



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

SOLUÇÕES DE PONTA PARA A AVALIAÇÃO SUSTENTÁVEL DAS FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO – DAMFA

Relatório de progresso do projeto

Projeto DAMFA

Lisboa • janeiro de 2018

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 24/2018 – DBB/NO

Título

SOLUÇÕES DE PONTA PARA A AVALIAÇÃO SUSTENTÁVEL DAS FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO – DAMFA

Relatório de progresso do projeto

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 Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

Noemi Schclar Leitão

Investigadora Principal, Núcleo de Observação

Romano Câmara

Investigador-Coordenador, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

Eloísa Castilho dos Santos

Bolseira de Iniciação à Investigação Científica, 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 24/2018

Proc. 0403/112/20755, 0402/112/2075501

SOLUÇÕES DE PONTA PARA A AVALIAÇÃO SUSTENTÁVEL DAS FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE BETÃO - DAMFA

Relatório de progresso do projeto

Resumo

O presente relatório descreve de forma sucinta a atividade desenvolvida no âmbito do projeto DAMFA - Soluções de ponta para a avaliação sustentável das fundações de barragens de betão, até ao final de 2017.

Palavras-chave: Barragens de betão / Maciços rochosos de fundação / Interação comportamentos mecânico/térmico/hidráulico / Ferramenta numérica

CUTTING-EDGE SOLUTIONS FOR THE SUSTAINABLE ASSESSMENT OF CONCRETE DAM FOUNDATIONS - DAMFA

Project progress report

Abstract

This report presents a brief description of the activity carried out within the project DAMFA – Cutting-edge solutions for sustainable assessment of concrete dam foundations, until the end of 2017.

Keywords: Concrete dams / Rock mass foundations / Coupled mechanical/thermal/hydraulic interaction / Numerical tool

Índice

1	Introdução	1
2	Breve descrição da atividade desenvolvida	2
2.1	Geração de malhas tridimensionais	2
2.2	Modelo hidromecânico acoplado	3
2.3	Modelação do comportamento termo-químico-mecânico com elementos finitos	4
2.4	Modelos baseados no conceito de energia da fratura	4
2.5	Ligação dos diferentes códigos	4
2.6	Avaliação da segurança de barragens de betão	4
3	Divulgação e disseminação de conhecimentos	5
3.1	Publicações	5
3.1.1	Artigos em revistas internacionais com arbitragem científica	5
3.1.2	Artigos em revistas nacionais com arbitragem científica	5
3.1.3	Comunicações em encontros científicos internacionais	5
3.1.4	Comunicações em encontros científicos nacionais	6
3.1.5	Relatórios	6
3.2	Participação em encontros científicos	7
3.2.1	Encontros científicos internacionais	7
3.2.2	Encontros científicos nacionais	7
3.3	Formação avançada	8
3.3.1	Teses de doutoramento	8
3.3.2	Teses de mestrado	8
3.4	Participação em júris de teses elaboradas no âmbito do projeto	9
3.5	Deslocações a barragens	9
4	Financiamento externo	11
4.1	Candidatura a financiamento de projetos IC&DT	11
4.2	Bolsas de estudo	11
4.3	Trabalhos por contrato	12
5	Recursos mobilizados e indicadores de projeto	13
6	Considerações finais	15
	ANEXO Ficha de projeto DAMFA	17

Índice de quadros

Quadro 5.1 – Percentagem de tempo de afetação dos investigadores envolvidos no projeto.....	13
Quadro 5.2 – Indicadores de projeto previstos, realizados e a decorrer	14

1 | Introdução

O projeto DAMFA – Soluções de ponta para a avaliação sustentável das 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.

Assim sendo, 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 PALOP), é fundamental que as ferramentas utilizadas pelos investigadores permitam estudos mais aprofundados do que as ferramentas comerciais disponíveis.

O projeto DAMFA tem como parceiro externo a NOVA.ID.FCT – Associação para a Inovação e Desenvolvimento da Faculdade de Ciências e Tecnologia, sendo o investigador responsável, por parte desta associação, o Professor João Rocha de Almeida.

O projeto DAMFA foi entregue por mão própria ao Diretor do Departamento de Barragens de Betão (DBB) em 24 de julho de 2015, e enviado formalmente por *e-mail* uma semana depois, em 31 de julho de 2015. A avaliação do projeto foi feita, numa primeira fase, pelos Chefes de Núcleo e Direção do DBB, e decorreu até 16 de fevereiro de 2016, e, numa segunda fase, pela Comissão de Acompanhamento do Plano de Investigação e Inovação 2013-2020 (projetos P2I), e decorreu até 18 de julho de 2016. O projeto foi formalmente aprovado pelo Conselho Diretivo do LNEC em 9 de setembro de 2016.

A pedido dos investigadores que constituem a equipa de trabalho do projeto DAMFA, o Professor Carlos Tiago, do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico (IST), o Professor António Topa Gomes, Coordenador da Secção de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e o Dr. Jair Rodrigues, Presidente do Laboratório de Engenharia Civil de Cabo Verde, escreveram cartas abonatórias. Os contactos feitos e a análise conjunta do projeto serviram como ponto de partida para as parcerias que se estão a estabelecer com o IST e a FEUP.

Apresenta-se neste relatório uma breve descrição das atividades desenvolvidas no âmbito do projeto DAMFA até ao final de 2017.

2 | Breve descrição da atividade desenvolvida

O plano de trabalhos previstos no projeto, que se apresenta em anexo, tem sido na generalidade cumprido, tendo havido, no entanto, alguns reajustes normais num projeto em que participa uma equipa alargada de investigadores. Nomeadamente há que referir que dentro da colaboração que existe com a NOVA.ID.FCT houve oportunidade de acolher no LNEC diversos alunos para orientação de dissertações de mestrado. No âmbito do projeto estão também a ser desenvolvidas no LNEC duas teses de doutoramento, em colaboração com o IST. De referir que a orientação de trabalhos de mestrado e de doutoramento, para além de permitir a transmissão de conhecimentos sobre a análise do comportamento de barragens de betão e verificação da sua segurança, permite também envolver os alunos no processo de verificação, validação e exploração dos códigos computacionais que estão a ser desenvolvidos, o que tem superior relevância no âmbito deste projeto.

Apesar de no projeto DAMFA se prever o desenvolvimento de ferramentas tridimensionais (3D) com base em ferramentas bidimensionais (2D) previamente desenvolvidas e validadas, verifica-se que tem sido importante continuar a desenvolver as ferramentas numéricas bidimensionais. Como exemplo, o artigo referente ao modelo hidromecânico 2D publicado na revista *Rock Mechanics and Rock Engineering* teve, até agora, uma citação e quase 1000 downloads, o que demonstra o interesse da comunidade técnica e científica no controlo e segurança de barragens de betão fundadas em maciços rochosos. Para além disso os desenvolvimentos em 3D são em muitas situações a extrapolação dos modelos 2D.

Apresenta-se de seguida uma breve descrição dos avanços no projeto até ao final de 2017. Nesta descrição são referidos alguns dos documentos publicados no âmbito do projeto, que se apresentam no capítulo 3 deste relatório.

2.1 Geração de malhas tridimensionais

A atividade 1 prevê o desenvolvimento de um algoritmo de pré-processamento para a geração de malhas 3D descontínuas mediante a utilização de elementos finitos de interface. Foi desenvolvido trabalho nas quatro tarefas enquadradas nesta atividade:

Tarefa 1.1 – Geração de malhas 3D com faces compatíveis

O algoritmo de pré-processamento tem vindo a ser desenvolvido com base no modelo de pré-processamento 2D proposto [AI1, EI3, EN1]. Foi igualmente desenvolvido um modelo de contacto em pequenos deslocamentos.

Tarefa 1.2 – Algoritmo de geração 3D de malhas tetraédricas

A tarefa 1.2 encontra-se parcialmente completa, prevendo-se que sejam necessários mais três meses de trabalho para a sua conclusão.

O algoritmo de geração tem sido desenvolvido através da implementação de rotinas (*3D Delaunay* e *3D Advancing Front*) que permitem gerar a malha interna de um bloco dada uma prévia triangulação das faces.

De referir que a tarefa de gerar uma malha interna tetraédrica garantindo que as faces triangulares estão incluídas na malha é extremamente complexa, pelo que foi necessário desenvolver algoritmos do tipo *3D Advancing Front* em zonas locais onde o algoritmo *3D Delaunay* não é eficaz.

Tarefa 1.3 – Contacto esfera/superfície triangular para grandes deslocamentos

A tarefa 1.3 encontra-se completa. O modelo de contacto que permitirá a modelação de grandes deslocamentos nas zonas onde é possível a ocorrência de deslizamentos já se encontra implementado, tendo sido demonstrado em [EN2] a potencialidade do modelo através da sua aplicação à análise de estabilidade de uma barragem abóbada.

Tarefa 1.4 – Modelo híbrido

A tarefa 1.4 encontra-se parcialmente completa prevendo-se que sejam necessários mais quatro meses de trabalho para a sua conclusão. Está em fase de preparação um artigo a submeter a revista com base na comunicação [E14]. A conclusão das tarefas 1.1 e 1.2 será essencial para finalizar com sucesso a tarefa 1.4.

2.2 Modelo hidromecânico acoplado

Na atividade 2 está prevista a construção de um modelo descontínuo que permita a modelação do escoamento através das discontinuidades da fundação e da matriz rochosa, considerada como meio poroso.

Tarefa 2.1 – Desenvolvimento de um modelo 3D com elementos finitos

Dadas as dificuldades no desenvolvimento de um modelo de geração que permita a compatibilidade perfeita entre blocos do tipo elemento triangular/elemento triangular, optou-se por iniciar o desenvolvimento do modelo hidromecânico 3D recorrendo a um modelo de escoamento unidirecional pelas arestas dos elementos triangulares de interface. Optou-se por este modelo mais simples pois, à partida, a compatibilidade entre blocos está verificada. A tarefa está completa. Na sequência do trabalho desenvolvido foi feita uma apresentação em congresso internacional (CMN 2017) e foi elaborada uma comunicação [E14].

