

Muografia e a sua primeira aplicação em Portugal, na Mina do Lousal

Pedro Teixeira¹, Alberto Blanco², Bento Caldeira¹, Bernardo Tomé², Isabel Alexandre³, João Matos⁴, Jorge Silva⁵, José Borges¹, Lorenzo Cazon⁷, Luís Afonso², Luís Lopes², Magda Duarte⁷, Mário Pimenta^{2,3}, Mourad Bezzeghoud¹, Paolo Dobrilla², Pedro Assis^{2,3}, Raul Sarmento², Rui Oliveira¹, Sofia Andringa²

¹ Departamento de Física (ECT), Instituto de Ciências da Terra (ICT/IFFA), Earth Remote Sensing Laboratory (EaRSLab), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho nº59 - 7000-671 Évora

² Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP), Av. Prof. Gama Pinto, 2 - 1649-003 Lisboa

³ Instituto Superior Técnico (IST), Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa

⁴ Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada da Portela. Bairro do Zambujal, Apartado 7586 - Alfragide, 2610-999 Amadora

⁵ Departamento de Física (DF), Universidade de Coimbra, Rua Larga, 3004-516 Coimbra, Portugal

⁶ Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE) - Universidade de Santiago de Compostela, Rúa de Xoaquín Díaz de Rábago, 15705 Santiago de Compostela, Espanha

⁷ Universidade do Minho, Campus Gualtar, CP3, 3.02, 4710-057 Braga, Portugal

* Autor correspondente: pmmt@uevora.pt

Resumo

A muografia é uma técnica de sondagem não invasiva que usa muões, uma radiação natural de fundo com algum poder penetrante, para observar o interior das estruturas atravessadas. Com detetores adequados à observação da subsuperfície terrestre, é possível criar muografias, imagens com informação sobre a distribuição de densidades da região observada.

Internacionalmente, esta técnica já foi aplicada em várias áreas. Em Portugal, está a ser aplicada pela primeira vez na área da geofísica para fazer um reconhecimento geológico da Mina do Lousal.

Palavras-Chave

Muografia, RPC, física de partículas, geofísica, mina do Lousal

1. Introdução

Os muões são partículas elementares produzidas por raios cósmicos em interações com a atmosfera. São partículas carregadas semelhantes aos eletrões, mas aproximadamente 200 vezes mais massivas que eles. Como têm uma interação com a matéria muito baixa e atravessam longas distâncias, são um bom meio para criar imagens do interior de grandes estruturas, usando detetores concebidos para medir o fluxo de muões e estimar a sua atenuação na matéria atravessada em comparação com o fluxo esperado. A esta técnica, relativamente recente, dá-se o nome de muografia. Quando da sua aplicação resulta a construção de modelos tridimensionais também é referida como tomografia muônica ou de muões. A densidade dos materiais é o parâmetro físico ao qual esta técnica de sondagem não-invasiva é sensível. Quanto mais longo é o caminho ou mais

denses são os materiais numa determinada direção, menos muões têm energia para o atravessar. Uma contagem de muões em todas as direções permite inferir esses contrastes. O instrumento usado na medição da atenuação do fluxo de muões designa-se por telescópio de muões e é equipado com detetores de partículas construídos para esse fim.

No final da década de 70, a muografia começou a ganhar forma e, passadas várias décadas, a evolução da tecnologia de detetores, software de simulação e do conhecimento científico sobre raios cósmicos e o fluxo de muões trouxeram-lhe um amplo crescimento a nível internacional. Atualmente, a muografia destaca-se em aplicações nas áreas de vulcanologia e geofísica, mas também tem aplicações em domínios como a arqueologia, engenharia civil, segurança e controlo nuclear.

A partir da colaboração entre o LIP, a UÉvora e o CCV do Lousal, e com suporte do LNEG, está a ser desenvolvido um projeto pioneiro que tenciona introduzir a muografia no panorama da geofísica em Portugal. A aplicação em curso centra-se na Mina do Lousal e consiste no reconhecimento da variabilidade geológica na estrutura compreendida entre a galeria e a superfície, a partir dos dados fornecidos por telescópios desenvolvidos pelo projeto LouMu.

