



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

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

**Relatório de progresso 2016-2017 do projeto do P2I/LNEC**

Lisboa • junho de 2018

**I&D** BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 248/2018 – **DBB/NMMR**

## **Título**

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

Relatório de progresso 2016-2017 do projeto do P2I/LNEC

## **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

### **Margarida Espada**

Bolseira de Doutoramento, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

### **Luís Nolasco Lamas**

Investigador Principal, 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](mailto:lnec@lnec.pt)

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

Relatório 248/2018

Proc. 0402/112/20549

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

Relatório de progresso 2016-2017 do projeto do P2I/LNEC

### Resumo

---

Neste relatório apresenta-se de forma sucinta a descrição da atividade de investigação realizada no âmbito do projeto DEMRock6m no período 2016-2017. Os resultados da atividade são analisados e avaliados em face dos objetivos inicialmente previstos, sendo proposta uma revisão do plano de atividades para os próximos três anos.

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

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

Progress report 2016-2017 of the P2I/LNEC project

### Abstract

---

A concise description is presented of the research activities undertaken in the scope of the DEMRock6m project during 2016-2017. The results are analyzed and assessed, considering the initial goals of the project. A revised plan for the next three years is proposed.

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



## Índice

1	Introdução .....	1
2	Atividade desenvolvida.....	2
2.1	Descrição da atividade desenvolvida .....	2
2.2	Apreciação da atividade desenvolvida e proposta de alteração do plano para 2018-2020 .....	5
3	Divulgação de resultados .....	7
3.1	Publicações.....	7
3.1.1	Artigos em revistas internacionais .....	7
3.1.2	Comunicações em reuniões científicas .....	7
3.1.3	Relatórios .....	7
3.2	Teses de mestrado .....	7
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento .....	8
4.1	Indicadores de desempenho.....	8
4.2	Recursos mobilizados.....	8
4.3	Aplicações a trabalhos de contrato.....	9
5	Considerações finais.....	10

## Índice de quadros

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial .....	2
Quadro 2.2 – Proposta de revisão do plano de trabalhos.....	6
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho .....	8
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos.....	9

## 1 | Introdução

O projeto de investigação DEMRock6m (Discrete element modelling of rock engineering structures for seismic safety analyses) teve início formal em 01-01-2016 e tem uma duração total prevista de 48 meses. O projeto está integrado no Plano de Inovação e Investigação (P2I) do LNEC e tem 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).

A equipa de investigação do LNEC é formada pelos seguintes elementos:

- IP José Muralha (Investigador Responsável);
- IC José Vieira de Lemos (Investigador Responsável);
- BD Margarida Espada;
- IP Luís Nolasco Lamas;
- Téc.Sup. Luis Dias.

O projeto destina-se, em larga medida, a enquadrar as atividades de investigação relacionadas com a dissertação 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 dissertação na FEUP, o projeto conta com a colaboração externa do Prof. José Couto Marques na sua qualidade de co-orientador da BD Margarida Espada.

No plano de tese da BD está previsto o estudo da barragem de Baihetan (China) sob ação sísmica, que decorre 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, o projeto tem também envolvido o Prof. Quan Jiang, responsável por este protocolo por parte do SKLGGE.

Encontram-se englobadas ainda algumas atividades complementares relacionadas com a caracterização geométrica e mecânica das descontinuidades de maciços rochosos, que justificam a participação do Técnico Superior Luis Dias.

## 2 | Atividade desenvolvida

### 2.1 Descrição da atividade desenvolvida

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								

As atividades desenvolvidas nas diversas tarefas nos dois primeiros anos do projeto, que em seguida sumariamente se descrevem, apresentaram alguns desvios em relação ao plano inicial, tendo algumas tarefas sido adiadas para os próximos dois anos, de modo a permitir o desenvolvimento de outros trabalhos no âmbito do projeto, que se afiguraram como prioritários, nomeadamente os que se referem às unidades curriculares que constam do programa doutoral da BD Margarida Espada.

