



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DAMCONCRETE – CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAÇÃO NUMÉRICA DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO BETÃO DE BARRAGENS

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



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DAMCONCRETE – CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAÇÃO NUMÉRICA DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO BETÃO DE BARRAGENS

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

Lisboa • outubro 2023

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 349/2023 – DBB/NO

Título

DAMCONCRETE – CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAÇÃO NUMÉRICA DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO BETÃO DE BARRAGENS

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

Carlos Serra

Investigador Auxiliar, Núcleo de Observação

João Conde Silva

Investigador Auxiliar, Núcleo de Observação

Nuno Monteiro Azevedo

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 349/2023

Proc. 0403/1102/20181

DAMCONCRETE - CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAÇÃO NUMÉRICA DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO BETÃO DE BARRAGENS

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

Resumo

Descreve-se a atividade de investigação realizada no projeto DamConcrete até 2023, no âmbito do comportamento reológico do betão de barragens considerando trabalho experimental (laboratorial e *in situ*), modelos analíticos e modelos de partículas. Os resultados das diferentes atividades são analisados e avaliados, face aos objetivos inicialmente definidos.

Palavras-chave: DamConcrete / Betão de barragens / Trabalho experimental / Modelação numérica

DAMCONCRETE – EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND NUMERICAL MODELLING OF DAM CONCRETE RHEOLOGICAL PROPERTIES

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

Abstract

This report describes the research activities of the DamConcrete project until 2023, in the scope of the rheological behaviour of dam concrete considering experimental work (laboratorial and *in situ*), analytical models and particle models. The obtained results are analysed and assessed, considering the initial goals of the project.

Keywords: DamConcrete / Dam concrete / Experimental work / Numerical modelling

Índice

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 2 | Atividade desenvolvida..... | 2 |
| | 2.1 Considerações gerais | 2 |
| | 2.2 Descrição da atividade desenvolvida..... | 2 |
| | 2.3 Apreciação da atividade desenvolvida..... | 6 |
| 3 | Divulgação de resultados | 7 |
| | 3.1 Teses de doutoramento | 7 |
| | 3.2 Publicações em livros, revistas e congressos | 7 |
| | 3.2.1 Artigos em revistas internacionais | 7 |
| | 3.2.2 Artigos em revistas nacionais | 8 |
| | 3.2.3 Comunicações apresentadas em congressos internacionais | 8 |
| | 3.2.4 Comunicações apresentadas em congressos nacionais | 9 |
| | 3.3 Relatórios técnico-científicos | 10 |
| 4 | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento | 11 |
| | 4.1 Indicadores de desempenho..... | 11 |
| | 4.2 Recursos humanos mobilizados | 11 |
| | 4.3 Financiamento..... | 12 |
| | 4.4 Aplicações a estudos por contrato..... | 12 |
| 5 | Considerações finais | 13 |
| | ANEXOS..... | 15 |
| | ANEXO I Ficha inicial do projeto DamConcrete..... | 17 |
| | ANEXO II Plano de trabalhos do projeto DamConcrete após proposta de revisão em 2018 e extensão até 2023 | 33 |

Índice de quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho | 11 |
| Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC | 12 |
| Quadro II.1 – Plano de trabalhos do projeto DamConcrete após proposta de revisão em 2018 e extensão até 2023 | 35 |
| Quadro II.2 – Plano de trabalhos do projeto DamConcrete após proposta de revisão em 2018 e extensão até 2023 (continuação)..... | 36 |
| Quadro II.3 – Plano de trabalhos do projeto DamConcrete após proposta de revisão em 2018 e extensão até 2023 (continuação)..... | 37 |

1 | Introdução

O projeto de investigação *Caracterização experimental e modelação numérica das propriedades reológicas do betão de barragens*, com o acrónimo DamConcrete, destinou-se a enquadrar os trabalhos da tese de doutoramento do então bolsheiro do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Carlos Luís de Oliveira Macedo Serra. A tese de doutoramento foi elaborada no LNEC para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil pela Universidade Nova de Lisboa (UNL), ao abrigo do protocolo de cooperação entre a UNL e o LNEC. Foi terminada em finais de 2017, tendo as provas decorrido no dia 5 de fevereiro de 2018. Atendendo ao interesse no desenvolvimento de trabalhos no âmbito da temática em apreço, o projeto prolongou-se até 2023.

O projeto foi 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 no eixo E1 (Património construído) e na temática T8 (Desenvolvimento de competências e transferência de conhecimentos).

O IA Carlos Serra iniciou os trabalhos de doutoramento em setembro de 2013 [R1]. O projeto DamConcrete foi submetido para aprovação no dia 14 de maio de 2015, através da informação n.º 230 do Departamento de Barragens de Betão (DBB), propondo como data de início 1 de setembro de 2015 e uma duração de 36 meses. A apreciação da comissão de acompanhamento dos projetos do P2I/LNEC foi emitida, favoravelmente, em 25 de junho de 2015. O Conselho Diretivo do LNEC aprovou o projeto em 9 de julho de 2015, tendo-lhe sido atribuído o número de processo 0403/112/20181. O presente relatório considera toda a atividade desenvolvida entre 2013 e 2023, sendo os indicadores apresentados respeitantes a este período de cerca de 10 anos.

A equipa de investigação é 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 Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), orientador científico e responsável pelo projeto, pelo IA Nuno Monteiro Azevedo, coorientador da tese de doutoramento, e pelo IA Carlos Serra, que foi bolsheiro de doutoramento (BD) até final de 2017, bolsheiro de pós-doutoramento (BPD) entre maio de 2018 e novembro de 2020 e IA desde dezembro de 2020. Em 2018, o IA João Conde Silva integrou o projeto para o apoio em algumas atividades propostas no relatório de progresso do projeto então emitido.

Este relatório de avaliação final destina-se a apresentar as atividades definidas na ficha inicial do projeto DamConcrete e na proposta apresentada no relatório de progresso de 2018, 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 DamConcrete abordou questões importantes sobre o comportamento do betão de barragens, nas fases de construção e exploração das obras. O projeto pretendeu dar um contributo na caracterização experimental, laboratorial e *in situ*, e na simulação numérica, usando modelos de partículas, do comportamento de provetes de betão de barragens, integral e crivado. Pretendeu-se determinar os principais parâmetros que caracterizam as propriedades reológicas do betão de barragens, por forma a usá-las, à escala das estruturas, nas atividades de apoio à observação e ao controlo de segurança das obras.

De seguida apresentam-se as atividades desenvolvidas no projeto de investigação. São referidos os locais onde foram realizados os ensaios, nomeadamente *in situ* em barragens, e em laboratório, no Departamento de Materiais (DM) e no DBB do LNEC, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e no laboratório de obra do Sistema Eletroprodutor do Tâmega (SET), no âmbito da realização dos ensaios de caracterização das propriedades do betão das barragens em construção. Os ensaios em obra foram realizados em estaleiro e no próprio corpo das barragens, em células de fluência instaladas nas barragens do Baixo Sabor, Ribeiradio, Foz Tua, Daivões e Alto Tâmega.

No contexto deste projeto, integram-se também as participações nos comités técnicos da RILEM, TC 254-CMS – *Thermal cracking of massive concrete structures*, finalizado em 2019, e TC 287-CCS – *Early age and long-term crack width analysis in RC structures*, em curso.

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 no relatório de progresso de 2018, contemplando as atividades de 2015 a 2023. Como mencionado, o trabalho de investigação já vinha a ser desenvolvido desde 2013, no âmbito da tese de doutoramento referida [R1].

As atividades desenvolvidas no período 2013-2018, apresentadas no relatório de progresso, estão genericamente em linha com o plano inicial [R1] (Anexo I), mas apresentaram, naturalmente, algumas diferenças. De facto, considerou-se oportuno adicionar uma nova atividade e eliminar a última atividade definida no plano. A atividade introduzida relacionou-se com o desenvolvimento de modelos analíticos para a interpretação e previsão do comportamento do betão de barragens a partir dos resultados dos ensaios de betão crivado. Esta nova atividade revelou-se muito importante na análise integrada dos resultados experimentais. A atividade relacionada com a modelação do comportamento estrutural de uma barragem foi eliminada do plano de trabalhos original, mas foi considerada no contexto da tarefa T4.4 do plano de trabalhos reformulado (Quadro II.2).

A caracterização experimental da argamassa seguiu um plano de ensaios padrão com a determinação da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de elasticidade. A atividade relacionada com a modelação do comportamento do betão teve desenvolvimentos que não estavam previstos no plano de 2015, mas que se mostraram úteis para o projeto, nomeadamente a implementação do modelo constitutivo de rotura do contacto entre partículas e a modelação do comportamento do betão crivado e integral até à rotura em compressão e em tração.

