

# Aplicação do método de resistividade elétrica na caracterização do calcário em exploração numa pedreira de rocha ornamental

## Application of the electrical resistivity method in the characterization of limestone in a quarry of ornamental rock

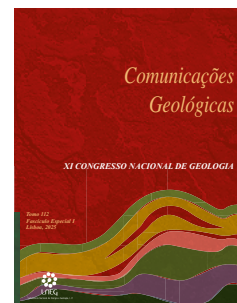
A. Gomes<sup>1\*</sup>, J. Duarte<sup>1,2,3</sup>, J. Ribeiro<sup>1,4</sup>

DOI: <https://doi.org/10.34637/fcdg-n916>

Recebido em 01/10/2023 / Aceite em 03/05/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original  
Original article

**Resumo:** O principal objetivo deste trabalho foi a caracterização do maciço calcário explorado na pedreira “EM&R nº 6478”, com base na aplicação do método geofísico de resistividade elétrica, tendo em vista a otimização da operação extrativa de calcário para fins ornamentais. Pretende-se identificar as zonas do maciço com coloração acinzentada, que apresentam menor interesse económico. Verificou-se que os valores de resistividade elétrica sofrem variações significativas nas zonas de contato entre as zonas de coloração bege e as zonas de coloração acinzentada do calcário. Constatou-se que a tonalidade acinzentada se deve à presença de uma fração argilosa na sua composição, que pode explicar os valores mais baixos de resistividade elétrica. A metodologia utilizada revelou-se bastante eficaz no planeamento futuro da exploração, permitindo uma melhor orientação das frentes de desmonte, tornando a exploração ainda mais rentável.

**Palavras-chave:** rocha ornamental, caracterização de calcários, tomografia de resistividade elétrica, fração argilosa, planeamento da exploração.

**Abstract:** The main objective of this work was to characterize the limestone massif exploited in the “EM&R nº 6478” quarry, based on the application of the geophysical method of electrical resistivity, with a view to optimizing the limestone extraction operation for ornamental purposes. The aim is to identify the areas of the massif with a greyish color that are of less economic interest. It was found that the electrical resistivity values vary significantly in the contact zones between the beige and grey areas of the limestone. It was found that the greyish hue is due to the presence of a clay fraction in its composition, which may explain the lower electrical resistivity values. The methodology used proved to be highly effective in the future planning of quarrying, allowing for better orientation of the blasting fronts, making quarrying even more profitable.

**Keywords:** Ornamental rock, limestone characterization, electrical resistivity tomography, clay fraction, exploitation planning.

### 1. Introdução e Objetivos

O calcário Creme Valinho, explorado na pedreira EM&R nº 6478, situada na localidade de Valinho de Fátima, freguesia de Fátima, concelho de Ourém, distrito de Santarém (Figura 1), é uma rocha carbonatada de cor bege claro, por vezes com leve tonalidade acinzentada (EM&R, 2017; Carvalho, 2013), datado do Caloviano, final do Jurássico Médio (Azerêdo, 2007). A ocorrência de material com a tonalidade acinzentada tem implicações na operação da extração. Dada a sua utilização para fim ornamental e tratando-se de um recurso natural finito, o planeamento e otimização da sua exploração é fundamental (Duarte, 2018). Desse modo, é possível garantir a obtenção de um produto de boa qualidade, diminuindo o desperdício gerado.



Figura 1. Localização da área de estudo (assinalada a vermelho) (fonte: Google Earth, acessado em 2023).

Figure 1. Location of the study area (marked in red) (source: Google Earth, accessed in 2023).

A boa aceitação e, posterior, entrada e permanência no mercado do calcário ornamental explorado está significativamente dependente da coloração do produto final obtido. Como tal, o calcário em estudo

<sup>1</sup>Universidade de Coimbra, Departamento de Ciências da Terra, Portugal.

<sup>2</sup>IQGeo-Serviços, Lda. Coimbra, Portugal.