Tarefa 2.2 – Submissão de um artigo a revista

Está a ser desenvolvido um modelo 3D de uma barragem abóbada em que existe uma compatibilidade perfeita entre os diversos blocos, que será analisado com o modelo hidromecânico desenvolvido na tarefa 2.1. Os resultados e conclusões da análise efetuada serão apresentados num artigo a submeter a uma revista científica.

2.3 Modelação do comportamento termo-químico-mecânico com elementos finitos

A atividade 3 tem por objetivo incluir os efeitos térmicos (deformação e fendilhação) na análise do sistema barragem-fundação. Nos primeiros três semestres de atividade no projeto estava prevista a realização das tarefas 3.1 e 3.2.

Na tarefa 3.1 estava prevista a modelação da refrigeração do betão durante a injeção das juntas de contração de uma barragem, tendo-se previsto a sua validação com os resultados da observação obtidos durante o arrefecimento forçado da barragem de Foz Tua. No entanto, na data de aprovação do projeto já estava a iniciar-se o primeiro enchimento da albufeira da barragem de Foz Tua, que foi necessário acompanhar.

Para o acompanhamento do primeiro enchimento da barragem de Foz Tua foi decidido implementar novas funcionalidades nos programas existentes, que permitem uma simulação mais realista das condições térmicas ambientais. De salientar o desenvolvimento de rotinas que permitem a utilização das temperaturas e radiação solar medidas hora a hora na estação meteorológica instalada no local da barragem.

2.4 Modelos baseados no conceito de energia da fratura

A atividade 4 prevê o desenvolvimento de modelos constitutivos que incluem conceitos de energia da fratura e comportamento não linear, tanto para análise estática como dinâmica. Embora ainda não se tenham iniciado os desenvolvimentos específicos discriminados nas diversas tarefas desta atividade, são de considerar como estudos preliminares os contributos publicados em [AN1, EI2, EN4, EN3].

2.5 Ligação dos diferentes códigos

Para o desenvolvimento do trabalho apresentado no *14th ICOLD International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams* [EI1] foi necessário realizar um acoplamento sequencial entre os códigos de cálculo térmico, de elementos finitos, e de cálculo mecânico, que utiliza de forma integrada elementos finitos e discretos. Esta aplicação permitiu fazer uma reflexão sobre os possíveis caminhos a seguir para fazer a adequada interligação dos códigos que vão sendo desenvolvidos no âmbito deste projeto (atividade 6).

2.6 Avaliação da segurança de barragens de betão

A análise da estabilidade de barragens de betão, tanto em condições estáticas como dinâmicas, pode ser melhorada incorporando os conceitos de energia da fratura, o que permite uma simulação mais realista do comportamento do material. A redução dos tempos de cálculo é importante, em especial nas análises em situações dinâmicas. Os relatórios desenvolvidos até ao final de 2017 no âmbito do projeto DAMFA [R1, R2, R3, R4] enquadram-se na atividade 8, relativa à avaliação da segurança de barragens de betão.

3 | Divulgação e disseminação de conhecimentos

A transmissão de conhecimentos à comunidade técnico-científica tem sido 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 teses de mestrado e de doutoramento.

Até ao final de 2017 foram publicados dois artigos em revista, sendo um numa revista internacional e outro numa revista nacional, apresentadas três comunicações em congressos internacionais, quatro comunicações em congressos nacionais e publicados 4 relatórios. Foram ainda submetidas duas comunicações a um congresso internacional, que estão em fase de apreciação. Relativamente aos trabalhos de formação avançada foram concluídas 3 teses de mestrado e estão em curso 2 teses de doutoramento e 3 teses de mestrado.

Apresentam-se de seguida, por ordem cronológica inversa, os documentos publicados no âmbito do projeto DAMFA. Alguns destes trabalhos foram apresentados em eventos científicos internacionais e nacionais. Apresenta-se também informação relativa às teses de doutoramento e de mestrado já concluídas e que estão a ser desenvolvidas e indicam-se as participações de investigadores da equipa do projeto DAMFA em júris de teses elaboradas no âmbito do projeto. São ainda indicadas as visitas a obras que foram acompanhadas por alunos de doutoramento e de mestrado no âmbito da sua formação.

3.1 Publicações

3.1.1 Artigos em revistas internacionais com arbitragem científica

[AI1] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; 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.

3.1.2 Artigos em revistas nacionais com arbitragem científica

[AN1] Alegre, A.; Oliveira, S.; Espada, M.; Câmara, R.; Lemos, J.V., 2017 - Pressões hidrodinâmicas em barragens abóbada: resultados numéricos e experimentais. Mecânica Experimental - Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), 28: 55-62.

3.1.3 Comunicações em encontros científicos internacionais

[EI4] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Leitão, N.; Castilho, E.; Câmara, R., 2018 – *3D coupled hydromechanical analysis of dam foundations*. Submetido ao Congresso NUMGE2018 – 9th NUMGE Conference on Numerical Methods in

Geotechnical Engineering, Porto, Portugal, 25-27 de junho de 2018 (em fase de apreciação).

- [EI3] Mendonça, G.; Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B.; Cismasiu, I., 2018 - *Hydromechanical analysis of gravity dam foundations*. Submetido ao Congresso NUMGE2018 – 9th NUMGE Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Porto, Portugal, 25-27 de junho de 2018 (em fase de apreciação).
- [EI2] Candeias, M.; Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B., 2017 – *VGCM3D – A 3D rigid particle model for rock fracture following Voronoi Tessellation of the grain structure: formulation and validation*. PARTICLES 2017, V International Conference on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications. Hannover, Alemanha, 26-28 de setembro de 2017.
- [EI1] Leitão, N.; Monteiro Azevedo, N.; Castilho, E.; Farinha, M.L.B.; Câmara, R., 2017 – *Thermal cracking of a concrete arch dam*. 14th ICOLD International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, Estocolmo, Suécia, 5-9 de setembro de 2017.

3.1.4 Comunicações em encontros científicos nacionais

- [EN4] Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B., 2016 – Um modelo 3D discreto de partículas para análise da fratura em betão armado. Encontro Nacional Betão Estrutural, BE 2016, Coimbra, 2-4 de novembro de 2016.
- [EN3] Alegre, A.; Oliveira, S.; Espada, M.; Câmara, R., 2016 – Utilização de uma abordagem de estado no desenvolvimento de modelos de EF3D para análise dinâmica de sistemas barragem-fundação-albufeira. Encontro Nacional Betão Estrutural, BE 2016, Coimbra, 2-4 de novembro de 2016.
- [EN2] Monteiro Azevedo, N.; Farinha, M.L.B.; Rocha de Almeida, J.; Candeias, M., 2016 – Modelo de interface partícula esférica/superfície triangular aplicado à análise da estabilidade de fundações de barragens de betão. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, 15 CNG, FEUP, Porto, 19-23 de junho de 2016.
- [EN1] Farinha, M.L.B.; Monteiro Azevedo, N.; Rocha de Almeida, J.; Candeias, M., 2016 – Análise estática e dinâmica de barragens gravidade em pequenos deslocamentos. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, 15 CNG, FEUP, Porto, 19-23 de junho de 2016.

3.1.5 Relatórios

- [R4] Câmara, R.; Monteiro Azevedo, N., 2017 – Fotoelasticidade digital. LNEC - Proc. 0402/112/2075501. Relatório 377/2017 – DBB/NMMR.
- [R3] Oliveira, S.; Silvestre, A., 2017 – Barragem do Cabril. Sistema para monitorização de vibrações em contínuo. Medição e análise automática da resposta dinâmica sob excitação ambiente/operacional e sob ações sísmicas. LNEC - Proc. 0402/112/2075501. Relatório 205/2017 – DBB/NMMR.

[R2] Câmara, R.; Oliveira, S., 2017 – Modelo para o estudo sísmico transiente de barragens abóbada e suas albufeiras pelo método dos elementos de fronteira. LNEC - Proc. 0402/112/2075501. Relatório 147/2017 – DBB/NMMR.

[R1] Câmara, R.; Oliveira, S., 2017 – Modelos para estudo sísmico transiente de uma barragem abóbada. LNEC - Proc. 0402/112/2075501. Relatório 147/2017 – DBB/NMMR.

3.2 Participação em encontros científicos

3.2.1 Encontros científicos internacionais

- Eloísa Castilho dos Santos: participou no curso *Modelling of cement based materials and structures*, organizado no âmbito da COST ACTION TU1404, que decorreu na Polónia, de 9 a 13 de outubro de 2017.
- Nuno Monteiro Azevedo: participou na conferência *V International Conference on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications*, PARTICLES 2017, que decorreu em Hannover, na Alemanha, de 26 a 28 de setembro de 2017, onde apresentou a comunicação [EI2].
- Eloísa Castilho dos Santos: participou no *14th ICOLD International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, que decorreu em Estocolmo, na Suécia, de 5 a 9 de setembro de 2017, onde apresentou a comunicação [EI1].
- Maria Luísa Braga Farinha: participou na conferência Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, CMN2017, que decorreu em Valência, em Espanha, de 3 a 6 de julho de 2017, onde apresentou o estudo *A 3D coupled hydromechanical model for dam foundation analysis in small displacements* desenvolvido por Maria Luísa Braga Farinha, Nuno Monteiro Azevedo, João Rocha de Almeida e Mariline Candeias.

3.2.2 Encontros científicos nacionais

- Nuno Monteiro Azevedo: participou no Encontro Nacional Betão Estrutural 2016, BE 2016, que decorreu de 2 a 4 de novembro de 2016, em Coimbra, onde apresentou a comunicação [EN4].
- Sérgio Oliveira: participou no Encontro Nacional Betão Estrutural 2016, BE 2016, que decorreu em Coimbra, de 2 a 4 de novembro de 2016, onde apresentou a comunicação [EN3].
- Maria Luísa Braga Farinha: participou no, 15º Congresso Nacional de Geotecnia, 15 CNG, que decorreu na FEUP, Porto, de 19 a 23 de junho de 2016, onde apresentou as comunicações [EN2] e [EN1].

