



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

STEPPDAM – UM PASSO EM FRENTE PARA A CAPACIDADE DE ANTECIPAR E EVITAR ROTURAS DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO

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



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

STEPDAM – UM PASSO EM FRENTE PARA A CAPACIDADE DE ANTECIPAR E EVITAR ROTURAS DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO

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

Projeto StepDam

Lisboa • julho 2026

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 290/2026 – DBB/NO

Título

STEPPDAM – UM PASSO EM FRENTE PARA A CAPACIDADE DE ANTECIPAR E EVITAR ROTURAS DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO

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

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

Maria Luísa Braga Farinha

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Observação

Nuno Monteiro Azevedo

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

Sérgio Oliveira

Investigador Principal, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

João Conde Silva

Investigador Auxiliar, Núcleo de Observação

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 290/2026

Proc. 0403/1102/24145, 0402/1102/2414501

STEPPDAM - UM PASSO EM FRENTE PARA A CAPACIDADE DE ANTECIPAR E EVITAR ROTURAS DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO

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

Resumo

O presente relatório descreve a atividade desenvolvida no âmbito do projeto *StepDam – Um passo em frente para a capacidade de antecipar e evitar roturas de fundações de barragens de betão*, desde o início, em janeiro de 2024, até ao final de março de 2026.

Palavras-chave: Modelação / Barragens de betão / Maciços rochosos de fundação / Interação comportamentos mecânico/hidráulico

STEPPDAM - A STEP FORWARD FOR THE ABILITY TO ANTICIPATE AND PREVENT FAILURES OF CONCRETE DAM FOUNDATIONS

Project progress report of P2I/LNEC 2021/2027

Abstract

This report describes the activities carried out within the scope of the project *StepDam – A step forward for the ability to anticipate and prevent failures of concrete dam foundations*, from its start in January 2024 to the end of March 2026.

Keywords: Modelling / Concrete dams / Rock mass foundations / Coupled hydraulic and mechanical interaction

Índice

1	Introdução	1
2	Descrição da atividade desenvolvida	3
2.1	Considerações iniciais	3
2.2	Atividade desenvolvida em cada tarefa	3
2.2.1	Revisão da literatura	3
2.2.2	Melhoria/otimização do modelo hidromecânico 3D – mais rápido	4
2.2.3	Melhoria/otimização do modelo hidromecânico 3D – padrões de descontinuidades mais complexos	4
2.2.4	Melhoria de modelos de previsão – calibração para aviso de possibilidade de rotura	5
2.2.5	Desenvolvimento de modelos constitutivos mais realistas	5
2.2.6	Ensaio <i>in situ</i> de afluência de água - aperfeiçoamento do conhecimento	6
2.2.7	Cenários de rotura acoplados – galgamento	6
2.2.8	Cenários de rotura acoplados – efeito de sismos	7
2.2.9	Transferência de informação/conhecimento	8
2.2.10	Gestão técnica do projeto	8
2.3	Atualização do cronograma do projeto	8
3	Divulgação de resultados e disseminação de conhecimentos	10
3.1	Aspectos gerais	10
3.2	Publicações	10
3.2.1	Artigos em revistas internacionais com arbitragem científica	10
3.2.2	Artigos em revistas nacionais com arbitragem científica	11
3.2.3	Capítulos de livros com arbitragem científica	11
3.2.4	Comunicações em encontros científicos internacionais	11
3.2.5	Comunicações em encontros científicos nacionais	13
3.2.6	Comunicação oral em encontro científico internacional	13
3.2.7	Relatórios	13
3.3	Participação em encontros científicos	14
3.3.1	Encontros científicos internacionais	14
3.3.2	Encontros científicos nacionais	15
3.4	Formação avançada	15
3.4.1	Teses de doutoramento	15
3.4.2	Dissertações de mestrado	16
3.5	Participação em júris de teses de doutoramento elaboradas no âmbito do projeto	16
3.6	Participação em atividades de organização de conferências	17
4	Financiamento externo	18
4.1	Candidaturas a financiamento de projetos IC&DT	18
4.2	Bolsas de doutoramento	18
4.3	Trabalhos por contrato	19
5	Recursos mobilizados e indicadores de projeto	20
6	Prémios e distinções	22
6.1	Prémio	22
6.2	Distinções	22
7	Considerações finais	23
	ANEXOS	25

ANEXO I Ficha de projeto StepDam	27
ANEXO II Ficha de autoavaliação de projeto	61

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Cronograma inicial do projeto	9
Quadro 2.2 – Atualização do cronograma do projeto	9
Quadro 5.1 – Tempo dedicado ao projeto dos investigadores responsáveis pelo projeto desde o início de 2024 até ao final de janeiro de 2026 (horas e % de afetação)	20
Quadro 5.2 – Indicadores de projeto previstos para 48 meses e realizados em 27 meses	21

1 | Introdução

O projeto *StepDam – Um passo em frente para a capacidade de antecipar e evitar roturas de fundações de barragens de betão* tem como objetivo principal contribuir para o reforço das competências do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) na área de barragens de betão, procurando assim manter o papel de destaque do LNEC no desenvolvimento de orientações e recomendações para o controlo de segurança deste tipo de obras. O projeto teve início em 1 de janeiro de 2024 e está a ser desenvolvido na sequência do projeto *DAMFA – Soluções de ponta para a avaliação sustentável das fundações de barragens de betão*, que decorreu de 9 de setembro de 2016 até ao final de setembro de 2023.

De acordo com as grandes linhas de atividade do LNEC (que incluem trabalhos de investigação programada, estudos e pareceres, apoio à indústria da construção e cooperação com universidades e laboratórios, em especial dos Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa (PALOP)), é fundamental que as ferramentas desenvolvidas e utilizadas pelos investigadores permitam estudos mais aprofundados do que as ferramentas comerciais atualmente disponíveis.

A equipa de investigação é composta pelos seguintes investigadores do Núcleo de Observação (NO) e do Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas (NMMR) do Departamento de Barragens de Betão (DBB) do LNEC: Maria Luísa Braga Farinha (NO), Nuno Monteiro Azevedo (NMMR), Sérgio Oliveira (NMMR) e João Conde Silva (NO).

Apresenta-se neste relatório uma descrição das atividades desenvolvidas no âmbito do projeto StepDam até ao final de março de 2026. São também apresentados os elementos de divulgação dos resultados, os indicadores de desempenho e a distribuição dos recursos humanos do LNEC. Em anexo apresenta-se a ficha inicial do projeto e a ficha de autoavaliação enviada ao Conselho Diretivo do LNEC em meados de março de 2026.

A atividade de I&D&I do projeto StepDam envolve as seguintes vertentes principais:

- desenvolvimento de modelos numéricos mais rápidos (com recurso a computação paralela) e aplicáveis a geometrias de fundação mais complexas;
- desenvolvimento de modelos que considerem a propagação de fratura sob carregamento hidráulico;
- realização de uma campanha de ensaios *in situ* que permita aprofundar o conhecimento do comportamento hidromecânico do conjunto barragem-fundação e a calibração dos parâmetros do modelo tridimensional, nomeadamente as propriedades hidráulicas;
- desenvolvimento de modelos de previsão que tenham em conta o comportamento hidromecânico (resposta observada e resposta numérica) e permitam previsões mais realistas e a identificação de alterações de comportamento; e

- produção de uma base de dados alargada de análises de rotura por galgamento e/ou ações sísmicas, que permitam a interação com outros investigadores, donos de obra e especialistas no domínio do controlo de segurança de barragens de betão.

No texto deste relatório referem-se os documentos incluídos na lista de referências do projeto StepDam, que se apresenta no final do Anexo I, numerados de 1 a 37, e os documentos publicados (ou em fase de revisão) no âmbito do projeto StepDam, no período a que se refere este relatório, que se encontram discriminados no capítulo 3. Estes documentos são identificados da seguinte forma: AI - artigo em revista internacional com arbitragem científica; AN - artigo em revista nacional com arbitragem científica; CL – capítulo de livro com arbitragem científica; EI - comunicação em encontro científico internacional; EN - comunicação em encontro científico nacional; CAI – comunicação oral em encontro científico internacional; e R – relatório.

2 | Descrição da atividade desenvolvida

2.1 Considerações iniciais

O plano de trabalhos previsto no projeto, que se apresenta no Anexo I, tem vindo a ser cumprido, na generalidade, tendo havido, no entanto, alguns reajustes normais num projeto em que participam diversos investigadores que estão simultaneamente envolvidos noutros trabalhos.

No âmbito do projeto e dentro da colaboração que existe com a NOVA.ID.FCT houve oportunidade de acolher no LNEC duas alunas para orientação de dissertações de mestrado, uma já concluída e outra a decorrer. Em colaboração com o Instituto Superior Técnico (IST) foram concluídas no LNEC duas teses de doutoramento e está outra a ser desenvolvida, em colaboração com o IST e com o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). A orientação de trabalhos de mestrado e de doutoramento, para além de permitir a transmissão de conhecimentos sobre modelação, verificação da segurança e a análise do comportamento de barragens de betão, permite também envolver os alunos no processo de verificação, validação e exploração dos modelos computacionais desenvolvidos.

Apesar de o projeto StepDam se focar essencialmente no desenvolvimento de ferramentas numéricas para análise de modelos tridimensionais (3D) com base em ferramentas previamente desenvolvidas e validadas para análise de modelos bidimensionais (2D), verificou-se a necessidade de continuar a desenvolver as ferramentas numéricas 2D, apropriadas para os estudos de barragens gravidade.

A atividade realizada no desenvolvimento de modelos foto-realistas pelo investigador Sérgio Oliveira, para apoio ao controlo da segurança de barragens de betão, permite o desenvolvimento de modelos de realidade virtual que facilitam as tarefas de inspeção visual com recurso a ambientes imersivos, com especial destaque para o comportamento hidromecânico (os modelos serão elaborados com base em imagens recolhidas durante a realização dos ensaios de campo).

Apresenta-se de seguida uma descrição da atividade desenvolvida desde o início de janeiro de 2024 até ao final de março de 2026, sendo referidos alguns dos documentos incluídos na lista de referências e alguns dos documentos publicados no âmbito do projeto.

2.2 Atividade desenvolvida em cada tarefa

2.2.1 Revisão da literatura

No início dos trabalhos foi efetuada uma pesquisa exaustiva de artigos e comunicações recentes que abordam os principais temas do projeto, nomeadamente: i) modelos hidromecânicos; ii) modelos de previsão; iii) ensaios *in situ* na fundação de barragens; iv) métodos de análise não linear; e, v) avaliação de cenários de rotura de barragens de betão e de alvenaria, sob condições de carregamento estático e dinâmico.

Nesta tarefa estava prevista a redação de um artigo de revisão, mas considerou-se mais adequado incluir análises críticas dos documentos consultados nas introduções dos artigos submetidos a revistas, internacionais e nacionais [AI01-AI08, AN01], bem como nas introduções de comunicações apresentadas em congressos [EI01-EI12, EN01, EN02, CAI01].

2.2.2 Melhoria/otimização do modelo hidromecânico 3D – mais rápido

Nesta segunda tarefa está previsto o desenvolvimento da versão paralela do modelo hidromecânico 3D descontinuo. A versão paralela basear-se-á nos algoritmos paralelos propostos em [8]. Tal exigirá o aperfeiçoamento da entrada, da saída, incluindo as bibliotecas de visualização, e do algoritmo explícito discreto/finito. Após a implementação da versão paralela utilizando bibliotecas MPI, será adotada uma abordagem *multi-threading*, a fim de tirar pleno proveito de uma arquitetura de *cluster multi-core*. Com a paralelização, tanto MPI como *multi-threading*, será possível fazer uma comparação entre os resultados numéricos que foram publicados e os novos resultados 3D para o mesmo nível de discretização. Os resultados serão comparados com os dados numéricos atualmente disponíveis.

No final desta tarefa será disponibilizado um modelo computacional mais rápido que o atual. Prevê-se a elaboração de um relatório sobre os algoritmos paralelos desenvolvidos, que servirá de base para um artigo a ser publicado numa revista científica internacional e em apresentações em conferências internacionais.

Esta atividade foi iniciada com a implementação de técnicas de *multi-threading* no módulo hidromecânico. Os trabalhos prosseguirão ao longo dos próximos 12 meses, com o objetivo de desenvolver uma ferramenta computacional com tempos de execução mais otimizados.

Nesta fase, foi tomada a decisão estratégica de adotar modelos tridimensionais ou bidimensionais simplificados. Esta abordagem facilitou a conclusão de vários estudos de investigação, apoiou a validação de abordagens de modelação hidromecânica e contribuiu para publicações em revistas internacionais [AI05, AI06, AI08] e atas de conferências [EI05, EI07, EI08, EI12].

2.2.3 Melhoria/otimização do modelo hidromecânico 3D – padrões de descontinuidades mais complexos

No âmbito do projeto DAMFA, anteriormente referido, foi desenvolvido um modelo hidromecânico baseado em elementos finitos de junta, que foi aplicado a distribuições simplificadas de descontinuidades [7, 28]. Para modelar padrões de geometria de descontinuidades complexas, é necessário incluir uma fase de pré-processamento em que os blocos que representam a fundação da barragem são discretizados com elementos finitos tetraédricos, garantindo que a representação triangular das superfícies que interagem seja totalmente compatível e que a interação entre os blocos possa ser representada apenas por facetas triangulares.

No final desta terceira tarefa do projeto estará disponível um módulo computacional mais robusto, que permitirá à equipa de investigação apresentar os principais resultados relativos à validação dos modelos de interação em pequenos deslocamentos. Os resultados publicados em artigos científicos

serão utilizados para a criação de uma base de dados sobre os resultados relativos às fundações de barragens, que será disponibilizada à comunidade científica especializada em barragens. Prevê-se a apresentação num artigo científico das validações dos resultados do modelo hidromecânico acoplado 3D, comparando os resultados com as abordagens simplificadas atualmente utilizadas.

Esta atividade foi parcialmente concluída. O módulo computacional pode agora ser aplicado à análise de cenários de rotura que envolvem sistemas de fundações mais complexos. O trabalho irá prosseguir, uma vez que foram identificadas várias áreas para desenvolvimento, permitindo a implementação futura de modelos de fundações mais avançados e precisos, incluindo o comportamento hidromecânico. Prevê-se que esta fase demore mais seis meses.

As capacidades atuais do módulo computacional permitem análises de estabilidade do sistema barragem-fundação de barragens arco-gravidade e de barragens abóbada. Foram realizados vários estudos de investigação para validar o modelo de interação de sistemas complexos, tendo os resultados sido publicados em revistas internacionais [AI05, AI06] e em conferências internacionais [EI05, EI08].

2.2.4 Melhoria de modelos de previsão – calibração para aviso de possibilidade de rotura

Os dados e os resultados da observação do comportamento de barragens são habitualmente analisados utilizando métodos estatísticos simplificados de interpretação quantitativa. Esta metodologia é de fácil aplicação e requer apenas a disponibilidade de um grande número de resultados de monitorização. Para superar as limitações relativas à aplicação destes métodos à análise de dados de monitorização de maciços rochosos de fundações de barragens de betão e alvenaria foram realizados trabalhos que permitiram estabelecer um procedimento para a análise dos caudais observados, que tem em conta o comportamento hidromecânico não linear das fundações das barragens [9]. A aplicação deste procedimento pré-estabelecido num grande número de barragens continua a ser necessária, a fim de estabelecer correlações de utilidade prática e tornar o procedimento amplamente aceite pela comunidade científica.

Esta atividade está atualmente em curso, estando a ser desenvolvidos modelos híbridos para interpretar o comportamento hidromecânico, com base nas metodologias propostas na investigação de doutoramento de Miguel Rodrigues, desenvolvidas no âmbito dos projetos DAMFA e StepDam. Foram publicados numa revista internacional e apresentados numa conferência internacional estudos que analisaram, do ponto de vista numérico, a influência da geometria da barragem e das condições da fundação na resposta hidromecânica [AI08, EI12]. Estas conclusões estão agora a ser incorporadas na ferramenta de previsão. Esta atividade irá prosseguir ao longo dos próximos nove meses.

