



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

MEBAD – MODELAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BLOCOS SOB AÇÕES DINÂMICAS

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



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

MEBAD – MODELAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BLOCOS SOB AÇÕES DINÂMICAS

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

Lisboa • outubro 2023

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 337/2023 – DBB/NMMR

Título

MEBAD – MODELAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BLOCOS SOB AÇÕES DINÂMICAS

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

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

José Vieira de Lemos

Investigador-Coordenador, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

António Lopes Batista

Investigador-Coordenador, Diretor do Departamento

Jorge Pereira Gomes

Investigador Principal, 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 337/2023

Proc. 0402/1102/20615

MEBAD - MODELAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BLOCOS SOB AÇÕES DINÂMICAS

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

Resumo

Neste relatório apresenta-se, de forma sucinta, a descrição da atividade de investigação realizada no âmbito do projeto MEBAD do P2I/LNEC 2013-2020, no período 2016-2023. Os resultados da atividade são analisados e avaliados, em face dos objetivos previstos.

Palavras-chave: MEBAD / Modelos numéricos / Modelos de elementos discretos / Mecânica das rochas / Barragens de betão / Estruturas de alvenaria

MEBAD - MODELLING OF BLOCK STRUCTURES UNDER DYNAMIC LOADS

Report of the final assessment of the P2I/LNEC 2013-2020 project

Abstract

A concise description is presented of the research activities undertaken in the MEBAD project, within the P2I/LNEC 2013-2020 framework, during 2016-2023. The results achieved are analyzed and assessed, considering the project objectives.

Keywords: MEBAD / Numerical modelling / Discrete element models / Rock mechanics / Concrete dams / Masonry structures

Índice

1	Introdução	1
2	Atividade desenvolvida.....	2
2.1	Plano de trabalhos	2
2.2	Descrição da atividade desenvolvida.....	2
2.3	Aplicações a estudos por contrato	5
2.4	Apreciação da atividade desenvolvida.....	6
3	Divulgação de resultados	7
3.1	Teses de doutoramento	7
3.2	Dissertações de mestrado	7
3.3	Outras publicações	7
3.3.1	Edição de livros.....	7
3.3.2	Capítulos de livros	8
3.3.3	Edição de números especiais de revistas internacionais	8
3.3.4	Artigos em revistas internacionais	8
3.3.5	Comunicações a congressos.....	11
3.3.6	Outras publicações	12
3.4	Eventos de divulgação científica.....	13
4	Indicadores de desempenho e recursos mobilizados.....	14
4.1	Indicadores de desempenho.....	14
4.2	Recursos mobilizados	14
4.3	Candidaturas a financiamento	15
5	Considerações finais	16
	ANEXO Ficha inicial do projeto	19

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Síntese das tarefas do plano de trabalhos inicial.....	2
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho	14
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos.....	15

1 | Introdução

O projeto de investigação *Modelação de estruturas de blocos sob ações dinâmicas*, com o acrónimo MEBAD, teve início formal em junho de 2016. A duração inicialmente prevista era de 48 meses, tendo sido prolongado até setembro de 2023, o que conduziu a uma duração total de 88 meses. O projeto esteve integrado no Plano de Inovação e Investigação (P2I) do LNEC, tendo enquadramento na matriz programática da Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020 (E2I), inserindo-se no eixo E4 (Risco e segurança) e na temática T8 (Desenvolvimento de competências e transferência de conhecimentos). Apresenta-se no Anexo I a ficha inicial do projeto.

O projeto enquadrou um conjunto de estudos sobre a modelação numérica de estruturas com superfícies de descontinuidade, ou formadas por blocos, incluindo obras em maciços rochosos e estruturas de alvenaria e de betão em massa. Foi dado um relevo especial aos cenários envolvendo ações dinâmicas. Os modelos baseados no método dos elementos discretos (MED) constituíram a principal abordagem numérica, tendo sido examinado um conjunto de questões tendo em vista o desenvolvimento das formulações, a validação e a aplicação a diversos tipos de obras.

A equipa de investigação do LNEC foi formada por: IC José Vieira de Lemos (Investigador Responsável), IC António Lopes Batista e IP Jorge Pereira Gomes, do DBB; e IP Alfredo Campos Costa, do DE.

O projeto teve colaboração externa de: Prof. Carlos Sousa Oliveira (IST); Dr. Vasilis Sarhosis (U. Leeds, Reino Unido); Prof. Eser Catki (U. Bogazici, Istambul); Prof. Özden Saygili (U. Yeditepe, Istambul); Dr. Eduardo Bretas (Northern Research Institute, Noruega); Dr. Bora Pulatsu (Carleton University, Canadá); Dr. Bruno Silva (FEUP); e Dr. Francesca Gobbin (U. Roma Tre, Itália).

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Plano de trabalhos

Na Quadro 2.1 apresenta-se uma síntese das atividades do plano de trabalhos proposto na ficha do projeto MEBAD.

Quadro 2.1 – Síntese das tarefas do plano de trabalhos inicial

Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa
1 - Modelação do comportamento de superfícies de descontinuidade	T1.1	Implementação de modelos constitutivos de descontinuidades
	T1.2	Aplicação em estudos de avaliação da segurança
2 - Modelação da fratura de blocos em modelos MED	T2.1	Desenvolvimento de modos de representação da fratura de blocos
	T2.2	Comparação com modelos MEF
	T2.3	Comparação com formulações alternativas MED
3 - Validação experimental de modelos MED	T3.1	Análise de ensaios realizados no NESDE
	T3.2	Análise de movimentos observados em estruturas de blocos
4 - Aplicação a estruturas de alvenaria	T4.1	Estruturas de alvenaria
	T4.2	Barragens de alvenaria
	T4.3	Metodologias de geração de modelos numéricos
	T4.4	Representação de geometrias irregulares e danos estruturais

A atividade desenvolvida nos seis anos de duração do projeto seguiu, no essencial, este plano, embora com diversas adaptações, como se analisa na secção seguinte.

2.2 Descrição da atividade desenvolvida

Descreve-se sumariamente a atividade realizada em cada tarefa:

- **Atividade 1 - Modelação do comportamento de superfícies de descontinuidade**

- Esta atividade foi substancialmente alterada durante a execução do projeto. O plano inicial de analisar modelos constitutivos de descontinuidades em maciços rochosos, nomeadamente a generalização do modelo Barton-Bandis, não se concretizou. Em alternativa, foi desenvolvido um modelo constitutivo genérico para superfícies de descontinuidade tendo em conta o enfraquecimento pós-pico da resistência à tração e da coesão. Este modelo foi aplicado nos

estudos de propagação da fratura em blocos de rocha ou alvenaria, correspondente à Atividade 2 do projeto [A25].

- No âmbito da tarefa T1.2 foram abordadas várias questões sobre a análise da segurança de obras em maciços rochosos com modelos MED, nomeadamente: fundações de barragens [C18]; obras subterrâneas [C2, E3]; e modelação de pregagens [C3, C6].

