outras barragens afetadas os processos de deterioração são ainda de pequena a moderada magnitude, mas em algumas delas as taxas de expansão têm aumentado nos últimos anos. Em todas estas obras foram utilizados agregados graníticos e quartzíticos, muito frequentes no país, exceto na barragem de Fagilde, onde foram usados calcários micríticos. No mundo existem milhares de barragens afetadas por esta patologia, apontando-se o Canadá, os Estados Unidos da América, França e Suíça como os países onde a situação é mais grave.

As reações expansivas mais comuns no betão são a reação álcali-agregado (RAA) e a reação sulfática interna (RSI). Os efeitos estruturais macroscópicos mais comuns das expansões em barragens são o empolamento do coroamento, os deslocamentos horizontais para montante e a fendilhação superficial difusa. No diagnóstico, acompanhamento e prognóstico das reações expansivas do betão e dos seus efeitos estruturais, em geral recorre-se: i) à interpretação dos resultados da observação (monitorização e inspeção); ii) a análises e ensaios laboratoriais, físicos e químicos, sobre amostras de betão retiradas do corpo das obras; iii) a ensaios "in situ"; e iv) a modelação matemática. Os sistemas de observação das barragens portuguesas permitem, em regra, captar os efeitos em apreço. Quanto aos ensaios, a sua padronização tem vindo a sofrer melhoramentos, sendo um tema de investigação do DM. A modelação matemática dos fenómenos envolvidos tem sido objeto de dedicada investigação no DBB [1,2], mas carece ainda de vários desenvolvimentos, propostos no presente projeto. Refere-se que se realizou no LNEC, em 2022, a conferência quadrienal mundial no âmbito desta temática, a 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete.

A modelação numérica do comportamento das obras de betão é normalmente realizada à escala das construções (macroescala), envolvendo as peças constituintes das estruturas e as suas ligações, e à escala dos provetes (mesoescala), envolvendo os agregados e a pasta de cimento.

No que respeita à macroescala, os códigos computacionais de elementos finitos existentes do DBB permitem, para obras afetadas por expansões moderadas (até cerca de 500×10^{-6} a 1000×10^{-6}), realizar a sua análise sem limitações de monta, compreendendo: i) a geração da ação expansiva, considerando o potencial intrínseco do próprio betão (expansão a longo prazo em condições padrão) e a influência dos campos de temperatura, humidade interna e de tensões; e ii) a consideração do comportamento viscoelástico e da fendilhação do betão. Os estudos de aplicação realizados, de investigação e por contrato, para as barragens de Santa Luzia, Pracana, Bemposta, Covão do Meio, Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil), mostraram as potencialidades das capacidades existentes. Contudo, para expansões de maior magnitude, é necessário considerar a depreciação da rigidez e da resistência do betão, que influencia as roturas, pelo que torna necessário o ajuste dos modelos de dano de duas variáveis (compressão e tração) utilizados para simular o comportamento não-linear. É também necessário melhorar o desempenho numérico dos elementos de junta para representar as descontinuidades (existentes, designadamente as juntas de contração, e induzidas, em particular os cortes estruturais) e de elementos laminares (para representar chapas e mantas de fibras) e lineares (para representar varões e cabos, passivos e ativos), para possibilitar o apoio a topo o tipo de intervenções nas obras. Refere-se ainda o interesse da realização de estudos considerando a variabilidade espacial das expansões (e, eventualmente, das propriedades do betão), para interpretação da fendilhação superficial difusa e para a avaliação da sensibilidade do comportamento das obras a estas variáveis [3].

A modelação na mesoescala permite compreender os efeitos estruturais associados às reações expansivas que ocorrem ao nível da pasta de cimento e dos agregados [4]. A modelação do efeito das reações expansivas foi realizada através de modelos de partículas, considerando a viscoelasticidade da pasta de cimento e a fratura de cada componente do betão. Pretende-se desenvolver este tipo de modelação para interpretação dos resultados de ensaios, estabelecer a relação entre condições laboratoriais e in situ e dar apoio às análise estrutural de barragens.

O presente projeto pretende dar continuidade ao projeto DamSwelling e a uma vertente do projeto DamConcrete, integrados no P2I/LNEC 2013-2020, que se prolongou até 2023.

- [1] Piteira Gomes, J. (2007). Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a reações expansivas. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- [2] Batista, A.L. (2021). Deterioração e reabilitação de barragens afetadas por reações expansivas internas do betão. Programa de investigação, LNEC, Lisboa.
- [3] Saouma, V.; Hariri-Ardebil, M.; Graham-Brady, L. (2020). Stochastic analysis of concrete dams with alkali aggregate reaction. Concrete and Cement Research 132, doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106032.
- [4] Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. (2022). 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, Lisboa.

2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER

Pretende-se que sejam resolvidos os seguintes problemas:

- a) 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) 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;
- d) Modelação dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão.

2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS

2.3.1 Contributo para o progresso dos conhecimentos (científicos, tecnológicos, de processos ou de metodologias)

As contribuições inovadoras previstas são as seguintes:

- a) Melhoramento da representação numérica dos processos de fendilhação e da depreciação da rigidez e da resistência do betão, usando o método dos elementos finitos, na macroescala, e o método dos elementos discretos, na mesoescala, para permitir a simulação do comportamento das obras de forma mais realista;
- b) Agilização da utilização de elementos de junta e de elementos laminares e lineares, para consideração da influência de descontinuidades e de reforços estruturais;
- c) Interpretação de resultados de ensaios de provetes, em condições aceleradas, através de modelação na mesoescala, usando modelos de partículas, e extrapolação para as condições reais das estruturas;
- d) Melhoramento das ferramentas numéricas disponíveis para interpretar o comportamento observado das obras e para estudar as soluções de intervenção mais adequadas, considerando o leque disponível de opções e as especificidades de cada caso;
- e) Modelação de processos de degradação baseados em dados por recurso a métodos estocásticos. Identificação de fatores internos e externos conducentes à acumulação de dano ao longo do tempo e previsão de potenciais roturas.

No que se refere aos “Níveis de Prontidão Tecnológica” (TRL), avalia-se, na vertente de estudo da representação dos fenómenos físicos envolvidos, o estado da tecnologia disponível em nível TRL2 “Conceito tecnológico formulado” e pretende-se atingir o nível TRL8 “Sistema completado e qualificado”. Já no que respeita aos modelos a desenvolver, considera-se o estado do desenvolvimento tecnológico atual correspondente ao nível TRL5 “Tecnologia validada em ambiente relevante”, pretendendo-se alcançar, no final do projeto, o nível TRL8 “Sistema completo e qualificado”.

2.3.2 Contributo para o reforço das competências e dos recursos do LNEC, nomeadamente os experimentais

Serão reforçadas as capacidades numéricas para a realização da análise de estruturas de betão em massa e betão armado pré-esforçado, afetadas por expansões do betão, para interpretação do comportamento observado, avaliação da segurança e apoio a todo o tipo de intervenções nas obras.

O desenvolvimento deste projeto estará articulado com o reforço de competências experimentais, designadamente no DM e no DE. No que respeita ao DM, espera-se tirar partido dos resultados de ensaios físicos e químicos de diagnóstico e prognóstico de provetes de betão, obtidos pelas mais recentes metodologias de ensaios, que depois serão extrapolados para a escala das obras. Quanto aos contributos esperados do DE, referem-se os relativos à medição da humidade interna do betão através de dispositivos instalados nas obras nos últimos anos.

2.4 MOTIVAÇÃO

Motivos para o desenvolvimento do projeto (ver E2I)

Solicitações - Pedidos de estudo de entidades externas

Necessidades - Carências de conhecimento identificadas pelos investigadores

Justificação sucinta da motivação para a realização do projeto (opcional)

3. TEMAS E OBJETIVOS

3.1 TEMAS E DESAFIOS

Tema principal (ver E2I)

Construção

Desenvolvimento de produtos e processos inovadores para responder às necessidades sociais de qualidade e sustentabilidade do ambiente construído

Desafios principais (ver E2I)

Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído

Preservação e reabilitação do património construído, natural e cultural

Tema secundário (ver E2I)

Alterações climáticas

Exploração e redução de incertezas, gestão de riscos, mitigação e adaptação

Desafios secundários (ver E2I)

Adaptação e proteção de pessoas, infraestruturas e atividades às alterações climáticas

Enquadramento nos temas e objetivos de I&I da Unidade Departamental

Enquadra-se nos principais temas e objetivos do DBB, nomeadamente no estudo de barragens afetadas por expansões do betão. Enquadra-se ainda nos temas prioritários de investigação do DBB "Deterioração e reabilitação de barragens de betão e de alvenaria" e "Desenvolvimento de modelos de análise estrutural, térmica e hidromecânica de obras de betão, de alvenaria e em maciços rochosos". As metodologias a desenvolver permitirão apoiar a observação, o controlo da segurança e a reabilitação das barragens afetadas.

3.2 OBJETIVO GERAL DO PROJETO

O LNEC tem sido solicitado para a realização de estudos de análise e interpretação do comportamento observado e avaliação da segurança de barragens e de outras estruturas de betão (em particular de pontes) afetadas por expansões do betão. Os estudos mais significativos são das barragens de Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil), que terminaram em 2021, e da barragem de Santa Luzia, em curso. O projeto pretende contribuir para o melhoramento das capacidades numéricas neste âmbito, dando continuidade ao projeto DamSwelling e a uma vertente do projeto DamConcrete do P2I/LNEC 2013-2020. Pretende-se melhorar as capacidades numéricas para o estudo do comportamento, segurança e intervenções nas obras. Pretende-se também melhorar as capacidades de modelação dos efeitos das expansões à escala dos provetes de betão.

Os desenvolvimentos do projeto permitirão uma melhor gestão dos processos de deterioração associados a esta patologia, através de uma adequada programação de eventuais ações corretivas ao longo do tempo. Esta abordagem terá um impacto económico considerável nas obras, através da otimização da afetação de recursos.

3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROJETO

Os objetivos específicos do projeto estão associados à resolução dos problemas atrás referidos, para as estruturas afetadas por expansões do betão. Pretende-se o melhoramento das capacidades numéricas nos seguintes domínios:

- a) 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) 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;
- d) Modelação dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão;

Serão feitos estudos de aplicação das metodologias desenvolvidas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para avaliação do desempenho das ferramentas numéricas melhoradas.

Na concretização dos objetivos específicos contar-se-á com o apoio dos parceiros internos e externos, designadamente: i) nos estudos de casos simples, serão utilizados resultados de ensaios e de análises provenientes do DM, do DE e da Universidade de Ottawa; e ii) nos estudos envolvendo barragens de betão, serão considerados elementos provenientes da observação de obras da EDP, Engie Douro, EDM e HCB.

4. METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL

Os estudos de análise e interpretação do comportamento observado e avaliação da segurança de barragens e de outras estruturas de betão (em particular de pontes) afetadas por expansões do betão assentam, em geral, na análise do comportamento observado e na realização de ensaios específicos do betão.

No que respeita à observação, no caso das barragens de betão, os sistemas de monitorização instalados nas obras portuguesas e as inspeções permitem, em regra, a obtenção de informação suficiente para caracterizar as ações e os seus efeitos estruturais. A caracterização da fendilhação do betão, difusa e linear, associada aos efeitos das expansões, poderá beneficiar com as metodologias proporcionadas pelo tratamento digital de imagens, já disponíveis. Os ensaios específicos do betão afetado, físicos e químicos, são cobertos pelo âmbito de ação do DM. Há um conjunto de ensaios de campo que poderão contribuir para o diagnóstico estrutural, designadamente os baseados em técnicas de ultrassons e vibração (ambiente e forçada).

Apesar de existirem boas capacidades numéricas, como o atestam os estudos realizados para as barragens de Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil), pretende-se melhorar as ferramentas computacionais para o estudo do comportamento, segurança e intervenções nas obras. Pretende-se também melhorar as capacidades de modelação dos efeitos das expansões à escala dos provetes de betão.