2.2.5 Desenvolvimento de modelos constitutivos mais realistas

Na avaliação de cenários de rotura que envolvem o corpo da barragem já foram introduzidos conceitos de energia nos modelos constitutivos [27]. Nesta tarefa, a interação de contacto simplificada, válida na hipótese de pequenos deslocamentos, será comparada com a abordagem computacionalmente mais

exigente, baseada na modelação detalhada de partículas, e com o algoritmo híbrido adaptativo que será desenvolvido. A validação dos modelos constitutivos será realizada utilizando o modelo numérico descontínuo da barragem de Alqueva, que tem sido utilizado na avaliação da estabilidade da interface barragem/fundação através de um procedimento simplificado [20]. Será abordada a simulação da evolução dos indicadores de rotura da barragem.

Esta atividade está em fase de conclusão. Os modelos de dano foram implementados e validados com sucesso nos módulos 2D e 3D. Os modelos constitutivos foram validados no âmbito da dissertação de mestrado de Catarina Assunção Cervela Ramos Brás, tendo sido publicados artigos em revistas internacionais [AI01, AI03, AI04] e apresentados resultados em conferências internacionais [EI03, CAI01].

Com base na investigação realizada e na qualidade dos resultados obtidos, tanto para o modelo de dano como para o modelo híbrido, foi decidido prolongar esta atividade por mais seis meses, com início em 2027.

2.2.6 Ensaios *in situ* de afluência de água - aperfeiçoamento do conhecimento

Os ensaios *in situ* de afluência de água propostos por um dos membros da equipa [9, 10] permitem obter informação mais detalhada sobre o comportamento hidráulico da fundação, possibilitando a avaliação dos padrões de escoamento pelas discontinuidades da fundação da barragem. O conhecimento obtido é relevante para a identificação de possíveis modos de rotura e, assim, contribuir indiretamente para uma avaliação mais rigorosa da segurança da barragem.

Os ensaios a realizar permitem tirar conclusões sobre a profundidade a que as discontinuidades condutoras de água atravessam cada um dos furos testados, sobre a distribuição dos caudais e das pressões da água ao longo dos furos e sobre eventuais discontinuidades condutoras de água que ligam vários furos. As zonas de discontinuidades hidrologicamente dominantes têm de ser corretamente incluídas nos modelos. A ferramenta numérica integrada que foi desenvolvida no âmbito deste projeto será utilizada, recorrendo aos resultados dos ensaios e às características específicas do local das fundações da barragem.

Os ensaios de campo previstos nesta atividade ainda não foram realizados. Embora esta não seja uma atividade crítica para a conclusão do projeto, foi considerado importante mantê-la, esperando-se que comece no início de 2027.

Durante a fase de ensaios de campo será realizada uma campanha de aquisição de imagens com o objetivo de desenvolver um modelo foto realista, permitindo a realização de inspeções em ambientes imersivos, com especial destaque no comportamento hidromecânico.

2.2.7 Cenários de rotura acoplados – galgamento

A análise de estabilidade das fundações de barragens de betão sob carga estáticas é normalmente realizada utilizando um modelo de Mohr-Coulomb com coesão nula e resistência à tração nula. O fator

de segurança é obtido através da redução progressiva do ângulo de atrito e da realização de uma sequência de análises, até ocorrer a rotura [18, 20].

O trabalho a desenvolver nesta tarefa é importante para calibrar melhor a ferramenta de previsão, de modo a torná-la capaz de reconhecer o comportamento no início da rotura (pressões e deslocamentos). Espera-se que o projeto contribua para o desenvolvimento de diretrizes de projeto melhoradas e de práticas de monitorização e controlo de segurança relativas à avaliação da estabilidade considerando roturas acopladas em fundações de barragens de betão, incluindo conceitos de energia de fratura e metodologias de modelação incluindo a aplicação de cargas.

Os objetivos iniciais desta atividade foram parcialmente alcançados. Os módulos desenvolvidos permitem a análise de estabilidade de sistemas complexos de barragens e fundações. Foram publicados artigos em revistas internacionais [AI05, AI06] e apresentadas comunicações em conferências internacionais [EI05, EI08].

Com base na investigação realizada e nos resultados obtidos com modelos acoplados, decidiu-se prolongar esta atividade por mais 12 meses. A base de dados de resultados que se pretende construir servirá de suporte à calibração da ferramenta híbrida de interpretação quantitativa.

2.2.8 Cenários de rotura acoplados – efeito de sismos

O ponto de partida desta atividade é o modelo hidromecânico acoplado, para pequenos e grandes deslocamentos, a desenvolver no âmbito do projeto. Conforme mencionado anteriormente, a análise do comportamento para ações sísmicas [7,30], através de procedimentos explícitos, é muito demorada e, por esse motivo, os procedimentos paralelos previstos na tarefa 2 serão importantes para reduzir os tempos de cálculo nos estudos de análise sísmica.

Esta atividade, relativa aos cenários de rotura acoplados sob ação sísmica, focou-se no desenvolvimento, atualização e aplicação de ferramentas numéricas avançadas, tendo-se iniciado do final de 2024.

Foram desenvolvidos e atualizados programas computacionais de base, nomeadamente no domínio da identificação modal e da análise dinâmica de estruturas, bem como efetuadas melhorias em códigos de elementos finitos para análise não linear de sistemas barragem-fundação-albufeira. Estes desenvolvimentos permitiram criar uma base metodológica consistente para posterior simulação de cenários sísmicos com comportamento acoplado hidromecânico.

A aplicação destas ferramentas a casos de estudo relevantes incluiu a calibração de modelos numéricos com base em dados de barragens existentes, bem como a interpretação do seu comportamento observado, em coordenação com atividades em curso no LNEC [R01-R03]. Este processo de calibração revelou-se essencial para garantir a fiabilidade das simulações de resposta sísmica e dos mecanismos de rotura associados.

Os resultados obtidos evidenciam que a consideração de efeitos dinâmicos, em conjunto com o comportamento não linear, é determinante para a correta identificação de cenários de rotura. Em particular, verificou-se que a resposta sísmica pode induzir degradação localizada da rigidez, alteração

das condições de contacto na interface barragem-fundação, o que pode influenciar a evolução de trajetórias preferenciais de percolação, aspetos que não são captados por abordagens simplificadas.

Paralelamente, o trabalho desenvolvido contribuiu para a consolidação de competências avançadas em modelação numérica e interpretação de resultados, tendo sido disseminado através de publicações científicas [AI07, AN01] e comunicações apresentadas em eventos técnico-científicos na área da engenharia de barragens [EI01, EI02, EI04, EI06, EI09, EI11] e nacionais [EN01, EN02].

2.2.9 Transferência de informação/conhecimento

O principal objetivo desta atividade é investir na implementação de estratégias destinadas a promover e garantir a divulgação e a transferência de conhecimento. Está dividida em três tarefas: i) Desenvolvimento da página web do projeto, da base de dados, do programa de acesso e do manual; ii) Apresentação de comunicações em conferências e encontros científicos e publicação em revistas internacionais; e iii) Simpósio científico sobre fundações de barragens de betão. O sucesso desta tarefa depende dos resultados obtidos em todas as tarefas anteriores.

Esta atividade prosseguirá ao longo de toda a duração do projeto. Até ao final de 2027 será desenvolvido uma página web do projeto para apoiar a sua divulgação. Pretende-se também organizar um simpósio científico em 2028. Tem sido feito um esforço grande na atividade editorial e na promoção do trabalho através da participação em encontros científicos internacionais e nacionais.

2.2.10 Gestão técnica do projeto

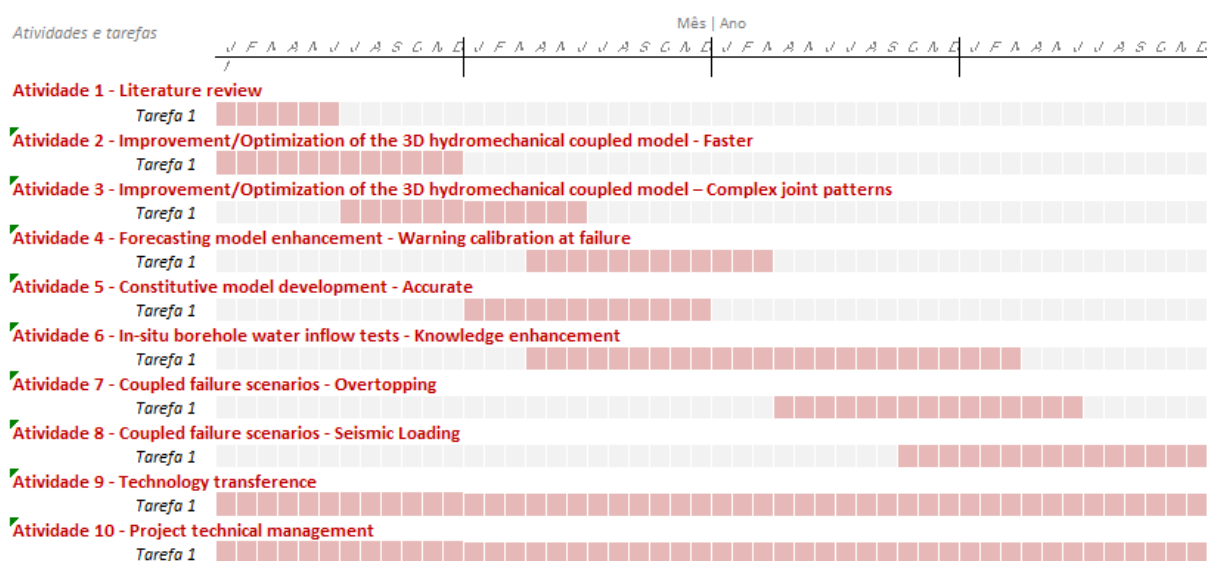
O projeto tem sido gerido pelos investigadores Maria Luísa Braga Farinha e Nuno Monteiro Azevedo. Está a ser preparada uma página web com o objetivo de promover as ferramentas numéricas e apresentar os principais resultados que serão obtidos no âmbito do projeto. Esta página será atualizada à medida que o projeto evoluir. Estão a ser preparadas palestras e seminários de curta duração, a apresentar em universidades portuguesas, com o objetivo de destacar a relevância da avaliação da segurança das fundações de barragens de betão para o meio técnico e para a sociedade, de forma a reduzir os riscos.

Esta é uma atividade que continuará a ser realizada ao longo da duração do projeto.

2.3 Atualização do cronograma do projeto

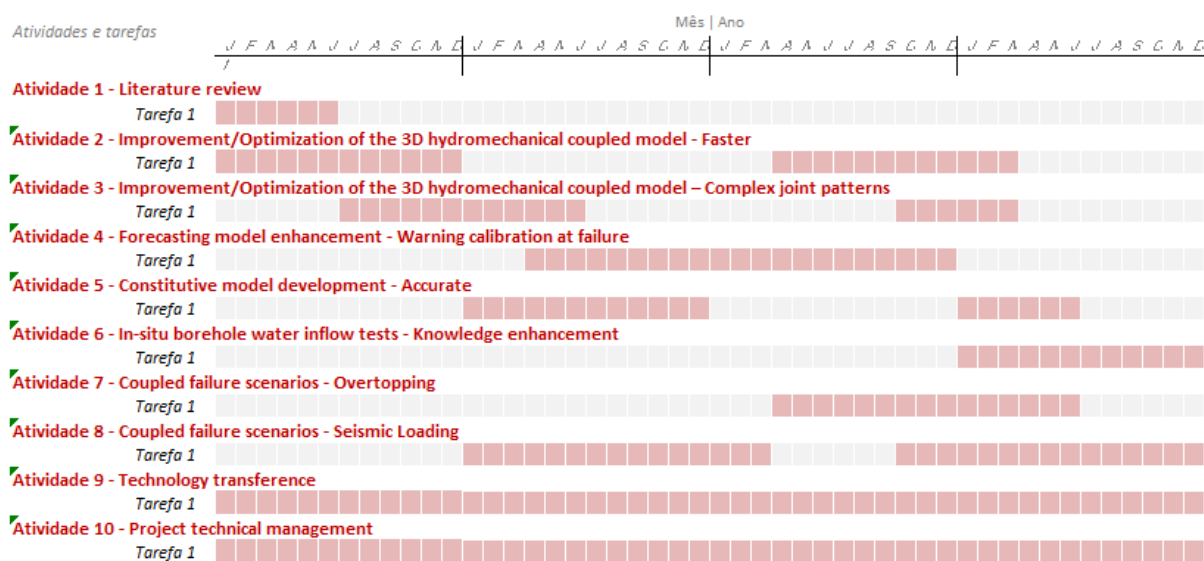
Tendo em consideração a análise da atividade desenvolvida em cada tarefa, apresentada nos subcapítulos anteriores, considera-se que a reformulação do projeto envolve apenas uma atualização do cronograma, como se refere na ficha de autoavaliação do projeto que se apresenta no Anexo II. Nos Quadros 2.1 e 2.2 apresentam-se o cronograma inicial do projeto e a sua atualização, respetivamente.

Quadro 2.1 – Cronograma inicial do projeto



Quadro 2.2 – Atualização do cronograma do projeto

3.2 ATUALIZAÇÃO DO CRONOGRAMA



3 | Divulgação de resultados e disseminação de conhecimentos

3.1 Aspetos gerais

A transmissão de conhecimentos à comunidade técnico-científica foi feita não só através da publicação de artigos em revistas, da apresentação de comunicações em congressos e da elaboração de relatórios, mas também através da orientação de dissertações de mestrado e de teses de doutoramento.

Até ao final de março de 2026 foram publicados nove artigos em revista, sendo oito em revistas internacionais e um numa revista nacional, um capítulo de livro e um relatório. Neste período foram também apresentadas doze comunicações em congressos internacionais, duas comunicações em congressos nacionais e uma comunicação oral em encontro científico internacional. Relativamente às atividades de formação avançada, foram concluídas quatro dissertações de mestrado e duas teses de doutoramento, e estão em elaboração uma dissertação de mestrado e uma tese de doutoramento.

Apresentam-se, de seguida, por ordem cronológica inversa, os documentos publicados no âmbito do projeto StepDam. Alguns destes trabalhos foram apresentados em eventos científicos internacionais e nacionais. Apresenta-se também informação relativa às teses de doutoramento e às dissertações de mestrado que foram desenvolvidas no âmbito do projeto e indicam-se as participações de investigadores da equipa em júris de dissertações de mestrado e de teses de doutoramento. São ainda indicadas as colaborações nas atividades de organização de conferências.

3.2 Publicações

3.2.1 Artigos em revistas internacionais com arbitragem científica

[AI08] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Oliveira, S., 2026 - *Effects of geometry, joint properties, and deterioration scenarios on the hydromechanical response of gravity dams*. Appl. Mech, 7(1), 8. (DOI: 10.3390/applmech7010008).

[AI07] Alegre, A.; Oliveira, S.; Proença, J.; Mendes, P.; Carvalho, E., 2025 - *A finite element formulation for true coupled model analysis and nonlinear seismic modeling of dam-reservoir-foundation systems: Application to an arch dam and validation*. Infrastructures, 10(8), 193. (DOI: 10.3390/infrastructures10080193).

[AI06] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Oliveira, S., 2025 - *A coupled hydromechanical model including fracture propagation along the dam foundation interface for gravity dam's stability assessment*. Soils and Rocks, 48(4). Special Issue: 18th ECSMGE, Lisbon 2024 (Invited Editors: A.A.S. Correia, J. Mateus de Brito, C. Ferreira) (DOI: 10.28927/SR.2025.002125).

- [AI05] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Oliveira, S., 2025 - *Safety assessment of concrete gravity dams: hydromechanical coupling and fracture propagation*. Geosciences, 15(4), 149 (DOI: 10.3390/geosciences15040149).
- [AI04] Monteiro Azevedo, N.; Cismaşiu, I.; Pinho, F.F.S.; Neves, F., 2025 - *Numerical modeling of reinforcement solutions in traditional stone masonry using a particle model*. Buildings, 15(7), 1058 (DOI: 10.3390/buildings15071058).
- [AI03] Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B.; Oliveira, S., 2025 - *A novel 3D reinforced particle model for reinforced concrete fracture assessment: Formulation and validation*. Applied Mechanics, 6(1), 2 (DOI: 10.3390/applmech6010002).
- [AI02] Trindade, N.; Leitão, P.; Gonçalves, D.; Oliveira, S.; Ferreira, A., 2024 - *The role of situatedness in immersive dam visualization: Comparing proxied with immediate approaches*. Computers, 13(2), 35 (Doi: 10.3390/computers13020035).
- [AI01] Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B.; Oliveira, S., 2024 - *Assessment of contact laws accounting for softening in 3D rigid concrete particle models*. Buildings, 14(3), 801 (DOI: 10.3390/buildings14030801).

