

## Caracterização de diferentes rochas para estudos de acoplamento electroacústico *Different rock characterization for electro-acoustic coupling studies*

Ana B. Vinagre<sup>(1,2\*)</sup>, Hugo G. Silva<sup>(1,2†)</sup>, P. Moita<sup>(1,2)</sup>, A. B. Pinho<sup>(2,4)</sup>, M. Bezzeghoud<sup>(1,3)</sup> e M. Tlemçani<sup>(1,3)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora, Portugal

<sup>(2)</sup> Departamento de Geologia, Universidade de Évora, Portugal

<sup>(3)</sup> Departamento de Física, Universidade de Évora, Portugal

<sup>(4)</sup> Centro de Investigação GeoBioTec, Universidade de Aveiro, Portugal

\* ana.vinagre@gmail.pt; † hgsilva@uevora.pt

### SUMMARY

*This work is part of the project PTDC/GEO-FIQ/4178/2012, funded by FCT/MCES, whose object of study is the electro-acoustic coupling in rocks, during mechanical action. The rocks were selected and analysed petrographically with the conventional polarized light microscopy (transmitted) and physically, in terms of connected porosity and density. The composition elemental geochemistry (ICP-MS) and isotopic (TIMS) rocks constitute a complementary and essential step for the differentiation and classification of the various lithotypes. After this, tests such as semi-quantitative analyses by SEM-EDS and Raman spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy and X-Ray will be made to evaluate the mineral phases, elemental composition and infrared spectrum of absorption/emission. The porosimetry of the rocks will be studied through testing of the specific surface area and pore size distribution measurements.*

### 1. INTRODUÇÃO

O estudo da física das rochas reveste-se de extrema importância, especialmente em áreas como a sismologia e a vulcanologia, e abrange o estudo das propriedades estruturais das rochas, sob condições específicas, relacionando-as com as suas propriedades sísmicas, eléctricas e electromagnéticas.

Estas duas últimas propriedades têm suscitado maior interesse por parte dos investigadores, principalmente no que diz respeito ao acoplamento electroacústico (EAC) durante a acção mecânica, algo que tem sido frequentemente validado experimental e teoricamente por F. Freund et al. (2007) e por P.M. Areias et al. (2013), respectivamente. O principal objectivo destes estudos é reconhecer e compreender os mecanismos de geração dos fenómenos sismo-electromagnéticos, cuja ocorrência se manifesta numa fase anterior (preparatória) à fase em que o sismo se inicia e que envolve a conversão de acções mecânicas em emissões electromagnéticas.

Atendendo à grande diversidade de materiais que constituem a Terra e à consequente diversidade de comportamentos, resultantes das várias propriedades dos materiais, o entendimento do seu comportamento a nível eléctrico-acústico, envolve a selecção de várias rochas, testadas em diferentes condições de pressão e temperatura. Torna-se necessário efectuar uma caracterização adequada das rochas, em termos estruturais (conteúdo mineral, porosidade e microfracturação), eléctricos (energia de activação e mobilidade de carga) e acústicos (velocidade de propagação de ondas e atenuação), de forma a retirar conclusões válidas sobre o EAC, que se prevê estar fortemente correlacionado com as suas propriedades. Posteriormente serão realizadas, simultaneamente, medições acústicas e electroacústicas sob pressão (AE, EE, respectivamente), em rochas previamente sujeitas a diferentes temperaturas, até 1000°C. A fase final envolverá a análise dos dados experimentais e a descrição teórica das AE e EE durante a fractura do material.

