

Aspectos petrográficos do metamorfismo de contacto associado ao plutão granítico de Penamacor-Monsanto

Petrographic features of contact metamorphism associated to the Penamacor-Monsanto granite pluton

I. Ribeiro da Costa^{1,2,*}, I.M. Antunes³, J. Farinha Ramos², C. Recio⁴, F. Barriga^{1,2}, C. Mourão², F. Guimarães⁵, N. Ferreira⁵

Recebido em 30/04/2012 / Aceite em 17/01/2013

Disponível online em Janeiro de 2013 / Publicado em Junho de 2013

© 2013 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Artigo original
Original article

Resumo: Os granitos marginais e a auréola de contacto do plutão de Penamacor-Monsanto (Zona Centro-Ibérica da Cadeia Varisca) apresentam heterogeneidades texturais e mineralógicas relevantes para a interpretação dos efeitos desta intrusão granítica nos metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico encaixante, afectados por metamorfismo regional varisco.

Variações térmicas e composicionais durante a instalação dos granitos marginais, bem como a gradação litológica das formações encaixantes, são as causas prováveis das variações texturais e mineralógicas encontradas nas rochas desta auréola metamórfica, que compreende corneanas e xistos mosqueados, estes últimos mostrando-se particularmente afectados por meteorização intensa. A mineralogia destas rochas aponta para metamorfismo de grau baixo a médio, e as frequentes gradações texturais que apresentam traduzem as heterogeneidades dos metassedimentos encaixantes.

Fluidos magmáticos tardios enriquecidos em B são provavelmente responsáveis, não só pela turmalina acessória na maioria dos granitos marginais, mas também pela ocorrência de rochas turmalínicas em várias localidades junto à intrusão de Penamacor-Monsanto.

Palavras-chave: plutão de Penamacor-Monsanto, granitos marginais, corneanas, xistos mosqueados, Complexo Xisto-Grauváquico (CXG).

Abstract: Detailed petrography of the marginal granites and contact zone of the Penamacor-Monsanto pluton (Central Iberian Zone) has revealed textural and mineralogical features relevant to the interpretation of the effects of the granitic intrusion on the host Schist-Greywacke Complex (SGC).

Among sampled marginal granites, muscovite-biotite monzogranites with accessory tourmaline predominate, mostly medium-to-coarse grained, though finer-grained and even aplitic facies occur. Argillization or sericitization of plagioclase and biotite replacement by chlorite are incipient to moderate.

The narrow metamorphic aureole surrounding this pluton comprises a thin, probably discontinuous, aureole of hornfels, along the contact with the intrusion, and a wider rim of spotted-schists, which eventually give way to the monotonous, fine-grained phyllites and greywackes of the SGC, affected by Variscan regional metamorphism. Thermal and compositional variations during the emplacement of the marginal granites, deduced from the heterogeneities referred above, and the lithological gradations within the host SGC itself are the most likely causes for the textural and mineralogical variations found in the narrow contact aureole which envelops this pluton.

Most hornfels are very fine-grained, compact rocks, made of quartz and feldspars, with some proportion of mica, and rare detrital tourmaline grains. However, a few hornfels present a high proportion of coarse porphyroblasts (mostly altered to fine-grained quartz-sericite material), often aligned along a preferred orientation, thus conferring a semblance of foliation and suggesting these rocks may be transitional to the spotted-schists of the outer rim of the contact zone.

Spotted-schists are much altered: both porphyroblasts and matrix are

invariably reduced to very fine-grained quartz-sericitic material, occasionally mixed with fine-grained Fe oxy-hydroxides attesting to the intense meteoric alteration these rocks have gone through. The predominant oval shape of these ghost porphyroblasts and the abundance of micro-inclusions suggest they may replace cordierite, rather than andaluzite. Cordierite-schists are also common in granitic contact aureoles hosted in Al-rich host-rocks. Detrital tourmaline is much rarer in the spotted-schists than in the hornfels.

Boron-enriched late magmatic fluids are likely to be responsible, not only for the presence of tourmaline in most marginal granites, but also for the local occurrence of quartz(± mica)-tourmaline rocks, as sampled in the Medelim area, and of thorough replacement of biotite by tourmaline in fine-grained biotite-quartz schists from several places around the intrusion.

We hope the petrographic detail this study has afforded us will be a useful contribution to the overall geological study of the Penamacor-Monsanto region and of similar granite-related metamorphic aureoles in Portugal.

Keywords: Penamacor-Monsanto pluton, marginal granites, hornfels, spotted-schists, Schist-Greywacke Complex (SGC).

¹Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

²CREMINER / LARSyS (Lab. Associado)

³Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Castelo Branco e CVRM – Centro de Geossistemas, UTL

⁴Servicio General de Análisis de Isótopos Estables, Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca

⁵LNEG: Laboratório Nacional de Energia e Geologia, S. Mamede de Infesta

*Autor correspondente/Corresponding author: isabelrc@fc.ul.pt

1. Introdução

A presente contribuição insere-se num estudo que visa a caracterização geoquímica e mineralógica detalhada das rochas metamórficas na zona de contacto entre a intrusão granítica de Penamacor-Monsanto e o Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) encaixante, situados na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Orógeno Varisco.

Tendo-se verificado, tal como assinalam Pattison & Tracy (1991), a relevância das distinções texturais entre as rochas pelíticas metamorfizadas da auréola de contacto e os metassedimentos regionais, o presente trabalho centra-se na petrografia das rochas marginais daquela intrusão granítica e das rochas que constituem a sua estreita orla metamórfica, nomeadamente corneanas e xistos mosqueados, pondo em destaque as suas heterogeneidades texturais e mineralógicas, e, sempre que possível, traçando a sua evolução desde as rochas metassedimentares encaixantes.

A presença de turmalina como mineral acessório em muitas das rochas graníticas marginais e a ocorrência de rochas extremamente enriquecidas em turmalina em vários locais da zona de contacto com os metassedimentos encaixantes conferiram um interesse acrescido a este estudo petrográfico e põem em destaque o papel do boro nos fluidos magmáticos tardios ou em fluidos hidrotermais associados a esta intrusão.

2. Enquadramento geotectónico

O maciço granítico de Penamacor-Monsanto, pequeno plutão com cerca de 216 km² e alongado na direcção NW-SE (Fig. 1), intrui metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) ante-Ordovícico. O CXG forma uma espessa sequência detritica de tipo *flysch*, constituída essencialmente por filitos e metagrauvasques (Sousa, 1985; Ribeiro, 1990; Ferreira Pinto & Matos, 2000), que ocupa extensos sectores da Zona Centro-Ibérica (ZCI) da Cadeia Varisca Ibérica. Tal como as restantes zonas individualizadas no Maciço Ibérico, a ZCI distingue-se pelas suas características paleogeográficas, estruturais, magmáticas e metamórficas particulares (Julivert *et al.*, 1974; Martínez *et al.*, 1990; Oliveira *et al.*, 1992).

As características estruturais da ZCI são amplamente descritas em múltiplos trabalhos, como os citados acima. Esta zona é considerada como o Domínio Axial do Orógeno Varisco Ibérico, separando o ramo NE, onde predominam dobras e cavalgamentos com vergências para NE, e o ramo SW, onde estes acidentes tectónicos apresentam vergência para SW (e.g., Ribeiro, 1990). O encaixante metassedimentar, na região em estudo, evidencia os efeitos das três fases principais de deformação varisca (D1, D2 e D3; Conde *et al.*, 2000).

