



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

## **RockGeoStat – MODELAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS MARCADAMENTE HETEROGÊNEOS**

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





LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# **RockGeoStat – MODELAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS MARCADAMENTE HETEROGÊNEOS**

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

Lisboa • dezembro 2023

**I&D BARRAGENS DE BETÃO**

**RELATÓRIO 405/2023 – DBB/NMMR**

## **Título**

### **RockGeoStat – MODELAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS MARCADAMENTE HETEROGÊNEOS**

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

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

### **Luís Lamas**

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

### **José Muralha**

Investigador Principal, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

### **Renato Pereira**

Investigador Auxiliar, 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 405/2023

Proc. 0402/1102/20536

## RockGeoStat – MODELAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS MARCADAMENTE HETEROGÊNEOS

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

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

## RockGeoStat – MODELLING OF HIGHLY HETEROGENEOUS ROCK MASSES 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 RockGeoStat project of the P2I/LNEC 2013-2020. The results achieved are analyzed and assessed, considering the initial goals of the project.

Keywords: RockGeoStat / Rock mechanics / Heterogeneity / Numerical modelling



## Índice

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introdução .....  | 1  |
| 2     | Atividade desenvolvida.....   | 3  |
| 2.1   | Descrição da atividade desenvolvida .....                             | 3  |
| 2.1.1 | Primeira fase .....   | 3  |
| 2.1.2 | Segunda fase .....  | 4  |
| 2.2   | Apreciação da atividade desenvolvida .....                            | 5  |
| 3     | Divulgação de resultados .....  | 7  |
| 3.1   | Publicações.....  | 7  |
| 3.1.1 | Programa de habilitação .....   | 7  |
| 3.1.2 | Artigos em revistas internacionais .....                              | 7  |
| 3.1.3 | Coordenação de atas de congressos .....                               | 8  |
| 3.1.4 | Comunicações em eventos técnicos e científicos .....                  | 8  |
| 3.1.5 | Projeto e tese de doutoramento .....                                  | 10 |
| 3.1.6 | Ficha do projeto e relatório de progresso .....                       | 10 |
| 3.1.7 | Informações científicas e técnicas (ICT) do LNEC .....                | 10 |
| 3.1.8 | Lições especiais por convite .....                                    | 10 |
| 4     | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento ..... | 12 |
| 4.1   | Indicadores de desempenho.....  | 12 |
| 4.2   | Recursos mobilizados.....   | 12 |
| 5     | Considerações finais .....  | 14 |

## Índice de quadros

|  |    |
|--|----|
| Quadro 2.1 – Plano de trabalhos inicial .....  | 3  |
| Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho .....   | 12 |
| Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos..... | 13 |



## 1 | Introdução

O projeto de investigação “Modelação de maciços rochosos marcadamente heterogêneos”, com acrónimo RockGeoStat, teve início formal em 1 de janeiro de 2016, com uma duração total prevista de 30 meses. O projeto estava integrado no Plano de Inovação e Investigação (P2I) do LNEC e tinha 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), como indicado na ficha de projeto [R1].

A equipa do projeto de investigação RockGeoStat, na fase inicial, era 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.

Nesta fase inicial, 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), cuja bolsa foi financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). O trabalho desta bolseira foi realizado fundamentalmente na UM. A intervenção do LNEC, para além do trabalho de orientação da tese, envolveu apoio na parte de modelação numérica e a realização de trabalho experimental.

Em julho de 2018 foi elaborado um relatório de progresso [R2] que apresentou, de forma sucinta, a descrição da atividade de investigação realizada no âmbito do projeto RockGeoStat no período 2016-2017, bem como a análise e avaliação dos resultados obtidos. Nessa altura tinha já terminado a tese de doutoramento prevista e foi proposto o prolongamento do projeto por mais seis meses, até ao final de 2018, por forma a finalizar a elaboração de publicações respeitantes ao trabalho desenvolvido.

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 RockGeoStat 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 a atividade de investigação dos investigadores da equipa.