<sup>3</sup>Universidade de Coimbra, Centro de Geociências, Coimbra. Portugal.

<sup>4</sup>Universidade de Coimbra, IDL. Coimbra, Portugal

\* Corresponding author / Autor correspondente: alexgomes20@hotmail.com

possui variações na sua coloração (entre cor bege e uma coloração acinzentada, tal como se pode observar na Figura 2) que podem dificultar a sua comercialização para fins ornamentais, uma vez que a uniformidade do resultado em obra *e.g.* pode ficar comprometida.

Assim, é necessário um bom planeamento e otimização da exploração, que garanta a obtenção de um produto com as características e qualidade desejáveis e, por outro lado, a minimização de desperdícios gerados pela extração do calcário com a tonalidade não pretendida (acinzentada) com o intuito de obter o calcário de tonalidade aceite no mercado (bege). Esta ação acaba por desencadear um problema de sustentabilidade e rentabilidade, uma vez que o calcário de tonalidade acinzentada extraído acaba por não trazer o retorno pretendido dada a sua difícil comercialização.



Figura 2. Fotografia de pormenor do calcário, com variação de cor (acinzentada em a) e bege em b)).

Figure 2. Detail photograph of the limestone, with color variation (greyish in a) and beige in b)).

Tendo como objetivo otimizar o planeamento da exploração do calcário, foi executada uma campanha de prospeção geofísica, com a aplicação do método de resistividade elétrica e aplicação do dispositivo *Wenner*, numa secção da pedreira em exploração onde as diferentes tonalidades estão expostas. Pretendeu-se encontrar variações nos valores de resistividade elétrica e, dessa forma, definir uma metodologia que permitisse identificar espacialmente as diferentes tonalidades do calcário.

## 2. Metodologia

A primeira etapa da metodologia incluiu trabalho de campo envolvendo uma campanha de prospeção geofísica, onde foi aplicado o método de resistividade elétrica com o dispositivo *Wenner* e, conseqüentemente, em gabinete, o processamento dos dados recolhidos *in situ* com recurso ao *software Res2Dinv*. Neste processamento foram efetuadas 4 iterações e obtido um erro quadrático médio (*root mean square* – RMS), em todas as inversões, inferior a 3%. Uma segunda etapa incluiu trabalhos realizados em laboratório, e na qual foram realizados ensaios de resistividade elétrica, tendo sido usado para o efeito um resistivímetro *ABEM Terrameter SAS 300B* e um espaçamento entre elétrodos de 2,5 centímetros, com o objetivo de comparar com os resultados obtidos em campo. Nesta etapa foram realizadas diversas medições dos valores de resistividade elétrica, tanto no calcário de tonalidade acinzentada como no de tonalidade bege. Estas medições

foram efetuadas numa primeira análise com os provetes de rocha saturados em água e as restantes gradualmente à medida que os provetes iam perdendo percentual de água, até que a última medição ocorresse com o provete praticamente seco. Entre medições os provetes estiveram em estufa durante cerca de 1 hora a 14°C (temperatura média anual para a zona em estudo (Fonte: IPMA)).

Relativamente aos trabalhos de campo, foi determinado o local da pedreira que iria ser objeto de estudo para o trabalho a desenvolver, tendo sido escolhido o local, à data, onde estava a ser desenvolvida a principal frente de desmonte da pedreira, mais precisamente no terceiro patamar de exploração (Gomes, 2022).

O dispositivo *Wenner* é caracterizado por preservar uma distância fixa entre os quatro elétrodos e possuir uma relativa sensibilidade a variações de resistividade verticais, particularmente a estruturas dispostas horizontalmente. Em relação às profundidades de investigação, estas podem ser de até 50% o espaçamento utilizado entre elétrodos (Loke, 1999).

