

Migmatitos: características petrológicas e geoquímicas, formação e evolução

Pereira, A. R.¹, Pereira, M.¹, Teixeira, M.¹, Amaro, P.¹, Bento dos Santos, T.^{1,2}, Mata, J.^{1,2}

¹DG-FCUL – Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

²IDL – Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

*Autor correspondente: ritapereira1993@gmail.com

Resumo

Os migmatitos são rochas de alto grau metamórfico geradas por anatexia crostral. Em rochas metapelíticas, a quantidade de líquido assim formado permite diferenciar metatexitos – gerados num estágio inicial por fusão de moscovite – de diatexitos – representativos de intensa anatexia com fusão incongruente de biotite. Após o pico metamórfico, parte dos migmatitos são exumados para níveis crostais mais superficiais por descompressão e arrefecimento, provocando transformações paragenéticas e texturais que permitem constrear a sua evolução pós-pico metamórfico. O estudo de migmatitos fornece as ferramentas para compreender a evolução metamórfica prógrada e retrógrada, os processos magmáticos e tectónicos ocorridos durante os eventos orogénicos, bem como a evolução da crosta continental.

Palavras-chave: Complexo anatóctico, fusão incongruente, exumação, percurso P-T-t, crosta continental.

Abstract

Migmatites are high-grade metamorphic rocks formed by crustal anatexis. In metapelitic rocks, the amount of melt formed allow to differentiate metatexites – formed during an early stage by muscovite melting – from diatexites – representative of abundant anatexis with dehydration-melting of biotite. After the metamorphic peak, part of the migmatites are exhumed to more superficial crustal levels by decompression and cooling, causing paragenetic and textural transformations that allow to constrain the post-metamorphic peak evolution. The study of migmatites provides the tools to understand the prograde and retrograde metamorphic evolution, the magmatic and tectonic processes occurred during the orogenic events, as well as the evolution of the continental crust.

Keywords: anatectic complex, dehydration-melting, exhumation, P-T-t path, continental crust.

1. Introdução

Em Portugal são conhecidas rochas migmatíticas associadas quer à Orogenia Varisca (e.g.: Valle Aguado *et al.*, 2005; Pereira, 2014; Amaro *et al.*, 2016), quer à Orogenia Cadomiana (e.g. Ribeiro *et al.*, 2009). Porque este tipo de rochas é, muitas vezes, pouco reconhecido, quer em termos do seu significado, quer em termos da sua relevância nas Ciências da Terra, procurar-se-á, de uma forma simples e acessível, explicar o que são migmatitos, quais os processos associados à sua génese e exumação, bem como o interesse do seu estudo.

2. Definições e nomenclatura

Migmatitos são rochas ultra-metamórficas, geralmente silicatadas que apresentam evidências de anatexia (fusão parcial crostral), encontrando-se, de modo frequente, especialmente associadas a corpos graníticos (Wimmenauer *et al.*, 2007; Allaby, 2013). Estas rochas são heterogéneas à escala meso- e megascópica e caracterizam-se por serem constituídas por zonas ricas em minerais máficos, denominadas de melanossomas, e zonas mais ricas em minerais félsicos, denominadas de leucossomas. Os melanossomas exibem características típicas de rochas metamórficas

e, comumente, correspondem à parte dos migmatitos que representa a rocha parental (paleossoma), ou seja, que resistiu ao processo de fusão. Os leucossomas correspondem às zonas neofornadas, resultantes dos processos de fusão parcial do protólito e, por isso, são muitas vezes também denominados de neossomas. Os migmatitos são extremamente variáveis e representam, considerando todo o seu espectro, uma transição contínua entre as rochas metamórficas e as rochas ígneas plutônicas (Wimmenauer *et al.*, 2007).

As rochas migmatíticas podem ser divididas em metatexitos e diatexitos. Nos metatexitos, as estruturas pré-existentes, como foliação ou xistosidade, encontram-se parcialmente preservadas na rocha, dando origem a um bandado, com alternância de leucossomas e melanossomas, resultando num aspecto marcadamente heterogêneo. Tal é devido ao comportamento rígido dos metatexitos, onde a fração

fundida é ainda pequena (Fig. 1a-b). Os diatexitos, por sua vez, são rochas migmatíticas que foram sujeitas a um processo de fusão parcial mais amplo, pelo que as estruturas do protólito foram obliteradas, tendo sido substituídas por outras que demonstram abundante fluidez devido à maior quantidade de fundido. Neste caso, e ao contrário dos metatexitos, ocorre predomínio de leucossomas (Fig. 1c), podendo apresentar nos estádios mais avançados de migmatização uma textura mais homogênea e muito similar à de um granito (Fig. 1d) (Sawyer *et al.*, 2011; Wimmenauer *et al.*, 2007). De um modo geral, considerando um protólito com a mesma composição, pode-se afirmar que os metatexitos se formam a temperaturas mais baixas que os diatexitos e como tal, a passagem dos metatexitos para os diatexitos pode ser vista como o resultado do aumento do grau de fusão parcial, em consequência do aumento da temperatura (Sawyer, 2008).