Além dos metassedimentos (metagrauvasques, micaxistos, filitos e gneisses) do Pré-Câmbrico/Câmbrico, Ordovícico e Silúrico, a geologia da ZCI é dominada por granitóides variscos, essencialmente monzogranitos, granodioritos e leucogranitos de duas micas (Corretgé *et al.*, 1985; Bea *et al.*, 1987; Ugidos, 1990). Muitas das classificações propostas para as rochas granitóides da ZCI são baseadas na idade da sua implantação relativamente à terceira fase de deformação hercínica (D3); estando agrupados em sin-tectónicos e tardi- a pós-tectónicos (e.g., Schermerhorn, 1956; Oen, 1970; Ferreira *et al.*, 1987; Neiva & Gomes, 2001; Dias *et al.*, 2002; Azevedo *et al.*, 2005; Valle Aguado *et al.*, 2005). Os granitóides sin-tectónicos tendem a ocupar o núcleo de antiformas da terceira fase de deformação, enquanto os tardi- a pós-tectónicos definem, em geral, contactos discordantes com as estruturas regionais (e.g., Ribeiro *et al.*, 1990; Ramirez & Grundvig, 2000). De acordo com Neiva & Campos (1992; 1993), o maciço granítico de Penamacor-Monsanto ocorre no núcleo de um antiforma da terceira fase de deformação hercínica. Contudo, estudos de Ferreira *et al.* (1987) sugerem que este plutão poderá ser classificado como tardi-pós-tectónico, pois a orientação dominante da deformação hercínica, na sua fase tardia, em particular a fracturação, terá condicionado esta e outras intrusões na região (e.g., Gama Pereira, 1976; Ramirez & Grundvig, 2000). Antecedendo esta actividade magmática dominante, merecem referência alguns episódios magmáticos pré-variscos na ZCI (e.g., Diez Balda *et al.*, 1990; Roger *et al.*, 2004; Antunes *et al.*, 2009; Neiva *et al.*, 2009), bem como os importantes alinhamentos quartzíticos WNW-ESE, do Ordovícico inferior, como o que se destaca junto ao flanco leste do plutão de Penamacor-Monsanto (Fig. 1).

O metamorfismo de contacto associado à instalação de granitóides sin-D3, no núcleo de antiformas, define isógrads paralelas aos contactos dos granitóides, originando auréolas metamórficas (Oen, 1970; Reavy, 1989; Acciaioli *et al.*, 2005) que se sobrepõem ao metamorfismo regional varisco, polifásico (Oen,

1970; Ugidos, 1990). A intrusão de Penamacor-Monsanto produziu uma auréola de contacto, nem sempre visível em afloramento e aparentemente discordante com as estruturas regionais, com uma largura cartografada entre 1000 e 2500 m (Neiva & Campos, 1992), em que os efeitos do metamorfismo térmico se sobrepõem ao metamorfismo regional varisco.

De acordo com as fácies graníticas definidas por Neiva & Campos (1992, 1993) neste plutão zonado, os granitos que bordejam o maciço de Penamacor-Monsanto são granitos de duas micas, porfiróides e de grão médio, correspondentes às fácies designadas por GIIIFrb, em todo o perímetro norte do plutão, e por GIa, no seu perímetro sul.

Dada a distribuição da amostragem realizada (Fig. 1) consideraram-se quatro sectores marginais neste plutão: os sectores NW e NE, no perímetro norte, e os sectores SW e SE, no contacto meridional.

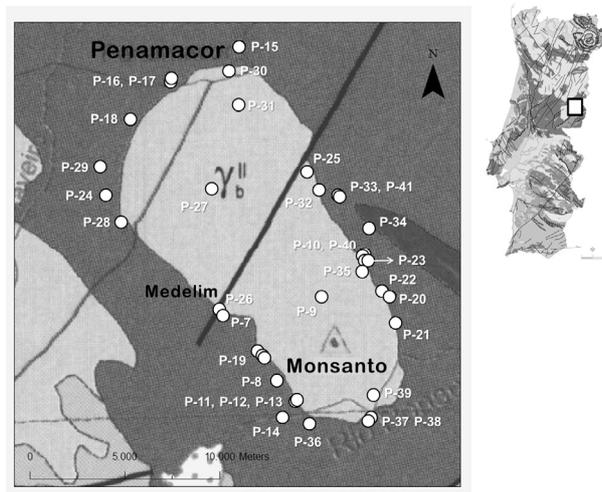


Fig.1. Localização da amostragem realizada na zona de contacto do plutão de Penamacor-Monsanto, sobre sector da carta geológica 1/500 000 (Oliveira *et al.*, 1992). A numeração refere-se às estações de amostragem, seguindo-se as referências específicas para as amostras dos vários litótipos: (a) rochas graníticas: P-8, P-9, P-9A, P-12, P-22B, P-27, P-28, P-30, P-31, P-32, P-35, P-39; rochas aplíticas: P-12A, P-32A; (b) corneanas: P-10, P-11, P-19, P-19B, P-21, P-22, P-22A, P-23, P-23A, P-24, P-25, P-29, P-33, P-34, P-36B, P-37A, P-37B, P-37AB, P-38A, P-40, P-40B1, P-40B2, P-41A; (c) xistos mosqueados: P-13, P-16B, P-17, P-18, P-18C, P-19A, P-20, P-21A, P-22, P-33A, P-36A, P-37B, P-40B3, P-41; (d) rochas metassedimentares regionais: P-11, P-14, P-15A; (e) turmalinitos: M-1, M-2, M-3, P-7, P-13B, P-13C, P-17A, P-26, P-40A, P-43.

Fig.1. Sample location within the contact zone of the Penamacor-Monsanto pluton, on this sector of the 1/500 000 geological map (Oliveira *et al.*, 1992). Numbering refers to sampling stations. Sample references for each specific lithotype are listed below: (a) granitic rocks: P-8, P-9, P-9A, P-12, P-22B, P-27, P-28, P-30, P-31, P-32, P-35, P-39; aplitic rocks: P-12A, P-32A; (b) hornfels: P-10, P-11, P-19, P-19B, P-21, P-22, P-22A, P-23, P-23A, P-24, P-25, P-29, P-33, P-34, P-36B, P-37A, P-37B, P-37AB, P-38A, P-40, P-40B1, P-40B2, P-41A; (c) spotted-schists: P-13, P-16B, P-17, P-18, P-18C, P-19A, P-20, P-21A, P-22, P-33A, P-36A, P-37B, P-40B3, P-41; (d) regional metasedimentary rocks: P-11, P-14, P-15A; (e) tourmalinites: M-1, M-2, M-3, P-7, P-13B, P-13C, P-17A, P-26, P-40A, P-43.

3. Procedimentos analíticos

Na interpretação das observações efectuadas e nas conclusões deste trabalho, referem-se alguns resultados analíticos relativos a certas características químicas que complementam as observações petrográficas das rochas estudadas. Estes dados composicionais foram obtidos nos ACTLABS (Activation Laboratories, Ancaster, Canadá) por vários métodos analíticos, nomeadamente ICP-fusão (elementos maiores), titulação (FeO) e PGNA - análise por activação neutrónica com radiação-gama fraca (B).