2. Muões

Os muões são o tipo mais abundante de partículas criadas nos fenômenos atmosféricos designados por chuveiros de partículas. Estes ocorrem quando raios cósmicos, partículas muito energéticas vindas do espaço, colidem com as moléculas da atmosfera terrestre produzindo cascatas de

novas partículas. A maioria dos muões é criada a cerca de 15 km de altitude, após a entrada dos raios cósmicos na região mais densa da atmosfera. Por esse motivo, é também comum usar-se a designação de muões atmosféricos ou cósmicos, de acordo com a natureza da sua criação.

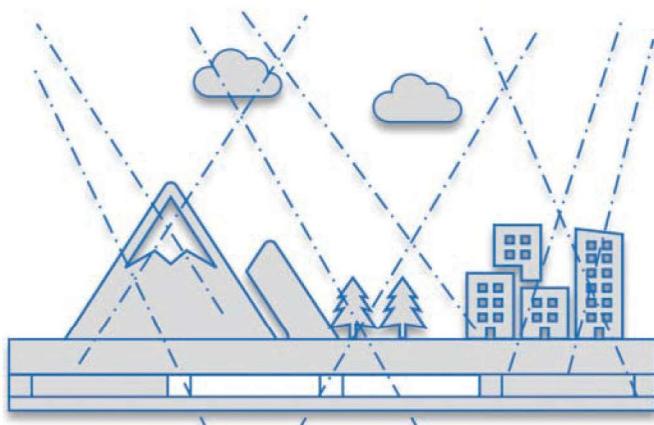


Figura 1 - Os muões atmosféricos são uma radiação natural e inofensiva criada na atmosfera, capaz de atravessar longas distâncias da superfície terrestre. Estão presentes em todo o globo com uma distribuição relativamente constante.

A descoberta desta partícula aconteceu em 1936 por Carl Anderson e Seth Neddermeyer [1]. Até ao momento, eram conhecidos o protão, o neutrão e o eletrão e a sua observação abriu portas para a descoberta do vasto mundo das partículas subatómicas, impulsionando o aparecimento da primeira geração de aceleradores de partículas na década de 50.

São partículas elementares com carga, semelhantes aos eletrões, mas diferem na massa que é cerca de 200 vezes maior. Outra diferença é que os muões são partículas instáveis, com um tempo médio de vida de $2,2 \mu\text{s}$ em repouso, mas dado que viajam a velocidades relativistas, a dilatação do tempo permite que percorram longas distâncias e que ainda penetrem na superfície da Terra antes de decairem. O seu nível de interação com outras partículas é baixo e por serem mais pesados do que os eletrões, não são desacelerados tão facilmente na interação com os átomos que encontram pelo caminho. As trajetórias em que viajam são essencialmente retílineas e, dependendo da energia com que foram criados, podem atravessar vários metros ou mesmo quilometros da crosta terrestre antes que a sua energia se esgote. Nesse momento decaem num eletrão ou positrão, dependendo da carga elétrica do muão que lhes deu origem, sendo rapidamente absorvidos pela matéria, e em dois neutrinos diferentes, que podem continuar a atravessar todo o planeta indiferentes a qualquer interação.

3. Muografia e Tomografia Muónica

A perda da energia dos muões ocorre principalmente por ionização e excitação atómica e pode ser determinada em função da densidade da materiais atravessados e distância neles percorrida. Isto dá-nos a energia mínima necessária para um muão atravessar uma determinada coluna de matéria, de uma determinada direção, até chegar ao ponto de deteção.

