



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

RockGeoStat – MODELAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS MARCADAMENTE HETEROGÊNEOS

Relatório de progresso 2016-2017 do projeto do P21/LNEC

Lisboa • julho de 2018

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 263/2018 – **DBB/NMMR**

Título

RockGeoStat – MODELAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS MARCADAMENTE HETEROGÊNEOS

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

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

Luís Lamas

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

José Muralha

Investigador Principal, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

Margarida Espada

Bolseira de Doutoramento, 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 263/2018

Proc. 0402/112/20536

RockGeoStat – MODELAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS MARCADAMENTE HETEROGÊNEOS

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 RockGeoStat no período 2016-2017. Os resultados da atividade são analisados e avaliados em face dos objetivos inicialmente previstos, sendo proposto um prolongamento do projeto até ao final de 2018.

Palavras-chave: RockGeoStat / Mecânica das rochas / Heterogeneidade / Modelação numérica

RockGeoStat – MODELLING OF HIGHLY HETEROGENEOUS ROCK MASSES
Progress Report 2016-2017

Abstract

A concise description of the research activities undertaken in the scope of the RockGeoStat project during 2016-2017 is presented. The results are analyzed and assessed, considering the initial goals of the project. The extension of the project until the end of 2018 is proposed.

Keywords: RockGeoStat / Rock mechanics / Heterogeneity / Numerical modelling

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	4
3	Divulgação de resultados	5
3.1	Publicações.....	5
3.1.1	Artigos em revistas internacionais	5
3.1.2	Comunicações em eventos técnicos e científicos	5
3.1.3	Projeto e tese de doutoramento	5
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	6
4.1	Indicadores de desempenho.....	6
4.2	Recursos mobilizados.....	6
5	Considerações finais	7

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial	2
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho	6
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos.....	6

1 | Introdução

O projeto de investigação “Modelação de maciços rochosos marcadamente heterogéneos”, com acrónimo RockGeoStat, teve início formal em 1 de janeiro de 2016, embora na sua proposta estivesse prevista uma data seis meses anterior. A duração total prevista era de 30 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 é formada pelos seguintes elementos:

- Investigador Principal Luís Lamas, LNEC (Investigador Responsável);
- Bolseira de Doutoramento FCT Marisa Mota Pinheiro, Universidade do Minho;
- Professor Auxiliar Tiago Miranda, Universidade do Minho;
- Investigador Principal José Muralha, LNEC;
- Bolseira de Doutoramento Margarida Espada, LNEC;
- Técnico Superior Luís Dias, LNEC.

Este projeto enquadrava a tese de doutoramento, que já havia sido iniciada, de Marisa Mota Pinheiro, da Escola de Engenharia da Universidade do Minho (UM), coorientada pelos Investigadores deste projeto Tiago Miranda (UM) e Luís Lamas (LNEC), cuja bolsa foi financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. O trabalho desta Bolseira foi realizado fundamentalmente na UM. A intervenção do LNEC, para além do trabalho de coorientação da tese, envolveu apoio e colaboração na parte de modelação numérica, assim como a realização de trabalho experimental no LNEC.

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Descrição da atividade desenvolvida

No Quadro 2.1 apresenta-se o plano de trabalhos proposto na ficha do projeto RockGeoStat. Este plano de trabalhos inclui as atividades previstas no projeto de tese de doutoramento apresentado na Universidade do Minho [T1], complementadas com outras que se vieram a mostrar convenientes.

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial

Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa	1º Sem. 2016	2º Sem. 2016	1º Sem. 2017	2º Sem. 2017	1º Sem. 2018
1 Pesquisa bibliográfica	T 1.1	Caracterização de maciços rochosos; parâmetros geomecânicos					
	T 1.2	Modelação de heterogeneidades; métodos de simulação geoestatística					
	T 1.3	Obras subterrâneas; modelos numéricos de comportamento mecânico					
	T 1.4	Técnicas de otimização					
2 Análise de técnicas de modelação de maciços heterogêneos	T 2.1	Métodos probabilísticos					
	T 2.2	Técnicas de geoestatística					
	T 2.3	Realização dos mapas geoestatísticos					
	T 2.4	Modelação do comportamento mecânico					
3 Desenvolvimento de uma metodologia de modelação de maciços heterogêneos	T 3.1	Mapas 2D e 3D de parâmetros de sistemas empíricos de classificação de maciços rochosos					
	T 3.2	Mapas de zonamento geotécnico					
	T 3.3	Mapas de deformabilidade					
	T 3.4	Exportação de dados para um modelo do comportamento mecânico					
4 Aplicação da metodologia a casos reais	T 4.1	Análises paramétricas iniciais					
	T 4.2	Aplicação aos dados do maciço de uma mina chilena					
	T 4.3	Adaptação de um modelo matemático existente das cavernas de Salamonde II					
	T 4.4	Recolha e análise da informação geotécnica existente de Salamonde II					
	T 4.5	Ensaio complementares para caracterização do maciço de Salamonde II					
	T 4.6	Aplicação às obras de Salamonde II					
5 Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de otimização de planos de sondagens	T 5.1	Desenvolvimento da metodologia com base em técnicas geoestatísticas					
	T 5.2	Definição dos algoritmos de otimização a utilizar					
	T 5.3	Integração das técnicas geoestatísticas com os algoritmos de otimização					
	T 5.4	Aplicação da metodologia desenvolvida a casos reais					
6 Escrita de artigos e da tese de doutoramento	T 6.1	Comunicações a congressos					
	T 6.2	Artigos em revistas internacionais com revisão					
	T 6.3	Escrita da tese de doutoramento					