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 do comportamento do betão e à pesquisa de trabalhos experimentais relacionados com a caracterização do comportamento do betão crivado e integral. A segunda e terceira tarefas respeitaram ao estudo dos modelos de partículas e, em particular, à análise do comportamento do betão à mesoescala, considerando explicitamente os agregados.

- **Atividade 2 - Trabalhos experimentais**

Os trabalhos experimentais centraram-se na execução de ensaios específicos, laboratoriais e *in situ*, de determinação da deformabilidade do betão de barragens [CN2, CN5, CN10, R2, R3, R6, R7, R8, R9, R10] e na análise dos resultados de ensaios de betão executados na FEUP durante a construção das barragens do Baixo Sabor [R5], Ribeiradio e Foz Tua, cedidos pela EDP, e, mais recentemente, dos resultados dos ensaios de betão da barragem de Daivões e Alto Tâmega, cedidos pela Iberdrola.

No contexto dos ensaios de deformabilidade *in situ* recorrendo a células de fluência, refere-se a instalação de 3 grupos na barragem do Baixo Sabor em 2012, de 2 grupos na barragem de Ribeiradio em 2013, de 2 grupos na barragem de Foz Tua em 2014, de 3 grupos na barragem de Daivões em 2019 e de 3 grupos na barragem do Alto Tâmega em 2021 e 2022. Nas células de fluência das duas primeiras barragens foram introduzidos melhoramentos relativamente ao sistema tradicional e nas células da barragem de Foz Tua foram consideradas outras alterações no projeto e instalação, para permitir o acesso ao sistema de carga na base dos cilindros de betão [CN5]. Os resultados dos ensaios das células de fluência instaladas na barragem do Baixo Sabor deram origem a dois artigos publicados em revistas internacionais [AI1, AI2].

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral do betão da barragem do Baixo Sabor foram publicados na revista *Journal of Materials in Civil Engineering* [AI3] e em relatório técnico-científico do LNEC [R5]. Como complemento, foram executados ensaios de determinação do módulo de elasticidade, da resistência à compressão e da resistência à tração por compressão diametral de provetes de argamassa de ligação dos agregados em laboratório [AI3]. A argamassa foi produzida no LNEC, utilizando os mesmos componentes utilizados no betão da barragem do Baixo Sabor.

Foi também incluída nesta atividade uma tarefa relativa à análise integrada dos principais resultados de estudos relacionados com a deformabilidade do betão de diversas barragens portuguesas [AN1, CI1, CI11].

Em 2021, no contexto do TC 287-CCS – *Early age and long-term crack width analysis in RC structures*, realizaram-se ensaios de fluência em compressão e à tração de um betão corrente para determinar a relação entre comportamento viscoelástico com endurecimento em compressão e à tração. Estes ensaios permitiram avaliar as condições e dificuldades deste tipo de ensaios, em particular à tração.

- **Atividade 3 - Modelos analíticos para a previsão do comportamento do betão**

No decurso dos trabalhos, a análise dos resultados experimentais beneficiou da utilização de modelos analíticos, baseados em leis semi-empíricas, e modelos reológicos simples para a interpretação do comportamento do betão. Assim, este aspeto influenciou naturalmente a proposta de alteração do plano em 2018, no sentido de incluir uma nova atividade. Os estudos implicaram o desenvolvimento de metodologias de previsão das propriedades de deformabilidade e de resistência do betão integral a partir dos resultados do betão crivado, utilizando modelos compósitos de duas fases, o método da idade equivalente, a lei de escala e uma adaptação da lei de Abrams. O trabalho desenvolvido deu origem a três artigos publicados em revistas internacionais [A11, A12, A13] e duas comunicações [CN3, CN6].

- **Atividade 4 - Caracterização dos betões utilizados na construção das novas barragens (Baixo Sabor, Ribeiradio, Foz Tua, Daivões e Alto Tâmega)**

Face ao desenvolvimento dos estudos do projeto, considerou-se oportuno introduzir uma nova atividade relacionada com a caracterização dos betões utilizados na construção das novas barragens (Baixo Sabor, Ribeiradio, Foz Tua, Daivões e Alto Tâmega), com vista à produção de conhecimento a partir do acervo de elementos disponíveis. Esta atividade foi dividida em quatro tarefas: compilação e exploração integrada dos resultados dos ensaios de caracterização dos betões, incluindo os das células de fluência; avaliação do desempenho dos diferentes tipos de células de fluência; caracterização da deformabilidade e da resistência dos betões utilizados; e avaliação das implicações das propriedades dos betões no desempenho estrutural das obras.

Nesta atividade iniciou-se a análise dos resultados dos ensaios de betão das barragens de Daivões e Alto Tâmega, que apresentam características de composição e de aplicação em obra distintas das dos betões utilizados nas barragens do Baixo Sabor, de Ribeiradio e de Foz Tua [CI11]. A análise do comportamento do betão destas barragens recorreu aos resultados dos ensaios de fluência obtidos durante o desenvolvimento deste projeto [A11, CN2, R6, R10].

Foram também efetuados estudos que permitiram adquirir conhecimento em técnicas de reabilitação de barragens de betão, seja através da utilização de betão para reforço [A16, A18, CI6, CI7, CN8, CN9] e do preenchimento de fendas com caldas e argamassas cimentícias [A17, CI5, CI6].

- **Atividade 5 - Modelação numérica do comportamento do betão**

O trabalho desenvolvido no âmbito da modelação do comportamento do betão dividiu-se em duas grandes partes, uma relativa ao comportamento diferido e outra respeitante ao comportamento até à rotura (esta última não estava contemplada no plano inicial de 2015).

Foram implementados modelos para representar o comportamento diferido de materiais cimentícios nos contactos entre partículas, para suprir a inexistência de soluções numéricas para análise do comportamento do betão a longo prazo. Foram implementados os modelos de Burgers e o

viscoelástico com endurecimento decorrente da teoria da solidificação. A análise a longo prazo implicou também o desenvolvimento de um esquema numérico para ultrapassar os constrangimentos do passo de cálculo exigido pelo método dos elementos discretos. A validação do modelo viscoelástico com endurecimento e do esquema numérico proposto foi publicado em revista internacional [A14], apresentado em seis comunicações [CI2, CI3, CI10, CN3, CN4, CN7] e divulgado num relatório técnico-científico do LNEC [R4].

Os modelos referidos foram implementados num programa de cálculo automático, desenvolvido de raiz em C++.

Foram ainda implementados e validados dois modelos de rotura para os contactos entre partículas com base no modelo Mohr-Coulomb, um com rotura frágil e outro com *softening*. Os algoritmos desenvolvidos permitiram realizar a modelação do comportamento da argamassa e dos betões crivado e integral, bem como a comparação dos diferentes comportamentos até à rotura, incluindo a influência do agregado grosso na composição do betão.

Foi proposta uma metodologia para a previsão do comportamento do betão de barragens com base no comportamento dos seus componentes, nomeadamente a argamassa, os agregados e a interface entre estes dois materiais. Os resultados obtidos mostraram um bom acordo entre os resultados numéricos e os resultados dos ensaios experimentais [T1].

Como previsto na extensão do projeto, foi implementada a consideração de deformações impostas ao nível dos contactos das partículas, para a modelação das reações expansivas do betão, e estudada a sua interação com o dano [CI10].

Refere-se também a conclusão da tese de doutoramento do IA Carlos Serra [T1], que integrou grande parte dos resultados das atividades descritas.

Na sequência das atividades desenvolvidas no TC 254 CMS – *Thermal cracking of massive concrete structures* e no TC 287-CCS – *Early age and long-term crack width analysis in RC structures* da RILEM, foi publicado um artigo científico em revista internacional sobre a modelação termo-mecânica de estruturas de betão em massa [A15].

No contexto do projeto foram realizadas duas reuniões técnicas do TC 287-CCS no LNEC, em setembro de 2022 e em junho de 2023.

2.3 Apreciação da atividade desenvolvida

O projeto DamConcrete teve como principal objetivo o estudo das propriedades reológicas do betão de barragens, particularmente a previsão do comportamento do betão estrutural de barragens a partir dos resultados obtidos nos ensaios de betão crivado.