Os muões são também desviados da sua direção inicial, e ainda que o desvio seja mesmo muito pequeno, o efeito cresce significativamente com o número atómico dos elementos que atravessam. Dependendo da escala de observação e natureza dos alvos, a muografia pode ser feita apenas contando os muões que chegam numa dada direção, ou então medindo diretamente a deflexão das trajetórias.

O fluxo de muões que se espera detetar é a soma dos muões que incidem na direção desse ponto com energia superior à energia mínima. Assim, quanto mais denso for o material a atravessar, menor será o fluxo de muões observado nessa direção. Com a energia de 1 GeV, um muão tem a probabilidade de atravessar aproximadamente 2 m de um solo comum, considerando uma massa volémica média de $2,6 \text{ g/cm}^3$. Acima desse valor de energia, o fluxo de muões ao nível do mar é pelo menos duas ordens de grandeza maior que a quantidade de outras partículas carregadas.

Sabendo as distâncias totais da matéria atravessada, a medição da atenuação do fluxo permite conhecer a distribuição das densidades médias, com base na razão entre o fluxo observado e o fluxo esperado. A intensidade do fluxo de muões decresce desde a direção vertical, torna-se quase nula perto da direção horizontal e tem uma distribuição de energia bem conhecida [2]. Em média, chegam à superfície cerca de 250 muões por metro quadrado e por segundo, vindos de todas as direções.

A deteção é feita por detektors de muões, montados em paralelo numa estrutura designada por telescópio de muões. A observação produz imagens como radiografias, mas que resultam da atenuação de muões, chamadas muografias. As muografias mostram a distribuição das densidades médias da região observada. Esta é a base da técnica de muografia, que usa esta radiação natural e detektors de muões para realizar observações não invasivas. Com a combinação de dados da observação de um alvo em diferentes ângulos ou usando mais do que um telescópio em simultâneo, pode-se obter o aspeto tomográfico desta técnica. É por isso que também se refere a ela usando o termo tomografia muónica ou tomografia de muões.

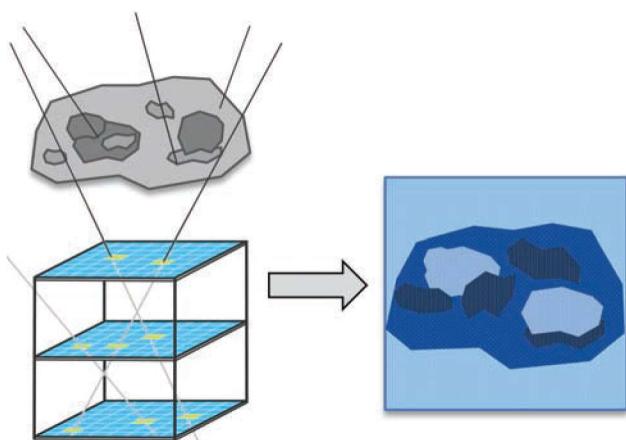


Figura 2 - Exemplificação da técnica de muografia: os muões atravessam o alvo de matéria e alguns chegam aos detektors do telescópio de muões (esquerda), produzindo sinais elétricos que permitem reconstruir a trajetória dos muões e criar muografias com a distribuição das densidades médias do alvo (direita).

Atualmente, a muografia é aplicada sob duas formas. A mais usual é a muografia de transmissão, por vezes também referida como de absorção, que utiliza um telescópio para registar a contagem dos muões transmitidos através da matéria, vindos da direção da observação, em trajetórias essencialmente retílineas. Neste método, o fluxo de muões é medido dentro do intervalo angular de aceitação do telescópio e considera a probabilidade de uma determinada percentagem do fluxo ser transmitida através da coluna de matéria numa dada direção do alvo observado. Por outras palavras, o que é medido é a opacidade da matéria na linha de visão dos detetores, dependente da densidade média da coluna de matéria atravessada em cada direção. A segunda forma é a muografia de dispersão que faz uso de dois telescópios em paralelo, em lados opostos do alvo sob observação. Neste método, são registadas as trajetórias de entrada e de saída dos muões através do alvo em estudo, entre os dois telescópios. Nas sucessivas interações atómicas, os muões acumulam pequenas deflexões, efeito da dispersão múltipla de Coulomb. O objetivo desta forma de muografia é localizar elementos de grande número atómico no interior do alvo (p. ex. materiais radioativos), os quais provocam desvios significativos nas trajetórias dos muões. A reconstrução das trajetórias nesta forma revela uma tomografia muónica mais precisa, permitindo identificar com maior rapidez a presença de materiais muito densos no interior dos volumes analisados.