Refere-se ainda a importância do conhecimento proporcionado, ao longo do tempo, dos campos de tensão-deformação nas obras, que possibilitam a avaliação direta da sua segurança estática e, usando metodologias disponíveis de outros projetos de investigação, da verificação da segurança sísmica.

4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

Existe no DBB uma experiência considerável na modelação do comportamento de barragens sujeitas a expansões do betão. Essa modelação tem vindo a ser feita por meio de métodos numéricos, sendo a sua verificação realizada, sempre que possível, através da comparação com resultados da observação das obras. Pretende-se melhorar as ferramentas numéricas já disponíveis, com vista à realização de estudos de análise e interpretação do comportamento das obras, avaliação da sua segurança e apoio a intervenções de reparação e reforço.

Na modelação numérica serão utilizados o método dos elementos finitos, na macroescala (obras de betão), e o método dos elementos discretos, nos estudos à escala dos provetes de betão. As análises serão realizadas ao longo do tempo, para atender à evolução da ação expansiva e das propriedades do betão.

O método dos elementos finitos será usado nas vertentes térmica, higrométrica e estrutural. Importa determinar os campos térmicos e de humidade interna no betão, já que têm uma grande influência no desenvolvimento das expansões livres. Nas condições observadas nas obras, a determinação desses campos envolve a resolução de um problema de difusão, governado pela equação de Fourier. Na vertente estrutural serão considerados: i) o comportamento viscoelástico com maturação do betão; ii) o comportamento não linear do betão através de um modelo de dano, com variáveis independentes à compressão e à tração, para simular as roturas por corte e a fendilhação, respetivamente; iii) o comportamento não linear das descontinuidades (juntas de contração, outras superfícies de descontinuidade com interesse, designadamente na interface com a fundação ou no próprio maciço de fundação, e cortes estruturais), através de um modelo de Mohr-Coulomb; iv) o comportamento elasto-plástico de elementos laminares (chapas e mantas de fibras) e de elementos lineares (varões e cabos), passivos ou ativos, para representar armaduras e reforços; v) a depreciação da rigidez e da resistência do betão, que aumento com a magnitude das expansões; e vi) os efeitos do confinamento nas expansões estruturais, que diminuem, relativamente às expansões livres, com o aumento das tensões de compressão.

Nos estudos dos efeitos das expansões, à escala dos provetes, será usado o método dos elementos discretos aplicado a modelos de partículas, considerando o comportamento viscoelástico da pasta de cimento e o comportamento não linear, ao corte e à tração, dos agregados, da pasta de cimento e da interface pasta-agregado. Já há alguma experiência na utilização de modelos planos, que se pretende consolidar através de mais simulações numéricas e mesmo alargar para o caso tridimensional.

As ferramentas numéricas desenvolvidas são aplicadas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para testar o seu desempenho, através da comparação com resultados da observação das obras e com resultados disponíveis na bibliografia. Contar-se-á, nestas tarefas, com o apoio dos parceiros DM, DE, Universidade de Ottawa, EDP, Engie Douro, EDM e HCB.

[illegible]

6. PLANO DE TRABALHOS

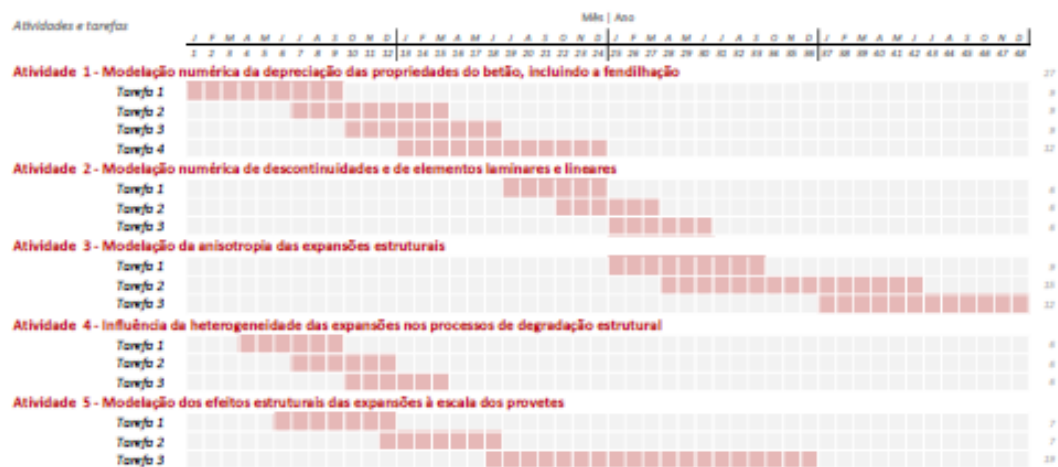
Atividade	1
<i>Designação</i>	Modelação numérica da depreciação das propriedades do betão, incluindo a fendilhação
<i>Descrição</i>	Representação numérica da depreciação da rigidez e da resistência do betão ao longo do tempo, devida aos diferentes tipos de expansão, incluindo os processos de fendilhação (formação e propagação das fendas)
<i>Resultados</i>	Dispor de capacidade de simular a depreciação da rigidez e da resistência do betão, em conjunto com a fendilhação (já disponível)
<i>Duração (meses)</i>	24
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 5% Ivo Figueiredo Dias 10% Aluno de doutoramento 100%
<i>Tarefa 1 Descrição</i>	Modelação numérica da diminuição da rigidez ao longo do tempo Estudo e implementação nos códigos computacionais dos modelos disponíveis para representar a diminuição da rigidez ao longo do tempo devida à evolução das expansões
<i>Tarefa 2 Descrição</i>	Modelação numérica da diminuição da resistência ao longo do tempo Estudo e implementação nos códigos computacionais dos modelos disponíveis para representar a diminuição da resistência do betão ao longo do tempo devida à evolução das expansões
<i>Tarefa 3 Descrição</i>	Modelação numérica da fendilhação Melhoramento, nos códigos computacionais de elementos finitos, das ferramentas numéricas que representam a formação e propagação de fendas, considerando modelos de dano contínuo com variáveis independentes à tração e à compressão
<i>Tarefa 4 Descrição</i>	Estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão Aplicação das metodologias desenvolvidas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para avaliação dos efeitos estruturais
Atividade	2
<i>Designação</i>	Modelação numérica de descontinuidades e de elementos laminares e lineares
<i>Descrição</i>	Representação numérica de descontinuidades (existentes ou a introduzir) e de elementos laminares e lineares (chapas, mantas e armaduras, passivas e ativas) nos códigos computacionais de elementos finitos, em toda a gama de deformações
<i>Resultados</i>	Melhorar as capacidades dos códigos computacionais para simular o comportamento das descontinuidades e de elementos laminares e lineares
<i>Duração (meses)</i>	12
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 5% Ivo Figueiredo Dias 15% Aluno de mestrado 1 75%

<i>Tarefa 1</i>	Modelação numérica do comportamento das descontinuidades
<i>Descrição</i>	Estudo e implementação de modelos constitutivos para descontinuidades sob cargas cíclicas e alternadas, para as juntas de contração e para cortes estruturais em barragens de betão
<i>Tarefa 2</i>	Modelação numérica de elementos laminares e lineares
<i>Descrição</i>	Melhoramento da implementação, nos códigos computacionais de elementos finitos, de elementos laminares e lineares, para representar o comportamento de chapas, mantas, varões e cabos
<i>Tarefa 3</i>	Estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para avaliação dos efeitos estruturais; aplicação no estudo de soluções de reparação e de reforço de obras
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	
Atividade 3	
<i>Designação</i>	Modelação da anisotropia das expansões estruturais
<i>Descrição</i>	Modelação da anisotropia das expansões estruturais devida aos efeitos do confinamento proporcionado pelo campo de tensões, no betão em massa, e por armaduras passivas e ativas, nas estruturas de betão armado e pré-esforçado
<i>Resultados</i>	Implementar as diferentes alternativas de consideração dos efeitos do confinamento nas expansões estruturais e testar a sua influência nas estruturas
<i>Duração (meses)</i>	24
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 5% Ivo Figueiredo Dias 15% José Piteira Gomes 15% Aluno de doutoramento 100%
<i>Tarefa 1</i>	Estudo dos modelos numéricos disponíveis para consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento
<i>Descrição</i>	Existem duas abordagens para a consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento: i) independência do comportamento nas três direções; e ii) dependência entre as três direções, havendo, pelo menos, três métodos diferentes (LNEC, Saouma e Perotti, Liaudat)
<i>Tarefa 2</i>	Integração nos modelos numéricos dos métodos para consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento
<i>Descrição</i>	Implementação nos códigos computacionais, de forma integrada, dos quatro métodos conhecidos para consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento
<i>Tarefa 3</i>	Estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para avaliação dos efeitos estruturais
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	

Atividade	4
<i>Designação</i>	Influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural
<i>Descrição</i>	Consideração da heterogeneidade das expansões do betão, através de campos aleatórios gerados a partir de distribuições de probabilidades, para estudo da sua influência na evolução dos processos de degradação local e global das obras
<i>Resultados</i>	Avaliar a influência da heterogeneidade das expansões do betão, tendo em consideração os padrões de fendilhação difusa e linear nas estruturas
<i>Duração (meses)</i>	12
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 10% José Piteira Gomes 15% Aluno de mestrado 2 75%
<i>Tarefa 1</i>	Estudo das distribuições de probabilidade que melhor se ajustam à representação da variabilidade espacial das expansões
<i>Descrição</i>	
<i>Tarefa 2</i>	Estudos de aplicação para simulação da fendilhação difusa de estruturas de betão em massa e de betão armado
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas em blocos de betão em massa (agregados de grande dimensão) e em lajes de betão armado (agregados de pequena dimensão), para simulação e interpretação de padrões de fendilhação difusa
<i>Tarefa 3</i>	Estudos de aplicação para avaliação da influência da heterogeneidade das expansões no comportamento e degradação de barragens de betão
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas no estudo das barragens de Bemposta e Santa Luzia
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	
Atividade	5
<i>Designação</i>	Modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes
<i>Descrição</i>	Modelação numérica dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala, considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão, usando o método dos elementos discretos aplicados a modelos de partículas, considerando o comportamento viscoelástico e não-linear
<i>Resultados</i>	Avaliação e interpretação dos padrões de fendilhação entre a pasta de cimento e os agregados e nos próprios agregados
<i>Duração (meses)</i>	36
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 5% Carlos Serra 10% Nuno Azevedo 3%

<i>Tarefa 1</i>	Recolha bibliográfica e estudo dos fenómenos envolvidos à escala dos provetes
<i>Descrição</i>	Estudo dos tipos de reações expansivas existentes e da interação entre os componentes do betão durante a reação, em particular a pressão gerada pelos produtos das reações, e estudo dos modelos numéricos mais utilizados para estudar a problemática
<i>Tarefa 2</i>	Implementação numérica e validação dos modelos constitutivos de cada um dos tipos de reação expansiva
<i>Descrição</i>	Desenvolver e validar os modelos constitutivos mais adequados para cada tipo de reação considerando o comportamento viscoelástico da pasta de cimento e o efeito estrutural da temperatura no desenvolvimento das propriedades mecânicas e das reações expansivas
<i>Tarefa 3</i>	Estudos de aplicação aplicados a ensaios em provetes de betão
<i>Descrição</i>	Modelação do comportamento de provetes de argamassa e de betão afetados por reações expansivas, em condições ambientais normais e condições ambientais aceleradas, e comparação dos padrões de fendilhação
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	

7. CRONOGRAMA



8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROJETO

Descritores do tipo de resultados (ver E21)

Produtos e soluções

Produtos e soluções, para responder a problemas ou desafios concretos

Informação e conhecimento

Informação e conhecimento, a reter para o desenvolvimento temático em que se referenciam

Descrição dos resultados e sua integração nos diferentes tipos

O projeto permitirá melhorar as ferramentas disponíveis no DBB para responder aos desafios concretos relacionados com a segurança de barragens de betão afetadas por reações expansivas de origem interna. Este problema tem grande atualidade, sendo o LNEC regularmente solicitado por donos de obras nacionais e internacionais.
O conhecimento gerado será divulgado através de relatórios e artigos científicos.

