



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

RELICONDAM – ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO

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



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

RELICONDAM – ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO

Relatório de avaliação final do projeto do P21/LNEC 2013-2020

Lisboa • dezembro 2023

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 411/2023 – **DBB/Chefia**

Título

RELICONDAM – ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO

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

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

António Lopes Batista

Investigador-Coordenador, Diretor do Departamento

José Vieira de Lemos

Investigador-Coordenador, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

Luís Lamas

Investigador Principal com Habilitação, Chefe do Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

Renato Miguel Rodrigues Pereira

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

UNIVERSITY OF NOTTINGHAM

Luís Armando Canhoto Neves

Associate Professor, Department of Civil Engineering

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 411/2023

Proc. 0401/1102/20366, 0402/1102/2036601

RELICONDAM – ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO

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

Resumo

Descreve-se a atividade de investigação realizada no projeto ReliConDam até 2023, que teve por objetivo aplicar conceitos probabilísticos ao problema da segurança estrutural de barragens de betão. Os resultados das diferentes atividades são analisados e avaliados, face aos objetivos inicialmente previstos.

Palavras-chave: ReliConDam / Barragens de betão / Análise probabilística / Segurança estrutural

RELICONDAM- PROBABILISTIC ANALYSIS OF THE STRUCTURAL SAFETY OF CONCRETE DAMS

Final assessment report of the P2I/LNEC 2013/2020 project

Abstract

This report describes the research activities of the ReliConDam project until 2023, aiming at applying probabilistic concepts to deal with the structural safety of concrete dams. The obtained results are analyzed and assessed, considering the initial goals of the project.

Keywords: ReliConDam / Concrete dams / Probabilistic analysis / Structural safety

Índice

1	Introdução	1
2	Atividade desenvolvida.....	3
2.1	Considerações gerais	3
2.2	Descrição da atividade desenvolvida	3
2.3	Interações com a University of Nottingham	7
2.4	Apreciação da atividade desenvolvida	7
3	Divulgação de resultados	8
3.1	Tese de doutoramento	8
3.2	Publicações em livros, revistas e congressos	8
3.2.1	Artigos em revistas internacionais	8
3.2.2	Comunicações apresentadas em congressos nacionais	8
3.2.3	Comunicações apresentadas em congressos internacionais	9
3.3	Relatórios técnico/científicos	9
3.3.1	Relatórios de investigação	9
3.3.2	Outros documentos de investigação	9
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	10
4.1	Indicadores de desempenho.....	10
4.2	Recursos humanos mobilizados	10
4.3	Financiamento	11
5	Considerações finais	12
	ANEXOS.....	15
	ANEXO I Ficha inicial do projeto ReliConDam.....	17
	ANEXO II Plano de trabalhos do projeto ReliConDam após revisão em 2018.....	29

Índice de quadros

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho	10
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC, em número de horas	10
Quadro 4.3 – Afetação de recursos humanos exteriores ao LNEC entre 2015 e 2019	11
Quadro 4.4 – Afetação ao projeto de recursos humanos, prevista e concretizada	11
Quadro II.1 – Plano de trabalhos do projeto ReliConDam após proposta de revisão em 2018	31

1 | Introdução

O projeto de investigação “Análise probabilística da segurança estrutural de barragens de betão”, com o acrónimo ReliConDam, destinou-se a enquadrar os trabalhos da tese de doutoramento do Investigador Auxiliar (IA) Renato Miguel Rodrigues Pereira, enquanto bolseiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), com acolhimento no Departamento de Barragens de Betão (DBB) do LNEC. A tese de doutoramento foi elaborada no LNEC para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil pela Universidade Nova de Lisboa (UNL). Foi entregue no dia 25 de março de 2019 e discutida no dia 22 de julho do mesmo ano.

O projeto esteve integrado no Plano de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC, tendo enquadramento na matriz programática da Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020 (E2I) e inserindo-se ainda no eixo E4 (Risco e segurança) e nas temáticas T8 (Desenvolvimento de competências e transferência de conhecimentos).

O IA Renato Pereira iniciou os trabalhos de doutoramento em setembro de 2013 [R1]. O projeto ReliConDam foi submetido para aprovação no dia 23 de junho de 2015, através da informação n.º 271 do DBB, propondo como data de início 1 de junho de 2015 e uma duração de 30 meses. A apreciação da comissão de acompanhamento dos projetos do P2I/LNEC foi emitida, favoravelmente, em 10 de novembro de 2015. O Conselho Diretivo do LNEC aprovou o projeto em 27 de novembro de 2015, tendo-lhe sido atribuído o número de processo 0401/112/20366. No relatório de progresso das atividades do projeto [R3], tendo-se constatado que as tarefas previstas até ao final de 2017 estavam a ser realizadas a bom ritmo, propôs-se a extensão do projeto para 2018, prazo que se considerou adequado para finalização da tese de doutoramento. O facto de o IA Renato Pereira ter continuado a trabalhar no LNEC após a discussão da tese, levou a que tenha havido desenvolvimentos no âmbito do projeto, maioritariamente no que respeita à divulgação de resultados, até 2023. O presente relatório considera, por isso, toda a atividade desenvolvida entre 2013 (início do doutoramento) e 2023, sendo os indicadores apresentados respeitantes a este período.

A equipa de investigação foi composta por elementos do DBB, sendo constituída pelo Investigador-Coordenador (IC) António Lopes Batista, também Professor Associado convidado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL (FCT/UNL), orientador científico e responsável pelo projeto, pelo IC José Vieira de Lemos, pelo Investigador Principal com Habilitação (IPH) Luís Lamas, pelo Professor Associado (PA) e coorientador da tese Luís Canhoto Neves, da Universidade de Nottingham (UoN), e pelo próprio IA Renato Pereira, que foi Bolsheiro de Doutoramento com Acolhimento (BDA) até junho de 2019, Bolsheiro de Pós-Doutoramento (BPD) desde setembro de 2019 até novembro de 2020, Investigador Doutorado (ID) entre dezembro de 2020 e janeiro de 2022 e é IA desde fevereiro de 2022. O IA Renato Pereira integrou também, entre setembro de 2019 e março de 2020, a equipa do projeto DAM-AGE “Técnicas avançadas de monitorização dinâmica da condição estrutural de barragens de betão”, e, após abril de 2020, a equipa do projeto RockGeoStat “Modelação de maciços rochosos marcadamente heterogéneos”.

Este relatório final destina-se a apresentar as atividades definidas na ficha inicial do projeto ReliConDam e na proposta apresentada, em 2018, no relatório de progresso, referindo as adaptações que foram ocorrendo no decurso dos trabalhos. São também apresentados os elementos de divulgação dos resultados, os indicadores de desempenho e a distribuição dos recursos humanos do LNEC. No Anexo I encontra-se a ficha inicial do projeto e no Anexo II apresenta-se a reestruturação do plano de trabalhos após a avaliação intercalar de 2018.