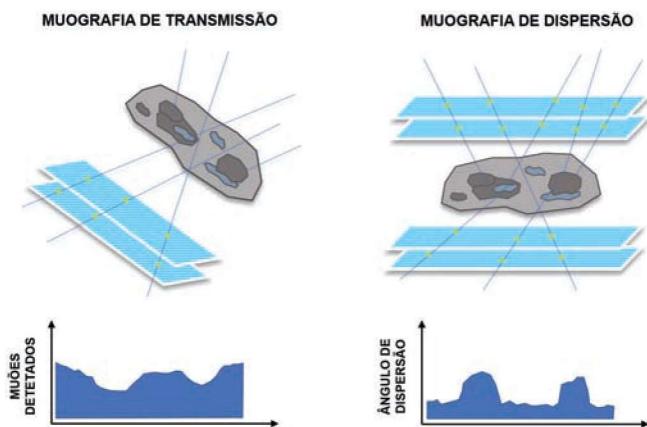


Figura 3 - Visualização esquemática da geometria de deteção (detetores e alvo rochoso) e da informação detetada na muografia de transmissão (menor número de deteções nas direções do alvo com densidade média maior) e de dispersão (maior ângulo de dispersão nas regiões com elementos de maior número atómico).

A concretização de ambas as formas de muografia estão dependentes da distribuição estatística de grandes amostras de contagens de muões, para que o contraste entre materiais de densidades diferentes se torne aparente. De um modo geral a muografia de transmissão é o método ideal para estruturas médias e de grandes dimensões, enquanto a muografia de dispersão é mais adequada para alvos pequenos ou médios, pois a reconstrução das trajetórias torna-se inexequível para alvos muito grandes, como vulcões [3].

4. Áreas de aplicação

O conhecimento sobre partículas subatómicas, e em particular sobre os muões, conseguido inicialmente com a

primeira geração de aceleradores de partículas da década de 50, abriu portas para novas aplicações. A primeira dessas aplicações documentada, a fazer uso de muões, aconteceu em 1955. A partir das leituras do fluxo de muões medidas com um contador Geiger colocado num túnel na Austrália, Eric George conseguiu determinar a atenuação causada pela ionização dos muões e daí inferir a espessura de gelo acima do túnel [4]. Anos mais tarde, em 1969, Luis Alvarez lidera uma equipa de cientistas que emprega detetores de muões com características semelhantes às atuais, em arqueologia, para sondar o interior da Pirâmide de Quéfren, obtendo a primeira imagem de muografia, que não revelou nenhum espaço desconhecido no seu interior [5].