Em finais de 2018 deixou de participar neste projeto de investigação a Bolseira de Doutoramento Margarida Espada, por se ter desligado do LNEC e ter terminado a atividade de investigação. Em março de 2020, o Investigador Auxiliar Renato Pereira iniciou a sua atividade como investigador deste projeto.

O presente relatório apresenta, de forma sucinta, a atividade desenvolvida no projeto de investigação RockGeoStat desde o seu início, em janeiro de 2016, até ao 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 proposto na ficha do projeto RockGeoStat [R1]. Este plano de trabalhos incluía as atividades previstas no projeto de tese de doutoramento apresentado na Universidade do Minho [T1].

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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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 deste plano de trabalhos inicial estavam em grande medida terminadas quando foi emitido o relatório de progresso 2016-2017 [R2], na medida em 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. Tinham sido executadas na totalidade todas as atividades previstas, com exceção da 6, que previa a publicação de um artigo em revista sobre as aplicações das metodologias desenvolvidas na tese às obras subterrâneas de Salamonde II, o que veio a ser posteriormente efetuado.

Com este projeto foi possível aproveitar o conhecimento existente no LNEC, resultante da sua intervenção durante a construção das obras subterrâneas do empreendimento hidroelétrico de Salamonde II, no âmbito de um contrato com a Eletricidade de Portugal (EDP), por forma a utilizar esta obra como caso de estudo das técnicas desenvolvidas pela doutoranda Marisa Mota Pinheiro. A contribuição dos investigadores do LNEC foi particularmente relevante nas atividades 4 e 5, 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 de Salamonde II;
- 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 heterogéneos desenvolvida;
- a sua aplicação às obras subterrâneas de Salamonde II.

Desta primeira fase do projeto de investigação, constante do plano de trabalhos, resultaram uma tese de doutoramento [T2], cinco artigos em revista ([A1], [A2], [A4], [A5] e [A7]) e três comunicações ([C1], [C2], [C3]).

### 2.1.2 Segunda fase

Como referido na introdução, numa segunda fase o âmbito deste projeto foi alargado, cobrindo uma gama mais ampla de trabalhos de investigação, nomeadamente no âmbito da determinação do campo de tensões em maciços rochosos. Estas investigações resultaram, em grande medida, das necessidades dos estudos realizados pelo LNEC para obras subterrâneas e da análise e interpretação dos resultados obtidos nesses estudos. Destacam-se os desenvolvimentos feitos para aplicação da metodologia de integração de tensões utilizada no LNEC a maciços rochosos heterogéneos, como é o caso da caverna da central hidroelétrica de Gouvães. Estes estudos deram origem a duas comunicações a congressos internacionais ([C4] e [C5]), tendo a segunda sido uma *keynote lecture*, a uma comunicação a um congresso nacional ([C6]) e a três lições especiais ([L4] e [L6]).

Foi realizado um estudo aprofundado de identificação das constantes elásticas anisotrópicas em ensaios biaxiais utilizados para interpretação de ensaios de sobre-carotagem para determinação do estado de tensão, que deu origem a um artigo em revista internacional com arbitragem científica ([A3]) e a uma Informação Científica e Técnica do LNEC ([P1]) com os resultados de estudos efetuados.

Ainda no âmbito da determinação de tensões *in situ*, foram efetuados estudos para aplicação do método da sobre-carotagem utilizando um aparelho adquirido para o efeito (do tipo USBM), no betão do corpo da barragem de Cahora Bassa. Os resultados obtidos deram lugar a uma comunicação num congresso internacional ([C7]), a três comunicações em congressos nacionais ([C10], [C11] e [C12]) e a duas lições especiais ([L2] e [L7]).

Foram preparados e publicados dois artigos na revista Geotecnia, por convite ao investigador Luís Lamas por parte da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), o primeiro ([A6]) num número temático dedicado à "Aplicação de métodos numéricos em obras de Engenharia Geotécnica" e o segundo ([A8]) num número especial intitulado "Edição especial comemorativa dos 50 anos da revista GEOTECNIA".