As atividades previstas nas diversas tarefas foram em grande medida terminadas, atendendo a que o objetivo fundamental do projeto, que consistia na elaboração de uma tese de doutoramento, foi cumprido. A tese, intitulada “Numerical methodology to characterise heterogeneous rock masses.” [T2], foi apresentada pela investigadora do projeto Marisa Mota Pinheiro na Universidade do Minho e aprovada em outubro de 2017.

Descreve-se sumariamente a atividade realizada em cada tarefa:

Atividade 1 – Pesquisa bibliográfica

Esta atividade foi executada na totalidade.

Atividade 2 – Análise de técnicas de modelação de maciços heterogêneos

Esta atividade foi executada na totalidade e está refletida nos capítulos iniciais da tese de doutoramento. A análise efetuada permitiu adquirir competências no domínio dos métodos probabilísticos e das técnicas de simulação geostatística e efetuar aplicações iniciais no que se refere à caracterização de maciços rochosos. Desta tarefa resultou a publicação dos dois artigos em revista [A1] e [A2].

Atividade 3 – Desenvolvimento de uma metodologia de modelação de maciços heterogêneos

Esta atividade foi executada na totalidade e está refletida num capítulo da tese de doutoramento. Foi efetuada uma aplicação experimental a um caso simples. Deu origem a um artigo em revista [A4] e a uma comunicação a congresso [C1].

Atividade 4 – Aplicação da metodologia a casos reais

Esta atividade foi executada na totalidade e está refletida num capítulo da tese. A contribuição dos investigadores do LNEC foi particularmente relevante nesta atividade e compreendeu: a disponibilização de todos os elementos disponíveis sobre a caracterização do maciço rochoso interessado pelo empreendimento hidroelétrico subterrâneo de Salamonde II; a execução de um largo número de ensaios laboratoriais sobre amostras de rocha de Salamonde II, por forma a completar a informação existente; a disponibilização dos modelos numéricos de grandes dimensões e complexidade desenvolvidos pelo LNEC para os estudos de acompanhamento da obra; o apoio à exploração dos modelos para as aplicações da tese; o apoio na estratégia da sequência dos cálculos a realizar para otimizar os resultados obtidos com a metodologia de modelação de maciços heterogêneos desenvolvida.

Atividade 5 – Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de otimização de planos de sondagens

Esta atividade foi executada na totalidade e está refletida em dois capítulos da tese, um correspondente ao desenvolvimento da metodologia e outro à sua aplicação às obras subterrâneas de Salamonde II. A contribuição dos investigadores do LNEC foi também particularmente relevante nesta atividade, tendo dado origem a um artigo em revista [A3] e a duas comunicações em congresso [C2] e [C3].

Atividade 6 – Escrita de artigos e da tese de doutoramento

Esta atividade não foi finalizada até ao final do período a que este relatório de progresso se refere, na medida em que está em curso a preparação de, pelo menos, mais um artigo em revista e uma comunicação a congresso, sobre as aplicações das metodologias desenvolvidas às obras subterrâneas de Salamonde II.

2.2 Apreciação da atividade desenvolvida e proposta de alteração do plano para 2018

Considera-se que as atividades realizadas cumpriram os objetivos previstos na ficha do projeto.

Apenas ficou por terminar a atividade 6 no que se refere apenas à divulgação de resultados. Foi apresentado mais um artigo em revista do que estava previsto e menos duas comunicações a congresso.

Propõe-se o prolongamento do projeto por mais seis meses, até ao final de 2018, por forma a possibilitar terminar a escrita e a submissão de mais um artigo a revista e de pelo menos uma comunicação a congresso.