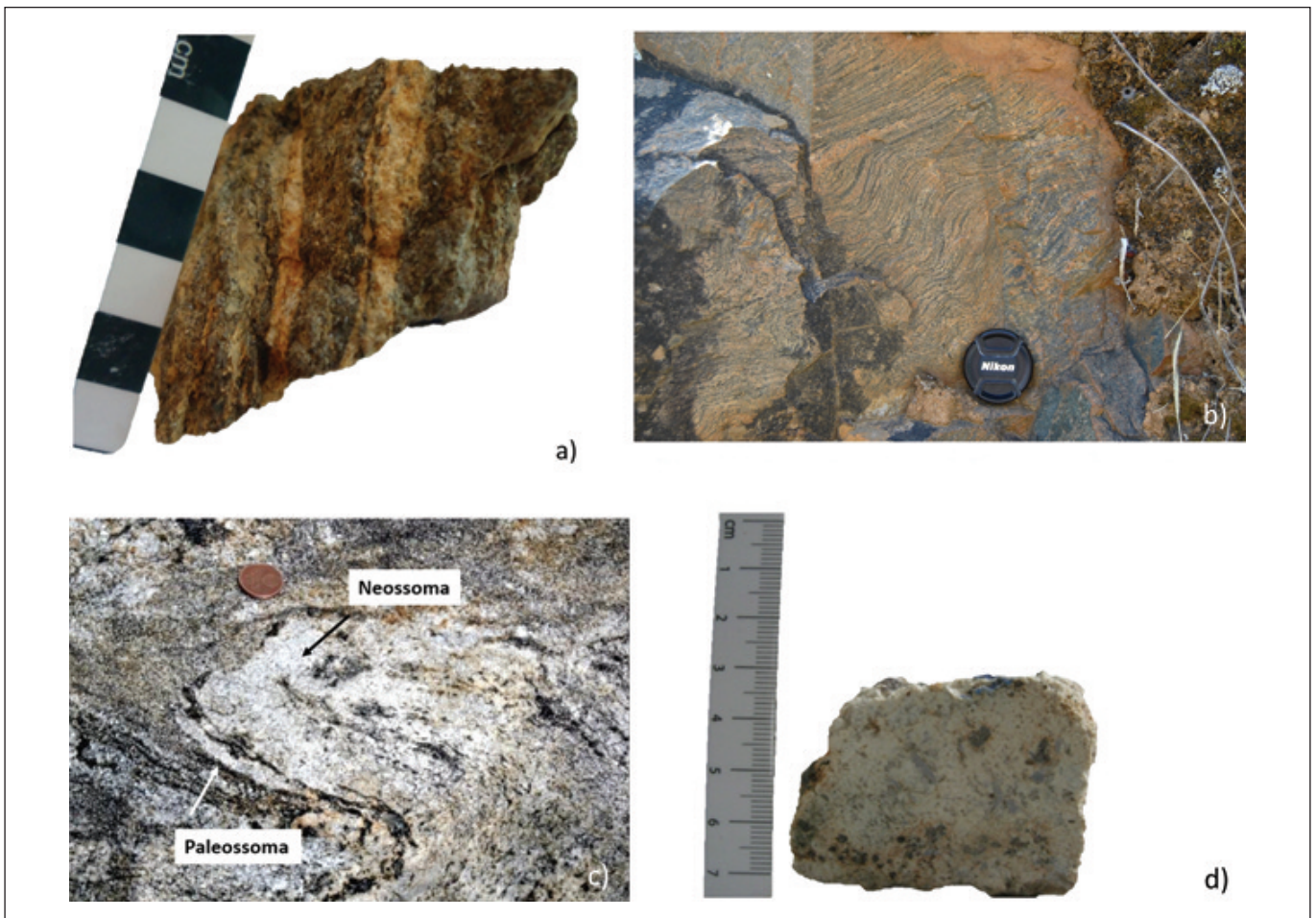


Figura 1 – a) Metatexito da região da Serra da Estrela, Portugal (Amaro *et al.*, 2016); b) Metatexito da região de São Fidelis (Rio de Janeiro, Brasil) (Bento dos Santos, 2008); c) Diatexito da região de Figueira de Castelo Rodrigo, Portugal (adaptado de Pereira, 2014); d) Diatexito da região da Serra da Estrela, Portugal.

Figure 1 – a) Metatexite from Serra da Estrela, Portugal (Amaro *et al.*, 2016); b) Metatexite from São Fidelis (Rio de Janeiro, Brazil) (Bento dos Santos, 2008); c) Diatexite from Figueira de Castelo Rodrigo, Portugal (modified from Pereira, 2014); d) Diatexite from Serra da Estrela, Portugal.

Tal como foi referido, os migmatitos são o resultado dos processos de fusão parcial que ocorrem na crosta continental, representando o expoente máximo do metamorfismo de alto grau e ocorrendo sob condições P-T típicas da fácies granulítica (Winter, 2010). Também importante é o factor composicional, pois rochas metapelíticas (as que são abordadas neste trabalho), apresentam maior predominância de minerais hidratados e fundem a temperaturas mais baixas (Patiño Douce & Beard, 1995), resultando na esmagadora maioria das ocorrências de migmatitos a nível mundial (Sawyer *et al.*, 2011). De facto, estas rochas metamórficas de alto grau representam a litologia hegemónica em domínios atualmente expostos de crosta continental média e inferior. O seu estudo contribui para a compreensão tanto da formação e evolução da crosta continental, como da evolução geodinâmica de múltiplos sectores de orógenos recentes e antigos. Tal é o caso do Orógeno Varisco Ibérico onde os muitos estudos recentes sobre as várias ocorrências de migmatitos têm contribuído para um enriquecimento da compreensão da sua evolução (e.g.: Valle Aguado *et al.*, 2005; Bento dos Santos *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, *in press*).

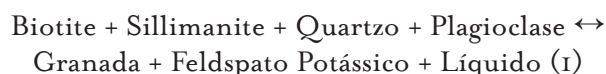
3. O processo de migmatização

Na crosta podem ocorrer vários tipos de fusão parcial, estando a ocorrência do processo, bem como a quantidade de líquido gerado, dependente da disponibilidade de água no sistema. A fusão *fluid-present* ocorre quando existe água livre disponível nos interstícios intra-minerais, o que não é vulgar nas condições P-T típicas da fácies granulítica. A fusão *fluid-absent* ocorre quando não existe água livre no sistema, estando esta apenas na estrutura cristalina dos minerais que compõem a rocha (Clemens, 1990; Clemens *et al.*, 2016). O processo de fusão parcial, tanto na presença como ausência de fluidos, é usualmente por fusão incongruente, situação na qual o líquido gerado não apresenta a composição do material que fundiu, sendo por exemplo mais silicioso. A partir desses líquidos migmatíticos geram-se minerais denominados de peritéticos (Sawyer *et al.*, 2011).

Como anteriormente referido, o protólito dos migmatitos é frequentemente pelítico. Estas rochas, mesmo a altas temperaturas, contêm elevadas quantidades de minerais micáceos, nomeadamente moscovite e biotite que fundem incongruente, dando origem a líquidos de composição granítica (Sawyer *et al.*, 2011). A fusão incongruente de micas

em condições *fluid-absent* pode produzir, no seu conjunto, mais de 50% de líquido relativamente ao volume total da rocha. Este fenómeno explica os volumes de líquidos gerados na fácies granulítica e as típicas associações mineralógicas refractárias na crosta profunda, que são resultado da extracção de líquido magmático (Fyfe, 1973; Stevens *et al.*, 1993; Clemens *et al.*, 2016).

Segundo Spear *et al.* (1999), para um gradiente geotérmico do tipo barroviiano, o normalmente encontrado na crosta, o início da fusão parcial (no caso de protólitos metapelíticos) é marcado pela fusão de moscovite a $P > 6$ kbar e $T > 700$ °C. Esta fusão gera até 10% de fundido (Vielzeuf *et al.*, 1988; Anenburg & Katzir, 2014; Fig. 2). Segundo o mesmo autor, a passagem dos metatexitos para os diatexitos faz-se através do consumo de biotite (1), via reacções como a abaixo indicada:



A fusão incongruente de biotite, último mineral micáceo a desaparecer durante um processo prógrado de metamorfismo, promove nos diatexitos o desaparecimento do bandado característico dos metatexitos, tanto pela ausência de minerais de *fabric* planar como pelo rápido incremento de líquido nos diatexitos (Fig. 2). Com efeito, a fusão incongruente de biotite nos metatexitos é responsável por gerar um mínimo de 30 a 40% de líquido anatético a temperaturas acima de 820 °C (Bento dos Santos *et al.*, 2011). Como referido, esta conduz ao progressivo desaparecimento dos melanossomas, conferindo um aspecto mais homogéneo e granular aos diatexitos relativamente aos metatexitos. Como patente na reacção (1), a fusão de biotite é normalmente acompanhada pelo consumo de sillimanite, pelo que esta se apresenta em menor quantidade nos diatexitos, ao contrário do feldspato potássico que constitui um produto da reacção (Vielzeuf & Holloway, 1988).

O grau de fusão dos diatexitos pode ser avaliado através das proporções entre os constituintes mineralógicos. Em situações de baixo grau de fusão, o consumo da biotite pela reacção (1) não terá sido completo, apresentando-se ainda como um constituinte residual das rochas. Em fases mais avançadas da evolução litológica, poderá observar-se a ocorrência de granada peritética (Fig. 3), enquanto a sillimanite será inexistente ou rara, tendo sido consumida. Tal verifica-se, por exemplo, nos migmatitos variscos da

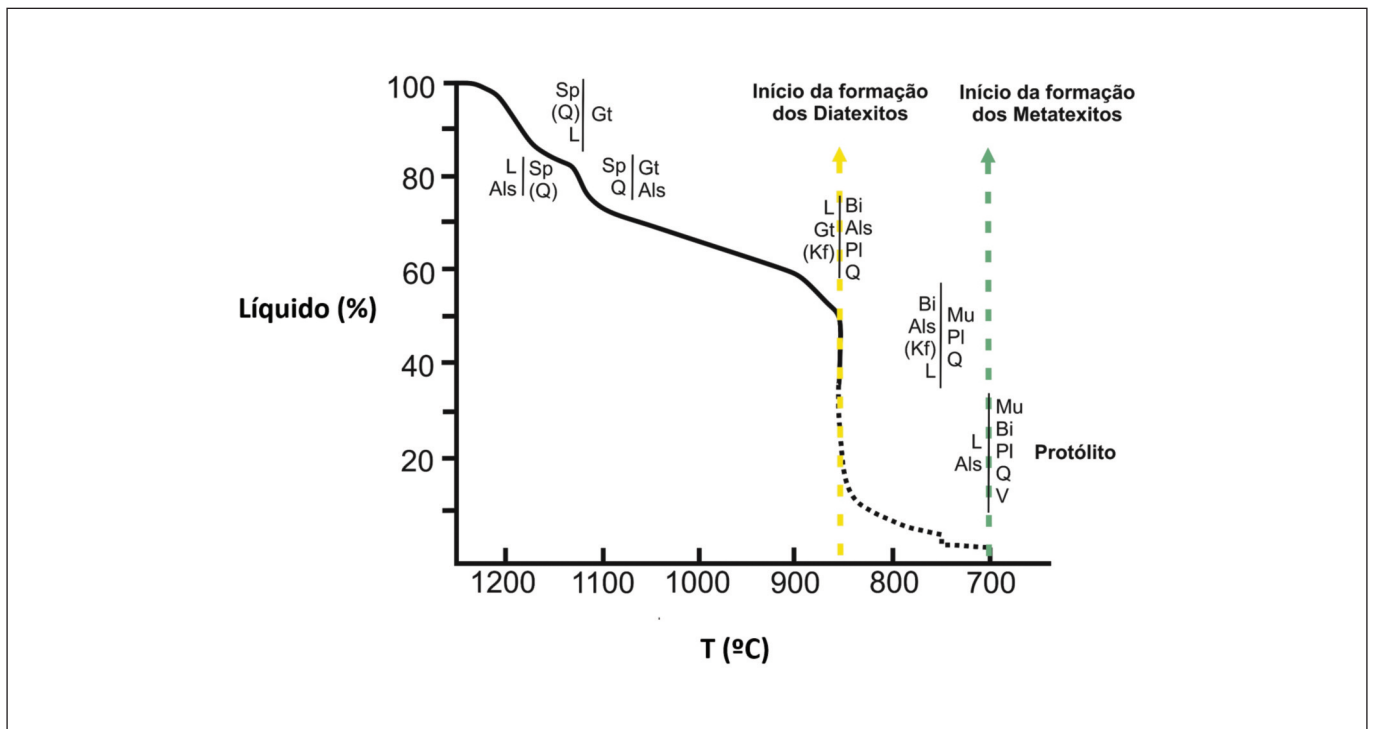


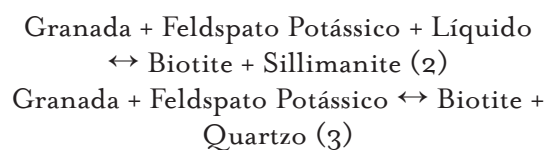
Figura 2 – Representação esquemática das diferentes reacções que ocorrem aquando da formação dos migmatitos. A linha verde representa o início da fusão de moscovite a ~700 °C, enquanto a linha amarela representa o início da fusão da biotite a ~820 °C (Sawyer *et al.*, 2011) (adaptado de Vielzeuf & Holloway, 1988). Als: Al_2SiO_5 ; Mu: moscovite; Kf: feldspato potássico; Bi: biotite; Gt: granada; Cd: cordierite; Q: quartzo; L: líquido (fundido); Sp: espinela; Pl: plagioclase; V: vapor.

Figure 2 – Schematic representation of the different reactions occurring during the formation of migmatites. The green line represents the beginning of muscovite dehydration-melting at ~700 °C, whereas the yellow line represents the beginning of biotite dehydration-melting at ~820 °C (Sawyer *et al.*, 2011) (modified from Vielzeuf & Holloway, 1988). Als: Al_2SiO_5 ; Mu: muscovite; Kf: K-feldspar; Bi: biotite; Gt: garnet; Cd: cordierite; Q: quartz; L: Liquid (melt); Sp: spinel; Pl: plagioclase; V: vapour.

Serra da Estrela, no centro-norte de Portugal (Amaro *et al.*, 2016).

Aquando de uma evolução metamórfica que leva à geração de migmatitos, os respectivos picos térmico e bórico podem ou não coincidir. Segundo Brown (2002) é frequente observar-se a paragénese mineral do pico metamórfico preservada nestas rochas, o que demonstra que o grau de reacção da paragénese do pico com o fundido gerado não foi total aquando da exumação da rocha. Tal só é possível se este fundido estiver isolado ou então se tiver sido consumido por outras reacções. O processo de retrogradação (que se inicia após o pico metamórfico), é influenciado pela taxa de arrefecimento, pela disponibilidade de fluidos e pelo percurso P-T que a rocha realiza. Nesta fase, é possível a recristalização tardia de moscovite, biotite e até de outros minerais indicativos de mais baixo grau metamórfico (Fig. 4), estando estes dependentes da pressão. Durante o retrometamorfismo, quando a $T = 650$ °C e $P > 4$ kbar,

ocorre recristalização de moscovite tardia, pois o caminho retrógrado seguiu o sentido inverso do metamorfismo prógrado (Spear *et al.*, 1999; Fig. 5). De acordo com Brown (2002), esta moscovite tardia formar-se-á devido à água que é exsolvida aquando da cristalização do melt que ficou aprisionado nos poros da rocha, em consequência da diminuição da sua migração. Por outro lado, a cristalização de biotite tardia, implica que a $T = 650$ °C, $P < 4$ kbar, ocorrendo uma de duas reacções distintas:



A presença em simultâneo de ambos minerais indica que a rocha esteve sujeita a $P \leq 4$ kbar (Spear *et al.*, 1999; Fig. 5) ou a processos de retrogradação mais complexos.

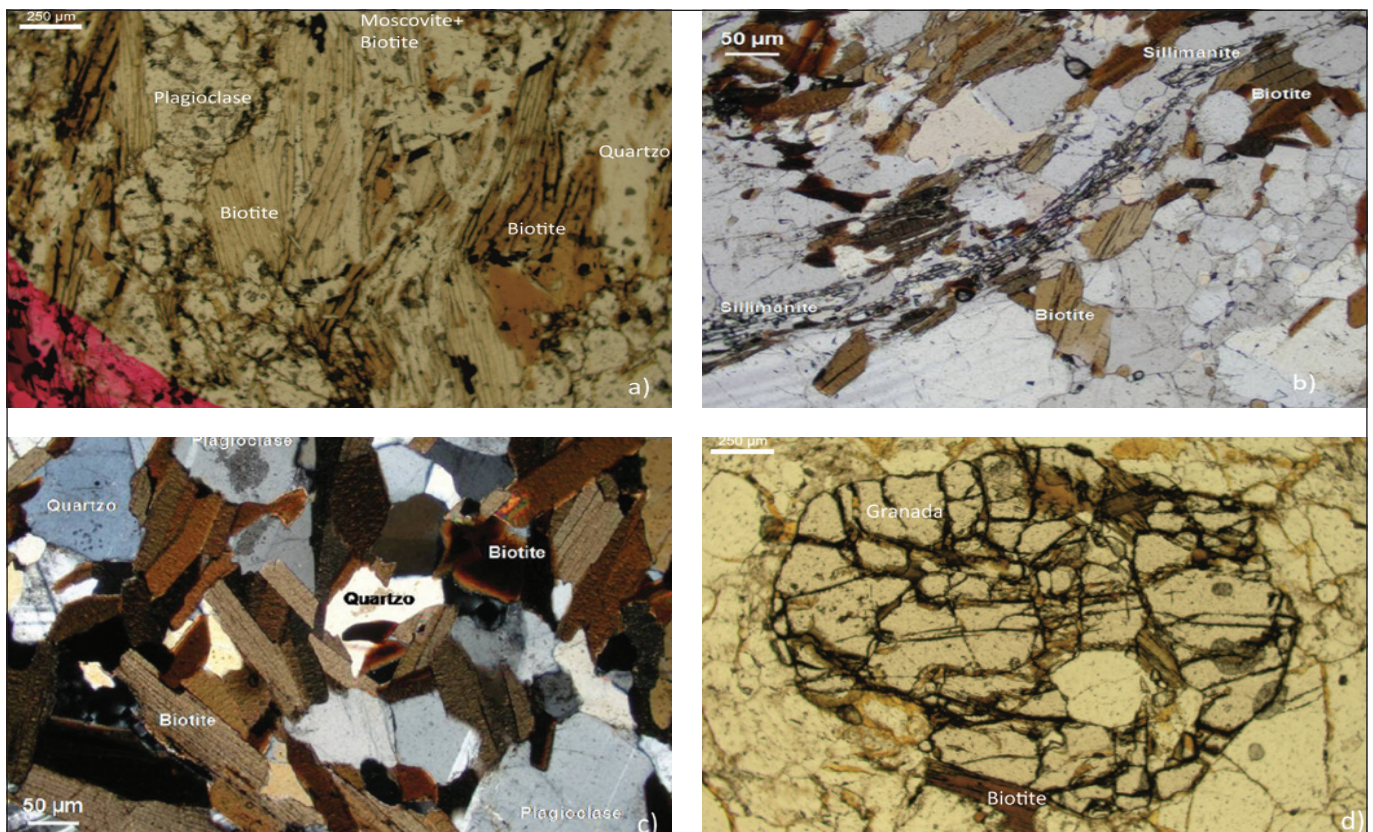


Figura 3 – a) Metatexito da região da Serra da Estrela (Portugal) ao microscópio petrográfico; b) Metatexito da região de São Fidelis (Rio de Janeiro, Brasil) ao microscópio petrográfico (adaptado de Bento dos Santos, 2008); c) Diatexito da região de São Fidelis (Rio de Janeiro, Brasil) ao microscópio petrográfico (adaptado de Bento dos Santos, 2008); d) Diatexito da região da Serra da Estrela (Portugal) ao microscópio petrográfico.

Figure 3 – a) Metatexite from Serra da Estrela (Portugal) under the petrographic microscope; b) Metatexite from São Fidelis (Rio de Janeiro, Brazil) under the petrographic microscope (modified from Bento dos Santos, 2008); c) Diatexite from São Fidelis (Rio de Janeiro, Brazil) under the petrographic microscope (modified from Bento dos Santos, 2008); d) Diatexite from Serra da Estrela (Portugal) under the petrographic microscope;

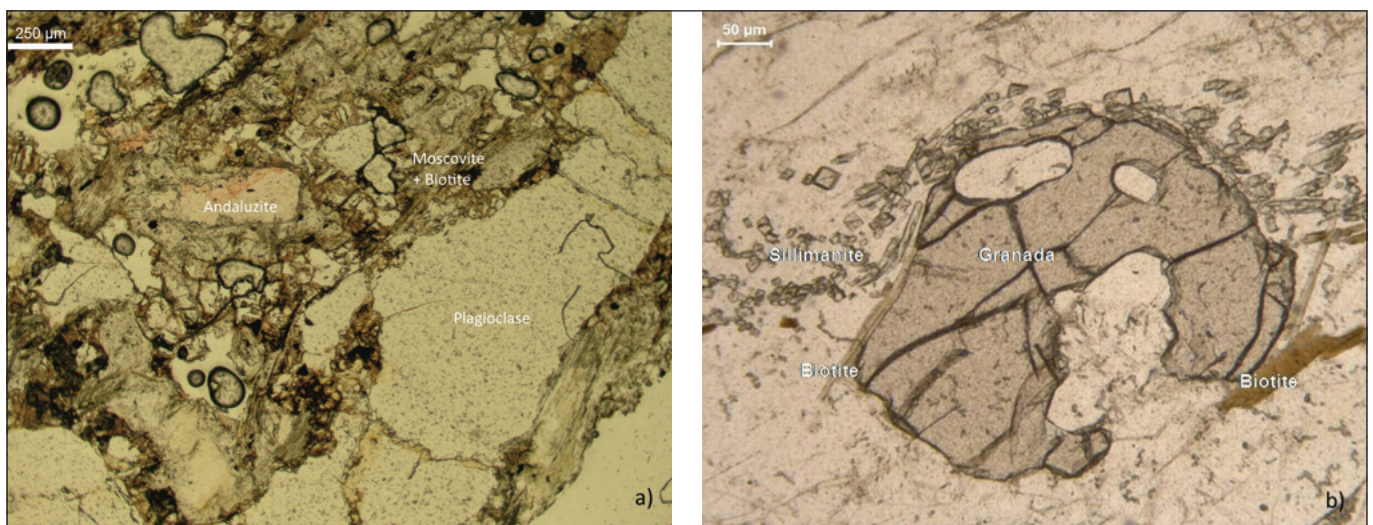


Figura 4 – a) Andalusite retrorretamórfica num diatexito (Amaro *et al.*, 2016); b) Metatexito com evidências de consumo retrógrado de granada, dando origem a biotite + sillimanite (Bento dos Santos, 2008).

Figure 4 – a) Retrogressive andalusite in a diatexite (Amaro *et al.*, 2016); b) Metatexite with evidence of garnet breakdown during retrogression, forming biotite + sillimanite (Bento dos Santos, 2008).

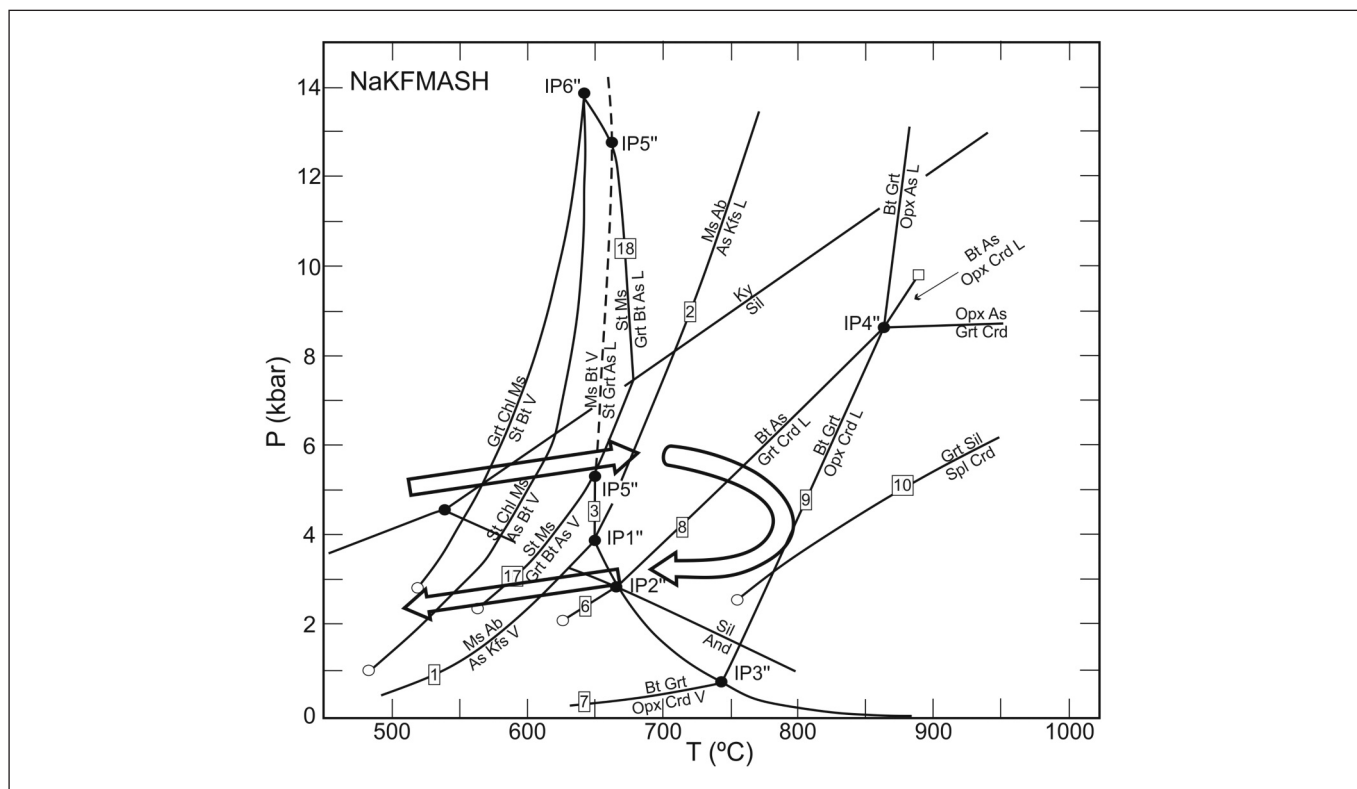


Figura 5 – Representação esquemática de um típico percurso P-T-t de rochas migmatíticas com representação das várias paragéneses minerais estáveis durante o metamorfismo prógrado e retrógrado (adaptado de Spear *et al.*, 1999).

Figure 5 – Schematic representation of a typical migmatite P-T-t path displaying the several mineral paragenesis stable during prograde and retrogressive metamorphism (modified from Spear *et al.*, 1999).

4. O processo de exumação

Sendo os migmatitos o resultado de processos ocorridos em níveis profundos da crosta continental e não sendo invulgar o seu afloramento à superfície, um aspeto incontornável para quem estuda este tipo de rochas é a compreensão do seu processo de exumação (e.g. Whitney *et al.*, 2004).

Actualmente, são vários os modelos que descrevem os processos de exumação de migmatitos que incluem fenómenos associados a eventos quer compressivos quer distensivos em ambiente orogénico. Diferentes modelos têm sido avançados para os referidos processos de exumação na tentativa de explicar a zonografia metamórfica observada em diferentes cadeias orogénicas de diversos períodos temporais. Na figura 6 apresenta-se uma síntese dos principais modelos, assunto que pode ser encontrado discutido em grande detalhe noutros trabalhos (e.g. Pereira *et al.*, *in press*).

5. Reflexões finais

A crosta continental tem, em média, 41,4 km de espessura e cobre cerca de 39% da superfície terrestre

(Sawyer *et al.*, 2011). Devido aos processos tectónicos que operam no nosso planeta, a crosta continental é significativamente mais antiga (idade média: 2,1 Ga) que a crosta oceânica (idade média: 60 Ma) que é reciclada nas zonas de subducção. A crosta continental é, também por isso, significativamente mais complexa. À semelhança do que ocorre actualmente nas zonas de colisão continental que dão origem às orogenias modernas, existem áreas antigas de crosta continental muito deformada e com abundantes evidências de metamorfismo de alto grau. Estas zonas experimentaram, durante os processos metamórficos, temperaturas suficientemente elevadas (tipicamente acima de 700 °C) para sofrerem fusão parcial, geração de granitos e, em última análise, diferenciação crustal. Na verdade, os migmatitos, e particularmente os gerados na fácies granulítica, são importantes na compreensão da origem dos magmas graníticos capazes de ascender ao longo da crosta (White *et al.*, 2011; Clemens *et al.*, 2016), pelo que o seu estudo é fundamental na compreensão dos processos de fusão parcial e diferenciação da crosta continental em crosta continental inferior e superior.

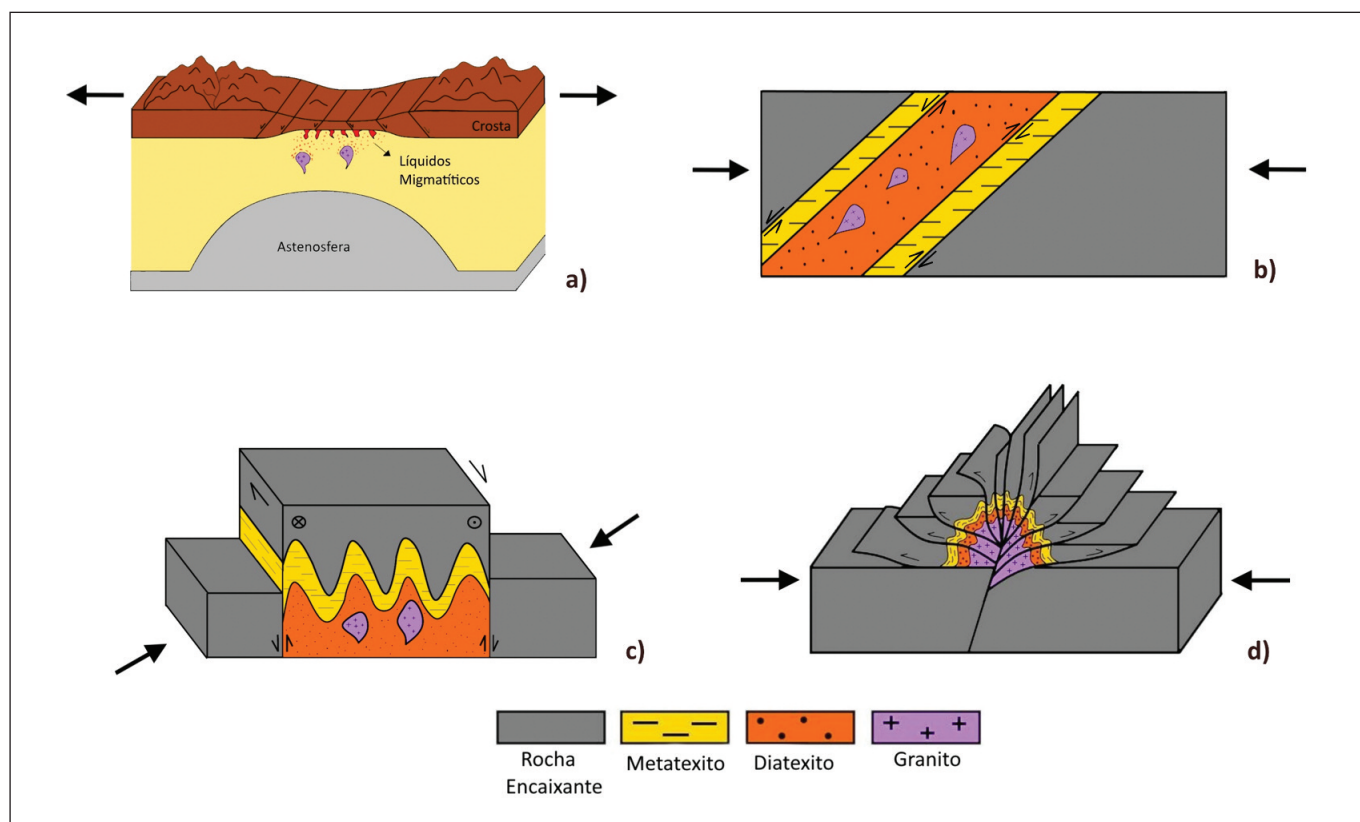


Figura 6 – Os principais modelos inferidos para a exumação de rochas migmatíticas em ambiente orogénico: a) geração de domas migmatíticas em ambiente extensional com adelgaçamento crustal e *upwelling* do manto litosférico (e.g.: Díez Balda *et al.*, 1995; Valle Aguado *et al.*, 2005); b) *channel flow* em ambiente compressivo com geração de zonas de cisalhamento de cinemática antitética (e.g.: Hodges *et al.*, 2001; Godin *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2013); c) exumação de níveis crustais profundos ao longo de uma zona de cisalhamento em ambiente transpressivo (e.g. Sanderson & Marchini, 1984; Pereira, 2014); d) exumação de migmatitos na zona axial de uma estrutura em flor (e.g.: Bento dos Santos *et al.*, 2009; 2014).

Figure 6 – The most relevant models suggested for exhumation of migmatites in an orogenic environment: a) formation of migmatitic domes in an extensional setting with crustal thinning and mantle upwelling (e.g.: Díez Balda *et al.*, 1995; Valle Aguado *et al.*, 2005); b) *channel flow* in a compressive setting with generation of shear zones with antithetic kinematics (e.g.: Hodges *et al.*, 2001; Godin *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2013); c) exhumation of deep crustal levels by a transpressive shear zone (e.g. Sanderson & Marchini, 1984; Pereira, 2014); d) exhumation of migmatites in the axial zone of a flower structure (e.g.: Bento dos Santos *et al.*, 2009; 2014).

Abordagens multidisciplinares têm possibilitado a melhor compreensão da realidade complexa e dinâmica dos processos de fusão parcial e, como tal, permitem a reconstrução da evolução geodinâmica de determinado segmento infra-crustal (e.g. Harley, 1989). Além disso, mostram a relação entre o consumo de fases hidratadas e a produção de líquido migmatítico. Estes estudos permitem ainda estimar as condições P-T do processo de fusão e do clímax térmico, bem como a proporção e composição dos líquidos gerados e a natureza dos resíduos refractários. Esta informação é crucial para compreender os processos de diferenciação composicional crustal e os mecanismos de evolução secular da crosta (e.g. Fyfe, 1973; Aranovich *et al.*, 2014).

Bibliografia

- Allaby, M., 2013. *Dictionary of Geology & Earth Sciences*. Oxford University Press, 660.
- Amaro, P., Pereira, A. R., Pereira, M., Teixeira, M., 2016. *Estudo petrográfico, mineralógico e geotermobarométrico de rochas migmatíticas variscas da Zona Centro-Ibérica*. Projecto de Licenciatura não publicado, Universidade de Lisboa, 31.
- Anenburg, M., Katzir, Y., 2014. Muscovite dehydration melting in Si-rich metapelites: microstructural evidence from trondhjemitic migmatites, Roded, Southern Israel. *Mineralogy and Petrology*, **108**, 1, 137-152.
- Aranovich, L. Y., Makhluף, A. R., Manning, C. E., Newton, R.C., 2014. Dehydration melting and the relationship between granites and granulites. *Precambrian Research*, **253**, 26-37.

- Bento dos Santos, T., 2008. *Petrologia e Termocronologia de Granulitos no Sector Central da Faixa Ribeira (Região de São Fidelis, Rio de Janeiro, Brasil)*. Tese de Doutoramento não publicada, Universidade de Lisboa, 388.
- Bento dos Santos, T., Fonseca, P. E., Munhá, J. M., Tassinari, C. C. G., C. Dias Neto, C., 2009. Geodynamic evolution of the São Fidelis - Santo António de Pádua sector, central Ribeira Fold Belt, SE Brazil. *Comunicações Geológicas*, **96**, 101-122.
- Bento dos Santos, T., Ribeiro, M. L., Clavijo, E., Díez Montes, A., Solá, A. R., 2010. Geothermobarometric estimates and P-T paths for migmatites from Farilhões Islands, Berlengas Archipelago, W Portugal. VIII Congresso Nacional de Geologia, Braga, e-Terra, **16**, 11, 1-4.
- Bento dos Santos, T., Munhá, J. M. U., Tassinari, C. C. G., Fonseca, P. E., Dias Neto, C. M., 2011. Metamorphic P-T evolution of granulites in central Ribeira Fold Belt, SE Brazil. *Geosciences Journal*, **15**, 1, 27-51.
- Bento dos Santos, T., Tassinari, C. C. G., Fonseca, P. E., 2014. Garnet-biotite diffusion mechanisms in granulites from Ribeira Fold Belt (SE Brazil): Understanding and constraining petrological cooling rates in complex high-grade orogenic belts. *Journal of South American Earth Sciences*, **56**, 128-138.
- Brown, M., 2002. Retrograde processes in migmatites and granulites revisited. *Journal of metamorphic Geology*, **20**, 25-40.
- Clemens, J. D., 1990. *The Granulite - Granite connexion. Granulite and Crustal Evolution*, Kluwer Academic Publishers, 25-36.
- Clemens, J. D., Buick, I. S., Stevens, G., 2016. Fluids, melting, granulites and granites: A commentary. *Precambrian Research*, **278**, 394-399.
- Díez Balda, M., Martínez Catalán, J., Ayarza Arribas, P., 1995. Syn-collisional extensional collapse parallel to the orogenic trend in a domain of steep tectonics: the Salamanca Detachment Zone (Central Iberian Zone, Spain). *Journal of Structural Geology*, **17**, 163-182.
- Fyfe, W. S., 1973. The granulite facies, partial melting and the Archaean crust. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **A273**, 457-461.
- Godin, L.G., Rujic, R. D., Law, R. D., Searle, M. P. 2006. Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones: an introduction. In: Law, R. D., Searle, M. P. Godin, L. (Eds), *Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones*. Geological Society Special Publications, **268**, 1-23.
- Harley, S. L. 1989. The origins of granulites: a metamorphic perspective. *Geological Magazine*, **126**, 215-247.
- Hodges, K. V., Hurtado, J. M., Whipple K. X., 2001. Southward extrusion of Tibetan crust and its effect on Himalayan tectonics. *Tectonics*, **20**, 799-809.
- Patiño Douce, A., Beard, J., 1995. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, **36**, 3, 707-738.
- Pereira, I., 2014. *Petrologia e geoquímica dos migmatitos e granitóides do sector Figueira de Castelo Rodrigo - Rio Águeda: evolução litológica e estrutural no contexto da Zona de Cisalhamento de Juzbado - Penalva do Castelo*. Tese de Mestrado não publicada, Universidade de Évora, 171.
- Pereira, I., Dias, R., Bento dos Santos, T., Mata, J., 2017 (in press). Exhumation of a migmatite complex along a transpressive shear zone: inferences from the Variscan Juzbado-Penalva do Castelo Shear Zone (Central Iberian Zone). *Journal of the Geological Society*.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Mateus, A., Fonseca, P., Pereira, E., Noronha, F., Romão, J., Rodrigues, J., Castro, P., Meireles, C., Ferreira, N., 2009. Mechanics of thick-skinned Variscan overprinting of Cadomian basement (Iberian Variscides). *Comptes Rendus Geoscience*, **341**, 127-139.
- Rodrigues, J., Bento dos Santos, T., Castro, P., Meireles, C., Ferreira, P., Ribeiro, A., Pereira, E., Ferreira, N., 2013. Deformação não-coaxial na Faixa Metamórfica Porto-Viseu: détachement extensional ou par thrust/underthrust contraccional? *Livro de Actas da 9ª Conferência Anual do GGET-SGP*, 131-134.
- Sanderson, D. J., Marchini, W. R., 1984. Transpression. *Journal of Structural Geology*, **6**, 449-458.
- Sawyer, E. W., 2008. *Atlas of Migmatites*. National Research Council of Canada, 371.
- Sawyer, E. W., Cesare, B., Brown, M., 2011. When the continental crust melts. *Elements*, **7**, 220-234.
- Spear, F. S., Kohn, M. J., Cheney, J. T., 1999. P-T paths form anatexitic pelites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **134**, 17-32.
- Stevens, G., Clemens, J. D., 1993. Fluid-absent melting and the roles of fluids in the lithosphere: a slanted summary? *Chemical Geology*, **108**, 1-17.
- Valle Aguado, B., Azevedo, M. R., Schaltegger, U., Martínez Catalán, J. R., Nolan, J., 2005. U-Pb zircon and monazite geochronology of Variscan magmatism related to syn-convergence extension in Central Northern Portugal. *Lithos*, **82**, 169-184.
- Vielzeuf, D., Holloway, J., 1988. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **98**, 257-276.
- White, R., Stevens, G., Johnson, T. E., 2011. Is the crucible reproducible? Reconciling Melting Experiments with thermodynamic calculations. *Elements*, **7**, 241-246.
- Whitney, D. L., Teyssier, C., Fayon, A. K., 2004. Isothermal decompression, partial melting and exhumation of deep continental crust. *Geological Society London Special Publications*, **227**, 1, 313-326.
- Wimmenauer, W., Bryhni, I., 2007. *Migmatites and related rocks*. IUGS Sub-commission on Metamorphic Rocks, 5.
- Winter, J., 2010. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Pearson, 720.