Os estudos realizados no âmbito do projeto estiveram centrados, como referido, ao nível do comportamento do betão, no que diz respeito à caracterização experimental e à modelação numérica, pelo que se propôs que a atividade relacionada com o estudo do comportamento estrutural de barragens fosse eliminada do projeto. Por outro lado, no seguimento dos trabalhos de doutoramento, foi desenvolvida uma nova atividade que tinha como objetivo a interpretação dos resultados experimentais obtidos e da relação entre o comportamento dos betões integral e crivado.

Após a avaliação intercalar em 2018, apresentou-se uma nova atividade no relatório de progresso, relacionada com a caracterização dos betões utilizados na construção das novas barragens e a interpretação dos resultados experimentais de uma forma integrada, bem como a sua influência no comportamento estrutural. Foram também incluídas novas tarefas na atividade A5 sobre a modelação numérica do comportamento do betão, nomeadamente para a implementação de deformações impostas no contacto entre partículas. O desenvolvimento destas novas tarefas estava previsto para o período de extensão do projeto, entre 2019 e 2023.

A apreciação da atividade desenvolvida no projeto é muito favorável, principalmente durante o período entre 2013/2015 e 2018, no contexto dos trabalhos da tese de doutoramento. No período subsequente, entre 2019 e 2023, os principais desenvolvimentos estão relacionados com a execução de novos ensaios de fluência *in situ* e em laboratório do betão das barragens de Daivões e Alto Tâmega, com os estudos de revisão bibliográfica para a utilização de materiais cimentícios na reabilitação de barragens de betão e com a implementação de deformações impostas ao nível dos contactos entre partículas para a modelação de expansões no betão.

Durante o desenvolvimento do projeto privilegiou-se a divulgação dos resultados, através da publicação de artigos científicos, comunicações e de relatórios técnico-científicos (Cap. 3).

3 | Divulgação de resultados

3.1 Teses de doutoramento

[T1] Serra, C. (2018) - *Prediction of dam concrete structural properties based on wet-screened test results and mesoscale modelling*. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). Lisboa.

3.2 Publicações em livros, revistas e congressos

3.2.1 Artigos em revistas internacionais

[AI1] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2016) - *Dam and wet-screened concrete creep in compression: in situ experimental results and creep strains prediction using model B3 and composite models*. *Materials and Structures*, v. 49, n. 11, pp 4831–4851, 2016 (DOI: 10.1617/s11527-016-0828-2) - <https://link.springer.com/article/10.1617%2Fs11527-016-0828-2>.

[AI2] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2016) - *Effect of wet screening in the elastic properties of dam concrete: experimental in situ test results and fit to composite models*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 12, 2016 (DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001672) - [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001672](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001672).

[AI3] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N.; Custódio, J. (2017) - *Prediction of dam concrete compressive and splitting tensile strength on wet-screened concrete test results*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 10, 2017 (DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002012) - [https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002012](https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002012).

[AI4] - Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L.; Schlar, N. (2018) - *Discrete element method for modelling the long-term aging viscoelastic behaviour of concrete considering its mesostructure*. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 144, n. 5, 2018 (DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001434) - <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29EM.1943-7889.0001434>.

[AI5] - Azenha, M.; Kanavaris, F.; Schlicke, D.; Jędrzejewska, A.; Benboudjema, F.; Honorio, T.; Šmilauer, V.; Serra, C.; Forth, J.; Riding, K.; Khadka, B.; Sousa, C.; Briffaut, M.; Lacarrière, L.; Koenders, E.; Kanstad, T.; Klausen, A.; Torrenti, J.-M.; Fairbairn, E. (2021) - *Recommendations of RILEM TC 287-CCS: thermo-chemo-mechanical modelling of massive concrete structures towards cracking risk assessment*. *Materials and Structures*, v. 54, N. 4, 2021 (DOI: 10.1617/S11527-021-01732-8) - <https://doi.org/10.1617/S11527-021-01732-8>.

[AI6] Silva, J.C. (2019) - *Repairing concrete dams with cement-based grouts: Case histories*. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Issue 5 (October), Aqua Media International.

[AI7] Silva, J.C.; Serra, C. (2022) - *Injection of discontinuities in concrete dams with cement-based grouts*. J. Struct. Integr. Maint. 7(4), pp. 252-264, Taylor&Francis (DOI:10.1080/24705314.2022.2088070) <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24705314.2022.2088070>.

[AI8] Silva, J.C.; Serra, C. (2022) - *A review on cement-based materials and practices for rehabilitation, retrofitting and strengthening of hydraulic structures*. Pract. Period. Struct. Des. Constr. 27(3), pp. 03122002-(1-10), ASCE (DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000692) - <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29SC.1943-5576.0000692>

3.2.2 Artigos em revistas nacionais

[AN1] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2015) - *Análise integrada dos resultados dos ensaios de deformabilidade do betão de grandes barragens portuguesas*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n. 15, p. 27-38.

3.2.3 Comunicações apresentadas em congressos internacionais

[CI1] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2015) - *Comprehensive analysis of the concrete deformability test results of Portuguese large dams*. Second International Dam World Conference, Lisboa.

[CI2] - Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. (2015) - *Viscoelastic concrete behaviour analysis using rigid particle detailed modelling*. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Lisboa, Portugal.

[CI3] - Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. (2018) - *Particle model for the prediction of long-term deformability properties of dam concrete*. SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Funchal, Portugal.

[CI4] - Tavares de Castro, A.; Barateiro, J.; Serra, C. (2018) - *Overview on the multi-decade database of Portuguese large concrete dams monitoring data*, In: Azenha M, Schlicke D, Benboudjema F, Jędrzejewska A (eds) SynerCrete'18 - Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete: Synergizing Expertise and Bridging Scales of Space and Time. RILEM, Funchal, Portugal.

[CI5] - Silva, J.C. (2019) - *Use of cement based grouts in the rehabilitation of concrete dams: a review*. Proceedings SMAR 2019 - 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Potsdam, Germany.

[CI6] - Silva, J.C. (2019) - *Repairing concrete dams with cement-based grouts: Case histories*. Proceedings Hydro 2019, Porto, Portugal.

[CI7] - Silva, J.C. (2020) - *Repair, rehabilitation and retrofitting of concrete dams with cement based materials*, Proceedings Hydro 2020 (webinar), Estrasburgo, France.

[C18] - Custódio, J.; Mata, J.; Serra, C.; Bettencourt Ribeiro, A.; Tavares de Castro, A. (2020) - *The diagnosis and prognosis of ASR in dams. Application to Alto Ceira dam (Portugal)*. Fourth International Dam World Conference, LNEC, Lisbon, Portugal.

[C19] – Custódio, J.; Ferreira, P.; Camelo, A.; Serra, C. (2021) - *Prevention of alkali-silica reaction in massive concrete structures: Laboratory and field correlation*. In: Concrete 2021. Sydney, Australia.

[C110] - Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. (2022) - *Numerical simulation of concrete swelling using mesoscale detailed 2D particle models taking into account aging viscoelasticity and damage*, 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, LNEC, Lisboa, Portugal.

[C111] - Serra, C.; Silva, J.C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2023) - *Dam concrete in situ creep tests. Experimental setup and results from six large concrete dams*. SynerCrete'23 - Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete: Synergizing Expertise and Bridging Scales of Space and Time. RILEM, Milos, Grécia.

3.2.4 Comunicações apresentadas em congressos nacionais

[CN1] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2014) - *Análise integrada dos resultados dos ensaios de deformabilidade do betão de grandes barragens portuguesas*. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas - JPÉE2014, Lisboa.

[CN2] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2014) - *Estudos de avaliação da deformabilidade do betão da barragem de montante do Baixo Sabor*. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas - JPÉE2014, Lisboa.

[CN3] - Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. (2016) - *Representação do comportamento viscoelástico com endurecimento com modelos detalhados de partículas: calibração dos parâmetros das leis constitutivas*. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016, Coimbra.

[CN4] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2016) - *Utilização de modelos compósitos na determinação da deformabilidade do betão de barragens*. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016, Coimbra.

[CN5] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2016) - *Melhoramentos recentes no projeto e instalação de células de fluência em barragens de betão*. 10^o Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Lisboa.

[CN6] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N.; Custódio, J. (2018) - *Previsão da resistência do betão de barragens usando modelos analíticos*. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2018, Lisboa.

[CN7] - Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. (2018) - *Modelos de partículas para simulação de ensaios deformabilidade diferida do betão considerando explicitamente a mesoestrutura* Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2018, Lisboa.

[CN8] - Silva, J.C. (2021) - *Injeções de caldas cimentícias no âmbito de operações de reabilitação da superestrutura de barragens de betão – Parte 1: revisão de literatura*. Reabilitar & Betão Estrutural 2020, LNEC, Lisboa.