Com o avanço da tecnologia, os equipamentos de deteção tornaram-se mais compactos, robustos e precisos, permitindo alargar a sua aplicação a várias áreas. Aquela onde mais se tem usado e desenvolvido a muografia é a vulcanologia. Em 1995, a equipa de Nagamine (Japão), obteve imagens do Monte Tsukuba medindo a atenuação do fluxo de muões [6]. O resultado deste trabalho motivou futuras aplicações em vários vulcões no Japão, como Satsuma-Iwojima [7], Sakurajima [8] e talvez o exemplo mais importante foi a monitorização da erupção em tempo real do Monte Asama, em 2009 [9]. O Japão lidera em aplicações em vulcanologia, devido à sensibilidade do país nesta área, mas outros países seguiram os mesmos passos, como a Itália em aplicações no Vesúvio, Etna e Stromboli [10], ou a França em Puy de Dôme [11] e La Soufrière de Guadeloupe [12], entre outros. Ainda no campo da geofísica, têm sido feitos estudos sobre a utilização da muografia em exploração mineira, envolvendo a observação no interior de minas ou no interior de sondagens [13]. O projeto LouMu é também, dentro deste campo da ciência, uma aplicação em ambiente subterrâneo, dentro de uma mina [14]. Na área de engenharia civil também foram encontrados meios de monitorar a estabilidade de edifícios históricos, como no Palazzo della Loggia em Itália [15]. Outro grande projeto que usa muografia é o ScanPyramids que arrancou em 2015, novamente no Egito e aplicada à arqueologia, com o objetivo de fazer observações não invasivas às várias pirâmides do país. Em 2017, fizeram uma grande descoberta na Pirâmide de Quéfren, uma câmara de grandes dimensões, situada no seu interior e até então desconhecida [16]. Todas estas aplicações fizeram uso da muografia de transmissão, com medições da atenuação do fluxo de muões através dos alvos.

Os avanços que permitiram explorar aplicações com muografia de dispersão foram feitos pelo Laboratório Nacional de Los Alamos, México, em 2003 [17]. As áreas de controlo e segurança são as que mais podem tirar partido deste conhecimento. Para o controlo de carga de camiões, são exemplos o Portal Scanner nas Bahamas [18] e o Muon Portal Project desenvolvido em Itália [19]. Na segurança nuclear, a monitorização e caracterização de contentores de armazenamento de resíduos nucleares beneficia do uso da muografia de dispersão [20], servindo de exemplo a aplicação feita nos reatores de Fukushima Daiichi [21], após o acidente nuclear.

Uma última aplicação que vale a pena mencionar e que está em estudo para o futuro é equipar rovers enviados para Marte com detetores de muões, para analisarem o interior das várias estruturas geológicas que se encontram acima da superfície marciana [22].

A muografia é uma área em crescimento e sobre ela já foram escritas excelentes revisões da literatura como as de Chechia [23], Procurer [24], Kaiser [25] e Bonechi [26], que desenvolvem em muitos aspectos os assuntos abordados neste artigo, que tenciona divulgar em língua portuguesa a técnica de muografia.

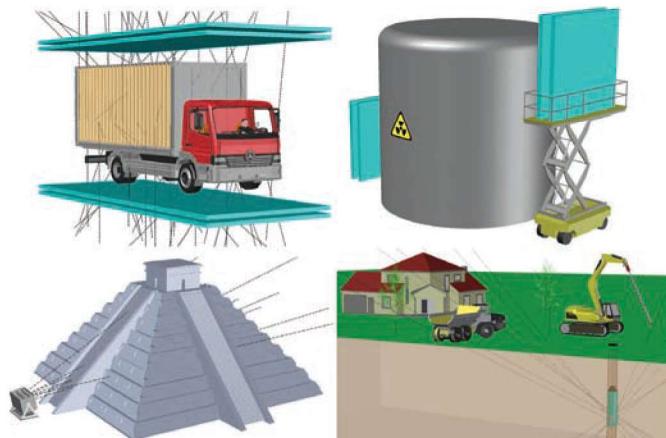


Figura 4 - Em cima, da esquerda para a direita, duas aplicações de muografia de dispersão: inspeção da carga de camiões e monitorização de contentores de armazenamento nuclear. Em baixo, da esquerda para a direita, duas aplicações de muografia de transmissão: observação do interior de grandes estruturas acima da superfície (p. ex. uma pirâmide) e observações subterrâneas dentro de sondagens (Bonechi et al. 2020).

