



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

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

**Relatório de progresso 2015-2017 do projeto do P2I/LNEC**

Lisboa • julho de 2018

**I&D** BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 255/2018 – **DBB/NO**

## **Título**

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

Relatório de progresso 2015-2017 do projeto do P21/LNEC

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

### **António Lopes Batista**

Investigador Principal, Diretor do Departamento

### **Nuno Monteiro Azevedo**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

### **Carlos Serra**

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Observação

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 255/2018

Proc. 0403/112/20181

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

Relatório de progresso 2015-2017 do P2I/LNEC

### Resumo

---

Descreve-se a atividade de investigação realizada no projeto DamConcrete até 2017, 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 previstos. Propõe-se a extensão do projeto até 2020, para se conseguir uma melhor divulgação dos desenvolvimentos efetuados e para permitir a abordagem de tópicos de muito interesse para a engenharia de barragens, designadamente no que respeita às deformações impostas.

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

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

Progress report 2015-2017 of the P2I/LNEC project

### Abstract

---

This report describes the research activities of the DamConcrete project until 2017, in the scope of the rheological behavior of dam concrete considering experimental work (laboratorial and *in situ*), analytical models and particle models. The obtained results are analyzed and assessed, considering the initial goals of the project. A project extension until 2020 is proposed, in order to better disseminate the main developments and allow an approach to interesting topics concerning dam engineering, namely with respect to prescribed strains.

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 e proposta de extensão do projeto até 2020 .....	6
3	Divulgação de resultados .....	11
3.1	Publicações em livros, revistas e congressos .....	11
3.1.1	Artigos em revistas internacionais .....	11
3.1.2	Artigos em revistas nacionais .....	11
3.1.3	Comunicações apresentadas em congressos internacionais .....	11
3.1.4	Comunicações apresentadas em congressos nacionais .....	12
3.2	Relatórios técnico/científicos .....	12
3.3	Teses de doutoramento .....	13
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento .....	14
4.1	Indicadores de desempenho.....	14
4.2	Recursos humanos mobilizados .....	14
4.3	Financiamento .....	15
4.4	Aplicações a estudos por contrato .....	15
5	Considerações finais .....	16

## Índice de quadros

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos do projeto de investigação DamConcrete .....	3
Quadro 2.2 – Plano de trabalhos do projeto de investigação DamConcrete (continuação) .....	4
Quadro 2.3 – Proposta de revisão e extensão do plano de trabalhos do projeto DamConcrete .....	8
Quadro 2.4 – Proposta de revisão e extensão do plano de trabalhos do projeto DamConcrete (continuação) .....	9
Quadro 2.5 – Proposta de revisão e extensão do plano de trabalhos do projeto DamConcrete (continuação) .....	10
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho .....	14
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC .....	14

## 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 de tese do bolseiro de doutoramento (BD) 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 e discutida no dia 5 de fevereiro de 2018.

O projeto está integrado no Plano de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC e tem enquadramento na matriz programática da Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020 (E2I), inserindo-se no eixo E1 (Património construído) e na temática T8 (Desenvolvimento de competências e transferência de conhecimentos).

O BD 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 2017, sendo os indicadores apresentados respeitantes a este período.

A equipa de investigação é composta por elementos do DBB, sendo constituída pelo Investigador Principal (IP) Engº António Lopes Batista, também Professor Associado convidado da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da UNL, orientador científico e responsável pelo projeto, pelo Investigador Auxiliar (IA) Engº Nuno Monteiro Azevedo, coorientador da tese de doutoramento, e pelo Engº Carlos Serra, BD até final de 2017 e bolseiro pós-doutoramento (BPD) desde maio de 2018.

Este relatório destina-se a apresentar o progresso das atividades definidas no projeto DamConcrete, 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. Propõe-se que o plano de trabalhos do projeto seja prolongado até meados de 2020 e ainda a agregação do bolseiro de iniciação à investigação científica (BIIC) Engº João Conde Silva (também do DBB) ao projeto.

## 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 pretende 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. Pretende-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.

Em seguida apresentam-se as atividades desenvolvidas no projeto de investigação. São referidos os locais onde foram realizados os ensaios, nomeadamente nas próprias obras, no Departamento de Materiais (DM) e no DBB do LNEC, e ainda na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), no âmbito do apoio que tem dado à EDP na 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 nas barragens do Baixo Sabor, Ribeiradio e Foz Tua, todas da EDP.