[CN9] - Silva, J.C. (2021) - *Injeções de caldas cimentícias no âmbito de operações de reabilitação da superestrutura de barragens de betão – Parte 2: casos de sucesso*. Reabilitar & Betão Estrutural 2020, LNEC, Lisboa.

[CN10] - Serra, C.; Silva, J.C.; Vieira, M. (2022) - *Comportamento do betão da barragem de Daivões ao longo do tempo. Ensaios de fluência e ajuste a modelos semi-empíricos*, JPEE2022, LNEC, Lisboa.

3.3 Relatórios técnico-científicos

[R1] - Serra, C.; Batista, A.L.; Monteiro Azevedo, N. (2013) - *Caracterização experimental e modelação numérica das propriedades reológicas do betão de barragens. Plano de tese de doutoramento do bolseiro de iniciação à investigação científica Carlos Serra*. Relatório 284/2013 – DBB/NO/Chefia/NMMR, LNEC, Lisboa.

[R2] - Serra, C.; Batista, A.L. (2013) - *Procedimentos e recomendações para a realização de ensaios de deformabilidade em betão de barragens, efetuados in situ e em laboratório*. Relatório 455/2013 – DBB/NO, LNEC, Lisboa.

[R3] - Serra, C.; Batista, A.L.; Piteira Gomes, J. (2013) - *Barragem de montante do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Instalação de células de fluência e ensaios nas primeiras idades*. Relatório 311/2014 – DBB/NO, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Lisboa.

[R4] - Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A.L. (2013) - *Code implementation of particle based discrete element method for concrete viscoelastic modelling*. Relatório 333/2015 – DBB/NO, LNEC, Lisboa.

[R5] - 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, LNEC, Lisboa.

[R6] - Serra, C. (2018) - *Barragem de Ribeiradio. Instalação de células de fluência e ensaios de deformabilidade*. Relatório 396/2018 – DBB/NO, LNEC, Lisboa.

[R7] - Serra, C.; Silva, J.C.; Vieira, M. (2020) - *Barragem de Daivões. Resultados dos ensaios laboratoriais de fluência do betão crivado (6 meses iniciais)*. Relatório 331/2020 – DBB/NO, LNEC, Lisboa.

[R8] - Serra, C.; Silva, J.C. (2020) - *Barragem de Foz Tua. Instalação de células de fluência e ensaios de deformabilidade do betão*. Relatório 344/2020 – DBB/NO, LNEC, Lisboa.

[R9] - Serra, C.; Silva, J.C. (2022) - *Barragem de Daivões. Instalação de células de fluência e ensaios de deformabilidade do betão*. Relatório 229/2022 – DBB/NO, LNEC, Lisboa.

[R10] - Serra, C.; Silva, J.C.; Vieira, M. (2022) - *Barragem de Daivões. Resultados dos ensaios laboratoriais de fluência do betão crivado (2 anos iniciais)*. Relatório 337/2022 – DBB/NO, LNEC, Lisboa.

4 | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento

4.1 Indicadores de desempenho

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

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

| Indicadores | Total previsto no projeto (4 anos) | Realizado até 2023 (10 anos) |
|---|---------------------------------------|---------------------------------|
| Artigos em revistas internacionais | 3 | 8 |
| Artigos em revistas nacionais | - | 1 |
| Comunicações em congressos internacionais | 6 | 11 |
| Comunicações em congressos nacionais | | 8 |
| Relatórios técnico-científicos | - | 10 |
| Teses de doutoramento | 1 | 1 |

Foi levada a bom termo a tese de doutoramento prevista e foram elaborados oito artigos em revistas internacionais. O número de comunicações em eventos nacionais e internacionais foi também significativo. Refere-se ainda o apoio a um grande número de estudos por contrato com forte incorporação de resultados do projeto, sendo que a maioria desses estudos tiveram um dimensão e complexidade assinaláveis.

4.2 Recursos humanos mobilizados

No Quadro 4.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC dedicados ao projeto entre 2015 e 2023, designadamente os meses de trabalho previstos e efetivamente imputados.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC

| Equipa do LNEC | Afetação percentual prevista (2015-2018) | Meses de trabalho | | Afetação percentual prevista (2019-2023) | Meses de trabalho | |
|-----------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | | Previsto entre 2015 e 2018 (4 anos) | Realizado entre 2015 e 2018 (4 anos) | | Previsto entre 2019 e 2023 (5 anos) | Realizado entre 2019 e 2023 (5 anos) |
| António Lopes Batista | 15% | 4,5 | 2,5 | 10% | 6,0 | 0,2 |
| Nuno Monteiro Azevedo | 15% | 4,5 | 1,0 | 5% | 3,0 | 0,4 |
| Carlos Serra | 90% | 27,0 | 26,4 | 50% | 30,0 | 2,8 |
| João Conde Silva | - | - | - | 20% | 12,0 | 7,7 |

Refere-se que os desvios das afetações previstas e concretizadas, até 2017, podem ser considerados normais. Tal já não se verifica no período após 2017, dado que as atividades realizadas já estiveram fora do âmbito da tese de doutoramento de Carlos Serra, tendo sido direcionadas para responder aos trabalhos por contrato.

4.3 Financiamento

No sentido de dar continuidade ao trabalho desenvolvido neste projeto e no projeto DamSwelling (também integrado no P2I 2013-2020), e ainda aplicar os conhecimentos e ferramentas desenvolvidas, foi submetida, em maio de 2017, uma candidatura ao concurso para Projetos de Investigação Científica e Desenvolvimento Tecnológico (IC&DT), promovido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), em parceria com a Universidade do Minho. O projeto, intitulado *Lifetime assessment of key concrete infrastructures behaviour affected by swelling processes combining meso and macroscale modelling* (Código Universal: 4184e6cc-121b-4bbb-a127-c0b128c1dfd8), tinha como objetivo o melhoramento de ferramentas de modelação existentes para a previsão do comportamento do betão afetado por reações expansivas e a implementação de uma abordagem integrada no sentido de promover a interação entre os procedimentos experimentais e a modelação numérica. A FCT comunicou, em maio de 2018, que o projeto não foi considerado para financiamento. Está prevista uma nova submissão, após ser revisto e melhorado.

4.4 Aplicações a estudos por contrato

O apoio à instalação de células de fluência nas barragens do Baixo Sabor, Ribeiradio, Foz Tua, Daivões e Alto Tâmega, definidas como parte das atividades do projeto DamConcrete, corresponde a aplicações diretas em estudos por contrato. Estes equipamentos fazem parte dos sistemas de observação destas cinco barragens e os resultados neles obtidos são fundamentais para a caracterização do comportamento do betão e, conseqüentemente, na interpretação do comportamento estrutural e na avaliação da segurança ao longo do tempo.

5 | Considerações finais

O projeto de investigação DamConcrete teve como objetivo o aprofundamento dos conhecimentos relativos ao comportamento estrutural do betão de barragens e o desenvolvimento de metodologias de apoio à análise estrutural para avaliação da segurança e interpretação do comportamento das obras.

O trabalho realizado incluiu o melhoramento dos procedimentos experimentais e a execução de ensaios em condições de obra em betão integral que, por si, constitui uma mais-valia para o conhecimento do betão de barragens. Para além disso, foram desenvolvidos modelos numéricos baseados no método dos elementos discretos para a previsão da capacidade resistente do betão e para o desenvolvimento das extensões diferidas do betão integral e crivado. A interpretação dos resultados experimentais utilizando os modelos de partículas constitui uma das contribuições inovadoras e permite uma melhor compreensão do comportamento mecânico do betão, considerando explicitamente a dimensão dos agregados.

O desenvolvimento das tarefas que constam do plano de trabalhos do projeto sofreu alterações em relação ao definido inicialmente, sendo que uma atividade prevista foi eliminada e, em contrapartida, duas novas atividades foram definidas, uma relativa à análise dos resultados experimentais utilizando modelos analíticos, já concretizada, e outra respeitante ao comportamento estrutural do betão das grandes barragens recentemente construídas, que se pretende dar continuidade nos próximos anos.

A utilização das metodologias referidas trará vantagens para o LNEC e para os donos de obra, designadamente no que diz respeito à racionalização de recursos e ao melhor conhecimento do comportamento dos materiais e da resposta estrutural das próprias obras.

Em termos de divulgação científica e indicadores de desempenho, os objetivos do projeto foram globalmente alcançados, tanto em número de artigos e comunicações, como através da publicação de relatórios técnico-científicos.