3.2.2 Artigos em revistas nacionais com arbitragem científica

- [AN01] Oliveira, S.; Alegre, A.; Ramos, R.; Proença, P.; Mendes, P., 2024 - *Resposta sísmica não-linear de uma barragem abóbada com 300 m de altura. Avaliação da segurança estrutural. (SBP e SMP) para diferentes cotas de água*. RPEE | Série III | nº 26 | novembro de 2024.

3.2.3 Capítulos de livros com arbitragem científica

- [CL01] Trindade, N.; Ferreira, A.; Gonçalves, D.; Oliveira, S., 2025 - *The future of structural health monitoring with extended reality* (Chapter 30). In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Digital Transformation in the Construction Industry, Woodhead Publishing; ISBN 9780443298615; Elsevier, Woodhead Publishing, 1st Ed. May 22, 2025, pages 593-620. DOI: 10.1016/B978-0-443-29861-5.00030-5 (Doi: 10.1016/B978-0-443-29861-5.00030-5)

3.2.4 Comunicações em encontros científicos internacionais

- [EI12] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Oliveira, S., 2025 - *Influence of rock mass hydraulic properties and jointing pattern on hydromechanical behaviour of gravity dams*, Proceedings of the Hydro 2025 Conference, outubro 2025, Tessalónica, Grécia.
- [EI11] Ramos, R.; Oliveira, S.; Alegre, A.; Proença, J.; Mendes, P., 2025 - *Seismic behaviour of an arch dam using a 3DFE model. Study on the influence of a dam body horizontal crack*, Proceedings of the XI International Conference on Experimental

Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES 2025, julho 2025, Porto.

- [EI10] Mendes, P.; Carvalho, E.; Matsinhe, B.; Ramos, R.; Proença, J.; Alegre, A.; Oliveira, S., 2025 - *Cahora Bassa Dam SSHM System: Initial configuration installed in 2010, and upgrades implemented in 2013 and 2024*. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. EVACES 2025. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 676. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-96114-4_24
- [EI09] Oliveira, S.; Ramos, R.; Alegre, A.; Proença, J.; Mendes, P.; Silva, J.; Serra, C., 2025 - *A study on the influence of the reservoir water level on the seismic performance of a large double curvature arch dam*, Proceedings of the 5th International Dam World Conference, DAM WORLD 2025, abril 2025, Lisboa.
- [EI08] Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B.; Oliveira, S., 2025 - *Stability analysis of concrete dam foundations following a hybrid discrete element/finite element approach*, Proceedings of the 5th International Dam World Conference, DAM WORLD 2025, abril 2025, Lisboa.
- [EI07] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Oliveira, S., 2025 - *Assessment of concrete dam foundation discharges for different reservoir levels following a hydromechanical discrete model*, Proceedings of the 5th International Dam World Conference, DAM WORLD 2025, 13-17 de abril 2025, Lisboa.
- [EI06] Oliveira, S.; Alegre, A.; Mendes, P.; Carvalho, E.; Matsinhe, B.; Proença, J.; Ramos, R., 2024 - *State-space FE approach for modal analysis of concrete dams. Deterioration assessment of Cahora Bassa dam*. International Symposium on Dams and Earthquakes – 7th Meeting of the EWG. 12-13 de setembro, Atenas, Grécia.
- [EI05] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Oliveira, S., 2024 - *Safety assessment of a gravity dam using a hydromechanical model: fracture propagation at the dam/foundation interface*, Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 18th ECSMGE 2024, agosto 2024, Lisboa.
- [EI04] Alegre, A.; Oliveira, S.; Mendes, P.; Proença, J.; Ramos, R., 2024 - *Non-linear seismic response of an ultra-high arch dam. ETA based safety assessment*. 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024), 30 junho- 5 julho, Milão, Itália.
- [EI03] Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B.; Oliveira, S., 2024 - *A 3D particle model for reinforced concrete fracture analysis*, Proceedings of the 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS Congress 2024, junho 2024, Lisboa.
- [EI02] Oliveira, S.; Alegre, A.; Ramos, R.; Serra, C.; Silva, J.; Proença, J.M.; Mendes, P., 2024 - *Seismic performance assessment of Bouçã arch dam. Non-linear analysis considering joint movements and concrete damage under tension and*

compression, Proceedings of the 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS Congress 2024, 3-7 junho 2024, Lisboa.

[EI01] Oliveira, S.; Alegre, A.; Mendes, P.; Proença, J.; Ramos, R., 2024 - *Modal-based SHM of Cabril dam. Exploring vibration data acquired over the last 15 years*. 10th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC) 2024. 21-24 maio. Nápoles, Itália.

3.2.5 Comunicações em encontros científicos nacionais

[EN02] Oliveira, S.; Alegre, A.; Ramos, R.; Proença, J.; Mendes, P., 2024 - *Estudo da resposta sísmica não-linear da barragem da Bouçã*. Encontro Nacional de Betão Estrutural 2024, BE2024., 13-15 de novembro, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[EN01] Oliveira, S.; Alegre, A.; Ramos, R.; Mendes, P.; Proença, J., 2024 - *Resposta sísmica não-linear de uma barragem abóbada com 300m de altura. Avaliação da segurança estrutural (SBP e SMP) para diferentes cotas de água*. 13º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica (Sísmica 2024). 17-19 de abril, Guimarães, Portugal.

3.2.6 Comunicação oral em encontro científico internacional

[CAI01] Monteiro Azevedo, N., Cismasiu, I., Pinho, F., Farinha, M.L.B., 2015 - *Masonry dam structural assessment using discrete element-based particle modelling*. Proceedings of the IX International Conference on Particle-Based Methods Fundamentals and Applications, Barcelona, outubro 2025 (Abstract and Presentation).

3.2.7 Relatórios

[R03] Oliveira, S.; Rodrigues, M.; Hernâni, B., 2024 - *Barragem da Aguieira. Análise do comportamento estrutural*. Trabalho realizado para a EDP. Relatório. LNEC, DBB/NMMR, Proc. 0403/121/05397, 0402/121/0539701. LNEC, Lisboa. (em fase de revisão).

[R02] Oliveira, S.; Ramos, R.; Serra, C.; Silva, J.; Azevedo, N., 2026 - *Barragem da Bouçã. Análise do comportamento sísmico e verificação da segurança para o SBP e SMP*. Trabalho realizado para a EDP. Relatório. Proc. 0403/121/05397, 0402/121/0539701. LNEC, Lisboa (em fase de revisão).

[R01] Oliveira, S.; Alegre, A.; Santos, C.; Reis, J., 2024 - *Barragem do Cabril. Monitorização de vibrações (2008-2023) e verificação da segurança sísmica para o SBP e SMP*. Trabalho realizado para a EDP. Rel 118/2024 – DBB/NMMR. Proc. 0403/1201/00234, 0402/1201/0023401. LNEC Lisboa.

3.3 Participação em encontros científicos

3.3.1 Encontros científicos internacionais

Maria Luísa Braga Farinha participou em:

- Hydro 2025 Conference, que decorreu em Tessalónica, Grécia, de 22 a 24 de outubro de 2025, onde apresentou a comunicação [EI12].
- 5th International Dam World Conference, que decorreu em Lisboa, em Portugal, de 14 a 16 de abril de 2025, onde apresentou a comunicação [EI07].
- XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - 18th ECSMGE 2024, que decorreu em Lisboa, de 26 a 30 de agosto de 2024, onde apresentou a comunicação [EI05].

Nuno Monteiro Azevedo participou em:

- IX International Conference on Particle-Based Methods Fundamentals and Applications, PARTICLES 2025, que decorreu em Barcelona, Espanha, de 20 a 22 de outubro de 2025, onde apresentou a comunicação oral [CAI01].
- 5th International Dam World Conference, que decorreu em Lisboa, em Portugal, de 14 a 16 de abril de 2025, onde apresentou a comunicação [EI08].
- 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS Congress 2024, que decorreu em Lisboa, de 3 a 7 de junho de 2024, onde apresentou a comunicação [EI03].

Sérgio Oliveira participou em:

- XI International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES 2025, que decorreu no Porto, de 2 a 4 de julho de 2025, onde participou como organizador de uma sessão especial intitulada “Seismic Safety Assessment and Long-term Structural Health Monitoring of Large Dams”.
- 5th International Dam World Conference, que decorreu em Lisboa, em Portugal, de 14 a 16 de abril de 2025, onde apresentou a comunicação [EI09].
- International Symposium on Dams and Earthquakes – 7th Meeting of the EWG, que decorreu em Atenas, Grécia, de 12 a 13 de setembro de 2024, onde apresentou a comunicação [EI06].
- 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024), 30 de Junho a 5 Julho de 2024, Milão, Itália onde apresentou a comunicação [EI04].
- 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS Congress 2024, que decorreu em Lisboa, de 3 a 7 de junho de 2024, onde apresentou a comunicação [EI02].

- 10th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC) 2024, que decorreu em Nápoles, Itália, de 21 a 24 de maio de 2024, onde apresentou a comunicação [EI01].

Rafael Ramos participou em:

- XI International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES 2025, que decorreu no Porto, de 2 a 4 de julho de 2025, onde apresentou as comunicações [EI10, EI11].
- 5th International Dam World Conference, que decorreu em Lisboa, em Portugal, de 14 a 16 de abril de 2025, onde apresentou a comunicação [EI09].
- 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS Congress 2024, que decorreu em Lisboa, de 3 a 7 de junho de 2024, onde apresentou a comunicação [EI02].

3.3.2 Encontros científicos nacionais

Rafael Ramos: participou no Encontro Nacional Betão Estrutural 2024, BE2024, que decorreu de 13 a 15 de novembro, no Porto, onde apresentou a comunicação [EN02].

3.4 Formação avançada

3.4.1 Teses de doutoramento

- Rafael Manuel da Silva Ramos: aluno de doutoramento do IST, com acolhimento no LNEC, está a desenvolver a sua tese com orientação do investigador Sérgio Oliveira e com coorientação dos Professores Jorge Proença (IST) e Paulo Mendes (ISEL). O trabalho de doutoramento tem como tema de investigação: *Avaliação da segurança sísmica de barragens de betão. Modelação numérica considerando fendas, juntas de contração e danos no betão / Seismic Safety Assessment of Concrete Dams. Numerical modelling considering cracks, contraction joints and concrete damage*. A apresentação pública do plano de tese, perante a CAT, decorreu em 16 de janeiro de 2026.
- Nuno Filipe Verdelho Trindade: bolseiro de doutoramento FCT com acolhimento no LNEC, terminou em 1 de julho de 2025 o Programa de Doutoramento em Engenharia Informática e de Computadores do IST, com a tese *Análise imersiva no controlo de segurança de barragens / Immersive Analytics in Dam Safety Control*, orientada pelos Professores Alfredo Ferreira Júnior e Daniel Gonçalves (IST-INESC) e pelo investigador Sérgio Oliveira. O acolhimento no LNEC terminou em 30 de junho de 2025.
- Miguel Ângelo da Silva Rodrigues: bolseiro de doutoramento com acolhimento no LNEC e bolsa de projeto FCT, terminou em 27 de janeiro de 2025 o Programa Doutoral em Engenharia Civil do IST, com a tese *“Development of hybrid HST-FE models for effects separation and deterioration assessment of concrete dams”*, orientada pelo investigador Sérgio

Oliveira, do LNEC, e pelo Professor Jorge Proença, do IST. O acolhimento no LNEC terminou em 30 de abril de 2025.

3.4.2 Dissertações de mestrado

- Maria Margarida da Rocha Marques: dissertação de mestrado realizada ao obrigo do convénio entre o LNEC e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), com o tema *Estudo do comportamento estrutural de paredes de alvenaria antiga com modelo misto elementos finitos/discretos*, orientada pela Professora Ildi Cismasiu, da FCT-UNL, e pelo investigador Nuno Monteiro Azevedo. O acolhimento no LNEC iniciou-se em abril de 2025 e ainda está a decorrer.
- Pedro Dias Rodrigues: dissertação de mestrado realizada no IST, com o tema *Dam monitoring dashboard*, orientada pelo Professor Alfredo Ferreira, do IST, e pelo investigador Sérgio Oliveira. A dissertação foi aprovada em sessão pública em outubro de 2025.
- Tomás Mota Pinto: dissertação de mestrado realizada no IST, com o tema *Immersive simulation of flooding during dam peak discharges*, orientada pelo Professor Alfredo Ferreira (IST) e pelo investigador Sérgio Oliveira. A dissertação foi aprovada em sessão pública em fevereiro de 2025.
- Tomás Filipe Santiago Mateus Soares: dissertação de mestrado realizada no IST, com o tema *Immersive exploration of dam galleries*, orientada pelo Professor Alfredo Ferreira (IST) e pelo investigador Sérgio Oliveira. A dissertação foi aprovada em sessão pública em fevereiro de 2025.
- Catarina Assunção Cervela Ramos Brás: dissertação de mestrado realizada ao obrigo do convénio entre o LNEC e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), com o tema *Modelação de ensaios experimentais de compressão uniaxial em modelos de alvenaria de pedra tradicional através de modelos de partículas*, orientada pela Professora Ildi Cismasiu, da FCT-UNL, e pelo investigador Nuno Monteiro Azevedo. O acolhimento no LNEC decorreu de abril de 2024 ao final de outubro de 2024. A dissertação foi aprovada em sessão pública em dezembro de 2024.

3.5 Participação em júris de teses de doutoramento elaboradas no âmbito do projeto

- Nuno Monteiro Azevedo, integra a Comissão de Acompanhamento de Tese (CAT) do aluno de Doutoramento Rafael Ramos, do IST, que desenvolve a sua tese com orientação do investigador Sérgio Oliveira e com coorientação dos Professores Jorge Proença (IST) e Paulo Mendes (ISEL).
- Maria Luísa Braga Farinha, membro do júri, como relatora e arguente, nas provas de Doutoramento em Engenharia Civil de Miguel Ângelo da Silva Rodrigues, com o título

“Development of hybrid HST-FE models for effects separation and deterioration assessment of concrete dams” (IST, Lisboa, 27 de janeiro de 2025).

3.6 Participação em atividades de organização de conferências

Maria Luísa Braga Farinha:

- Foi *Chairman* na Parallel Session 17 (T1 Concrete and Masonry Dams | ST7 Instrumentation and Monitoring), do Dam World 2025, que decorreu de 14 a 16 de abril de 2025, em Lisboa.
- Pertenceu ao comité de revisores da XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE 2024), que decorreu de 26 a 30 de agosto de 2025, em Lisboa.

Nuno Monteiro Azevedo:

- Foi *Chairman* na Parallel Session 23 (T1 Concrete and Masonry Dams) do Dam World 2025, que decorreu de 14 a 16 de abril de 2025, em Lisboa.
- Pertenceu ao comité de revisores da XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE 2024), que decorreu de 26 a 30 de agosto de 2025, em Lisboa.

Sérgio Oliveira:

- Participou como organizador de uma sessão especial intitulada “Seismic Safety Assessment and Long-term Structural Health Monitoring of Large Dams” na conferência EVACES2025, que decorreu de 2 a 4 de julho de 2025, no Porto.
- Foi *Chairman* na Parallel Session 21 (T3 ST6 Seismic Analysis), do Dam World 2025, que decorreu de 14 a 16 de abril de 2025, em Lisboa.

4 | Financiamento externo

4.1 Candidaturas a financiamento de projetos IC&DT

Com o objetivo de obter financiamento externo para a execução do projeto *StepDam* foi apresentada, em março de 2024, uma candidatura no âmbito do concurso Projetos de IC&DT em todos os Domínios Científicos, promovido pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). O projeto submetido tinha o título “Coupled models for dam-reservoir-foundation failure assessment. Protection against extreme events” e o acrónimo *DamS4XEvents*.

No projeto *DamS4XEvents* estava previsto desenvolver parte das tarefas do projeto *StepDam*, nomeadamente a ferramenta numérica 3D iniciada no âmbito do projeto P2I DAMFA (2016-2023), as campanhas de ensaios in-situ para aprofundar a compreensão do comportamento hidromecânico do conjunto barragem-fundação e o desenvolvimento de modelos de previsão tendo em consideração o comportamento hidromecânico. Estes modelos de previsão utilizam não só os dados da monitorização, mas também os resultados numéricos, de modo a obter modelos mais realistas.