8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROJETO

Descritores do valor acrescentado do projeto (ver E21)

Promoção da segurança

Melhoria da eficiência e do desempenho

Promoção da sustentabilidade

Descrição do valor acrescentado do projeto

O projeto permitirá ao LNEC melhorar as suas capacidades de resposta às questões relacionadas com a segurança e a reabilitação de barragens e outras estruturas afetadas por expansões do betão, promovendo a segurança e a durabilidade das obras e a melhoria da eficiência, desempenho e sustentabilidade da sua exploração.

8.3 ESTRATÉGIA DE DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE

Descritores das estratégias de devolução dos resultados à sociedade (ver E21)

Comunicação de ciência e disseminação do conhecimento

Sensibilização para a importância do conhecimento científico produzido na melhoria da qualidade de vida, da segurança e da saúde

Aplicação e replicabilidade dos resultados e produtos

Apropriação e utilização dos resultados pelos interlocutores a privilegiar

Descrição das estratégias de devolução de resultados à sociedade

O LNEC é solicitado regularmente para a realização de estudos de diagnóstico e prognóstico de estruturas afetadas por expansões do betão. A devolução à sociedade dos resultados decorrerá naturalmente neste contexto. O conhecimento da condição estrutural de barragens e outras estruturas de betão afetadas pela referida patologia permitirá avaliar os níveis de segurança (minimizando os riscos de rotura associado a estas infraestruturas críticas) e incrementar a sua durabilidade.

Os principais resultados serão publicados em artigos científicos e relatórios, disponibilizando o conhecimento para as comunidades científica e técnica.

8.4 PRODUTOS PREVISTOS

Publicações

Relatórios científicos	4
Livros	
Capítulos de livros	
Artigos em revista internacionais	5
Artigos em revista nacionais	2

Comunicações

Comunicações em encontros científicos internacionais	6
Comunicações em encontros científicos nacionais	6

Organização de seminários e conferências

Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados	1
Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados	1

Formação avançada

Teses de doutoramento	1
Dissertações de mestrado	2
Outros documentos de formação avançada	

Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão

Especificações LNEC	
Informações Técnicas LNEC	
Guias	
Normas de aplicação	
Outros documentos	

Outros

Modelos	
Aplicações computacionais	2
Instalações piloto	
Protótipos laboratoriais	

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

Objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU

Energias renováveis e acessíveis
Indústria, inovação e infraestruturas
Água potável e saneamento

Horizonte Europa

Segurança civil para a sociedade

Estratégia Portugal 2030

Descarbonização da sociedade e promoção da transição energética
Qualificação das instituições
Redução dos riscos e valorização dos ativos ambientais

Explicação da indexação ao contexto

A energia hidroelétrica é uma fonte essencial para a descarbonização e transição energética, sendo as albufeiras associadas às barragens um ativo fundamental para o bastecimento de água potável às populações e mitigação de riscos climáticos (associados a longos períodos de seca ou precipitação extrema).

O conhecimento do comportamento de barragens e outras estruturas afetadas por expansões do betão permitirá uma melhor avaliação dos níveis de segurança (minimizando o risco de rotura) e o incremento da sua durabilidade, promovendo o aumento da eficiência da sua exploração.

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

10.1 RECURSOS HUMANOS

Grupo		Esforço (p*m)	Valor
IC	Grupo 91	6,00	45.600 €
IP (cH)	Grupo 92	0,00	- €
IP	Grupo 93	0,00	- €
IA	Grupo 94	17,88	110.856 €
AI, TS	Grupo 95	0,00	- €
EI, TI	Grupo 96	0,00	- €
CT, AT	Grupo 97	0,00	- €
AO	Grupo 98	0,00	- €
BPD (LNEC)	Grupo 11	0,00	- €
BD, BI (LNEC)	Grupo 12	48,00	96.000 €
BII (LNEC)	Grupo 13	0,00	- €
BIPD (Projeto), BI (Projeto)	Grupo 21	0,00	- €
BI (Projeto)	Grupo 22	0,00	- €
BII (Projeto)	Grupo 23	0,00	- €
Total		71,88	252.456 €

10.2 DESPESAS CORRENTES

Designação	Quantidade	Valor unitário	Montante
Missões nacionais	6	800,00 €	4.800 €
Missões internacionais	6	2.000,00 €	12.000 €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			16.800 €

10.3. EQUIPAMENTO

Designação	Quantidade	Valor unitário	Montante
Computadores de alto desempenho	2	3.000,00 €	6.000 €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			6.000 €

10.4 ORÇAMENTO

Designação	Estimativa de custo	Financiamento externo	Financiamento LNEC
Recursos humanos	252.456,00 €		252.456 €
Despesas correntes	16.800,00 €		16.800 €
Equipamentos	6.000,00 €		6.000 €
Gastos gerais	257.016,00 €		257.016 €
Total	532.272 €	- €	532.272 €

Valor do financiamento externo proveniente de empresas públicas ou privadas (incluída em estudos de I&I ou por contrato)

Valor do financiamento destinado a processos internos inseridos em projetos de investigação

Se não existe financiamento externo nem vai ser

Se não existe financiamento externo, mas vai ser

Legenda

Grupo 91 - Investigador Coordenador (IC)

Grupo 92 - Investigador Principal c/habilitação (IP Ch)

Grupo 93 - Investigador Principal (IP)

Grupo 94 - Investigador Auxiliar (IA)

Grupo 95 - Assistente de investigação (AI); Técnico Superior (TS)

Grupo 96 - Especialista de informática (E); Técnico de informática (TI)

Grupo 97 - Coordenador técnico (CT); Assistente técnico (AT)

Grupo 98 - Assistente operacional (AO)

Grupo 11 - Bolseiro LNEC - investigação pós-doutoral (BPD)

Grupo 12 - Bolseiro LNEC - investigação doutoramento (Antigo Regulamento LNEC de 2001/D4/26); Bolseiro LNEC - investigação doutoramento (BI);

Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BI); Bolseiro LNEC - investigação licenciatura (BI)

Grupo 13 - Bolseiro LNEC - iniciação à investigação (BII)

Grupo 21 - Bolseiro de Projeto - investigação pós-doutoral FCT/majoração LNEC (BIPD); Bolseiro de Projeto - investigação doutoramento FCT/majoração LNEC (BI); Bolseiro de Projeto - investigação doutoramento ou licenciados/mestres inscritos em cursos n/confere grau académico FCT (BI)

Grupo 22 - Bolseiro de Projeto - investigação mestrado/mestrado integrado ou licenciados/mestres inscritos em cursos n/confere grau académico FCT (BI)

Grupo 23 - Bolseiro de Projeto - iniciação à investigação FCT (BII)

A.1 CONTRIBUIÇÃO PARA OS INDICADORES DA E2I

Indicador 1	<i>Financiamento externo relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	0%
Indicador 2	<i>Financiamento da atividade de investigação por empresas (públicas ou privadas) relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	0%
Indicador 3	<i>Valor do financiamento do LNEC relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	100%
Indicador 5	<i>Número de teses de doutoramento orientadas por investigador do projeto</i>	0,04
Indicador 6	<i>Número de dissertações de mestrado orientadas por investigador do projeto</i>	0,08
Indicador 7	<i>Investimento em equipamentos relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	1%
Indicador 9	<i>Valor do financiamento destinado a processos internos relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	0%
Indicador 10	<i>Número de entidades externas parceiras do projeto</i>	2,00
Indicador 11	<i>Número de publicações científicas (e.g., artigos, livros ou capítulos de livros, comunicações, relatórios científicos) por investigador do projeto</i>	0,96
Indicador 13	<i>Número de documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão (Especificações LNEC, Informações Técnicas LNEC, guias, normas de aplicação, etc.) por investigador do projeto</i>	0,00
Indicador 14	<i>Número de eventos científicos e técnicos organizados ou coorganizados pelo LNEC por investigador do projeto</i>	0,08

A.2 CICLO DE INVESTIGAÇÃO

Motivação

Solicitações - Pedidos de estudo de entidades externas
Necessidades - Carências de conhecimento identificadas pelos investigadores

Temas e desafios

Tema principal

Construção

Desafios

Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído
Preservação e reabilitação do património construído, natural e cultural

Tema secundário

Alterações climáticas

Desafios

Adaptação e proteção de pessoas, infraestruturas e atividades às alterações climáticas
--

Tipo de resultados

Produtos e soluções
Informação e conhecimento

Valor acrescentado do projeto

Promoção da segurança
Melhoria da eficiência e do desempenho
Promoção da sustentabilidade

Conetividade

Comunicação de ciência e disseminação do conhecimento
Aplicação e replicabilidade dos resultados e produtos

Indexação ao contexto

Objetivos de desenvolvimento sustentável

Energias renováveis e acessíveis
Indústria, inovação e infraestruturas
Água potável e saneamento

Horizonte Europa

Segurança civil para a sociedade

Estratégia Portugal 2030

Descarbonização da sociedade e promoção da transição energética
Qualificação das instituições
Redução dos riscos e valorização dos ativos ambientais

ANEXO II

Ficha de autoavaliação do projeto



Estratégia de Investigação
e Inovação do LNEC **21-27**

FICHA DE AUTOAVALIAÇÃO DE PROJETO
MODELAÇÃO DOS EFEITOS DAS
EXPANSÕES DO BETÃO EM BARRAGENS,
PARA APOIO À GESTÃO E REABILITAÇÃO
DAS OBRAS
(DAMSWELLING-II)

Versão da ficha 2 | 2026/04/13



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ENQUADRAMENTO

A Estratégia de Investigação e Inovação 2021-2027 (E2I 21-27) estabelece a orientação estratégica para a atividade de investigação e inovação do LNEC para o período de 2021 a 2027. A E2I 21-27 está estruturada com base num ciclo de inovação e investigação com as seguintes etapas: motivação, temas, desafios, tipo de resultados, valor acrescentado e conectividade.

A E2I 21-27 é concretizada através do Plano de Investigação e Inovação que comporta: (i) Projetos de investigação, que têm um objeto de investigação específico e os aspetos de inovação claramente definidos, e (ii) Programas de investigação, que estabelecem linhas de investigação mais amplas nos quais se inserem vários projetos de investigação.

Os projetos e programas de investigação são descritos em fichas de projeto de investigação e em fichas de programa de investigação. A apreciação destas fichas de programa e projeto é apresentada numa ficha de apreciação. A monitorização e avaliação dos projetos e programas tem com base uma ficha de autoavaliação preenchida pelo investigador responsável a meio e no fim do projeto.

FICHA DE AUTOAVALIAÇÃO DE PROJETO

Modelação dos efeitos das expansões do betão em barragens, para apoio à gestão e reabilitação das obras

Investigador responsável

António Lopes Batista e Ivo Figueiredo Dias

Departamento de Barragens de Betão

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Av. do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

(Versão de julho de 2022)

1. INTRODUÇÃO

1.1 DADOS GERAIS

<i>Título do projeto</i>	Modelação dos efeitos das expansões do betão em barragens, para apoio à gestão e reabilitação das obras
<i>Acrónimo do projeto</i>	DamSwelling-II
<i>Unidade Departamental</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Setor</i>	Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas
<i>Investigador responsável</i>	António Lopes Batista e Ivo Figueiredo Dias
<i>Data de início</i>	01/01/2024
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Versão da ficha</i>	2
<i>Data da ficha</i>	13/04/2026

1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES

<i>Unidade operativa coordenadora</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Parceiros internos</i>	Departamento de Estruturas Departamento de Materiais
<i>Parceiros externos</i>	Universidade de Ottawa EDP
<i>Entidades financiadoras</i>	FCT Horizonte Europa EDP
<i>Entidades externas interessadas</i>	EDP Engie Douro HCB EDM
<i>Breve descrição do interesse das entidades externas</i>	As entidades gestoras de barragens afetadas por expansões do betão de origem interna têm muito interesse no conhecimento proporcionado pelo acompanhamento dos processos de deterioração das obras, incluindo a modelação do comportamento observado e a avaliação do desempenho, para garantirem a funcionalidade, a segurança e a durabilidade, programarem atempadamente as intervenções a realizar e ainda conseguirem melhores condições nas apólices de seguros. As aplicações desenvolvidas no âmbito do projeto têm sido muito utilizadas nesses estudos.