Tiveram lugar atividades dos investigadores Luís Lamas, José Muralha e Renato Pereira no domínio da aplicação do Eurocódigo 7 a engenharia das rochas. A atividade realizada está relacionada com o processo de revisão dos Eurocódigos e deu origem a três artigos em revista ([A9], [A10] e [A11]), uma comunicação a um congresso internacional ([C8]) e a três lições especiais ([L1], [L3], [L5] e [L9]).

O investigador Luís Lamas foi coordenador das atas da 3rd International Conference on Information Technology in Geo-engineering (3<sup>rd</sup> ICITG), realizado em Guimarães ([E1]).

Foi também no âmbito deste projeto de investigação que foram desenvolvidos os estudos do investigador Luís Lamas para a preparação da XXXIX Lição Manuel Rocha ([L8]) e dos Programas de Investigação e de Formação Pós-Graduada apresentados para obtenção do título de habilitado para o exercício de funções de coordenação de investigação científica, intitulados "Determinação do campo de tensões em maciços rochosos para o projeto de estruturas subterrâneas" ([H1]).

## 2.2 Apreciação da atividade desenvolvida

A atividade desenvolvida ao abrigo do projeto de investigação RockGeoStat excedeu largamente a prevista inicialmente, pelas razões referidas na introdução, de que se salienta o aumento da sua duração de 2,5 para 8 anos.

As atividades realizadas na primeira fase cumpriram claramente os objetivos previstos na ficha do projeto, nomeadamente o desenvolvimento das metodologias propostas para a modelação de maciços heterogêneos e a otimização de planos de sondagens, a realização da tese de doutoramento e a publicação dos correspondentes artigos em revista e em congressos.

Na segunda parte do projeto foram feitos importantes desenvolvimentos na aplicação de uma metodologia de integração de tensões utilizada no LNEC a maciços rochosos heterogêneos, concretizada nos estudos para a central subterrânea de Gouvães. Os resultados obtidos permitem concluir sobre o grande interesse e a utilidade destas atividades.

Ainda no âmbito da determinação de tensões, o processo de identificação das constantes elásticas anisotrópicas em ensaios biaxiais utilizados para interpretação de ensaios de sobre-carotagem permitiu realizar um salto qualitativo na metodologia de interpretação destes ensaios, com claros benefícios para os resultados obtidos.

Os estudos efetuados para aplicação do método da sobre-carotagem, utilizando um aparelho adquirido para o efeito (do tipo USBM), à barragem de Cahora Bassa tiveram resultados inovadores por permitirem a utilização dos conhecimentos e das técnicas habitualmente utilizadas em mecânica das rochas à determinação de tensões no volume das barragens de betão.

Num âmbito muito diferente, durante todo o tempo em que decorreu o projeto de investigação foram realizados estudos de apoio à revisão dos Eurocódigos, nomeadamente no que concerne à aplicação do Eurocódigo 7 (Eurocódigo Geotécnico) ao projeto de obras em maciços rochosos.

Finalmente realça-se o trabalho que levou, primeiramente, à realização da XXXIX Lição Manuel Rocha pelo investigador Luís Lamas e, em seguida, dos Programas de Investigação e de Formação Pós-Graduada apresentados para obtenção do título de habilitado para o exercício de funções de coordenação de investigação científica, intitulados “Determinação do campo de tensões em maciços rochosos para o projeto de estruturas subterrâneas”. Este documento constitui um estado da arte aprofundado sobre o tema e crê-se que constitui um elemento de referência para estudos futuros.

## 3 | Divulgação de resultados

### 3.1 Publicações

#### 3.1.1 Programa de habilitação

[H1] Lamas, L.N. (2023). **Determinação do campo de tensões em maciços rochosos para o projeto de estruturas subterrâneas**. Programas de investigação e de formação pós-graduada apresentados para obtenção do título de habilitado para o exercício de funções de coordenação de investigação científica, LNEC, fevereiro de 2023.