3 | Divulgação de resultados

3.1 Publicações

3.1.1 Artigos em revistas internacionais

- [A1] Pinheiro, M.; Emery, X.; Miranda, T.; Vallejos, J. (2016a). Truncated Gaussian simulation to map the spatial heterogeneity of rock mass rating. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(8), 1-6.
- [A2] Pinheiro, M.; Vallejos, J.; Miranda, T.; Emery, X. (2016b). Geostatistical simulation to map the spatial heterogeneity of geomechanical parameters: A case study with rock mass rating. *Engineering Geology*, 205, 93-103.
- [A3] Pinheiro, M.; Emery, X.; Rocha, A.M.; Miranda, T.; Lamas, L. (2017). Boreholes plans optimization methodology combining geostatistical simulation and simulated annealing. *Tunnelling and Underground Space Technology* 70: 65-75, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.003>, novembro de 2017.
- [A4] Pinheiro, M.; Emery, X.; Miranda, T.; Lamas, L.; Espada, M. (2018). Modelling geotechnical heterogeneities using geostatistical simulation and finite differences analysis. *Minerals* 2018, 8(2), 52, <https://doi.org/10.3390/min8020052>, fevereiro de 2018.

3.1.2 Comunicações em eventos técnicos e científicos

- [C1] Pinheiro, M.; Miranda, T.; Emery, X.; Lamas, L.; Peixoto, L. (2016). Numerical methodology to model heterogeneous rock masses. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.
- [C2] Pinheiro, M.; Miranda, T.; Emery, X.; Lamas, L. (2016). Metodologia de otimização da escolha do local de sondagens dos planos de prospeção em maciços rochosos. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.
- [C3] Pinheiro, M.; Miranda, T.; Emery, X.; Rocha, A.M.; Lamas, L. (2016). Borehole plan optimization in rock masses using geostatistical simulation. *Geostats 2016 – 10th International Geostatistical Congress*, Valência, Espanha.

3.1.3 Projeto e tese de doutoramento

- [T1] Pinheiro, M. (2014) – Metodologia numérica para a modelação de maciços rochosos marcadamente heterogêneos. Projeto de tese de doutoramento, Universidade do Minho.
- [T2] Pinheiro, M. (2017) – Numerical methodology to characterise heterogeneous rock masses. Tese de doutoramento, Universidade do Minho.

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	Total previsto no projeto	Realizado em 2016-2017 (2 anos)
Artigos em revista internacional	3	4
Comunicações em congresso	5	3
Teses de doutoramento	1	1
Metodologia de modelação de maciços rochosos heterogêneos utilizando técnicas geoestatísticas	1	1
Metodologia de otimização de planos de sondagens	1	1

4.2 Recursos mobilizados

No Quadro 4.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC afetados ao projeto, em termos de meses de trabalho efetivamente dedicados em 2016-2017 e o total previsto.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos

Equipa do LNEC	Categoria	Meses de trabalho	
		Realizado em 2016-2017 (2 anos)	Total previsto no projeto
Luís Lamas	Investigador Principal	2	3,0
José Muralha	Investigador Principal	1	1,5
Margarida Espada	Bolseira de doutoramento	3	6,0
Luis Dias	Técnico Superior	3	4,5

5 | Considerações finais

O projeto RockGeoStat teve como principal objetivo o desenvolvimento de metodologias inovadoras, para serem usadas, tanto na caracterização geomecânica de maciços rochosos, como na redução da incerteza associada à elaboração dos planos de prospeção geotécnica. O projeto enquadrava a tese de doutoramento, que já havia sido iniciada, de Marisa Mota Pinheiro, da Escola de Engenharia da Universidade do Minho (UM), coorientada pelos Investigadores deste projeto Tiago Miranda (UM) e Luís Lamas (LNEC).

As atividades realizadas cumpriram os objetivos previstos. Foi terminada a tese de doutoramento e foi feita a divulgação dos resultados da investigação por meio de artigos em revista e de comunicações a congressos.

Pretende-se, até ao final de 2018, terminar a elaboração de um artigo a apresentar a uma revista e de pelo menos duas comunicações a congresso. Para o efeito, propõe-se o prolongamento do projeto por mais seis meses, até ao final de 2018.

Lisboa, LNEC, julho de 2018

VISTO

O Diretor do Departamento de Barragens de
Betão



António Lopes Batista

AUTORIA



Luís Lamas

Investigador Principal
Chefe do Núcleo de Modelação e
Mecânica das Rochas



José Muralha

Investigador Principal



Margarida Espada

Bolseira de Doutoramento

