



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEMRock6m – DISCRETE ELEMENT MODELLING OF ROCK ENGINEERING STRUCTURES FOR SEISMIC SAFETY ANALYSES

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



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEMRock6m – DISCRETE ELEMENT MODELLING OF ROCK ENGINEERING STRUCTURES FOR SEISMIC SAFETY ANALYSES

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

Lisboa • janeiro 2024

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 42/2024 – DBB/NMMR

Título

DEMRock6m – DISCRETE ELEMENT MODELLING OF ROCK ENGINEERING STRUCTURES FOR SEISMIC SAFETY ANALYSES

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

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

José Muralha

Investigador Principal, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

José Vieira de Lemos

Investigador-Coordenador, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

Luís Lamas

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

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 42/2024

Proc. 402/1102/20549

DEMRock6m - DISCRETE ELEMENT MODELLING OF ROCK ENGINEERING STRUCTURES FOR SEISMIC SAFETY ANALYSES

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 DEMRock6m do P2I/LNEC 2013-2020. Os resultados da atividade desenvolvida são analisados e avaliados em face dos objetivos inicialmente previstos.

Palavras-chave: DEMRock6m / Modelos numéricos / Modelos de elementos discretos / Mecânica das rochas / Barragens de betão / Estruturas de alvenaria

À

DEMRock6m - DISCRETE ELEMENT MODELLING OF ROCK ENGINEERING STRUCTURES FOR SEISMIC SAFETY ANALYSES

Final Report of the project of the P2I/LNEC 2013-2020

Abstract

This report presents a concise description of the research activities undertaken in the DEMRock6m project of the P2I/LNEC 2013-2020. The results achieved are analyzed and assessed, considering the initial goals of the project.

Keywords: DEMRock6m / Numerical modelling / Discrete element models / Rock mechanics / Concrete dams / Masonry structures

Índice

1	Introdução	1
2	Atividade desenvolvida.....	3
2.1	Descrição da atividade desenvolvida	3
2.1.1	Primeira fase	3
2.2	Apreciação da atividade desenvolvida	5
3	Divulgação de resultados	6
3.1	Publicações.....	6
3.1.1	Capítulo de livro	6
3.1.2	Artigos em revistas internacionais	6
3.1.3	Comunicações em reuniões científicas	6
3.1.4	Lições por convite	7
3.1.5	Informações científicas e técnicas (ICT) do LNEC	8
3.1.6	Relatórios.....	8
3.2	Teses de mestrado	8
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	9
4.1	Indicadores de desempenho.....	9
4.2	Recursos mobilizados.....	9
5	Considerações finais	11

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial	3
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho	9
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos.....	10

1 | Introdução

O projeto de investigação “Discrete element modelling of rock engineering structures for seismic safety analyses”, com o acrónimo DEMRock6m, teve início formal em 1 de janeiro de 2016, tendo uma duração total prevista de 48 meses.

O projeto foi integrado no Plano de Inovação e Investigação (P2I) do LNEC e enquadrado 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).

A equipa inicial do projeto de investigação DEMRock6m era formada pelos seguintes elementos:

- Investigador Principal José Muralha, LNEC (Investigador Responsável);
- Investigador-Coordenador José Vieira de Lemos (Investigador Responsável);
- Bolseira de Doutoramento Margarida Espada;
- Investigador Principal Luís Lamas;
- Técnico Superior Luís Dias, LNEC.

O projeto destinava-se, em larga medida, a enquadrar as atividades de investigação relacionadas com a tese de doutoramento da BD Margarida Espada [R.1]. Estas atividades foram formalmente iniciadas com a atribuição de uma bolsa de doutoramento do LNEC a Margarida Espada, em setembro de 2016, na sequência dos trabalhos desenvolvidos como BIIC. Posteriormente a BD candidatou-se a uma bolsa FCT, que lhe foi concedida por um período de quatro anos com início em 01-06-2017. Encontrando-se prevista a apresentação da tese na FEUP, o projeto contava com a colaboração externa do Prof. José Couto Marques na qualidade de coorientador da BD Margarida Espada.