Lisboa, LNEC, outubro de 2023

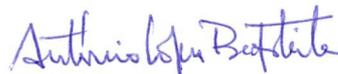
VISTOS

AUTORIA

O Chefe do Núcleo de Observação



António Tavares de Castro



António Lopes Batista
Investigador-Coordenador

O Chefe do Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

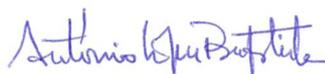


Luís Nolasco Lamas



Carlos Luís de Oliveira Macedo Serra
Investigador Auxiliar

O Diretor do Departamento de Barragens de Betão



António Lopes Batista



João Conde Silva
Investigador Auxiliar



Nuno Monteiro Azevedo
Investigador Auxiliar

ANEXOS

ANEXO I

Ficha inicial do projeto DamConcrete

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

1 - Dados Gerais

1.1 Identificação do projeto

| | |
|----------------------------------|--|
| Designação | Caracterização experimental e modelação numérica das propriedades reológicas do betão de barragens |
| Acrónimo | DamConcrete |
| Unidade Departamental proponente | DBB |
| Setor | NO |
| Investigador Responsável | António Lopes Batista |
| Duração (meses) | 36 |
| Data de início (ano-mês-dia) | 01/09/2015 |

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

| | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Par principal (obrigatório) | E1, T8 |
| Par secundário (opcional) | E1, T2; E1,T9; E5,T2; E5,T8 |

1.3 Entidades intervenientes

| | |
|------------------------------|----------|
| Entidade coordenadora | LNEC |
| Parceiros internos | DBB/NMMR |
| Parceiros externos | DM/NBPC |
| Entidade externa interessada | EDP |
| Financiamento externo (S/N) | N |

1.4 Resumo

| | |
|----------------------------|---|
| <p>(max. 300 palavras)</p> | <p>As barragens desempenham um papel importante na garantia da qualidade de vida das sociedades, devido às necessidades de água e energia, para além do controlo de cheias. Destes factos surgem duas necessidades: a manutenção, reabilitação e controlo de segurança das estruturas existentes, tendo muitas delas dezenas de anos; e o desenvolvimento de soluções técnicas, produtos e processos construtivos adequados às novas exigências impostas pelas obras em projeto e construção.</p> <p>O trabalho a desenvolver aborda algumas das principais questões sobre o comportamento do betão de barragens, nas fases de construção e exploração. Pretende-se dar um contributo na caracterização experimental, laboratorial e <i>in situ</i>, e na simulação numérica, usando modelos de partículas, do comportamento de provetes de betão de barragens, integral e crivado, para a determinação dos parâmetros que caracterizam as suas propriedades reológicas, por forma a compreender e quantificar as principais grandezas do âmbito da engenharia dos materiais e usá-las, à escala das estruturas, nas atividades de apoio à observação e ao controlo de segurança das obras. Espera-se a obtenção de melhoramentos significativos nos procedimentos experimentais e numéricos por forma a que, futuramente: i) a padronização dos ensaios de campo possa conduzir a resultados mais fiáveis; ii) possa ser reduzido o número de ensaios onerosos de betão integral durante a construção; e iii) se disponha de técnicas numéricas robustas de interpretação dos resultados de ensaios de betões, sãos ou deteriorados. Este tipo de melhorias trará enormes vantagens no desenvolvimento das atividades de acompanhamento das barragens de betão nas fases de construção e exploração, nomeadamente no que respeita às seis dezenas de barragens portuguesas, muitas delas, mais antigas, apresentando processos de deterioração das propriedades mecânicas do betão. A utilização das metodologias referidas trará também vantagens para os donos de obra, designadamente no que respeita à racionalização de recursos e ao melhor conhecimento do comportamento dos materiais e das próprias obras.</p> <p>Este projeto destina-se a enquadrar a tese de doutoramento em curso do Bolseiro de Doutoramento Carlos Serra.</p> |
|----------------------------|---|

2 - Fundamentação

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

Devido às condições geométricas e a implicações estruturais e económicas, nas barragens utiliza-se betão em massa [1], que tem baixa dosagem de cimento, entre 100 a 200 kg/m³, e elevadas dosagens de adições, até 50% da dosagem de cimento. A dosagem de agregado é também elevada e a sua máxima dimensão pode atingir 150 mm.

A dissipação do calor de hidratação durante o processo de endurecimento e, conseqüentemente, o risco de fendilhação nas idades jovens quando se estabelece o equilíbrio térmico com o exterior, é uma das maiores preocupações no estudo da composição do betão de barragens. Para a avaliação do risco de fendilhação é necessário conhecer o desenvolvimento das propriedades mecânicas e das tensões durante os primeiros meses de idade do betão. Para além disso, a interpretação do comportamento estrutural durante o período de exploração e a avaliação da segurança requerem informação sobre o comportamento instantâneo e diferido do betão ao longo dos anos [2-7].

O betão de barragens tem características mecânicas distintas dos betões convencionais. Devido à dimensão dos agregados, é necessário usar provetes de grandes dimensões para as determinar. Dadas as dificuldades de moldagem, transporte e ensaio de provetes de grandes dimensões, utilizam-se predominantemente provetes de dimensões correntes, usados para os betões convencionais, pelo que é necessário crivar o betão estrutural (betão integral), através da remoção, em fresco, dos agregados de maiores dimensões. Dada a dimensão corrente dos dispositivos de observação embebidos, designadamente os extensómetros e as células tensométricas, o betão de envólucra é também crivado. Os betões integrais e os correspondentes betões crivados têm propriedades distintas, sendo ainda mal conhecidas as relações entre elas, devido, principalmente, à escassez de resultados de ensaios. Esta questão tem constituído tema de estudo no LNEC nas últimas décadas. No projeto da barragem do Baixo Sabor, recorrendo aos resultados de ensaios efetuados em quatro grandes barragens, foram estabelecidas correlações entre as resistências à compressão aos 90 dias do betão integral e do betão crivado. Verificou-se, nessas obras, que o betão integral apresentou valores de resistência à compressão de cerca de 60% a 80% da resistência à compressão do respetivo betão crivado. Outros resultados experimentais, para determinação da função de fluência, mostram uma relação semelhante entre os parâmetros que caracterizam o comportamento diferido do betão integral e do betão crivado [6], [8-12].

Dadas as dificuldades de ensaio de peças de grandes dimensões, a modelação pode constituir uma ferramenta de grande utilidade no estudo do comportamento do betão de barragens [13-18]. A utilização de modelos numéricos baseados em modelos de partículas poderá permitir o estudo da influência da crivagem no comportamento do betão, minimizando, no futuro, a execução de ensaios em provetes de betão integral. Por outro lado, dado que o betão crivado é utilizado no envolvimento dos instrumentos embebidos, para a determinação do estado de deformação e tensão da estrutura é necessário conhecer as propriedades dos betões integrais e crivados. Nesse âmbito, devem referir-se os trabalhos numéricos desenvolvidos no LNEC para determinar a influência das características do agregado no comportamento do betão e para reproduzir os efeitos globais dos fenómenos associados à fratura [19]. A modelação explícita do agregado embebido numa matriz de ligante tem sido considerada no estudo do comportamento diferido do betão convencional [15].

3 - Objectivos

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

O projeto pretende contribuir para uma melhor transposição do conhecimento da área da engenharia dos materiais para a engenharia de estruturas. Estabelecendo uma ponte entre estes dois campos da engenharia, será possível determinar a influência de eventuais modificações ou variações de composição nas propriedades do betão e nas grandezas que usualmente são monitorizadas com os sistemas de observação das obras. No caso particular de barragens, o conhecimento das propriedades reológicas do betão constitui um requisito essencial na interpretação do comportamento nas fases de construção, primeiro enchimento e exploração, com enfoque nos deslocamentos, extensões e tensões.

Com o apoio das ferramentas disponíveis na engenharia dos materiais e na engenharia de estruturas, tanto no campo experimental como no numérico, pretende-se estudar as relações entre as propriedades reológicas dos tipos de betão existentes na construção de barragens, em particular o betão integral/estrutural e o betão crivado. Existe particular interesse em caracterizar a evolução ao longo do tempo das extensões, a fluência básica (para tensões impostas), bem como o desenvolvimento da resistência à compressão e à tração. O comportamento diferido tem especial relevância na engenharia de barragens, uma vez que, para além de estar diretamente relacionado com o aumento das deformações da estrutura ao longo do tempo em situações de carga (fluência), é também responsável pela relaxação de tensões sob deformações impostas, como é o caso das variações térmicas e das expansões.