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Considerações gerais

O trabalho desenvolvido no projeto ReliConDam abordou a aplicação de conceitos probabilísticos na análise da segurança de barragens de betão, um tema de investigação de grande interesse para o LNEC, em particular para o DBB. O projeto pretendeu dar um contributo no estabelecimento de uma metodologia de avaliação da segurança estrutural de barragens de betão, nomeadamente a definição de critérios semi-probabilísticos de verificação da segurança, através da utilização de coeficientes parciais de segurança definidos com base na análise da fiabilidade estrutural deste tipo de obras. O projeto foi idealizado no sentido de que os avanços conseguidos durante o seu desenvolvimento pudessem vir a influenciar os critérios de projeto de barragens de betão e serem integrados em futuras revisões da regulamentação portuguesa de segurança de barragens. Outra vantagem perspetivada prendeu-se com a utilidade que os desenvolvimentos alcançados trariam para a análise da segurança de obras em exploração, seguindo uma abordagem quantitativa da gestão do risco estrutural.

Em seguida apresenta-se e aprecia-se a atividade desenvolvida no projeto de investigação.

2.2 Descrição da atividade desenvolvida

No Anexo I apresenta-se a ficha inicial do projeto e no Anexo II apresenta-se o plano de trabalhos adaptado, que consta do relatório de progresso de 2018, contemplando as atividades de 2015 a 2018. Como mencionado, o trabalho de investigação já vinha a ser desenvolvido desde 2013, no âmbito da tese de doutoramento referida [R1], e teve seguimento após esta data, com o ingresso do IA Renato Pereira no LNEC.

As atividades desenvolvidas no período 2013-2019, em que foi elaborada a tese de doutoramento do IA Renato Pereira, estão genericamente dentro do âmbito previsto no projeto inicial [R1], tendo havido, no entanto, a redefinição do conteúdo de algumas tarefas. Os atrasos ocorridos na concretização de algumas tarefas, devido sobretudo à subestimação do tempo de cálculo necessário para a realização das análises numéricas, levou à decisão de excluir do âmbito do projeto o estudo das barragens abóbada, para se poder aprofundar o caso das barragens gravidade. Assim, as tarefas T3.1 e T3.2 tiveram de ser redefinidas e as tarefas T4.2, T4.4 e T4.5 eliminadas.

Descrevem-se, de seguida, os desenvolvimentos realizados em cada atividade:

- **Atividade 1 - Pesquisa bibliográfica**

A pesquisa bibliográfica dividiu-se em três grandes tarefas: A primeira foi relativa ao estudo dos métodos de análise da fiabilidade (T1.1); a segunda respeitou ao estudo dos métodos e modelos numéricos utilizados na análise estrutural de barragens de betão (T1.2); e a terceira teve como objetivo compilar informação proveniente de outros trabalhos em que as técnicas de análise da fiabilidade estrutural foram aplicadas a barragens de betão (T1.3). Outra tarefa

a que foi dedicado algum tempo, e que não estava explícita quer no projeto inicial quer na proposta de revisão do seu plano de trabalhos, prendeu-se com o estudo das técnicas estatísticas para a modelação da incerteza, que se viria a desenvolver na Atividade 2.

- **Atividade 2 – Modelação da incerteza**

A modelação da incerteza envolvida no problema da segurança estrutural de barragens de betão dividiu-se em três temas, cada um dos quais com duas tarefas correspondentes aos trabalhos necessários para o seu desenvolvimento e à respetiva divulgação dos resultados através de artigos científicos submetidos a revistas internacionais e comunicações em congressos. Os temas em apreço foram os seguintes:

- A caracterização probabilística das subpressões nas fundações de barragens de betão com base em dados da monitorização contínua disponíveis no LNEC. As tarefas T2.1 e T2.2 requereram, em primeiro lugar, o estudo da percolação de água nos maciços rochosos e a origem das subpressões, as propriedades dos maciços rochosos relevantes para os fenómenos em causa e as hipóteses de projeto relativamente à sua consideração no dimensionamento de barragens. O modelo probabilístico proposto para a caracterização das subpressões nas fundações de barragens de betão teve como elementos base os dados da monitorização de 15 grandes barragens de betão portuguesas e distingue, tal como a regulamentação francesa, as subpressões expectáveis em fundações com condições geológicas favoráveis ou desfavoráveis. Esta tarefa deu origem a uma comunicação em evento nacional [C2], um artigo em revista científica internacional [A1] e um relatório técnico/científico do LNEC [R4].
- A caracterização probabilística do nível de água na albufeira, em condições normais de exploração, com base nos dados da monitorização contínua, disponíveis no LNEC. As tarefas T2.3 e T2.4 iniciaram-se pela compilação dos registos do nível de água na albufeira de 27 grandes barragens de betão portuguesas, perfazendo um total de 650 anos de registos; seguiu-se a identificação de padrões de variação do nível de água na albufeira durante o ano, distinguindo as albufeiras de regularização e as de exploração a fio de água; e, por fim, o desenvolvimento do modelo que permite a obtenção de uma distribuição probabilística para o nível de água na albufeira. Esta tarefa deu origem a uma comunicação em evento nacional [C3] e a um artigo em revista científica internacional [A2].
- A caracterização probabilística das propriedades mecânicas do betão de barragens, com base nos resultados dos ensaios de provetes de betão de barragens portuguesas, a diferentes idades, disponíveis no LNEC. Nos trabalhos das tarefas T2.5 e T2.6 desenvolveu-se uma metodologia para a caracterização probabilística das propriedades potenciais do betão de barragens a partir de resultados de ensaios laboratoriais de resistência e deformabilidade. De seguida propôs-se um modelo probabilístico preditivo das propriedades estruturais do betão de barragens, conhecida a caracterização probabilística das propriedades potenciais, que considera o efeito de

escala, pelo facto de os ensaios serem realizados em provetes de pequenas dimensões, e os efeitos, aleatórios, resultantes da heterogeneidade espacial do betão aplicado nas obras. Esta tarefa deu origem a duas comunicações em evento nacional [C4, C5] e a um relatório técnico/científico do LNEC [R2].

Acrescenta-se ainda a caracterização probabilística da incerteza dos modelos pseudo-estático e pseudo-dinâmico que aproximam os efeitos estruturais da ação sísmica em barragens gravidade de betão sob a forma de ações estáticas equivalentes. Afigurou-se necessário, no decurso desta tarefa, recorrer a modelos de elementos discretos, analisados no programa 3DEC, para comparar a resposta estrutural sob solicitações estática e dinâmica. Esta tarefa, que se revelou fundamental para o desenvolvimento da tese, não foi devidamente antecipada quer na formulação inicial do projeto, quer na proposta de revisão, e subtraiu algum tempo de dedicação a outras atividades, tendo, também por isso, contribuído para a necessidade de extensão temporal do projeto.