Para o efeito foram efetuadas seis tomografias de resistividade elétrica (TRE), predispostas sub-paralelamente entre si e à própria frente de desmonte (P1 a P6), o que permitiu comparar os resultados obtidos com as ocorrências verificadas *in situ* (Figura 3), pelo processo de desmonte da rocha.

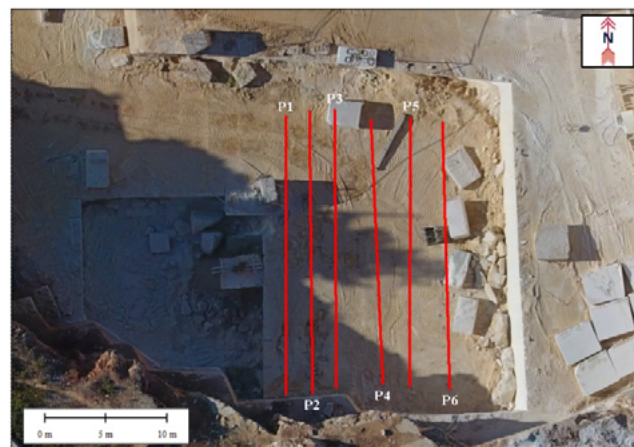


Figura 3. Localização e predisposição das tomografias de resistividade elétrica (P1 a P6).

Figure 3. Location and predisposition of electrical resistivity tomography (P1 to P6).

Procedeu-se ainda a uma análise petrográfica (através de microscopia ótica) e mineralógica (através de difração de raios X - DRX) de amostras do calcário explorado na pedreira e com as colorações diferentes com o objetivo de identificar a causa da variação na coloração.

## 3. Resultados e Discussão

No que diz respeito aos resultados obtidos com o processamento dos dados das TRE em campo e, posteriormente, comparados e comprovados com os resultados obtidos com os ensaios de resistividade elétrica efetuados em laboratório, verificou-se que os calcários de tonalidade mais acinzentada apresentam valores de resistividade elétrica significativamente mais baixos dos que os calcários de tonalidade bege. Sendo o valor médio obtido para o calcário de tonalidade acinzentada de 3161  $\Omega.m$ , enquanto para o calcário bege, os valores médios obtidos, foram da ordem dos 4997  $\Omega.m$ , como demonstra a tabela 1. De notar que à medida que a quantidade de água vai sendo menor, a resistividade elétrica de ambos os calcários tende a aumentar.

Tabela 1. Valores de resistividade elétrica obtidos para os calcários acinzentado e bege.

Table 1. Electrical resistivity values obtained for grayish and beige limestones.

	Medições efetuadas ( $\Omega.m$ )					Média final
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	
C. Acinzentado	2190	2967	3226	3492	3928	3161
C. Bege	3588	4229	4611	5485	7075	4997

Diminuição da % de água

As observações do maciço *in situ* permitiram verificar uma aparente correspondência entre a variação de valores de resistividade com a proximidade a descontinuidades estruturais do maciço (Figura 4, 5 e 6). Esta variação aparenta ser mais expressiva nas proximidades da transição entre o calcário de tonalidade bege e o calcário de tonalidade acinzentada.

A correlação entre argilas e resistividade elétrica pode ser explicada pela presença de água nos poros dos materiais argilosos, que permite a condução eletrolítica (Johnson *et al.*, 2001). A quantidade de água presente nos poros influencia diretamente na resistividade do material, sendo que quanto maior a porosidade menor a resistividade (Machado *et al.*, 2006).