- **Atividade 2 - Modelação da fratura de blocos em modelos MED**

- Nesta atividade os trabalhos seguiram essencialmente o plano inicial.
- O problema da modelação da fratura de blocos em modelos MED tem subjacente a questão da representação do contacto entre blocos, uma vez que, após a ocorrência da fratura, o bloco será representado por um conjunto de blocos, devendo a transição das condições de interação mecânica ser tratada de forma consistente. As diversas alternativas de representação numérica do contacto entre blocos rígidos foram analisadas no artigo [A6].
- A discussão do estado da arte da representação numérica da fratura em rocha foi apresentada na palestra [C7].
- Foi desenvolvida uma abordagem de modelação da fratura de blocos, tendo por base a definição de uma rede aleatória de fraturas potenciais, com uma geometria que corresponde a uma malha de polígonos/poliedros de Voronoi. Os critérios de rutura do material, por tração ou corte, são testados ao longo destas superfícies, de modo que a ocorrência de comportamento não linear conduz à separação e fragmentação progressiva dos blocos [A7, C9, C16].
- Foi desenvolvido, na Atividade 1, um modelo constitutivo para descontinuidades considerando o enfraquecimento pós-pico, o qual demonstrou um bom desempenho, nomeadamente em confronto com resultados experimentais [A25]. Um modelo constitutivo alternativo para a representação da fratura em geomateriais foi desenvolvido por Bora Pulatsu (Carleton University, Canadá), que realizou diversas aplicações com o programa 3DEC [A13, A16, A18, A19, A20, A26].

- **Atividade 3 - Validação experimental de modelos MED**

- Nesta atividade foram realizados os trabalhos previstos e alguns adicionais.
- Na tarefa T3.1 foi realizada a modelação numérica de um ensaio em mesa sísmica do LNEC de uma construção em alvenaria, cujos resultados foram publicados nos artigos [A4, A5].
- No âmbito da validação experimental de modelos MED, foi também analisado um ensaio de um modelo físico de uma estrutura de alvenaria de pedra, realizado na mesa sísmica da Universidade de Bogazici, Istambul [A3].
- Na tarefa T3.2 previa-se, inicialmente, apenas a análise de movimentos observados em estruturas de blocos sob ações sísmicas. Foi decidido alargar o âmbito desta tarefa de modo a incluir estudos sobre a resposta de outras estruturas a sismos e outras ações dinâmicas. Tendo por motivação um estudo por contrato do NMMR, foi realizada uma dissertação de mestrado no ISEL por Ricardo Fonseca [TM3], sob orientação do IP Jorge Pereira Gomes, do IC José Vieira de Lemos e do Prof. Ricardo Resende (ISCTE). Nesta dissertação foram analisados, com base

num modelo numérico elaborado com o programa 3DEC, as medições de vibrações efetuadas na barragem de Salomonde e sua fundação devido à escavação do maciço, com recurso a explosivos, para a construção do novo descarregador de cheias complementar localizado sob o encontro direito. Os resultados foram publicados nas comunicações [C8, C11].

- Ainda na tarefa T3.2, foi realizado, em colaboração com o Prof. Carlos Sousa Oliveira, do IST, um estudo do colapso de uma estrutura de betão durante o sismo do Nepal de 2015 [A21].

- **Atividade 4 - Aplicação a estruturas de alvenaria**

- Nesta atividade foi realizado um conjunto alargado de trabalhos, bastante para além do inicialmente previsto.
- Na tarefa T4.1, tal como previsto, prosseguiu a colaboração com o Prof. Carlos Sousa Oliveira (IST) e o grupo da Prof. Eser Catki (U. Bogazici, Istambul) sobre o comportamento sísmico de minaretes, tendo dado lugar à publicação de um artigo em revista [A15] e de uma comunicação [C4].
- Na mesma tarefa, insere-se a visita do Dr. Bruno Silva, pós-doutorado da FEUP, que esteve no LNEC em abril-maio e novembro de 2016, realizando séries de estudos paramétricos com modelos de blocos de estruturas de arcos e aquedutos sob ações sísmicas, tendo em vista uma análise de fiabilidade.
- Foi desenvolvida uma colaboração com o Prof. Corneliu Cismasiu da Universidade Nova de Lisboa sobre o comportamento dinâmico de um arco de alvenaria de pedra utilizando o programa 3DEC, no âmbito da dissertação de mestrado de Pedro Silva [TM4], da qual resultaram as publicações [A23, C10].
- A tese de doutoramento de Francesca Gobbin [TD1], da Universidade Roma Tre, orientada pelo Prof. Gianmarco De Felice e pelo IC J.V. Lemos, desenvolveu técnicas de utilização de análise “pushover” para estruturas de alvenaria [A24, C13], assim como a implementação de elementos de reforço nestas obras [A14, C17].
- A utilização de modelos MED para o estudo de pontes de alvenaria, em colaboração com o Dr. Vasilis Sarhosis (U. Leeds) e Tamas Forgács (U. Budapest), é abordada nas publicações [A10, A22, C14, C21]. No âmbito da tese de mestrado de Afonso Guerreiro [TM5], orientada pelo IC José Vieira de Lemos e pelo IC António Lopes Batista, foi realizado o estudo sísmico da ponte romana de Alcântara, em Espanha.
- Foi ainda abordado o comportamento sísmico de diversas estruturas de alvenaria, tais como colunas [A8], igrejas [A12, C12], estruturas históricas de diversas tipologias [A17, A30] e ainda outras estruturas [A31].
- A representação do amortecimento em análises dinâmicas com modelos de blocos que utilizam algoritmos explícitos de solução apresenta dificuldades computacionais, uma vez que a inclusão da parcela do amortecimento de Rayleigh proporcional à rigidez implica a redução do passo de cálculo e um aumento substancial dos tempos de execução. Foi testada uma forma alternativa de dissipação de energia, o amortecimento de Maxwell, que mostrou bons resultados e uma economia computacional significativa [A27, A29, A32, C20].