- **Atividade 3 – Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão**

A modelação do comportamento estrutural de barragens de betão contemplou o conjunto das tarefas necessárias para a definição dos mecanismos de rotura e das correspondentes funções de estado limite, que constituem informação essencial para a realização de análises de fiabilidade. A este propósito, deu-se especial atenção ao facto das barragens gravidade de betão portuguesas apresentarem, em média, uma profundidade de entrega na fundação correspondente a 10% da sua altura. A definição geométrica do perfil-tipo que viria a ser analisado nas atividades 4 e 5 enquadrou-se na tarefa T3.1.

Os mecanismos de rotura dos perfis gravidade, que são conhecidos e adequadamente reproduzidos recorrendo ao método do equilíbrio limite, tornam-se mais complexos quando se contempla explicitamente a sua entrega na fundação. A identificação dos mecanismos de rotura de perfis com entrega na fundação baseou-se em informação recolhida na literatura técnica e científica, bem como nos relatos de ensaios em modelos físicos realizados no LNEC, tendo as respetivas funções de estado limite sido, posteriormente, deduzidas e validadas recorrendo a modelos de elementos discretos bidimensionais, também analisados no programa 3DEC. Estes desenvolvimentos, que se enquadraram na tarefa T3.2, deram origem a uma comunicação em evento internacional [C8] e a um artigo em revista científica internacional [A3].

- **Atividade 4 – Análise da fiabilidade estrutural**

A aplicação das técnicas de análise de fiabilidade estrutural ao problema da segurança de barragens gravidade de betão teve desenvolvimentos incipientes nos primeiros anos do projeto, tendo dado origem a uma comunicação em evento nacional [C1] e a outra em evento internacional [C6]. O IA Renato Pereira teve ainda a oportunidade de participar no Workshop da ICOLD sobre o tema “Reliability analysis of a concrete gravity dam”, tendo apresentado uma comunicação nesse evento [C7].

Tendo em conta os objetivos do estudo, houve uma clarificação na redefinição desta atividade, apontando para o dimensionamento probabilístico de barragens gravidade de betão, cuja

solução recorre aos métodos de análise de fiabilidade inversa. O procedimento que resolve este problema, para todos os casos de combinação de ações definidos tendo em conta as indicações do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), tem por base o método de fiabilidade de primeira ordem (FORM) e foi implementado num programa de cálculo automático, desenvolvido de raiz em MatLab. Este procedimento utiliza como informação de entrada os resultados das Atividades 2 (modelos probabilísticos de caracterização da incerteza) e 3 (descrições analíticas dos mecanismos de rotura), e conduz à obtenção dos valores da variável de dimensionamento (inclinação do paramento de jusante do perfil-tipo) para as diferentes situações analisadas.

- **Atividade 5 – Definição de critérios de verificação da segurança**

A definição de critérios semi-probabilísticos de verificação da segurança, com base na calibração de coeficientes parciais de segurança, é um processo de tentativa-erro que, dependendo do formato de verificação da segurança pré-definido e da minimização de uma função de penalidade, pretende assegurar que a sua futura utilização seja, ao mesmo tempo, objetiva e abrangente. A formulação teórica da calibração de coeficientes parciais de segurança limita este procedimento a casos de estudo simples, atendendo aos cálculos estruturais que, na maioria das vezes, requer. Nesse sentido, tendo em consideração que se pretendia que estes critérios sejam utilizados na verificação da segurança de barragens gravidade de betão sob a ação de dois eventos principais (sismo ou cheia), conjugados com diferentes casos de combinação quanto às características associadas às restantes variáveis aleatórias, nomeadamente no que respeita às condições geológicas da fundação para a quantificação das subpressões, ao tipo de exploração da albufeira para quantificação do nível de água na albufeira em condições normais de exploração, e ao tipo e localização da ação sísmica, afigurou-se necessário procurar simplificar o procedimento, minimizando o número de cálculos estruturais a realizar. Esta tarefa envolveu, por isso, uma capacitação teórica aprofundada sobre este tema, bem como a proposta de uma formulação simplificada para a calibração de coeficientes parciais de segurança.

Os objetivos da atividade foram amplamente alcançados, já que foi possível deduzir um conjunto de coeficientes parciais de segurança, aplicados os efeitos das ações (peso próprio, pressão hidrostática, subpressão e ação sísmica) e resistências (resistência tangencial das superfícies de deslizamento) que, para os mecanismos de rotura identificados, são capazes de assegurar níveis de fiabilidade próximos de valores-alvo pré-definidos e substituir o procedimento de base determinística estabelecido no RSB.

Refere-se ainda o trabalho realizado com o investigador do LNEC João Casaca, no domínio da aplicação da estatística aos problemas em estudo [R4].

Naturalmente, a tese de doutoramento de Renato Pereira [T1] integrou grande parte dos resultados das atividades descritas.

2.3 Interações com a University of Nottingham

O Prof. Luís Canhoto Neves, que figurava como orientador da tese de doutoramento de Renato Pereira quando ela se iniciou, em 2013, integrava então o Departamento de Engenharia Civil da FCT/UNL. Entretanto foi para a Universidade de Nottingham (UoN), no Reino Unido, passando então a coorientador. Houve interações remotas de forma praticamente contínua, tendo o doutorando feito deslocações prolongadas à University of Nottingham, para interações mais específicas, nos seguintes dois períodos: entre meados de fevereiro e meados de abril de 2014, durante cerca de dois meses; e em maio de 2016, durante cerca de um mês. Estas deslocações foram financiadas pela FCT.

2.4 Apreciação da atividade desenvolvida

O projeto ReliConDam teve como principal objetivo introduzir conceitos e práticas de cariz probabilístico nos problemas e desafios abordados na engenharia de barragens de betão, e, por conseguinte, no DBB/LNEC. A abordagem probabilística ao problema da segurança estrutural, em particular, tem sido estudada em outros domínios da engenharia de estruturas, maioritariamente em ambiente académico, mas também no desenvolvimento de regulamentação para o cálculo estrutural. O advento dos eurocódigos, baseados em princípios probabilísticos e aplicados a outro tipo de estruturas, e o investimento feito no seu melhoramento contínuo, abrem o caminho para o estudo da aplicação deste tipo de abordagem também aos problemas da engenharia de barragens de betão.

Os estudos realizados no âmbito do projeto estiveram centrados, como referido, no problema da segurança de barragens gravidade de betão, mais concretamente nos modos de falha relativos à perda de equilíbrio. Este problema tem a vantagem de ser genericamente conhecido e não exigir o recurso a modelos numéricos pesados, possibilitando, por isso, o desenvolvimento, com mais detalhe, das atividades relativas à modelação das fontes de incerteza e dos mecanismos de rotura e à análise da fiabilidade estrutural. A extensão deste estudo a barragens de betão do tipo abóboda foi descartada, durante os trabalhos da tese, por afetar o detalhe com que se tratariam estes assuntos, por um lado, e por haver a necessidade de recorrer a modelos numéricos mais complexos, sem garantias quanto à exequibilidade dos objetivos propostos, por outro. A adaptação do plano de trabalhos, apresentada no relatório de progresso, que redefiniu o âmbito e as tarefas da atividade A3, traduziu esta opção.