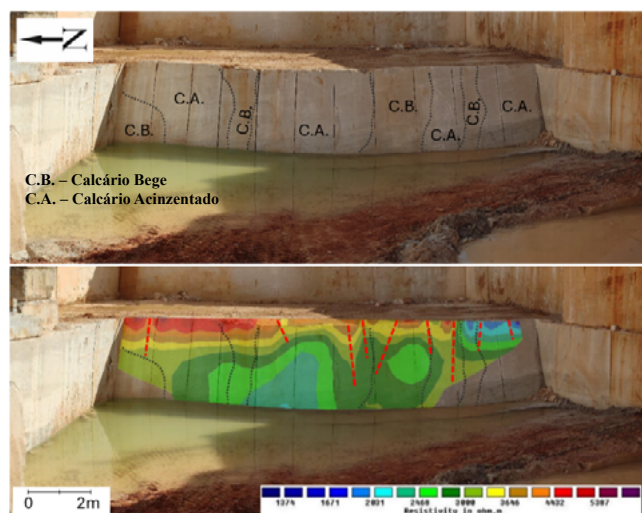


Figura 4. Frente de desmonte (1) com delimitação (tracejado a preto) de mudanças de tonalidade do maciço rochoso e secção de resistividade elétrica (2), projetada na frente de desmonte da TRE 4 e marcação (tracejado a vermelho) de possíveis descontinuidades estruturais.

Figure 4. Dismantling front (1) with delineation (dashed in black) of changes in the tone of the rock mass and electrical resistivity section (2), projected at the TRE 4 dismantling front and marking (dashed in red) of possible structural discontinuities.

As observações petrográficas, com recurso ao microscópio ótico de reflexão, permitiram identificar uma fração detrítica na bordadura dos cristais de calcite em amostras do calcário acinzentado, que aparenta ser uma fração detrítica argilosa (Figura 7).

Os resultados obtidos através da DRX indicam a presença de uma fração argilosa na composição do calcário de tonalidade acinzentada que não se identifica no calcário bege.

A componente mineralógica poderá ser um fator determinante para a variabilidade encontrada, dado que essa fração argilosa será possivelmente responsável pela origem da tonalidade acinzentada e, conseqüente, variação da resistividade elétrica do calcário.



Figura 5. Pormenor da alteração de tonalidade do calcário mais acinzentado para calcário mais creme (tracejado a preto), próximo a descontinuidades estruturais, visível na pedra.

Figure 5. Detail of the change in tone from grayier limestone to creamier limestone (dashed in black), close to structural discontinuities, visible in the quarry.

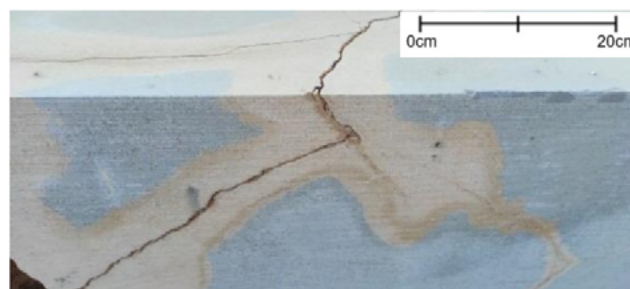


Figura 6. Pormenor da alteração de tonalidade do calcário mais acinzentado para calcário mais creme, próximo a descontinuidades estruturais, em detalhe numa amostra de mão.

Figure 6. Detail of the change in tone from greyier limestone to creamier limestone, close to structural discontinuities, in detail on a hand sample.

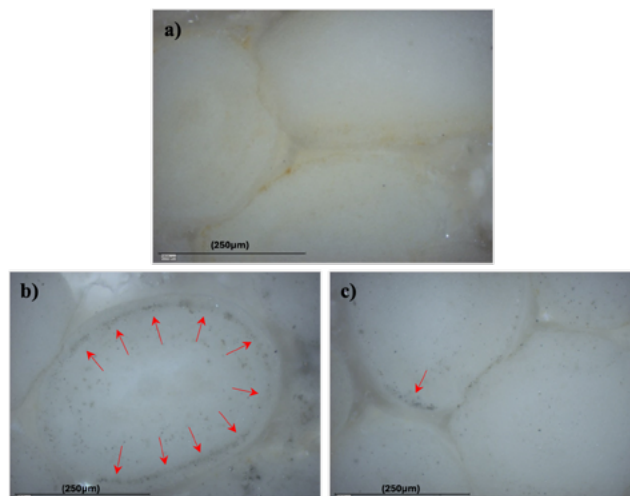


Figura 7. Microfotografias de amostras de calcário bege (a) e de calcário acinzentado (b e c), no qual é possível observar fração detrítica argilosa nos cristais de calcite (setas a vermelho).