#### 3.1.2 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, DOI: 10.1007/s00603-016-0928-x, fevereiro de 2016.

[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, DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.03.003, março de 2016.

[A3] Espada, M.; Lamas, L. (2017). **Back analysis procedure for identification of anisotropic elastic parameters of overcored rock specimens**. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50: 513-527, DOI: 10.1007/s00603-016-1129-3, março de 2017.

[A4] 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, DOI: 10.1016/j.tust.2017.07.003, novembro de 2017.

[A5] 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, DOI: 10.3390/min8020052, fevereiro de 2018.

[A6] Lamas, L.; Espada, M.; Muralha, J.; Lemos, J.V. (2018). **Aplicação de métodos numéricos na interpretação de resultados de medições de tensões em maciços rochosos**. Geotecnia 143, 113-140, número temático "Aplicação de métodos numéricos em obras de Engenharia Geotécnica", DOI: 10.24849/j.geot.2018.143.06, julho de 2018.

[A7] Pinheiro, M.; Emery, X.; Miranda, T.; Lamas, L.; Espada, M. (2021). **Using geotechnical scenarios for underground structure analysis: A case study in a hydroelectric complex in northern Portugal**. Tunnelling and Underground Space Technology, 111, DOI: 10.1016/j.tust.2021.103855, maio de 2021.

- [A8] Lamas, L.; Lemos, J.V. (2021). **O desenvolvimento da mecânica das rochas e perspectivas de evolução da investigação e dos domínios de aplicação**. Geotecnia 152, 481:508, “Edição especial comemorativa dos 50 anos da revista GEOTECNIA”, DOI: 10.14195/2184-8394\_15, julho de 2021.
- [A9] Lamas, L.; Burbaum, U.; Estaire, J.; Harrison, J.; Nuijten, G.; Pereira, R. (2023). **Rock engineering design in tomorrow's geotechnical toolbox: Eurocode and the basis of structural and geotechnical design (the second generation of EN 1990 and EN 1997) | Felsbauplanung mit dem geotechnischen Werkzeugkasten von morgen: Eurocode und die Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken (die zweite Generation der EN 1990 und EN 1997)**. Geomechanics and Tunnelling, DOI: 10.1002/geot.202300021, 16(5), pp. 469–490, outubro de 2023.
- [A10] Walter, H.; Labiouse, V.; Lamas, L.; Spross, J.; Stille, H. (2023). **Rock engineering design in tomorrow's geotechnical toolbox: Eurocode 7 – General Rules (EN 1997-1:2024) | Felsbauplanung mit dem geotechnischen Werkzeugkasten von morgen: Eurocode 7 – Allgemeine Regeln (EN 1997-1:2024)**. Geomechanics and Tunnelling, DOI: 10.1002/geot.202300019, 16(5), pp. 469–490, outubro de 2023.
- [A11] Harrison, J.P.; Burbaum, U.; Lamas, L.; Nuijten, G.; Spross, J.; Stille, H. (2023). **Rock engineering design in tomorrow's geotechnical toolbox: Perspectives on the evolution to the 2035 third generation of Eurocode | Felsbauplanung mit dem geotechnischen Werkzeugkasten von morgen: Perspektiven der Entwicklung der dritten Generation des Eurocodes 2035**. Geomechanics and Tunnelling, DOI: 10.1002/geot.202300027, 16(5), pp. 560–572, outubro de 2023.

### 3.1.3 Coordenação de atas de congressos

- [E1] Correia, A.G.; Cortez, P.; Tinoco, J.; Lamas, L. (Editors) (2020). **Information Technology in Geo-engineering: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference (ICITG)**. Guimarães, Springer, setembro de 2019.

### 3.1.4 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**. 15<sup>o</sup> 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**. 15<sup>o</sup> 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.