### 2.2 Descrição da atividade desenvolvida

Nos Quadros 2.1 e 2.2 apresenta-se o plano de trabalhos do projeto submetido em 2015. 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 2013-2017 estão genericamente em linha com o plano inicial [R1], mas apresentaram, naturalmente, algumas diferenças. De facto, considerou-se oportuno adicionar uma nova atividade nova e eliminar a última atividade definida no plano. A atividade introduzida surgiu na sequência da tarefa T2.7 (Quadro 2.1), que previa a correlação estatística dos resultados experimentais, e relaciona-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 (ver Quadro 2.3). Esta nova atividade revelou-se muito importante na análise integrada dos resultados experimentais. A atividade eliminada do plano de trabalhos foi a A4 – Modelação do comportamento estrutural de uma barragem, a retomar no contexto da tarefa T4.4 do plano de trabalhos reformulado até 2020 (Quadro 2.4).

Algumas tarefas das atividades A2 e A3 sofreram também ajustes no decorrer do projeto. As tarefas relacionadas com os ensaios de fluência da argamassa de ligação dos agregados grossos (tarefa T2.1) e com os ensaios de determinação da curva tensão-deformação da argamassa e do betão crivado (tarefas T2.2 e T2.4) não foram executadas devido a dificuldades técnicas e indisponibilidade



de meios. Alternativamente, 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 A3 teve desenvolvimentos que não estavam previstos 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.

Do plano inicial, à exceção da atividade A4 que foi eliminada do plano de trabalhos, apenas a tarefa T3.5, relativa à disseminação de resultados, ainda não está completa (Quadro 2.2).

A última coluna dos Quadros 2.1 e 2.2 referem o grau de progresso do plano de trabalhos proposto na ficha do projeto.

**Quadro 2.1 – Plano de trabalhos do projeto de investigação DamConcrete**

Atividade	Tarefa	Designação da tarefa	1º Sem.	2º Sem.	3º Sem.	4º Sem.	5º Sem.	6º Sem.	Progresso
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							-
A2 Trabalhos experimentais	T2.1	Ensaio de fluência em compressão de provetes de argamassa de ligação dos agregados grossos, a realizar em laboratório (LNEC/DM e LNEC/DBB)							Não executada; abandonada
	T2.2	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)							Adaptada
	T2.3	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 Ribeiradio e de Foz Tua)							Completa
	T2.4	Ensaio de determinação da curva extensão-tensão (em compressão) de provetes de betão crivado #38, a realizar em laboratório (LNEC/DM)							Não executada; abandonada
	T2.5	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)							Completa
	T2.6	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)							Completa
	T2.7	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							Completa
	T2.8	Submissão de um artigo científico em revista internacional com os principais resultados obtidos							Completa

Quadro 2.2 – Plano de trabalhos do projeto de investigação DamConcrete (continuação)

Atividade	Tarefa	Designação da tarefa	1º Sem.	2º Sem.	3º Sem.	4º Sem.	5º Sem.	6º Sem.	Progresso
A3 Modelação do comportamento do betão	T3.1	Estudo e implementação de modelos constitutivos dependentes do tempo que permitam simular o comportamento dos materiais cimentícios utilizando modelos de partículas							Completa
	T3.2	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							Completa
	T3.3	Submissão de um artigo científico em revista internacional com a apresentação do modelo diferido aplicado a materiais com maturação							Completa
	T3.4	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							Completa
	T3.5	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							Incompleta
A4 Modelação do comportamento estrutural de uma barragem	T4.1	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							Não executada; a retomar no contexto da atividade T4.4 do plano de trabalhos proposto até 2020
	T4.2	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							Não executada; a retomar no contexto da atividade T4.4 do plano de trabalhos proposto até 2020

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

- **Atividade 1 - Pesquisa bibliográfica**

A pesquisa bibliográfica dividiu-se em duas 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. Em 2015 esta tarefa estava já em fase adiantada de desenvolvimento. A segunda tarefa respeitou 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 [C4, R2 e R3] e na análise dos resultados de ensaios executados na FEUP durante a construção da barragem do Baixo Sabor, cedidos pelo dono de obra (EDP).

No contexto dos ensaios de deformabilidade *in situ* recorrendo a células de fluência, referem-se a instalação de 3 grupos na barragem do Baixo Sabor em 2012, de 2 grupos na barragem de Ribeiradio em 2013 e de 2 grupos na barragem de Foz Tua em 2014. 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 [C7]. Os resultados dos ensaios das células de fluência instaladas na barragem do Baixo Sabor deram origem a dois artigos publicados em revistas internacionais [A1 e A2].