A composição dos feldspatos identificados nas rochas graníticas foi determinada por micro-sonda electrónica, nos

laboratórios do LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia, S. Mamede de Infesta, Portugal). Trata-se de uma microsonda electrónica JEOL JXA-8500F, e foi operada a 15 kV, usando um diâmetro médio de feixe de 3 µm, e considerando tempos de contagem de 20s nos picos analíticos e de 10s nos fundos inferior e superior. Os padrões utilizados foram: ortose (Si, Al, K), albite (Na) e apatite (Ca); para estes elementos, foram usados os seguintes cristais analisadores: TAP (Si, Al), TAPH (Na) e PETJ (K, Ca).

4. Caracterização Petrográfica

4.1. Rochas graníticas marginais

Os vários granitos que constituem o maciço zonado de Penamacor-Monsanto foram caracterizados em detalhe por Neiva & Campos (1992, 1993). Apesar das fácies graníticas de bordadura amostradas neste trabalho (Fig. 1) corresponderem maioritariamente a monzogranitos de duas micas, de grão médio a grosseiro, quase sempre com turmalina acessória, são patentes várias heterogeneidades a nível da granularidade, da mineralogia específica e até do seu grau de alteração, mesmo dentro de cada sector considerado, como se deprende pela análise da Tabela 1. Embora heterométricos, poucos dos granitos marginais amostrados parecem ser verdadeiramente porfiróides.

A plagioclase, reconhecida pela sua macla polissintética primária e identificada petrograficamente como albite ou oligoclase (An_{8-11}), ocorre em cristais tabulares, ou megacristais nos granitos de textura mais porfiróide; em todos os granitos, mostra indícios de argilização ou de sericitização, incipiente a moderada (Figs. 2a, b). A plagioclase parece ser menos abundante nos granitos do sector NE, relativamente a todos os outros granitos amostrados.

A microclina é o feldspato-K presente na maioria dos granitos marginais amostrados, reconhecível em geral pela sua macla típica (Fig. 2c); a microclina (Or_{92-97}) encontra-se invariavelmente pertitzada (Fig. 2d), traduzindo condições de arrefecimento lento, como expectável em intrusões desta natureza. Ao contrário da plagioclase, a microclina é particularmente abundante nos granitos do sector NE do maciço e os seus cristais são anédricos e tendem a ter dimensão superior à das plagioclases; nalguns dos granitos marginais estudados, o feldspato-K tem textura nebulosa e não é reconhecível a macla que tipifica a microclina e nem sempre são detectáveis micro-pertites, podendo tratar-se talvez de um feldspato resultante de processos secundários de substituição.

O quartzo, mineral também maioritário nestas rochas, é invariavelmente anédrico, apresenta granularidade variável e, frequentemente, subgranulação e extinção ondulante indicadoras de alguma deformação, possivelmente associada à instalação dos próprios granitos.

A moscovite é quase sempre o acessório mais abundante, ocorrendo em lamelas de grão médio a fino, ou formando agregados de lamelas mais alongadas (Fig. 2e). Os granitos que só têm moscovite ± turmalina como minerais acessórios são minoritários (Tabela 1), mas tal situação é comum nos aplitos (Fig. 2f) correspondentes às fases tardias desta intrusão.

A biotite castanha, fortemente pleocróica e contendo abundantes inclusões de zircão (ou halos pleocróicos, quando o zircão já foi metamictizado), encontra-se presente em muitos dos granitos estudados, mas é quase sempre menos abundante do que a moscovite. Ausente nalguns granitos do sector marginal SW do plutão e nas rochas aplíticas, a biotite é, pelo contrário, mais abundante nos granitos do sector SE (Fig. 2g). Nos granitos mais alterados, a biotite apresenta-se parcialmente cloritizada, como se verifica nas amostras P-19C e, em menor grau, P-30 e P-35. Em vários dos granitos estudados, a biotite parece dar lugar a moscovite, observando-se moscovite a rodear “núcleos” de biotite,

em aparente continuidade estrutural (Fig. 2h): tal efeito poderá talvez dever-se a efeitos hidrotermais tardios de lixiviação de Mg-Fe, que, atacando primeiramente os bordos dos cristais de biotite, deixaram intactos os núcleos de algumas lamelas maiores.

Tabela 1. Composição modal de granitos marginais do plutão de Penamacor-Monsanto.

Table 1. Modal composition of marginal granites from the Penamacor-Monsanto pluton.

Sector	Amostra	Grão	Qz	Plg	Fdp-K	Mosc	Biot	Tur	And	Alteração
NE	P-30	F - M/G	34.1	27.1	23.6	6.4	3.4	1.5		3.2
	P-31	M - G	39.2	28.6	22.2	3.5	4.0	0.5	<1	2.0
	P-32	F - M/G	30.2	31.4	23.0	8.9	2.6	1.6		2.1
	P-32A	mF - F	46.1	24.6	17.5	6.6	0.0	0.0		4.8
NW	P-27	M - G	33.0	29.3	24.0	6.2	2.6	1.4	<1	3.4
	P-28	M - G	37.4	32.7	14.8	9.6	4.1	0.0	<1	1.2
SW	P-8	M	32.4	26.9	21.0	9.6	2.8	1.3		5.7
	P-12	P	31.9	29.8	16.5	13.3	0.0	1.7		5.7
	P-12A	M - G	34.8	23.0	27.6	9.2	0.0	3.2		2.0
	P-19C	F - M	52.1	5.4	8.1	28.4	0.6			4.6
SE	P-35	M - G	42.7	25.2	10.7	5.2	7.8	1.2	<1	6.9
	P-39	M - G	29.4	25.1	16.8	6.2	12.9	3.1		6.7
Monsanto	P-9	M - G	20.2	54.0	13.3	5.0	2.2	0.5		4.6

Granularidade e textura: mF - grão muito fino; F - grão fino; M - grão médio; G - grão grosseiro; P - textura porfiróide, com megacristais em matriz de grão fino-médio. O grau de alteração da rocha foi avaliado pela quantidade relativa de sericitização dos feldspatos/plagioclases e de cloritização da biotite.

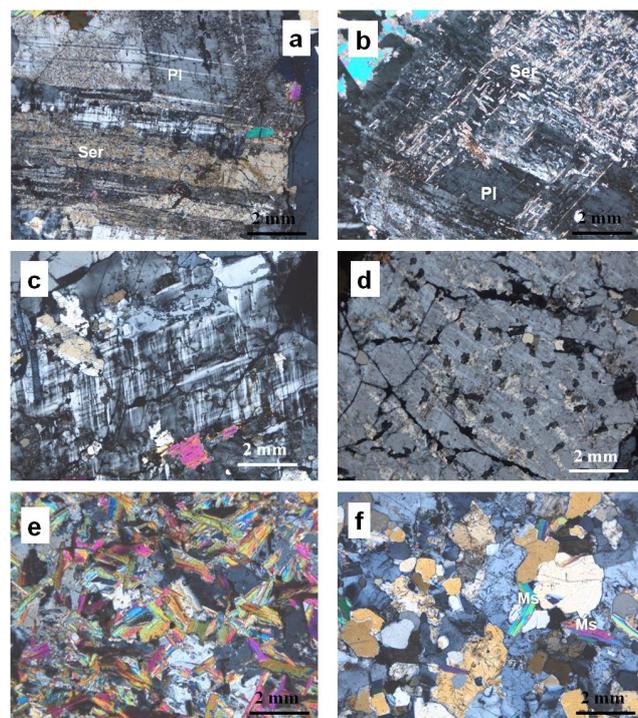


Fig.2. Fotomicrografias de aspectos petrográficos vários dos granitos marginais do maciço de Penamacor-Monsanto: (a) plagioclases sericitizadas (amostra P-9; pol. X); (b) sericitização da plagioclase, marcando as direcções de clivagem (amostra P-27; pol. X); (c) microclina, mostrando as suas maclas de inversão típica (amostra P-9A; pol. X); (d) textura pertítica em microclina (amostra P-39; pol. X); (e) finas lamelas de moscovite primária em aptito (amostra P-12A; pol. X); (f) concentração de finas lamelas de moscovite, formando textura entrecruzada (amostra P-19C; pol. X). Abreviações: Pl, plagioclase; Ser, sericite; Ms, moscovite; Bt, biotite; Tur, turmalina (segundo Whitney & Evans, 2010).