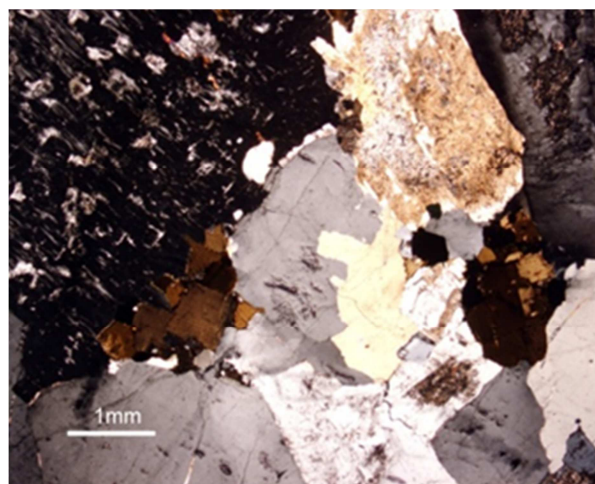
Para cumprir os objectivos supracitados, foram seleccionados diversos tipos de rocha, de modo a abranger um maior espectro composicional, seja do teor em sílica (e.g. granito de Évora vs. gabro) ou da proporção em minerais ferromagnesianos (e.g. leucogranito vs. granito de Évora), no caso das rochas ígneas. Por outro lado, com uma composição global semelhante, procurou-se comparar diferentes graus de cristalinidade entre rochas metamórficas e sedimentares (e.g. mármore vs. calcário). Deste modo, foram escolhidas as seguintes amostras:

- Rochas ígneas – granitóides (granito porfiróide, leucogranito e granodiorito de Évora), gabro e sienito nefelínico;
- Rochas metamórficas – mármore;
- Rochas sedimentares – calcário.

### 2. CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

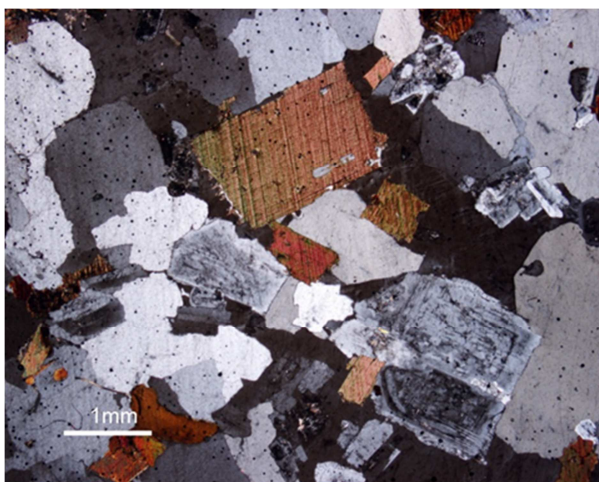
A realização da análise petrográfica envolveu a preparação de dezasseis lâminas delgadas, a partir das amostras de rocha recolhidas, e a sua posterior observação, utilizando microscopia de luz polarizada (transmitida). Para cada uma das rochas, foi registada a sua mineralogia principal e secundária, fazendo referência a aspectos texturais e indicando a eventual presença de heterogeneidades, alterações e microfracturação.

O granito porfiróide (GRP) apresenta uma textura hipidiomórfica, inequigranular média e porfiróide (ver figura 1). É constituído por fenocristais de feldspatos potássicos (50-60%) e plagioclases (10-20%), envolvidos numa matriz de quartzo (20-30%), biotite (3-5%) e também de feldspatos, essencialmente plagioclases, de dimensão mais reduzida (0.5 mm). Muitos cristais apresentam uma intensa sericitização o que indica que estiveram sujeitos a alguma alteração. Exibe uma microfracturação moderada.



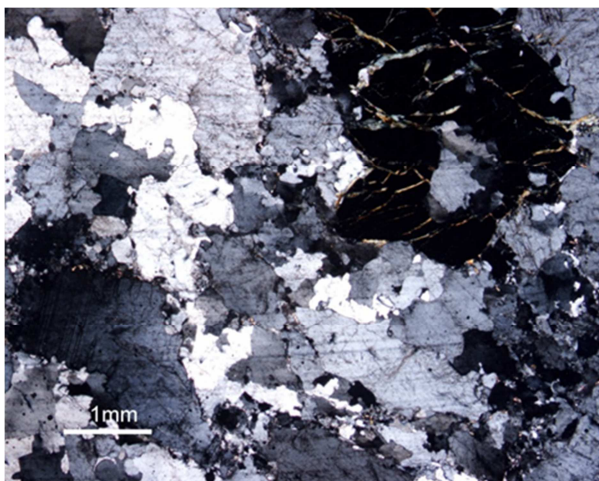
**Figura 1** – Vista geral do granito porfiróide ao microscópio, em nicóis cruzados. (Overview of porphyritic granite under the microscope, in crossed nicols.)