5. Projeto LouMu

No panorama português, o projeto LouMu está a levar a cabo a primeira aplicação de muografia em Portugal, na forma de muografia de transmissão. É uma aplicação que está a ser desenvolvida através da colaboração entre o Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP), o Instituto de Ciências da Terra da Universidade de Évora e o Centro Ciência Viva do Lousal (CCV Lousal), contando também com o suporte do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). Os conhecimentos multidisciplinares dos membros da equipa são aplicados nas várias etapas do trabalho. A aplicação de muografia no Lousal envolve: a criação de simulações muográficas, para previsão e comparação; desenvolvimento de ferramentas de análise dos dados de muografia; trabalho geofísico para o estudo do terreno sobre a mina, resultando num modelo geológico de referência para a observação com a muografia; desenvolvimento e otimização dos telescópios de muões; instalação, observação, recolha e análise da informação muográfica obtida no local.

A Mina do Lousal é um exemplo de sucesso de requalificação de zonas mineiras abandonadas, funcionando atualmente como Mina da Ciência, dentro da rede de museus Ciência Viva, organizando visitas ao museu de ciência, museu mineiro e à mina [27].

A geologia da Mina do Lousal é conhecida e oferece as infraestruturas ideais para esta aplicação de muografia em ambiente subterrâneo, tendo sido por isso escolhida a galeria superior da mina (Galeria Waldemar) como o local da observação. O objetivo é fazer um levantamento geológico do terreno, entre o telescópio e a superfície, usando a Falha de Corona e os contrastes com as massas de sulfuretos como alvos da observação e aprimorar as informações existentes com novos dados, enquanto se avalia o desempenho do telescópio e das ferramentas de análise de muografia.

Um protótipo do telescópio de muões, o MiniMu (Fig. 5, esquerda), foi colocado no início de 2019 na galeria para divulgação e teste do equipamento eletrónico às condições da mina. Atualmente é parte integrante das visitas realizadas pelo Centro Ciência Viva do Lousal à mina.

Todos os equipamentos de deteção são construídos no laboratório de instrumentação do LIP em Coimbra. Os detetores utilizados são do tipo *Resistive Plate Chamber* (RPC) que usam um gás no seu interior que é ionizado na passagem dos muões. O sinal elétrico produzido em simultâneo em diferentes RPC, colocados em paralelo, determinam a direção da trajetória de cada muão, resultando nas muografias.

Um telescópio maior, nomeado CorePix (Fig. 5, direita), com 4 planos RPC quadrados de dimensão 1 m x 1 m, foi instalado no pátio 4 da galeria, no segundo trimestre de 2021, onde se encontra a operar. A recolha dos dados de muografia, decorrentes da observação, são analisados à distância em tempo real e o processo continuará, durante o tempo necessário, para fazer o reconhecimento da geologia do terreno em estudo.

Após esta aplicação teste no Lousal, o objetivo do Projeto LouMu é desenvolver e disponibilizar a técnica de muografia em Portugal para outras aplicações em geofísica, como mapeamento geológico e prospecção geofísica.

Uma página na internet contendo informações sobre o projeto e os diferentes aspectos do trabalho foi criada e está disponível publicamente [28].

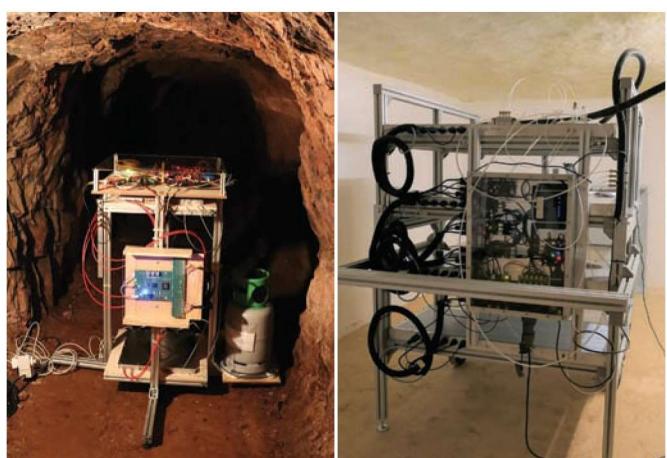


Figura 5 - À esquerda, MiniMu, protótipo usado para testar o equipamento nas condições da mina e para divulgação do projeto nas visitas ao Lousal; à direita, CorePix, telescópio de muões com quatro RPCs, a operar no interior do pátio 4 da Galeria Waldemar.