- Ainda no âmbito da tarefa T4.1 foi publicado um livro sobre a aplicação de modelos de elementos discretos a estruturas de alvenaria [EL1], com edição de Vasilis Sarhosis (então na U. Newcastle), Katalin Bagi (U. Budapest), J.V. Lemos e Gabriele Milani (Politecnico di Milano), composto por 17 capítulos escritos por especialistas convidados. Incluem-se 3 capítulos referentes a trabalhos do DBB: um sobre a aplicação do programa 3DEC [CL1]; outro da autoria do IA Nuno Monteiro Azevedo, reportando estudos de aplicação de modelos de partículas a alvenarias; e um terceiro do Dr. Eduardo Bretas, sobre a sua tese de doutoramento elaborada no LNEC.
- No âmbito da divulgação de trabalhos de aplicação de modelos MED, referem-se ainda várias publicações: um capítulo de livro (Elsevier) [CL2]; um número especial da revista J. Engineering Mechanics do ASCE [ER1]; os artigos [A1, A9]; e a palestra [C16].
- Teve também lugar a participação nos seguintes eventos: uma sessão de congresso [E1]; um seminário na Università Politecnica delle Marche [E2]; um curso em Udine [E4, CL4]; e um curso em Como [E5, CL3].
- Na tarefa T4.2 inseriu-se a colaboração com o Dr. Eduardo Bretas sobre a modelação numérica de barragens de alvenaria, na sequência do seu trabalho de doutoramento no DBB, tendo sido publicado um artigo [A2].
- Ainda no âmbito da tarefa T4.2, foram elaboradas duas dissertações de mestrado por Daladier Fernandes [TM1] e Bernardo Jalles [TM2], da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), sob orientação do IC António Lopes Batista, relativo à modelação do comportamento de barragens de alvenaria. A primeira tese abordou o comportamento de barragens de planta poligonal, tendo como caso de estudo a barragem do Covão do Ferro; a segunda analisou os processos de deterioração por efeito da percolação através do corpo de barragem, com base nos resultados da observação das barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro, tendo sido publicada a comunicação [C19].
- As tarefas T4.3 e T4.4 envolvem essencialmente o aperfeiçoamento dos modelos MED para abordar situações mais complexas, quer em termos de geometria, quer do ponto de vista do comportamento dos materiais e das descontinuidades. Neste âmbito enquadra-se: a geração de modelos com blocos de geometrias aleatórias, já referidos nos estudos de fratura [A7]; a utilização de modelos com distribuições aleatórias de propriedades mecânicas [A11, A20, A28]; e a automatização da execução de séries de simulações em estudos de vulnerabilidade sísmica [A23].

2.3 Aplicações a estudos por contrato

Para além do reforço da capacidade do DBB em utilizar de modo efetivo modelos numéricos complexos de estruturas descontínuas, referem-se contribuições específicas para estudos por contrato:

- O estudo da modelação da propagação de vibrações em maciços rochosos provocadas por ações explosivas foi motivado por um trabalho por contrato do NMMR, tendo fornecido um contributo

importante para o relatório final (J. Pereira Gomes et al., Relatório 371/2021 – DBB/NMMR, novembro de 2021).

- Os desenvolvimentos conseguidos nas teses de mestrado TM1 e TM2 deram um contributo significativo para a elaboração do relatório de análise do comportamento observado da barragem do Covão do Ferro, realizado por contrato com o dono de obra (A.L. Batista et al., Relatório 99/2018 – DM/Chefia, março de 2018).
- Modelos MED elaborados com o programa 3DEC foram utilizados no estudo sísmico do Aqueduto das Águas Livres (Dória Costa et al., Relatório 213/2020 – DM/NBPC, junho de 2020).

2.4 Apreciação da atividade desenvolvida

A atividade desenvolvida decorreu, no essencial, dentro do âmbito previsto para o projeto, tendo o prolongamento da sua duração para 6,5 anos permitido expandir significativamente os trabalhos efetuados.

Do ponto de vista dos desenvolvimentos fundamentais do MED, destaca-se o início dos estudos de fratura com base em redes aleatórias que definem os caminhos potenciais de rotura, uma abordagem também denominada “bonded-block models”. Os resultados obtidos confirmam o grande interesse desta metodologia para o estudo do colapso de estruturas de alvenaria, de betão em massa e de obras em maciços rochosos.

No campo da análise sísmica de sistemas de blocos, os testes preliminares efetuados com o modelo de amortecimento de Maxwell mostraram um desempenho muito promissor, a ser explorado em projetos futuros.

Os estudos de validação do desempenho dos modelos numéricos, em confronto com os resultados de ensaios em laboratório ou da observação das obras, têm grande utilidade prática ao confirmar as suas potencialidades ou apontar deficiências a ultrapassar. Destes estudos ressalta, em primeiro lugar, a necessidade de o modelo numérico representar com rigor as condições experimentais. Pode também concluir-se que a validação efetiva de um modelo numérico requer a simulação de múltiplos ensaios, e tem de ser baseada na análise de um conjunto alargado de indicadores do comportamento experimental.

No âmbito dos estudos de aplicação, destacam-se os trabalhos relativos a barragens, incidindo sobre obras em estudo no DBB, com resultados de interesse para os estudos por contrato.

No âmbito global do projeto, foram as obras de alvenaria que mereceram mais atenção, nomeadamente no quadro de colaboração com investigadores de outras instituições. Em particular, refere-se o estudo do comportamento sob ações sísmicas intensas, tendo em vista a análise dos modos de colapso e a avaliação da segurança. Salienta-se o estudo de diversos tipos de estruturas históricas, que apresentam sempre dificuldades acrescidas dada a dificuldade em obter informação rigorosa sobre as suas propriedades mecânicas. Estes trabalhos demonstraram a viabilidade de realizar estudos paramétricos extensos e séries de cálculos considerando distribuições estatísticas das propriedades.

3 | Divulgação de resultados

3.1 Teses de doutoramento

[TD1] Francesca Gobbin (2021) Discrete element modelling for the seismic analysis of masonry structures. Universidade de Roma Tre. Orientação: Prof. Gianmarco De Felice e IC José Vieira de Lemos.

3.2 Dissertações de mestrado

[TM1] Daladier Fernandes (2016) Avaliação da resposta estática de barragens gravidade de alvenaria de pedra de planta poligonal considerando modelos tridimensionais e planos. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). Orientação: IC António Lopes Batista.

[TM2] Bernardo Jalles (2017) Avaliação dos efeitos estruturais da lixiviação das argamassas de ligação dos blocos das barragens de alvenaria de pedra. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). Orientação: IC António Lopes Batista e IC José Vieira de Lemos.

[TM3] Ricardo Fonseca (2018) Estudo do comportamento de barragens de betão sujeitas a vibrações provocadas por desmonte do maciço rochoso com recurso a explosivo. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). Orientação: IP Jorge Pereira Gomes, IC José Vieira de Lemos e Prof. Ricardo Resende (ISCTE).

[TM4] Pedro Silva (2018) Modelação de alvenarias reforçadas utilizando o método dos elementos discretos. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). Orientação: Prof. Corneliu Cismasiu e IC José Vieira de Lemos.

[TM5] Afonso Guerreiro (2022) Análise do comportamento sísmico de pontes de alvenaria de pedra através do método dos blocos. Aplicação à ponte romana de Alcântara (Espanha). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). Orientação: IC José Vieira de Lemos e IC António Lopes Batista.

3.3 Outras publicações

3.3.1 Edição de livros

[EL1] V. Sarhosis, K. Bagi, J.V. Lemos, G. Milani (Editores) (2016) Computational Modeling of Masonry Structures Using the Discrete Element Method. IGI Global.

3.3.2 Capítulos de livros

[CL1] J.V. Lemos (2016) The Basis for Masonry Analysis with UDEC and 3DEC. Chapter 3 of Computational Modeling of Masonry Structures Using the Discrete Element Method (Eds. Sarhosis, Bagi, Lemos, Milani), IGI Global, pp. 61-89.

[CL2] V. Sarhosis, J.V. Lemos, K. Bagi (2019) Chapter 12 - Discrete element modelling. In Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures - From Theory to Application (Eds. Bahman Ghiassi Gabriele Milani), Woodhead Publishing, pp. 469-501.

[CL3] J.V. Lemos, F. Gobbin, T. Forgács, V. Sarhosis (2022) Discrete Element Modelling of Masonry Arch Bridges, Arches and Vaults. In: From Corbel Arches to Double Curvature Vaults (Eds. G.Milani, V. Sarhosis). Springer, Cham, pp. 233-256.

[CL4] J.V. Lemos and Katalin Bagi (2023) Chapter 5 - Discrete Element Modeling. In: Discrete Computational Mechanics of Masonry Structures (Eds. K. Bagi, M. Angelillo), CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol. 609, pp. 189-232.

3.3.3 Edição de números especiais de revistas internacionais

[ER1] Special Collection on Recent Advances on the Mechanics of Masonry Structures. J. Engineering Mechanics ASCE, 2022, 148(6), 02022002. Guest Editors: V. Sarhosis, K. Bagi, G. Milani, J.V. Lemos.

3.3.4 Artigos em revistas internacionais

[A1] J.V. Lemos (2016) Modelling the Dynamics of Masonry Structures with Discrete Elements. The Open Construction and Building Technology Journal, 10, 210-219.

[A2] E.M. Bretas, J.V. Lemos, P.B. Lourenço (2016) Seismic analysis of masonry gravity dams using the Discrete Element Method: Implementation and application. Journal of Earthquake Engineering, 20(2), 157-184.

[A3] Eser Çaktı, Özden Saygılı, J.V. Lemos, C. Sousa Oliveira (2016) Discrete element modeling of a scaled masonry structure and its validation. Engineering Structures, 126, 224-236.

[A4] J.V. Lemos, A. Campos Costa (2017) Simulation of Shake Table Tests on Out-Of-Plane Masonry Buildings. Part (V): Discrete Element Approach. International Journal of Architectural Heritage, 11(1), 117-124.

[A5] N. Mendes, A.A. Costa, P.B. Lourenço, R. Bento, K. Beyer, G. de Felice, M. Gams, M.C. Griffith, J.M. Ingham, S. Lagomarsino, J.V. Lemos, D. Liberatore, C. Modena, D.V. Oliveira, A. Penna & L. Sorrentino (2017) Methods and Approaches for Blind Test Predictions of Out-of-Plane Behavior of Masonry Walls: A Numerical Comparative Study. International Journal of Architectural Heritage, 11(1), 59-71.

[A6] J.V. Lemos (2017) Contact representation in rigid block models of masonry. Int. J. Masonry Research and Innovation, 2(4), 321-334.

[A7] V. Sarhosis, J.V. Lemos (2018) A detailed micro-modelling approach for the structural analysis of masonry assemblages. *Computers and Structures*, 206, 66-81.

[A8] V. Sarhosis, D. Baraldi, J.V. Lemos, G. Milani (2019) Dynamic behaviour of ancient freestanding multi-drum and monolithic columns subjected to horizontal and vertical excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 39-57.

[A9] J.V. Lemos (2019) Discrete Element Modeling of the Seismic Behavior of Masonry Construction. *Buildings*, 9(2), 43.

[A10] V. Sarhosis, T. Forgács, J.V. Lemos (2019) A discrete approach for modelling backfill material in masonry arch bridges. *Computers and Structures* 224, 106108.

[A11] V. Sarhosis, T. Forgács, J.V. Lemos (2019) Stochastic strength prediction of masonry structures: a methodological approach or a way forward? *RILEM Technical Letters*, 4, 122-129.

[A12] N. Mendes, Sara Zanotti, J.V. Lemos (2020) Seismic Performance of Historical Buildings Based on Discrete Element Method: An Adobe Church. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(8), 1270-1289.

[A13] B. Pulatsu, E. Erdogmus, P.B. Lourenço, J.V. Lemos, Jim Hazzard (2020) Discontinuum analysis of the fracture mechanism in masonry prisms and wallettes via discrete element method. *Meccanica*, 55, 505-523.

[A14] Francesca Gobbin, Gianmarco de Felice, J.V. Lemos (2020) A Discrete Element Model for Masonry Vaults Strengthened with Externally Bonded Reinforcement. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(12), 1959-1972.

[A15] Eser Çaktı, Özden Saygılı, J.V. Lemos, C. Sousa Oliveira (2020) Nonlinear dynamic response of stone masonry minarets under harmonic excitation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(10), 4813-4838.

[A16] B. Pulatsu, E. Erdogmus, P.B. Lourenço, J.V. Lemos, K. Tuncay (2021) Numerical modeling of the tension stiffening in reinforced concrete members via discontinuum models. *Computational Particle Mechanics*, 2021, 8, 423-436.

[A17] Özden Saygılı, J.V. Lemos (2020) Investigation of the structural dynamic behavior of the Frontinus Gate. *Applied Sciences*, 10, 5821.

[A18] B. Pulatsu, E. Erdogmus, P.B. Lourenço, J.V. Lemos, K. Tuncay (2020) Simulation of the in-plane structural behavior of unreinforced masonry walls and buildings using DEM. *Structures*, 27, 2274-2287.

[A19] B. Pulatsu, S. Gonen, E. Erdogmus, P.B. Lourenço, J.V. Lemos, J. Hazzard (2020) Tensile Fracture Mechanism of Masonry Wallettes Parallel to Bed Joints: A Stochastic Discontinuum Analysis. *Modelling*, 1, 78-93.

[A20] B. Pulatsu, S. Gonen, Ece Erdogmus, P.B. Lourenco, J.V. Lemos, R. Prakash (2021) In-plane structural performance of dry-joint stone masonry walls: A spatial and non-spatial stochastic discontinuum analysis. *Engineering Structures*, 242, 112620.

- [A21] C. Sousa Oliveira, J.V. Lemos (2021) Back-analysis of the Collapse of a Tetrastyle Canopy during the April 25, 2015 Nepal Earthquake. *International Journal of Architectural Heritage*, 2023, 17(2), 418-430. Publicado online: 9 junho 2021.
- [A22] Özden Saygılı, J.V. Lemos (2021) Seismic vulnerability assessment of masonry arch bridges. *Structures*, 33, 3311-3323.
- [A23] Corneliu Cismaşiu, P.B.S. Silva, J.V. Lemos, I. Cismaşiu (2021) Seismic vulnerability assessment of a stone arch using discrete elements. *International Journal of Architectural Heritage*, 2023, 17(5), 730-744. Publicado online: 26 agosto 2021.
- [A24] Francesca Gobbin, Gianmarco de Felice, J.V. Lemos (2021) Numerical procedures for the analysis of collapse mechanisms of masonry structures using discrete element modelling. *Engineering Structures*, 246, 113047.
- [A25] J.V. Lemos, V. Sarhosis (2022) Discrete element bonded-block models for detailed analysis of masonry. *Infrastructures*, 2022, 7, 31.
- [A26] B. Pulatsu, S. Gonen, P.B. Lourenço, J.V. Lemos, J. Hazzard (2022) Computational investigations on the combined shear-torsion-bending behavior of dry-joint masonry using DEM. *Computational Particle Mechanics*, 2023, 10(2), 249-260. Publicado online: 5 julho 2022.
- [A27] J.V. Lemos, E.M. Dawson, Z. Cheng (2022) Application of Maxwell damping in the dynamic analysis of masonry structures with discrete elements. *Int. J. Masonry Research and Innovation*, 7(6), 663-686.
- [A28] S. Gonen, B. Pulatsu, P.B. Lourenço, J.V. Lemos, K. Tuncay, E. Erduran (2023) Analysis and Prediction of Masonry Wall Strength under Combined Compression-Bending via Stochastic Computational Modeling. *Engineering Structures*, 278, 115492.
- [A29] J.V. Lemos, Vasilis Sarhosis (2023) Dynamic analysis of masonry arches using Maxwell damping. *Structures*, 49, 583-592.
- [A30] Özden Saygılı, J.V. Lemos, S. Moghimi (2023) Site specific hazard assessment and multi-level seismic performance evaluation of historical mosque. *Int. J. Architectural Heritage*. Publicado online: 25 maio 2023.
- [A31] A. Altunbas, O. Saygili, M.K. Kelesoglu, J.V. Lemos (2023) Numerical analysis of failure mechanism observed in backfills supported by masonry walls. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, 2023, 95(2): e20220420.
- [A32] J.V. Lemos (2023) Damping models for dynamic analysis of masonry vaults with discrete elements. *Int. J. Masonry Research and Innovation* (aceite para publicação).

3.3.5 Comunicações a congressos

[C1] Nuno Mendes, Sara Zanotti, Paulo B. Lourenço, J.V. Lemos (2016) Análise Sísmica da Igreja de Kuño Tambo. 10º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Ponta Delgada, 20-22 abril 2016.

[C2] Christine Detournay, J.V. Lemos, Frank Zhang (2016) Development of a Proppant Transport Logic in 3DEC. Proceedings of the 4th Itasca Symposium on Applied Numerical Modeling, 7-9 Mar. 2016, Lima, Perú, (Eds. P.Gómez, C.Detournay, R.Hart & M. Nelson), paper 10-1, pp. 573-585.

[C3] L. Bouzeran, J. Furtney, J. Hazzard, J.V. Lemos, M. Pierce (2016) Advanced 3DEC bolt model for simulation of ground support performance in highly fractured and bulked rock masses. in Ground Support 2016 (Eds. E. Nordlund, T. H. Jones & A. Eitzenberger).

[C4] E. Çaktı, Ö. Saygılı, C.S. Oliveira, J.V. Lemos (2017) Non-linear earthquake response of three minarets in Istanbul. 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017, Santiago Chile, 9-13 January 2017, Paper nº 2903.

[C6] L. Bouzeran, J. Furtney, J. Hazzard, J.V. Lemos, M. Pierce (2017) Simulation of ground support performance in highly fractured and bulked rock masses with advanced 3DEC bolt model. in Deep Mining 2017 (Ed. J Wesseloo), pp. 667–680.

[C7] J.V. Lemos (2018) Rock failure analysis with discrete elements. Keynote Lecture, 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, in Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX – Cardoso et al. (Eds), Taylor & Francis Group, London, vol. 1, pp. 13-22.

[C8] R. Fonseca, J. Pereira Gomes, J.V. Lemos, R. Resende (2018) Modelação do maciço rochoso para avaliação do comportamento de barragens de betão sujeitas a vibrações explosivas. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, COBRAMSEG 2018 – 28 de Agosto a 01 de Setembro, Salvador, Bahia, Brasil, ABMS, 2018.

[C9] V. Sarhosis, J.V. Lemos (2018) Numerical investigation of the compressive strength of masonry using discrete element method. 10th International Masonry Conference, G. Milani, A. Taliercio and S. Garrity (eds.), Milan, Italy, July 9-11, 2018, pp. 1709-1719.

[C10] P.B.S. Silva, Corneliu Cismasiu, J.V. Lemos (2019) Avaliação da vulnerabilidade sísmica de um arco em alvenaria utilizando o método dos elementos discretos. Sísmica 2019 - 11º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, IST, Lisboa, 29-30 Abril 2019.

[C11] R. Fonseca, J. Pereira Gomes, J.V. Lemos, Ricardo Resende (2019) Avaliação do efeito das explosões de desmonte de rocha em barragens de betão com base num modelo numérico do maciço e barragem e comparação com resultados observados. CMN 2019, Congress on Numerical Methods in Engineering, University of Minho, Guimarães, July 1-3, 2019, Paper ID 127.

[C12] Nuno Mendes, J.V. Lemos, Sara Zanotti (2019) Seismic performance of the Kuño Tambo church (Peru). CMN 2019, Congress on Numerical Methods in Engineering, University of Minho, Guimarães, July 1-3, 2019, Paper ID 119.

[C13] Francesca Gobbin, J.V. Lemos, Gianmarco de Felice (2019) A Discrete Element Model for the seismic behaviour of masonry churches in central Italy. CMN 2019, Congress on Numerical Methods in Engineering, University of Minho, Guimarães, July 1-3, 2019, Paper ID 94.

[C14] V. Sarhosis, Tamás Forgács, J.V. Lemos (2020) Modelling backfill in masonry arch bridges: A DEM approach. ARCH 2019 (A. Arêde and C. Costa, eds.), Springer, SI 11, pp. 178-184.

[C15] J.V. Lemos (2020) Dynamic analysis of masonry structures with DEM. keynote lecture, 5th International Itasca Symposium – 2020, (Eds. Billaux, Hazzard, Nelson & Schöpfer), February 2020, Vienna, Austria.

[C16] V. Sarhosis, T. Forgács, J.V. Lemos (2020) Macro and micro-scale modelling of masonry structures using the Discrete Element Method. 5th International Itasca Symposium - 2020, Billaux, Hazzard, Nelson & Schöpfer (eds.), February 2020, Vienna, Austria.

[C17] F. Gobbin, M. Malena, G. de Felice, J.V. Lemos (2021) A Discrete Element Model for Unreinforced and Reinforced Masonry Vault with Buttresses and Backfill. 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM), ECCOMAS Congress 2020, (Eds. F. Chinesta, R. Abgrall, O. Allix and M. Kaliske), 11-15 January 2021.

[C18] J.V. Lemos (2021) Arch dam static and dynamic modelling with discrete elements. 11th Asian Rock Mechanics Symposium, Beijing, 21-25 oct 2021. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 861, 072085.

[C19] Bernardo Abecasis Jalles, A.L. Batista, J.V. Lemos (2021) Metodologia de avaliação da deterioração das alvenarias das barragens provocada pela lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de pedra. Reabilitar&BE2020 (Congresso Nacional Reabilitar & Betão Estrutural 2020), LNEC, 3-5 novembro 2021.

[C20] J.V. Lemos (2022) Damping models for dynamic analysis of masonry vaults with discrete elements. ICoNSoM 2022 - International Conference on Nonlinear Solid Mechanics, Alghero, Sardinia, 13-16 Junho 2022.

[C21] Özden Saygılı, J.V. Lemos (2023) Influence of site effects on the seismic vulnerability of masonry arch bridges. Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems (IALCCE 2023) (Eds. Fabio Biondini, Dan M. Frangopol), 2-6 July 2023, Politecnico di Milano, Italy, pp. 1523-1529.

3.3.6 Outras publicações

[OP1] J.V. Lemos, Modelação do comportamento sísmico de barragens de betão. Construção Magazine nº113, janeiro/ fevereiro 2023, pp. 28-31.

3.4 Eventos de divulgação científica

No âmbito do projeto foi organizado o evento:

[E1] Sessão sobre “Discrete element modelling of masonry structures”, em colaboração com Katalin Bagi e Vasilis Sarhosis, Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia (CMN), Guimarães, julho 2019.

Tiveram ainda lugar aulas e palestras nos seguintes seminários e cursos:

[E2] Seminário sobre “Modelling of Masonry Structures”, em colaboração com Augusto Lucarelli, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Itália, setembro 2019.

[E3] Seminário online sobre “Discrete Element Method dynamic modeling in rock mechanics”, Seoul National University, outubro 2020.

[E4] Curso sobre “Discrete Computational Mechanics of Masonry Structures”, organizado por K. Bagi e M. Angelilo, CISM, Udine, Itália, julho 2021.

[E5] Curso sobre “From Corbel Arches to Double Curvature Vaults: Data Acquisition, Structural Analysis, Conservation and Restoration of Architectural Heritage Masonry”, organizado por G. Milani e V. Sarhosis, Lake Como School of Advanced Studies, Como, Itália, agosto 2021.

4 | Indicadores de desempenho e recursos mobilizados

4.1 Indicadores de desempenho

No Quadro 4.1 apresentam-se os indicadores de desempenho do projeto, os valores previstos na ficha inicial, e os realizados no período 2016-2023.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Realizado em 2016-2023 (7 anos)	Total previsto no projeto (4 anos)
Edição de livros	1	1
Capítulos de livros	4	0
Artigos em revista internacional	32	5
Artigos em revista nacional	0	2
Comunicações a congressos	21	6
Outras publicações	1	0
Dissertações de mestrado	5	2
Teses de doutoramento	1	1

Como previsto, foi levada a efeito uma tese de doutoramento. Foram ainda concretizadas cinco dissertações de mestrado. O número de artigos em revistas internacionais e de comunicações em congressos superou, em muito, a previsão inicial. Refere-se ainda a elaboração de quatro capítulos de livros e a edição de um número especial de uma revista internacional. Houve também a realização de alguns estudos por contrato com forte incorporação de resultados do projeto.

4.2 Recursos mobilizados

No Quadro 4.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC afetados ao projeto, os meses de trabalho previstos e efetivamente dedicados em 2016-2023.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos

Equipa do LNEC	Categoria	Meses de trabalho		Concretização percentual extrapolando para 7 anos o previsto no projeto
		Executado em 2016-2023 (7 anos)	Previsto no projeto (4 anos)	
José Vieira de Lemos	IC	22,4	16,8	76%
António Lopes Batista	IC	1,1	2,4	26%
Jorge Pereira Gomes	IP	1,3	2,4	31%

A concretização percentual foi, em todos os casos, inferior à prevista. Pode considerar-se que o IC José Vieira de Lemos teve uma boa afetação ao projeto, mas os outros dois investigadores tiveram contributos muito menores que os esperados, devido ao seu envolvimento em outros projetos.

4.3 Candidaturas a financiamento

As seguintes candidaturas a financiamento não tiveram sucesso:

- Ação COST sobre modelos de elementos discretos (COST Action Proposal OC-2017-1-22158 "Best Practice in Particulate Simulations", COST Open Call OC-2017-1), em 2017.
- Projeto FCT "safePAVPAR", liderado pelo Prof. Fernando Pinho (U. Nova de Lisboa), em 2020.
- Projeto FCT "FW-SeismicCond", liderado pelo Prof. Fernando Pinho (U. Nova de Lisboa), em 2022.

5 | Considerações finais

O projeto MEBAD englobou um conjunto muito diversificado de atividades e tarefas, tendo em comum o recurso a modelos numéricos baseados numa aproximação de meio descontínuo, entre os quais se destacam os modelos de blocos ou elementos discretos (MED). Integrar esta multiplicidade de aplicações num projeto único conduz inevitavelmente a alguma dispersão, mas tem a grande vantagem de facilitar a transmissão de conhecimentos e resultados entre os vários domínios, que neste caso envolvem a mecânica das rochas e as estruturas de alvenaria.

Uma das principais dificuldades da aplicação de modelos MED a problemas dinâmicos reside nos elevados tempos de cálculo para o caso de sistemas complexos ou de grande dimensão. Neste projeto foi demonstrado que uma metodologia criteriosa de geração da representação numérica permite atualmente executar modelos com grande número de blocos, bem como séries extensas de cálculos com modelos de média dimensão.

Afigura-se de grande interesse a continuação dos estudos de comparação das simulações numéricas com resultados experimentais, quer de ensaios em mesa sísmica, quer da observação das estruturas, nomeadamente dos danos causados por sismos. É com base nesta experiência que é possível adquirir confiança nas previsões dos modelos e identificar os aspetos que exigem desenvolvimentos futuros.

Lisboa, LNEC, outubro de 2023

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Modelação
e Mecânica das Rochas



Luís Nolasco Lamas

O Diretor do Departamento
de Barragens de Betão



António Lopes Batista

AUTORIA



José Vieira de Lemos
Investigador-Coordenador



António Lopes Batista
Investigador-Coordenador



Jorge Pereira Gomes
Investigador Principal

ANEXO
Ficha inicial do projeto

FICHA DE PROJETO DE I&D&I (versão2)	
2013-2020	
1 - Dados Gerais	
1.1 Identificação do projeto	
Designação	Modelação de estruturas de blocos sob ações dinâmicas
Acrónimo	MEBAD
Unidade Departamental proponente	DBB
Setor	NMMR
Investigador Responsável	José Vieira de Lemos
Duração (meses)	48
Data de início (ano-mês-dia)	01/01/2016
1.2 Inserção na matriz programática da E2I (indicar par(es) (Eixo programático, Temática prioritária))	
Par principal (obrigatório)	E4, T8
Par secundário (opcional)	
1.3 Entidades intervenientes	
Entidade coordenadora	LNEC
Parceiros internos	DBB/NMMR, DE/NESDE
Parceiros externos	IST, U.Bogazici (Turquia), Northern Research Institute (Noruega)
Entidade externa interessada	Cardiff University (Reino Unido)
Financiamento externo (S/N)	N
1.4 Resumo	
(max. 300 palavras)	<p>O tema do projeto é a modelação numérica de estruturas cujo comportamento é controlado em larga medida pela presença de superfícies de descontinuidade, nomeadamente obras em maciços rochosos e estruturas de alvenaria. O objetivo é o aperfeiçoamento e a validação de modelos baseados no método dos elementos discretos (MED), tendo em vista a sua utilização em estudos de avaliação da segurança, em especial para o caso de ações dinâmicas. O desafio principal é atingir uma simulação mais realista dos estados avançados do processo de rotura, de modo a obter estimativas mais corretas da capacidade resistente das estruturas. Os desenvolvimentos previstos compreendem: a implementação e teste de modelos constitutivos de descontinuidades em modelos 3D; análise de processos de rotura envolvendo a fratura dos blocos; representação de danos existentes e geometrias complexas em modelos numéricos; análise dinâmica eficiente no domínio dos grandes deslocamentos. A validação destes modelos será efectuada com base em dados experimentais, nomeadamente provenientes de ensaios na plataforma sísmica do LNEC, e da observação de estruturas que sofreram a ação de sismos ou outras ações dinâmicas. Pretende-se consolidar um conjunto de metodologias e regras para a elaboração de modelos numéricos mais robustos e fiáveis, e proceder à sua divulgação na comunidade científica.</p>

2 - Fundamentação

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

A designação de estruturas de blocos engloba um conjunto de sistemas estruturais nos quais as superfícies de descontinuidade desempenham um papel importante. Incluem-se estruturas fundadas ou escavadas em maciços rochosos, construções de alvenaria, assim como outras estruturas de natureza marcadamente descontínua. O método dos elementos discretos (MED) é uma das ferramentas mais poderosas para o estudo do comportamento até à rotura destas estruturas, com um campo de aplicação progressivamente mais vasto. Existem, no entanto, lacunas que dificultam a sua utilização prática em certos tipos de problemas.

Nos casos em que o material dos blocos tem elevada resistência, os mecanismos de rotura envolvem essencialmente a abertura e deslizamento ao longo das descontinuidades. Neste caso, a questão mais importante é a implementação de modelos de comportamento das descontinuidades que reproduzam bem os resultados experimentais, por exemplo, para o caso de cargas cíclicas.

Em muitos outros casos, desenvolvem-se fraturas através dos próprios blocos, uma situação que ainda não é bem abordada na maioria dos programas MED. É necessário implementar soluções que, respeitando os requisitos da mecânica da fratura, permitam simulações computacionalmente eficientes. Em particular, é importante aperfeiçoar a simulação de colapso estrutural sob cargas dinâmicas.

Os ensaios em mesa sísmica fornecem informação imprescindível para a validação das representações numéricas. No DE/NESDE têm sido realizados inúmeros ensaios de estruturas de alvenaria que permitem testar estas ferramentas. Por outro lado, os modelos são um instrumento de grande utilidade na interpretação dos resultados experimentais.

Em sismos recentes, têm sido observados deslocamentos importantes em estruturas compostas por blocos, susceptíveis de pôr em risco a sua segurança. A análise destes fenómenos pode dar uma contribuição relevante para a validação dos modelos numéricos, e, por outro lado, viabilizar a sua utilização em estudos de estimação da acção sísmica a partir dos efeitos observados.

3 - Objectivos

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

O principal objetivo do projeto é o incremento das competências do LNEC na previsão por via numérica da capacidade resistente de estruturas com descontinuidades. Em particular, pretende-se:

- (1) Implementação de uma versão 3D do modelo de Barton-Bandis, um modelo de comportamento para descontinuidades com rugosidade com grande aplicação no domínio da mecânica das rochas. A inexistência de uma versão 3D tem impedido a sua aplicação, por exemplo, nos estudos de fundações de barragens realizados no DBB/NMMR. A nova implementação será testada e aplicada ao estudo de fundações e obras subterrâneas em rocha.
- (2) Desenvolvimento de metodologias para a simulação de processos de rotura através dos blocos. A não consideração destes fenómenos pode conduzir a uma sobrestimação da capacidade resistente.
- (3) Análise de ensaios de estruturas de alvenaria em mesa sísmica, tendo em vista a validação dos modelos MED em problemas dinâmicos.
- (4) Análise de movimentos e roturas causados por sismos em estruturas descontínuas, tendo em vista a validação e aferição dos modelos MED, e a sua utilização no apoio a estudos sismológicos.
- (5) Desenvolvimento de metodologias de geração de modelos MED para estruturas de formas complexas, irregulares, ou com danos pré-existentes. Em particular, consideram-se os casos de barragens de alvenaria e estruturas antigas de pedra.
- (6) Divulgação das conclusões obtidas e metodologias propostas.

4 - Contribuições inovadoras

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

No âmbito do estudo do comportamento de estruturas descontínuas ou de blocos, prevêem-se diversas contribuições inovadoras:

- Análise dos aspetos 3D dos fenómenos de deslizamento em superfícies de descontinuidade.
- Incorporação da análise da propagação da fratura em modelos MED.
- Comparação de resultados numéricos e dados experimentais ou de campo que caracterizem o rigor e fiabilidade de modelos MED em estudos de rotura sob ações dinâmicas.
- Metodologias para a elaboração, verificação e calibração de modelos MED para o estudo da resposta a ações dinâmicas intensas.

5 - Metodologia

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

A maioria dos modelos MED a utilizar no projeto serão elaborados com base no programa 3DEC, para o qual existe larga experiência de utilização no DBB. A implementação do modelo Barton-Bandis em 3D será realizada de modo a poder ser aplicada neste programa, mas na forma de rotina externa (DLL), que poderá ser livremente distribuída e aplicada por qualquer utilizador do programa.

Para a questão da fratura dos blocos serão realizadas comparações com formulações avançadas de elementos finitos, nomeadamente as desenvolvidas pelo BPD Ivo Dias no DBB. Resultados adicionais serão fornecidos por uma formulação independente em desenvolvimento no trabalho de doutoramento de Luís Dias na Universidade de Coimbra, orientado pelo Prof. Paulo Providência e pelo IC J.V. Lemos.