Os objetivos assim redefinidos para o projeto consideram-se alcançados, avaliando a atividade desenvolvida de modo muito favorável. Como referido, este projeto enquadrava a tese de doutoramento do Renato Pereira, que não tinha, no período do seu desenvolvimento, vínculo contratual com o LNEC. Após a finalização da tese de doutoramento, em julho de 2019, continuou a haver desenvolvimentos no âmbito do projeto, mais concretamente no que toca às tarefas de divulgação dos resultados, porque o Renato Pereira ingressou no LNEC, primeiro enquanto BPD, depois como ID e finalmente como IA. Regista-se, no entanto, que nem todos os indicadores de desempenho (Quadro 4.1) foram cumpridos, nomeadamente os que respeitam à publicação de artigos científicos em revistas internacionais, apesar de existir material para a sua concretização no futuro. Por outro lado, foram redigidos relatórios técnico-científicos, não previstos, para divulgação dos resultados.

3 | Divulgação de resultados

3.1 Tese de doutoramento

[T1] - Pereira, R. (2019) - *Probabilistic-based structural safety analysis of concrete gravity dams*. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). Caparica - <https://run.unl.pt/handle/10362/76842>.

3.2 Publicações em livros, revistas e congressos

3.2.1 Artigos em revistas internacionais

[A1] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2018) - *Probabilistic Model for the Representation of the Reservoir Water Level of Concrete Dams During Normal Operation Periods*. *Water Resources Management* v.32, pp 3041–3052, DOI: 10.1007/s11269-018-1973-x;

[A2] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C.; Casaca, J. M. (2019) - *À priori uplift pressure model for concrete dam foundations based on piezometric monitoring data*. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 17, n. 11, pp 1523–1534, DOI: 10.1080/15732479.2020.1815805;

[A3] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C.; Lemos, J. V. (2021) - *Deduction of ultimate equilibrium limit states for concrete gravity dams keyed into rock mass foundations based on large displacement analysis*. *Structures*, v. 8, pp 1180-1190, DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.049.

3.2.2 Comunicações apresentadas em congressos nacionais

[C1] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2014) - *Verificação da segurança ao deslizamento de barragens gravidade considerando a variabilidade das propriedades hidráulicas e mecânicas do maciço rochoso de fundação*. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas - JP2014, Lisboa;

[C2] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2016) - *Modelo probabilístico para a representação das subpressões nas fundações de barragens de betão*. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016, Coimbra;

[C3] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2016) - *Modelo probabilístico para representação do nível de água na albufeira em análises de fiabilidade de barragens de betão*. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016, Coimbra;

[C4] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2016) - *Quantificação das propriedades estruturais do betão de barragens. Parte 1 – Caracterização probabilística das propriedades potenciais a partir de resultados de ensaios*. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016, Coimbra;

[C5] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2016) - *Quantificação das propriedades estruturais do betão de barragens. Parte 2 – Estimativa das propriedades reais a partir das propriedades potenciais.* Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016, Coimbra.

3.2.3 Comunicações apresentadas em congressos internacionais

[C6] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2015) - *Safety evaluation of concrete gravity dams sliding considering the variability of rock mass foundation hydraulic and mechanical properties.* Second International Dam World Conference, Lisbon;

[C7] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2017) - *Reliability analysis of a concrete gravity dam Contribution for discussion on Theme D: Risk Analysis-assessment of reliability for concrete dams.* 14th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, Stockholm, Sweden;

[C8] - Pereira, R.; Batista, A. L.; Neves, L. C. (2020) - *Concrete gravity dams stability: a comparative study between unkeyed and keyed foundations.* Forth International Dam World Conference, Lisbon.

3.3 Relatórios técnico/científicos

3.3.1 Relatórios de investigação

[R1] - Pereira, R. (2016) - *Probabilistic-based structural safety analysis of concrete dams. Phd thesis work plan of Renato Pereira.* LNEC – Report 119/2016 – DBB.

[R2] - Serra, C.; Batista, A. L.; Pereira, R. (2017) - *Analysis of the concrete test results obtained during the Baixo Sabor dam construction.* Relatório 236/2017 – DBB/NO, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa;

[R3] - Batista, A. L.; Pereira, R.; Canhoto, L. C.; Lemos, J. L.; Lamas, L. (2018) - *ReliConDam – Análise probabilística da segurança estrutural de barragens de betão. Relatório de progresso 2015-2017 do projeto do P2I/LNEC.* LNEC – Report 89/2018 – BDD/Chefia.

3.3.2 Outros documentos de investigação

[R4] - Casaca, J.; Pereira, R. (2017) – *Parametric inference in the context of beta mixtures.* LNEC – ICT INCB 24.

4 | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento

4.1 Indicadores de desempenho

No Quadro 4.1 apresentam-se os indicadores de desempenho do projeto, designadamente os previstos na ficha inicial e os realizados de 2013 a 2023.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Total previsto no projeto (cerca de 4 anos)	Realizado até 2023 (cerca de 8 anos)
Artigos em revistas internacionais	5	3
Comunicações em congressos	6	8
Relatórios científicos	-	4
Teses de doutoramento	1	1

4.2 Recursos humanos mobilizados

No Quadro 4.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC dedicados ao projeto entre o final de 2015 e 2023, designadamente os meses de trabalho previstos e efetivamente dedicados. No caso de Renato Pereira considera-se, para efeitos de contabilização da afetação dos recursos humanos do LNEC, apenas o período após o estabelecimento do seu vínculo contratual, em 2020.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC, em número de horas

Investigador	Horas de trabalho									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
IC António Lopes Batista	40	194	40	75	78	0	0	0	0	427
IC José Vieira de Lemos	0	64	20	71	37	10	24	0	0	226
IPH Luís Lamas	0	32	25	21	0	0	0	0	0	78
IA Renato Pereira	-	-	-	-	-	26	472	465	441	1404

No Quadro 4.3 apresentam-se os recursos humanos exteriores ao LNEC mobilizados no projeto entre o final de 2015 e 2019 (Renato Pereira, enquanto BDA, e PA Luís Canhoto Neves), no período correspondente à elaboração da tese de doutoramento, designadamente a afetação percentual prevista e uma estimativa da efetivamente concretizada.

Quadro 4.3 – Afetação de recursos humanos exteriores ao LNEC entre 2015 e 2019

Equipa	Afetação percentual	
	Prevista	Concretizada (estimativa)
IA Renato Pereira	100%	100%
PA Luís Canhoto Neves	10%	10%

No Quadro 4.4 apresentam-se os recursos humanos dedicados ao projeto, a afetação percentual inicialmente prevista, os anos efetivos dedicados ao projeto, os meses de trabalho correspondentes à previsão inicial, os meses de trabalho no período remanescente do projeto, os meses de trabalho imputados ao projeto e a concretização percentual face ao previsto inicialmente. No caso de Renato Pereira considerou-se uma afetação desejável de 20% entre 2020 e 2023, ao passo que para os restantes elementos da equipa apenas foi considerado um envolvimento marginal neste período.