O granodiorito de Évora (GRE) exibe uma textura hipidiomórfica, inequigranular e fanerítica média (ver figura 2), apresentando uma associação mineralógica primária composta por quartzo (30-40%), plagioclase (20-35%), feldspato potássico (10-25%) e biotite (5-10%). Apresenta uma microfracturação que varia entre moderada a elevada.



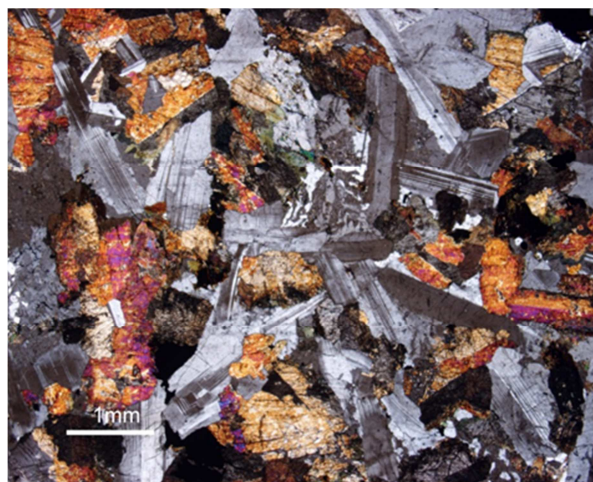
**Figura 2 – Vista geral do granodiorito ao microscópio, em nicóis cruzados. (Overview of granodiorite under the microscope, in crossed nicols.)**

O leucogranito (LGR) exibe uma textura xenomórfica (composta exclusivamente por cristais anédricos), inequigranular média e porfiróide (ver figura 3). Apresenta uma associação mineralógica primária composta exclusivamente por minerais félsicos (de cor clara), nomeadamente por quartzo (40-50%), feldspato potássico (25-35%) e plagioclase (10-20%). Apresenta também quantidades vestigiais de granadas, moscovite e zircão. É constituído por fenocristais de feldspatos potássicos e plagioclases. Os cristais apresentam-se moderadamente fracturados.



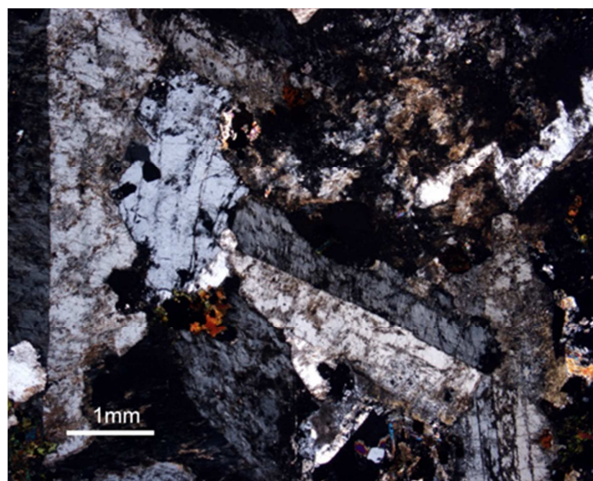
**Figura 3 – Vista geral do leucogranito ao microscópio, em nicóis cruzados. (Overview of leucogranite under the microscope, in crossed nicols.)**

O gabro (GBR) exibe uma textura hipidiomórfica (composta por cristais subeuédricos e anédricos), inequigranular e fanerítica média/fina (ver figura 4), apresentando uma associação mineralógica primária composta por plagioclase (45-55%) e piroxenas (35-45%). Estão presentes também, em quantidades vestigiais, os feldspatos potássicos e alguns minerais opacos. Os seus cristais apresentam uma microfracturação moderada/elevada.