No plano de tese da BD estava previsto, para além de desenvolvimentos teóricos, o estudo da barragem de Baihetan (China) sob ação sísmica, que decorria do protocolo existente, desde janeiro de 2015, entre o State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering (SKLGGE) de Wuhan, China, e o LNEC. Assim, no projeto esteve também envolvido o Prof. Quan Jiang, responsável por este protocolo por parte do SKLGGE.

Este projeto contou ainda com um conjunto de atividades complementares relacionadas com a caracterização geométrica e mecânica das descontinuidades de maciços rochosos, que justificavam a participação do Técnico Superior Luis Dias.

Em finais de 2018, por se ter desligado do LNEC e ter terminado a atividade de investigação, a BD Margarida Espada deixou de participar neste projeto de investigação.

Uma vez que o Plano de Investigação e Inovação 2013-2020 do LNEC se veio a prolongar até finais de 2023 – não se tendo iniciado os projetos do Plano de Investigação e Inovação 2021-2027 – as atividades previstas inicialmente para o projeto DEMRock6m vieram a ser complementadas com uma série de outras atividades, de âmbito diversificado no domínio da mecânica das rochas, que se

consideraram convenientes e relevantes, por forma a enquadrar parte das atividades de investigação dos elementos da equipa.

O presente relatório apresenta, de forma sucinta, a atividade desenvolvida no projeto de investigação DEMRock6m desde o seu início, em janeiro de 2016, até ao seu final, em dezembro de 2023.

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Descrição da atividade desenvolvida

2.1.1 Primeira fase

No Quadro 2.1 apresenta-se o plano de trabalhos inicialmente proposto na ficha do projeto DEMRock6m.

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial

Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa	2016 I	2016 II	2017 I	2017 II	2018 I	2018 II	2019 I	2019 II
1 Literature review and thesis framework	T1.1	Literature review about joint generation techniques								
	T1.2	Literature review about probabilistic analyses applied to rock engineering structures								
	T1.3	Literature review about seismic analyses applied to rock engineering structures								
2 Development of model generator tool	T2.1	Study of the statistical distributions of the geometric properties of joints								
	T2.2	Methodologies to adapt the 3D discrete element tool to mechanical stability analysis								
	T2.3	Study of the procedures to effectively represent the non-persistence of the discontinuities in stability analysis								
3 Development of a procedure for probabilistic analyses in 3D DE models	T3.1	Study of the advanced methodologies for probabilistic analyses aiming at reducing computational effort								
	T3.2	Development of a procedure to perform efficient probabilistic analyses in 3D DE models								
4 Development of a procedure for seismic analyses in 3D DE models	T4.1	Study of the national codes to perform seismic analysis applied to arch dams and other rock engineering works								
	T4.2	Development of a procedure to perform efficient seismic analyses in 3D DE models								

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial (continuação)

Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa	2016 I	2016 II	2017 I	2017 II	2018 I	2018 II	2019 I	2019 II
5 Numerical modelling of two arch dams and other rock engineering works (case studies)	T5.1	Development of 3D discrete element models of arch dams and other rock engineering works								
	T5.2	Application of probabilistic analysis with variation of the geometric parameters, shear strength values and water pressure distributions of the discontinuities, to arch dams and other rock engineering works in order to identify the most relevant failure mechanisms to be considered in subsequent seismic analyses								
	T5.3	Seismic analysis using 3D discrete element models of a large Chinese dam located in the highly seismic Sichuan region and of a Portuguese dam located in the north of Portugal								
6 Writing papers and thesis text	T6.1	Dissemination of the thesis results through national and international journals and conferences								
	T6.2	Writing and review of the thesis text								

Até finais de 2018, altura em que a BD Margarida Espada se desligou do LNEC e terminou as atividades de investigação relacionadas com a sua tese de doutoramento, as tarefas previstas nas diversas atividades deste plano de trabalhos inicial estavam, em grande medida, terminadas ou mesmo excedidas. Neste âmbito foram apresentadas duas comunicações a reuniões científicas [C.3 e C.7], foi elaborado um relatório com a análise sísmica da barragem de Baihetan considerando descontinuidades na fundação [R.3] e foi ainda elaborada uma ICT Informação Técnica [P1].

Dado que esta dissertação de doutoramento era o principal objeto deste projeto de investigação, as atividades desenvolvidas entre 2019 e 2023 apenas se referem a trabalhos de investigação complementares dos restantes membros da equipa de investigação.