Figure 7. Microphotographs of samples of beige limestone (a) and grayish limestone (b and c), in which it is possible to observe the clayey detrital fraction in the calcite crystals (red arrows).

#### 4. Conclusões

Conclui-se que o calcário de tonalidade acinzentada apresenta valores de resistividade elétrica significativamente mais baixos do que os calcários de tonalidade bege. Esta diferença de resistividade elétrica foi mais expressiva nas proximidades da transição entre os dois tipos de calcário.

A observação e reconhecimento do local de estudo *in situ* permitiram identificar que a variação da tonalidade do calcário bege para acinzentado tende a ser mais evidente próximo de descontinuidades estruturais existentes no maciço.

As observações petrográficas e os resultados obtidos através da DRX indicaram a presença de uma fração argilosa na composição do calcário de tonalidade acinzentada que não se identifica no calcário de tonalidade mais bege. Com base nestes resultados, é possível concluir que a presença de argilas poderá ser um dos principais fatores responsáveis pela variação da resistividade elétrica dos calcários estudados.

A alteração da coloração deverá ter sido influenciada pela circulação de fluidos no interior do maciço (Santos, 2017), e por processos de oxidação por exposição do maciço ao ar por via da tectónica.

Este trabalho revelou ser possível identificar e localizar as diferenças litológicas presentes no maciço através da prospeção geofísica, que irá permitir, no futuro, um melhor e mais sustentável planeamento da lavra da pedra.

#### Agradecimentos

À IQGeo-Serviços, Lda pelo investimento financeiro, material e humano, à empresa Eduardo Marques & Rosa Lda pela autorização da utilização do espaço para a recolha de dados e publicação. Ao Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra para a utilização de equipamentos e laboratórios. Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto UIDB/00073/2020.

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) I.P./MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) – UIDB/50019/2020- IDL.

#### Referências

- Azerêdo, A. C., 2007. Formalização da litostratigrafia do Jurássico inferior e médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). *Comunicações Geológicas*, **94**: 29-51.
- Carvalho, J. M. F., 2013. *Tectónica e caracterização da fracturação do maciço calcário estremenho, Bacia Lusitânica. Contributo para a prospeção de rochas ornamentais e ordenamento da atividade extrativa*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Duarte, J. A. M., 2018. *Caracterização de áreas com potencial para extração de rochas ornamentais carbonatadas: análise integrada de dados de fotogramétricos, geológicos e geofísica para caracterização de alta resolução de maciços rochosos carbonatados*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- EM&R., 2017. *Ficha técnica de produto* (documento interno). Eduardo Marques e Rosa, Lda.
- Gomes, A. F., 2022. *Estudo da coloração de calcários ornamentais para planeamento e otimização de explorações - contributos com a integração de dados geofísicos e ensaios de laboratório*. Dissertação Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Johnson, C. K., Doran, J. W., Duke, H. R., Wienhold, B. J., Eskridge, K. M., Shanahan, J. F., 2001. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Science Society of America Journal*, **65**: 1829-1837.
- Loke, M. H., 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, **2**, 70.
- Machado, P. L. O. D. A., Bernardi, A. C. D. C., Valencia, L. I. O., Molin, J. P., Gimenez, L. M., Silva, C. A., ..., Meirelles, M. S. P., 2006. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **41**: 1023-1031.
- Santos, M. A. C., 2017. Mecanismos de descoloração dos calcários “azuis” do Maciço Calcário Estremenho. Dissertação Mestrado, Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências.