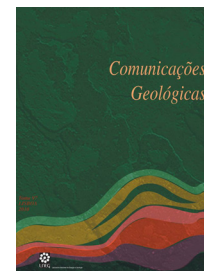


Sequência de processos anatéticos no Complexo Migmatítico de Mindelo (NW de Portugal)

Sequential anatectic processes in Mindelo Migmatite Complex (NW Portugal)

M. Areias^{1*}, M. A. Ribeiro¹, J. F. Santos², A. Dória¹



Artigo Curto
Short Article

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: O Complexo Migmatítico de Mindelo aflora na orla litoral a norte do Porto sendo composto por um conjunto de litologias diversas incluindo rochas metassedimentares, migmatíticas, graníticas e veios pegmatíticos. As relações de campo, petrografia, geoquímica e assinatura isotópica das diversas litologias permitem deduzir a sequência de processos anatéticos que resultaram na heterogeneidade litológica presente. A fusão terá ocorrido em diferentes níveis estruturais e consequentemente em condições de pressão e temperatura distintos, resultando em rochas com características específicas: i) a níveis pouco profundos (< 3,5 Kbar) geram-se metatexitos e leucogranitos por migração de leucossomas. Os primeiros *melts* resultam essencialmente da fusão de quartzo e plagioclase por fusão húmida seguidos de reacções de fusão incongruente da biotite; (ii) a nível ligeiramente mais profundo a taxa de fusão é superior, o que leva à formação de diatexitos que, sendo menos densos do que a rocha encaixante, intruem os metatexitos; (iii) em níveis ainda mais profundos (~5 Kbar), a composição da rocha, conjuntamente com temperatura e pressão mais elevadas permitem a fusão da moscovite gerando *melts* típicos dos granitos de duas micas. Este material ascende na crosta e incorpora abundantes xenólitos formando um corpo granítico muito heterogéneo.

Numa fase mais tardia ocorrem processos de metassomatismo potássico com feldspatização, na dependência de circulação de fluidos estruturalmente controlada, em migmatitos e em granitoides. Posteriormente ocorre turmalinização e moscovitização de alguns granitoides e instalação de veios aplitopegmatíticos.

Palavras-chave: Anatexia, Migmatitos, Segregação de leucossomas, Granitos tipo S.

Abstract: Mindelo Migmatitic Complex outcrops in the coastal-zone, north of Porto. This complex consists on a set of diverse lithologies including metasedimentary, migmatitic and granitic rocks, and pegmatite veins. Field relationships, petrography, geochemistry and isotopic signature of these lithologies allow inferring the sequence of anatectic processes that are responsible for the lithological heterogeneity. The melting occurred at different structural levels, and thus at different pressure and temperature conditions, generating rocks with specific characteristics: i) in shallow levels (<3.5 Kbar) metatexitos are produced essentially by water-saturated melting followed by water-undersaturated biotite melting. Leucogranites resulted from migration of leucosomes; (ii) in slightly deeper levels the melting rate is higher which leads to the formation of diatexitos that intruded metatexitos; (iii) in even deeper levels (~ 5 Kbar) higher pressure and temperature permit the melting of muscovite producing a large amount of typical two-mica granite melts. This material rises in the crust and incorporates abundant xenoliths forming a very heterogeneous granitic body. In subsolidus conditions, structurally controlled metasomatic processes lead to feldspatization of migmatites

and granitoids. Later, installation of aplite-pegmatites and local tourmalinization previously formed granitoids took place.

Keywords: Anatexis, Migmatites, Leucosomes segregation, S-type granites.

¹Centro de Geologia da Universidade do Porto; DGAOT Faculdade de Ciências - Univ. Porto.

²Gebiotec, Dep. Geociências – Universidade de Aveiro.

*Autor correspondente / Corresponding author: mariaareias@fc.up.pt

1. Introdução

O Complexo Migmatítico de Mindelo (CMM) aflora na orla litoral a norte do Porto, entre Póvoa de Varzim e Leça da Palmeira, sendo composto por um conjunto de litologias diversas incluindo rochas metassedimentares, migmatíticas, graníticas e veios pegmatíticos. Neste trabalho pretende-se inferir a sequência dos processos de anatexia que deram lugar à migmatização e à produção das diversas rochas graníticas constituintes do CMM, com base nas relações de campo, petrografia, geoquímica e assinatura isotópica.

2. Relações de campo e características petrográficas

Na vizinhança do CMM a sequência metassedimentar é composta por litologias do Complexo Xisto-Grauváquico (CXG). O gradiente metamórfico é marcado por isógradas condensadas paralelas aos granitos e migmatitos, variando numa curta distância da zona da clorite à zona da estauroлите-almândina e silimanite. Na zona da estauroлите, os xistos apresentam foliação e bandado composicional marcado por bandas ricas em biotite, estauroлите e almândina e bandas ricas em quartzo e oligoclase. Ocorrem andaluzite e cordierite tardias assim como turmalina e moscovite hidrotermais.

Com base nas relações de campo as rochas que compõem o CMM dividem-se em sete tipos distintos: metatexitos mosqueados, metatexitos bandados, diatexitos, metagrauvaques (*resisters*), leucogranitos, granitos de duas micas e veios aplitopegmatíticos.

Os metatexitos mosqueados (Fig. 1A) caracterizam-se pela ocorrência de pequenos aglomerados de neossoma *in situ* inserido numa matriz metassedimentar constituída por biotite, silimanite, almandina, plagioclase e quartzo. O neossoma é constituído por quartzo, plagioclase, cordierite e raro feldspato potássico circunscritos por *selvedge* de biotite e cordierite. Os metatexitos bandados (Fig. 1B) têm a mesma composição mineralógica mas a quantidade de neossoma é maior formando bandas alternantes de leucossoma e de melanossoma. Em alguns dos metatexitos ocorre feldspato potássico que substitui a plagioclase e inclui todos os outros minerais.

Os *resisters* são rochas que pela sua constituição mineralógica não sofreram fusão parcial. Estão inseridos nos metatexitos e são constituídos por metagrauvaques cálcicos com textura granoblástica.

Os diatexitos (Fig. 1C) ocorrem no seio dos metatexitos tendo contactos abruptos. São rochas de composição essencialmente granítica de grão médio a grosseiro contendo remanescências de material metassedimentar (*schlieren*) numa matriz quartzofeldspática.

Os leucogranitos (Fig. 1D) formam veios no seio dos migmatitos e também afloram em corpos de maiores dimensões imediatamente a norte e a sul da zona dos metatexitos. Alguns veios intruem os metassedimentos do CXG nas vizinhanças do CMM. São constituídos essencialmente por quartzo e plagioclase, com quantidades muito variáveis de feldspato potássico. Apresentam aglomerados de biotite, silimanite e rara almandina. Em alguns dos leucogranitos a biotite é substituída por turmalina simpletítica com quartzo e feldspato potássico.

Os granitos de duas micas (Fig. 1E) formam corpos de maiores dimensões e apresentam variação textural desde grão fino a médio. Têm mineralogia típica de granitos de duas micas, por vezes contendo raros alinhamentos de biotite e silimanite assim como rara andaluzite e turmalina. Contêm xenólitos de metatexito e formam diques discordantes com o encaixante migmatítico e com os metassedimentos do CXG.

3. Geoquímica

A composição química dos metatexitos é similar à dos metassedimentos do CXG e ao NIBAS (Neoproterozoic Iberian Average Shale; Ugidos *et al.*, 2010) embora com variação no conteúdo de Ca, Sr, Mn e Na. Os diatexitos apresentam empobrecimento em Fe, Mg, Mn, V, Co e “HSFE” relativamente ao CXG e aos metatexitos. Os leucogranitos e leucossomas mostram a mesma variação de composição relativamente aos metatexitos mas com desvio mais acentuado (Fig. 1G).