- **Atividade 1 - Literature review and thesis framework**

- Esta atividade foi executada na totalidade no que se refere às tarefas T1.1 - Revisão bibliográfica acerca das técnicas de geração de descontinuidades e T1.2 - Revisão bibliográfica acerca da análise probabilística de estruturas geotécnicas em rocha, e parcialmente realizada no que se refere às tarefas T1.3 - Revisão bibliográfica acerca da análise sísmica de estruturas geotécnicas em rocha.
- Como resultado foi elaborado um relatório em que se apresenta o programa da dissertação de doutoramento da BD Margarida Espada [R.1].

- **Atividade 2 - Development of a model generator tool**
  - Foram iniciadas as três tarefas englobadas nesta atividade: T2.1 - Estudo das distribuições estatísticas das propriedades geométricas das descontinuidades, T2.2 - Metodologias para adaptar códigos de elementos discretos 3D a análises de estabilidade, T2.3 - Estudo dos procedimentos para uma representação eficiente da não persistência das descontinuidades nas análises de estabilidade.
  
- **Atividade 3 - Development of a procedure for probabilistic analyses in 3D DE models**
  - Nesta atividade foi realizado o trabalho para a unidade curricular "Análise de risco em obras geotécnicas" do programa doutoral da FEUP, no âmbito da tarefa T3.1 - Estudo de metodologias avançadas para análises probabilísticas com o objetivo de reduzir o esforço computacional, não tendo sido desenvolvida qualquer atividade na tarefa T3.2.
  - Este trabalho envolveu o estudo e a pesquisa bibliográfica dos métodos probabilísticos aproximados, dos métodos de simulação e do método das superfícies de resposta. O trabalho realizado consistiu na determinação da probabilidade de rotura da cunha rochosa identificada no talude de escavação da margem esquerda da barragem de Baihetan, utilizando o modelo de elementos discretos desenvolvido com o programa 3DEC para o efeito (tarefa 5.1). A probabilidade de rotura foi estimada com base em métodos probabilísticos aproximados, cuja função estado limite foi aproximada recorrendo ao método das superfícies de resposta.
  
- **Atividade 4 - Development of a procedure for seismic analyses in 3D DE models**
  - Nesta atividade foi realizado o estudo dos regulamentos chineses referentes a barragens de betão e a cálculos sísmicos, respeitantes à tarefa T4.1.
  - Foi também iniciado o estudo da análise dinâmica com o programa 3DEC, no âmbito do trabalho proposto para a avaliação da unidade curricular "engenharia sísmica" do programa doutoral da FEUP, que consiste na avaliação do comportamento dinâmico do conjunto barragem-fundação-albufera para o caso de estudo da barragem de Baihetan.
  
- **Atividade 5 - Numerical modelling of two arch dams and other rock engineering works (case studies)**
  - Nesta atividade encontram-se já efetuados mais trabalhos do que foi inicialmente previsto.
  - Na tarefa T5.1 - Desenvolvimento de modelos de elementos discretos 3D de barragens abóbada e outras obras, encontra-se executado o modelo da barragem de Foz Tua e o modelo da escavação da encosta da margem esquerda da barragem de Baihetan. Esta tarefa deu origem a uma publicação [C3], referida na secção 3.
  - Na Tarefa T5.2 – Aplicação de análises probabilísticas, foi estudada a variação da resistência das descontinuidades, os ensaios para a sua determinação, bem como a influência das subpressões em fundações de barragens.

- **Atividade 6 - Writing papers and thesis text**

– Nesta atividade foram elaboradas publicações destinadas a disseminar os resultados do projeto (tarefa T6.1), que se encontram listadas na secção 3 do presente relatório, em particular no âmbito da caracterização da resistência tangencial de descontinuidades rochosas [A1], [C2,C4] e no domínio da caracterização hidráulica de maciços rochosos [C1]. Salienta-se que, para além das publicações listadas, se encontram já aceites para publicação dois artigos em revistas internacionais e uma comunicação.

## **2.2 Apreciação da atividade desenvolvida e proposta de alteração do plano para 2018-2020**

Considera-se que as tarefas já realizadas cumpriram os objetivos previstos na ficha do projeto, tendo sido superados vários indicadores, nomeadamente os relativos às publicações e às teses de mestrado associadas ao projeto, como será detalhado nos capítulos seguintes.