3.3 Formação avançada

3.3.1 Teses de doutoramento

- Miguel Ângelo da Silva Rodrigues, bolsheiro de doutoramento em acolhimento no LNEC, encontra-se inscrito no Programa Doutoral em Engenharia Civil do IST e a desenvolver os seus trabalhos de doutoramento, com a orientação do investigador Sérgio Oliveira, do LNEC, e do Professor Jorge Proença, do IST.
- André Filipe Moreira Alegre, bolsheiro de doutoramento em acolhimento no LNEC com bolsa FCT, encontra-se inscrito no Programa Doutoral em Engenharia Civil do IST e a desenvolver os seus trabalhos de doutoramento, com a orientação do investigador Sérgio Oliveira, do LNEC, do Professor Jorge Proença, do IST, e do Professor Paulo Mendes, do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). O tema da tese é “Modelação do comportamento dinâmico de grandes barragens de betão. Desenvolvimento de *software* para sistemas automáticos de monitorização de vibrações em contínuo e controlo da segurança sob ações sísmicas”.

3.3.2 Teses de mestrado

- Glória Gonçalves de Mendonça: tese 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 *Comportamento hidromecânico de fundações de barragens gravidade*, orientada pela Professora Ildi Cismasiu, da FCT-UNL, e pelos investigadores Maria Luísa Braga Farinha e Nuno Monteiro Azevedo. O acolhimento no LNEC decorreu de 15 de março de 2016 a 27 de dezembro de 2017. A tese foi discutida no dia 13 de dezembro de 2017 e obteve a classificação de 18 valores. O trabalho será apresentado num encontro científico internacional [EI3].
- Mariana Salles da Silva Simarro: tese realizada ao obrigo do convénio entre o LNEC e o ISEL, com o tema *Observação e análise do comportamento de barragens de betão ao longo do tempo tendo em conta o efeito de ações expansivas - Utilização integrada de modelos de elementos finitos e de modelos de separação de efeitos*, orientada pelo investigador Sérgio Oliveira. O acolhimento no LNEC decorreu de 2 de maio de 2016 a 29 de dezembro de 2017. A tese foi discutida no dia 13 de dezembro de 2017 e obteve a classificação de 17 valores.
- Rafael Manuel da Silva Ramos: tese realizada ao obrigo do convénio entre o LNEC e o ISEL, com o tema *Modelação do comportamento sísmico de barragens abóbada: estudo da influência da cota de água*, orientada pelo investigador Sérgio Oliveira. O acolhimento no LNEC decorreu de 1 de junho de 2016 a 29 de dezembro de 2017. A tese foi discutida no dia 6 de dezembro de 2017 e obteve a classificação de 18 valores.

- Cláudia Patrícia Basílio Manco: tese realizada ao obrigo do convénio entre o LNEC e a FCT-UNL com o tema *Análise comparativa de leis de enfraquecimento em modelos de partículas: aplicação a betão e rocha*, orientada pelos investigadores Nuno Monteiro Azevedo e Maria Luísa Braga Farinha, do LNEC, e pelo Professor João Rocha de Almeida, da FCT-UNL. O acolhimento no LNEC teve início no dia 20 de outubro de 2017.
- Igor Acoob Varagilal: tese realizada ao obrigo do convénio entre o LNEC e a FCT-UNL com o tema *Análise de estabilidade em barragens gravidade para o sismo máximo de projeto: modelos hidromecânico e hidrodinâmico*, orientada pelos investigadores Nuno Monteiro Azevedo e Maria Luísa Braga Farinha, do LNEC, e pelo Professor João Rocha de Almeida, da FCT-UNL. O acolhimento no LNEC teve início no dia 6 de outubro de 2017.
- Patrícia Filipa Lopes Reis: tese realizada ao obrigo do convénio entre o LNEC e a FCT-UNL com o tema *Análise da estabilidade em barragens gravidade para ações estáticas: modelo de contacto com energia de fratura*, orientada pelos investigadores Nuno Monteiro Azevedo e Maria Luísa Braga Farinha, do LNEC, e pelo Professor João Rocha de Almeida, da FCT-UNL. O acolhimento no LNEC teve início no dia 3 de outubro de 2017.
- Valdemiro Semedo Robalo: tese realizada ao obrigo do convénio entre o LNEC e a Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias (ULHT) com o tema *Segurança de barragens de betão e alvenaria*, orientada pelas investigadoras Noemi Schclar Leitão e Maria Luísa Braga Farinha, do LNEC, e pelo Professor Elói Figueiredo, da ULHT. O acolhimento no LNEC teve início no dia 3 de outubro de 2016, mas os trabalhos para a elaboração da dissertação de mestrado foram interrompidos por motivos administrativos da Universidade. O acolhimento no LNEC terminou no dia 20 de dezembro de 2017.

3.4 Participação em júris de teses elaboradas no âmbito do projeto

- Noemi Schclar Leitão, membro do júri, como arguente, da tese de Glória Gonçalves de Mendonça.
- Nuno Monteiro Azevedo, membro do júri, como arguente, da tese de Mariana Salles da Silva Simarro.
- Sérgio Oliveira, membro do júri, como orientador, da tese de Mariana Salles da Silva Simarro.
- Sérgio Oliveira, membro do júri, como orientador, da tese de Rafael Manuel da Silva Ramos.

3.5 Deslocações a barragens

Os investigadores da equipa de trabalho do projeto DAMFA aproveitaram as visitas de inspeção a obras, acordadas entre o LNEC, a Agência Portuguesa do Ambiente e os donos de obra, para proporcionar a alunos de mestrado e doutoramento a deslocação a diferentes barragens. Assim:

- a aluna de mestrado Patrícia Reis acompanhou a investigadora Maria Luísa Braga Farinha na visita de inspeção à barragem do Pedrógão, no dia 19 de outubro de 2017;
- o aluno de doutoramento Miguel Rodrigues acompanhou o investigador Sérgio Oliveira na visita de inspeção à barragem de Corgas, no dia 21 de setembro de 2017;
- a aluna de mestrado Glória Mendonça acompanhou a investigadora Maria Luísa Braga Farinha na visita de inspeção à barragem do Carrapatelo, nos dias 20 e 21 de junho de 2017;
- a aluna de mestrado Glória Mendonça acompanhou o investigador Nuno Monteiro Azevedo na visita de inspeção à barragem da Régua, nos dias 5 e 6 de abril de 2017.

As ajudas de custo da investigadora Noemi Leitão e da BIIIC Eloísa Santos, que participaram na visita de inspeção à barragem de Pedrógão, foram enquadradas no projeto DAMFA.

4 | Financiamento externo

4.1 Candidatura a financiamento de projetos IC&DT

Com o objetivo de obter financiamento externo para a execução do projeto DAMFA foi apresentada, em maio de 2017, uma candidatura no âmbito do concurso Projetos de IC&DT em todos os Domínios Científicos 2017 (AAC Nº02/SAICT/2017). A candidatura foi promovida pelo LNEC, em colaboração com a NOVA.ID.FCT.

O projeto submetido tem o mesmo nome e o mesmo acrónimo do projeto P2I, mas foi ajustado de modo a cumprir com as exigências do concurso. A equipa de trabalho mantém-se, tendo havido um reajuste nas percentagens de tempo de afetação ao projeto de cada investigador. O investimento elegível para o LNEC é de 213028,33 euros e contempla missões, equipamento científico, bolsas de investigação para mestres e um contrato para investigador auxiliar.

O Professor Giovanni Barla declarou a sua disponibilidade para ser consultor externo do projeto. O Professor Giovanni Barla formou-se no Politecnico de Torino em 1965, e obteve o mestrado e o doutoramento na Columbia University, em Nova York, em 1967 e em 1970, respetivamente. Foi professor de mecânica das rochas na Columbia University e no Politecnico de Torino. Foi vice-presidente da faculdade de engenharia do Politecnico de Torino e diretor do Departamento de Estruturas e Engenharia Geotécnica desde 2003 até 2011. Atualmente é editor da revista *Rock Mechanics and Rock Engineering*.

Neste momento ainda não são conhecidos os resultados da candidatura.

4.2 Bolsas de estudo

O orçamento do projeto DAMFA aprovado pelo LNEC destina-se essencialmente a financiar os recursos humanos envolvidos. De salientar, no entanto, que no âmbito do projeto foram obtidas as seguintes bolsas de estudo:

- bolsa de doutoramento com a referência SFRH/BD/116417/2016, financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) concedida ao bolseiro de doutoramento com acolhimento (BDA) no LNEC André Filipe Moreira Alegre;
- bolsa outorgada pela rede *European Cooperation in Science and Technology* (COST) para participar no curso *Modelling of cement based materials and structures*, organizado no âmbito da COST ACTION TU1404, que decorreu na Polónia, de 9 a 13 de outubro de 2017, concedida à BIIC Eloísa Castilho dos Santos.

4.3 Trabalhos por contrato

O projeto DAMFA tem permitido o desenvolvimento, aperfeiçoamento e manutenção de códigos de simulação numérica, que permitem a análise do comportamento de barragens de betão.

Destaca-se a aplicação dos referidos códigos no acompanhamento em tempo real do comportamento observado durante o primeiro enchimento da barragem de Foz Tua. Este trabalho, realizado pela investigadora Noemi Leitão e pela bolsista Eloísa Castilho dos Santos, foi acordado com a EDP no âmbito do Plano de intervenção do LNEC durante a construção e o primeiro enchimento da albufeira do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua. Este plano contemplava a interpretação do comportamento da barragem com base em modelos a elaborar pelo LNEC, que, para além dos elementos de projeto, incluiria toda a informação relevante compilada durante a construção.