A candidatura foi promovida pelo LNEC, que foi a única instituição participante, e tinha como responsável a Investigadora Maria Luísa Braga Farinha e como co investigador responsável o investigador Nuno Monteiro Azevedo. O projeto *DamS4XEvents* foi considerado elegível, com uma classificação média de 3,8 (3,50 na qualidade do projeto, 4,00 na capacidade de execução e 4,00 no impacto do projeto), mas não atingiu o limiar mínimo para financiamento.

Em março de 2026 foi submetida uma nova candidatura ao concurso de projetos de IC&DT em todos os domínios científicos 2025, promovido pela FCT, elaborada com base na candidatura anterior. O projeto tem o título “Safe dams for extreme events” e o acrónimo *SafeDamS4XE*, sendo Maria Luísa Braga Farinha a investigadora responsável.

4.2 Bolsas de doutoramento

O orçamento do projeto *StepDam*, aprovado pelo CD do LNEC, destina-se essencialmente a financiar os recursos humanos envolvidos. Salienta-se, no entanto, que no âmbito do projeto foi desenvolvido trabalho por dois alunos a quem foram concedidas as seguintes bolsas de estudo:

- Bolsa de doutoramento com a referência 2023.00414.BD (desde 2 de janeiro de 2024), financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), concedida ao bolseiro de doutoramento com acolhimento no LNEC (DBB/NMMR) Rafael Manuel da Silva Ramos.
- Bolsa de doutoramento com a referência 2021.07266.BD, financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), concedida ao bolseiro de doutoramento com acolhimento no LNEC (DBB/NMMR) Nuno Filipe Verdelho Trindade.

4.3 Trabalhos por contrato

O projeto contribui para a definição de melhores orientações de projeto e práticas de monitorização e controlo de segurança no que respeita, em particular, à avaliação da estabilidade das fundações de barragens de betão, incluindo o corpo da barragem, sob cargas estáticas e dinâmicas. Durante este primeiro período de vigência do projeto aplicaram-se os modelos desenvolvidos na monitorização de vibrações e verificação da segurança sísmica para o sismo base de projeto (SBP) e sismo máximo de projeto (SMP) da barragem do Cabril [R01], na análise do comportamento sísmico e verificação da segurança para o SBP e SMP da barragem da Bouça [R02], e na análise do comportamento estrutural da barragem da Aguieira [R03].

Os modelos computacionais e as metodologias desenvolvidas e validadas no âmbito da atividade IC&DT podem ser adotadas em estudos e pareceres do LNEC, com comprovada vantagem sobre as ferramentas atualmente utilizadas, nomeadamente:

- Análise da rotura pela superfície de inserção, incluindo o comportamento não linear do betão e da interface betão/rocha;
- Análise da rotura de barragens de betão e de alvenaria para cenários de galgamento, incluindo o conjunto barragem/fundação;
- Análise da rotura de barragens de betão e de alvenaria para o sismo máximo de projeto, adotando modelos em grandes deslocamentos somente nas zonas com maior não linearidade;
- Análise não linear de estruturas sob ações estáticas e dinâmicas.

5 | Recursos mobilizados e indicadores de projeto

A equipa de projeto envolve quatro investigadores do LNEC. No Quadro 5.1 apresenta-se o número de horas e as percentagens de tempo dedicadas ao projeto por cada um dos investigadores responsáveis pelo projeto, desde o início de 2024 até ao final de janeiro de 2026, num total de 25 meses. Os investigadores João Silva e Sérgio Oliveira não afetaram horas de dedicação ao projeto, tendo, no entanto, realizado atividades no âmbito de outros projetos que contribuíram simultaneamente para o presente projeto, como se pode verificar pelo seu envolvimento em orientações de dissertações de mestrado e de teses de doutoramento e/ou pela lista de trabalhos apresentados.

Quadro 5.1 – Tempo dedicado ao projeto dos investigadores responsáveis pelo projeto desde o início de 2024 até ao final de janeiro de 2026 (horas e % de afetação)

Nome	2024	2025	Jan 2026
Maria Luísa Braga Farinha	700 (46%)	592 (38%)	77 (55%)
Nuno Monteiro Azevedo	284 (19%)	414 (27%)	45 (32%)

No Quadro 5.2 apresentam-se os indicadores de projeto previstos para um horizonte de projeto de 48 meses e os indicadores realizados desde o início do projeto até ao final de março de 2026 (27 meses). Da análise do Quadro 5.3 verifica-se que o projeto está a decorrer de forma satisfatória.

Quadro 5.2 – Indicadores de projeto previstos para 48 meses e realizados em 27 meses

Descrição	Previstos	Realizados
Livros	1	0
Capítulos de livro	1	1
Artigos em revista internacional	6	8
Artigos em revista nacional	4	1
Comunicações em encontros científicos internacionais	12	12
Comunicações em encontros científicos nacionais	4	2
Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados	1	0
Teses de doutoramento	1	2
Dissertações de mestrado	6	4
Informações técnicas LNEC	2	0
Outros documentos	2	1
Aplicações computacionais	1	0
Webpage- StepDam	1	0
Seminário	1	0

6 | Prémios e distinções

6.1 Prémio

A comunicação [EI08] apresentada no DAM WORLD 2025 recebeu o prémio BEST ACADEMIC-SCIENTIFIC PAPER AWARD, atribuído pelo Comité Científico da conferência. A comunicação foi distinguida como uma das dez melhores comunicações de âmbito científico apresentadas, e foi seleccionada para ser publicada na revista *Infrastructures*, depois de desenvolvida para o formato de artigo.

Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B.; Oliveira, S., 2025 - *Stability analysis of concrete dam foundations following a hybrid discrete element/finite element approach*, Proceedings of the 5th International Dam World Conference, DAM WORLD 2025, abril 2025, Lisboa.

6.2 Distinções

O artigo publicado na revista Applied Mechanics [AI03] foi seleccionado para ser destacado na capa da revista como *cover story* e para ser promovido *on-line* com um *banner*:

Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B.; Oliveira, S., 2025 - *A novel 3D reinforced particle model for reinforced concrete fracture assessment: Formulation and validation*. Applied Mechanics, 6(1), 2 (DOI: 10.3390/applmech6010002).

O artigo publicado na revista Applied Mechanics [AI08] foi seleccionado para ser apresentado *on-line* com um *graphical abstract* e para ser promovido *on-line* com um *banner*:

Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Oliveira, S., 2026 - *Effects of geometry, joint properties, and deterioration scenarios on the hydromechanical response of gravity dams*. Appl. Mech, 7(1), 8. (DOI: 10.3390/applmech7010008).

7 | Considerações finais

Os trabalhos de desenvolvimento do projeto StepDam têm decorrido de forma adequada, salientando-se a colaboração entre os investigadores dos dois núcleos do DBB envolvidos (Núcleo de Observação e Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas). Realça-se ainda a colaboração, no período a que se refere este relatório, com: i) a NOVA.ID.FCT, que possibilitou o acolhimento no LNEC de duas alunas para orientação de dissertações de mestrado; ii) o IST, que possibilitou o acolhimento no LNEC de um aluno de doutoramento, com os trabalhos já concluídos; e iii) o IST e o ISEL, que possibilitou o acolhimento no LNEC de um aluno de doutoramento, cujos trabalhos estão a decorrer.

Dos estudos realizados no âmbito do projeto StepDam resultaram várias publicações que ajudam a reforçar as competências do LNEC na área de barragens de betão, contribuindo-se assim para a manutenção do papel de destaque do LNEC no controlo de segurança deste tipo de obras (como consultor da Autoridade e no apoio aos donos de obra) e no desenvolvimento técnico-científico do país na área da engenharia de barragens (através da orientação científica de alunos de doutoramento e de mestrado).

A atividade realizada tem tido o reconhecimento da comunidade científica, sendo de destacar que uma das comunicações apresentadas e publicadas recebeu o prémio BEST ACADEMIC-SCIENTIFIC PAPER AWARD, atribuído pelo Comité Científico da conferência DAM WORLD 2025. A comunicação foi distinguida como uma das dez melhores de âmbito científico, e foi selecionada para ser publicada na revista *Infrastructures*, depois de desenvolvida para o formato de artigo. Dois artigos publicados numa revista internacional foram objeto de distinção.

Com base na análise da investigação realizada durante este período inicial do projeto considera-se que a reestruturação do projeto envolve apenas a atualização do cronograma, pois os objetivos e as principais contribuições sociais permanecem inalterados. Refere-se apenas a necessidade de acrescentar tempo a algumas atividades e de adiar o início da atividade dos ensaios de campo.

Em 2026/2027 pretende-se recrutar um investigador doutorando ao abrigo das bolsas concedidas pela instituição, o que representa uma oportunidade para reforçar o projeto e contribuir para o seu sucesso.

Deve referir-se, por fim, que o projeto beneficiou dos recursos computacionais conseguidos no âmbito do projeto, financiado pela FCT, SSHM4Dams - Seismic and Structural Health Monitoring of Large Concrete Dams (Monitorização Sísmica e da Integridade Estrutural de Grandes Barragens de Betão), que decorreu desde abril de 2021 até ao final de 2024 (<https://sshm4damswebapp.vercel.app/>). Pretende-se continuar a atualização/reforço destes recursos computacionais com vista a reforçar a capacidade de produção de novos resultados com interesse para a engenharia de barragens.

VISTOS

O Chefe do Núcleo de
Modelação e Mecânica das Rochas

Assinado por: **Luís Manuel Nolasco Lamas**
Num. de Identificação: 04884922
Data: 2026.07.23 17:14:36+01'00'

Luís Lamas

O Chefe do Núcleo de Observação

Assinado por: **António Luís Henriques Tavares de Castro**
Num. de Identificação: 05399290
Data: 2026.07.23 17:49:44+01'00'

António Tavares de Castro

O Diretor do Departamento de
Barragens de Betão

Assinado por: **António Lopes Batista**
Num. de Identificação: 03847091
Data: 2026.07.27 08:20:05+01'00'

António Lopes Batista

AUTORIA

Assinado por: **Maria Luísa Mendes de Vasconcelos Braga Farinha**
Num. de Identificação: 07766228
Data: 2026.07.23 11:39:04+01'00'

Maria Luísa Braga Farinha
Investigadora Auxiliar

Assinado por: **Nuno Miguel Monteiro Azevedo**
Num. de Identificação: 10282051
Data: 2026.07.23 16:39:02+01'00'

Nuno Monteiro Azevedo
Investigador Auxiliar

Assinado por: **Sérgio Bruno Martins de Oliveira**
Num. de Identificação: 04484982
Data: 2026.07.23 11:45:27+01'00'

Sérgio Oliveira
Investigador Principal

Assinado por: **João Ricardo Marques Conde da Silva**
Num. de Identificação: 11690842
Data: 2026.07.23 11:42:21+01'00'

João Conde Silva
Investigador Auxiliar

ANEXOS

ANEXO I
Ficha de projeto StepDam



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

FICHA DE PROGRAMA

A STEP FORWARD FOR THE ABILITY TO ANTICIPATE AND PREVENT FAILURES OF CONCRETE DAM FOUNDATIONS

(STEP DAM)

Versão da ficha 2 | 2024/01/26



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 PROGRAMA

A step forward for the ability to anticipate and prevent failures of concrete dam foundations

Investigador responsável

Maria Luísa Braga Farinha / Nuno Monteiro Azevedo

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 PROGRAMA
- 3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROGRAMA

4. METODOLOGIA

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

5. EQUIPA

6. PLANO DE TRABALHOS

- 6.1 ATIVIDADES
- 6.2 PROJETOS QUE INTEGRAM O PROGRAMA

7. CRONOGRAMA

8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

- 8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROGRAMA
- 8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROGRAMA
- 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

Título do programa

A step forward for the ability to anticipate and prevent failures of concrete dam foundations

Um passo em frente para a capacidade de antecipar e evitar roturas de fundações de barragens de betão

Acrónimo do programa

StepDam

Unidade Departamental

Departamento de Barragens de Betão

Setor

0403 (NO)

Investigador responsável

Maria Luísa Braga Farinha / Nuno Monteiro Azevedo

Data de início

01/01/2024

Duração (trimestres)

16

Versão da ficha

2

Data da ficha

26/01/2024

1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES

Unidade operativa coordenadora

Departamento de Barragens de Betão

Parceiros internos

DBB/NO

DBB/NMMR

Parceiros externos

NOVA.ID.FCT

CERIS

Entidades financiadoras

FCT+

+The research project on its present form or in a similar form will be submitted for external funding, namely for a FCT research grant or for european grants that will open within the scopus of the project.

Entidades externas interessadas

EDP

EDIA

ENGIE

Breve descrição do interesse das entidades externas

The main companies responsible for concrete dam operation in Portugal (EDP, EDIA, ENGIE) are LNEC clients regarding dam monitoring and safety control and therefore are potential partners.

Last year EDP wrote a letter of support for a similar research project. In-situ testing has already been carried out in the two large concrete dams owned by EDIA (Alqueva and Pedrógão). The interaction with other dam owners and their specialists in the area of control and safety of concrete dams will be pursued.

Dam owners are interested in the technical and scientific insights that this project can deliver to the community, its main objective is to make the analysis of the monitoring data and safety control of large concrete dams more efficient.

1.3 RESUMO

The proposed research project follows on from the P2I-DAMFA project (2016-2023), and aims to contribute to the further development of the 3D numerical tool in order to make it faster (using parallel computing), applicable to more complex foundation geometries, capable of modelling small and large displacements and with more robust and realistic constitutive models, at various scales, which consider fracture propagation, particularly under hydraulic loading. The development of numerical analysis tools is fundamental, since the currently available numerical analysis tools are based on simplistic assumptions, considering continuous medium and simplified constitutive models.

The research project aims to contribute in a significant way to deepening the understanding of the behaviour of the dam-foundation assembly (current and extreme actions) in an integrated manner, based on numerical models, quantitative interpretation models and in situ tests.

Within the scope of the project, a campaign of in situ tests will be carried out to deepen the understanding of the hydro-mechanical behaviour of the dam-foundation system and to calibrate the parameters of the three-dimensional model, namely its hydraulic properties.

It is also intended to promote the development of more accurate prediction models for the hydro-mechanical behaviour, namely for predicting hydraulic loads, flows and displacements in the foundation and dam. The current models for interpreting hydraulic quantities are based on methodologies developed for interpreting the mechanical model, which, as a rule, do not suit the observed behaviour. In addition, the models for interpreting mechanical quantities do not take coupled behaviour into consideration. The development of prediction models that include hydro-mechanical behaviour is essential to build a prediction tool that can be calibrated to identify and anticipate changes in the behaviour of the dam/foundation system.

The results of safety analyses of existing dams for situations of overtopping, due to floods greater than foreseen in the design phase and/or due to climate changes, and for seismic actions, will enable the definition of alert levels to be used in the prediction models, in order to anticipate failure scenarios and the production of a database of failure analyses by overtopping and/or seismic actions that will enable interaction with other researchers, owners and specialists in the area of control and safety of concrete dams.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 ESTADO DA ARTE

This project falls within the scope of the research work that has been developed at LNEC regarding the safety assessment of concrete dams, where significant challenges still arise, mainly concerning appropriate models to simulate the hydromechanical coupled behavior of dam foundations [20,28,31,32,33,34,35], the assessment of failure scenarios using accurate models for static and seismic loading [7,28,31,33,34], methods of automated control of future dam behavior [30], with warning levels at the onset of failure, and in technology transfer. Nevertheless, given the potential of material and human losses associated to dam coupled failure it is mandatory to build a framework that has the capacity to anticipate and prevent failures, as the current approaches are simplified, not being able to characterize the complex behaviour at the onset of failure.