A atividade desenvolvida decorreu, no essencial, dentro do âmbito previsto para o projeto, tendo-se verificado principalmente alterações na sequência temporal das tarefas. Os trabalhos relativos aos modelos que constituem os casos de estudo (fundação da barragem de Foz Tua e encosta da barragem de Baihetan), estando já efetuados, tiveram um desenvolvimento superior ao previsto, ao passo que atividades relacionadas com a formulação e implementação de procedimentos mais eficientes em termos computacionais de modo a permitirem abordagens probabilísticas dos estudos de estabilidade e das análises sísmicas foram menos desenvolvidos que o previsto.

Apesar do início do projeto se encontrar reportado a 1 de janeiro de 2016, deve referir-se que as atividades relacionadas apenas se iniciaram em finais de 2016 com o início da bolsa da BD Margarida Espada (setembro de 2016). Dado que posteriormente foi concedida à BD uma bolsa financiada pela FCT até junho de 2021, propõe-se que o projeto seja prolongado até ao final de 2020 com a revisão do plano de trabalhos que se apresenta no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Proposta de revisão do plano de trabalhos

Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa	2018 I	2018 II	2019 I	2019 II	2020 I	2020 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						
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...						
	T5.3	Seismic analysis using 3D discrete element models of a large Chinese dam 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						

## 3 | Divulgação de resultados

### 3.1 Publicações

#### 3.1.1 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.

#### 3.1.2 Comunicações em reuniões científicas

[C1] Amaro, A., Muralha, J. (2016) – Interpretação de ensaios Lugeon para a caracterização hidráulica de maciços rochosos. 15<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> 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.

#### 3.1.3 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.

### 3.2 Teses 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.

## 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 e os já realizados em 2016-2017.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Realizado em 2016-2017 (2 anos)	Total previsto no projeto
Artigos em revista internacional	1	4
Artigos em revista nacional	0	1
Comunicações em congresso	4	6
Teses de mestrado	1	0
Teses de doutoramento	0	1

### 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 2016-2017, e o total previsto. Neste total já se encontra considerado o prolongamento do projeto por mais um ano.

**Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos**

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

### 4.3 Aplicações a trabalhos de contrato

A questão da modelação de problemas tridimensionais envolvendo sistemas de grande dimensão e geometria complexa tem aplicação em estudos de comportamento dinâmico de barragens abóbada e sua interação com a fundação e albufeira. O desenvolvimento de modos de representação numérica mais eficiente da compartimentação dos maciços, que viabilizem tempos de cálculo mais expeditos, permitirá melhorar a capacidade do NMMR na análise e avaliação de segurança de barragens sob ações sísmicas.

Prevê-se que os resultados obtidos neste projeto possam ser aplicados em estudos destinados à avaliação da segurança de barragens atualmente em construção em Portugal (Daivões e Alto Tâmega).

A colaboração com o SKLGGE de Wuhan permitiu a aplicação dos estudos a uma grande barragem abóbada, com cerca de 300 m de altura. Salienta-se o interesse manifestado pelo dono dessa obra, a China Three Gorges Corporation, nos resultados que têm sido obtidos.

## 5 | Considerações finais

O projeto DEMRock6m pretende recorrer a modelos numéricos baseados numa aproximação de meio descontínuo para avaliar a segurança de obras em maciços rochosos sujeitas a ações correntes, em termos probabilísticos, e a ações sísmicas. Uma das principais dificuldades da aplicação destes modelos reside no elevado esforço computacional requerido no caso de fundações de barragens, sistemas complexos ou de grande dimensão.

As atividades deste projeto visam melhorar as metodologias de análise da segurança de obras de engenharia em maciços rochosos, que suportam os estudos normalmente desenvolvidos durante as fases de projeto, construção e exploração, bem como 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).

Este é um objetivo comum às várias componentes do projeto, que deverá assumir maior relevo nos próximos três anos.



Lisboa, LNEC, junho de 2018

VISTO

O Diretor do Departamento  
de Barragens de Betão



António Lopes Batista

AUTORIA



José Muralha  
Investigador Principal



José Vieira de Lemos  
Investigador-Coordenador



Margarida Espada  
Bolsista de Doutoramento



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