O perfil de TR dos metatexitos (normalizado ao Condrito, Boynton, 1984) é semelhante ao do CXG e ao NIBAS (Fig. 1F), sendo típico de rochas metassedimentares. O perfil de TR dos diatexitos apresenta um somatório de TR inferior ao dos metatexitos, sem anomalia do Eu. Os leucossomas e leucogranitos têm um somatório de TR baixo e anomalia positiva do Eu.

Os granitos de duas micas são peraluminosos, alcalino-cálcicos. Relativamente aos diatexitos são ligeiramente empobrecidos em Fe, Mg, Mn, Ca, Sr, Ba, Y, V e Co e enriquecidos em P, K, Rb, Ta, Nb e Th (Fig. 1G). O perfil de TR é típico de granitos peraluminosos com conteúdo total de terras raras moderado (inferior ao dos migmatitos), marcado por anomalia negativa do Eu e com moderado fracionamento de TR leves e alto fracionamento das TR pesadas (Fig. 1F).

Em todas as litologias, a variação nos teores em “HSFE” está positivamente relacionada com o teor em $Fe_2O_{3(t)}+MgO$.

4. Assinatura isotópica

A assinatura isotópica de todas as litologias é crustal, com ϵSr_{325} entre 114 e 262 e ϵNd_{325} entre 9,3 e -2,1. Relativamente ao ϵNd_{325} distinguem-se dois grupos (Fig. 1H): um grupo que inclui metassedimentos pelíticos, migmatitos mosqueados, diatexitos e granitos de duas micas com valores entre -2,1 e -5,13 e o grupo dos metagrauvaques com valores entre -8,2 e -9,3. Os migmatitos bandados apresentam valores que variam entre estes dois grupos distintos sendo a dispersão relacionada com o facto de estas rochas serem constituídas por uma parte neoformada e por uma parte restítica.

Comparando com os valores encontrados por Beetsma (1995) verifica-se que os metassedimentos pelíticos se situam no campo do Grupo das Beiras do CXG e que nenhuma das rochas granitoides se situa nos campos dos granitos sin ou pós-tectónicos. Apenas as amostras de aplito-pegmatito se localizam no campo dos granitos sintectónicos.

5. Discussão

As relações de campo, geoquímica e assinatura isotópica sugerem que os metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico fundiram para dar origem às litologias do Complexo Migmatítico de Mindelo.

Levando em conta a composição do protólito (sem fases hidratadas como muscovite, etc.) a produção de *melt* deriva essencialmente da fusão incongruente de biotite através de reacções do tipo (White, 2008):



A ocorrência de cordierite peritética e a ausência de granada peritética ou ortopiroxena indicam que a fusão ocorreu a $P < 4$ Kbar e $T < 760$ °C (White, 2008).

A composição química peculiar dos leucogranitos e leucossomas, ou seja, a depleção em “HSFE” relativamente aos metatexitos e anomalia positiva de Eu resulta da segregação do leucossoma antes de atingido o equilíbrio. A migração de leucossoma terá ocorrido numa escala de tempo menor do que a necessária para saturar o *melt* em Zr e Th (*e.g.* Watt *et al.*, 1996). Evidências de migração de *melt* estão presentes em todo o MMC.