6. Agradecimentos

Este projeto de I&D é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, referência EXPL/FIS-OUT/1185/2021. A FCT financia também a bolsa de doutoramento do autor correspondente, integrada no LouMu, referência PD/BD/150490/2019 e no âmbito do ICT o projeto com referência UIDB/04683/2020.

O projeto é desenvolvido no âmbito de atividades desenvolvidas pelos polos de Lisboa, Coimbra e Minho do LIP, do Grupo de Investigação de Dinâmica da Litosfera do ICT – UÉvora e pelo Centro Ciência Viva do Lousal.

Um agradecimento especial à equipa do Centro Ciência Viva do Lousal pelo apoio ao projeto, em particular a Vanessa Pais e João Costa, que organizam as atividades de divulgação no museu e ajudam na manutenção dos telescópios na mina.

Referências

- [1] C. Anderson, & S. H. Neddermeyer, "Cloud chamber observations of cosmic rays at 4300 meters elevation and near sea-level", *Physical Review*, 50, 263-271, (1936)
- [2] M. Tanabashi et al., « Review of particle physics », *Phys. Rev. D* 98 030001, (2018)
- [3] C. Rhodes, "Muon Tomography: Looking inside Dangerous Places", *Science Progress*, 98(3), 291-299, (2015)
- [4] E. George, "Cosmic rays measure overburden of tunnel", *Commonwealth Eng.* July 1, 455, (1955)
- [5] L.W. Alvarez, et al., "Search for hidden chambers in the pyramids", *Science* 167, 832, (1970).
- [6] K. Nagamine et al., "Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction" *Nucl. Inst. Methods A* 356, 585, (1995)
- [7] H. Tanaka et al., "Cosmic-Ray Muon Imaging of Magma in a Conduit: Degassing Process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan", *Geophysical Research Letters* 36(1):1-5, (2009).
- [8] L. Oláh et al., "High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors", *Sci Rep* 8, 3207, (2018).
- [9] H. Tanaka et al., "Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): first results from measurements at Asama volcano, Japan", *Geophys. Res.Lett.* 36, 1944, (2009).
- [10] R. D'Alessandro et al., "Volcanoes in Italy and the role of muon radiography", *Phil. Trans. R. Soc. A* 3772018005020180050, (2019).
- [11] C. Cârloganu et al., "Towards a Muon Radiography of the Puy de Dôme" *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 2(1):55-60, (2013).
- [12] J. Marteau et al., "DIAPHANE: Muon tomography applied to volcanoes, civil engineering, archaeology", *Journal of Instrumentation*. 12, (2016) .
- [13] A. Bonneville et al., "A novel muon detector for borehole density tomography", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A* 851, 108-117, (2017)
- [14] P. Teixeira et al., "Muography for Underground Geological Surveys: ongoing application at the Lousal Mine (Iberian Pyrite Belt, Portugal)", *JAIS*, vol. 2022, Apr. (2022)
- [15] A. Zenoni et al., "Historical building stability monitoring by means of a cosmic ray tracking system", *arXiv:1403.1709*, (2014).
- [16] K. Morishima et al., "Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons", *Nature* 552, 386-390, (2017).
- [17] K. Borozdin et al., "Radiographic imaging with cosmic-ray muons", *Nature* 422, 277, (2003)
- [18] R. Patnaik et al., "Image based object identification in muon tomography", *2014 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, pp. 1-9, (2014).
- [19] F. Riggi et al., "The Muon Portal Project: Commissioning of the full detector and first results", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A*, Volume 912, Pages 16-19, ISSN 0168-9002, (2018).
- [20] D. Mahon et al., "First-of-a-kind muography for nuclear waste characterization", *Phil. Trans. R. Soc. A*.3772018004820180048, (2019).
- [21] H. Miyadera et al., "Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons", *AIP Advances*. 3, (2013).
- [22] S. Kedar et al., "Muon radiography for exploration of Mars geology", *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 2, 157-164, (2013).
- [23] P. Checchia, "Review of possible applications of cosmic muon tomography", *JINST* 11 (12), C12072, (2016).
- [24] S. Procureur, "Muon imaging: principles, technologies and applications", *Nucl. Inst. Methods A* 878, 169, (2018).
- [25] R. Kaiser, "Muography: overview and future directions", *Philos. Trans. R. Soc. A* 377, 0049, (2018).
- [26] L. Bonechi et al., "Atmospheric muons as an imaging tool. *Reviews in Physics*, Volume 5, 100038, ISSN 2405-4283, (2020).
- [27] J. Relvas et al., "Lousal, Portugal: a successful example of rehabilitation of a closed mine in the Iberian Pyrite Belt", *Society for Geology Applied to Mineral Deposits SGA News*, Nº 31, June 2, 1-16, (2012).
- [28] Página LouMu: <https://pages.lip.pt/loumu/en/loumu/>



Pedro Teixeira, licenciou-se em Astronomia com minor em Geologia na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2015). Completou o Mestrado em Geologia (2017), na mesma universidade, com uma tese na área da Geofísica. Atualmente, frequenta o Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço, especialidade em Geofísica, na Escola de Ciências e Tecnologias da Universidade de Évora. A sua investigação, inserida no projeto LouMu, está a contribuir para o desenvolvimento da técnica de muografia em Portugal. Aliando técnicas geofísicas à observação dos muões no estudo do terreno e examinando a sua complementaridade, levando à disponibilidade da muografia para mais aplicações na área da geofísica.



Sofia Andringa, é licenciada e mestre em Física pela FCUL e doutorou-se no Instituto Superior Técnico, em 2003, com uma tese em Física de Partículas, explorando dados do acelerador LEP no CERN. É investigadora no LIP onde integra desde 2007 vários projetos na área da física de neutrinos e de raios cósmicos. Entre outros, participa no Observatório de Neutrinos de Sudbury no Canadá e no Observatório Pierre Auger na Argentina. Tem-se interessado também pelas aplicações da física de partículas às Ciências da Terra, através do estudo dos geoneutrinos e da utilização de muões para prospeção geofísica, coordenando o Projeto LouMu.



Mourad Bezzeghoud, é professor catedrático no Departamento de Física da Universidade de Évora. Licenciou-se em Eng. Geofísica no Inst. Nat. des Hydrocarbures et de la Chimie (Argélia, 1981), possui um mestrado (DEA) em Geofísica interna e Geoquímica e um doutoramento na área da Sismologia (U. Denis Diderot, Paris, 1987). Realizou a agregação em Ciências da Terra e do Espaço (2011) na U. de Évora. Foi docente na U. Pierre et Marie Curie (Paris, 1986-88), investigador e Diretor de Depto. no Centre en Astronomie, Astrophysique et Géophysique de Argel (1988-94) onde fundou o Depto. de Sismologia e liderou a instalação das primeiras redes sísmica telemétrica e geodésica em Argélia. Foi professor/investigador convidado na “École National des Mines de Paris” (1985), na U. Complutense de Madrid (1996 e 2010) e na “École Normal Supérieure de Paris” (2011). Entre 2013 e 2020, foi Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia da U. Évora. Atualmente, é investigador e coordenador do Instituto de Ciências da Terra (Polo de Évora), Presidente do Conselho Científico da Escola de Ciências e Tecnologia da U. Évora. É cocoodenador do projeto LouMu e dedica a sua investigação à Geofísica/Sismologia, nomeadamente ao estudo do fenómeno sísmico e ao risco a ele associado.