1.3 RESUMO

Dado que existem muitas obras, em Portugal e no mundo, afetadas por reações expansivas do betão de origem interna, o LNEC tem sido solicitado, nos últimos anos, para a realização do diagnóstico e do prognóstico destas obras. No caso das barragens, em Portugal cerca de um terço das obras têm esta patologia. Os efeitos estruturais das expansões do betão são normalmente identificados e acompanhados através da observação (compreendendo a monitorização, a inspeção e os ensaios, laboratoriais e de campo). A avaliação estrutural desses efeitos apoia-se em estudos de análise e interpretação do comportamento, para se conhecerem as condições de funcionalidade e de segurança das obras, bem como apoiar os donos de obra na programação das intervenções a realizar.

As estudos de análise e interpretação do comportamento observado, avaliação das condições de segurança e de apoio às intervenções nas obras, recorrem à modelação numérica, normalmente realizada à escala das obras, recorrendo ao método dos elementos finitos. Contudo, há fenómenos, ao nível da escala dos provetes de betão, que podem ser modelados, com vantagem, recorrendo ao método dos elementos discretos aplicados a modelos de partículas. A modelação dos fenómenos expansivos na macroescala envolve a resolução dos problemas térmico e higrométrico no betão e do problema estrutural, com necessidade de consideração da viscoelasticidade e da fendilhação do betão e do comportamento não linear de descontinuidades estruturais e de elementos laminares e lineares. Assim, exige-se uma análise de comportamento das obras em regime não linear e dependente do tempo.

O projeto pretende o prosseguimento dos estudos dos efeitos da deterioração de barragens sujeitas a expansões do betão de origem interna, realizados no âmbito do projeto DamSwelling (P2I 2013-2020), alargando o seu âmbito à modelação à escala dos provetes de betão e à realização de estudos de adequação de soluções de reabilitação das obras. Tem duas vertentes principais, uma relacionada com a modelação dos efeitos estruturais das expansões tendo em conta os fenómenos químicos, térmicos e higrométricos envolvidos, na meso e na macroescala, e outra relativa à avaliação do impacto das intervenções possíveis nas obras, designadamente a proteção e a regeneração do betão, bem como o reforço e as modificações estruturais.

Estavam previstas as cinco seguintes atividades principais no projeto: i) modelação numérica da depreciação das propriedades do betão, incluindo a fendilhação; ii) modelação numérica de descontinuidades e de elementos laminares e lineares; iii) modelação da anisotropia das expansões estruturais; iv) influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural; e v) modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes. As primeiras três atividades tiveram um desenvolvimento que se pode considerar normal, na quarta atividade houve alguns desenvolvimentos, mas na quinta atividade o avanço foi marginal. Para além destas cinco atividades, houve uma outra muito significativa, correspondente ao desenvolvimento, já concluído, de um módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão, considerando a geração do calor de hidratação do cimento, para atender à dependência das expansões devidas à DEF das temperaturas atingidas na fase de cura e de endurecimento do betão.

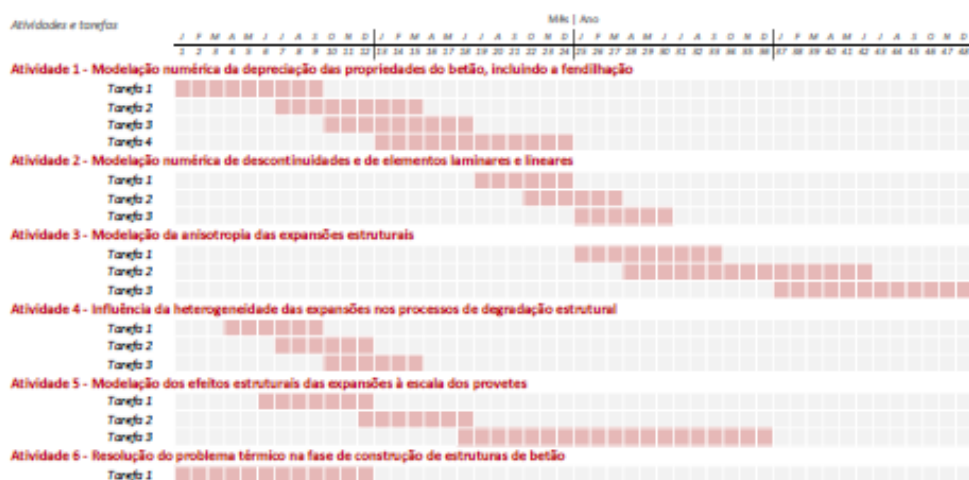
2. REALIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS

Atividade	1
<i>Designação</i>	Modelação numérica da depreciação das propriedades do betão, incluindo a fendilhação
<i>Descrição</i>	Representação numérica da depreciação da rigidez e da resistência do betão ao longo do tempo, devida aos diferentes tipos de expansão, incluindo os processos de fendilhação (formação e propagação das fendas)
<i>Resultados previstos</i>	Dispor de capacidade de simular a depreciação da rigidez e da resistência do betão, em conjunto com a fendilhação (já disponível)
<i>Resultados obtidos</i>	Foi implementada a depreciação da rigidez do betão ao longo do tempo, devida à magnitude das expansões, em conjunto com o modelo de fendilhação. A implementação da depreciação da resistência do betão poderá ser realizada seguindo uma abordagem semelhante.
Atividade	2
<i>Designação</i>	Modelação numérica de descontinuidades e de elementos laminares e lineares
<i>Descrição</i>	Representação numérica de descontinuidades (existentes ou a introduzir) e de elementos laminares e lineares (chapas, mantas e armaduras, passivas e ativas) nos códigos computacionais de elementos finitos, em toda a gama de deformações
<i>Resultados previstos</i>	Melhorar as capacidades dos códigos computacionais para simular o comportamento das descontinuidades e de elementos laminares e lineares
<i>Resultados obtidos</i>	Foram implementados os modelos numéricos para representar as descontinuidades e os elementos lineares, em toda a gama de deformações. Prevê-se a implementação, a curto prazo, dos elementos laminares.
Atividade	3
<i>Designação</i>	Modelação da anisotropia das expansões estruturais
<i>Descrição</i>	Modelação da anisotropia das expansões estruturais devida aos efeitos do confinamento proporcionado pelo campo de tensões, no betão em massa, e por armaduras passivas e ativas, nas estruturas de betão armado e pré-esforçado
<i>Resultados previstos</i>	Implementar as diferentes alternativas de consideração dos efeitos do confinamento nas expansões estruturais e testar a sua influência nas estruturas
<i>Resultados obtidos</i>	Das quatro alternativas conhecidas para consideração dos efeitos do confinamento nas expansões estruturais, estão implementadas duas, tendo-se obtido bons resultados com a sua utilização. Prevê-se a implementação, a curto prazo, das restantes duas alternativas.

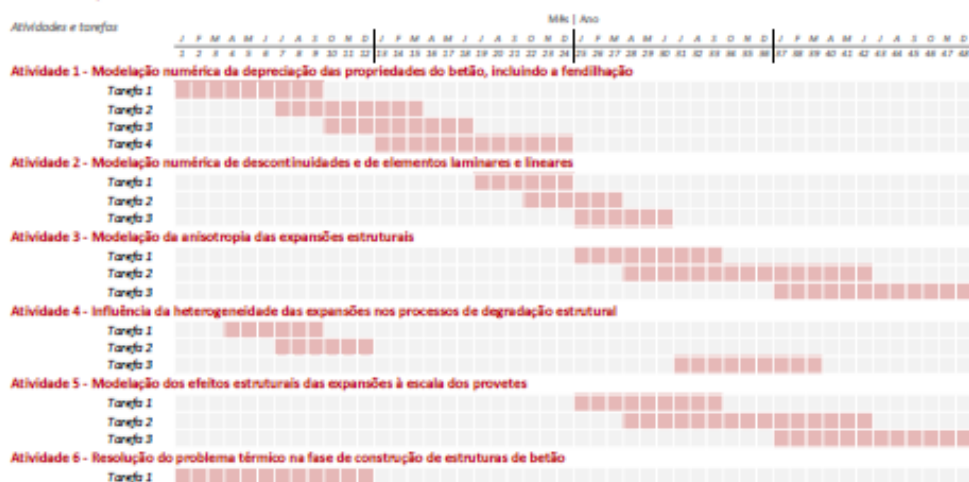
Atividade	4
<i>Designação</i>	Influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural
<i>Descrição</i>	Consideração da heterogeneidade das expansões do betão, através de campos aleatórios gerados a partir de distribuições de probabilidades, para estudo da sua influência na evolução dos processos de degradação local e global das obras
<i>Resultados previstos</i>	Avaliar a influência da heterogeneidade das expansões do betão, tendo em consideração os padrões de fendilhação difusa e linear nas estruturas
<i>Resultados obtidos</i>	Foram já realizados estudos, considerando campos aleatórios gerados a partir de distribuição de probabilidades, para avaliação da degradação local de lajes, armadas e não armadas, com bons resultados. Pretende-se estender esta abordagem a casos de grandes obras.
Atividade	5
<i>Designação</i>	Modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes
<i>Descrição</i>	Modelação numérica dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala, considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão, usando o método dos elementos discretos aplicados a modelos de partículas, considerando o comportamento viscoelástico e não-linear
<i>Resultados previstos</i>	Avaliação e interpretação dos padrões de fendilhação entre a pasta de cimento e os agregados e nos próprios agregados
<i>Resultados obtidos</i>	Foi aprofundado o estudo dos mecanismos físicos e químicos dos fenómenos envolvidos, mas ainda não foi possível avançar para os desenvolvimentos numéricos associados. É preciso ajustar esta atividade, tendo em consideração o tempo e os meios disponíveis.
Atividade	6
<i>Designação</i>	Resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão
<i>Descrição</i>	Desenvolvimento de um módulo computacional para a resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão, usando o método dos elementos finitos
<i>Resultados previstos</i>	Não estava prevista esta atividade na ficha inicial do projeto
<i>Resultados obtidos</i>	Partindo de um programa já existente para resolução do problema térmico na fase de serviço das estruturas de betão, acrescentaram-se os efeitos da geração do calor de hidratação do cimento na fase de construção

3. CRONOGRAMA

3.1 CRONOGRAMA INICIAL



3.2 ATUALIZAÇÃO DO CRONOGRAMA



4. RESULTADOS E SUA DISSEMINAÇÃO

4.1 APRECIACÃO CRÍTICA DOS RESULTADOS DO PROJETO

Descritores do tipo de resultados (ver E21)

Produtos e soluções

Produtos e soluções, para responder a problemas ou desafios concretos

Informação e conhecimento

Informação e conhecimento, a reter para o desenvolvimento temático em que se referenciam

Apreciação

Nos dois primeiros anos do projeto foram conseguidos importantes desenvolvimentos, no sentido de melhorar as capacidades de modelação e análise de estruturas afetadas por expansões do betão.

Destacam-se os seguintes aspetos: a consideração da depreciação da rigidez do betão devido às expansões; a implementação de elementos lineares, que permitem a consideração dos efeitos das armaduras e do pré-esforço; a implementação de elementos de junta, que permitem a representação das juntas de contração das barragens e da superfície de inserção na fundação; o desenvolvimento de um módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão, considerando a geração do calor de hidratação do cimento, para atender à dependência das expansões devidas à DEF das temperaturas atingidas na fase de cura e de endurecimento do betão; e a realização de estudos, considerando campos aleatórios gerados a partir de distribuição de probabilidades, para avaliação da degradação local de lajes, armadas e não armadas. Estes desenvolvimentos permitem realizar análises numéricas de melhor qualidade, tendo sido já aplicados em estudos por contrato recentes, nomeadamente no estudo de análise, interpretação e previsão do comportamento estrutural da barragem de Santa Luzia (LNEC, 2026) e no estudo de análise dos efeitos da formação de etringite retardada nos tabuleiros de passagens superiores da autoestrada A85, em França, que está em fase de conclusão.