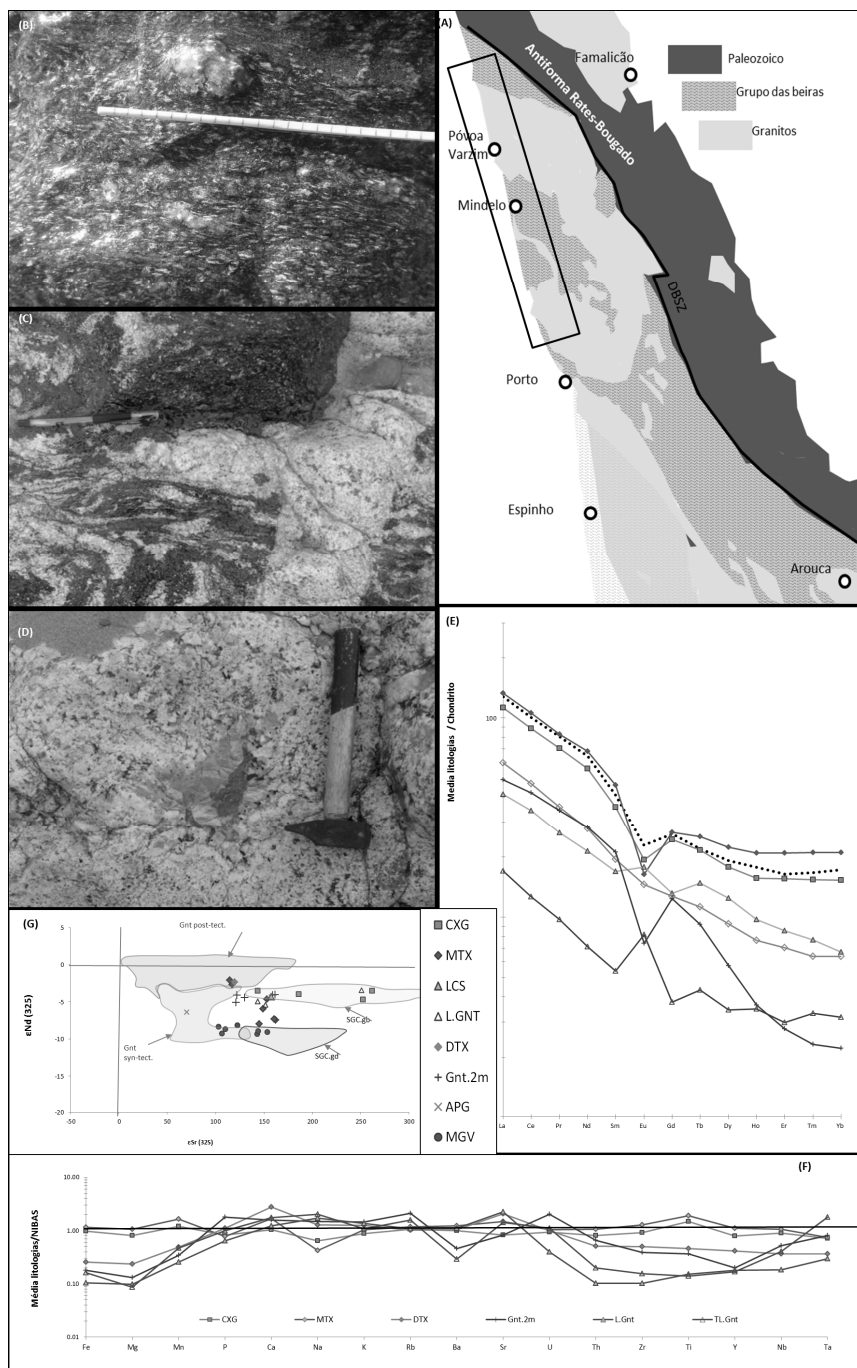


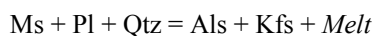
Fig. 1. A) Esquema geológico com localização do MMC; (B a C) Fotografias de campo das litologias aflorantes no MMC: B) Metatexito mosqueado; C) Metatexito bandado; D) Leucogranito com turmalina; E) Perfis de terras raras normalizado ao condrito (Boynton, 1984) com a composição média por litologia. F) Diagrama multielementar normalizado ao NIBAS (Ugidos *et al.*, 2010) com a composição média por litologia. G) Diagrama ϵSr_{325} versus ϵNd_{325} para as rochas do MMC. Áreas sombreadas correspondem aos campos definidos por Beetsma (1995): granitos sin-tectónicos (Gnt sin-tect.), granitos pós-tectónicos (Gnt pos-tect.), Complexo Xisto-Grauváquico - Grupo das Beiras (CXG.gb) e por Teixeira (2008): Complexo Xisto-Grauváquico - Grupo do Douro (CXG.gd). (Abreviações: CXG – média das amostras de metassedimentos do CXG, n=4; MTX – média das amostras de metatexitos, n=9; DTX – média das amostras de diatexitos, n=6; LCS – amostra de leucossoma *in situ*; L.Gnt – média das amostras de leucogranitos, n=5; TL-Gnt – média das amostras de leucogranito com turmalina, n=3; Gnt.2m – média das amostras de granito de duas micas, n=9; MGv - metagrauwaques).