Fig.2. Photomicrographs of relevant petrographic features of marginal granites from the Penamacor-Monsanto pluton: (a) sericite alteration in plagioclase (sample P-9; X pol.); (b) sericite alteration marking cleavage directions in plagioclase (sample P-27; X pol.); (c) microcline showing its typical inversion twinning (sample P-9A; X pol.); (d) perthites in microcline (sample P-39; X pol.); (e) fine primary muscovite lamellae in aplite (sample P-12A; X pol.); (f) fine muscovite lamellae forming local intertwinning texture (sample P-19C; X pol.). Mineral abbreviations: Pl, plagioclase; Ser, sericite; Ms, muscovite; Bt, biotite; Tur, tourmaline (after Whitney & Evans, 2010).

A turmalina é constituinte acessório em quase todas as rochas granitoides amostradas, e particularmente abundante nos granitos P-27 e P-39 e nalguns aplitos (p.ex., P-12A e P-22B), mas a sua

proporção, dimensão e características são bastante variáveis. Distinguem-se dois tipos de ocorrências, seguindo padrões idênticos aos descritos, por exemplo, para as turmalinas dos granitos da Cornualha, por London & Manning (1995): nos granitos africanos e/ou sem biotite (P-12 e P-22B) e nos aplitos (P-12A e P-32A), as turmalinas são azuladas ou azuis-esverdeadas e exibem forma prismática (Fig. 2i) ou secções basais triangulares características (Fig. 2j), enquanto na maioria dos granitos, com biotite e menos diferenciados, a turmalina apresenta tons castanhos claros ou amarelados, é bastante pleocróica e ocorre em cristais anédricos ou fragmentados, intersticiais, ocasionalmente formando agregados, parecendo por vezes estar a formar-se a partir da biotite do granito (Figs. 2 l, m) (Ribeiro da Costa *et al.*, 2012a); em ambos os tipos de ocorrência, as turmalinas mostram frequentemente zonação cromática ao microscópio (Ribeiro da Costa *et al.*, 2012a, b). Nestas rochas em que se identificou turmalina, os teores em B são elevados (100 – 627 ppm). Foram raras as rochas graníticas amostradas, como o granito P-28 e o aplito P-32A, em que não se observou turmalina.

As fácies apliticas, que ocorrem pontualmente ao longo do bordo do plutão, caracterizam-se sobretudo pela sua textura de grão fino ou muito fino (Fig. 2f) e pela escassez ou mesmo ausência de biotite; a presença de turmalina é, pelo contrário, extremamente variável, dependendo da localização destas rochas.

Entre os minerais ocasionais dos granitos estudados, destacam-se o zircão, a monazite e a apatite.

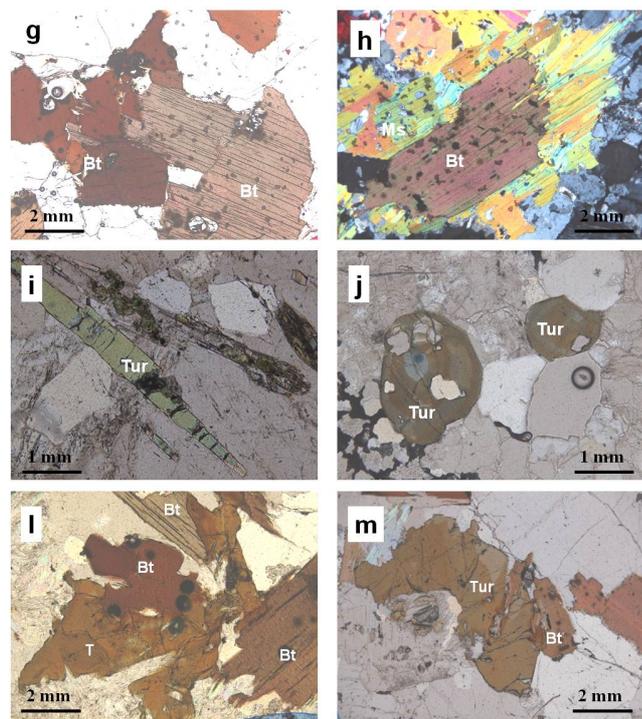


Fig.2 (cont.). Fotomicrografias de aspectos petrográficos vários dos granitos marginais do maciço de Penamacor-Monsanto: (g) biotite castanha, muito pleocróica, exibindo halos pleocróicos (amostra P-9A; pol. //); (h) núcleo de biotite rodeado por moscovite, evidenciando metamatismo tardio selectivo (amostra P-39; pol. X); (i) cristal prismático de turmalina verde azulada (amostra P-12; pol. //); (j) secções baseais de turmalina verde azulada, exibindo zonação concêntrica bem marcada (amostra P-22B; pol. //); (l) desenvolvimento de turmalina amarela acastanhada associada a biotite (amostra P-8; pol. //); (m) turmalina amarela acastanhada também associada a biotite (amostra P-35; pol. //). Abreviaturas: Pl, plagioclase; Ser, sericite; Ms, moscovite; Bt, biotite; Tur, turmalina (segundo Whitney & Evans, 2010).

Fig.2 (cont.). Photomicrographs of relevant petrographic features of marginal granites from the Penamacor-Monsanto pluton: (g) brown, very pleochroic biotite showing pleochroic haloes (sample P-9A; // pol.); (h) biotite core surrounded by muscovite, evidencing selective late metasomatism (sample P-39; X pol.); (i) prismatic section of

bluish green tourmaline (sample P-12; // pol.); (j) near-basal sections of bluish green tourmaline exhibiting well-marked concentric zoning (sample P-22B; // pol.); (l) brownish yellow tourmaline associated to biotite (sample P-8; // pol.); (m) brownish yellow tourmaline associated to biotite (sample P-35; // pol.). Mineral abbreviations: Pl, plagioclase; Ser, sericite; Ms, muscovite; Bt, biotite; Tur, tourmaline (after Whitney & Evans, 2010).

4.2. Corneanas

Foram amostradas corneanas em vários pontos da estreita auréola metamórfica que envolve o plutão de Penamacor-Monsanto, no contacto imediato com os granitos (Fig. 1).

Na maior parte dos casos, trata-se de rochas de elevada dureza, compactas, com textura granoblástica de grão fino a muito fino (Tabela 2; Figs. 3a, b), essencialmente constituídas por quartzo, plagioclase e alguma mica (biotite \pm moscovite) sem orientação preferencial. Nalgumas corneanas, destacam-se do material mais fino clastos de quartzo (\pm plagioclase) de dimensão média, provavelmente herdados da rocha encaixante, embora possam exibir por vezes alguma recristalização pontual (Fig. 3c); é ainda possível, segundo Spry (1974) que algum quartzo fino destas rochas tenha sido produzido durante as reacções químicas que deram origem aos minerais formados por efeito do metamorfismo térmico. O grau de alteração/oxidação destas rochas (0.07 – 0.41%), tal como o seu teor em quartzo, é bastante variável de local para local, mesmo dentro de cada um dos sectores considerados na periferia do plutão (Tabela 2). Nas corneanas com abundantes clastos de quartzo (\pm plagioclase) e em que estes parecem alinhar-se numa determinada orientação, a rocha aparenta por vezes uma textura foliada ou bandada, particularmente a nível microscópico (Tabela 2). A variabilidade dos protólitos destas rochas do contacto, deduzidos a partir das suas texturas (e referidos na última coluna da Tabela 2), é também patente no intervalo alargado de valores A/CNK que apresentam (Fig. 7).