5 | Recursos mobilizados e indicadores de projeto

A equipa de projeto envolve seis investigadores do LNEC e um Professor da NOVA.ID.FCT, com as percentagens de tempo de afetação ao projeto indicadas no Quadro 5.1. No mesmo quadro são indicadas as percentagens de tempo dedicadas ao projeto por cada um dos investigadores do LNEC desde o início de 2017 até ao final de outubro do mesmo ano.

Quadro 5.1 – Percentagem de tempo de afetação dos investigadores envolvidos no projeto

Nome	Categoria	Sector/Entidade	Afetação ao projeto (%)	Tempo dedicado ao projeto (%)
Maria Luísa Braga Farinha	Investigadora Auxiliar	DBB/NO	30%	25%
Nuno Monteiro Azevedo	Investigador Auxiliar	DBB/NMMR	30%	20%
Noemi Schclar Leitão	Investigadora Principal	DBB/NO	25%	10%
Sérgio Oliveira	Investigador Auxiliar	DBB/NMMR	15%	10%
Romano Câmara	Investigador Coordenador	DBB/NMRR	10%	10%
Eloísa Castilho dos Santos	Bolseira de Iniciação à Investigação Científica	DBB/NO	30%	40%
João Rocha de Almeida	Professor Associado	NOVA-ID-FCT	20%	20%

No Quadro 5.2 apresentam-se os indicadores de projeto previstos, realizados e a decorrer. Da análise do quadro verifica-se que o projeto está a decorrer de forma muito satisfatória, havendo a expectativa de que os indicadores previstos serão atingidos.

Quadro 5.2 – Indicadores de projeto previstos, realizados e a decorrer

Descrição	Previstos	Realizados	A decorrer
Teses de doutoramento	1	-	2
Teses de mestrado	6	3	3
Artigos em revista nacional	2	1	-
Artigo em revista internacional	6	1	-
Comunicações em encontros científicos	8	7	2
Relatórios LNEC	0	4	-

6 | Considerações finais

Os trabalhos de desenvolvimento do projeto DAMFA estão a decorrer de forma adequada, salientando-se a excelente interligação não só entre os investigadores dos dois núcleos do DBB envolvidos no projeto (Núcleo de Observação e Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas), mas também com os professores universitários da NOVA.ID.FCT, parceira do projeto, do IST e do ISEL. Salienta-se também o esforço da equipa de investigadores na divulgação do trabalho desenvolvido e na transmissão de conhecimentos a alunos de mestrado, doutoramento e bolsiros de investigação.

O projeto DAMFA que se apresenta em anexo continua a revelar-se adequado, pelo que não se propõem ajustes.

De salientar, por fim, como ficou demonstrado no acompanhamento do primeiro enchimento da barragem de Foz Tua, a potencialidade de aplicação dos códigos desenvolvidos em trabalhos de consultoria. Este facto é indicador de que a médio prazo o investimento efetuado no desenvolvimento das ferramentas numéricas é autofinanciável.

Lisboa, LNEC, janeiro de 2018

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Modelação e Mecânica
das Rochas



Luís Lamas

O Chefe do Núcleo de Observação



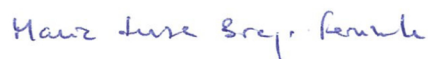
António Tavares de Castro

O Diretor do Departamento de Barragens de
Betão



António Lopes Batista

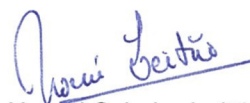
AUTORIA



Maria Luísa Braga Farinha
Investigadora Auxiliar



Nuno Monteiro Azevedo
Investigador Auxiliar



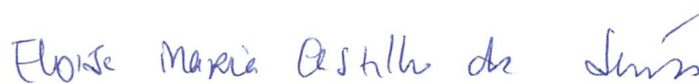
Noémí Schclar Leitão
Investigadora Principal



Sérgio Oliveira
Investigador Auxiliar



Romano Câmara
Investigador-Coordenador



Eloísa Castilho dos Santos
Bolsista de Iniciação à Investigação Científica

ANEXO
Ficha de projeto DAMFA

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

Dados Gerais

1.1 Identificação do projeto

Designação

Soluções de ponta para a avaliação sustentável das fundações de barragens de betão

Cutting-edge solutions for sustainable assessment of concrete dam foundations

Acrónimo / Acronym

DAMFA

Unidade Departamental proponente

DBB

Setor

NO e NMMR

Investigador Responsável / Responsible

Maria Luísa Braga Farinha

Nuno Monteiro de Azevedo

Duração (meses)

48

Data de início (ano-mês-dia) / Starting date

2016-7-1

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

Par principal (obrigatório)

E1, T1

Par secundário (opcional)

E4, T1

1.3 Entidades intervenientes

Entidade coordenadora

LNEC

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

Parceiros internos / Internal partners

DBB/NO e DBB/NMMR

Parceiros externos / External partners

NOVA.ID.FCT – Associação para a Inovação e Desenvolvimento da FCT

Entidade externa interessada / External interest

Unidades de Investigação nacionais e internacionais, Entidades reguladoras, Empresas de consultoria e projeto, Donos de Obra

Financiamento externo (S/N) / External funding (Y/N)

N

1.4 – Resumo / Abstract:

Em Inglês / In English

The rock mass foundation of a concrete dam is a crucial element when considering safety, as the majority of recorded failures were due to problems in the foundation rock mass. Foundation behaviour is influenced by the load transferring mechanism from the dam body to the dam foundation. Regarding concrete dams, the main static loads to take into account during normal operation are the hydraulic pressure and variations in ambient temperatures. It is necessary to analyse the interaction between the mechanical and the hydraulic behaviour in a coupled way, taking into account that changes in the structure's temperature give rise to dam displacements that may affect the hydromechanical behaviour. It must be highlighted that it is essential to take both couplings into account in order to assess the behaviour and safety of the dam foundation system.

The main purpose of the project is to develop a numerical multiphysic integrated tool for the sustainable assessment of concrete dam foundations which intends to supersede the current available commercial software that has been acquired by LNEC for dam foundation analysis, which lacks thermal coupling and fully coupled hydromechanical behaviour.

The development of the above mentioned tool is particularly relevant to assess the safety of a large number of concrete dams built in the third quarter of the 20th century, for which stability is found to fall short of modern guidelines. It is also going to be used to assess dam foundation behaviour effects due to variations in the main loads, as the extreme values of these loads are influenced by climate changes, which is a field that merits further attention.

For sustainable reasons it is necessary to guarantee that concrete dams, with an expected lifetime of about 50 years, remain operational as long as possible, in order to avoid new constructions and thus minimize the effect on the environment. Presently, dam design guidelines recommend simplified stability analysis procedures considering a zero cohesion and tensile strength interface model.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

Stability analysis for static and seismic loads may be improved by incorporating fracture energy concepts which allow better representation of the actual material behaviour (concrete/rock interface with cohesion).

Significant future climate changes are expected to occur (including extreme temperature variations and floods) which may affect the operational condition of this type of structures, designed, and in most cases rehabilitated, for stable climate conditions recorded in the past. The accurate modelling of the water level and the temperature variation of the concrete dam body and their influence on the hydromechanical behaviour is mandatory as their extreme variation may lead to dam instability and/or global failure. Temperature variation during the first filling of the reservoir has to be properly simulated, as the majority of recorded failures occurred during the first filling of the reservoir or shortly after it was completed.

The current project will provide a competitive advantage in consulting services not only for the tool value but also for the knowledge that will be gained by the research team. It will also allow LNEC to maintain its prominent role in the development of project guidelines and recommendations.

Em Português / In Portuguese

O maciço rochoso de fundação das barragens é um elemento crucial na segurança das obras, pois a maioria das roturas de barragens de betão ocorreram devido a problemas no maciço de fundação. O comportamento da fundação é influenciado pelo mecanismo de transferência de cargas do corpo da obra para a fundação. Em barragens de betão as principais ações estáticas a considerar em situação de exploração normal são a pressão hidrostática e as variações de temperatura. É necessário analisar de forma acoplada a interação entre o comportamento mecânico e o comportamento hidráulico, tendo em conta que variações do campo térmico no corpo da obra dão origem a deslocamentos da barragem que provocam deformações na fundação, que podem influenciar o comportamento hidromecânico. De salientar que é fundamental ter em consideração as interações referidas para analisar o comportamento e a segurança do sistema barragem/fundação.

O principal objetivo do projeto é desenvolver uma ferramenta numérica que permita analisar o maciço de fundação de barragens de betão de uma forma integrada, de modo a suplantarem os programas comerciais que têm sido adquiridos pelo LNEC para a análise da fundação de barragens, que não consideram a interação do comportamento mecânico com os comportamentos térmico e hidráulico.

O desenvolvimento desta ferramenta é particularmente importante para avaliar a segurança de um elevado número de barragens de betão construídas no terceiro quartel do século 20, muitas das quais não cumprem as atuais recomendações. No âmbito deste projeto, a ferramenta será usada para avaliar os efeitos no comportamento da fundação das variações nas principais ações que atuam sobre as barragens, cujos valores extremos são influenciados pelas alterações climáticas, assunto que merece particular atenção.

Por questões de sustentabilidade é necessário garantir que as barragens de betão, projetadas para um tempo de vida útil de cerca de 50 anos, se mantêm operacionais durante o maior período de tempo possível, de modo a evitar a construção de novas barragens e assim minimizar despesas e o impacto no ambiente. Atualmente, as normas de projeto de barragens recomendam procedimentos de análise simplificados considerando um modelo de interface com coesão e tensão à tração nulas. É possível melhorar a análise de estabilidade, sob ações estáticas e ações sísmicas, incorporando conceitos de energia da fratura, que representam de forma mais realista o comportamento do material (interface betão/rocha com coesão).