Quadro 4.4 – Afetação ao projeto de recursos humanos, prevista e concretizada

Investigador	Afetação percentual prevista	Anos de afetação ao projeto	Meses de trabalho			Concretização percentual
			Previsto entre 2015 e 2019 (~4 anos)	Previsto entre 2020 e 2023 (~4 anos)	Imputados ao projeto	
IC António Lopes Batista	15%	4	6,3	-	2,8	44%
IC José Vieira de Lemos	5%	4	2,1	-	1,5	71%
IPH Luís Lamas	5%	4	2,1	-	0,5	24%
BDA Renato Pereira	100% (entre 2015 e 2019)	4	48	-	48	100%
IA Renato Pereira	20% (entre 2020 e 2023)	4	-	9,6	9,1	95%
PA Luís Canhoto Neves	10%	4	4	-	4	100%

A concretização percentual foi praticamente a desejável, no caso de Renato Pereira e do PA Luís Neves, mas para os restantes elementos da equipa, todos do LNEC, foi muito inferior à prevista, mas mesmo assim pode ser considerada aceitável, no contexto dos condicionamentos do LNEC.

4.3 Financiamento

O trabalho teve financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia entre setembro de 2013 e setembro de 2017, ao abrigo da bolsa de doutoramento SFRH/BD/91131/2012 atribuída a Renato Pereira.

5 | Considerações finais

O projeto ReliConDam teve como principal objetivo introduzir conceitos e práticas de cariz probabilístico nos problemas e desafios abordados na engenharia de barragens de betão, e, por conseguinte, no DBB/LNEC. Em particular, abordou-se, de forma extensiva, o problema da segurança estrutural de barragens gravidade de betão.

O projeto pretendeu dar um contributo no estabelecimento de uma metodologia de avaliação da segurança estrutural de barragens de betão, nomeadamente a definição de critérios semi-probabilísticos de verificação da segurança, através da utilização de coeficientes parciais de segurança definidos com base na análise da fiabilidade estrutural deste tipo de obras. O projeto foi idealizado para que os avanços conseguidos durante o seu desenvolvimento pudessem vir a influenciar os critérios de projeto de barragens de betão e serem integrados em futuras revisões da regulamentação portuguesa de segurança de barragens. Outra vantagem perspetivada prendeu-se com a utilidade que os desenvolvimentos alcançados trariam para a análise da segurança de obras em exploração, seguindo uma abordagem quantitativa da gestão do risco estrutural.

Regista-se o trabalho desenvolvido quanto à modelação das fontes de incerteza envolvidas no problema da segurança estrutural de barragens de betão, nomeadamente no que concerne: às propriedades mecânicas do betão de barragens; às subpressões nas suas fundações; às variações do nível de água na albufeira; e aos modelos simplificados para aproximação da resposta estrutural sob ações sísmicas. Acrescenta-se ainda a investigação sobre o comportamento estrutural de barragens gravidade de betão em situações de estado limite de estabilidade e os casos de estudo resolvidos quanto ao dimensionamento probabilístico de perfis gravidade e à calibração de critérios semi-probabilísticos de verificação da segurança, onde foram obtidos resultados promissores.

Os desenvolvimentos conseguidos constituem uma primeira abordagem neste domínio, abrindo portas para a persecução dos estudos num tema de grande interesse e atualidade para a engenharia de barragens de betão e, em particular, para o LNEC e para o DBB.

Os objetivos do projeto, tendo em conta a redefinição do seu conteúdo apresentada no relatório de progresso de 2018, consideram-se alcançados, avaliando a atividade desenvolvida de modo muito favorável. Em termos de divulgação científica dos resultados, constatam-se que os indicadores de desempenho foram, quase na totalidade, cumpridos, à exceção do número de artigos publicados em revista científica internacional, que ficou aquém do previsto. Não obstante, reforça-se que existe muito material para publicação no futuro próximo, sem prejuízo do tempo dedicado a outros projetos que sucedam a este.

Lisboa, LNEC, dezembro de 2023

VISTO

AUTORIA

O Diretor do Departamento de Barragens de
Betão



António Lopes Batista



António Lopes Batista
Investigador-Coordenador



Renato Miguel Rodrigues Pereira
Investigador Auxiliar



Luís Armando Canhoto Neves
Professor Associado



José Vieira de Lemos
Investigador-Coordenador



Luís Lamas
Investigador Principal com Habilitação,
Chefe do Núcleo de Modelação e Mecânica das
Rochas

ANEXOS

ANEXO I

Ficha inicial do projeto ReliConDam

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

1 - Dados Gerais

1.1 Identificação do projeto

Designação	Análise probabilística da segurança estrutural de barragens de betão
Acrónimo	ReliConDam
Unidade Departamental proponente	DBB
Setor	CH
Investigador Responsável	António Lopes Batista
Duração (meses)	30
Data de início (ano-mês-dia)	01/06/2015

1.2 Inserção na matriz programática da E2I

Par principal (obrigatório)	E4, T8
Par secundário (opcional)	E4, T2; E4, T9

1.3 Entidades intervenientes

Entidade coordenadora	LNEC
Parceiros internos	DBB/NMMR
Parceiros externos	FCT/UNL e Universidade de Nottingham
Entidade externa interessada	
Financiamento externo (S/N)	S

1.4 Resumo

A construção e exploração de barragens, que está associada ao aproveitamento dos recursos hídricos, visa essencialmente a produção de energia e o abastecimento de água às populações e, em alguns casos, a regularização de caudais e o controlo de cheias.

Por serem obras de engenharia a que estão associados consideráveis riscos potenciais, principalmente relacionados com a segurança das populações no vale de jusante, mas também aos custos de construção, manutenção e reabilitação, justifica-se que as barragens sejam dimensionadas considerando níveis de segurança adequados, sendo que tal pode ser conseguido, com vantagem, usando princípios probabilísticos, à semelhança do que já acontece correntemente com outros tipos de estruturas.

Com o trabalho a desenvolver neste projeto pretende-se estabelecer uma metodologia de avaliação da segurança estrutural de barragens de betão, nomeadamente a definição de critérios de verificação da segurança, através da utilização de coeficientes parciais de segurança definidos a partir da análise da fiabilidade estrutural. Começa-se com uma contribuição na caracterização estatística das incertezas envolvidas na segurança de barragens de betão, através da definição de distribuições de probabilidade de ações e resistências, recorrendo-se, para além dos elementos disponíveis na literatura técnica e científica afim, à informação disponível no LNEC resultante do acompanhamento e monitorização do comportamento deste tipo de estruturas, e prossegue-se com a calibração de coeficientes parciais de segurança, aplicando metodologias robustas de análise da fiabilidade estrutural a modelos de barragens de betão representativos de soluções padronizadas para as diferentes situações de projeto. Afigura-se que o conhecimento a criar possa influenciar os critérios de projeto de barragens de betão e ser integrado em futuras revisões da regulamentação portuguesa de segurança de barragens.