Os resultados 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* [A3] 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 [A3]. 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 [A5 e C1].

- **Atividade 3 - Modelação 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).

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. Os modelos implementados foram o 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 [A4], apresentado em duas comunicações [C2 e C5] 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.

- **Atividade 4 - Modelação do comportamento estrutural de uma barragem**

Como referido, o projeto tem privilegiado o estudo do betão à mesoescala, incluindo a caracterização experimental e a modelação numérica ao nível dos provetes. Dada a relevância desta atividade, designadamente o estudo da influência do comportamento do betão no desempenho das obras, será retomada em moldes ligeiramente diferentes, no âmbito da tarefa T4.4 do plano de trabalhos revisto, adiante apresentado.

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

## 2.3 Apreciação da atividade desenvolvida e proposta de extensão do projeto até 2020

Como referido, o projeto DamConcrete tem 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. Até ao final de 2017 foram conseguidos desenvolvimentos relevantes, como se pode verificar pelas publicações efetuadas, mas julga-se que o projeto deve prosseguir por cerca de mais dois anos, para se poderem terminar algumas atividades previstas inicialmente e também abordar outros assuntos relevantes para a temática em apreço, designadamente no que respeita à consideração de deformações impostas.

Os estudos realizados no âmbito do projeto têm sido centrados, como referido, ao nível da mesoestrutura do betão, no que diz respeito à caracterização experimental e à modelação numérica, pelo que se propõe que a atividade relacionada com o estudo do comportamento estrutural de barragens seja eliminada do projeto.

No decurso dos trabalhos, a análise dos resultados experimentais obrigou à 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 para 2018-2020 no sentido de incluir uma nova atividade. Os estudos, já concretizados, 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 [A1, A2 e A3].

Face ao desenvolvimento dos estudos do projeto, considera-se oportuno considerar uma nova atividade relacionada com a caracterização dos betões utilizados na construção das novas barragens (Baixo Sabor, Ribeiradio e Foz Tua), com vista à produção de conhecimento a partir do acervo de elementos disponíveis. Esta atividade está 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 estruturais das propriedades dos betões no desempenho das obras.

As duas novas atividades (uma já realizada e outra a desenvolver nos próximos meses) constam dos Quadros 2.3, 2.4 e 2.5, nos quais se apresenta a proposta de revisão e extensão do plano de trabalhos do projeto.

Refere-se que as tarefas T1.3, T5.6, T5.7 e T5.8, dada a sua complexidade, poderão ser prolongadas para além do horizonte temporal previsto. Contudo, o seu desenvolvimento já está em curso.

Quadro 2.3 – Proposta de revisão e extensão do plano de trabalhos do projeto DamConcrete

Atividade	Tarefa	Designação da tarefa	2015		2016		2017		2018		2019		2020
			1º Sem.	2º Sem.	3º Sem.	4º Sem.	5º Sem.	6º Sem.	7º Sem.	8º Sem.	9º Sem.	10º Sem.	11º 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 e Foz Tua)											
	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 e LNEC/DM)											
	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 2.4 – Proposta de revisão e extensão do plano de trabalhos do projeto DamConcrete (continuação)**

Atividade	Tarefa	Designação da tarefa	2015		2016		2017		2018		2019		2020
			1º Sem.	2º Sem.	3º Sem.	4º Sem.	5º Sem.	6º Sem.	7º Sem.	8º Sem.	9º Sem.	10º Sem.	11º 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											
	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, Ribeiradio e Foz Tua)	T4.1	Compilação e exploração integrada dos resultados dos ensaios de caracterização dos betões, incluindo os das células de fluência											
	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 2.5 – Proposta de revisão e extensão do plano de trabalhos do projeto DamConcrete (continuação)

Atividade	Tarefa	Designação da tarefa	2015		2016		2017		2018		2019		2020
			1º Sem.	2º Sem.	3º Sem.	4º Sem.	5º Sem.	6º Sem.	7º Sem.	8º Sem.	9º Sem.	10º Sem.	11º Sem.
A5 Modela- ção numérica do compor- tamento 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 do 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											
	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											



## 3 | Divulgação de resultados

### 3.1 Publicações em livros, revistas e congressos

#### 3.1.1 Artigos em revistas internacionais

[A1] - 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>;

[A2] - 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);

[A3] - 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);

[A4] - Serra, C.; Monteiro Azevedo, N.; Batista, A. L.; Schclar, 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>.

#### 3.1.2 Artigos em revistas nacionais

[A5] - 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.