Estas texturas (granoblásticas a grano-lepidoblásticas muito finas) distinguem as corneanas de metamorfismo de contacto dos metassedimentos pelíticos regionais, em que a disposição paralela de cristais tabulares define uma foliação. As nossas observações petrográficas vão ao encontro das características das corneanas pelíticas descritas por Spry (1974), em resultado dos efeitos da temperatura, nomeadamente: as rochas pelíticas e outras de grão muito fino sofrem profundas modificações texturais, em particular recristalização, que tende a produzir cristais não-orientados de minerais metamórficos; em geral, as texturas originais estratificadas ou bandadas são preservadas como layering composicional e a rocha tem pouca tendência a homogeneizar-se. Como explicam Pattison & Tracy (1991), o metamorfismo de contacto de metapelitos com uma foliação preexistente origina geralmente um decréscimo gradual na fissilidade das rochas à medida que o grau metamórfico aumenta, de modo que se assiste muitas vezes a uma transição textural gradual entre xistos mosqueados e corneanas maciças.

Na maior parte das corneanas, observaram-se pequeníssimos grãos de turmalina (diâmetros médios \sim 0.04 - 0.06 mm), quase sempre escassos e com contornos bastante arredondados. Estas turmalinas apresentam geralmente cor castanha amarelada, sendo raro, dada a sua dimensão, conseguir observar-se zonação ou qualquer gradação cromática para tons azulados/esverdeados. As características morfológicas e a escassez da turmalina nestas rochas levam-nos a considerar que se trate de turmalina detrítica, herdada, e não se relacione com os efeitos dos fluidos tardi-magmáticos ricos em B associados à intrusão do plutão.

Assinala-se a presença de ilmenite e, nalgumas corneanas, de sulfuretos (Tabela 2), nomeadamente de pirrotite \pm pirite \pm calcopirite (amostras P-18A, P-18B, P-23), de pirrotite + pirite + calcopirite + marcassite (P-36B), e de pirite + marcassite (amostra P-19).

Tabela 2. Aspectos petrográficos gerais das corneanas amostradas em vários sectores do contacto do plutão de Penamacor-Monsanto.

Table 2. General petrographic features of hornfels from several sectors of the contact aureole of the Penamacor-Monsanto pluton.

Sector	Amostra	Grão	Porfiro-blastos	Foliação	Qz ± Plg (clastos)	Qz (matriz)	Plg (matriz)	Mosc (matriz)	Biot (matriz)	Turm (matriz)	Alteração (oxidação)	Protólito
NW	P-24	mF - F		n-ap	XXX	XXX	(?)	(?)	(X)	(X)	XXX	R.gr.
	P-29	mF - F		n-ap	XXX	XXX	X	X	(X) - chl	X	X	R.gr./fil
SW	P-11	mF - F		fin (Cl)	XXX	XXX	X	XX	XX			R.gr.
	P-19	mF		fin (Cl)	X	XXX		XX	XX	X		R.gr.
	P-19B	mF - F	X(f)	Pf		XXX	X	XX	XX (chl)	X		R.gr.
	P-36B	mF-M	XX(Cord)	Pf		XXX	X	XX	XX	XX		R.fil
	P-37A	mF-M	X(f)	Pf		XXX		XXX	Chl XXX	X	X	R.fil
	P-37B	mF-M	X(f)	Pf		XXX		XXX	X + Chl	X	X	R.gr.
	P-37AB	mF-M	XX(f)	Pf		XX		XXX	XX + Chl		XX	R.fil
	P-38A	mF-M	X(f)	Pf		XXX		XXX	X			R.gr.
	P-10	mF - F	X(f)	n-ap	XXX	XXX	X	XX	XXX			R.gr.
	P-21	mF - F		n-ap	XXX	XXX	X	XX	XX	(X)		R.gr.
SE	P-22	mF-F	X(f)	n-ap	XXX	XXX	X	XXX	XX	X	XX	R.gr.
	P-22A	mF - F		n-ap	XXX	XXX	(?)	XX	XX	X		R.gr.
	P-23	mF - F		n-ap	XXX	XXX	X	XX	XX	X		R.gr.
	P-23A	mF - F		n-ap	XXX	XXX	X	XXX	XX			R.gr.
	P-25	mF	XX(f)	Pf		XX	(?)	XXX	XX		XXX	R.gr.
	P-33	mF - F		n-ap	XXX	XXX	X	X	XX		X	R.gr.
	P-34	mF - F		n-ap	XXX	XXX	(?)	X	X (?)		XXX	R.gr.
	P-40	mF - F		n-ap	XXX	XXX	X	XX	XX	X		R.gr.
	P-40B(1)	mF - F	X(f)	Cl	XXX	XXX		XX	XX	XX	X	R.gr.
	P-40B(2)	mF - F		Cl	XXX	XXX	XX	XX	XX			R.gr.
P-41A	mF - F		Cl	XXX	XXX	X-XX	XX	XX		X	R.gr.	

X - escasso; XX - frequente; XXX - abundante; X (f) - Presença de relíquias-fantasma de porfiroblastos (em geral de formas ovais, correspondendo talvez a cordierite); Cl/ Pf - orientação preferencial dos clastos ou dos porfiroblastos; n-ap - Foliação não-aparente na lâmina; R.fil - Rocha filitosa; R.gr. - Rocha com componente gresosa ou grauvaçóide. O grau de alteração da rocha foi avaliado pela quantidade relativa de sericitização dos feldspatos/plagioclases e de cloritização da biotite.

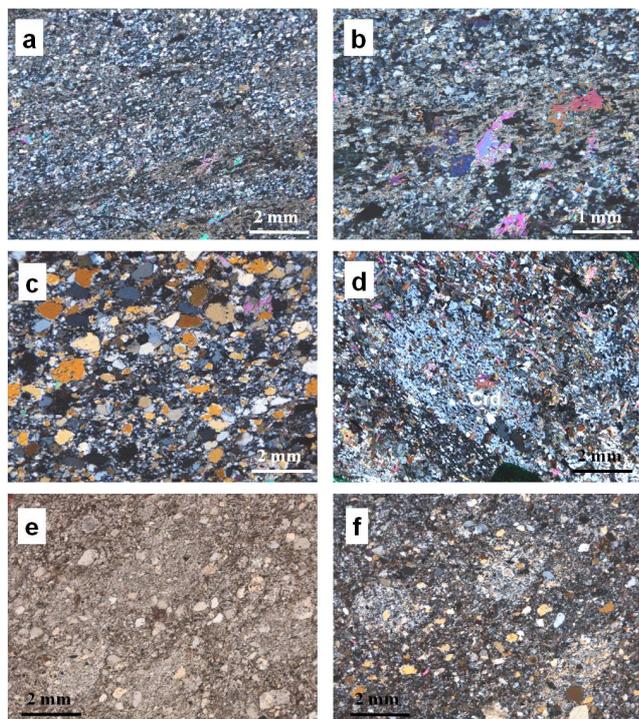


Fig.3. Fotomicrografias mostrando diversos aspectos petrográficos das corneanas e xistos mosqueados da orla metamórfica associada ao maciço de Penamacor-Monsanto: (a) textura granoblástica de grão muito fino típica de algumas corneanas quartzo-feldspáticas (amostra P-37B; pol. X); (b) recristalização pontual da sericite de uma corneana de grão fino (amostra P-37B; pol. X); (c) corneana de granularidade heterométrica, destacando-se abundantes clastos de quartzo (± plagioclase) numa matriz quartzo-feldspática mais fina (amostra P-19B; pol. X); (d) possível porfiroblasto de cordierite, apresentando numerosas inclusões de quartzo e mica, em corneana mosqueada (amostra P-36B; pol. X); (e), (f) corneana mosqueada com porfiroblastos-fantasma em matriz quartzo-sericítica fina (amostra P-10; pol. // e pol. X). Abreviatura: Crd, cordierite (segundo Whitney & Evans, 2010).

Fig.3. Photomicrographs of relevant petrographic features of hornfels and spotted schists from the contact zone of the Penamacor-Monsanto pluton: (a) very fine-grained granoblastic texture typical of some quartz-feldspar hornfels (sample P-37B; X pol.); (b) local recrystallization of sericite in fine-grained hornfels (sample P-37B; X pol.); (c) heterometric hornfels with abundant quartz clasts (± plagioclase) in finer-grained quartz-feldspar groundmass (sample P-19B; X pol.); (d) possible cordierite porphyroblast, showing numerous quartz and mica inclusions, in spotted-hornfels (sample P-36B; X pol.); (e), (f) spotted-hornfels with ghost porphyroblasts in fine-grained quartz-sericite groundmass (sample P-10; // and X pol.). Mineral abbreviation: Crd, cordierite (after Whitney & Evans, 2010).

Foram também observadas corneanas mosqueadas, rochas de textura porfiroblástica constituídas por quantidade variável de porfiroblastos numa matriz quartzo-feldspática muito fina mas sem foliação aparente (Figs. 3e, f). Na maior parte das corneanas com este tipo de textura, os porfiroblastos encontram-se totalmente alterados, tendo dado lugar a um material quartzo-sericítico muito fino, onde por vezes se destacam ainda micro-inclusões de quartzo e mica da fase mineral original; estes porfiroblastos-fantasma apresentam frequentemente formas ovais, o que nos leva a crer que possam substituir cordierite, visto tratar-se de morfologia menos provável para a andaluzite que eventualmente poderia ocorrer nestas rochas do contacto; numa única amostra (P-36B; Fig. 3d) parecem subsistir os porfiroblastos de cordierite, exibindo enorme profusão de micro-inclusões de quartzo e mica, por vezes quase obliterando a presença das maclas que lhe são típicas. Segundo Pattison & Tracy (1991), a orientação aleatória da biotite e da cordierite (ou andaluzite) é característica de corneanas de grau baixo-intermédio, enquanto as corneanas de mais alto grau são rochas maciças, duras, de grão fino, apresentando textura granoblástica ao microscópio.

4.3. Xistos mosqueados

A faixa de xistos mosqueados que envolve o plutão de Penamacor-Monsanto e as corneanas do contacto imediato (Fig. 1) encontra-se em estado de alteração muito avançado, pelo que não dispomos de amostras em que os porfiroblastos não estejam totalmente sericitizados. Alguns aspectos petrográficos mais relevantes destas rochas são descritos na Tabela 3.

Apesar da textura porfiroblástica destas rochas ser imediatamente reconhecível nos afloramentos, é difícil identificar a natureza desses porfiroblastos, dado o seu estado de alteração: no entanto, a predominância de formas ovaladas (Figs. 3g, h) e a abundância de micro-inclusões de quartzo e sericite sugerem, como referido atrás e à semelhança de ocorrências descritas por Pattison & Tracy (1991) e por Vernon & Clarke (2008), que esses porfiroblastos possam ter correspondido a cordierite, ainda que muitas vezes a textura das amostras-de-mão lembre a de xistos com andaluzite. A abundância destes porfiroblastos-fantasma de forma ovalada e a sua proximidade conferem a alguns destes xistos mosqueados aquilo que Spry (1974) designa por textura nodular.

Estes porfiroblastos-fantasma, abundantes e de dimensão milimétrica, distinguem-se bem da matriz, ainda que, nalgumas amostras, pareçam ser constituídos pelo mesmo material que esta, nomeadamente, por uma mistura extremamente fina de quartzo e mica sericítica (\pm biotite), a que por vezes se juntam oxi-hidróxidos de ferro (Fig. 3g). Existe toda uma gradação evolutiva entre os xistos mosqueados em que se conseguem ainda distinguir bem as micro-inclusões no corpo do porfiroblasto, apesar de o mineral original já ter sido completamente alterado, até àqueles xistos em que matriz e porfiroblastos se confundem praticamente, quer na granularidade, quer na mineralogia. Nalgumas destas rochas mais alteradas em que os porfiroblastos foram totalmente substituídos por material quartzo-micáceo fino, a observação petrográfica revela uma zonação concêntrica, em termos de granularidade, em muitos desses porfiroblastos-fantasma (Fig. 3g). Tais detalhes estão a ser estudados do ponto de vista composicional e serão tratados em trabalhos futuros respeitantes a estas ocorrências metamórficas.

A abundância de micro-inclusões (quartzo e mica) nos porfiroblastos de muitos dos xistos mosqueados observados sugere uma textura poicilitica e um crescimento bastante rápido daqueles grandes cristais por acção de impulsos térmicos associados à instalação do plutão. Uma vez que estes porfiroblastos se terão certamente desenvolvido a partir do material disponível na rocha encaixante, e que constitui a actual matriz quartzo-micácea daqueles

xistos, é expectável que a alteração desses porfiroblastos tenha produzido um material quase indistinto da matriz envolvente, a não ser pela menor abundância de biotite. No entanto, não pode ser completamente posta de lado a hipótese de que os efeitos térmicos associados aos níveis mais superiores desta intrusão granítica tenham sido tão bruscos que as fases minerais porfiroblásticas não se tenham chegado a desenvolver por completo, ocorrendo, como se descreve, quase indistintas da matriz e contendo quantidade significativa de micro-inclusões de minerais idênticos aos da matriz envolvente.

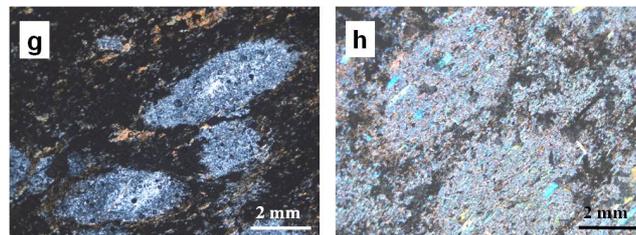


Fig.3 (cont.). Fotomicrografias mostrando diversos aspectos petrográficos das corneanas e xistos mosqueados da orla metamórfica associada ao maciço de Penamacor-Monsanto: (g) xisto mosqueado com porfiroblastos-fantasma exibindo zonação concêntrica, em matriz quartzo-sericítica muito fina (amostra P-16A; pol. X); (h) xisto mosqueado com abundantes porfiroblastos-fantasma, totalmente sericitizados, em matriz de composição quase idêntica (amostra P-36A; pol. X).

Fig.3 (cont.). Photomicrographs of relevant petrographic features of hornfels and spotted schists from the contact zone of the Penamacor-Monsanto pluton: (g) spotted-schist with ghost porphyroblasts exhibiting concentric zoning, within very fine-grained quartz-sericite groundmass (sample P-16A; X pol.); (h) spotted-schist with abundant and completely sericitized ghost porphyroblasts, in a groundmass of analogous composition (sample P-36A; X pol.).

Em geral, dificilmente se encontra turmalina nos xistos mosqueados, o que não é surpreendente dadas as características mecânicas daquele mineral e a sua tendência para se associar a níveis mais granulares/gresosos, nas sequências pelíticas.

Tabela 3. Aspectos petrográficos gerais dos xistos mosqueados amostrados em vários sectores do contacto do plutão de Penamacor-Monsanto e de algumas rochas metassedimentares regionais próximas desse contacto.

Table 3. Petrographic features of hornfels from several sectors of the contact aureole of the Penamacor-Monsanto pluton and of regional metasediments close to this aureole.

Sector	Amostra	Grão	Porfiro-blastos	Foliação	Qz (matriz)	Plg (matriz)	Ser (matriz)	Biot (matriz)	Turm (matriz)	Alteração (oxidação)	Protólito
NW	P-16	mF	XX(f)	nm	XX	(?)	X	XX		XXX	R.fil
	P-16A	mF	XX(f)	XX	XX	(?)	X	XX		XXX	R.fil
	P-16B	mF	XX(f)	nm	X - XX	(?)	XX	XX		XXX	R.fil
	P-17	mF - F		XX	XXX	XX	XX				R.fil
	P-18	mF	XX(f)	Pf	X - XX	(?)	XXX	X		X	R.fil
	P-18A	mF - F	XXX(f)	Pf			XXX	X		XX	R.fil
	P-18B	mF	XXX(f)	Pf			XXX	X		XX	R.fil
	P-18C	mF	XX(f)	XX	X - XX	(?)	XXX	X		X	R.fil
SW	P-13										R.fil
	P-19A	mF	XX(f)	XX	X - XX	(?)	XXX	X		X	R.fil
	P-19B										R.fil
	P-36A	mF	XX(f)	XX	X		XXX(rx)	X		X	R.fil
	P-37B1	mF	XX(f)	XX	XXX		XXX(rx)	XX	X	X	R.fil
SE	P-20	mF	XX(f)	XX	X - XX	(?)	XXX	X		X	R.fil
	P-21A	mF	XX(f)	nm	XXX		XXX(rx)	(X)		X	R.fil/gr.
	P-40B(3)	mF-F	XX(f)	XX	XXX		XXX			XX	R.fil/gr.
	P-41	mF	XX(f)	nm	XX	X	XXX	XX			R.fil
Xistos Regionais	P-13	mF - F		XX	XXX		X	X		XX	R.gr.
	P-14	mF		XXX	XX		XXX			XX	R.fil
	P-15A	mF - F		XX	XXX		XXX			XX	R.fil/gr.

X - escasso; XX - frequente; XXX - abundante; X (f) - Presença de relíquias-fantasmas de porfiroblastos (em geral de formas ovais, correspondendo talvez a cordierite); nm - Foliação não muito marcada, a nível da observação petrográfica; rx - Sericite recristalizada pontualmente; R.fil - Rocha filitosa; R.gr. - Rocha com componente gresosa ou grauvacóide. O grau de alteração da rocha foi avaliado pela quantidade relativa de sericitação dos feldspatos/plagioclases e de clorização da biotite.

4.4. Metassedimentos regionais

O maciço de Penamacor-Monsanto intruiu uma sequência extensa e maciça de metassedimentos resultantes do metamorfismo regional hercínico, localmente pouco intenso, que afectou este domínio do CXG. Estes metassedimentos regionais, já anteriormente objecto de estudo de outros autores (e.g., Ferreira Pinto & Matos, 2000), estão longe de corresponder a um litótipo único: as fácies xistosas ou metapelíticas são predominantes, mas são frequentes localmente as nuances de carácter grauvacóide ou gresoso. Naturalmente, a enorme diversidade textural, senão mineralógica, dos metassedimentos do CXG condicionam fortemente as texturas tão variáveis encontradas nas próprias rochas do contacto, quer se trate de corneanas, quer de xistos mosqueados.

Estes metassedimentos regionais não apresentam porfiroblastos, tratando-se em geral de rochas de grão muito fino a fino, com foliação bem marcada, resultante da orientação da mica; são frequentes rochas em que se define uma alternância de níveis claros, quartzosos, com níveis escuros, em que predomina a clorite/biotite fina \pm hidróxidos de Fe (Figs. 4a, b). Noutras amostras, clastos de quartzo alongados parecem definir um alinhamento preferencial, de acordo com a orientação da matriz que os envolve (Fig. 4c). Em muitas das rochas onde esta foliação apertada é patente, observam-se localmente indícios de crenulação dessa foliação (Fig. 4d). No entanto, algumas destas rochas regionais apresentam, em vários locais, fácies mais gresosas, de foliação menos marcada.

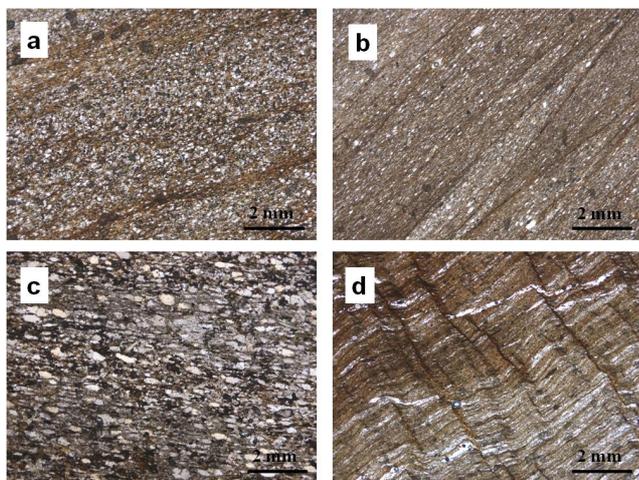


Fig.4. Fotomicrografias de vários aspectos petrográficos dos xistos regionais encaixantes do plutão de Penamacor-Monsanto: (a), (b) xisto regional de grão muito fino, com foliação bem marcada e onde se destaca a alternância de níveis mais ricos em biotite (\pm oxí-hidróxidos de ferro) com níveis mais quartzosos (amostra P-15; pol. //); (c) xisto regional de carácter mais gresoso, mas sendo igualmente evidente a sua foliação, marcada pela própria orientação preferencial dos clastos de quartzo (amostra P-13; pol. //); (d) evidência de oxidação e de crenulação da xistosidade em xisto regional muito fino, onde alternam níveis ricos em biotite (\pm oxí-hidróxidos de ferro) com níveis mais quartzosos (amostra P-14; pol. //).

Fig.4. Photomicrographs of relevant petrographic features of the regional metapelites hosting the Penamacor-Monsanto pluton: (a), (b) very fine-grained regional schist with well-marked foliation and showing alternating biotite (\pm Fe oxí-hydroxides)- and quartz-rich levels (sample P-15; // pol.); (c) coarser-grained regional schist with penetrative foliation, equally well-marked by the preferred orientation of quartz clasts (sample P-13; // pol.); (d) evidence of oxidation and crenulation in very fine-grained regional schist showing alternate biotite (\pm Fe oxí-hydroxides)- and quartz-rich levels (sample P-14; // pol.).