Está prevista a ocorrência de significativas alterações climáticas (variações da temperatura e cheias com valores extremos mais gravosos) que podem afetar a operacionalidade das barragens de betão, projetadas, e em muitos casos reabilitadas, para condições climáticas estáveis observadas anteriormente. É essencial modelar de modo adequado não só as variações do nível da água na albufeira e das variações de temperatura no corpo da obra mas também a sua influência no comportamento hidromecânico, já que variações extremas destas ações podem conduzir a instabilidade ou/e a rotura global das obras. A variação de temperatura no corpo da obra durante o primeiro enchimento da albufeira tem de ser analisada e modelada com detalhe, já que a maioria das

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

roturas em barragens de betão ocorreu nesta fase de vida das obras ou pouco tempo depois do final do enchimento.

O projeto que se apresenta irá proporcionar uma vantagem competitiva em serviços de consultoria não só pelo valor da ferramenta desenvolvida mas também pelo conhecimento que será adquirido pela equipa de investigadores envolvida no trabalho. Os estudos efetuados e os resultados obtidos irão permitir que o LNEC mantenha o seu papel de destaque no desenvolvimento de orientações de projeto e recomendações que contribuem para aumentar a segurança das obras.

Descrição / Description:**2 - Fundamentação / Justification**

Concrete dams are built with their foundations in rock masses, which are discontinuous and, in most cases, heterogeneous and anisotropic. The foundation is a crucial element when considering dam safety [L1], thus safety control of concrete dams must include detailed analysis of monitored data and accurate models for foundation behaviour interpretation. In the foundation rock masses seepage takes place mainly through the rock mass discontinuities and there is great interdependency between the hydraulic and mechanical behaviours. Following the accident at Malpasset dam, in France in 1959, several studies were carried out which highlighted the significance of the hydromechanical behaviour of dam foundations [L2], and therefore this hydromechanical interaction is a critical aspect to take into account in concrete dam structural safety assessment.

As mentioned in [L3], during the past two decades most of the research and development on hydromechanical coupling in fractured rocks and most applications of hydromechanical coupled analysis have been conducted as part of oil and gas exploration, hot-dry rock geothermal energy investigations, and studies for nuclear waste disposal. Thus, there is still need in the field of dam foundation engineering to develop and/or incorporate from other scientific areas [L4] accurate models for interpretation of the foundation behaviour.

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 [L3, L5]. Previous work showed that equivalent continuum models can be used successfully [L6, L11, L15] when the hydraulic behaviour (water pressure and seepage losses) is the sole concern. For dam stability analysis the most straightforward approach is to take into account the main foundation discontinuities [L7, L26]. 2D discrete element based models that take into account the coupling between the hydraulic and mechanical behaviours have been proposed. Applications to different dams have been developed using preferentially the code UDEC [L8], which proposes a hydraulic model that considers the effect of stresses in the discontinuities on the rock mass permeability in a simplified way [L8, L9, L10, L11, L12, L13].

Arch dams require 3D analysis, but no numerical tools are available that can solve in an integrated manner the hydromechanical coupled analysis including thermal loading influence and the subsequent stability assessment for static and seismic loads [L14], due to the difficulties related to 3D discontinuous hydromechanical analysis. Traditionally, a continuum based foundation model is used to perform the hydraulic analysis [L15] and the water pressures obtained are then taken into account in a discontinuum mechanical model [L16], which is then used for stability analysis [L25].

The starting point of the project will be the development of a fast, robust and efficient hydromechanical numerical analysis tool that also incorporates a stability analysis module. In order to adopt a FE based model that represents the discontinuities and to ease the process of creating the associated flow

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

network, it is necessary, as previously done in 2D [L17], to include a pre-processing stage, ensuring that the triangular representation of the block surfaces that interact are fully compatible (facet to facet interaction only). The outer surface of each block in which the foundation is discretized will be meshed with triangular elements following a 2D Delaunay generation algorithm previously implemented in a particle model [L18]. The internal tetrahedra mesh of for each block, necessary to represent the block deformability, will be based on a 3D Delaunay generation algorithm that has already been developed for a particle generation algorithm [L19] which includes boundary recovery algorithms [L20]. A more robust boundary recovery 3D algorithm based on the advancing front algorithm will be developed if found necessary [L21].

Given the need to have an integrated solution tool, a 3D hydromechanical model based on the FE method capable of handling the problem of fluid flow in deforming porous media will be developed [L5], taking advantage of the fact that interactions between blocks are solely facet to facet. The model will allow fluid flow through both the rock matrix and the foundation discontinuities [L7], using volume finite elements and zero-thickness interface elements.

The experience acquired in developing 3D thermo-chemo-mechanical models of dams during previous research programs carried out at LNEC [L28, L29, L30] will be incorporated and further developed in the present research program. The modelling of the cooling water pipes will be also addressed and the necessary developments will be pursued. An accurate modelling of the dam body (including thermal deformation and possible cracking) is fundamental in order to consider precisely the forces that are exerted at the mass foundation.

In the evaluation of failure scenarios involving dam body failure, fracture energy concepts have already been introduced in the constitutive models [L22]. A similar approach will be incorporated in the stability analysis of dam foundations, and thus constitutive models taking into account fracture energy will be implemented [L23, L24], which will allow a response closer to the actual behaviour of a concrete/rock interface to be obtained.

During the computational codes development process, systematic and comprehensive work will be carried out to verify, validate and maintain not only the codes developed within the present project but also previously developed codes used as a basis for research on the different subjects. Simplified code manuals will be written whilst developing the numerical codes.

Guidelines regarding the generation of the foundation model still need to be addressed [L26]. By incorporating fluid flow through both the matrix and the discontinuities a better agreement with experimental data is expected to be obtained.

Another aspect that merits further attention, and that deserves to be studied within this project is that global environmental conditions are changing [L27], including extreme temperature gradients and floods, and this poses several challenges to structures such as dams. It is intended to quantify the effect that temperature increase and water level increase (upstream and downstream from the dam) have on the overall dam behaviour.

A previously research project submitted to Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) in January 2015 was used as a basis for the development of the present project. The FCT evaluation panel statement and rating is presented in Appendix 1, and although the submitted project was not recommended for funding, the evaluation panel provided quite good comments and highlighted the significance of the project idea and the clarity of the proposal.

In addition to the above-mentioned evaluation, the research team obtained three supporting letters: one from the University of Lisbon, Instituto Superior Técnico (IST), presented in Appendix 2, another from the University of Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), presented in Appendix 3, and the other one from the Laboratory for Civil Engineering (LEC) in Cape Verde, in Praia, presented in Appendix 4. Professor Carlos Tiago Fernandes carries out his research in IST, in the Department of Civil Engineering and Architecture. He highlights the relevance of the proposal and shows his interest in future collaborations in order to test and validate, in an academic environment, the numerical codes developed. Professor Topa Gomes, Coordinator of the Geotechnical Division of FEUP, focuses not only on the scientific value and technical interest of the project but also on the team experience. Dr. Jair Rodrigues, President of LEC, would like to receive scientific papers published by the team members and to use the numerical tool developed within the project to analyse the behaviour of the recently built dams in Cape Verde.

3 – Objetivos / Objectives

The main focus of this project is the safety assessment of concrete dams, which must be carried out in a sustainable manner by the civil engineering teams responsible for the safety of this important type of structure. It is well known that the majority of recorded failures of concrete dams were due to problems in the foundation rock mass, mainly during the first filling of the reservoir. These rock masses have a coupled hydromechanical behaviour, which is complex and needs to be adequately analysed using numerical models. The thermal coupling also needs to be assessed and properly considered given its importance during the first filling. Most of the research and development on hydromechanical coupling in fractured rocks has been conducted for different research fields [L3], thus, there is still need to develop and/or incorporate accurate models for dam foundation behaviour interpretation [L4].

The numerical analysis of concrete arch dams requires three-dimensional (3D) models. However, there are no commercial numerical tools able to address the hydromechanical behaviour of the dam foundation and the subsequent stability analysis in a 3D integrated manner. Simplified methodologies have been used, in which the hydraulic and the mechanical behaviours are analysed in an uncoupled way and stability is analysed separately, but, from the point of view of the practitioner engineer, these procedures are difficult to apply. Thermal coupling is usually disregarded.

The main idea of this project is to develop an innovative numerical 3D tool, based on work previously done in 2D by members of the research team, which can take adequately into account not only the specific features of dam foundations but also their thermo-hydromechanical behaviour.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

There are currently around 50,000 dams classified as large dams all over the world, and their operational lifetime has to be prolonged as much as possible, keeping in mind that these structures must remain safe, as any failure may lead to a great loss of human lives and environmental disasters. The sustainable assessment of the behaviour and safety of these structures is thus essential. Nowadays, the potential effects of climate change are increasing the interest in this field, as it is necessary to prepare adaptation options for these structures or design adaptations, and to foresee if the effects of the climate changes on the hydromechanical behaviour are serious enough to risk the operating dams' safety, which can only be studied using adequate numerical models.

Based on the experience of the research team, a new numerical model will be developed to solve the above-mentioned problem in an integrated manner (Activities 1, 2 and 3). More realistic constitutive models (interface and volume), which include fracture energy concepts, will be used (Activity 4), in order to improve the safety assessment. This is especially relevant for the safety assessment of old dams, in which the consideration of the actual material properties may lead to significant reduction of costs of rehabilitation works.

The model has to 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 (validation stage). Finally, the model will be applied for the assessment of the behavior and safety analysis of several dams.

A systematic analysis of the results will be carried out in order to detect possible errors in the modelling process, parameters, loads or boundary conditions, and to clarify how changes in the model affect the numerical outcome.

The adaptation to 3D of a 2D model previously developed by researchers of the team and which has already been validated, will allow easier and faster analysis, more complex problems to be analysed and more accurate results to be obtained, with lower computing times. This will overcome the need to have an adequate integrated numerical tool, and will allow the development of a rational analysis methodology (Activities 5 and 6), in order to reduce computational times and costs. One of the aims is that the tool that is developed will be used by practitioner engineers responsible for dam safety.

This research project is going to be carried out in cooperation with the New University of Lisbon, including the completion of several master thesis and one PhD thesis. External financing through FCT grants for individual PhD scholarships will be pursued for master students that show research and development capabilities.