- [C4] Lamas, L.; Muralha, J. Espada, M. (2016). **Análise integrada de resultados de ensaios in situ de medição de tensões em maciços rochosos**. Anais das 5as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, Corunha, Espanha, outubro de 2016.
- [C5] Lamas, L.; Espada, M.; Figueiredo, B.; Muralha, J. (2017). **Stress measurements for underground powerhouses – three recent cases**. In: Proc. ISRM AfriRock-Rock Mechanics for Africa; keynote session, Cidade do Cabo, África do Sul, outubro de 2017.
- [C6] Lamas, L.; Espada, M.; Muralha, J.; Lemos, J.V. (2018). **Determinação do campo de tensões in situ para o projeto das obras subterrâneas de Gouvães**. Anais do 16º Congresso Nacional de Geotecnia, Ponta Delgada, 2018.
- [C7] Lamas, L.; Gomes, J.P.; Batista, A.L.; Carvalho, E.F.; Matsinhe, B. (2019). **Measurement of in situ stresses in the concrete of the Cahora Bassa dam**. In: Proc. ICOLD-2019 Annual Symposium “Sustainable and Safe Dams around the World”, Ottawa, Canada, 1649-1662, DOI: 10.1201/9780429319778, Taylor and Francis, Agosto de 2019.
- [C8] Lamas, L.; Nuijten, G.; Boley, C.; Burbaum, U.; Feinendegen, M; Harrison, J.P.; Johansson, E.; Labiouse, V.; Migliazza, M.R.; Olsson, R.; Poisel, R.; Segalini, A.; Stille, H.; Virely, D.; Walter, H. (2020). **Revision of the Eurocodes – aspects of geotechnical and rock engineering design**. In Proc. ISRM International Symposium - EUROCK 2020, Article 167, junho 2020
- [C9] Pereira, R.; Lamas, L.; Muralha J. (2021). **Sliding stability analyses of a rock slope using deterministic, semi-probabilistic and probabilistic methods**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 833. ISRM International Symposium on Rock Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice 20-25 September 2021, Turin, Italy, 2021.
- [C10] Lamas, L.; Gomes, J.P. (2021). **Barragem de Cahora Bassa. Medição “in situ” de tensões no betão do corpo da barragem**. Resumo alargado. Anais do 12º Congresso Nacional de Mecânica Experimental – CNME2020 Monte Real, Leiria, setembro/outubro de 2021.
- [C11] Gomes, J.P; Lamas, L. (2021). **Barragem de Cahora Bassa. Medição “in situ” de tensões nas armaduras das estruturas salientes do descarregador de meio fundo**. Resumo alargado. Anais do 12º Congresso Nacional de Mecânica Experimental – CNME2020, Monte Real, Leiria, setembro/outubro de 2021.
- [C12] Pereira, R.; Lamas, L.; Muralha J. (2022). **Análise probabilística da estabilidade de uma cunha rochosa considerando a variabilidade espacial**. Anais do 11º Simposio Nacional de Ingenieria Geotecnia e 7as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia. Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, Mieres, Espanha, maio de 2022.
- [C13] Gomes, J.P.; Lamas, L. (2022). **Barragem de Cahora Bassa. Medição "in situ" de tensões no betão e nas armaduras das estruturas salientes do descarregador de meio fundo**. Resumo alargado. Anais do 3º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil – Tecnologias Inteligentes, FCT Nova, Oeiras, junho de 2022.

[C14] Pereira, R.; Espada, M.; Lamas, L.; Reis, N. (2022). **Analysis of the monitored behaviour of a hydraulic tunnel using structural and statistical models**. In: Proc. IX Latin American Rock Mechanics Symposium and IX Simposio Latinoamericano de Mecánica de Rocas, Asunción, Paraguay, outubro de 2022.

[C15] Pereira, R.; Muralha, J.; Lamas, L. (2023). **Stability analysis of a rock slope: Fully-probabilistic approach**. In: Proc. 15th ISRM Congress & 72nd Geomechanics Colloquium (Ed. Schubert, Kluckner), Salzburg, Áustria, outubro de 2023.

### 3.1.5 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.

### 3.1.6 Ficha do projeto e relatório de progresso

[R1] Lamas, L. (2015). **RockGeoStat – Modelação de maciços rochosos marcadamente heterogêneos – Ficha de projeto de I&D&I**. LNEC, Lisboa, julho de 2015.