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

Comportamento do betão integral e crivado:

- Estudo da influência da crivagem nas propriedades do betão;
- Estudo da influência da dimensão dos agregados na resistência e na deformabilidade;
- Identificação das relações entre as propriedades do betão integral e crivado;

Modelação do comportamento do betão usando o método dos elementos discretos:

- Modelação do comportamento viscoelástico do betão com modelos de partículas;
- Modelação de ensaios de fluência e relaxação em provetes de betão;
- Avaliação da influência da granulometria dos agregados no comportamento instantâneo e diferido do betão.

Modelação do comportamento estrutural utilizando o método dos elementos finitos:

- Modelação do comportamento de uma barragem sujeita às principais ações, considerando as propriedades reológicas do betão estrutural obtidas a partir dos ensaios e modelos de provetes de betão integral e crivado;
- Análise da influência das propriedades reológicas no campo de extensões, tensões e deslocamentos da estrutura.

4 - Contribuições inovadoras

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

Este projeto de investigação visa o aprofundamento dos conhecimentos relativos ao comportamento estrutural do betão de barragens e o desenvolvimento de metodologias de apoio à análise estrutural para avaliação da segurança e interpretação do comportamento de barragens de betão. O trabalho proposto inclui o melhoramento dos procedimentos experimentais e a execução de ensaios em condições de obra em betão integral que, por si, constitui uma mais-valia para o conhecimento do betão de barragens. A utilização de modelos numéricos baseados no método dos elementos discretos para a previsão da capacidade resistente e do desenvolvimento das extensões diferidas do betão integral e crivado constitui uma das contribuições inovadoras e pode permitir uma melhor compreensão do comportamento mecânico do betão, considerando explicitamente a dimensão dos agregados. Espera-se a obtenção de melhoramentos significativos nos procedimentos experimentais e numéricos por forma a que, futuramente: i) a padronização dos ensaios de campo possa conduzir a resultados mais fiáveis; ii) possa ser reduzido o número de ensaios onerosos de betão integral durante a construção; e iii) se disponha de técnicas numéricas robustas de interpretação dos resultados de ensaios de betões, são ou deteriorados. Este tipo de melhorias trará enormes vantagens no desenvolvimento das atividades de acompanhamento das barragens de betão nas fases de construção e exploração, nomeadamente no que respeita às seis dezenas de barragens portuguesas, muitas delas, mais antigas, apresentando processos de deterioração das propriedades mecânicas do betão. A utilização das metodologias referidas trará também vantagens para os donos de obra, designadamente no que respeita à racionalização de recursos e ao melhor conhecimento do comportamento dos materiais e das próprias obras.

5 - Metodologia

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

Em seguida apresentam-se as quatro principais tarefas previstas no desenvolvimento do projeto de investigação. São referidas as entidades onde serão realizados os ensaios, nomeadamente o Departamento de Materiais (DM) do LNEC e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), esta última no âmbito do apoio que está a dar à EDP nos ensaios de caracterização das propriedades do betão das barragens em construção. A implementação das células de fluência nas barragens de montante do Baixo Sabor, Ribeiradio e Foz Tua foi financiada pela EDP e a realização dos ensaios laboratoriais do betão integral, na FEUP, é encargo da EDP.

Atividade 1. Pesquisa bibliográfica:

Tarefa 1.1. Pesquisa bibliográfica do trabalho experimental relativo ao comportamento estrutural do betão convencional e do betão de barragens;

Tarefa 1.2. Pesquisa bibliográfica de modelos numéricos para o estudo do comportamento instantâneo e diferido do betão, com particular foco nos modelos de partículas aplicados ao método dos elementos discretos.

Atividade 2. Trabalhos experimentais:

Tarefa 2.1. Ensaio de fluência em compressão de provetes de argamassa de ligação dos agregados grossos, a realizar em laboratório (LNEC/DM e LNEC/DBB);

Tarefa 2.2. Ensaio de determinação da curva extensão-tensão (em compressão) de provetes de argamassa de ligação dos agregados grossos, a realizar em laboratório (LNEC/DM e LNEC/DBB);

Tarefa 2.3. Ensaio de fluência em compressão, in situ e em laboratório, de betão integral, de betão crivado #76 e de betão crivado #38 (ensaio in situ realizados em células de fluência instaladas nas barragens de montante do Baixo Sabor, Ribeiradio e Foz Tua);

Tarefa 2.4. Ensaio de determinação da curva extensão-tensão até à rotura (em compressão) de provetes de betão crivado #38, a realizar em laboratório (LNEC/DM);

Tarefa 2.5. Ensaio de determinação da resistência à compressão e à tração e ensaio de determinação do módulo de elasticidade de provetes de betão integral e crivado #38 (FEUP e LNEC/DM);

Tarefa 2.6. Ensaio de determinação da resistência à compressão e ensaio de determinação do módulo de elasticidade da rocha utilizada na produção do agregado dos betões estudados (LNEC/DBB);

Tarefa 2.7. Execução de estudos de correlação estatística dos resultados obtidos, nomeadamente entre os resultados da argamassa de ligação dos agregados grossos, o betão crivado e o betão integral;

Tarefa 2.8. Submissão de um artigo científico em revista internacional com os principais resultados obtidos.

Atividade 3. Modelação do comportamento do betão:

Tarefa 3.1. Estudo e implementação de modelos constitutivos dependentes do tempo [20] que permitam simular o comportamento dos materiais cimentícios utilizando modelos de partículas;

Tarefa 3.2. Modelação da mesoestrutura da argamassa de ligação dos agregados grossos através de modelos de partículas e calibração das propriedades mecânicas dos contactos e reprodução dos ensaios experimentais referidos nas tarefas 2.1 e 2.2;

Tarefa 3.3. Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação do modelo diferido aplicado a materiais com maturação;

Tarefa 3.4. Modelação da mesoestrutura dos betões integral, crivado #38 e #76 através de modelos de partículas calibrados para o comportamento da argamassa de ligação dos agregados grossos e reprodução dos ensaios experimentais referidos nas tarefas 2.3, 2.4 e 2.5;

Tarefa 3.5. Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação do modelos desenvolvidos para a avaliação da crivagem do betão de barragens e a sua comparação com os resultados experimentais.

Atividade 4. Modelação do comportamento estrutural de uma barragem:

Tarefa 4.1. Integração dos resultados obtidos na modelação da mesoestrutura do betão na modelação do comportamento de uma grande barragem abóbada nos períodos de construção e de primeiro enchimento da albufeira e comparação com os resultados da observação;

Tarefa 4.2. Submissão de um artigo científico em revista internacional com a comparação dos resultados de monitorização obtidos em obra com os resultados de um modelo numérico para a avaliação do comportamento da barragem.

Para a realização dos trabalhos experimentais referidos anteriormente é necessária a conjugação do apoio e disponibilidade de alguns recursos do LNEC, bem como a ligação com as obras em construção.

No que diz respeito à realização de ensaios de fluência, o LNEC foi responsável pela instalação das células de fluência e pela realização dos ensaios em laboratório de betão crivado #38 (tarefa 2.3) das barragens do Baixo Sabor (montante), Ribeiradio e Foz Tua. A logística deste tipo de ensaios envolve recursos humanos do LNEC/DBB/NO e do LNEC/DM para a execução de ensaios correntes (determinação de módulo de elasticidade e resistência à compressão – tarefa 2.4). Os ensaios correntes de betão integral e crivado #38 (tarefa 2.5), decorrentes da caracterização do betão das obras, são realizados na FEUP. No que diz respeito aos ensaios de argamassas (tarefas 2.1 e 2.2) e aos ensaios de rocha (tarefa 2.6), prevê-se também a mobilização dos meios disponíveis no DBB/NMMR.

No que diz respeito aos estudos de modelação, serão utilizados modelos de partículas para a simulação do comportamento na mesoescala e modelos tridimensionais contínuos para representar o comportamento dos protótipos. Prevê-se a utilização, em ambos os casos, de meios disponíveis no LNEC. Para a análise dos modelos de partículas propõe-se a utilização do método dos elementos discretos, devendo ser usado para o efeito o programa PFC2D [21] que permite a integração de novos modelos reológicos. No que respeita à análise do comportamento das barragens, serão usados programas de cálculo automático de comprovada robustez [2, 3].