Fig. 1. A) Geological sketch showing delimitation of MMC; B to C) MMC field pictures of outcropping lithologies in the MMC: B) Patch metatexite; C) Banded metatexite; D) Tourmaline bearing leucogranite; E) Chondrite normalized (Boynton, 1984) REE profiles of the average composition of the different lithologies. F) Multielement diagram normalized to NIBAS (Ugidos *et al.*, 2010); G) Plot of MMC rocks in the ϵSr_{325} versus ϵNd_{325} diagram. The shade areas are the fields defined by Beetsma (1995) for the syn-tectonic granites (Gnt sin-tect), post-tectonic granites (Gnt pos-tect.), schist-Greywacke Complex - Beiras Group (CXG.gb) and by Teixeira (2008) for Schist-Greywacke Complex - Douro Group (CXG.gd). (Abbreviations: CXG – average of SGC metasediments samples, n = 4; MTX - average metatexites samples, n = 9; DTX - average diatexites samples, n = 6; LCS - leucosome *in situ*; L.Gnt - average leucogranites samples, n = 5; TL.Gnt - average tourmaline bearing leucogranite, n=3; Gnt.2m - average two mica granite samples, n = 9; MGv - metagrauwaques).

A ocorrência de leucossomas e de leucogranitos sem feldspato potássico, a correlação do conteúdo de P e de Na + Ca e as texturas de substituição de plagioclase por feldspato potássico sugerem que, em zonas estruturalmente controladas, ocorreu difusão de potássio. Assim, a maioria dos leucossomas e leucogranitos seriam essencialmente trondhjemiticos. Esta e outras características dos leucossomas e leucogranitos, como a baixa relação Rb/Sr, a ausência de minerais peritéticos e a impossibilidade de produzir grandes quantidades de *melt* por fusão da biotite abaixo dos 850°C (e.g. Brown, 2008; Spicer, 2011) sugerem que o primeiro *melt* se deu na presença de fluidos (gerando essencialmente plagioclase e quartzo) e foi seguido por reacções de fusão da biotite assim que os fluidos livres foram consumidos.

Os diatexitos mostram composição mineralógica e química coerente com fusão parcial *in situ* contendo as mesmas fases minerais que os metatexitos mas onde a relação leucossoma/melanossoma é maior, condicionando a sua composição química. A raridade de *resisters* no seio dos diatexitos e o seu maior teor em Ca é o reflexo da incorporação dos metagrauques calcossilicatados na sua composição. No entanto, nos metatexitos estas rochas permanecem como *resisters*. Isto sugere que a temperatura (e consequentemente a taxa de fusão) foi mais elevada nos diatexitos. Os contactos abruptos entre diatexitos e metatexitos sugerem que os primeiros intruíram os segundos tendo-se formado em níveis mais profundos.

Para a compreensão da relação entre as massas de granitos de duas micas e os metatexitos no CMM, vários fatores devem ser levados em conta: 1) os granitos de duas micas têm um carácter intrusivo; 2) as rochas encaixantes são mais pobres em potássio, indicando que as grandes massas de granito rico em potássio não podem ter resultado exclusivamente de segregações *in situ*; 3) a composição mineralógica e química dos granitos de duas micas é diferente da dos migmatitos (contêm andaluzite e abundante apatite e feldspato potássico e não contêm cordierite). Isto reflete-se na composição química dos granitos que mostram um diferente padrão de TR e mais alto teor de K e P. Sabe-se que a baixas pressões P (< 3,5 Kbar) a produção de *melt* resulta essencialmente da fusão de biotite uma vez que a moscovite é consumida em condições de subsolidus. No entanto, em níveis mais profundos (cerca de 5 Kbar) a mica branca persiste a mais alta temperatura (White, 2008). Por isso é provável que os pelitos do CXG de níveis mais profundos contenham mica branca quando se inicia a fusão, que se daria através de reacções do tipo (Brown, 2008; White, 2008):



gerando grandes quantidades de *melt* com composição mineralógica e química características dos granitos de duas micas.