No que se refere aos ensaios de caracterização do comportamento mecânico de descontinuidades rochosas, foram apresentados trabalhos relativos aos ensaios laboratoriais [C.5, C10 e C11] e desenvolvidas duas dissertações de mestrado [T.1 e T.2], bem como trabalhos relacionados com os ensaios de inclinação progressiva [A.1] e [C.4 e C.6].

Em relação à caracterização geométrica das superfícies de descontinuidade (estudos acerca da rugosidade), foram elaborados diversos estudos envolvendo a sua digitalização tridimensional por

meios envolvendo contacto com a superfície [C.2] e por meios fotogramétricos não envolvendo contacto [C.14].

No domínio da aplicação do Eurocódigo 7 à engenharia das rochas, foi desenvolvida atividade relacionada com o processo de revisão dos Eurocódigos, que deu origem a um artigo em revista [A2] e a uma lição num seminário [L1].

No âmbito das análises probabilísticas foram realizados trabalhos acerca da estabilidade de taludes, que deram origem a três comunicações a conferências internacionais [C.12, C.13 e C.15].

Referem-se ainda a publicação de um capítulo de um livro relacionado com os ensaios em laboratório e *in situ* de mecânica das rochas [L.1] e de dois artigos relacionados com a capacidade de intervenção do LNEC no domínio da engenharia de barragens [C.8 e C.9].

2.2 Apreciação da atividade desenvolvida

Tendo em conta os condicionalismos referidos – saída da BD Margarida Espada e cessação dos trabalhos relativos à sua tese de doutoramento – considera-se que a atividade de investigação dos restantes membros da equipa do projeto decorreu de forma satisfatória, tendo excedido o que estava previsto, mesmo tendo em conta o aumento da duração do projeto de 4 para 8 anos.

3 | Divulgação de resultados

3.1 Publicações

3.1.1 Capítulo de livro

[L.1] Muralha, J. e Lamas, L. (2022) – Rock Mechanics Laboratory and Field Testing for Civil Engineering Infrastructures. In C. Chastre et al. (eds.), *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*, Springer Tracts in Civil Engineering. doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_3

3.1.2 Artigos em revistas internacionais

[A1] Alejano, L.R.; Muralha, J.; Ulusay, R.; Li, C.C.; Pérez-Rey, I.; Karakul, H.; Chryssantakis, P.; Aydan, O. ; Martínez, J. e Zhang N. – A Benchmark Experiment to Assess Factors Affecting Tilt Test Results for Sawcut Rock Surfaces. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 50, no 9, pg. 2547-2562, July 2017. doi: 10.1007/s00603-017-1271-6J.V.

[A.2] Estaire, J.; Muralha, J.; Segalini, A.; Johansson, E.; Nuijten, G.; Heintz, R. – Rock engineering design in tomorrow's geotechnical toolbox: Eurocode 7 – Ground properties (EN 1997-2:2024). *Geomechanics and Tunnelling*, 16, No. 5, 510-352, October 2023.. doi: 10.1002/geot.202300023.

3.1.3 Comunicações em reuniões científicas

[C1] Amaro, A., Muralha, J. (2016) – Interpretação de ensaios Lugeon para a caracterização hidráulica de maciços rochosos. 15^o Congresso Nacional de Geotecnia, Porto (FEUP), Portugal.

[C2] Resende, R; Muralha, J.; Ramos, A.L. e Fortunato, E. (2016) – Estudo do contacto e fecho de descontinuidades rochosas através de digitalização tridimensional. 15^o Congresso Nacional de Geotecnia, Porto (FEUP), Portugal.

[C3] Espada, M.; Muralha, J.; Lemos, J.V.; Plasencia, N. e Paixão, J. (2016) – Avaliação da Segurança para Cenários de Rotura pela Fundação da Barragem de Foz Tua. 15^o Congresso Nacional de Geotecnia, Porto (FEUP), Portugal.

[C4] Pérez-Rey, I.; Alejano, L.R.; Arzúa, J. e Muralha, J. (2016) – The role of tilting rate and wear of surfaces on basic friction angle testing. *ISRM Int. Symp. EUROCK 2016 Rock Mechanics & Rock Engineering: from the Past to the Future*, Capadocia, Turquia.