The starting point of the project is based on the current available human resources at LNEC and FCT. With the completion of task 3 it will be possible to have a pilot tool that will ease the process of finding private funding from leading worldwide dam consulting and software development companies which will most likely be interested either as users or as partners in the subsequent commercial development. Research project funding from national and European grants will also be attempted for

equipment, human resources and missions, either presenting the project as a whole or as a part of a larger project.

4 - Contribuições inovadoras / Innovative contributions

This project will allow the team to:

- i) present an innovative model which can be effectively applied to the safety assessment of concrete dam foundations (Activities 1 and 2);
- ii) simulate in a coupled way the hydraulic, thermal, chemo and mechanical phenomena (Activities 3 and 6)
- iii) carry out improved safety assessment for static and seismic loads, made possible by a more realistic representation of the constitutive models (Activities 4 and 8);
- iv) present a methodology to define foundation discontinuities that must be represented in the model (Activity 5),
- v) present the advantages of using a continuum/discontinuum model instead of a fully discontinuum model and show in which cases this simplification is valid (Activity 5);
- vi) assess the influence of expected climate changes (increases in temperature amplitude and in the quantity of precipitation to extreme values) on the hydromechanical behaviour of dam foundations and how these changes may affect the dam stability (Activity 7).

5 – Metodologia / Methodology

The main tasks involved within this project are briefly presented below:

Activity 1. 3D mesh generation (compatible surfaces) – small and large displacement interaction:

Task 1.1. A discontinuous mechanical model based on joint finite elements (FE) is computationally less demanding than those based on discrete elements technology [L12, L13, L14A, L16] and allows better representation of the stress distribution. However, in order to be able to adopt a faster and more accurate mechanical finite element (FE) based model that represents the 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 interactions. The pre-processing algorithm to be devised will be based on the algorithm previously proposed for 2D block interactions which is able to generate a foundation model in which the blocks have fully compatible edge to edge interactions based on FE interface joint elements [L17]. The 3DEC software [L16] discrete fracture network generation capabilities will be used to generate the discontinuous foundation model taking into account the main discontinuities. With this

type of algorithm, the initial foundation single block is subdivided into several sub-blocks that interact with each other through the outer boundaries. As in the 2D version [L17], the algorithm will first include on neighbouring blocks the possible vertexes/edges/surfaces that are missing and need to be taken into account in order to be able to have fully matched final triangular surfaces representing the blocks interaction. With this purpose the contact detection algorithms developed for discrete particle simulations will be enhanced [L18, L19];

Task 1.2. After ensuring that each block recognises the boundary surfaces through which it interacts with the neighbouring blocks, the outer boundary of each block will be refined and meshed with triangular elements adopting a 2D Delaunay generation algorithm that has been implemented for a detailed particle model [L18]. In order to take block deformability into account, an internal mesh of tetrahedral elements has to be defined for each block. With this purpose, a 3D Delaunay generation algorithm that has been developed for a 3D particle model [L19] will be adopted. In order to guarantee that the triangular elements of the outer boundary are present in the final tetrahedral mesh it is necessary to adopt boundary recovery algorithms [L20]. The pre-processing algorithm will be verified and validated using several dam foundation discontinuous models that have been previously developed [L14A, L14B]. If in the verification process it is found that the adopted boundary recovery algorithm does not provide a full boundary recovery, an algorithm based on the advancing front tetrahedra generation scheme will be developed [L21].

At the end of this task it will be possible to create, from an initial discrete fracture network representing the foundation discontinuities, a mechanical representation of the block interactions based on FE technology, which will allow a much faster and more accurate mechanical response. With a perfect facet to facet block interaction, the discrete fracture network flow model may be straightforwardly generated from the interface FE joint mechanical elements. The contact interaction based on FE technology is valid only when small displacements are assumed, but it is expected that, as in 2D [L17], results similar to those obtained with a more computational intensive approach based on discrete element technology [L16] will be obtained. The reduction of computational times is important especially in seismic stability analysis [L26].

Task 1.3. Implementation of a 3D contact interaction based on a sphere particle / triangular surface interaction following the 2D contact model which considers a circular particle / edge interaction allowing large displacements [L17] and the principles stated in the pinball method [L33]. It is a very robust contact interaction scheme that will most likely handle well the transition of facet/facet contact to facet/vertex or vertex/vertex contact which is known to be an important feature when modelling large displacements in 3D.

Task 1.4. In order to reduce computational times, a hybrid contact model will be proposed that adopts the detailed contact model proposed in the foundation areas where a significant displacement is occurring, and the finite element 2D interface based model in the remaining area. Criteria to switch from a simplified small displacement interaction to a more accurate detailed contact model will be defined. The main results concerning the validation of both large and small displacement interaction models will be presented in a scientific paper that will be submitted to a research journal (numerical modelling, rock mechanics).

Activity 2. FE based hydromechanical coupled model – continuum/discontinuum:

Task 2.1. As mentioned in Activity 1, the hydraulic model will have a perfect correspondence with the mechanical model (volume FE and interface FE). For this reason, and in order to be applied to dam foundation analysis, it is required that the pre-processing tool that creates a model with facet to facet interactions be completed. Nevertheless, it is possible and recommended to start the development of the coupled model using simplified models where the discrete fracture network is guaranteed to be fully compatible.

In this task, a 3D hydromechanical model based on the FE method and capable of handling the problem of fluid flow in deforming porous media [L5] will be developed.

The displacement of the solid phase and the fluid pressure are considered as the main variables. The mechanical behaviour of a saturated porous material is described combining the linear momentum balance equation for the mixture solid/water, the general form of the effective stress principle, the constitutive relationship for solid phase relating effective stresses to strains, and the compatibility equation that links strains to displacements. The mass balance equation for water is combined with the general form of Darcy's law to describe the flow behaviour of the porous medium under the influence of the solid skeleton deformation.

The model developed will allow fluid flow through both the rock matrix and the foundation discontinuities [L7], using volume FE elements and zero-thickness FE interface elements, respectively. Since hydraulic and mechanical coupling has to be considered [L11], a sequential explicit coupling between the hydraulic and mechanical analysis will be carried out [L3]. The hydromechanical model will result from the coupling between the mechanical model and the hydraulic model. In a simplified way, the same timestep is used in both domains: the minimum value of all timesteps over all the model's domains [L17].

Task 2.2. The principal results will be presented in a scientific paper that will be submitted to a research journal (numerical modelling, dam engineering, rock mechanics) featuring the 3D hydromechanical model, and comparing the results with simplified

approaches and with in situ recorded discharges and water pressures from dams in operation.

Activity 3. FE based thermo-chemo-mechanical model

Task 3.1. Cooling coils are embedded in each block during construction by laying a continuous run of thin pipes on the top of each lift before the placement of the next lift. Water can then circulate through the embedded pipes to cool the mass concrete for reducing the peak temperature during placements and initial curing and during the final cooling period to open the contraction joints for grouting after the blocks are completed.

Numerous numerical studies have been conducted to analyse the temperature field in mass concrete embedded with cooling pipes. These methods can be classified into two main categories: the finite element equivalent method and the discrete method.

The former considers the effect of cooling pipes in an average sense and suggests that heat removal by a cooling system could be regarded as a negative heat source. Consequently, the method cannot simulate the actual effect of pipe cooling in different position and the gradient of cooling pipe.

In the second method the cooling water pipe is simulated by an explicit thermal-fluid line element. The simulation of the temperature field by the heat-fluid coupling method can reflect the influence of the cooling pipes, water-temperature rise along the flow, and directional changes in flow on temperature distributions. The main drawback is that extremely refined meshes have to be generated around the pipe axis to obtain precise temperature field.

In this work, the two alternatives will be explored. The element proposed in [L31] will be implemented. The developed tools will allow a rational modelling of the thermal coupling during the first filling and to assess its influence on the dam foundation stability.

Task 3.2. A thermal-chemo-mechanical based explicit model will be devised for 3D particle simulations. It will allow the current particle modelling [L18] to incorporate thermal cracking. In Activity 4 a detailed discrete particle model (PM) will be adopted in the zones where cracking is expected to occur.

Task 3.3. To improve the computational efficiency of the explicit thermal-fluid line element approach, a substructure technique will be implemented. Following the concept given in [L32] the substructure can be defined as a group of finite elements that, upon assembly, may be regarded as an individual element for computational purposes and results on breaking up a structure into distinguishable portions. The implementation of such algorithm will also allow taking advantage of the physical division in the dam-foundation rock system. Substructuring has been addressed also in parallel computations and multiphysics simulations.

Task 3.4. The results will be compared with the data obtained in the cooling of Foz Tua dam and the conclusions will be presented in a scientific paper that will be submitted to a research journal.

Activity 4. Development of constitutive models that include fracture energy concepts and nonlinear behaviour:

Task 4.1. In the evaluation of failure scenarios involving the dam body fracture energy concepts have already been introduced in the constitutive models [L22]. Similar approaches will be incorporated in the stability analysis of dam foundations that will allow a response closer to the actual behaviour of a concrete/rock interface to be obtained. A 3D contact interface model based on the work of [L23] will be implemented. With the latter model, a smooth transition between pure tension and shear failure is obtained by adopting a single hyperbolic yield function that represents both mode I and mode II fracture. The model also includes a second hyperbolic function which enables the representation of crushing at the rock interfaces.

A microplane based model [L24] will also be developed in order to take nonlinear behaviour within the dam and rock mass volumes into account, which can occur prior to the formation of the failure mechanisms. It has been shown that these models have advantages in terms of failure modelling and it is straightforward to incorporate thermal-cracking and cycling loading (seismic analysis).

Task 4.2. 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 [L14A].

Task 4.3. Modelling of the thermal cracks by 3D interface elements based on the formulation presented in task 4.1 will be also explored. The simulation of the evolution of the thermal cracks appeared in Bouçã dam will be addressed. The main results will be presented in a scientific paper that will be submitted to a research journal (structural engineering, dam engineering).