**Figura 4 – Vista geral do gabro ao microscópio, em nicóis cruzados. (Overview of gabbro under the microscope, in crossed nicols.)**

O sienito nefelínico (SIN) exibe uma textura hipidiomórfica, inequigranular e porfiróide (ver figura 5). Apresenta uma associação mineralógica primária composta por feldspato potássico (60-70%), nefelina (10-15%) e minerais máficos (5-10%). Estes minerais máficos incluem a biotite, as clinopiroxenas e as anfíbolas. Foi possível identificar quantidades vestigiais de esfena, apatite e de minerais opacos, surgindo estes últimos associados à biotite e às anfíbolas. Os fenocristais correspondem a feldspato potássico. Exibe uma microfracturação elevada.



**Figura 5 – Vista geral do sienito nefelínico ao microscópio, em nicóis cruzados. (Overview of foid syenite under the microscope, in crossed nicols.)**

O mármore (MRM) apresenta uma textura granoblástica. É totalmente constituído por cristais de calcite (ver figura 6) e não apresenta uma microfracturação significativa.

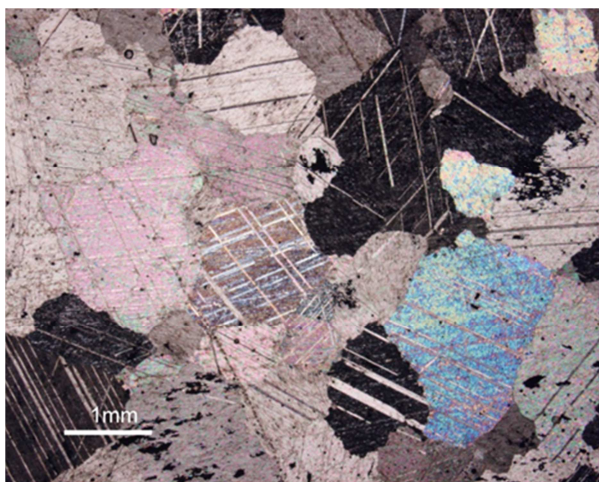


Figura 6 – Vista geral do mármore ao microscópio, em nicóis cruzados. (Overview of marble under the microscope, in crossed nicols.)

O calcário (CLC) apresenta uma textura oolítica e é formado por vários elementos aloquímicos (óides e písóides), cimentados através de elementos ortoquímicos, como a sparite e a microsparite (ver figura 7). Não apresenta uma microfracturação significativa.

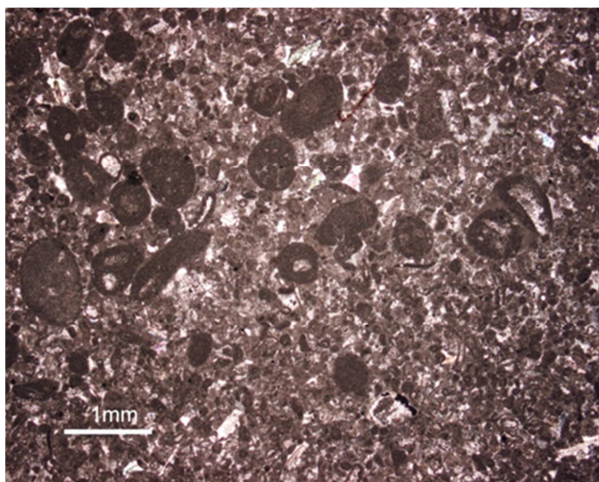


Figura 7 – Vista geral do calcário ao microscópio, em nicóis cruzados. (Overview of limestone under the microscope, in crossed nicols.)

Apresenta-se, em seguida, um resumo das principais características petrográficas estudadas (ver tabela 1).