6. Conclusão

A homogeneidade isotópica entre as litologias do CMM e os metassedimentos do CXG sugere uma relação cogenética direta entre granitos de duas micas, leucogranitos, migmatitos e as litologias do CXG que afloram nas proximidades. Assim, as diferenças químicas e mineralógicas entre eles resultam da sua derivação a partir de diferentes níveis crustais e não de uma diferença marcante nos protólitos envolvidos.

Os aspetos litológicos, petrográficos e geoquímicos sugerem várias etapas de anatexia/cristalização: i) a partir de um protólito constituído por metassedimentos do CXG ocorre um primeiro *melt* resultante de fusão hidratada, seguido de fusão incongruente de biotite; ii) a migmatização dá-se sob regime deformacional o que leva à rápida segregação de leucossomas; iii) a nível ligeiramente mais profundo a taxa de fusão é superior, o que leva à formação de diatexitos (ou granitos com *schlieren* e cordierite) que ascendem intruindo os metatexitos; (iv) em níveis ainda mais profundos os metassedimentos do CXG têm uma composição mineralógica ligeiramente distinta que aliada a mais alta temperatura produz uma grande quantidade de *melt* com características típicas de granitos de duas micas, tipo S. Este material ascende na crosta e incorpora grande quantidade de xenólitos metassedimentares e migmatíticos formando um corpo granítico muito heterogéneo.

Em condições de subsolidus o CMM é afectado por fluidos ricos em potássio que, sendo controlados estruturalmente, levam à feldspatização de alguns leucossomas e granitoides. Esses fluidos, com circulação condicionada estruturalmente, não atingiram todo o complexo migmatítico; (v) Em fases mais tardias verifica-se a circulação de fluidos hidrotermais ricos em boro que levam à formação de veios pegmatíticos com turmalina que cortam todas as litologias. Ao mesmo tempo provocam a turmalinização dos metassedimentos, de alguns leucogranitos e de alguns granitos de duas micas.

Agradecimentos

Suporte financeiro da FCT através dos projetos: PETROCHRON - PTDC/CTE-GIX/112561/2009 e da bolsa de doutoramento SFRH / BD / 65509 / 2009) e do Projecto Estratégico - UI 0039 - 2014” - PEst-OE/CTE/UI0039/2014.

Referências

- Beetsma, J.J., 1995. *The late Proterozoic/Paleozoic and Hercynian crustal evolution of the Iberian Massif, N Portugal*. PhD thesis, Vrije University, Netherlands, 223 p.
- Boynnton, W.V., 1984. Geochemistry of rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson, (Ed.). *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, 63-114.
- Brown, M., 2008. Granites, migmatites and residual granulites: relationships and processes. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 38, 97-144.

- Spicer, E.M., 2011. *The low-pressure partial-melting behavior of natural boron-bearing metapelites from the Mt Stafford area, central Australia*. PhD Thesis. University of Stellenbosch, 218 p.
- Teixeira, R.J.S., 2008. *Mineralogia, petrologia e geoquímica dos granitos e seus enclaves da região de Carrazeda de Ansiães*. Tese doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (não publicada) 430 p.
- Ugidos, J.M., Sánchez-Santos, J.M., Barba, P., Valladares, M.I., 2010. Upper Neoproterozoic series in the Central Iberian, Cantabrian and West Asturian Leonese Zones (Spain): Geochemical data and statistical results as evidence for a shared homogenized source area. *Precambrian Research*, **178**, 51-58.
- Watt, G.R., Burns, I.M., Graham, G.A., 1996. Chemical characteristics of migmatites: Accessory phase distribution and evidence for fast melt segregation rates. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **125**, 100–111.
- White, R.W., 2008. Insights into Crustal Melting and the Formation of Migmatites Gained from the Petrological Modeling of Migmatites. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, **38**, 77-96.