Activity 5. Fracture network lumping validation:

Task 5.1. At the beginning of this task a robust, efficient and accurate toolkit based on FE technology that integrates a hydromechanical analysis tool within the same package, allowing different modelling possibilities, and a stability assessment tool will be fully developed. It will be possible to conduct continuum, discontinuum and continuum/discontinuum based hydromechanical analysis.

A rational methodology for lumping features of the discrete fluid flow network will be devised using the case study of Alqueva dam, which has already been studied in detail by members of the research team, through in situ testing [L11] and numerical discontinuum modelling [L25].

Firstly, a continuum hydromechanical coupled analysis will be performed. The results will be compared with available in situ data and also with numerical data from equivalent continuum foundation models [L15]. Following this, a discontinuum analysis based on the previously developed foundation model [L25] will also be performed. The numerical results (fluid pressure and quantity of water that flows through the foundation) will be compared with the results of a continuum numerical model and with in situ data. Next, it will be assessed if a continuum/discontinuum hydromechanical model predicts the actual foundation response more accurately than the discontinuum model.

It is expected that by allowing fluid flow through the rock matrix (low hydraulic conductivity) the global response will be improved and the discontinuous foundation model will not require a large number of discontinuities to be taken into account.

In order to validate this hypothesis a more detailed discontinuum foundation model will be generated (including a high number of discontinuities) and a hydromechanical analysis will be performed. The developed numerical toolkit has the great advantage of allowing detailed discrete foundation models, as it has low computational costs due to the pre-processing step that ensures facet to facet interactions.

Task 5.2. The numerical studies carried out within this task will enable the research team to produce guidelines regarding how detailed the fracture network should be.

The principal results will be presented in a scientific paper research journal (dam engineering, rock mechanics) featuring the 3D hydromechanical model with a comparison of the different approaches (continuum, discontinuum and both continuum/discontinuum).

Activity 6. Code combination and interfaces:

Task 6.1. The process of transferring information from one code to the next is subject to errors and inconsistencies. One procedure for eliminating the possibility for such errors is to combine all codes such that data transfers occur automatically within the codes as they are run. However, for coupling situations which do not exhibit a high degree of nonlinearity a sequential analysis is more efficient and flexible because it is possible to perform the two analyses independently of each other. Moreover, a complete coupling of all codes eliminates the possibilities of using dissimilar meshes for the solution of different physical problems and requires the implementation of elements specifically formulated to solve the coupled-field interactions directly. There are also practical limitations to a totally coupled series of codes in terms of size relative to computer storage capabilities and in terms of ease in making future substitutions of codes within the package.

The general structure of the whole package will be defined in terms of the codes to be used in combined form or in sequential coupling. The details of these combinations and the reasons for combinations will be studied.

Activity 7. Climate change:

Task 7.1. By the beginning of this task guidelines regarding lumping of the discrete fracture network will have been set and the developed numerical toolkit will have been thoroughly validated.

Significant future climate changes are expected to occur due to global warming (including extreme temperature gradients and floods). Given that the majority of dams have been designed against past stable climate conditions, these extreme climate changes may affect their operational conditions [L27] and studies should be carried out in order to quantify these effects.

The starting point will be the Alqueva dam foundation discontinuous model previously developed and used in the previous activities (Activities 4, 5 and 6). Two additional examples will also be chosen in order to have a full range of examples that represent current and future Portuguese concrete dams. An example of a very high dam will also be analysed based on the geometry of a dam currently operating in China.

On the selected examples use will be made of a discontinuous foundation model similar to that used in the Alqueva dam model and the effect of an extreme temperature increase in the dam body on the dam foundation effective stress and on the flow properties will be quantified.

Task 7.2. Variations in water level upstream from the dam have significant influence on effective stresses and flow paths within the dam foundation, which will be numerically analysed simulating the first filling of the reservoir. The effect of an unexpected water level rise due to extreme rainfall, both in the upstream and downstream areas of the dam will be assessed. It will be verified if these sudden changes in water table levels can lead to permanent changes in the flow properties and in the corresponding foundation effective stresses which can in turn lead to instability and global failure.

With the results obtained, an attempt will be made to include the sensitivity of the foundation thermo-hydrromechanical model to environmental changes in present dam design guidelines.

Task 7.3. A scientific paper will be submitted to a research journal (Dam Engineering, Civil Engineering and Environmental Systems) featuring the influence of new environmental conditions, such as abnormal temperature and/or water level increases, on foundation behaviour.

Activity 8. Dam foundation safety evaluation – fracture energy based:

Task 8.1. The stability analysis of concrete dam foundations 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 [L12, L14A, L14B]. Stability analysis needs to be improved

by incorporating fracture energy concepts allowing better representation of the actual material behaviour (concrete/rock interface with cohesion).

With the constitutive models developed in Activity 4 [L23, L24], which include fracture energy, stability analysis of sliding for static and seismic loading through the dam foundation interface will be performed for the case studies chosen in Activity 7.

Several stability scenarios will be studied for different values of interface contact damage ($D=0$ sound material, $D=1$ completely cracked material). The contact damage threshold for which stability is not achieved will give an indication of the global safety factor associated with the stability analysis scenario. The methodology usually adopted in setting the global safety factor for a dam concrete degradation scenario will also be followed [L22], the water level upstream from the dam will be increased as long as stability is verified. The global safety factor is then given by the load multiplier threshold for which the dam foundation stability still occurs.

It is essential to be aware of how accurately the current simplified procedure predicts safety, as it is important to decide whether a dam that does not comply with current guidelines does in fact need to be retrofitted or the dam lifetime may be longer than previously predicted.

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 including fracture energy concepts.

Task 8.2. In the dam foundation safety evaluation, an effort will be made to use the limit state design methodology with partial safety factors as prescribed in EC7. This document serves as a reference document for the geotechnical design of foundations for special foundation works, such as the foundations of concrete dams [L12], and is the current trend in both structural and geotechnical engineering in Europe and in other countries such as Australia, Canada, Japan and the USA.

Task 8.3. Submission of a scientific paper to a research journal (Structural Engineering, Rock Mechanics) featuring a comparison between the developed methodology and the traditional approach, highlighting the importance of including fracture energy concepts in the stability analysis of dam foundations and in the safety factor definition, indicating the most suitable approaches.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

Referências Bibliográficas / References:

Referência	Ano	Publicação
Reference	Year	Publication
L1	1995	International Commission on Large Dams, Dam failures. Statistical analysis. ICOLD, Paris.
L2	1970	C.Louis, Y.N. Maini, 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, pp. 235-245.
L3	2003	J. Rutqvist, O. Stephansson, The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. Hydrogeology Journal, 11(1): 7-40, DOI: 10.1007/s10040-002-0241-5.
L4	2003	L. Jing, 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.
L5	1998	R.W.Lewis, B.A. Schrefler, The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media, Wiley: Chichester.
L6	2004	C. Callari, N. Fois, R. Cicivelli, 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'04). Beijing, China, 5-10 September 2004.
L7	2008	J.M. Segura, I. Carol, 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, pp. 2083–2101, DOI: 10.1002/nag.735.
L8	2004	Itasca, UDEC - Universal Distinct Element Code, Version 4.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
L9	2004	G. Barla, M. Bonini, G. Cammarata, 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.
L10	2006	E. Gimenes, G. Fernández, G., Hydromechanical analysis of flow behavior in concrete gravity dam foundations. Canadian Geotechnical Journal, vol. 43, pp. 244–259, DOI:10.1139/T05-095.
L11	2010	M.L.B. Farinha, Hydromechanical behaviour of concrete dam foundations. In Situ tests and numerical modelling. Ph.D. Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
L12	2015	M.L.B. Farinha; L. Caldeira; E. Maranha das Neves, 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, vol. 11, nº 10, pp. 1306-1322, DOI: 10.1080/15732479.2014.964265.
L13	2013	E. Bretas, J. Lemos, P. Lourenço, Hydromechanical analysis of masonry gravity dams and their foundations. Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 46, pp. 327–339, DOI: 10.1007/s00603-012-0305-3.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

- L14A 2012 M.L.B. Farinha; J. Lemos; E. Maranha das Neves, Analysis of Foundation sliding of an arch dam considering the hydromechanical behaviour, *Frontiers of Structural Civil Engineering*, vol. 6(1), pp. 35–43. DOI: 10.1007/s11709-012-0142-1.
- L14B 2012 M.P. Miranda, M.L.B. Farinha, Arch dam foundations. Chapter 5 of *Innovative Numerical Modelling in Geomechanics – Ribeiro e Sousa et al. (eds)*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-61661-4.
- L15 2011 M.L.B. Farinha; J. Lemos; E. Maranha das Neves, Numerical modelling of borehole water inflow tests in the foundation of the Alqueva arch dam, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 48(1), pp. 72-88, DOI: 10/1139/T10-052.
- L16 2013 Itasca, 3DEC - 3-Dimensional Distinct Element Code, Version 5.0, User's Manual. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- L17 2015 N.M. Azevedo, M.L.B. Farinha, A hydromechanical model for the analysis of concrete gravity dam foundations, *Revista Portuguesa de Geotecnia*, vol. 133 (March 2015), pp. 5-33 (in Portuguese).
- L18 2015 N.M. Azevedo, M. Candeias, F. Gouveia, A Rigid Particle Model for Rock Fracture Following the Voronoi Tessellation of the Grain Structure: Formulation and Validation, *Rock mechanics and Rock Engineering*, vol. 48, pp. 535-557, DOI 10.1007/s00603-014-0601-1.
- L19 2013 N.M. Azevedo; J. Lemos, A 3D generalized rigid particle contact model for rock fracture. *Engineering Computations*, 30(2):277-300. DOI: 10.1108/02644401311304890.
- L20 2007 J. Liu, B. Chen, Y. Chen, Boundary recovery after 3D Delaunay tetrahedralization without adding extra nodes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 72 (6), pp. 744-756, DOI: 10.1002/nme.2044.
- L21 1997 C.T. Chan and K. Anastasiou, An automatic tetrahedral mesh generation scheme by the advancing front method. *Communications in numerical methods in engineering*, Vol. 13, pp. 33-46.
- L22 2006 S. Oliveira; R. Faria, Numerical simulation of collapse scenarios in reduced scale tests of arch dams, *Engineering and Structures*, Vol 28: 1430-1439. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.01.012.
- L23 2011 L. Macorini, B.A. Izzuddin, A non-linear element for 3D mesoscale analysis of brick masonry structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 85(12), pp. 1584–1608, DOI: 10.1002/nme.3046.
- L24 1985 Z.P. Bazant, B. Oh, Microplane model for pregressive fracture of concrete and rock. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 111(4), pp. 559–582.
- L25 2013 M.L.B. Farinha, J. Lemos, E. Maranha das Neves, Influence of water pressure field on foundation displacements of Alqueva arch dam - A numerical approach. In *Proceedings of the 9th ICOLD European Club Symposium, Venice, Italy, 10-12 April 2013*.
- L26 2014 J. Lemos, 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.
- L27 2014 IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis report*. International Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press; 2014.
- L28 2012 N.S. Leitão, Thermal analysis of concrete dams – environmental thermal