Tabela 1 - Resumo das principais características petrográficas (Summary of the main petrographic characteristics)

Ref.	Textura	Minerais ferromagnesianos	Alteração
GRP	Porfíroide média (1-5mm); Quartzo e plagioclases com extinção ondulante	Biotite (3-5%)	Sericitização e cloritização moderada
GRE	Fanerítica média (1-5mm) a fina (<1mm); Quartzo e plagioclases com extinção ondulante	Biotite (5-10%)	Sericitização e cloritização moderada

LGR	Porfíroide média (1-5mm); Quartzo e plagioclases com extinção ondulante e feldspato potássico com deformação associada à clivagem	Inexistentes	Sericitização reduzida
GBR	Fanerítica média (1-5mm) a fina (<1mm); Plagioclases com maclas em cunha e extinção ondulante	Minerais opacos	Inexistente
SIN	Fanerítica média (1-5mm); Nefelina com extinção ondulante	Biotite (2-3%) e minerais opacos	Sericitização abundante
MRM	Granoblástica média (1-5mm)	Inexistentes	Inexistente
CLC	Oolítica, com cimento essencialmente microsparítico	Inexistentes	Inexistente

### 3. POROSIDADE CONECTADA E MASSA VOLÚMICA

Outro ensaio já executado, foi o ensaio para a determinação da porosidade conectada das amostras de rocha (também designada por porosidade aberta ou porosidade acessível à água), através do método da pesagem hidrostática, referenciado pela International Society of Rock Mechanics, ISRM (1979). Trata-se de uma técnica expedita que permite relacionar o volume de poros que se intercomunicam, com o volume total da amostra.

No decorrer deste ensaio são efectuadas três pesagens,  $m_3$ ,  $m_2$  e  $m_1$ , que correspondem, respectivamente, à massa do provete saturado submerso, à massa do provete saturado no ar e à massa do provete seco. Através destas três pesagens é possível determinar o valor da porosidade conectada (1), bem como o da massa volúmica aparente (2), que complementam a informação sobre a mineralogia dos constituintes.

$$n_a = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \times \gamma_w \quad (2)$$

Sendo a porosidade, uma característica estrutural das rochas, está fortemente correlacionada com a dimensão e disposição dos seus poros, exercendo uma grande influência no seu comportamento mecânico. Deste modo, rochas que apresentam uma porosidade elevada, como o calcário, por exemplo, são menos resistentes e apresentam, de um modo geral, menor durabilidade, Lama e Vutukuri (1978).

Dada a relevância dos ensaios mecânicos no âmbito do projecto, é necessário conhecer não só a porosidade conectada, como também a massa volúmica (densidade), sendo esta última

propriedade influenciada pela gravidade específica dos minerais que constituem as rochas e pela sua compactação, em termos estruturais. Desta forma, a massa volúmica fornece indicações sobre a compacidade das rochas, sendo possível relacioná-la com a porosidade.

Quando estudadas em simultâneo, a porosidade conectada e a massa volúmica permitem conhecer um pouco melhor a resistência das rochas, uma vez que se tem a noção da quantidade de poros acessíveis à água e do grau de compactação dos minerais (ver tabela 2). Uma rocha de baixa densidade e alta porosidade é, em geral, uma rocha com baixa resistência mecânica.

**Tabela 2 - Porosidade conectada e massa volúmica das rochas em estudo (Connected porosity and density of the analyzed rocks)**

Amostra	Porosidade conectada (%)	Massa volúmica (kg.m <sup>3</sup> )
GRP	1.11	2637
GRE	1.00	2663
LGR	1.29	2587
GBR	0.77	3056
SIN	2.58	2504
MRM	0.32	2717
CLC	13.58	2348

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Relativamente aos resultados da análise petrográfica, foi possível confirmar a análise macroscópica inicial, aquando da recolha das amostras, definindo quantitativamente a maioria dos minerais presentes, a sua textura e avaliando o seu grau de alteração. Os dados recolhidos mostram a grande diversidade mineralógica e textural das rochas em estudo.