[C.5] Muralha, J. (2016) – Ensaios laboratoriais de deslizamento de descontinuidades rochosas. *CNME 2016*, Lisboa (LNEC), Portugal

- [C.6] I. Pérez-Rey, L.R. Alejano, J. Martínez, M. Muñoz & J. Muralha (2018) – Understanding tilt-test results on planar rock surfaces from a statistical perspective. EUROCK 2018, São Petersburgo (Mining University), Rússia.
- [C.7] Espada, M. et al. (2018) – Discrete element modelling of the failure mechanisms of Foz Tua arch dam foundation. 9th Numerical Methods in Geotechnical Engineering NUMGE 2018, Porto (FEUP), Portugal.
- [C.8] L. Lamas, A.L. Batista, V. Lemos, A.T. Castro e J. Muralha (2018) – Apoio Recente do LNEC ao Projeto e Construção de Grandes Barragens de Betão, suas Fundações e Obras Subterrâneas. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG 2018, Salvador, Bahia, Brasil.
- [C.9] V. Lemos, Romano Câmara, S. Oliveira e J. Muralha (2018) – Estudos de apoio ao projeto da barragem do Baixo Sabor realizados pelo LNEC na vertente estrutural. Betão Estrutural 2018, Lisboa (LNEC), Portugal.
- [C.10] J. Muralha e V. Lemos (2019) – A discussion of strength reduction techniques in safety analysis with DEM models. 14th International Congress of the International Society for Rock Mechanics, Foz de Iguaçu, Brazil.
- [C.11] J. Muralha, Fortunato, E. e Fernandes, L.M. (2020) – Surface wear effects in multi-stage rock joint shear tests. ISRM International Symposium Eurock 2020 – Hard Rock Engineering, Trondheim, Norway.
- [C.12] R Pereira, L Lamas, J Muralha (2021) – Sliding stability analyses of a rock slope using deterministic, semi-probabilistic and probabilistic methods. ISRM International Symposium Eurock 2021, Torino, Italy.
- [C.13] R Pereira, L Lamas, J Muralha (2022) – Análise probabilística da estabilidade de uma cunha rochosa considerando a variabilidade espacial. 7^{as} Jornadas Hispano-Portuguesas de Geotecnia, Mieres, Espanha.
- [C.14] J Muralha, A Paixão, R Resende, E Fortunato (2022) –Laboratory 3D rock joint roughness evaluation with basic, uncomplicated close-range photogrammetry. IX Latin American Rock Mechanics Symposium, Asunción, Paraguay.
- [C.15] R Pereira, J Muralha, L Lamas (2023) – Stability analysis of a rock slope: Fully-probabilistic approach. 15th ISRM Congress, Salzburgo, Austria.
- [C.16] M. González-Fernández et al. (2023) – Determining the transversely isotropic elastic constants from strain data by means of different mathematical approaches. 15th ISRM Congress, Salzburgo, Austria.

3.1.4 Lições por convite

- [L1] Muralha, J. (2023). Ground properties and their relationship with in-situ and laboratory tests – EN standards. Seminário “The second generation of Eurocode 7 and the integration of rock

engineering”, 15th International Congress on Rock Mechanics and 72nd Geomechanics Colloquium, Salzburgo, Áustria, outubro de 2023 (30 diapositivos).

3.1.5 Informações científicas e técnicas (ICT) do LNEC

[P1] Espada, M.; Lamas, L. (2018). Stability analysis of excavation slopes of Baihetan arch dam foundation. Informação Técnica de Barragens ITB 37, ISBN 978-972-49-2303-1, LNEC, Lisboa, novembro de 2018.

3.1.6 Relatórios

[R1] LNEC (Espada, M.; Muralha, J.; Vieira de Lemos, J. e Couto Marques, J.) – Discrete element modelling of rock engineering structures for seismic safety analyses. PhD thesis research plan of Margarida Espada. Relatório LNEC 213/2016 – DBB/NMMR.

[R.2] LNEC (Muralha, J.; Lemos, J.V.; Espada, M. e Lamas, L.) – DEMRock6m - Discrete element modelling of rock engineering structures for seismic safety analyses. Relatório de progresso 2016-2017 do projeto do P2I/LNEC. Relatório LNEC 248/2018 – DBB/NMMR.