Regarding modelling, the first finite element (FE) numerical models for hydromechanical analysis were presented in the early 70s and allowed both the linear hydroelastic phenomena in porous media with fully implicit coupling to be analysed, as well as the behaviour in fractured media using sequential explicit coupling between the hydraulic and mechanical analyses [3]. Previous work carried out not only by members of the research team [9, 10] but also by other researchers [12] showed that equivalent continuum models can be used successfully when the hydraulic behaviour (water pressure and seepage losses) is the sole concern. However, for dam stability analysis, necessary to anticipate and prevent failures, the most straightforward approach is to take into account the main foundation discontinuities [13, 14]. 2D discrete element (DEM) based models that take into account the coupling between the hydraulic and mechanical behaviours have been proposed and applications to different dams have been developed by the PI [9, 18] and by other researchers [16, 17, 19] using preferentially UDEC [15]. However, arch dams require 3D analysis, but no numerical tools are available that can solve in an integrated manner the hydromechanical coupled analysis and the subsequent stability assessment for static and seismic loads [20], due to the difficulties related to 3D discontinuous hydromechanical analysis. Traditionally, a continuum based foundation model is used to perform the hydraulic analysis [10] and the water pressures obtained are then taken into account in a discontinuum mechanical model [21], which is then used for stability analysis [20]. To address this problem, the research team developed a 3D numerical analysis tool that takes adequately into account the specific features of dam foundations and also incorporates a stability analysis module [6,7,28], and which is an extension of the 2D model previously presented and validated in both static and dynamic conditions [5]. The starting point of the project will be the further development of the 3D model in order to obtain a fast, robust and efficient hydromechanical numerical analysis tool including the assessment of failure scenarios.

Taking advantage of the team experience acquired in the development of the 3D numerical models based on FEM and DEM technology [11,22,29] the development of parallel algorithms [8] will be carried out not only to decrease the computational time but also to make it possible to apply the program to more complex and larger geometries, including seismic loading. A more robust pre-processing stage, ensuring that the triangular representation of the block surfaces that interact are fully compatible (facet to facet interaction only) will also be developed in order to include more complex fault patterns and to represent more closely both the grout and drainage curtains that can be effectively used in practice [14]. The outer surface of each block in which the foundation is discretized is meshed with triangular elements following a 2D Delaunay generation algorithm previously implemented in a particle model [22]. The internal tetrahedra mesh of each block, necessary to represent the block deformability, is based on a 3D Delaunay generation algorithm that has already been developed for a particle generation algorithm [23] which includes boundary recovery algorithms [24]. A more robust boundary recovery 3D algorithm based on the advancing front algorithm will be developed if found necessary [25]. The 3D model hydraulic formulation is based on FE technology [26]. The model will allow fluid flow through both the rock matrix and the foundation discontinuities [13], using volume finite elements and zero-thickness interface elements. The stability analysis of dam foundations is usually carried out with simplified procedures and constitutive models [16,14,17], for this reason fracture energy constitutive models will be incorporated in the numerical tool following the work carried previously by the research team [27,29].

The hypotheses assumed in the numerical codes developed for both dam and foundation behaviour analyses have to be validated by comparison of the numerical results with both experimental and field data [10, 30]. A task involving in-situ experimental procedures will be carried out taking into account previously research team work [10] in order to further understand the coupled behavior and to calibrate the numerical model. Recorded data regarding dam foundation behaviour analysed using the simplified statistical methods of quantitative interpretation [9] will be compared with the coupled numerical results, in order to establish a hybrid forecasting tool, as already done successfully in the past by the research team [9] for non-coupled problems. The safety assessment that will be carried out for coupled failure scenarios will also be important in order to develop a forecasting tool that recognizes patterns (pressures and displacements) at the onset of failure.

2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER

- Deepening the understanding of the behaviour of the dam-foundation system (current and extreme actions) in an integrated manner, based on numerical models, on quantitative interpretation models and on in situ tests.
- Non-existence of three-dimensional models in the literature for analysing the coupled problem that make it possible to analyse the propagation of fracture in a realistic way. The current numerical tools are based on simplified assumptions (continuous medium and extremely simplistic constitutive models).
- Hydromechanical behaviour prediction models, namely hydraulic load prediction, flow rates, displacements in the foundation and dam. The models for interpreting the hydraulic quantities are based on methodologies developed for interpreting the mechanical model, which as a rule do not suit the observed behaviour and the models for interpreting the mechanical quantities do not consider the coupled behaviour.

2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS

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

- The aim is to further develop the 3D numerical tool initiated under the P2I DAMFA project (2016-2023), in order to make it faster (using parallel computing), applicable to more complex foundation geometries, capable of modelling small and large displacements and with more robust and realistic constitutive models, at various scales, which consider fracture propagation, particularly under hydraulic loading.
- A campaign of in situ tests that will allow a deeper understanding of the hydro-mechanical behaviour of the dam-foundation system and the calibration of the parameters of the three-dimensional model, namely the hydraulic properties.
- Prediction models that take into account the hydro-mechanical behaviour (observed response and numerical response) to enable more realistic predictions and the identification of changes in behaviour, assessing whether or not these correspond to the beginning of failure processes.
- Production of a database of rupture analyses by overtopping and/or seismic actions, which enables interaction with other researchers, owners and specialists in the area of control and safety of concrete dams.

One relevant scientific contribution of this project is the development of methodologies to calibrate models for the specific geological and geotechnical conditions of a given dam foundation. Regarding the Technology Readiness Level – TRL, the 3D numerical tool that has been developed by our team is a technology validated in relevant environment (TRL=5), as the results obtained so far in dam safety analysis using the 3D numerical tool have been compared with those obtained with other commercial numerical tools, giving accurate results. Concerning prediction models that take into account the hydro-mechanical behaviour it may be regarded as an experimental proof of concept (TRL=3), due to the non-linearity of dam foundation behaviour. The aim is to achieve TRL=6.

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

Advanced numerical modelling and experimental activity will allow strengthening LNEC's skills and resources.

A campaign of in situ tests (borehole water inflow tests) will be carried out with a view to understanding the seepage pattern of the dam foundation and the hydro-mechanical behaviour of the dam-foundation system.

Tests will be carried out with the equipment available at LNEC using the test procedures established by Farinha (2010). These tests allow measurement of discharges and water pressures in isolated sections of boreholes, and can be used to study in situ hydraulic properties and the way in which flow occurs within dam foundation rock masses.

LNEC's experimental competences will be reinforced, as these tests are unusual and require a team of at least three people specifically dedicated.

This project has a relevant potential economic impact, as it will allow better assessments of the safety levels of dam foundations.

2.4 MOTIVAÇÃO

Motivos para o desenvolvimento do programa (ver E2I)

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

Justificação sucinta dos motivos para a realização do programa (opcional)

The main motivation to develop this project is to establish a framework and methodology which can be used to understand, anticipate and prevent concrete dam foundation failures.

There is a lack of knowledge regarding the hydromechanical behaviour of concrete dam foundations, and this coupled behaviour has a fundamental role in dam foundation failure.

Studies of safety assessment of concrete dams required by dam owners can be significantly improved with the results of the proposed project.

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

Comunicação e sensibilização da sociedade para os riscos

Tema secundário (ver E2I)

Alterações climáticas

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

Desafios secundários (ver E2I)

Previsão e mitigação dos efeitos das alterações climáticas

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

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

The study of the behaviour of large concrete dams and their foundations are areas of actuation of the departmental units where research work needs to be carried out.

The knowledge regarding the structural safety of concrete and masonry dams should be object of further studies and improvements in order to ensure the institutional functions assigned to LNEC in the Dam Safety Regulations (RSB), Decree-Law nr. 21/2018, of March 28th, and in the respective Technical Support Documents.

The further development of numerical models for the study of the mechanical, thermal and hydraulic behavior of continuous and discontinuous media is a fundamental area of actuation of the departmental unit. Insitu tests campaigns are also a relevant area of actuation, and are central to get a deeper understanding of the hydro-mechanical behavior of the dam-foundation assembly and the calibration of the numerical models.

This project falls mainly within 2 of the research projects approved at the CCD/DBB: i) Development of models for structural, thermal and hydromechanical analysis of concrete or masonry structures and in rock mass foundations; ii) Behaviour analysis and safety assessment of concrete and masonry dams and their foundations

3.2 OBJETIVO GERAL DO PROGRAMA

The main objective of this project is to contribute in a significant way to improving the understanding of the behaviour of the dam/foundation system, an important aspect of dam engineering.

In addition, this project aims to improve the capacity to evaluate the safety of the dam-foundation system in an integrated manner, and to re-evaluate the safety evaluation methodologies, which, being simplified, are in some works very conservative, thus contributing to the improvement of regulations regarding the safety of the dam/foundation system.

The results of the safety analyses of existing dams for situations of overtopping, due to floods greater than predicted in the design phase, due to climate change, and for seismic actions, will enable the development of analysis and prediction models that allow for the timely detection of changes in the behaviour of the dam-foundation system.

3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROGRAMA

- 1 - To further develop the 3D numerical tool started under the P2I DAMFA project (2016-2023): faster (using parallel computing), applicable to more complex foundation geometries, able to model small and large displacements and with more robust and realistic constitutive models, at various scales, which consider fracture propagation, particularly under hydraulic loading;
- 2 - The conduct a campaign of insitu tests that allow a deeper understanding of the hydro-mechanical behavior of the dam-foundation assembly and the calibration of the three-dimensional model parameters, namely the hydraulic properties;
- 3 - The development of prediction models that take into account the hydromechanical behavior (observed response and numerical response) that allow more realistic predictions and the identification of changes in behavior, evaluating whether or not these correspond to the beginning of failure processes.
- 4 - The Production of a database of rupture analyses by overtopping and/or seismic actions that will enable interaction with other researchers, owners and specialists in the field of control and safety of concrete dams.

Within the collaboration protocol between LNEC and NOVA.ID.FCT, there is the opportunity to welcome students to LNEC for supervision of their master's theses. Professors from CERIS will be actively involved both in the verification and validation of the numerical models and in the analysis of the results of experimental activity.

4. METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL

The majority of recorded failures of concrete dams are due to problems in the foundation rock mass associated to seismic or overtopping loading. The current regulations are based on simplified analysis tools and material behaviour. In addition, most concrete dams were built prior to current regulations, when analysis for both static and seismic loading was either not specified or compulsory.

For arch dams there are no available tools that consider the coupled hydromechanical behaviour in discontinuous media. The methodologies that have been adopted in which the hydraulic and the mechanical behaviours are analysed in an uncoupled way and stability is analysed separately [14;20] do not address the coupled behaviour at onset of failure and adopt very simple constitutive failure models. The available forecasting models [9,30] are mostly focused on the mechanical response and are not calibrated to recognize the behaviour at the onset of failure. There is still a need to further understand the coupling behaviour that triggers most recorded failures [9].

In order to build the capacity to anticipate and prevent failures it is fundamental to:

- i) Carry out an in depth literature review, develop accurate numerical models for foundation behaviour interpretation and safety assessment (tasks 1,2,3,4 and 5); ii) Develop more accurate forecasting models that are able to recognize the onset of failure through both observations and numerical simulations (task 4);

iii) Understand the hydromechanical coupled behaviour through insitu testing (task 6);
 iv) Build data base of dam safety assessments for different overtopping and seismic scenarios (tasks 7 and 8);
 v) Have access to the fast and accurate tools and to transfer knowledge from research to engineering practice (tasks 9 and 10).
 The PhD thesis will focus on the improvment/optimization of the 3D hydromechanical coupled model (tasks 2 and 3) and constitutive models (task 5). Two different Master theses will be developed within each of the following tasks: 4, 6 and 7.

4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

Literature review and the further development of a discrete analysis tool that has been recently developed by the research team [5,6,7,28] will be the starting point of the project (tasks 1 and 2). The numerical tasks that are proposed within the project framework (tasks 2, 3, and 5) will build a faster and accurate 3D numerical coupled tool capable of modelling complex geometries and the hydromechanical coupled behaviour at the onset of failure, following realistic constitutive models [27]. The developed numerical tool will be fully verified and validated, firstly comparing the results with known theoretical solutions or with simplified models that are currently used for the safety assessment of concrete dams (verification stage) and secondly with recorded data from operating dams and water-inflow test results (validation stage). (Specific objective 1).

As mentioned, the available forecasting models are mostly focused on the non-coupled mechanical response [9,30]. The development of hybrid forecasting models based on both experimental observation and on the numerical results will be important to create a forecasting tool that can be calibrated to identify change of behaviour at the onset of failure (task 4). (Specific objective 3).

The borehole water inflow tests that will be carried out will use the equipment available at LNEC and will take advantage of the research team expertise on insitu testing [9,10]. These tests will be carried out will be relevant to further understand the coupled behaviour and to validate the numerical discrete coupled tool (task 6). Taking advantage of the regular inspection visits that are carried out to concrete dams by the LNEC members of the research team, in situ water-inflow tests will be carried out in three different dams. (Specific objective 2).

The assessment of failure scenarios (tasks 7 and 8) with the tool to be further developed and optimized will take advantage of the vast experience of the research team in 3D nonlinear modelling for both static and seismic loading [5,6,7,11,22,23,27,28]. A data base of results will be made available to practitioners (task 9). The analysis that will be carried out and the data base of results that will be created will be especially relevant to the safety assessment of current operational dams that were built before the current simplified methodologies were define, namely for seismic loading. The several dam geometries that will be assessed will also allow the calibration of the forecasting tools making them able to identify the onset of failure. (Specific objective 4).

A webpage in which all the information regarding the project is going to be freely available will be prepared at the beginning of the project and will be continuously updated.

Finally, the usefulness of this project can only be achieved if the main results are properly disseminated.

5. EQUIPA

Nome	Categoria	Setor/Entidade	Esforço (nºm)
Maria Luísa Braga Farinha	Investigador Auxiliar (IA)	DBB/NO	10.00
Nuno Miguel Monteiro Azevedo	Investigador Auxiliar (IA)	DBB/NMMR	10.00
Sérgio Oliveira	Investigador Auxiliar (IA)	DBB/NMMR	5.00
João Conde da Silva	Investigador Auxiliar (IA)	DBB/NO	4.34
João Rocha de Almeida		NOVA.ID.FCT	
Fátima Gouveia		CERIS	
Paulo Sousa Lobo		CERIS	
Bolseiro de Doutoramento	Bolseiro LNEC - investigação doutoramento (BI)	DBB/NMMR	36.00
Técnico superior	Técnico Superior (TS)	DBB/NO	1.00
Assistente técnico	Assistente técnico (AT)	DBB/NO	1.00
Bolseiro de mestrado	Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BI)	DBB/NMMR	-
Bolseiro de mestrado	Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BI)	DBB/NO	-
Bolseiro de mestrado	Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BI)	DBB/NMMR	-
Bolseiro de mestrado	Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BI)	DBB/NO	-
Bolseiro de mestrado	Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BI)	DBB/NMMR	-
Bolseiro de mestrado	Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BI)	DBB/NO	-
			-
			-
			-
			-
			-
			-
Total de investigadores			29.33
Total da equipa			67.33

6. PLANO DE TRABALHOS

6.1 ATIVIDADES

Atividade	1
<i>Designação</i>	Literature review
<i>Descrição</i>	The goal of this first task is to provide the research team with the appropriate knowledge on key subjects for this project and an opportunity to review the state-of-the-art, namely regarding hydromechanical models, forecasting models, in-situ testing and analysis of failure scenarios. Therefore, the literature review will be divided into two steps, to be carried out during the first months of the project, aiming to lay the foundations for the work to be developed and for all subsequent tasks.
<i>Resultados</i>	Summary of literature review. State of the art paper. Methodologies adjustments.
<i>Duração (meses)</i>	6

<i>Equipa</i>	Maria Luísa Braga Farinha 10% Nuno Miguel Monteiro Azevedo 10% Sérgio Oliveira 2% João Conde da Silva 2% Bolseiro de Doutoramento 50% João Rocha de Almeida 5% Fátima Gouveia 5% Paulo Sousa Lobo 5%
Atividade	2
<i>Designação</i>	Improvement/Optimization of the 3D hydromechanical coupled model - Fast
<i>Descrição</i>	The further development of the parallel version of the 3D discontinuous hydromechanical model based on the MPICH2 implementation will be carried out. The parallel version will be based on the parallel algorithms proposed in [8]. It will require the enhancement of the input, the output including the rendering libraries and the core explicit discrete/finite algorithm. After implementing the parallel version using MPI libraries, a multi-threading approach will be pursued in order to take full advantage of a multi-core cluster architecture. It is known that this kind of numerical solution needs a strong synchronization, which makes it more suitable for shared memory architectures. The shared memory will also be used for pre-processing and post-processing. With the parallelization, both MPI and Multi-thread, it will be possible to make a comparison between the numerical results that have been published and the new 3D results for the same level of discretization. The results will be compared with the numerical data presently available.
<i>Resultados</i>	A faster computational model will be available. A report is expected to be written about the parallel algorithms developed, that will serve as a basis for an article to be published in international journals and international conferences.
<i>Duração (meses)</i>	12
<i>Equipa</i>	Maria Luísa Braga Farinha 3% Nuno Miguel Monteiro Azevedo 11% Sérgio Oliveira 2% João Conde da Silva 2% Bolseiro de Doutoramento 55% João Rocha de Almeida 4%

Atividade**3***Designação**Descrição*

Improvement/Optimization of the 3D hydromechanical coupled model – Comp

A hydromechanical model based on joint finite elements has been developed and applied to simplified discontinuity distributions [7,28]. To model complex discontinuities, it is necessary to include a pre-processing stage where the blocks representing the foundation are discretized with tetrahedral finite elements ensuring that the triangular representation of the surfaces that interact are fully compatible and that the interaction between the blocks can be represented just by triangular facets.

Resultados

A more robust computational module will be available. The main results concerning the validation of small displacement interaction models will be presented in a scientific paper. This task will enable the research team to produce guidelines and the results published in scientific papers will allow a database regarding dam foundation results to be prepared, which will be made freely available for the dam scientific community. Validations of the 3D coupled hydromechanical model results will be presented in a scientific paper, comparing the results with the current simplified approaches.

Duração (meses)

12

Equipa

Maria Luísa Braga Farinha

3%

Nuno Miguel Monteiro Azevedo

12%

Sérgio Oliveira

2%

João Conde da Silva

2%

Bolseiro de Doutoramento

55%

Fátima Gouveia

2%

Paulo Sousa Lobo

2%

Atividade**4***Designação**Descrição*

Forecasting model enhancement - Warning calibration at failure

Recorded data regarding dam behaviour is customarily analysed using the simplified statistical methods of quantitative interpretation. This methodology is easily applied, and only requires that a large number of monitoring results are available. To overcome the limitations regarding the application of these methods to the analysis of foundation monitoring data, previous work carried out by the PI made it possible to establish a procedure for the analysis of the recorded discharges, which takes into account the non-linear hydromechanical behaviour of dam foundations [9]. Application of this pre-established procedure in a large number of dams is still required, in order to establish correlations of practical use and make the procedure widely accepted by the scientific community. Two Master theses will be developed within this task.

Resultados

Recorded data regarding dam behaviour is customarily analysed using the simplified statistical methods of quantitative interpretation. This methodology is easily applied, and only requires that a large number of monitoring results are available. To overcome the limitations regarding the application of these methods to the analysis of foundation monitoring data, previous work carried out by the PI made it possible to establish a procedure for the analysis of the recorded discharges, which takes into account the non-linear hydromechanical behaviour of dam foundations [9]. Application of this pre-established procedure in a large number of dams is still required, in order to establish correlations of practical use and make the procedure widely accepted by the scientific community.

Duração (meses)

12

Equipa

Maria Luísa Braga Farinha
7%
Nuno Miguel Monteiro Azevedo
4%
Sérgio Oliveira
3%
João Conde da Silva
3%
João Rocha de Almeida
4%
Fátima Gouveia
4%
Paulo Sousa Lobo
4%

Atividade**5***Designação*

Constitutive model development - Accurate

Descrição

In the evaluation of failure scenarios involving the dam body fracture, energy concepts have already been introduced in the constitutive models [27].

Resultados

A scientific paper will be published featuring the stability analysis of a given dam under operation. The simplified contact interaction valid under a small displacement hypothesis will be compared with the more computational intensive approach based on detailed particle modelling and with the hybrid adaptive algorithm that will be developed. The validation of the constitutive models will be performed using the Alqueva dam discontinuous numerical model, which has been used in the stability assessment of the dam/foundation interface using a simplified procedure [20]. The simulation of the evolution of dam failure indicators will be addressed.

Duração (meses)

12

<i>Equipa</i>	Maria Luísa Braga Farinha
	2%
	Nuno Miguel Monteiro Azevedo
	8%
	Sérgio Oliveira
	7%
	João Conde da Silva
	2%
	Bolseiro de Doutoramento
	50%
	João Rocha de Almeida
	3%

Atividade 6

<i>Designação</i>	In-situ borehole water inflow tests - Knowledge enhancement
<i>Descrição</i>	In situ water-inflow tests proposed by the PI [9, 10] are capable of providing more complete information on the foundation's hydraulic behaviour, allowing the assessment of seepage patterns underneath the dam. The knowledge obtained is relevant regarding the identification of possible failure modes and therefore indirectly contributes to a greater safety assessment of the dam. Two Master theses will be developed within this task.
<i>Resultados</i>	The tests that will be carried out make it possible to draw conclusions about the depth at which the seepage paths cross each one of the tested boreholes, about the distribution of discharges and water pressures along the boreholes, and about seepage paths linking various boreholes. The hydrologically dominant fracture zones have to be entered into the models. The integrated numerical tool that has been developed within this project is going to be used, using the test results and site specific characteristics of the dam foundations.

Duração (meses) 23

<i>Equipa</i>	Maria Luísa Braga Farinha
	9%
	Nuno Miguel Monteiro Azevedo
	3%
	Sérgio Oliveira
	2%
	João Conde da Silva
	2%
	Técnico superior
	4%
	Assistente técnico
	4%
	João Rocha de Almeida
	4%
	Fátima Gouveia
	3%
	Paulo Sousa Lobo
	3%

Atividade 7

<i>Designação</i>	Coupled failure scenarios - Overtopping
<i>Descrição</i>	The stability analysis of concrete dam foundations under static loading is normally performed using a Mohr-Coulomb model with zero cohesion and tensile strength. The safety factor is obtained by progressively reducing the friction angle and performing a sequence of analysis, until failure occurs [18, 20]. Two Master theses will be developed within this task.

Resultados As the numerical tool will be made available it is expected that worldwide dam practitioners will also contribute towards the data base of results that is intended to be built. The work will also be important to further calibrate the forecasting tool in order to make it able to recognize the behaviour at the onset of failure (pressures and displacements). The project expects to contribute towards the development of improved design guidelines and monitoring and safety control practices regarding the stability evaluation of concrete dam foundations coupled failure, including fracture energy concepts. The main results will be published in an international journal.

Duração (meses)

15

Equipa

Maria Luísa Braga Farinha
4%
Nuno Miguel Monteiro Azevedo
3%
Sérgio Oliveira
2%
João Conde da Silva
3%
Bolseiro de Doutoramento
42%
João Rocha de Almeida
4%
Fátima Gouveia
3%
Paulo Sousa Lobo
3%

Atividade 8

Designação

Coupled failure scenarios - Seismic Loading

Descrição

The starting point of this activity will be the coupled hydromechanical model, for small and large displacements, that will be developed within the project. As previously mentioned, the seismic loading analysis [7,30] within explicit procedures are very time consuming and for this reason the parallel procedures that will be carried out in Task 1 will be important in order to reduce computational times for seismic analysis assessment.

Resultados

With the developed studies, the project expects to contribute towards the development of improved design guidelines and monitoring and safety control practices regarding the stability evaluation of concrete dam foundations coupled failure, under seismic loading, including fracture energy concepts. The main results will be published in an international journal.

Duração (meses)

15

Equipa

Maria Luísa Braga Farinha
4%
Nuno Miguel Monteiro Azevedo
5%
Sérgio Oliveira
4%
João Conde da Silva
1%
Bolseiro de Doutoramento
50%
Fátima Gouveia
3%
Paulo Sousa Lobo
3%

Atividade	9
<i>Designação</i>	Technology transference
<i>Descrição</i>	The main goal of this activity is to invest in the implementations of strategies to promote and ensure the dissemination and transfer of knowledge. It is divided into three tasks: i) Development of the project web page, Data base and program access and manual; ii) Presentation of papers in scientific conferences and meetings and publication in international journals; and iii) Scientific symposium on concrete dam foundations. The success of this task depends on the results obtained in all the previous tasks.
<i>Resultados</i>	Project webpage, data base and program access and manual, papers in scientific conferences and meetings and a publications in international journals, Scientific symposium.
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Equipa</i>	Maria Luísa Braga Farinha 5% Nuno Miguel Monteiro Azevedo 5% Sérgio Oliveira 2% João Conde da Silva 3% João Rocha de Almeida 5% Fátima Gouveia 4% Paulo Sousa Lobo 4%
Atividade	10
<i>Designação</i>	Project technical management
<i>Descrição</i>	The project will be managed by Maria Luisa Braga Farinha and Nuno Monteiro Azevedo. The research work that will be carried at Uma will be coordinated by Professor Fátima Gouveia. The research carried out at NOVA.ID.FCT will be coordinated with the Professor João Rocha de Almeida. The work meetings will be organized by the PI and the Co-PI. The appointed researcher will be responsible for the activity management. The PI and the co-PI will be responsible for the preparation of the annual scientific reports.
<i>Resultados</i>	A website will be created at the beginning of the project in order to promote the numerical tools and present the main results that will be obtained within the project. The site will be updated as the project evolves. Short seminars will also be organized at the universities in order to highlight the relevance of concrete dam foundations safety assessment for the society, in order to reduce risks.
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Equipa</i>	Maria Luísa Braga Farinha 4% Nuno Miguel Monteiro Azevedo 2% Sérgio Oliveira 2% João Conde da Silva 2% João Rocha de Almeida 3% Fátima Gouveia 2% Paulo Sousa Lobo 2%

6.2 PROJETOS QUE INTEGRAM O PROGRAMA

Projeto 1

Designação	
Acrónimo	
Descrição	
Duração (meses)	
Investigador responsável	

Projeto 2

Designação	
Acrónimo	
Descrição	
Duração (meses)	
Investigador responsável	

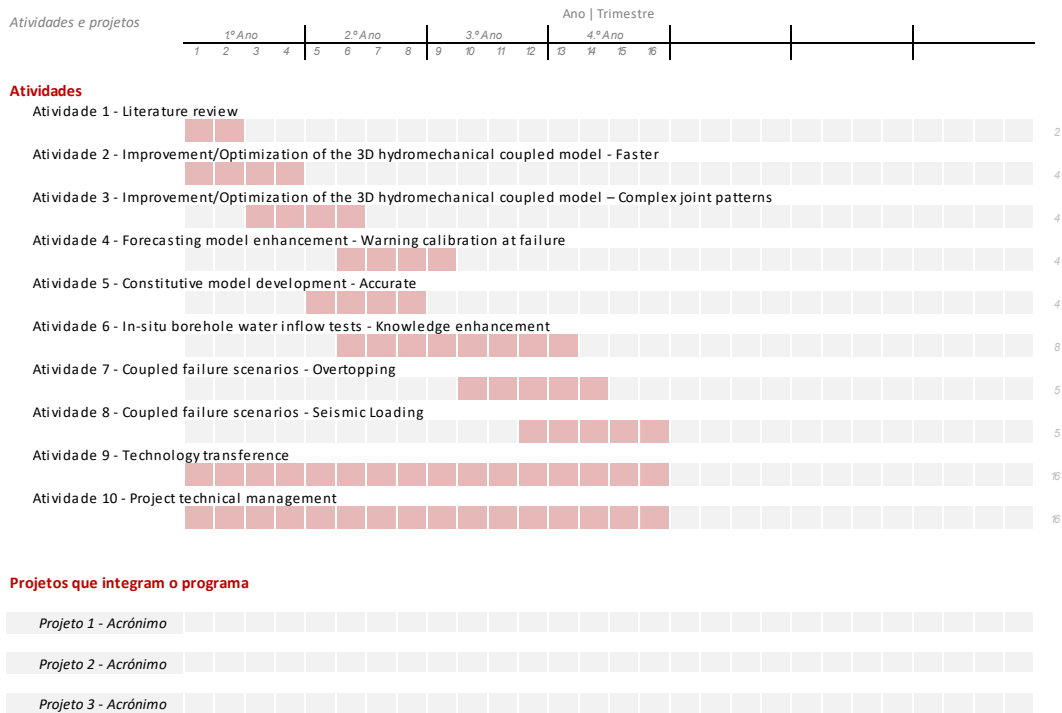
Projeto 3

Designação	
Acrónimo	
Descrição	
Duração (meses)	
Investigador responsável	

Projeto 4

Designação	
Acrónimo	
Descrição	
Duração (meses)	
Investigador responsável	

7. CRONOGRAMA



8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROGRAMA

Descritores do tipo de resultados (ver E21)

Informação e conhecimento

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

Descrição dos resultados e sua integração nos diferentes tipos

The expected main results of this project regarding information and knowledge are:

- i) To build a solid framework that has the capacity to anticipate and prevent failures;
- ii) To develop forecasting tools that will be calibrated to identify patterns (pressure and displacements) at the onset of failure that can be used by dam owners as a warning tool;
- iii) To contribute to guidelines for design stage and for the evaluation of existing dams;
- iv) To contribute to technology transfer by giving access to the results data base that will be made available at the project webpage.

- v) Scientific papers in both national and international conferences.
- vi) Scientific papers in books and in international journals with peer review classified in Web of Science (Clarivate)
- vii) International Symposium on concrete dam foundations that will be organized at the end of the project.

8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROGRAMA

Descritores do valor acrescentado do programa (ver E21)

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

Descrição do valor acrescentado do programa

Concrete dams are a vital part of the water storage infrastructure, and the analysis of the behaviour and safety assessment of concrete dam foundations contributes to safety promotion.

This project will improve current ability to assess the safety of concrete dam foundations, will allow optimisation of dam design, presently based on conservative methodologies, with the consequent reduction of costs, and will contribute to the improvement of guidelines.

In addition to safety, analysis of situations of overtopping, due to floods greater than foreseen in the design phase and/or due to climate changes, and seismic actions, will also be carried out (activities 7 and 8 of this project). As pointed out by the World Commission on Dams there is a need for a better understanding of the environmental concerns associated with dam development, and the increased knowledge about the environmental impacts of large dams will ensure the sustainability of this type of infrastructure.

One of the concerns of this project is to make the numerical analysis more efficient and accurate, with the simultaneous reduction of runtimes (activities 2, 3, 4 and 5). Results from the in situ tests that are proposed (activity 6) will allow better and more efficient models and thus contribute to increased safety.

The anticipated computational application enhances LNEC's capabilities to provide services necessary to solve existing problems.

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

Descrição das estratégias de devolução de resultados à sociedade

The usefulness of this project can only be achieved if the main results are properly disseminated. Strategies for returning the results to society involve:

1. Presentation of results in both national and international conferences.
2. Presentation of results in a book, book chapters and papers published in national and international peer reviewed scientific journals and 2 LNEC technical reports
3. Open access to the results of the study developed within the project, which are useful for other researchers, dam owners and academic studies

4. A website will be created in which the numerical code and its manual will be freely available along with a database regarding relevant data on dam foundations. This information is relevant for the dam scientific community and key stakeholders, but the team members will also try to capture the interest of a wider public and inspire younger students with an interest in engineering, as the safety of large dams impacts directly on the day-to-day lives of people.

5. The research team will continue their active participation in the International Benchmark Workshops organized by the ICOLD Committee A, on Computational Aspects of Analysis and Design of Dams. This participation started in 2017 and has allowed the presentation of the team developments in computational techniques, for analysis of dam behaviour and safety, over the last years.

6. International Symposium on concrete dam foundations that will be organized at LNEC at the end of the project.

8.4 PRODUTOS PREVISTOS

Publicações

Relatórios científicos	
Livros	1
Capítulos de livros	1
Artigos em revista internacionais	6
Artigos em revista nacionais	4

Comunicações

Comunicações em encontros científicos internacionais	12
Comunicações em encontros científicos nacionais	4

Organização de seminários e conferências

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

Formação avançada

Teses de doutoramento	1
Dissertações de mestrado	6
Outros documentos de formação avançada	

Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão

Especificações LNEC	
Informações Técnicas LNEC	2
Guias	
Normas de aplicação	
Outros documentos	2

Outros

Modelos	
Aplicações computacionais	1
Instalações piloto	
Protótipos laboratoriais	
Web page - StepDam	1
Seminário	1

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

Objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU

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

Horizonte Europa

Segurança civil para a sociedade
Clima, energia e mobilidade

Estratégia Portugal 2030

Redução dos riscos e valorização dos ativos ambientais
Promoção da sociedade do conhecimento
Qualificação dos recursos humanos

Explicação da indexação ao contexto

Many dams are a source of renewable energy, generated without polluting the atmosphere, which is a major advantage in meeting increasing electricity needs. Hydroelectricity can supply a continuous, reliable and affordable energy.

Significant future climate changes are expected to occur which may affect the operational condition of concrete dams. The accurate modelling of climate actions and their influence on the hydromechanical behaviour is mandatory to avoid dam instability and/or global failure.

Concrete dams allow fresh water to be stored for irrigation, water supply and flood control. Human life depends on freshwater and on the benefits provided by dams.

Large concrete dams are critical infrastructure that must be adequately protected in order to ensure civil security for society. Detection and prevention of dam failures, as proposed in this project, is a key issue, so as to reduce risks and enhance the value of environmental assets. Knowledge transfer is essential for society.

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

10.1 RECURSOS HUMANOS

Grupo		Esforço (p*m)	Valor
IC	Grupo 91	0.00	- €
IP (cH)	Grupo 92	0.00	- €
IP	Grupo 93	0.00	- €
IA	Grupo 94	29.33	181 868 €
AI, TS	Grupo 95	1.00	3 984 €
EI, TI	Grupo 96	0.00	- €
CT, AT	Grupo 97	1.00	1 793 €
AO	Grupo 98	0.00	- €
BPD (LNEC)	Grupo 11	0.00	- €
BD, BI (LNEC)	Grupo 12	36.00	72 000 €
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		67.33	259 645 €

10.2 DESPESAS CORRENTES

Designação	Quantidade	Valor unitário	Montante
Ensaio de campo - Visita a barragens em 2025	1	2 500.00 €	2 500 €
Ensaio de campo - Visita a barragens em 2026	1	2 500.00 €	2 500 €
Divulgação de resultados - Open access comunicati	4	2 500.00 €	10 000 €
Divulgação de resultados - International symposium	1	4 000.00 €	4 000 €
Divulgação de resultados - Participation in internat	10	2 500.00 €	25 000 €
Aquisição de outros bens e serviços - consumíveis	1	5 000.00 €	5 000 €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			49 000 €

10.3 EQUIPAMENTO

Designação	Quantidade	Valor unitário	Montante
High performance computers	5	4 500.00 €	22 500 €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			22 500 €

10.4 ORÇAMENTO

Designação	Estimativa de custo	Financiamento externo	Financiamento LNEC
Recursos humanos	259 644.54 €		259 645 €
Despesas correntes	49 000.00 €		49 000 €
Equipamentos	22 500.00 €		22 500 €
Gastos gerais	273 944.54 €		273 945 €
Total	605 089 €	- €	605 089 €

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

The research project on its present form or in a similar form will be submitted for external funding, namely for a FCT research grant which opens on a yearly basis or for european grants that will open within the scopus of the project. If the application is successful it will allow the funding of the items in 10.1 and 10.2. The research projects to be submitted to funding will also include funding to hire additional junior researchers (PhD and MsC).

Se não existe financiamento externo, mas vai ser obtido no futuro, indique as fontes de financiamento e o montante pretendido

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 (EI); 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 (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>programa</i>	0%
Indicador 2	<i>Financiamento da atividade de investigação por empresas (públicas ou privadas) relativamente à estimativa de custo do programa</i>	0%
Indicador 3	<i>Valor do financiamento do LNEC relativamente à estimativa de custo do programa</i>	100%
Indicador 5	<i>Número de teses de doutoramento orientadas por investigador do programa</i>	0.03
Indicador 6	<i>Número de dissertações de mestrado orientadas por investigador do programa</i>	0.20
Indicador 7	<i>Investimento em equipamentos relativamente à estimativa de custo do programa</i>	4%
Indicador 9	<i>Valor do financiamento destinado a processos internos relativamente à estimativa de custo do programa</i>	0%
Indicador 10	<i>Número de entidades externas parceiras do programa</i>	2.00
Indicador 11	<i>Número de publicações científicas (e.g., artigos, livros ou capítulos de livros, comunicações, relatórios científicos) por investigador do</i>	0.95
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 programa</i>	0.14
Indicador 14	<i>Número de eventos científicos e técnicos organizados ou coorganizados pelo LNEC por investigador do programa</i>	0.03

(A numeração dos indicadores corresponde à utilizada na E2I)

Para alguns indicadores da E2I não existe informação na ficha de programa que os permita calcular)

A.2 CICLO DE INVESTIGAÇÃO

Motivação

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

Temas e desafios

Tema principal

Construção

Desafios

Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído
Comunicação e sensibilização da sociedade para os riscos

Tema secundário

Alterações climáticas

Desafios

Previsão e mitigação dos efeitos das alterações climáticas
Adaptação e proteção de pessoas, infraestruturas e atividades às alterações climáticas

Tipo de resultados

Informação e conhecimento

Valor acrescentado do programa

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

Conetividade

Comunicação de ciência e disseminação do conhecimento

Indexação ao contexto

Objetivos de desenvolvimento sustentável

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

Horizonte Europa

Segurança civil para a sociedade
Clima, energia e mobilidade

Estratégia Portugal 2030

Redução dos riscos e valorização dos ativos ambientais
Promoção da sociedade do conhecimento
Qualificação dos recursos humanos

REFERÊNCIAS

1. International Commission on Large Dams (1995) Dam failures. Statistical analysis. ICOLD, Paris.
2. Louis, C.; Maini, Y.N. (1970) Determination of in situ hydraulic parameters in jointed rock. In Proceedings of the 2nd International Congress on Rock Mechanics. Belgrade, USA, 21-26 September 1970, Vol.I: 235-245.
3. Rutqvist, J.; Stephansson, O. (2003) The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. *Hydrogeology Journal*, 11(1): 7-40, DOI: 10.1007/s10040-002-0241-5.
4. Jing, L. (2003) A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3): 283-353, DOI:10.1016/S1365-1609(03)00013-3.
5. Farinha, M.L.B. Azevedo, N.M., Candeias, M. (2017) Small displacement coupled analysis of concrete gravity dam foundations: static and dynamic conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(2): 439-464. DOI: 10.1007/s00603-016-1125-7.
6. Farinha, M.L.B.; Azevedo, N.M. ; Leitão, N.S.; Câmara, R. (2018) 3D coupled hydromechanical analysis of dam foundations". In Proceedings of the 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Porto, Portugal.
7. Azevedo, N.M.; Farinha, M.L.B.; Câmara, R.; Leitão, N.S. (2021) Seismic analysis of Pine Flat concrete dam: comparison of numerical results from 2D and 3D analysis. In Bolzon, G.; Sterpi, D.; Mazzà, G.; Frigerio, A. (eds) *Numerical Analysis of Dams. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 91: 191-204. Springer International Publishing, 2021. Doi: 10.1007/978-3-030-51085-5_8.
8. Pantalé, O. (2005) Parallelization of an object-oriented FEM dynamics code: influence of the strategies on the Speedup, *Advances in Engineering software* 36(6): 361-373. Doi: 10.1016/j.advengsoft.2005.01.003.
9. Farinha, M.L.B. (2010) Hydromechanical behaviour of concrete dam foundations. In Situ tests and numerical modelling. Ph.D. Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
10. Farinha, M.L.B.; Lemos, J.; Maranha das Neves, E. (2011) Numerical modelling of borehole water inflow tests in the foundation of the Alqueva arch dam, *Canadian Geotechnical Journal*, 48(1): 72-88. DOI: 10/1139/T10-052.
11. Azevedo, N.M.; Lemos, J.V., Rocha de Almeida, J. (2016) Discrete element particle modelling of stone masonry. In: V. Sarhosis, K. Bagi, J.V. Lemos, and G. Milani (eds) *Computational modeling of masonry structures using the discrete element method* (Chapter 4, pp. 146-170). *Advances in Civil and Industrial Engineering (ACIE)*, Hershey PA.
12. Callari, C.; Fois, N.; Cicivelli, R. (2004) The role of hydro-mechanical coupling in the behaviour of dam-foundation system. In Proceedings of the 6th World Conference on Computational Mechanics (WCCM) in conjunction with the Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'O4). Beijing, China, 5-10 September 2004.

13. Segura, J.M.; Carol, I. (2008) Coupled HM analysis using zero-thickness interface elements with double nodes. Part I: Theoretical model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 32: 2083–2101. DOI: 10.1002/nag.735.
14. Lemos, J.V. (2014) Representation of rock discontinuities in safety analysis of large dams - Keynote Lecture. In *Proceedings of the 2014 ISRM European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2014)*, Vigo, Spain, 27-29 May 2014, pp. 29–38.
15. Itasca (2004) UDEC - Universal Distinct Element Code, Version 4.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
16. Barla, G.; Bonini, M.; Cammarata, G. (2004) Stress and seepage analyses for a gravity dam on a jointed granitic rock mass. *Proceedings of the 1st international UDEC/3DEC Symposium: Numerical Modeling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering, Civil Engineering, and Earth Sciences*, pp. 263–268, Bochum.
17. Gimenes, E.; Fernández, G. (2006) Hydromechanical analysis of flow behavior in concrete gravity dam foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(3): 244–259. DOI:10.1139/T05-095.
18. Farinha, M.L.B.; Caldeira, L.; Maranha das Neves, E. (2015) Limit state design approach for the safety evaluation of the foundations of concrete gravity dams. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 11(10): 1306–1322. DOI: 10.1080/15732479.2014.964265.
19. Bretas, E.; Lemos, J.; Lourenço, P. (2013) Hydromechanical analysis of masonry gravity dams and their foundations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46: 327–339. DOI: 10.1007/s00603-012-0305-3.
20. Farinha, M.L.B.; Lemos, J.; Maranha das Neves, E. (2012) Analysis of foundation sliding of an arch dam considering the hydromechanical behaviour, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6(1): 35–43. DOI: 10.1007/s11709-012-0142-1.
21. Itasca (2013) 3DEC - 3-Dimensional Distinct Element Code, Version 5.0, User's Manual. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
22. Azevedo, N.M.; Candeias, M.; Gouveia, F. (2015) A Rigid Particle Model for Rock Fracture Following the Voronoi Tessellation of the Grain Structure: Formulation and Validation, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48: 535–557, DOI 10.1007/s00603-014-0601-1.
23. Azevedo, N.M.; Lemos, J. (2013) A 3D generalized rigid particle contact model for rock fracture. *Engineering Computations*, 30(2): 277–300. DOI: 10.1108/026444401311304890.
24. Liu, J.; Chen, B.; Chen, Y. (2007) Boundary recovery after 3D Delaunay tetrahedralization without adding extra nodes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 72(6): 744–756. DOI: 10.1002/nme.2044.
25. Chan, C.T.; Anastasiou, K. (1997) An automatic tetrahedral mesh generation scheme by the advancing front method. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 13: 33–46.
26. Yan, C.; Zheng, H. (2017) FDEM-flow3D: A3D hydro-mechanical coupled model considering the pore seepage of rock matrix for simulating three-dimensional hydraulic fracturing. *Computers and Geotechnics* 81: 212–228.

27. Oliveira, S.; Faria, R. (2006) Numerical simulation of collapse scenarios in reduced scale tests of arch dams, *Engineering Structures*, 28(10): 1430-1439. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.01.012.
28. Azevedo, N.M.; Farinha M.L.B.; Freitas, G.; Almeida, J.R. (2021) Safety evaluation of an arch-gravity dam based on a small displacement hydromechanical coupled model. In Barla, M.; Di Donna, A.; Sterpi, D. (eds) *Challenges and Innovations in Geomechanics*. IACMAG 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 126: 285-292. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-64518-2_34.
29. Silva Lobo, P.; Almeida, J.; Guerreiro, L. (2015). Bond-slip effect in the assessment of RC structures subjected to seismic actions. *Procedia Engineering*, 114: 792-799. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.028.
30. Oliveira, S.; Alegre, A. (2019) Seismic and Structural Health Monitoring of Dams in Portugal. In: Limongelli M., Çelebi M. (eds) *Seismic Structural Health Monitoring* (Chapter 4, pp. 87-113). Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham.
31. Farinha, M.L.B.; Azevedo, N.M.; Leitão, N.S.; Rocha de Almeida, J.; Oliveira, S. (2022). Sliding Stability Assessment of Concrete Dams Using a 3D Discontinuum Hydromechanical Model Following a Discrete Crack Approach". *Geotechnics* 2(1): 133-157.
<https://doi.org/10.3390/geotechnics2010006>
32. Azevedo, N.M.; Farinha, M.L.B.; Sá, M.; Rocha de Almeida, J. (2021) Discontinuum models in three-dimensional hydromechanical analysis of the behaviour of concrete dam foundations (in Portuguese). *Geotecnia* (2021). <https://doi.org/10.24849/j.geot.2021.151.02.10.24849/>.
33. Farinha, M.L.B.; Azevedo, N.M.; Rocha de Almeida, J.; Oliveira, S.; Gouveia, F. (2021). Estudos de cenários de rotura por deslizamento em barragens de betão com modelos de fenda discreta. *Proceedings of Reabilitar & Betão Estrutural 2020*, Lisboa, 2021.
<https://reabilitar-be2020.pt/actas/>
34. Azevedo, N.M.; Farinha, M.L.B. (2020). Numerical simulation of failure in concrete dams using a hybrid discrete/finite model. *Proceedings of the 4th International Dam World Conference*, Lisboa, 2020. Vol. 1: 625-646. <https://dw2020.lnec.pt/proceedings>.
35. Freitas, G.; Farinha, M.L.B.; Azevedo, N.M.; Rocha de Almeida J. (2020). "Discontinuous hydromechanical modelling of concrete dam foundations". *Proceedings of the 4th International Dam World Conference*, Lisboa, 2020. Vol. 1: 923-936. <https://dw2020.lnec.pt/proceedings>.
36. Silva Lobo, P.; Almeida, J.; Guerreiro, L.. "Recentring and control of peak displacements of a RC frame using damping devices". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 94 (2017): 66-74. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85009114622&partnerID=MN8TOARS>.
37. Gouveia, Fátima; Gomes, Rui Carrilho; Lopes, Isabel. "Shallow and in depth seismic testing in urban environment: A case study in Lisbon Miocene stiff soils using joint inversion of active 213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.06.022>.

ANEXO II

Ficha de autoavaliação de projeto



Estratégia de Investigação
e Inovação do LNEC 21-27

FICHA DE AUTOAVALIAÇÃO DE PROJETO

A STEP FORWARD FOR THE ABILITY TO ANTICIPATE AND PREVENT FAILURES OF CONCRETE DAM FOUNDATIONS

(STEPDAM)

Versão da ficha 1 | 2026/03/16



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

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

A step forward for the ability to anticipate and prevent failures of concrete dam foundations

Investigador responsável

Maria Luísa Braga Farinha / Nuno Monteiro Azevedo

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)

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

1. INTRODUÇÃO

1.1 DADOS GERAIS

<i>Título do projeto</i>	A step forward for the ability to anticipate and prevent failures of concrete dam foundations
<i>Acrónimo do projeto</i>	StepDam
<i>Unidade Departamental</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Sector</i>	0403 (NO)
<i>Investigador responsável</i>	Maria Luísa Braga Farinha / Nuno Monteiro Azevedo
<i>Data de início</i>	01/01/2024
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Versão da ficha</i>	1
<i>Data da ficha</i>	16/03/2026

1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES

<i>Unidade operativa coordenadora</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Parceiros internos</i>	DBB/NO DBB/NMMR
<i>Parceiros externos</i>	NOVA.ID.FCT CERIS
<i>Entidades financiadoras</i>	FCT+ +The research project on its present form or in a similar form will be submitted for external funding, namely for a FCT research grant or for european grants that will open within the scopus of the project.
<i>Entidades externas interessadas</i>	EDP EDIA ENGIE
<i>Breve descrição do interesse das entidades externas</i>	The main companies responsible for concrete dam operation in Portugal (EDP, EDIA, ENGIE) are LNEC clients regarding dam monitoring and safety control and therefore are potential partners.

Last year EDP wrote a letter of support for a similar research project. In-situ testing has already been carried out in the two large concrete dams owned by EDIA (Alqueva and Pedrógão). The interaction with other dam owners and their specialists in the area of control and safety of concrete dams will be pursued.

Dam owners are interested in the technical and scientific insights that this project can deliver to the community, its main objective is to make the analysis of the monitoring data and safety control of large concrete dams more efficient.

1.3 RESUMO

The proposed research project follows on from the P2I-DAMFA project (2016-2023), and aims to contribute to the further development of the 3D numerical tool in order to make it faster (using parallel computing), applicable to more complex foundation geometries, capable of modelling small and large displacements and with more robust and realistic constitutive models, at various scales, which consider fracture propagation, particularly under hydraulic loading. The development of numerical analysis tools is fundamental, since the currently available numerical analysis tools are based on simplistic assumptions, considering continuous medium and simplified constitutive models.

The research project aims to contribute in a significant way to deepening the understanding of the behaviour of the dam-foundation assembly (current and extreme actions) in an integrated manner, based on numerical models, quantitative interpretation models and in situ tests.

Within the scope of the project, a campaign of in situ tests will be carried out to deepen the understanding of the hydro-mechanical behaviour of the dam-foundation system and to calibrate the parameters of the three-dimensional model, namely its hydraulic properties.

It is also intended to promote the development of more accurate prediction models for the hydro-mechanical behaviour, namely for predicting hydraulic loads, flows and displacements in the foundation and dam. The current models for interpreting hydraulic quantities are based on methodologies developed for interpreting the mechanical model, which, as a rule, do not suit the observed behaviour. In addition, the models for interpreting mechanical quantities do not take coupled behaviour into consideration. The development of prediction models that include hydro-mechanical behaviour is essential to build a prediction tool that can be calibrated to identify and anticipate changes in the behaviour of the dam/foundation system.

The results of safety analyses of existing dams for situations of overtopping, due to floods greater than foreseen in the design phase and/or due to climate changes, and for seismic actions, will enable the definition of alert levels to be used in the prediction models, in order to anticipate failure scenarios and the production of a database of failure analyses by overtopping and/or seismic actions that will enable interaction with other researchers, owners and specialists in the area of control and safety of concrete dams.

2. REALIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS

Atividade 1*Designação* Literature review*Descrição*

The goal of this first task is to provide the research team with the appropriate knowledge on key subjects for this project and an opportunity to review the state-of-the-art, namely regarding hydromechanical models, forecasting models, in-situ testing and analysis of failure scenarios. Therefore, the literature review will be divided into two steps, to be carried out during the first months of the project, aiming to lay the foundations for the work to be developed and for all subsequent tasks.

Resultados previstos

Summary of literature review. State of the art paper. Methodologies adjustments.

Resultados obtidos

At the beginning of the project, a comprehensive review of recent literature was undertaken, focusing on the key topics addressed, namely: (i) hydromechanical models; (ii) predictive models; (iii) in situ tests in dam foundations; (iv) nonlinear analysis methods; and (v) failure scenario assessment for concrete and masonry dams under both static and dynamic loading conditions.

Although the preparation of a standalone review article was initially envisaged, it was considered more appropriate to incorporate a critical analysis of the literature within the introductions of the papers submitted to national and international journals, as well as in conference proceedings.

Atividade 2*Designação* Improvement/Optimization of the 3D hydromechanical coupled model - Faster*Descrição*

The further development of the parallel version of the 3D discontinuous hydromechanical model based on the MPICH2 implementation will be carried out. The parallel version will be based on the parallel algorithms proposed in [8]. It will require the enhancement of the input, the output including the rendering libraries and the core explicit discrete/finite algorithm. After implementing the parallel version using MPI libraries, a multi-threading approach will be pursued in order to take full advantage of a multi-core cluster architecture. It is known that this kind of numerical solution needs a strong synchronization, which makes it more suitable for shared memory architectures. The shared memory will also be used for pre-processing and post-processing. With the parallelization, both MPI and Multi-thread, it will be possible to make a comparison between the numerical results that have been published and the new 3D results for the same level of discretization. The results will be compared with the numerical data presently available.

Resultados previstos

A faster computational model will be available. A report is expected to be written about the parallel algorithms developed, that will serve as a basis for an article to be published in international journals and international conferences.

Resultados obtidos

This activity has been initiated. Work began by implementing multithreading techniques in the hydromechanical module. Work will continue over the next 12 months with the aim of developing a computational tool with reduced execution times.

At this stage, a strategic decision was made to adopt simplified three-dimensional or two-dimensional models. This approach has facilitated the completion of several research studies, supported the validation of hydromechanical modelling approaches, and contributed to multiple publications in international journals and conference proceedings.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

Atividade 3

Designação

Descrição

Improvement/Optimization of the 3D hydromechanical coupled model – Complex joint patte

A hydromechanical model based on joint finite elements has been developed and applied to simplified discontinuity distributions [7,28]. To model complex discontinuities, it is necessary to include a pre-processing stage where the blocks representing the foundation are discretized with tetrahedral finite elements ensuring that the triangular representation of the surfaces that interact are fully compatible and that the interaction between the blocks can be represented just by triangular facets.

Resultados previstos

A more robust computational module will be available. The main results concerning the validation of small displacement interaction models will be presented in a scientific paper. This task will enable the research team to produce guidelines and the results published in scientific papers will allow a database regarding dam foundation results to be prepared, which will be made freely available for the dam scientific community. Validations of the 3D coupled hydromechanical model results will be presented in a scientific paper, comparing the results with the current simplified approaches.

Resultados obtidos

This activity has been partially completed. The computational module can now be applied to the analysis of failure scenarios involving more complex foundation systems. Work will continue, as several areas for further development have been identified, enabling the future implementation of more advanced and accurate foundation models, including hydromechanical behaviour. This phase is expected to require an additional six months. The current capabilities allow for stability analyses of the dam–foundation system in both arch-gravity and arch dams. Moreover, several research studies have been conducted to validate the interaction model in complex systems, resulting in publications in international journals and presentations at international conferences.

Atividade 4

Designação

Descrição

Forecasting model enhancement - Warning calibration at failure

Recorded data regarding dam behaviour is customarily analysed using the simplified statistical methods of quantitative interpretation. This methodology is easily applied, and only requires that a large number of monitoring results are available. To overcome the limitations regarding the application of these methods to the analysis of foundation monitoring data, previous work carried out by the PI made it possible to establish a procedure for the analysis of the recorded discharges, which takes into account the non-linear hydromechanical behaviour of dam foundations [9]. Application of this pre-established procedure in a large number of dams is still required, in order to establish correlations of practical use and make the procedure widely accepted by the scientific community. Two Master theses will be developed within this task.

Resultados previstos

Two Master theses will be developed within this task.

Resultados obtidos

This activity is currently in progress. Hybrid models are being developed to interpret hydromechanical behaviour, based on the methodologies proposed in Dr. Miguel Rodrigues's PhD research. Studies published in an international journal and presented at an international conference have examined, from a numerical standpoint, the influence of dam geometry and foundation conditions on hydromechanical response. These findings are now being incorporated into the prediction tool. This activity will continue over the next nine months.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

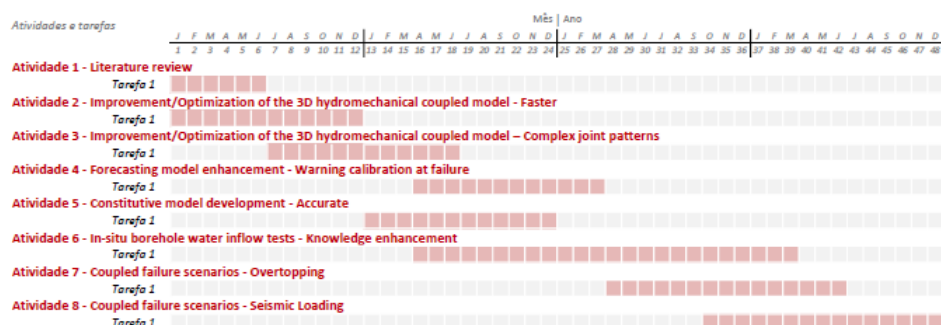
2013-2020

	Atividade	5
	<i>Designação</i>	Constitutive model development - Accurate
	<i>Descrição</i>	In the evaluation of failure scenarios involving the dam body fracture, energy concepts have already been introduced in the constitutive models [27].
	<i>Resultados previstos</i>	A scientific paper will be published featuring the stability analysis of a given dam under operation. The simplified contact interaction valid under a small displacement hypothesis will be compared with the more computational intensive approach based on detailed particle modelling and with the hybrid adaptive algorithm that will be developed. The validation of the constitutive models will be performed using the Alqueva dam discontinuous numerical model, which has been used in the stability assessment of the dam/foundation interface using a simplified procedure [20]. The simulation of the evolution of dam failure indicators will be addressed.
	<i>Resultados obtidos</i>	This activity is now nearing completion. Damage models have been successfully implemented and validated in both the 2D and 3D modules. The constitutive models were validated as part of a master's thesis, and several articles have been published in international journals and presented at international conferences. Based on the research carried out and the very satisfactory results obtained for both the damage model and the hybrid model, it has been decided to extend this activity for an additional six months, starting at the beginning of 2027.
	Atividade	6
	<i>Designação</i>	In-situ borehole water inflow tests - Knowledge enhancement
	<i>Descrição</i>	In situ water-inflow tests proposed by the PI [9, 10] are capable of providing more complete information on the foundation's hydraulic behaviour, allowing the assessment of seepage patterns underneath the dam. The knowledge obtained is relevant regarding the identification of possible failure modes and therefore indirectly contributes to a greater safety assessment of the dam. Two Master theses will be developed within this task.
	<i>Resultados previstos</i>	The tests that will be carried out make it possible to draw conclusions about the depth at which the seepage paths cross each one of the tested boreholes, about the distribution of discharges and water pressures along the boreholes, and about seepage paths linking various boreholes. The hydrologically dominant fracture zones have to be entered into the models. The integrated numerical tool that has been developed within this project is going to be used, using the test results and site specific characteristics of the dam foundations.
	<i>Resultados obtidos</i>	Field tests have not yet begun due to scheduling difficulties and the fact that editorial and professional work has been very intense over the last two years. Although this is not a critical activity for the completion of the project, it has been considered important to retain it, and it is therefore expected to commence at the beginning of 2027. During the field testing phase, an image acquisition campaign will be carried out with the aim of developing a photorealistic model, enabling inspections to be performed in immersive environments, with a particular focus on hydromechanical behaviour.
E2I 21-27 LNEC - Ficha de apreciação de projeto		7 14

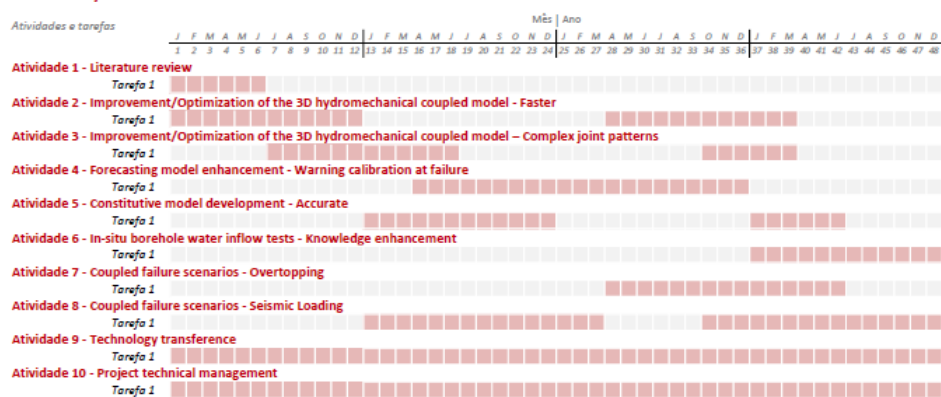
2013-2020

3. CRONOGRAMA

3.1 CRONOGRAMA INICIAL



3.2 ATUALIZAÇÃO DO CRONOGRAMA



4. RESULTADOS E SUA DISSEMINAÇÃO

4.1 APRECIÇÃO CRÍTICA DOS RESULTADOS DO PROJETO

Descritores do tipo de resultados (ver E21)

Informação e conhecimento

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

Apreciação

The project schedule has undergone some adjustments due to various constraints and the critical analysis of the results obtained throughout its duration.

The project has enabled the development of robust methodologies and computational modules capable of assessing and anticipating instability scenarios in the dam–foundation system. Preliminary results indicate that predictive models must account for both dam geometry and foundation characteristics. They also highlight the need for more comprehensive characterisation during the construction phase, particularly regarding the dam–foundation interface, foundation properties, and the nonlinear behaviour of concrete.

The work carried out has already led to several contributions, notably the development of an advanced analysis methodology based on complex 3D modelling. The main results have been widely published, ensuring effective dissemination of the project within the scientific community and to society at large. The research work and published outcomes have been recognised by the scientific community.

Within the scope of the StepDam project, virtual reality models have also been developed, enabling immersive visual inspections and the creation of photorealistic databases that facilitate the identification of visible structural changes and the monitoring of their evolution over time. By the end of 2027, a project website will be developed to support dissemination activities, and a scientific symposium is planned for 2028.

4.2 APRECIÇÃO CRÍTICA DA DEVOUÇÃO 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

Apreciação

The work carried out promotes safety, sustainability, and improvements in efficiency and performance, all of which are essential to a modern and developed society.

The ability to assess and anticipate instability scenarios in the dam–foundation system is critical, given the economic and human risks associated with dam-related disasters.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

The research enables control and safety activities to be carried out more effectively and in line with the demands of contemporary society.

Editorial and technical-scientific dissemination activities have been a priority, aiming to return and enhance knowledge for civil society, and in particular for the field of dam engineering.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

4.3 PRODUTOS

<i>Publicações</i>	Previstos	Realizados
Relatórios científicos		
Livros	1	0
Capítulos de livros	1	1
Artigos em revista internacionais	6	8
Artigos em revista nacionais	4	1
<i>Comunicações</i>		
Comunicações em encontros científicos internacionais	12	12
Comunicações em encontros científicos nacionais	4	2
<i>Organização de seminários e conferências</i>		
Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados	1	0
Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados		
<i>Formação avançada</i>		
Teses de doutoramento	1	2
Dissertações de mestrado	6	4
Outros documentos de formação avançada		
<i>Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão</i>		
Especificações LNEC		
Informações Técnicas LNEC	2	0
Guias		
Normas de aplicação		
Outros documentos	2	1
<i>Outros</i>		
Modelos		
Aplicações computacionais	1	0
Instalações piloto		
Protótipos laboratoriais		
Web page - StepDam	1	0
Seminário	1	0

5. REFORMULAÇÃO DO PROJETO

5.1 NECESSIDADE DE REFORMULAÇÃO

É necessário reformular o projeto

5.2 JUSTIFICAÇÃO DA REFORMULAÇÃO

The project's restructuring is based solely on the extension or adaptation of certain activities, informed by an analysis of the research carried out during the project's current period. The project objectives and main societal contributions remain unchanged and are further enhanced through the extension of these activities.

The activity relating to field tests has not yet been carried out due to its complexity, but it is planned for 2027. Its execution will require obtaining authorisation from the project owner, defining the project team, and acquiring the necessary consumables for the tests.

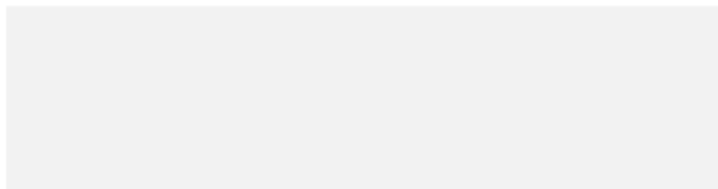
It is also intended to recruit a doctoral researcher in 2027 under the scholarships awarded by the institution, representing an opportunity to enhance the project and contribute to its success.

It should be noted that the project has benefited from the computational resources acquired under the FCT-funded SSH4DAMs project. However, updating these computational resources would also be important, as it would likely increase the project's impact on both society and the field of engineering.

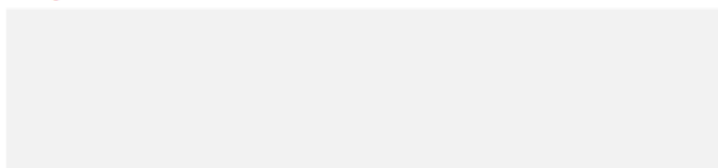
An application for external funding will be submitted to the ongoing FCT 2025 call for R&D Projects in all Scientific Domains, with the aim of securing external funding to support equipment, consumables, and the recruitment of research fellows.

6. CONCLUSÕES E LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA

6.1 CONCLUSÕES



6.2 LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA





www.lnec.pt

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