Todos os valores obtidos, relativos à porosidade conectada e à massa volúmica, estão bem enquadrados nos valores de referência que se encontram na literatura, Goodman (1989), Lama e Vutukuri (1978). Como era de esperar, verificou-se que as rochas sedimentares têm uma porosidade conectada superior à apresentada pelas rochas ígneas e metamórficas, sendo esta última categoria, a detentora do menor valor relativo àquela propriedade.

Verificou-se também que o calcário, sendo uma rocha sedimentar, apresenta o mais elevado valor de porosidade, ou seja, é a rocha com maior número de poros interligados, considerando o volume total da amostra. O menor valor de porosidade é apresentado pelo mármore, rocha metamórfica e que terá sido sujeita a pressões mais elevadas.

#### 5. TRABALHOS FUTUROS

A análise petrográfica será complementada com a avaliação geoquímica das rochas através de espectroscopia de massa (ICP-MS e TIMS), que irá permitir diferenciar e classificar os vários litótipos de forma mais detalhada. Também vão ser realizadas análises semi-quantitativas (SEM-EDS e Raman), difracção de raios-X e espectroscopia de infravermelhos (FTIR), para avaliar as diferentes fases minerais, a composição elementar e para a obtenção de um espectro de infravermelhos de absorção e emissão.

É importante referir que, apesar de algumas rochas apresentarem porosidades semelhantes, possuem distintas capacidades de absorção, devido às diferentes estruturas das redes capilares, resultantes da diferente distribuição e dimensão dos poros. Assim, facilmente se compreenderá a relevância do subsequente estudo de porosimetria, que visa o conhecimento daquele tipo de características.

A porosimetria será estudada através do ensaio da área de superfície específica e da medição da distribuição dos poros através do método de intrusão de mercúrio. Quanto mais pequena for a dimensão dos seus poros, maior a pressão necessária para o fazer

entrar na rocha, uma vez que a pressão e o diâmetro dos poros são grandezas inversamente proporcionais. Através desta relação, é possível deduzir características como a dimensão e a distribuição dos poros na rocha, até à nano-escala.

#### 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos através da análise petrográfica e do ensaio para a determinação da porosidade conectada e massa volúmica permitem concluir que, de facto, todas as rochas possuem características muito distintas, tanto petrograficamente como fisicamente. Deste modo, fica cumprido o objectivo proposto, uma vez que as rochas são adequadas aos estudos de acoplamento electro-acústico, permitindo, através da sua diversidade, analisar várias variáveis e assim obter resultados mais interessantes, do ponto de vista científico.

Futuramente, complementando os dados recolhidos com a análise química e estudo da porosimetria, será possível compreender melhor o modo como estas características influenciam o comportamento mecânico das rochas.

#### 7. REFERÊNCIAS

- Arcias, P. M., H.G. Silva, N. Van Goethem and M. Bezzeghoud (2013): "Damage-based fracture with electro-magnetic coupling, Computational Mechanics". 51, 629.
- Freund, F., M. A. Salgueiro da Silva, B. W. S. Lau, A. Takeuchi, and H. H. Jones (2007): "Electric currents along earthquake faults and the magnetization of pseudotachylite veins". Tectonophysics, 431, 131.
- Lama, R. D., V. S. Vutukuri (1978): "Handbook on mechanical properties of rocks". Series on rock and soil mechanics, 327-351.
- Goodman, R. (1989): "Introduction to rock mechanics". 19-34.
- ISRM (1979): "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties". Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr., 143-147.

#### 8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) e ao projecto PTDC/GEO-FIQ/4178/2012. Agradecem também às empresas "LUSOMARBLE, S.A" e "GRANIALPA – EXTRACÇÃO E COMÉRCIO DE GRANITOS, LDA" que ofereceram as rochas que foram analisadas. Os autores estão também gratos à Sandra Velez, ao Jorge Velez e ao Josué Figueira pela ajuda na preparação das amostras.