4.2 APRECIÇÃO CRÍTICA DA DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE

Descritores das estratégias de devolução dos resultados à sociedade (ver E21)

Comunicação de ciência e conhecimento

Transmissão dos resultados à sociedade em geral com vista a promover a sua compreensão

Aplicação dos resultados pela sociedade

Apropriação e utilização dos resultados pelos interlocutores a privilegiar

Apreciação

Os resultados alcançados têm um impacto muito relevante na capacidade de modelação de estruturas afetadas por expansões do betão. Estes avanços permitem realizar análises de melhor qualidade e apoiar de forma mais eficiente os donos de obra na avaliação do desempenho e da segurança de estruturas afetadas, sustentando as decisões de gestão das infraestruturas e a adoção das melhores soluções de reabilitação, promovendo a segurança e a durabilidade das obras e a melhoria da eficiência, desempenho e sustentabilidade da sua exploração.

Os desenvolvimentos do projeto têm sido divulgados à comunidade técnica e científica através da publicação de artigos em revista e da apresentação de comunicações em conferências internacionais.

4.3 PRODUTOS

<i>Publicações</i>	Previstos	Realizados
Relatórios científicos	4	3
Livros		
Capítulos de livros		
Artigos em revista internacionais	5	2
Artigos em revista nacionais	2	
<i>Comunicações</i>		
Comunicações em encontros científicos internacionais	6	7
Comunicações em encontros científicos nacionais	6	1
<i>Organização de seminários e conferências</i>		
Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados	1	1
Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados	1	
<i>Formação avançada</i>		
Teses de doutoramento	1	2
Dissertações de mestrado	2	
Outros documentos de formação avançada		1
<i>Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão</i>		
Especificações LNEC		
Informações Técnicas LNEC		
Guias		
Normas de aplicação		
Outros documentos		
<i>Outros</i>		
Modelos		
Aplicações computacionais	2	2
Instalações piloto		
Protótipos laboratoriais		
Relatórios de estudos por contrato com afinidade		4
Publicações com afinidade, de outros autores		3

Nota: as 2 teses de doutoramento estão em curso no DE, com apoio do DBB

5. REFORMULAÇÃO DO PROJETO

5.1 NECESSIDADE DE REFORMULAÇÃO

O projeto precisa de ser ajustado em alguns aspetos, pelo que se apresenta uma nova ficha.

5.2 JUSTIFICAÇÃO DA REFORMULAÇÃO

A reformulação está relacionada com quatro aspetos: i) o desenvolvimento, já concluído, de um módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão, considerando a geração do calor de hidratação do cimento; ii) a aposentação, em 2025, de um dos elementos da equipa do projeto; iii) o ajuste da atividade 5, que apenas teve desenvolvimentos marginais; e iv) a integração na equipa do projeto de um novo elemento, em 2026, essencialmente para apoiar o desenvolvimento da atividade 5.

6. CONCLUSÕES E LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA

6.1 CONCLUSÕES

Pode considerar-se, genericamente, que o desenvolvimento do projeto tem decorrido com normalidade, havendo apenas a referir que a atividade 5 teve menores avanços que o previsto. Assinala-se a realização de uma tarefa não prevista inicialmente, que consistiu na extensão para a DEF das metodologias antes desenvolvidas para a RAS. Esta tarefa foi motivada pela colaboração com o DE, para dar resposta a estudos por contrato envolvendo tabuleiros de obras de vigas pré-fabricadas afetadas por DEF. Tal obrigou ao desenvolvimento de um módulo computacional para resolver o problema térmico na fase de construção, tendo em conta a libertação do calor de hidratação do cimento, dado que as expansões associadas à DEF dependem muito das temperaturas atingidas pelo betão na fase de cura. Este módulo computacional tem também sido utilizado em estudos de simulação da fase de construção de barragens de betão.

Refere-se o apreciável desenvolvimento das aplicações computacionais previstas, em particular dos códigos de elementos finitos para a resolução dos problemas térmico, higrométrico e estrutural.

Em termos de divulgação científica, considera-se que os resultados são positivos, com um bom número de artigos em revista e de comunicações em eventos científicos.

Refere-se a realização de um curso internacional no LNEC, que reuniu alguns dos melhores especialistas do mundo nesta matéria.

6.2 LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA

O ajuste do projeto considera os aspetos prioritários a desenvolver, designadamente: i) a implementação dos modelos de expansão associados à DEF e o acoplamento entre a RAS e a DEF; ii) a implementação de modelos mais sofisticados para representar os efeitos do confinamento nas expansões estruturais; iii) a avaliação da influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural de barragens; e iv) a integração dos resultados de modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes, utilizando modelos de partículas, nos modelos estruturais macroscópicos, para permitir uma melhor consideração da redução da rigidez e da resistência.

ANEXO III

Ficha de reformulação do projeto



Estratégia de Investigação
e Inovação do LNEC 21-27

FICHA DE PROJETO

MODELAÇÃO DOS EFEITOS DAS EXPANSÕES DO BETÃO EM BARRAGENS, PARA APOIO À GESTÃO E REABILITAÇÃO DAS OBRAS

(DAMSWELLING-II)

Versão da ficha 2 | Monday/04/13



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ENQUADRAMENTO

A Estratégia de Investigação e Inovação 2021-2027 (E2I 21-27) estabelece a orientação estratégica para a atividade de investigação e inovação do LNEC para o período de 2021 a 2027. A E2I 21-27 está estruturada com base num ciclo de inovação e investigação com as seguintes etapas: motivação, temas, desafios, tipo de resultados, valor acrescentado e conectividade.

A E2I 21-27 é concretizada através do Plano de Investigação e Inovação que comporta: (i) Projetos de investigação, que têm um objeto de investigação específico e os aspetos de inovação claramente definidos, e (ii) Programas de investigação, que estabelecem linhas de investigação mais amplas nos quais se inserem vários projetos de investigação.

Os projetos e programas de investigação são descritos em fichas de projeto de investigação e em fichas de programa de investigação. A apreciação destas fichas de programa e projeto é apresentada numa ficha de apreciação. A monitorização e avaliação dos projetos e programas tem com base uma ficha de autoavaliação preenchida pelo investigador responsável a meio e no fim do projeto.

FICHA DE PROJETO

Modelação dos efeitos das expansões do betão em barragens, para apoio à gestão e reabilitação das obras

Investigador responsável

António Lopes Batista e Ivo Figueiredo Dias

Departamento de Barragens de Betão

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Av. do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

(Versão de julho de 2022)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO

- 1.1 DADOS GERAIS
- 1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES
- 1.3 RESUMO

2. FUNDAMENTAÇÃO

- 2.1 ESTADO DA ARTE
- 2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER
- 2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS
- 2.4 MOTIVAÇÃO

3. TEMAS E OBJETIVOS

- 3.1 TEMAS E DESAFIOS
- 3.2 OBJETIVO GERAL DO PROJETO
- 3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROJETO

4. METODOLOGIA

- 4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL
- 4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

5. EQUIPA

6. PLANO DE TRABALHOS

7. CRONOGRAMA

8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

- 8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROJETO
- 8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROJETO
- 8.3 ESTRATÉGIA DE DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE
- 8.4 PRODUTOS PREVISTOS

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

- 10.1 RECURSOS HUMANOS
- 10.2 DESPESAS CORRENTES
- 10.3 EQUIPAMENTO
- 10.4 ORÇAMENTO

A.1 CONTRIBUIÇÃO PARA OS INDICADORES DA E2I

A.2 CICLO DE INVESTIGAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 DADOS GERAIS

<i>Título do projeto</i>	Modelação dos efeitos das expansões do betão em barragens, para apoio à gestão e reabilitação das obras
<i>Acrónimo do projeto</i>	DamSwelling-II
<i>Unidade Departamental</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Setor</i>	Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas
<i>Investigador responsável</i>	António Lopes Batista e Ivo Figueiredo Dias
<i>Data de início</i>	01/01/2024
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Versão da ficha</i>	2
<i>Data da ficha</i>	13/04/2026

1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES

<i>Unidade operativa coordenadora</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Parceiros internos</i>	Departamento de Estruturas Departamento de Materiais
<i>Parceiros externos</i>	Universidade de Ottawa EDP
<i>Entidades financiadoras</i>	FCT Horizonte Europa EDP
<i>Entidades externas interessadas</i>	EDP Engie Douro HCB EDM
<i>Breve descrição do interesse das entidades externas</i>	As entidades gestoras de barragens de betão afetadas por expansões de origem interna têm muito interesse no conhecimento proporcionado pelo acompanhamento dos processos de deterioração das obras, incluindo a modelação do comportamento observado e a avaliação do desempenho, para garantirem a funcionalidade, a segurança e a durabilidade, programarem atempadamente as intervenções a realizar e ainda conseguirem melhores condições nas apólices de seguros.

1.3 RESUMO

Dado que existem muitas obras, em Portugal e no mundo, afetadas por reações expansivas do betão de origem interna, o LNEC tem sido solicitado, nos últimos anos, para a realização do diagnóstico e do prognóstico destas obras. No caso das barragens, em Portugal cerca de um terço das obras têm esta patologia. Os efeitos estruturais das expansões do betão são normalmente identificados e acompanhados através da observação (compreendendo a monitorização, a inspeção e os ensaios, laboratoriais e de campo). A avaliação estrutural desses efeitos apoia-se em estudos de análise e interpretação do comportamento, para se conhecerem as condições de funcionalidade e de segurança das obras, bem como apoiar os donos de obra na programação das intervenções a realizar.

Os estudos de análise e interpretação do comportamento observado, avaliação das condições de segurança e de apoio às intervenções nas obras, recorrem à modelação numérica, normalmente realizada à escala das obras, recorrendo ao método dos elementos finitos. Contudo, há fenómenos, ao nível da escala dos provetes de betão, que podem ser modelados, com vantagem, recorrendo ao método dos elementos discretos aplicados a modelos de partículas. A modelação dos fenómenos expansivos na macroescala envolve a resolução dos problemas térmico e higrométrico no betão e do problema estrutural, com necessidade de consideração da viscoelasticidade e da fendilhação do betão e do comportamento não linear de descontinuidades estruturais e de elementos laminares e lineares. Assim, exige-se uma análise de comportamento das obras em regime não linear e dependente do tempo.

O projeto pretende o prosseguimento dos estudos dos efeitos da deterioração de barragens sujeitas a expansões do betão de origem interna, realizados no âmbito do projeto DamSwelling (P2I 2013-2020), alargando o seu âmbito à modelação à escala dos provetes de betão e à realização de estudos de adequação de soluções de reabilitação das obras. Terá duas vertentes principais, uma relacionada com a modelação dos efeitos estruturais das expansões tendo em conta os fenómenos químicos, térmicos e higrométricos envolvidos, na meso e na macroescala, e outra relativa à avaliação do impacto das intervenções possíveis nas obras, designadamente a proteção e a regeneração do betão, bem como o reforço e as modificações estruturais.

A presente ficha corresponde à reformulação do projeto em 2026, estando relacionada com quatro aspetos: i) o desenvolvimento, já concluído, de um módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão, considerando a geração do calor de hidratação do cimento, não previsto na ficha inicial; ii) a aposentação, em 2025, de José Piteira Gomes, um dos elementos da equipa inicial; iii) o ajuste do cronograma das atividades 4 e 5; e iv) a integração na equipa do projeto de Hugo Fernandes, em 2026, para apoiar o desenvolvimento da atividade 5.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 ESTADO DA ARTE

Em Portugal há cerca de seis dezenas de grandes barragens de betão com observação continuada, sendo que cerca de um terço estão afetadas por reações expansivas de origem interna do betão. Uma delas, a barragem do Alto Ceira, foi mesmo substituída em 2013, já que não era viável a sua reabilitação. Há três que apresentam valores médios das extensões acumuladas no tempo superiores a 1000×10^{-6} (Pracana, Santa Luzia e Fagilde). A barragem de Pracana sofreu importantes obras de reabilitação na década de 1980. Atualmente apenas a barragem de Fagilde apresenta taxas de expansão anuais superiores a 100×10^{-6} . Nas outras barragens afetadas os processos de deterioração são ainda de pequena a moderada magnitude, mas em algumas delas as taxas de expansão têm aumentado nos últimos anos. Em todas estas obras foram utilizados agregados graníticos e quartzíticos, muito frequentes no país, exceto na barragem de Fagilde, onde foram usados calcários micríticos. No mundo existem milhares de barragens afetadas por esta patologia, apontando-se o Canadá, os Estados Unidos da América, França e Suíça como os países onde a situação é mais gravosa.

As reações expansivas mais comuns no betão são a reação álcali-agregado (RAA) e a reação sulfática interna (RSI). Os efeitos estruturais macroscópicos mais comuns das expansões em barragens são o empolamento do coroamento, os deslocamentos horizontais para montante e a fendilhação superficial difusa. No diagnóstico, acompanhamento e prognóstico das reações expansivas do betão e dos seus efeitos estruturais, em geral recorre-se: i) à interpretação dos resultados da observação (monitorização e inspeção); ii) a análises e ensaios laboratoriais, físicos e químicos, sobre amostras de betão retiradas do corpo das obras; iii) a ensaios "in situ"; e iv) a modelação matemática. Os sistemas de observação das barragens portuguesas permitem, em regra, captar os efeitos em apreço. Quanto aos ensaios, a sua padronização tem vindo a sofrer melhoramentos, sendo um tema de investigação do DM. A modelação matemática dos fenómenos envolvidos tem sido objeto de dedicada investigação no DBB [1,2], mas carece ainda de vários desenvolvimentos, propostos no presente projeto. Refere-se que se realizou no LNEC, em 2022, a conferência quadrienal mundial no âmbito desta temática, a 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete.

A modelação numérica do comportamento das obras de betão é normalmente realizada à escala das construções (macroescala), envolvendo as peças constituintes das estruturas e as suas ligações, e à escala dos provetes (mesoescala), envolvendo as agregados e a pasta de cimento.

No que respeita à macroescala, os códigos computacionais de elementos finitos existentes do DBB permitem, para obras afetadas por expansões moderadas (até cerca de 500×10^{-6} a 1000×10^{-6}), realizar a sua análise sem limitações de monta, compreendendo: i) a geração da ação expansiva, considerando o potencial intrínseco do próprio betão (expansão a longo prazo em condições padrão) e a influência dos campos de temperatura, humidade interna e de tensões; e ii) a consideração do comportamento viscoelástico e da fendilhação do betão. Os estudos de aplicação realizados, de investigação e por contrato, para as barragens de Santa Luzia, Pracana, Bemposta, Covão do Meio, Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil), mostraram as potencialidades das capacidades existentes. Contudo, para expansões de maior magnitude, é necessário considerar a depreciação da rigidez e da resistência do betão, que influencia as roturas, pelo que torna necessário o ajuste dos modelos de dano de duas variáveis (compressão e tração) utilizados para simular o comportamento não-linear. É também necessário melhorar o desempenho numérico dos elementos de junta para representar as descontinuidades (existentes, designadamente as juntas de contração, e induzidas, em particular os cortes estruturais) e de elementos laminares (para representar chapas e mantas de fibras) e lineares (para representar varões e cabos, passivos e ativos), para possibilitar o apoio a topo o tipo de intervenções nas obras. Refere-se ainda o interesse da realização de estudos considerando a variabilidade espacial das expansões (e, eventualmente, das propriedades do betão), para interpretação da fendilhação superficial difusa e para a avaliação da sensibilidade do comportamento das obras a estas variáveis [3].

A modelação na mesoescala permite compreender os efeitos estruturais associados às reações expansivas que ocorrem ao nível da pasta de cimento e dos agregados [4]. A modelação do efeito das reações expansivas foi realizada através de modelos de partículas, considerando a viscoelasticidade da pasta de cimento e a fratura de cada componente do betão. Pretende-se desenvolver este tipo de modelação para interpretação dos resultados de ensaios, estabelecer a relação entre condições laboratoriais e in situ e dar apoio às análises estrutural de barragens.

O presente projeto pretende dar continuidade ao projeto DamSwelling e a uma vertente do projeto DamConcrete, integrados no P2I/LNEC 2013-2020, que se prolongou até 2023.

[1] Piteira Gomes, J. (2007). Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a reações expansivas. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa, Lisboa.

[2] Batista, A.L. (2021). Deterioração e reabilitação de barragens afetadas por reações expansivas internas do betão. Programa de investigação, LNEC, Lisboa.

[3] Saouma, V.; Hariri-Ardebilila, M.; Graham-Brady, L. (2020). Stochastic analysis of concrete dams with alkali aggregate reaction. Concrete and Cement Research 132, doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106032.

[4] Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. (2022). 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, Lisboa.

2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER

Pretende-se que sejam resolvidos os seguintes problemas:

- a) 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, nas estruturas afetadas pela RAS e pela DEF;
- b) 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;
- d) Modelação dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão.

Na ficha inicial do projeto estavam previstas cinco seguintes atividades principais: i) modelação numérica da depreciação das propriedades do betão, incluindo a fendilhação; ii) modelação numérica de descontinuidades e de elementos laminares e lineares; iii) modelação da anisotropia das expansões estruturais; iv) influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural; e v) modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes. As primeiras três atividades tiveram um desenvolvimento que se pode considerar normal, na quarta atividade houve alguns desenvolvimentos, mas na quinta atividade os avanços foram marginais. Para além destas cinco atividades, houve uma outra muito significativa, correspondente ao desenvolvimento, já concluído, de um módulo computacional para resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão, considerando a geração do calor de hidratação do cimento, para atender à dependência das expansões devidas à DEF das temperaturas atingidas na fase de cura e de endurecimento do betão.

2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS

2.3.1 Contributo para o progresso dos conhecimentos (científicos, tecnológicos, de processos ou de metodologias)

As contribuições inovadoras previstas são as seguintes:

- a) Melhoramento da representação numérica dos processos de fendilhação e da depreciação da rigidez e da resistência do betão, usando o método dos elementos finitos, na macroescala, e o método dos elementos discretos, na mesoescala, para permitir a simulação do comportamento das obras de forma mais realista;
- b) Agilização da utilização de elementos de junta e de elementos laminares e lineares, para consideração da influência de descontinuidades e de reforços estruturais;
- c) Interpretação de resultados de ensaios de provetes, em condições aceleradas, através de modelação na mesoescala, usando modelos de partículas, e extrapolação para as condições reais das estruturas;
- d) Melhoramento das ferramentas numéricas disponíveis para interpretar o comportamento observado das obras e para estudar as soluções de intervenção mais adequadas, considerando o leque disponível de opções e as especificidades de cada caso;
- e) Modelação de processos de degradação baseados em dados por recurso a métodos estocásticos. Identificação de fatores internos e externos conducentes à acumulação de dano ao longo do tempo e previsão de potenciais roturas.

No que se refere aos "Níveis de Prontidão Tecnológica" (TRL), avalia-se, na vertente de estudo da representação dos fenómenos físicos envolvidos, o estado da tecnologia disponível em nível TRL2 "Conceito tecnológico formulado" e pretende-se atingir o nível TRL8 "Sistema completado e qualificado". Já no que respeita aos modelos a desenvolver, considera-se o estado do desenvolvimento tecnológico atual correspondente ao nível TRL5 "Tecnologia validada em ambiente relevante", pretendendo-se alcançar, no final do projeto, o nível TRL8 "Sistema completo e qualificado".

2.3.2 Contributo para o reforço das competências e dos recursos do LNEC, nomeadamente os experimentais

Serão reforçadas as capacidades numéricas para a realização da análise de estruturas de betão em massa e betão armado pré-esforçado, afetadas por expansões do betão, para interpretação do comportamento observado, avaliação da segurança e apoio a todo o tipo de intervenções nas obras.

O desenvolvimento deste projeto estará articulado com o reforço de competências experimentais, designadamente no DM e no DE. No que respeita ao DM, espera-se tirar partido dos resultados de ensaios físicos e químicos de diagnóstico e prognóstico de provetes de betão, obtidos pelas mais recentes metodologias de ensaios, que depois serão extrapolados para a escala das obras. Quanto aos contributos esperados do DE, referem-se os relativos à medição da humidade interna do betão através de dispositivos instalados nas obras nos últimos anos.

2.4 MOTIVAÇÃO

Motivos para o desenvolvimento do projeto (ver E2I)

Solicitações - Pedidos de estudo de entidades externas

Necessidades - Carências de conhecimento identificadas pelos investigadores

Justificação sucinta da motivação para a realização do projeto (opcional)

3. TEMAS E OBJETIVOS

3.1 TEMAS E DESAFIOS

Tema principal (ver E2I)

Construção

Desenvolvimento de produtos e processos inovadores para responder às necessidades sociais de qualidade e sustentabilidade do ambiente construído

Desafios principais (ver E2I)

Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído

Preservação e reabilitação do património construído, natural e cultural

Tema secundário (ver E2I)

Alterações climáticas

Exploração e redução de incertezas, gestão de riscos, mitigação e adaptação

Desafios secundários (ver E2I)

Adaptação e proteção de pessoas, infraestruturas e atividades às alterações climáticas

Enquadramento nos temas e objetivos de I&D da Unidade Departamental

Enquadra-se nos principais temas e objetivos do DBB, nomeadamente no estudo de barragens afetadas por expansões do betão. Enquadra-se ainda nos temas prioritários de investigação do DBB "Deterioração e reabilitação de barragens de betão e de alvenaria" e "Desenvolvimento de modelos de análise estrutural, térmica e hidromecânica de obras de betão, de alvenaria e em maciços rochosos". As metodologias a desenvolver permitirão apoiar a observação, o controlo da segurança e a reabilitação das barragens afetadas.

3.2 OBJETIVO GERAL DO PROJETO

O LNEC tem sido solicitado para a realização de estudos de análise e interpretação do comportamento observado e avaliação da segurança de barragens e de outras estruturas de betão (em particular de pontes) afetadas por expansões do betão. Os estudos mais significativos são das barragens de Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil), que terminaram em 2021, e da barragem de Santa Luzia, que terminou em 2025. O projeto pretende contribuir para o melhoramento das capacidades numéricas neste âmbito, dando continuidade ao projeto DamSwelling e a uma vertente do projeto DamConcrete do P2I/LNEC 2013-2020. Pretende-se melhorar as capacidades numéricas para o estudo do comportamento, segurança e intervenções nas obras. Pretende-se também melhorar as capacidades de modelação dos efeitos das expansões à escala dos provetes de betão.

Os desenvolvimentos do projeto permitirão uma melhor gestão dos processos de deterioração associados a esta patologia, através de uma adequada programação de eventuais ações corretivas ao longo do tempo. Esta abordagem terá um impacto económico considerável nas obras, através da otimização da afetação de recursos.

3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROJETO

Os objetivos específicos do projeto estão associados à resolução dos problemas atrás referidos, para as estruturas afetadas por expansões do betão. Pretende-se o melhoramento das capacidades numéricas nos seguintes domínios:

- a) 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, nas estruturas afetadas pela RAS e pela DEF;
- b) 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;
- d) Modelação dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão.

Serão feitos estudos de aplicação das metodologias desenvolvidas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para avaliação do desempenho das ferramentas numéricas melhoradas.

Na concretização dos objetivos específicos contar-se-á com o apoio dos parceiros internos e externos, designadamente: i) nos estudos de casos simples, serão utilizados resultados de ensaios e de análises provenientes do DM, do DE e da Universidade de Ottawa; e ii) nos estudos envolvendo barragens de betão, serão considerados elementos provenientes da observação de obras da EDP, Engie Douro, EDM e HCB.

4. METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL

Os estudos de análise e interpretação do comportamento observado e avaliação da segurança de barragens e de outras estruturas de betão (em particular de pontes) afetadas por expansões do betão assentam, em geral, na análise do comportamento observado e na realização de ensaios específicos do betão.

No que respeita à observação, no caso das barragens de betão, os sistemas de monitorização instalados nas obras portuguesas e as inspeções permitem, em regra, a obtenção de informação suficiente para caracterizar as ações e os seus efeitos estruturais. A caracterização da fendilhação do betão, difusa e linear, associada aos efeitos das expansões, poderá beneficiar com as metodologias proporcionadas pelo tratamento digital de imagens, já disponíveis. Os ensaios específicos do betão afetado, físicos e químicos, são cobertos pelo âmbito de ação do DM. Há um conjunto de ensaios de campo que poderão contribuir para o diagnóstico estrutural, designadamente os baseados em técnicas de ultrassons e vibração (ambiente e forçada).

Apesar de existirem boas capacidades numéricas, como o atestam os estudos realizados para as barragens de Cahora Bassa (Moçambique) e Peti (Brasil), pretende-se melhorar as ferramentas computacionais para o estudo do comportamento, segurança e intervenções nas obras. Pretende-se também melhorar as capacidades de modelação dos efeitos das expansões à escala dos provetes de betão.

Refere-se ainda a importância do conhecimento proporcionado, ao longo do tempo, dos campos de tensão-deformação nas obras, que possibilitam a avaliação direta da sua segurança estática e, usando metodologias disponíveis de outros projetos de investigação, da verificação da segurança sísmica.

4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

Existe no DBB uma experiência considerável na modelação do comportamento de barragens sujeitas a expansões do betão. Essa modelação tem vindo a ser feita por meio de métodos numéricos, sendo a sua verificação realizada, sempre que possível, através da comparação com resultados da observação das obras. Pretende-se melhorar as ferramentas numéricas já disponíveis, com vista à realização de estudos de análise e interpretação do comportamento das obras, avaliação da sua segurança e apoio a intervenções de reparação e reforço.

Na modelação numérica serão utilizados o método dos elementos finitos, na macroescala (obras de betão), e o método dos elementos discretos, nos estudos à escala dos provetes de betão. As análises serão realizadas ao longo do tempo, para atender à evolução da ação expansiva e das propriedades do betão.

O método dos elementos finitos será usado nas vertentes térmica, higrométrica e estrutural. Importa determinar os campos térmicos e de humidade interna no betão, já que têm uma grande influência no desenvolvimento das expansões livres. Nas condições observadas nas obras, a determinação desses campos envolve a resolução de um problema de difusão, governado pela equação de Fourier. Na vertente estrutural serão considerados: i) o comportamento viscoelástico com maturação do betão; ii) o comportamento não linear do betão através de um modelo de dano, com variáveis independentes à compressão e à tração, para simular as roturas por corte e a fendilhação, respetivamente; iii) o comportamento não linear das discontinuidades (juntas de contração, outras superfícies de descontinuidade com interesse, designadamente na interface com a fundação ou no próprio maciço de fundação, e cortes estruturais), através de um modelo de Mohr-Coulomb; iv) o comportamento elasto-plástico de elementos laminares (chapas e mantas de fibras) e de elementos lineares (varões e cabos), passivos ou ativos, para representar armaduras e reforços; v) a depreciação da rigidez e da resistência do betão, que aumento com a magnitude das expansões; e vi) os efeitos do confinamento nas expansões estruturais, que diminuem, relativamente às expansões livres, com o aumento das tensões de compressão.

Nos estudos dos efeitos das expansões, à escala dos provetes, será usado o método dos elementos discretos aplicado a modelos de partículas, considerando o comportamento viscoelástico da pasta de cimento e o comportamento não linear, ao corte e à tração, dos agregados, da pasta de cimento e da interface pasta-agregado. Já há alguma experiência na utilização de modelos planos, que se pretende consolidar através de mais simulações numéricas e mesmo alargar para o caso tridimensional.

As ferramentas numéricas desenvolvidas são aplicadas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para testar o seu desempenho, através da comparação com resultados da observação das obras e com resultados disponíveis na bibliografia. Contar-se-á, nestas tarefas, com o apoio dos parceiros DM, DE, Universidade de Ottawa, EDP, Engie Douro, EDM e HCB.

[illegible]

6. PLANO DE TRABALHOS

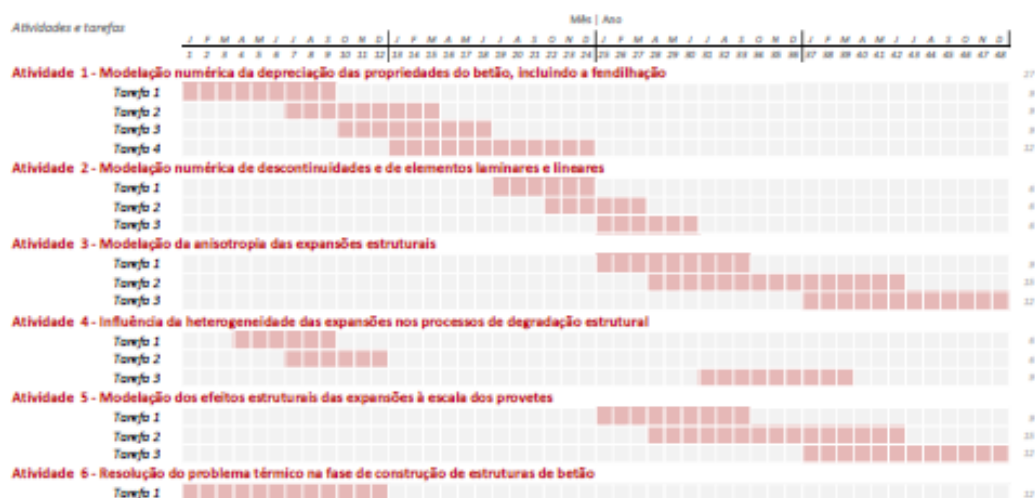
Atividade	1
<i>Designação</i>	Modelação numérica da depreciação das propriedades do betão, incluindo a fendilhação
<i>Descrição</i>	Representação numérica da depreciação da rigidez e da resistência do betão ao longo do tempo, devida aos diferentes tipos de expansão, incluindo os processos de fendilhação (formação e propagação das fendas)
<i>Resultados</i>	Dispor de capacidade de simular a depreciação da rigidez e da resistência do betão, em conjunto com a fendilhação (já disponível)
<i>Duração (meses)</i>	24
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 5% Ivo Figueiredo Dias 10% Aluno de doutoramento 100%
<i>Tarefa 1</i>	Modelação numérica da diminuição da rigidez ao longo do tempo
<i>Descrição</i>	Estudo e implementação nos códigos computacionais dos modelos disponíveis para representar a diminuição da rigidez ao longo do tempo devida à evolução das expansões
<i>Tarefa 2</i>	Modelação numérica da diminuição da resistência ao longo do tempo
<i>Descrição</i>	Estudo e implementação nos códigos computacionais dos modelos disponíveis para representar a diminuição da resistência do betão ao longo do tempo devida à evolução das expansões
<i>Tarefa 3</i>	Modelação numérica da fendilhação
<i>Descrição</i>	Melhoramento, nos códigos computacionais de elementos finitos, das ferramentas numéricas que representam a formação e propagação de fendas, considerando modelos de dano contínuo com variáveis independentes à tração e à compressão
<i>Tarefa 4</i>	Estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para avaliação dos efeitos estruturais
Atividade	2
<i>Designação</i>	Modelação numérica de descontinuidades e de elementos laminares e lineares
<i>Descrição</i>	Representação numérica de descontinuidades (existentes ou a introduzir) e de elementos laminares e lineares (chapas, mantas e armaduras, passivas e ativas) nos códigos computacionais de elementos finitos, em toda a gama de deformações
<i>Resultados</i>	Melhorar as capacidades dos códigos computacionais para simular o comportamento das descontinuidades e de elementos laminares e lineares
<i>Duração (meses)</i>	12
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 5% Ivo Figueiredo Dias 15% Aluno de mestrado 1 75%

<i>Tarefa 1</i>	Modelação numérica do comportamento das descontinuidades
<i>Descrição</i>	Estudo e implementação de modelos constitutivos para descontinuidades sob cargas cíclicas e alternadas, para as juntas de contração e para cortes estruturais em barragens de betão
<i>Tarefa 2</i>	Modelação numérica de elementos laminares e lineares
<i>Descrição</i>	Melhoramento da implementação, nos códigos computacionais de elementos finitos, de elementos laminares e lineares, para representar o comportamento de chapas, mantas, varões e cabos
<i>Tarefa 3</i>	Estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para avaliação dos efeitos estruturais; aplicação no estudo de soluções de reparação e de reforço de obras
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	
Atividade	3
<i>Designação</i>	Modelação da anisotropia das expansões estruturais
<i>Descrição</i>	Modelação da anisotropia das expansões estruturais devida aos efeitos do confinamento proporcionado pelo campo de tensões, no betão em massa, e por armaduras passivas e ativas, nas estruturas de betão armado e pré-esforçado
<i>Resultados</i>	Implementar as diferentes alternativas de consideração dos efeitos do confinamento nas expansões estruturais e testar a sua influência nas estruturas
<i>Duração (meses)</i>	24
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 5% Ivo Figueiredo Dias 15% José Piteira Gomes 5% Aluno de doutoramento 100%
<i>Tarefa 1</i>	Estudo dos modelos numéricos disponíveis para consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento
<i>Descrição</i>	Existem duas abordagens para a consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento: i) independência do comportamento nas três direções; e ii) dependência entre as três direções, havendo, pelo menos, três métodos diferentes (LNEC, Saouma e Perotti, Liaudat)
<i>Tarefa 2</i>	Integração nos modelos numéricos dos métodos para consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento
<i>Descrição</i>	Implementação nos códigos computacionais, de forma integrada, dos quatro métodos conhecidos para consideração da anisotropia das expansões estruturais a partir das expansões livres, devido ao confinamento
<i>Tarefa 3</i>	Estudos de aplicação em casos simples e em barragens de betão
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas em casos simples (blocos e lajes de betão, de betão simples, de betão armado e de betão armado pré-esforçado) e em barragens de betão, para avaliação dos efeitos estruturais
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	

Atividade	4
<i>Designação</i>	Influência da heterogeneidade das expansões nos processos de degradação estrutural
<i>Descrição</i>	Consideração da heterogeneidade das expansões do betão, através de campos aleatórios gerados a partir de distribuições de probabilidades, para estudo da sua influência na evolução dos processos de degradação local e global das obras
<i>Resultados</i>	Avaliar a influência da heterogeneidade das expansões do betão, tendo em consideração os padrões de fendilhação difusa e linear nas estruturas
<i>Duração (meses)</i>	12
<i>Equipa</i>	António Lopes Batista 10% Ivo Figueiredo Dias 5% Aluno de mestrado 2 75%
<i>Tarefa 1</i>	Estudo das distribuições de probabilidade que melhor se ajustam à representação da variabilidade espacial das expansões
<i>Descrição</i>	
<i>Tarefa 2</i>	Estudos de aplicação para simulação da fendilhação difusa de estruturas de betão em massa e de betão armado
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas em blocos de betão em massa (agregados de grande dimensão) e em lajes de betão armado (agregados de pequena dimensão), para simulação e interpretação de padrões de fendilhação difusa
<i>Tarefa 3</i>	Estudos de aplicação para avaliação da influência da heterogeneidade das expansões no comportamento e degradação de barragens de betão
<i>Descrição</i>	Aplicação das metodologias desenvolvidas no estudo das barragens de Bemposta e Santa Luzia
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	
Atividade	5
<i>Designação</i>	Modelação dos efeitos estruturais das expansões à escala dos provetes
<i>Descrição</i>	Modelação numérica dos efeitos estruturais das expansões à mesoescala, considerando os resultados disponíveis de ensaios de provetes de argamassa e de betão, usando o método dos elementos discretos aplicados a modelos de partículas, considerando o comportamento viscoelástico e não-linear
<i>Resultados</i>	Avaliação e interpretação dos padrões de fendilhação entre a pasta de cimento e os agregados e nos próprios agregados
<i>Duração (meses)</i>	24
<i>Equipa</i>	Hugo Fernandes 15% Carlos Serra 10% Nuno Azevedo 3%

<i>Tarefa 1</i>	Recolha bibliográfica e estudo dos fenómenos envolvidos à escala dos provetes
<i>Descrição</i>	Estudo dos tipos de reações expansivas existentes e da interação entre os componentes do betão durante a reação, em particular a pressão gerada pelos produtos das reações, e estudo dos modelos numéricos mais utilizados para estudar a problemática
<i>Tarefa 2</i>	Implementação numérica e validação dos modelos constitutivos de cada um dos tipos de reação expansiva
<i>Descrição</i>	Desenvolver e validar os modelos constitutivos mais adequados para cada tipo de reação considerando o comportamento viscoelástico da pasta de cimento e o efeito estrutural da temperatura no desenvolvimento das propriedades mecânicas e das reações expansivas
<i>Tarefa 3</i>	Estudos de aplicação aplicados a ensaios em provetes de betão
<i>Descrição</i>	Modelação do comportamento de provetes de argamassa e de betão afetados por reações expansivas, em condições ambientais normais e condições ambientais aceleradas, e comparação dos padrões de fendilhação
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	
Atividade 6	
<i>Designação</i>	Resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão
<i>Descrição</i>	Desenvolvimento de um módulo computacional para a resolução do problema térmico na fase de construção de estruturas de betão, usando o método dos elementos finitos
<i>Resultados</i>	Partindo de um programa já existente para resolução do problema térmico na fase de serviço das estruturas de betão, acrescentaram-se os efeitos da geração do calor de hidratação do cimento na fase de construção
<i>Duração (meses)</i>	12
<i>Equipa</i>	Ivo Figueiredo Dias
	10%

7. CRONOGRAMA



8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROJETO

Descritores do tipo de resultados (ver E21)

Produtos e soluções

Produtos e soluções, para responder a problemas ou desafios concretos

Informação e conhecimento

Informação e conhecimento, a reter para o desenvolvimento temático em que se referenciam

Descrição dos resultados e sua integração nos diferentes tipos

O projeto permitirá melhorar as ferramentas disponíveis no DBB para responder aos desafios concretos relacionados com a segurança de barragens de betão afetadas por reações expansivas de origem interna. Este problema tem grande atualidade, sendo o LNEC regularmente solicitado por donos de obras nacionais e internacionais.

O conhecimento gerado será divulgado através de relatórios e artigos científicos.

8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROJETO

Descritores do valor acrescentado do projeto (ver E21)

Promoção da segurança

Melhoria da eficiência e do desempenho

Promoção da sustentabilidade

Descrição do valor acrescentado do projeto

O projeto permitirá ao LNEC melhorar as suas capacidades de resposta às questões relacionadas com a segurança e a reabilitação de barragens e outras estruturas afetadas por expansões do betão, promovendo a segurança e a durabilidade das obras e a melhoria da eficiência, desempenho e sustentabilidade da sua exploração.

8.3 ESTRATÉGIA DE DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE

Descritores das estratégias de devolução dos resultados à sociedade (ver E21)

Comunicação de ciência e disseminação do conhecimento

Sensibilização para a importância do conhecimento científico produzido na melhoria da qualidade de vida, da segurança e da saúde

Aplicação e replicabilidade dos resultados e produtos

Apropriação e utilização dos resultados pelos interlocutores a privilegiar

Descrição das estratégias de devolução de resultados à sociedade

O LNEC é solicitado regularmente para a realização de estudos de diagnóstico e prognóstico de estruturas afetadas por expansões do betão. A devolução à sociedade dos resultados decorrerá naturalmente neste contexto. O conhecimento da condição estrutural de barragens e outras estruturas de betão afetadas pela referida patologia permitirá avaliar os níveis de segurança (minimizando os riscos de rotura associado a estas infraestruturas críticas) e incrementar a sua durabilidade.

Os principais resultados serão publicados em artigos científicos e relatórios, disponibilizando o conhecimento para as comunidades científica e técnica.

8.4 PRODUTOS PREVISTOS

Publicações

Relatórios científicos	6
Livros	
Capítulos de livros	
Artigos em revista internacionais	5
Artigos em revista nacionais	2

Comunicações

Comunicações em encontros científicos internacionais	12
Comunicações em encontros científicos nacionais	3

Organização de seminários e conferências

Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados	1
Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados	1

Formação avançada

Teses de doutoramento	1
Dissertações de mestrado	2
Outros documentos de formação avançada	1

Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão

Especificações LNEC	
Informações Técnicas LNEC	
Guias	
Normas de aplicação	
Outros documentos	

Outros

Modelos	
Aplicações computacionais	2
Instalações piloto	
Protótipos laboratoriais	
Relatórios de estudos por contrato com afinidade	6

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

Objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU

Energias renováveis e acessíveis
Indústria, inovação e infraestruturas
Água potável e saneamento

Horizonte Europa

Segurança civil para a sociedade

Estratégia Portugal 2030

Descarbonização da sociedade e promoção da transição energética
Qualificação das instituições
Redução dos riscos e valorização dos ativos ambientais

Explicação da indexação ao contexto

A energia hidroelétrica é uma fonte essencial para a descarbonização e transição energética, sendo as albufeiras associadas às barragens um ativo fundamental para o bastecimento de água potável às populações e mitigação de riscos climáticos (associados a longos períodos de seca ou precipitação extrema).

O conhecimento do comportamento de barragens e outras estruturas afetadas por expansões do betão permitirá uma melhor avaliação dos níveis de segurança (minimizando o risco de rotura) e o incremento da sua durabilidade, promovendo o aumento da eficiência da sua exploração.

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

10.1 RECURSOS HUMANOS

Grupo		Esforço (p*m)	Valor
IC	Grupo 91	4,20	31.920 €
IP (cH)	Grupo 92	0,00	- €
IP	Grupo 93	0,00	- €
IA	Grupo 94	16,32	101.184 €
AI, TS	Grupo 95	0,00	- €
EI, TI	Grupo 96	0,00	- €
CT, AT	Grupo 97	0,00	- €
AO	Grupo 98	0,00	- €
BPD (LNEC)	Grupo 11	0,00	- €
BD, BI (LNEC)	Grupo 12	48,00	96.000 €
BII (LNEC)	Grupo 13	0,00	- €
BIPD (Projeto), BI (Projeto)	Grupo 21	0,00	- €
BI (Projeto)	Grupo 22	0,00	- €
BII (Projeto)	Grupo 23	0,00	- €
Total		68,52	229.104 €

10.2 DESPESAS CORRENTES

Designação	Quantidade	Valor unitário	Montante
Missões nacionais	6	800,00 €	4.800 €
Missões internacionais	6	2.000,00 €	12.000 €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			16.800 €

10.3. EQUIPAMENTO

Designação	Quantidade	Valor unitário	Montante
Computadores de alto desempenho	2	3.000,00 €	6.000 €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			6.000 €

10.4 ORÇAMENTO

Designação	Estimativa de custo	Financiamento externo	Financiamento LNEC
Recursos humanos	229.104,00 €		229.104 €
Despesas correntes	16.800,00 €		16.800 €
Equipamentos	6.000,00 €		6.000 €
Gastos gerais	233.664,00 €		233.664 €
Total	485.568 €	- €	485.568 €

Valor do financiamento externo proveniente de empresas públicas ou privadas (incluída em estudos de I&I ou por contrato)

Valor do financiamento destinado a processos internos inseridos em projetos de investigação

Se não existe financiamento externo nem vai ser

Se não existe financiamento externo, mas vai ser

Legenda

Grupo 91 - Investigador Coordenador (IC)

Grupo 92 - Investigador Principal c/habilitação (IP Ch)

Grupo 93 - Investigador Principal (IP)

Grupo 94 - Investigador Auxiliar (IA)

Grupo 95 - Assistente de Investigação (AI); Técnico Superior (TS)

Grupo 96 - Especialista de Informática (E); Técnico de Informática (TI)

Grupo 97 - Coordenador técnico (CT); Assistente técnico (AT)

Grupo 98 - Assistente operacional (AO)

Grupo 11 - Bolseiro LNEC - Investigação pós-doutoral (BPD)

Grupo 12 - Bolseiro LNEC - Investigação doutoramento (Antigo Regulamento LNEC de 2001/04/26); Bolseiro LNEC - investigação doutoramento (BI);

Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BII); Bolseiro LNEC - investigação licenciatura (BII)

Grupo 13 - Bolseiro LNEC - Iniciação à Investigação (BII)

Grupo 21 - Bolseiro de Projeto - Investigação pós-doutoral FCT/majoração LNEC (BIPD); Bolseiro de Projeto - Investigação doutoramento FCT/majoração LNEC (BI); Bolseiro de Projeto - Investigação doutoramento ou licenciados/mestres inscritos em cursos n/confere grau académico FCT (BI)

Grupo 22 - Bolseiro de Projeto - Investigação mestrado/mestrado integrado ou licenciados/mestres inscritos em cursos n/confere grau académico FCT (BI)

Grupo 23 - Bolseiro de Projeto - Iniciação à Investigação FCT (BII)

A.1 CONTRIBUIÇÃO PARA OS INDICADORES DA E2I

Indicador 1	<i>Financiamento externo relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	0%
Indicador 2	<i>Financiamento da atividade de investigação por empresas (públicas ou privadas) relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	0%
Indicador 3	<i>Valor do financiamento do LNEC relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	100%
Indicador 5	<i>Número de teses de doutoramento orientadas por investigador do projeto</i>	0,05
Indicador 6	<i>Número de dissertações de mestrado orientadas por investigador do projeto</i>	0,10
Indicador 7	<i>Investimento em equipamentos relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	1%
Indicador 9	<i>Valor do financiamento destinado a processos internos relativamente à estimativa de custo do projeto</i>	0%
Indicador 10	<i>Número de entidades externas parceiras do projeto</i>	2,00
Indicador 11	<i>Número de publicações científicas (e.g., artigos, livros ou capítulos de livros, comunicações, relatórios científicos) por investigador do projeto</i>	1,36
Indicador 13	<i>Número de documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão (Especificações LNEC, Informações Técnicas LNEC, guias, normas de aplicação, etc.) por investigador do projeto</i>	0,00
Indicador 14	<i>Número de eventos científicos e técnicos organizados ou coorganizados pelo LNEC por investigador do projeto</i>	0,10

A.2 CICLO DE INVESTIGAÇÃO

Motivação

Solicitações - Pedidos de estudo de entidades externas
Necessidades - Carências de conhecimento identificadas pelos investigadores

Temas e desafios

Tema principal

Construção

Desafios

Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído
Preservação e reabilitação do património construído, natural e cultural

Tema secundário

Alterações climáticas

Desafios

Adaptação e proteção de pessoas, infraestruturas e atividades às alterações climáticas
--

Tipo de resultados

Produtos e soluções
Informação e conhecimento

Valor acrescentado do projeto

Promoção da segurança
Melhoria da eficiência e do desempenho
Promoção da sustentabilidade

Conetividade

Comunicação de ciência e disseminação do conhecimento
Aplicação e replicabilidade dos resultados e produtos

Indexação ao contexto

Objetivos de desenvolvimento sustentável

Energias renováveis e acessíveis
Indústria, inovação e infraestruturas
Água potável e saneamento

Horizonte Europa

Segurança civil para a sociedade

Estratégia Portugal 2030

Descarbonização da sociedade e promoção da transição energética
Qualificação das instituições
Redução dos riscos e valorização dos ativos ambientais



www.lnec.pt

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