[R2] Lamas, L.; Muralha, J.; Espada, M. (2018). **RockGeoStat – Modelação de maciços rochosos marcadamente heterogêneos - Relatório de progresso 2016-2017 do projeto do P2I/LNEC**. Relatório 263/2018 – DBB/NMMR, LNEC, Lisboa, julho de 2018.

### 3.1.7 Informações científicas e técnicas (ICT) do LNEC

[P5] Espada, M.; Lamas, L. (2018). **Identification of transversely isotropic parameters in overcored rock specimens - A back analysis approach**. Informação Técnica de Barragens ITB 38, ISBN 978-972-49-2304-8, LNEC, Lisboa, novembro de 2018.

### 3.1.8 Lições especiais por convite

[L1] Lamas, L. (2016). **Eurocode 7 and rock engineering design: main issues and the current process of revision. ISRM Workshop on Rock Mechanics and Rock Engineering – Theoretical advances, investigation techniques and design**. Croatian Geotechnical Society, Zagreb, Croácia, março de 2016 (26 diapositivos).

[L2] Batista, A.L.; Lamas, L.; Bettencourt Ribeiro, A.; Melo, J.F. (2017). **Barragem de Cahora Bassa. Estudos em curso relativos a aspetos da segurança estrutural e hidráulica**. 8º Encontro técnico-científico dos Laboratórios de Engenharia Civil da CPLP – Parcerias para a Capacitação, LNEC, Lisboa, 22 de maio de 2017 (33 diapositivos)

[L3] Lamas, L.; Virely, D. (2017). **Eurocode 7: from soil mechanics to rock mechanics**. Workshop on rock mechanics. 66th Geomechanics Colloquium 2017, Salzburgo, Áustria, outubro de 2017, (31 diapositivos).

- [L4] Lamas, L. (2017). **In situ stress measurements for the underground structures of the Gouvães hydroelectric scheme planning, execution and analysis** – a Keynote Lecture. ChinaRock 2018, Pequim, China, outubro de 2018 (33 diapositivos).
- [L5] Lamas, L. (2018). **The Eurocode programme – Eurocode 7 and rock engineering**. ChinaRock 2018, Meeting of the Commission on Design Methodologies, Pequim, China, novembro de 2018 (29 diapositivos).
- [L6] Lamas, L. (2019). **Medição de tensões *in situ* para as estruturas subterrâneas do aproveitamento hidroelétrico de Gouvães – planeamento, execução e análise**. Jornadas Tecnológicas 2019 FCTUNL, Caparica, 2019 (36 diapositivos).
- [L7] Lamas, L. (2020). **Input of rock mechanics testing methods for stress measurements in a concrete arch dam**. ISRM International Workshop on Recent Trends in Rock Mechanics, Ljubljana, Eslovénia, janeiro de 2020 (20 diapositivos).
- [L8] Lamas, L. (2022). **Determinação do campo de tensões em maciços rochosos para o projeto de estruturas subterrâneas**. Lição Manuel Rocha, Sociedade Portuguesa de Geotecnia e Associação de Geotécnicos Antigos Alunos da UNL, outubro de 2022, Lisboa, (54 diapositivos).
- [L9] Lamas, L. (2023). **General aspects of the second generation of EN 1990 and EN 1997, with a focus on rock engineering**. 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).

## 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 (primeira fase), os realizados em 2016-2017, bem como os realizados em 2016-2023 (total do projeto).