A análise de ensaios na mesa sísmica com modelos 3DEC prosseguirá estudos realizados em colaboração com o IP Alfredo Campos Costa no âmbito da Workshop enquadrada no 9º Int. Masonry Congress, Guimarães, que se baseou em resultados de ensaios do DE/NESDE.

Os estudos de movimentos em estruturas devidos a sismos, em colaboração com o Prof. Sousa Oliveira (IST), deram já lugar a várias publicações, nomeadamente sobre o obelisco deslocado pelo sismo de Lorca de 2011. Pretende-se generalizar estes estudos a outras estruturas, nomeadamente contentores empilhados deslocados pelo sismo do Japão de 2011, sobre os quais existe informação publicada.

A colaboração com o grupo da Prof. Eser Catki (Univ. de Bogazici, Istambul), tem sido dirigida para o estudo de estruturas altas de alvenaria, tais como minaretes históricos, com modelos 3DEC, nomeadamente no âmbito da tese de doutoramento de Ozden Ates, que estagiou no DBB/NMMR. Pretende-se alargar esta investigação a outros tipos de estruturas, utilizando a informação experimental disponível. O Dr. Bruno Silva, a realizar um pós-doutoramento na FEUP, efetuará uma estadia no LNEC para análise de estruturas de arco e aquedutos com modelos de blocos.

Os estudos relativos à segurança de barragens de alvenaria serão realizados em colaboração com o Dr. Eduardo Bretas (Northern Research Institute, Noruega), que realizou uma tese no LNEC sobre este tema. Serão ainda realizadas 2 teses de mestrado sobre barragens de alvenaria portuguesas em estudo no LNEC.

No âmbito da divulgação da aplicação de modelos de elementos discretos a estruturas de alvenaria está prevista a publicação de um livro composto por capítulos elaborados por especialistas convidados, cujos editores são Vasilis Sarhosis (Univ. Newcastle), Katalin Bagi (Univ. Budapest), J.V. Lemos e G. Milani (Politecnico de Milão).

6 - Plano de Trabalhos

Atividade	Designação da Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa	1º Semestre	2º Semestre	3º Semestre	4º Semestre	5º Semestre	6º Semestre	7º Semestre	8º Semestre
Atividade 1	Modelação do comportamento de superfícies de descontinuidade	T1.1	Implementação de uma versão 3D do Modelo de Barton-Bandis								
		T1.2	Aplicação em estudos de avaliação da segurança								
		T1.3									
		T1.4									
		T1.5									
Atividade 2	Modelação da fratura de blocos em modelos MED	T2.1	Desenvolvimento de modos de representação da fratura de blocos								
		T2.2	Comparação com modelos MEF								
		T2.3	Comparação com formulações alternativas MED								
		T2.4									
		T2.5									
Atividade 3	Validação experimental de modelos MED. Análise de ensaios em mesa sísmica. Análise de deslocamentos provocados por sismos	T3.1	Análise de ensaios realizados no NESDE								
		T3.2	Análise de movimentos observados em estruturas de blocos								
		T3.3									
		T3.4									
		T3.5									
Atividade 4	Aplicação a estruturas de alvenaria	T3.1	Estruturas altas de alvenaria								
		T3.2	Barragens de alvenaria								
		T3.3	Metodologias de geração de modelos numéricos								
		T3.4	Representação de geometrias irregulares e danos estruturais								

7 - Equipa de trabalho						
Nome	Categoria	Grupo	Setor/Entidade	Tarefas	Afetação ao projeto (%)	
José Vieira de Lemos	Investigador Coordenador	1	DBB/NMMR	Coordenação, Investigador	35%	
António Batista	Investigador Principal	2	DBB	Investigador	5%	
Jorge Pereira Gomes	Investigador Auxiliar	2	DBB/NMMR	Investigador	5%	
Ivo Dias	Bolseiro Pós-doc LNEC (BPD)	11	DBB/NMMR	Investigador	5%	
Alfredo Campos Costa	Investigador Principal	2	DE/NESDE	Investigador	2%	
Prof. Carlos Sousa Oliveira	Escolher		IST	Investigador		
Prof. Eser Catki e colaboradores	Escolher		U.Bogazici (Turquia)	Investigador		
Dr. Bruno Silva	Escolher		FEUP (pós-doc)	Investigador		
Dr. Eduardo Bretas	Escolher		Northern Res. Inst. (Nd)	Investigador	5%	
Luís Duarte	Escolher		U. Coimbra	Aluno de doutorament	100%	
Aluno de mestrado	Escolher			Aluno de mestrado	100%	
Aluno de mestrado	Escolher			Aluno de mestrado	100%	

8 - Resultados expectáveis	
Resultados por atividade/tarefa	Descrição
<i>(descrever os resultados esperados por actividade e/ou tarefas)</i>	
Atividade 1	
T1.1	Rotina de implementação de modelo BB em 3D
T1.2	Avaliação do desempenho do modelo para o estudo de fundações de barragens e obras subterrâneas em maciços rochosos
Atividade 2	
T2.1	Metodologia para o estudo de fractura em modelos MED
T2.2 e T2.3	Avaliação do desempenho da metodologia proposta face a alternativas numéricas
Atividade 3	
T3.1 e T3.2	Caracterização do desempenho e validação de modelos MED face a resultados experimentais e de campo, em especial para o caso de ações dinâmicas
Atividade 4	
T4.1 a T4.4	Definição de procedimentos para geração de modelos complexos MED; Definição de regras para a avaliação da capacidade resistente; Estudo comparativo do desempenho dos modelos de barragens e outras estruturas de alvenaria em processos de rotura
Outros resultados	Quantidade
Teses	
<i>mestrado</i>	2
<i>doutoramento</i>	1
<i>outras</i>	
Artigos em revista	
<i>nacional</i>	2
<i>internacional</i>	5
Comunicações	6
Outros produtos	
Livros	1

9 - Recursos humanos

Grupo	Esforço (h*m)	Valor €
1	16.80	109 200.00
2	5.76	32 832.00
3	0.00	0.00
4	0.00	0.00
11	2.40	9 600.00
12	0.00	0.00
13	0.00	0.00
21	0.00	0.00
22	0.00	0.00
23	0.00	0.00
TOTAL	24.96	151 632.00

10 - Despesas correntes

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
Missões ao estrangeiro	4	1 250.00	5 000.00
Missões no país	4	500.00	2 000.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
TOTAL			7 000.00

11 - Equipamento

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
TOTAL			0.00

12 - Orçamento

Designação	Estimativa de custo €	Financiamento externo €	Financiamento LNEC €
Recursos Humanos	151 632		151632
Despesas Correntes	7 000		7000
Equipamentos	0		0
Gastos gerais	153 032		153032
			0
			0
Total	311 664	0	311 664



www.lnec.pt

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