[R.3] LNEC (Espada, M.; Vieira de Lemos, J. e Muralha) – Seismic analysis of Baihetan dam considering foundation discontinuities. Exploratory studies. Relatório LNEC 361/2018 – DBB/NMMR.

3.2 Dissertações de mestrado

[T1] Silva, R. (2016) - Influência da forma dos provetes nos resultados dos ensaios de inclinação progressiva de diaclases. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Orientação: IP José Muralha.

[T1] Fernandes, L. (2019) - Influência do desgaste da superfície de descontinuidades rochosas na sua resistência tangencial. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Orientação: IP José Muralha.

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, os seus valores totais previstos na ficha inicial, os dos dois primeiros anos do projeto (2016-2017) e os realizados na totalidade do projeto (2016-2023).

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Total previsto no projeto	Realizado em 2016-2017 (2 anos)	Realizado em 2016-2023 (total do projeto)
Capítulos de livro	0	0	1
Artigos em revista internacional	4	1	2
Artigos em revista nacional	1	0	0
Comunicações em congresso	6	4	16
Relatórios e ICT do LNEC	0	0	2
Dissertações de mestrado	0	1	2
Teses de doutoramento	1	0	0

4.2 Recursos mobilizados

No Quadro 4.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC afetados ao projeto. Indicam-se, em termos de meses de trabalho, o previsto, o realizado entre 2016 e 2017 (correspondente ao relatório intercalar) e o realizado entre 2016 e 2023 (total do projeto). Indicam-se, também, em termos percentuais, as afetações previstas e realizadas entre 2016 e 2023 (total do projeto).

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos

Equipa do LNEC	Categoria	Meses de trabalho			Afetação percentual	
		Total previsto no projeto (4 anos)	Realizado em 2016-2017 (2 anos)	Realizado em 2016-2023 (8 anos)	Previsto no projeto (4 anos)	Realizado em 2016-2023 (8 anos)
José Muralha	Investigador Principal	9,0	3,0	3,6	15	19
José Vieira de Lemos	Investigador-Coordenador	9,0	1,5	3,6	15	10
Luís Nolasco Lamas	Investigador Principal com Habilitação	4,5	0,75	1,8	5	1
Margarida Espada	Bolseira de doutoramento	54,0	12,5	21,6	90	18
Luis Dias	Técnico Superior	1,5	0	0,6	5	0

As percentagens de afetação dos investigadores ao projeto foram inferiores ao previsto, com exceção do IP José Muralha, que, após a saída da BD Margarida Espada, desenvolveu mais atividade no domínio dos estudos complementares do que o inicialmente previsto.

5 | Considerações finais

O projeto DEMRock6m tinha como principal objetivo o enquadramento das atividades de investigação relacionadas com a tese de doutoramento da BD Margarida Espada, que, em finais de 2018, decidiu interromper essas atividades e sair do LNEC. Nessa altura, em que estava decorrido mais de metade do tempo previsto para o projeto, era previsível que a BD viesse a terminar a tese no prazo previsto de quatro anos.

As atividades deste projeto visavam melhorar as metodologias de análise da segurança de obras de engenharia em maciços rochosos e contribuir para o aperfeiçoamento de modelos numéricos capazes de considerar alguns dos fatores mais importantes que influenciam o comportamento estrutural, tais como a definição dos mecanismos de rotura, a resistência tangencial das descontinuidades envolvidas nesses mecanismos, bem como as diversas ações envolvidas (pressões de água e ações sísmicas).

Considera-se que foram dados passos relevantes no domínio da identificação dos mecanismos de rotura e da consideração da ação sísmica em modelos de blocos tridimensionais com descontinuidades.

A interrupção dos trabalhos da tese condicionou de forma determinante o desenvolvimento do projeto. Por um lado, o projeto não atingiu o seu principal objetivo; mas por outro, a quantidade de publicações produzidas fora desse âmbito excedeu o previsto.

Lisboa, LNEC, janeiro de 2024

VISTO

O Diretor do Departamento
de Barragens de Betão



António Lopes Batista

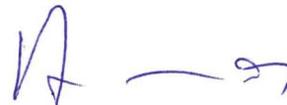
AUTORIA



José Muralha
Investigador Principal



José Vieira de Lemos
Investigador-Coordenador



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



www.lnec.pt

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