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

| Indicadores   | Total previsto no projeto (primeira fase) | Realizado em 2016-2017 (primeira fase) | Realizado em 2016-2023 (total do projeto) |
|---|---|--|---|
| Programas de habilitação  |   |  | 1   |
| Artigos em revista  | 3   | 5                                      | 11  |
| Comunicações em congresso   | 5   | 3                                      | 15  |
| Teses de doutoramento   | 1   | 1                                      | 1   |
| Metodologia de modelação de maciços rochosos heterogêneos utilizando técnicas geoestatísticas | 1   | 1                                      | 1   |
| Metodologia de otimização de planos de sondagens  | 1   | 1                                      | 1   |
| Outras publicações  |   |  | 1   |
| Lições especiais por convite  |   |  | 9   |

Como previsto inicialmente, na primeira fase do projeto de investigação foi realizada uma tese de doutoramento e foram publicados cinco artigos em revista e três comunicações dela decorrentes, tendo sido desenvolvidas as metodologias previstas. Na segunda fase o número de artigos em revistas e de comunicações em congresso foi elevado, tendo havido ainda uma série de lições especiais por convite. Destaca-se a realização de um programa de habilitação e a preparação de uma Lição Manuel Rocha.

### 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 em 2016-2017 (primeira fase) e o realizado em 2016-2023 (total do projeto). Indica-se, também, a afetação prevista e realizada em 2016-2023 (total do projeto), em termos percentuais.

**Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos**

| Equipa do LNEC   | Categoria                              | Meses de trabalho              |                                 |                                 | Afetação percentual            |                                 |
|------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                  |  | Previsto no projeto (2,5 anos) | Realizado em 2016-2017 (2 anos) | Realizado em 2016-2023 (8 anos) | Previsto no projeto (2,5 anos) | Realizado em 2016-2023 (8 anos) |
| Luís Lamas       | Investigador Principal com Habilitação | 3                              | 2                               | 8                               | 10                             | 9                               |
| José Muralha     | Investigador Principal                 | 1,5                            | 1                               | 3                               | 5                              | 3,5                             |
| Renato Pereira   | Investigador Auxiliar                  | –                              | –                               | 5                               | –                              | 5,5                             |
| Margarida Espada | Bolseira de doutoramento               | 6                              | 3                               | 4                               | 10                             | 4,5                             |
| Luis Dias        | Técnico Superior                       | 4,5                            | 3                               | 3                               | 10                             | 3,5                             |

As percentagens de afetação dos investigadores ao projeto, considerando os oito anos da sua duração, foram todas inferiores ao previsto, o que se deverá ao seu envolvimento noutros projetos. No entanto, considerando a entrada do novo membro da equipa, a afetação total de pessoal de investigação, no final do projeto, foi de 23,5%, apenas um pouco inferior aos 25% previstos.

## 5 | Considerações finais

O projeto RockGeoStat teve inicialmente 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 enquadrou uma tese de doutoramento apresentada por Marisa Mota Pinheiro à 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.

Na segunda fase do projeto foram abordadas outras temáticas, de âmbito diversificado no domínio da mecânica das rochas, que se consideraram convenientes e relevantes, por forma a enquadrar a atividade de investigação dos membros da equipa. Realçam-se os desenvolvimentos feitos para aplicação da metodologia de integração de tensões utilizada no LNEC a maciços rochosos heterogêneos, os estudos de identificação das constantes elásticas anisotrópicas em ensaios biaxiais utilizados para interpretação de ensaios de sobre-carotagem, os estudos para aplicação do método da sobre-carotagem utilizando um aparelho do tipo USBM, as atividades no domínio da aplicação do Eurocódigo 7 a engenharia das rochas no âmbito do processo de revisão dos Eurocódigos, os artigos por convite escritos para a revista Geotecnia, bem como a preparação de uma Lição Manuel Rocha e de um programa da habilitação.

As atividades realizadas neste projeto tiveram um impacto relevante em estudos por contrato, nomeadamente os relacionados com a determinação de tensões nas obras subterrâneas de Gouvães e no betão da barragem de Cahora Bassa.

São ainda de realçar o elevado número de publicações, incluindo 11 artigos em revista e 15 comunicações a congressos, bem como as 9 lições especiais por convite.

Lisboa, LNEC, dezembro de 2023

VISTO

O Diretor do Departamento de Barragens de  
Betão



António Lopes Batista

AUTORIA



Luís Lamas

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



José Muralha

Investigador Principal



Renato Pereira

Investigador Auxiliar









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

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