Este projeto destina-se a enquadrar a tese de doutoramento em curso de Renato Pereira, da FCT/UNL, com acolhimento no LNEC, cuja bolsa é financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. Assim, no orçamento considerou-se um montante de financiamento externo correspondente aos 30 meses da bolsa e à afetação de trabalho do co-orientador externo durante este período, considerando os valores de imputação de mão de obra tabelados do LNEC.

2 - Fundamentação

Durante as últimas décadas, tem-se verificado um interesse crescente das sociedades por temas relacionados com a sustentabilidade, a segurança e a economia [1, 2]. As estruturas de engenharia civil, em geral, e as barragens, em particular, pretendem contribuir para a melhoria da qualidade de vida das populações. Pretende-se que as estruturas construídas e a construir garantam os requisitos de segurança, dentro das limitações económicas existentes. Devido às incertezas envolvidas na análise da segurança estrutural, a solução ótima depende da probabilidade de ocorrência de um cenário de acidente ou incidente e das suas consequências. O produto destes dois fatores é designado por risco.

O advento de regulamentos de segurança baseados em princípios probabilísticos nas últimas décadas, quando a teoria da fiabilidade estrutural estava já consolidada [3], foi a tradução da necessidade de se incluírem as incertezas inerentes a algumas grandezas na verificação da segurança estrutural. A evolução dos critérios de projeto culminou com a publicação dos Eurocódigos estruturais [4], que são baseados na análise semi-probabilística da segurança, considerada por muitos autores [5;6;7;8] como uma simplificação consistente dos métodos probabilísticos.

Devido a diferentes fatores, o projeto de barragens de betão não acompanhou a evolução dos critérios considerados nos outros géneros de estruturas. O regulamento português de segurança de barragens [9], como inúmeros regulamentos internacionais deste tipo de estruturas [10], é ainda baseado no conceito de fator global de segurança. Este critério, que é baseado essencialmente na experiência acumulada, não permite a determinação da probabilidade de falha, o que conduz frequentemente a diferentes níveis de segurança [5; 11].

De acordo com o relatório do grupo de trabalho da ICOLD que estudou a segurança ao deslizamento de barragens existentes [10], o regulamento chinês, de 2000, é o primeiro exemplo de consideração de critérios semi-probabilísticos na verificação da segurança de barragens de betão. Mais recentemente, as normas francesas [12] também adotaram conceitos baseados na abordagem semi-probabilística. Esta temática tem também sido abordada em outros países da Europa, designadamente em Espanha, Suécia e, também, Portugal.

Em Espanha foi realizado um estudo exaustivo sobre a análise de risco de barragens de betão por um grupo de trabalho da *Universidad Politécnica de Valencia*. No que toca à fiabilidade estrutural, o trabalho de Luis Altarejos abordou o cálculo da probabilidade de falha [13], considerando diversos modelos estruturais e métodos de fiabilidade na análise da rotura de uma barragem gravidade espanhola, utilizando os dados da monitorização para justificar as funções de probabilidade consideradas.

Marie Westberg, da *Lund University*, na Suécia, abordou o mesmo tema, mas de uma forma mais genérica. A sua tese de doutoramento [14] centra-se na quantificação das incertezas envolvidas na segurança de barragens de betão e na definição dos formatos de verificação da segurança considerando abordagens probabilísticas e calibração pela prática corrente. Faz uma aplicação prática de avaliação da segurança de um perfil gravidade teórico considerando um conjunto alargado de combinações de solicitações.

Em Portugal foram realizados alguns estudos neste âmbito nos últimos anos. Em Oliveira Pedro [15] analisaram-se os critérios de funcionalidade e segurança adotados no dimensionamento estrutural de barragens abóbada, estimando as probabilidades de incidente e acidente a partir de resultados da caracterização das propriedades dos materiais e de ensaios elásticos e até à rotura de modelos físicos. Em Pereira [16] aplicou-se um método de fiabilidade aproximado, considerando hipóteses simplificativas quanto à quantificação das incertezas das ações e resistências envolvidas na segurança, para estimar a probabilidade de falha de algumas barragens gravidade portuguesas. Em Farinha et al. [17] aplicou-se o método dos estados limites na verificação da segurança de um modelo de elementos discretos da barragem de Pedrógão, considerando o conjunto barragem-fundação e os coeficientes parciais de segurança preconizados no Eurocódigo 7 [18].

3 - Objetivos

Este projeto pretende contribuir para a utilização de métodos de fiabilidade estrutural na avaliação da segurança de barragens de betão. Pretende-se estabelecer, com base nos dados da monitorização do comportamento de barragens de betão portuguesas, as distribuições de probabilidades representativas das incertezas associadas aos parâmetros envolvidos na segurança de barragens de betão e caracterizar o limite da segurança com base na experiência da engenharia de barragens, usando os métodos de fiabilidade estrutural para o cálculo da probabilidade de falha.

O contributo deste projeto, no que se refere à análise de risco de barragens de betão, está apenas relacionado com a vertente da fiabilidade estrutural. As restantes vertentes da análise de risco - a frequência de ocorrência de eventos extremos e as consequências da falha - não serão abordadas. Contudo, como indicado por Westberg [14], o índice de fiabilidade objetivo, que depende de ambos os aspetos, pode ser calibrado pela prática corrente, assumindo que esta é confiável. Prevê-se que sejam analisados três perfis gravidade típicos [19] e três barragens abóbada de diferentes alturas, dimensionadas de acordo com a prática da engenharia portuguesa de barragens, com vista à determinação da probabilidade falha (valor objetivo) e dos coeficientes parciais de segurança.

Apresentam-se, de seguida, os aspetos fundamentais que se pretendem abordar no projeto, agrupados por grandes temas, designadamente:

- Modelação da incerteza envolvida na segurança de barragens de betão, através da definição das funções de distribuição de probabilidade das grandezas envolvidas (fontes de incerteza), considerando os dados da monitorização de barragens existentes e de ensaios de materiais.
- Modelação do comportamento de barragens de betão, através da escolha de modelos genéricos representativos do comportamento estrutural, baseados na informação usualmente disponível na fase de projeto.
- Definição de uma metodologia de avaliação probabilística da segurança, utilizando a teoria da fiabilidade estrutural na escolha de critérios e coeficientes parciais de segurança com vista a serem utilizados num formato semi-probabilístico de verificação da segurança.