#### 3.1.3 Comunicações apresentadas em congressos internacionais

[C1] - 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;

[C2] - 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.

### 3.1.4 Comunicações apresentadas em congressos nacionais

[C3] - Serra, C.; Batista, A. L.; Monteiro Azevedo, N. (2014) - *Análise integrada dos resultados dos ensaios de deformabilidade do betão de grandes barragens portuguesas*. 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas - JPEE2014, Lisboa;

[C4] - Serra, C.; Batista, A. L.; Monteiro Azevedo, N. (2014) - *Estudos de avaliação da deformabilidade do betão da barragem de montante do Baixo Sabor*. 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas - JPEE2014, Lisboa;

[C5] - 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;

[C6] - 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;

[C7] - Serra, C.; Batista, A. L.; Monteiro Azevedo, N. (2016) - *Melhoramentos recentes no projeto e instalação de células de fluência em barragens de betão*. 10<sup>o</sup> Congresso Nacional de Mecânica Experimental, pp. 205 -206, Lisboa.

### 3.2 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, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 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, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 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, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa;

[R5] - Serra, C.; Batista, A. L.; Pereira, R. (2013) - *Analysis of the concrete test results obtained during the Baixo Sabor dam construction*. Relatório 236/2017 – DBB/NO, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

### 3.3 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). Caparica.

## 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, os realizados de 2013 a 2017 e os previstos até meados de 2020.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Total previsto no projeto (4 anos)	Realizado de 2013 a 2017 (4 anos)	Previsto até 2020 (cerca de 2 anos)
Artigos em revistas internacionais	3	4	2
Artigos em revistas nacionais	0	1	1
Comunicações em congressos internacionais	6	2	4
Comunicações em congressos nacionais		5	
Relatórios científicos	0	5	2
Teses de doutoramento	1	1	0

### 4.2 Recursos humanos mobilizados

No Quadro 4.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC dedicados ao projeto entre 2015 e 2017, designadamente os meses de trabalho previstos e efetivamente dedicados, e ainda o previsto até meados de 2020.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC

Equipa do LNEC	Categoria	Afetação percentual prevista (2015-2017)	Meses de trabalho		Afetação percentual prevista (2018-2020)	Meses de trabalho
			Previsto entre 2015 e 2017 (2,5 anos)	Realizado entre 2015 e 2017 (2,5 anos)		Previsto até 2020 (cerca de 2 anos)
António Lopes Batista	IPI	15%	4,5	2,5	10%	2,4
Nuno Monteiro Azevedo	IA	15%	4,5	1,0	5%	1,2
Carlos Serra	BPD	90%	27,0	23,5	50%	12,0
João Conde Silva	BIIC	-	-	-	20%	4,8

### **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. Em próxima oportunidade será novamente submetido, 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 e Foz Tua, 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 três barragens e os resultados neles obtidos são fundamentais para a caracterização do comportamento da betão e, conseqüentemente, na interpretação do comportamento estrutural e na avaliação da segurança ao longo do tempo.

Prevê-se a instalação, num horizonte de cerca de três anos, de vários conjuntos de células de fluência nas barragens em construção de Daivões e Alto Tâmega, no rio Tâmega.

## 5 | Considerações finais

O projeto de investigação DamConcrete 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 das obras.

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. Para além disso, prevê a utilização de 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.

A utilização das metodologias em apreço 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.

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 à criação de conhecimento sobre o comportamento do betão das grandes barragens recentemente construídas, que terá desenvolvimento nos próximos meses.

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

Face ao descrito, propõe-se um novo planeamento de atividades e tarefas para o prolongamento do projeto DamConcrete até meados de 2020. Para além da inclusão das novas atividades atrás referidas, este prolongamento visa a conclusão de alguns trabalhos relacionados com atividades já definidas, nomeadamente o melhoramento dos modelos de rotura de contacto entre partículas e sua aplicação à modelação do betão de barragens, a implementação nos modelos de deformações impostas ao nível do contacto e na divulgação de resultados.

Lisboa, LNEC, julho de 2018

VISTOS

AUTORIA

O Chefe do Núcleo de Observação



António Tavares de Castro



António Lopes Batista  
Investigador Principal

O Chefe do Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas



Luís Manuel Nolasco Lamas



Nuno Monteiro Azevedo  
Investigador Auxiliar

O Diretor do Departamento de Barragens de Betão



António Lopes Batista



Carlos Luís de Oliveira Macedo Serra  
Bolseiro de Pós-Doutoramento