Referencias Bibliográficas:

- [1] ACI Committee 207, "207.1R-05: Guide to mass concrete" 2005.
- [2] A. L. Batista, "Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens de abóbada", Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1998, Tese de doutoramento.
- [3] S. Oliveira, "Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulação de dano", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000, Tese de doutoramento.
- [4] J. Pinho, "Contribuição para o estudo da deformabilidade do betão de barragens", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1989.
- [5] J. Ramos, "Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1985.
- [6] ICOLD, "ICOLD Bulletin: The physical properties of hardened conventional concrete in dams. Draft for ICOLD review" 2008.
- [7] A. Neville, "Properties of concrete", Third edit. Harlow Essex: Longman Scientific & Technical, 1983.
- [8] M. Elices e C. Rocco, "Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete", Engineering Fracture Mechanics, vol. 75, no. 13, pp. 3839–3851, 2008.
- [9] C. Serra, A. L. Batista, e A. Tavares de Castro, "Creep of dam concrete evaluated from laboratory and in situ tests", Strain, p. 241–255, Junho 2012.
- [10] J. Vilardell, A. Aguado, L. Agullo, e R. Gettu, "Estimation of the modulus of elasticity for dam concrete", Cement and Concrete Research, vol. 28, no. 1, pp. 93–101, 1998.
- [11] U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation, "Concrete manual. A water resources technical publication", 8th Ed. Washington: United States Government Printing Office, 1988, p. 627.
- [12] J. Soares de Pinho, J. Ramos, e C. Florentino, "Control of mass concrete for dams. Full-mixed and wet-screened concrete tests", in ICOLD Congress Proc., 1988.
- [13] D. O. Potyondy e P. A. Cundall, "A bonded-particle model for rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 41, no. 8, pp. 1329–1364, 2004.
- [14] K. Meguro e M. Hakuno, "Fracture analysis of concrete structures by the modified distinct element method", Structural Engineering / Earthquake Engineering, vol. 6, no. 2, pp. 283–294, 1989.
- [15] G. Cusatis, "Tridimensional random particle model for concrete", Politecnico di Milano, 2001.
- [16] G. Lilliu e J. G. van Mier, "3D lattice type fracture model for concrete", Engineering Fracture Mechanics, vol. 70, no. 7–8, pp. 927–941, May 2003.
- [17] S. Hentz, L. Daudeville, e F. V. Donzé, "Identification and validation of a discrete element model for concrete", Journal of Engineering Mechanics, vol. 130, no. 6, pp. 709–719, 2004.
- [18] N. Azevedo, "A rigid particle discrete element model for the fracture analysis of plain and reinforced concrete", Heriot-Watt University, 2003.
- [19] N. M. Azevedo, J. V. Lemos, e J. R. de Almeida, "Influence of aggregate deformation and contact behaviour on discrete particle modelling of fracture of concrete", Engineering Fracture Mechanics, vol. 75, no. 6, pp. 1569–1586, Apr. 2008.
- [20] Z. P. Bažant, A. Hauggaard, S. Baweja, e F. Ulm, "Microprestress-solidification theory for concrete creep. I: Aging and drying effects", Journal of Engineering Mechanics. American Society of Civil Engineers. vol. 123, Nº 11, p. 1188-1201, 1997.
- [21] Itasca Consulting Group Inc., "PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions)", Minnesota, 2008.

6 - Plano de Trabalhos

| Atividade | Designação da Atividade | Tarefa | Designação da Tarefa | 1º Semestre | 2º Semestre | 3º Semestre | 4º Semestre | 5º Semestre | 6º Semestre |
|--------------|-------------------------|--------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Actividade 1 | Pesquisa bibliográfica | T 1.1 | Pesquisa bibliográfica do trabalho experimental relativo à determinação e comportamento estrutural do betão convencional e do betão de barragens; | | | | | | |
| | | T 1.2 | Pesquisa bibliográfica de modelos numéricos para o estudo do comportamento instantâneo e diferido do betão, com particular foco nos modelos de partículas aplicados ao método dos elementos discretos. | | | | | | |
| Actividade 2 | Trabalhos experimentais | T 2.1 | Ensaio de fluência em compressão de provetes de argamassa de ligação dos agregados grossos, a realizar em laboratório (LNEC/DM e LNEC/DBB); | | | | | | |
| | | T 2.2 | Ensaio de determinação da curva extensão-tensão (em compressão) de provetes de argamassa de ligação dos agregados grossos, a realizar em laboratório (LNEC/DM e LNEC/DBB); | | | | | | |
| | | T 2.3 | Ensaio de fluência em compressão, <i>in situ</i> e em laboratório, de betão integral, de betão crivado #76 e de betão crivado #38 (betão das barragens do Baixo Sabor, de Ribeiradão e de Foz Tua); | | | | | | |
| | | T 2.4 | Ensaio de determinação da curva extensão-tensão (em compressão) de provetes de betão crivado #38, a realizar em laboratório (LNEC/DM); | | | | | | |
| | | T 2.5 | Ensaio de determinação da resistência à compressão e à tração e ensaios de determinação do módulo de elasticidade de provetes de betão integral e crivado #38 (FEUP e LNEC/DM); | | | | | | |
| | | T 2.6 | Ensaio de determinação da resistência à compressão e ensaios de determinação do módulo de elasticidade da rocha utilizada na produção do agregado dos betões estudados (LNEC/DBB); | | | | | | |
| | | T 2.7 | Execução de estudos de correlação estatística dos resultados obtidos, nomeadamente entre os resultados da argamassa de ligação dos agregados grossos, o betão crivado e o betão integral; | | | | | | |
| | | T 2.8 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com os principais resultados obtidos. | | | | | | |

| Atividade | Designação da Atividade | Tarefa | Designação da Tarefa | 1º Semestre | 2º Semestre | 3º Semestre | 4º Semestre | 5º Semestre | 6º Semestre |
|--------------|---|--------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Actividade 3 | Modelação do comportamento do betão | T 3.1 | Estudo e implementação de modelos constitutivos dependentes do tempo [18] que permitam simular o comportamento dos materiais cimentícios utilizando modelos de partículas; | | | | | | |
| | | T 3.2 | Modelação da mesoestrutura da argamassa de ligação dos agregados grossos através de modelos de partículas e calibração das propriedades mecânicas dos contactos e reprodução dos ensaios experimentais referidos nas tarefas 2.1 e 2.2; | | | | | | |
| | | T 3.3 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação do modelo diferido aplicado a materiais com maturação; | | | | | | |
| | | T 3.4 | Modelação da mesoestrutura dos betões integral, crivado #38 e #76 através de modelos de partículas calibrados para o comportamento da argamassa de ligação dos agregados grossos e reprodução dos ensaios experimentais referidos nas tarefas 2.3, 2.4 e 2.5; | | | | | | |
| | | T 3.5 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação dos modelos desenvolvidos para a avaliação da crivagem do betão de barragens e a sua comparação com os resultados experimentais. | | | | | | |
| Actividade 4 | Modelação do comportamento estrutural de uma barragem | T 4.1 | Integração dos resultados obtidos na modelação da mesoestrutura do betão na modelação do comportamento de uma grande barragem abóbada nos períodos de construção e de primeiro enchimento da albufeira e comparação com os resultados da observação; | | | | | | |
| | | T 4.2 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com a comparação dos resultados de monitorização obtidos em obra com os resultados de um modelo numérico para a avaliação do comportamento da barragem. | | | | | | |

7 - Equipa de trabalho

| Nome | Categoria | Setor/Entidade | Tarefas | Afetação ao projeto (%) |
|-----------------------|------------------------|----------------|-------------|-------------------------|
| António Lopes Batista | Investigador Principal | DBB/NO | Coordenação | 15% |
| Nuno Monteiro Azevedo | Investigador Principal | DBB/NO | Coordenação | 15% |
| Carlos Serra | BD | DBB/NO | BD | 90% |
| Fernando Marques | Assistente técnico | DBB/NO | Técnico | 20% |
| | Escolher | | | |