4 – Contribuições inovadoras

Este projeto de investigação visa o aprofundamento do estudo das incertezas envolvidas na segurança das barragens de betão, a seleção e a aplicação de métodos de fiabilidade estrutural na verificação da segurança deste tipo de estruturas e o desenvolvimento de uma metodologia probabilística de avaliação da segurança que possibilite a utilização de critérios semi-probabilísticos através da consideração de coeficientes parciais de segurança. Afigura-se que o conhecimento a criar possa influenciar os critérios de projeto de barragens de betão e ser integrado em futuras revisões da regulamentação portuguesa de segurança de barragens.

5 – Metodologia

No que respeita à modelação das incertezas recorrer-se-á, para além de elementos bibliográficos, ao acervo de dados disponíveis no LNEC, fruto do acompanhamento e monitorização do comportamento de barragens de betão, que possibilitarão a aplicação de técnicas de inferência estatística para realização da caracterização probabilística das grandezas envolvidas na segurança deste tipo de estruturas.

A análise estrutural dos modelos genéricos das barragens será baseada, numa primeira aproximação, no método do equilíbrio limite. Posteriormente será utilizado o método dos elementos discretos na análise dos modelos numéricos bidimensionais (barragens gravidade) e tridimensionais (barragens abóbada), sendo a sua aplicação enquadrada em metodologias desenvolvidas no LNEC [20].

A determinação da probabilidade de rotura será baseada na teoria da fiabilidade estrutural. Serão utilizados métodos aproximados, como os métodos FORM e SORM, no caso em que o estado limite é definido analiticamente (método do equilíbrio limite). No caso geral, em que se utilizará modelação numérica na análise estrutural, recorrer-se-á a métodos de simulação para estimar a probabilidade de falha, de que é exemplo o método de Monte Carlo.

Referências bibliográficas

- [1] M.H., Faber, "Risk and safety in civil, surveying and environmental engineering", Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Switzerland, 2005.
- [2] J. Schneider, "Introduction in safety and reliability of structures", International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 1997.
- [3] B.R. Ellingwood, "Probability-based codified design: past accomplishments and future challenges", Structural Safety, 13, 1994
- [4] EN1990, "Eurocode 0: Basis of structural design", European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2002.
- [5] O. Ditlevsen e H.O. Madsen, "Structural reliability methods", Wiley, 1996.
- [6] JCSS, "Probabilistic model-code", Joint Committee on Structural Safety, 12th Draft, 2001.
- [7] M.H. Faber e J.D. Sorensen, "Reliability based code calibration". Paper for the Joint Committee on Structural Safety, Draft, March, 2002.
- [8] T. Vronvenwelder, "Treatment of risk and reliability in the Eurocodes", Structures & Buildings 161, pp. 209-214, 2008.
- [9] RSB, "Regulamento de segurança de barragens", Decreto-Lei 344/2007, Lisboa, 2007.
- [10] G. Ruggeri, "Sliding safety of existing gravity dams", Final report, European working group of ICOLD, 2004.
- [11] R.E. Melchers, "Structural reliability analysis and prediction", Wiley, 1999.
- [12] CFBR, "Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids", Comité Français des Barragens et Réservoirs. Paris, France, 2012.
- [13] L. Altarejos, "Contribución a la estimación de la probabilidad de fallo de presas de hormigón en el contexto del análisis de riesgos", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, 2009.
- [14] M. Westberg, "Reliability-based assessment of concrete dam stability", PhD thesis, Lund University, Lund, Sweden, 2010.
- [15] J. O. Pedro, "Barragens abóbada - Coeficientes de funcionalidade e segurança e probabilidades de incidente e acidente, para cenários de degradação do betão", ITB35, LNEC, 2007.
- [16] R. Pereira, "Análise probabilística da segurança ao deslizamento de barragens gravidade de betão", Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [17] M.L.B. Farinha, L. Caldeira, E.M. 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, 2014.
- [18] EN1997-1, "Eurocode 7. Geotechnical design - Part I: General rules", European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2004.
- [19] E.M. Bretas, A.L. Batista, J.V. Lemos, P. Léger, "Seismic analysis of gravity dams: a comparative study using a progressive methodology", Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2014), Porto, Portugal, 2014.
- [20] J.V. Lemos, "Modelling and failure analysis in rock engineering". Programa de Investigação, LNEC, Lisboa, Portugal, 2001.

6 – Plano de trabalhos								
Atividade	Designação da atividade	Tarefa	Descrição	1º S	2º S	3º S	4º S	5º S
Atividade 1	Pesquisa bibliográfica	T 1.1	Pesquisa bibliográfica sobre métodos de análise da fiabilidade					
		T 1.2	Pesquisa bibliográfica sobre modelos numéricos utilizados na análise estrutural de barragens de betão					
		T 1.3	Pesquisa bibliográfica sobre trabalhos de análise da fiabilidade estrutural aplicada a barragens de betão					
Atividade 2	Modelação da incerteza	T 2.1	Caracterização probabilística das subpressões nas fundações com base nos dados da monitorização contínua de barragens de betão, disponíveis no LNEC					
		T 2.2	Submissão de um artigo científico em revista internacional sobre o contributo para a definição probabilística das subpressões					
		T 2.3	Caracterização probabilística do nível de água da albufeira, em condições normais de exploração, com base nos dados da monitorização contínua de barragens de betão, disponíveis no LNEC					
		T 2.4	Submissão de um artigo científico em revista internacional sobre o contributo para a definição probabilística do nível de água da albufeira em condições normais de exploração					
		T 2.5	Caracterização probabilística das propriedades mecânicas do betão de barragens, com base nos resultados dos ensaios de provetes de betão de barragens portuguesas, a diferentes idades, disponíveis no LNEC; utilização de resultados, alguns disponíveis no LNEC, sobre a caracterização probabilística das propriedades dos maciços de fundação das barragens					
		T 2.6	Submissão de um artigo científico em revista internacional sobre o contributo para a definição probabilística das propriedades mecânicas do betão de barragens					

Atividade	Designação da atividade	Tarefa	Descrição	1º S	2º S	3º S	4º S	5º S
Atividade 3	Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão	T 3.1	Escolha da geometria de um conjunto de barragens que servirão como casos de estudo, do tipo gravidade e abóbada, dimensionadas de acordo com a experiência da engenharia portuguesa de barragens [9]					
		T 3.2	Escolha da geometria de um conjunto de barragens que servirão como casos de estudo, do tipo gravidade e abóbada, dimensionadas de acordo com a experiência da engenharia portuguesa de barragens [9]					
Atividade 4	Análise da fiabilidade estrutural	T 4.1	Análise da fiabilidade estrutural dos perfis das barragens gravidade, considerando o método do equilíbrio limite, através de métodos de fiabilidade aproximados e métodos de simulação [1, 2, 5]					
		T 4.2	Análise da fiabilidade estrutural dos perfis das barragens gravidade, considerando o método dos elementos discretos [20], através de métodos de simulação					
		T 4.3	Submissão de um artigo científico em revista internacional sobre a análise da fiabilidade de barragens gravidade					
		T 4.4	Análise da fiabilidade estrutural das barragens abóbada, considerando o método dos elementos discretos [20], através de métodos de simulação					
		T 4.5	Submissão de um artigo científico em revista internacional com as principais conclusões da aplicação dos métodos de fiabilidade estrutural a barragens de betão					
Atividade 5	Definição de critérios de verificação da segurança	T 5.1	Calibração dos coeficientes parciais de segurança e definição de uma metodologia de verificação da segurança com base nos resultados obtidos					
		T 5.2	Submissão de um artigo científico em revista internacional com a verificação da segurança de uma barragem existente recorrendo à metodologia proposta					