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

- actions. LNEC Report 185/2012-DBB/NMMF, LNEC, Lisbon, Portugal (in Portuguese).
- L29 2013 E. Castilho, Thermal analysis of concrete dams during construction - application to Alqueva dam. M.Sc. Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon University, Lisbon, Portugal (in Portuguese).
- L30 2015 N.S. Leitão, A.T. Castro, J. Cunha, Analysis of the observed behaviour of Alto Ceira dam II during the first filling of the reservoir. Dam World 2015, Lisbon, Portugal, 21-24 April 2015.
- L31 2015 Xinghong Liu, Chao Zhang, Xiaolin Chang, Wei Zhou, Yonggang Cheng, Yin Duan – Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system. Applied Thermal Engineering 78 (2015) 449-459. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050.
- L32 2004 C.A. Felippa, Introduction to finite element methods, Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures, University of Colorado at Boulder, USA, www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/IFEM.d/Home.html
- L33 1991 T. Belytschko and M. O' Neall, Contact-impact by the pinball algorithm with penalty and lagrangian methods, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 31(3), pp. 547–572
- Appendix 1 FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Evaluation panel statement and rating. Project DAMFA submitted to FCT in January 2015
- Appendix 2 Letter of support 1 – Instituto Superior Técnico (IST), Lisbon
- Appendix 3 Letter of support 2 – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto
- Appendix 4 1991 Letter of support 3 – Laboratório de Engenharia Civil de Cabo Verde (LEC), Cape Verde.

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

6 - Plano de trabalhos / Timeline

Atividade Activity	Designação da Atividade Activity denomination	Tarefa Task	Designação da Tarefa Task denomination	1ºS	2ºS	3ºS	4ºS	5ºS	6ºS	7ºS	8ºS
Activity 1	3D mesh generation (compatible surfaces) – small and large displacement interaction	T 1.1	Discontinuous mechanical model: pre-processing stage								
		T 1.2	3D Delaunay generation algorithm to refine and mesh the outer boundary of each block; validation of the pre-processing algorithm.								
		T 1.3	3D particle / surface interaction								
		T 1.4	Hybrid algorithm - Submission of a paper to a scientific journal								
Activity 2	FE based hydromechanical coupled model – continuum/ discontinuum	T 2.1	Development of a 3D hydromechanical model based on the FE method								
		T 2.2	Submission of a paper to a scientific journal								
Activity 3	FE based thermo-chemo-mechanical model	T 3.1	Modelling of the cooling water pipes								
		T 3.2	3D particle thermal model								
		T 3.3	Substructure technique								
		T 3.4	Submission of a paper to a scientific journal								
Activity 4	Development of contact interface constitutive models that include fracture energy concepts	T 4.1	Implementation of contact models that include fracture energy concepts								
		T 4.2	Validation of the constitutive modelling using a previously developed discontinuous model of the Alqueva dam foundation								
		T 4.3	Modelling of thermal cracks - Submission of a paper to a scientific journal								
Activity 5	Fracture network lumping validation	T 5.1	Comparison of results: continuum, discontinuum and both continuum / discontinuum models								
		T 5.2	Guidelines regarding lumping of the fracture network; submission								

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

Atividade Activity	Designação da Atividade Activity denomination	Tarefa Task	Designação da Tarefa Task denomination	1ºS	2ºS	3ºS	4ºS	5ºS	6ºS	7ºS	8ºS
			of a paper to a scientific journal								
Activity 6	Code combination and interfaces	T 6.1	Combination of codes: combined form or sequential coupling								
Activity 7	Climate change	T 7.1	Analysis of the effect of an extreme temperature increase in the dam body on the dam foundation effective stresses and on the flow properties;								
		T 7.2	Analysis of the effect of an unexpected water level rise due to extreme rainfall on effective stresses and flow paths within the dam foundation								
		T 7.3	Submission of a paper to a scientific journal								
Activity 8	Dam-foundation safety evaluation – fracture energy based	T 8.1	Analysis of different stability scenarios for different values of contact damage								
		T 8.2	Use of the limit state design approach in dam foundation safety evaluation								
		T 8.3	Submission of a paper to a scientific journal								

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

7 - Equipa de trabalho / Working team

Nome Name	Categoria Degree	Setor/Entidade Department/Division	Tarefas Role	Afetação ao projeto (%) % of time
Maria Luísa Braga Farinha	Investigador Auxiliar	DBB/NO	Coordenação	30%
Nuno Monteiro Azevedo	Investigador Auxiliar	DBB/NMMR	Coordenação	30%
Noemi Schclar Leitão	Investigador Principal	DBB/NO	Investigador	25%
Sérgio Oliveira	Investigador Auxiliar	DBB/NMMR	Investigador	15%
Romano Câmara	Investigador Coordenador	DBB/NMMR	Investigador	10%
Eloísa Castilho dos Santos	BIIC	DBB/NO	Bolseira	30%
João Rocha de Almeida	Professor Associado	NOVA-ID-FCT	Investigador	20%

8 - Resultados expetáveis / Expected results

Resultados por atividade/tarefa Results per activity/task	Descrição Description
Activity 1	<p>At the end of this activity it will be possible to create, from an initial discrete fracture network representing the foundation discontinuities, a mechanical representation of the block interactions based on FE technology, which will allow a much faster and more accurate mechanical response. With a perfect facet to facet block interaction, the discrete fracture network flow model may be straightforwardly generated from the interface FE joint mechanical elements.</p> <p>With the 3D particle to surface interaction it will be possible to model large displacements. The hybrid algorithm, by including the particle to surface interactions at the areas where large displacements occur, will allow a large displacement analysis with a minimum computational cost.</p>
Activity 2	<p>A 3D hydromechanical model based on the FE method capable of handling the problem of fluid flow in deforming porous media. It will be possible to model fluid flow through both the rock matrix and the foundation discontinuities.</p>

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

Resultados por atividade/tarefa Results per activity/task	Descrição Description
Activity 3	With this activity, it will be possible to include the thermal effects (deformation and cracking) and their influence on the forces that are exerted at the mass foundation and current dam conditions. The research conducted in this activity will provide dam analysis with an advanced method to simulate the post-cooling of the concrete. It will also provide a rational approach to the design, management and operation of an internal concrete cooling system in order to reduce the maximum temperature in the concrete to an acceptable level and within a reasonable time, while also maintaining structural integrity. An accurate modelling of the dam body will be possible
Activity 4	Constitutive models that include fracture energy concepts and the nonlinear behaviour of both concrete and rock will be added to the analysis tool. It will be possible to model thermal cracks and to simulate their evolution.
Activity 5	Guidelines regarding fracture network lumping will be devised.
Activity 6	This activity will provide an interactive environment for modeling and solving coupled problems in the area of fluid mechanics, heat transfer and structural mechanics.
Activity 7	With the results obtained in this activity, an attempt will be made to include the sensitivity of the foundation thermal-hydrromechanical model to environmental changes in present dam design guidelines.
Activity 8	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 including fracture energy concepts.

Outros resultados Other results	Quantidade Quantity
--	--------------------------------------

Teses / Thesis

<i>mestrado / MSc thesis</i>	6
<i>doutoramento / PhD thesis</i>	1
<i>Outras / other</i>	

Artigos em revista / Peer reviewed papers in journals

<i>nacional / national</i>	2
<i>internacional / international</i>	6

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

Outros resultados Other results	Quantidade Quantity
Comunicações / Conference papers	8

Outros produtos / Other

Software DAMFA: multiphysics integrated tool for sustainable assessment of concrete dam foundations	1
---	---

9 - Recursos humanos / Human resources

Grupo Group	Esforço Effort-month (h*m)	Valor Value €
1	4,80	31 200,00
2	48,00	273 600,00
3	0,00	0,00
4	0,00	0,00
<i>TOTAL</i>	52,80	304 800,00

FICHA DE PROJETO DE I&D&I

2013-2020

10 - Despesas correntes / Overheads

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
Missão internacional	8	1500	€12000,00
Missão nacional	8	500	4000,00
			0,00
			0,00
<i>TOTAL</i>			€16000,00

11 – Equipamento / Equipment

Designação	Quantidade Quantity	Valor unitário Unitary value €	Montante Value €
Computador	3	2000	6000.00
			0.00
			0.00
			0.00
<i>TOTAL</i>			0.00

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

12 – Orçamento / Budget

Designação Description	Estimativa de custo Predicted cost €	Financiamento externo External funding €	Financiamento LNEC Own funding €
Recursos Humanos	333 600,00		333 600,00
Despesas Correntes	16000,00		16000,00
Equipamentos	6000,00		6000,00
Gastos gerais	338 000,00		338 000,00
			0,00
			0,00
Total	693.600,00	0,00	693 600,00