8 - Resultados expectáveis

| Resultados por atividade/tarefa | Descrição |
|--|--|
| <i>(descrever os resultados esperados por actividade e/ou tarefas)</i> | |
| Atividade 1 | Obter uma base de referências sobre o estudo do comportamento do betão, em particular do betão de barragens. |
| | Obter uma base de referências sobre modelos de interpretação do comportamento do betão (modelos analíticos e numéricos). |
| Atividade 2 | Obter uma base experimental com vista à determinação das principais propriedades mecânicas do betão: 1) definição de procedimentos experimentais para a realização de ensaios em argamassa de ligação dos agregados grossos; 2) melhoramento no sistema de caracterização das propriedades de deformabilidade do betão in situ, através de células de fluência; 3) definição de metodologias de tratamento e interpretação dos resultados experimentais obtidos; 4) identificação de modelos estatísticos para a correlação de propriedades e leis empíricas de desenvolvimento ao longo do tempo. |
| Atividade 3 | Definir metodologias de análise e previsão do comportamento do betão de barragens, com base em modelos analíticos e modelos numéricos: 1) desenvolver modelos analíticos para a previsão das propriedades mecânicas do betão de barragens; 2) usando modelos de partículas, calibrar relações entre micro-macro parâmetros com base em resultados experimentais de argamassa de ligação e de betão crivado; 3) reproduzir numericamente a estrutura do betão de barragens e o processo de crivagem; 4) avaliar numericamente a influência da granulometria dos agregados no comportamento instantâneo e diferido do betão. |
| Atividade 4 | Definir metodologias para o desenvolvimento de modelos de elementos finitos a usar no estudo do comportamento das estruturas: 1) utilizar as relações entre micro e macro parâmetros para obter as principais características dos materiais utilizadas no modelo; 2) transformar deformações medidas em extensómetros embebidos em betão crivado em tensões equivalentes no betão integral; 3) avaliar a influência da variabilidade das propriedades mecânicas, a partir dos resultados experimentais e das simulações numéricas. |

| Outros resultados | Quantidade |
|---------------------------|------------|
| Teses | |
| <i>mestrado</i> | |
| <i>doutoramento</i> | 1 |
| <i>outras</i> | |
| Artigos em revista | |
| <i>nacional</i> | 1 |
| <i>internacional</i> | 3 |
| Comunicações | 6 |
| Outros produtos | |
| | |
| | |
| | |

9 - Recursos humanos

| Grupo | Esforço (h*m) | Valor € |
|--------------|---------------|------------|
| 1 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 10.80 | 61,560.00 |
| 3 | 32.40 | 113,400.00 |
| 4 | 7.20 | 10,800.00 |
| <i>TOTAL</i> | 50.40 | 185,760.00 |

10 - Despesas correntes

| Designação | Quantidade | Valor unitário € | Montante € |
|--|------------|------------------|------------|
| Execução de ensaios laboratoriais de deter | 90 | 90.00 | 8,100.00 |
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| <i>TOTAL</i> | | | 8,100.00 |

11 - Equipamento

| Designação | Quantidade | Valor unitário € | Montante € |
|--------------|------------|------------------|------------|
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| | | | 0.00 |
| <i>TOTAL</i> | | | 0.00 |

ANEXO II

Plano de trabalhos do projeto DamConcrete após proposta de revisão em 2018 e extensão até 2023

Quadro II.1 – Plano de trabalhos do projeto DamConcrete após proposta de revisão em 2018 e extensão até 2023

| Atividade | Tarefa | Designação da tarefa | 2015 | | 2016 | | 2017 | | 2018 | | 2019 | | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Comentários | |
|-------------------------------|--------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|------|------|------|------|-------------|--|
| | | | 1º Sem | 2º Sem | 3º Sem | 4º Sem | 5º Sem | 6º Sem | 7º Sem | 8º Sem | 9º Sem | 10º Sem | | | | | | |
| A1 Pesquisa bibliográfica | T1.1 | Pesquisa bibliográfica do trabalho experimental relativo à determinação e comportamento estrutural do betão convencional e do betão de barragens | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T1.2 | Pesquisa bibliográfica de modelos numéricos para o estudo do comportamento instantâneo e diferido do betão, com particular foco nos modelos de partículas aplicados ao método dos elementos discretos | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T1.3 | Pesquisa bibliográfica relativa à representação, em modelos de partículas, de deformações impostas, incluindo a sua acoplagem ao comportamento diferido e ao dano | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A2 Trabalhos experimentais | T2.1 | Estudo da deformabilidade do betão das barragens portuguesas | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T2.2 | Ensaio de fluência em compressão, <i>in situ</i> e em laboratório, de betão integral, de betão crivado #76 e de betão crivado #38 (betão das barragens do Baixo Sabor, Ribeiradio, Foz Tua, Daivões e Alto Tâmega) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T2.3 | Ensaio de determinação da resistência à compressão e à tração e ensaio de determinação do módulo de elasticidade de provetes de betão integral e crivado #38 (FEUP, LNEC/DM e laboratório de obra do SET) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T2.4 | Ensaio de determinação do módulo de elasticidade, da resistência à compressão e da resistência à tração por compressão diametral de provetes de argamassa de ligação dos agregados | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T2.5 | Execução de estudos de correlação estatística dos resultados obtidos, nomeadamente entre os resultados da argamassa de ligação dos agregados grossos, o betão crivado e o betão integral | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T2.6 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com os principais resultados obtidos | | | | | | | | | | | | | | | | |

Quadro II.2 – Plano de trabalhos do projeto DamConcrete após proposta de revisão em 2018 e extensão até 2023 (continuação)

| Atividade | Tarefa | Designação da tarefa | 2015 | | 2016 | | 2017 | | 2018 | | 2019 | | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Comentários |
|--|--------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|------|------|------|------|---|
| | | | 1º Sem | 2º Sem | 3º Sem | 4º Sem | 5º Sem | 6º Sem | 7º Sem | 8º Sem | 9º Sem | 10º Sem | | | | | |
| A3 Modelos analíticos para a previsão do comportamento do betão | T3.1 | Desenvolvimento de metodologias de previsão das deformações instantâneas e diferidas do betão de barragens a partir dos resultados dos ensaios do betão integral, utilizando modelos compósitos de duas fases | | | | | | | | | | | | | | | Atividade adicionada ao projeto no relatório de progresso de 2018 no seguimento dos trabalhos desenvolvidos na tese de doutoramento do IA Carlos Serra. |
| | T3.2 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação da metodologia desenvolvida na tarefa 3.1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T3.3 | Desenvolvimento de metodologias de previsão da resistência à compressão e à tração por compressão diametral do betão de barragens a partir dos resultados dos ensaios do betão integral, utilizando a lei de escala e uma adaptação da lei de Abrams | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T3.4 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação da metodologia desenvolvida na tarefa 3.3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| A4 Caracterização dos betões utilizados na construção das novas barragens (Baixo Sabor, Ribeirão, Foz Tua, Daivões e Alto Tâmega) | T4.1 | Compilação e exploração integrada dos resultados dos ensaios de caracterização dos betões, incluindo os das células de fluência | | | | | | | | | | | | | | | Atividade adicionada ao projeto no relatório de progresso de 2018 para a extensão do projeto até 2023. |
| | T4.2 | Avaliação do desempenho dos diferentes tipos de células de fluência | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T4.3 | Caracterização da deformabilidade e da resistência dos betões utilizados | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T4.4 | Avaliação das implicações estruturais das propriedades dos betões no desempenho das obras | | | | | | | | | | | | | | | |

Quadro II.3 – Plano de trabalhos do projeto DamConcrete após proposta de revisão em 2018 e extensão até 2023 (continuação)

| Atividade | Tarefa | Designação da tarefa | 2015 | | 2016 | | 2017 | | 2018 | | 2019 | | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Comentários | |
|--|--------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|------|------|------|------|-------------|---|
| | | | 1º Sem | 2º Sem | 3º Sem | 4º Sem | 5º Sem | 6º Sem | 7º Sem | 8º Sem | 9º Sem | 10º Sem | | | | | | |
| A5 Modelação numérica do comportamento do betão | T5.1 | Estudo e implementação de modelos constitutivos dependentes do tempo que permitam simular o comportamento dos materiais cimentícios utilizando modelos de partículas | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T5.2 | Modelação da mesoestrutura da argamassa de ligação dos agregados grossos através de modelos de partículas e calibração das propriedades mecânicas dos contactos e reprodução dos ensaios experimentais referidos nas tarefas 2.1 e 2.2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T5.3 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação do modelo diferido aplicado a materiais com maturação | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T5.4 | Modelação da mesoestrutura dos betões integral, crivado #38 e #76 através de modelos de partículas calibrados para o comportamento da argamassa de ligação dos agregados grossos e reprodução dos ensaios experimentais referidos nas tarefas 2.3, 2.4 e 2.5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T5.5 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação dos modelos desenvolvidos para a avaliação da crivagem do betão de barragens e a sua comparação com os resultados experimentais | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T5.6 | Implementação de deformações impostas ao nível dos contactos entre partículas para a modelação das variações de temperatura, retração e expansões | | | | | | | | | | | | | | | | Tarefas adicionadas ao projeto no relatório de progresso de 2018 para a extensão do projeto até 2023. |
| | T5.7 | Acoplagem das deformações diferidas e do dano ao nível dos contactos entre partículas | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T5.8 | Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação da representação do comportamento do betão ao longo do tempo para diferentes solicitações | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



www.lnec.pt

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