7 – Equipa de trabalho

Nome	Categoria	Setor/ Entidade	Tarefas	Afetação ao projeto (%)
António Lopes Batista	IP	DBB/Chefia	Coordenação	15%
Luís Armando Canhoto Neves	PA	UoN	Investigador	10%
Renato Miguel Rodrigues Pereira	BD	FCT/UNL	BD/FCT	100%
José Vieira de Lemos	IC	DBB/NMMR	Investigador	5%
Luís Nolasco Lamas	IP	DBB/NMMR	Investigador	5%

8 - Resultados expetáveis

Atividade	Descrição
Atividade 1	Obter uma base de referência sobre os modelos numéricos geralmente utilizados na análise do comportamento estrutural de barragens de betão, sobre os métodos de análise da fiabilidade estrutural e sobre aplicações de métodos probabilísticos na avaliação da segurança deste tipo de estruturas.
Atividade 2	Definir distribuições de probabilidade representativas das incertezas associadas aos parâmetros envolvidos na segurança de barragens de betão, nomeadamente da subpressão na interface barragem-fundação, do nível de água na albufeira em condições normais de exploração e das propriedades mecânicas do betão e do maciço rochoso de fundação.
Atividade 3	Definir as condições limite que representam os mecanismos de rotura, considerando essencialmente os relacionados com o corpo da barragem, e os modelos das barragens, do tipo gravidade e abóbada, a serem analisados como casos de estudo. O estado limite ou falha estrutural, em termos de forças, deslocamentos ou tensões máximas, será definido para situações de projeto representativas do comportamento real das estruturas.
Atividade 4	Obter a probabilidade de falha estrutural dos modelos testados e o valor de dimensionamento das variáveis aleatórias; relacionar a probabilidade de falha com o tipo e a altura da barragem.
Atividade 5	Definir critérios semi-probabilísticos de verificação da segurança com base nos resultados das atividades anteriores, com vista a criar conhecimento que possa vir a ser integrado em futuras revisões da regulamentação portuguesa de segurança de barragens.

Outros resultados		Quantidade
Teses	<i>mestrado</i>	
	<i>doutoramento</i>	1
	<i>outras</i>	
Artigos em revista	<i>Nacional</i>	
	<i>Internacional</i>	5
Comunicações		6
Outros produtos		

9 - Recursos humanos

Grupo	Esforço (h*m)	Valor (€)
1	1,50	9.750,00
2	9,00	51.300,00
3	30,00	105.000,00
4	0,00	0,00
<i>TOTAL</i>	40,50	166.050,00

10 - Despesas correntes

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

11 – Equipamento

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

12 - Orçamento

Designação	Estimativa de custo (€)	Financiamento externo (€)	Financiamento LNEC (€)
Recursos humanos	166.050,00	122.100,00	43.950,00
Despesas correntes	0,00	0,00	0,00
Equipamentos	0,00	0,00	0,00
Gastos gerais	166.050,00	122.100,00	43.950,00
Total	332.100,00	244.200,00	87.900,00

ANEXO II

Plano de trabalhos do projeto ReliConDam após revisão em 2018

Quadro II.1 – Plano de trabalhos do projeto ReliConDam após proposta de revisão em 2018

Atividade	Designação da atividade	Tarefa	Designação da tarefa	2015		2016		2017		2018	
				1º Sem	2º Sem	3º Sem	4º Sem	5º Sem	6º Sem	7º Sem	
A1	Pesquisa bibliográfica	T1.1	Pesquisa bibliográfica sobre métodos de análise da fiabilidade								
		T1.2	Pesquisa bibliográfica sobre modelos numéricos utilizados na análise estrutural de barragens de betão								
		T1.3	Pesquisa bibliográfica sobre trabalhos de análise da fiabilidade estrutural aplicada a barragens de betão								
A2	Modelação da incerteza	T2.1	Caracterização probabilística das subpressões nas fundações com base nos dados da monitorização contínua de barragens de betão, disponíveis no LNEC								
		T2.2	Submissão de um artigo científico em revista internacional sobre o contributo para a definição probabilística das subpressões								
		T2.3	Caracterização probabilística do nível de água da albufeira, em condições normais de exploração, com base nos dados da monitorização contínua de barragens de betão, disponíveis no LNEC								
		T2.4	Submissão de um artigo científico em revista internacional sobre o contributo para a definição probabilística do nível de água da albufeira em condições normais de exploração								
		T2.5	Caracterização probabilística das propriedades mecânicas do betão de barragens, com base nos resultados dos ensaios de provetes de betão de barragens portuguesas, a diferentes idades, disponíveis no LNEC; utilização de resultados, alguns disponíveis no LNEC, sobre a caracterização probabilística das propriedades dos maciços de fundação das barragens de betão								
		T2.6	Submissão de um artigo científico em revista internacional sobre o contributo para a definição probabilística das propriedades mecânicas do betão de barragens								

Quadro II.1 – Plano de trabalhos do projeto ReliConDam após proposta de revisão em 2018 (continuação)

Atividade	Designação da atividade	Tarefa	Designação da tarefa	2015		2016		2017		2018	
				1º Sem	2º Sem	3º Sem	4º Sem	5º Sem	6º Sem	7º Sem	
A3	Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão	T3.1	Escolha da geometria de um conjunto de barragens gravidade que servirão como casos de estudo, dimensionadas de acordo com a experiência da engenharia portuguesa de barragens								
		T3.2	Utilização de modelos de elementos discretos bidimensionais, no que respeita aos perfis das barragens gravidade, para quantificação da incerteza associada à consideração do método do equilíbrio limite								
A4	Análise da fiabilidade estrutural	T4.1	Análise da fiabilidade estrutural dos perfis das barragens gravidade, considerando o método do equilíbrio limite, através de métodos de fiabilidade aproximados e métodos de simulação								
		T4.2	Submissão de um artigo científico em revista internacional sobre a análise da fiabilidade de barragens gravidade								
A5	Definição de critérios de verificação da segurança	T5.1	Calibração dos coeficientes parciais de segurança e definição de uma metodologia de verificação da segurança com base nos resultados obtidos								
		T5.2	Submissão de um artigo científico em revista internacional com a verificação da segurança de uma barragem existente recorrendo à metodologia proposta								



www.lnec.pt

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