Como se referiu atrás, estes metassedimentos regionais são considerados de baixo grau metamórfico: de acordo com trabalhos anteriores (Gama Pereira, 1976), o metamorfismo regional nesta área não ultrapassaria a *zona da clorite*, mas a evidência

petrográfica parece demonstrar que, pelo menos localmente, pode atingir a *zona da biotite*.

Estas rochas apresentam, sem excepção, fortes indícios de alteração meteórica, patente na sua oxidação pervasiva.

4.5. Turmalinitos

Parece-nos digna de nota a ocorrência pontual de rochas extremamente ricas em turmalina (20 - 90 % de turmalina), que designámos genericamente por *turmalinitos* (já descritos em Ribeiro da Costa *et al.*, 2012a, b) e que apresentam duas tipologias:

- em vários locais do perímetro do plutão estudado, existem rochas de grão fino ou muito fino, e dureza elevada, macroscopicamente semelhantes a corneanas bandadas ou microgneisses, e constituídas por uma alternância de níveis de quartzo e níveis de turmalina, em geral castanha, castanha-esverdeada ou castanha-amarelada, muito pleocróica (Figs. 5a, b); a textura finamente bandada destas rochas assemelha-se à que se encontra nalguns metassedimentos quartzo-biotíticos do CXG, onde alternam níveis quartzosos com níveis predominantemente biotíticos; dadas estas evidências texturais e a ocorrência de biotite residual nalguns destes níveis turmalinizados, parece-nos provável que muitos destes turmalinitos tenham resultado da turmalinização maciça dos níveis biotíticos de metassedimentos idênticos aos descritos acima, onde houve circulação de fluidos enriquecidos em B, junto ao contacto com o granito;

- na área de Medelim, ocorrem também turmalinitos constituídos por turmalina azul e quartzo e/ou mica (Figs. 5c, d); a textura destas rochas não apresenta qualquer tipo de bandado ou foliação, e a turmalina, de granularidade variável e exibindo frequentemente formas euédricas, prismáticas/aciculares, não parece resultar de processos de substituição de metassedimentos locais.

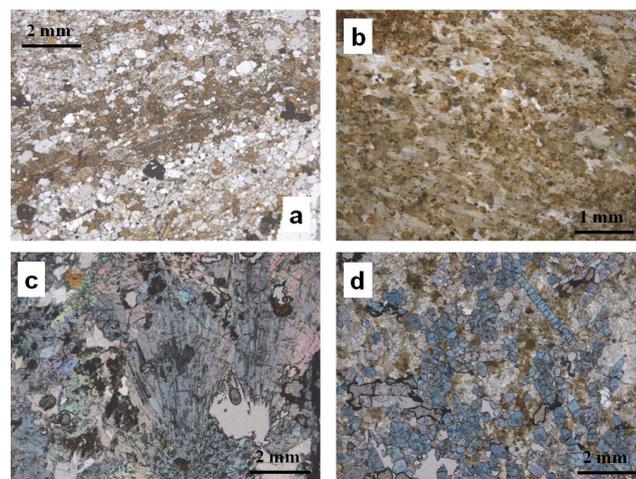


Fig.5. Fotomicrografias de rochas turmalínicas que ocorrem no contacto do maciço de Penamacor-Monsanto: (a) turmalinito bandado, com níveis ricos em turmalina alternando com níveis mais quartzosos, parecendo resultar da substituição completa da biotite em metapelitos como os representados pelas amostras 14 ou 15 (Figs. 4a, 4b e 4d) por turmalina (amostra M-3; pol.//); (b) detalhe de turmalinito bandado, mostrando os níveis com turmalina predominante (amostra P-26A; pol.//); (c) turmalinito constituído por turmalina azul, frequentemente acicular, e quartzo (amostra M-1; // pol.); (d) turmalinito constituído por turmalina azul e sericite (amostra M-2; pol.//).

Fig.5. Photomicrographs of tourmaline-rich rocks occurring on the contact zone of the Penamacor-Monsanto pluton: (a) banded tourmaline rock, showing alternate tourmaline- and quartz-rich bands, and likely to result from biotite replacement in regional metapelites like those represented by samples P-14 and P-15 (sample M-3; // pol.); (b) detail of banded quartz-tourmaline rock focusing on tourmaline-rich levels (sample P-26A; // pol.); (c) tourmalinite made of blue tourmaline and quartz (sample M-1; // pol.); (d) tourmalinite made of blue tourmaline and sericite mica (sample M-2; // pol.).

As rochas turmalínicas parecem, pois, restringir-se a certos pontos do contacto dos metassedimentos do CXG com o granito, como é o caso da localidade de Medelim, onde se registam ocorrências mais significativas dos dois tipos de *turmalinitos* acima descritos.

5. Interpretação e Discussão dos Dados

5.1. Rochas graníticas marginais

Apesar de alguma variabilidade mineralógica e geoquímica, as fácies graníticas amostradas no bordo exterior do Maciço de Penamacor-Monsanto foram identificadas como monzogranitos, mais raramente granodioritos (Fig. 6). As evidências de carácter petrográfico (presença comum de biotite castanha-avermelhada, de turmalina, por vezes de andaluzite, e de zircão e monazite) aliadas aos elevados índices de peraluminosidade ($A/CNK = 1.69 - 1.98$; Fig. 7) que caracterizam estas rochas indicam que se trata de rochas graníticas peraluminosas de tipo-S (de acordo com a classificação de White & Chappell, 1988), derivadas da anatexia de metassedimentos pelíticos alterados, tal como referido em trabalhos anteriores (e.g., Ugidos, 1990) e comum neste contexto. Como é também típico, as rochas aplíticas estudadas distinguem-se por apresentarem razões $Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)$ bastante mais elevadas (0.78 – 0.95) do que as rochas graníticas (0.19 – 0.61; Fig. 7).

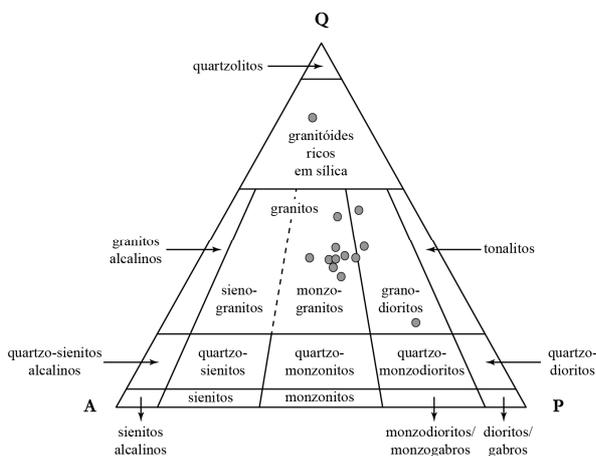


Fig. 6. Projecção das rochas graníticas amostradas no diagrama QAPF de Streckeisen (1976).

Fig. 6. Plot of sampled granitic rocks on the QAPF diagram (Streckeisen, 1976).

5.2. Metamorfismo de contacto associado ao plutão de Penamacor-Monsanto

As corneanas têm composição química bastante homogénea, independentemente da sua localização específica. Não obstante diferenças relacionadas com a concentração relativa de quartzo que contêm, as corneanas apresentam taxas de oxidação que não ultrapassam os 41% (Fig. 7). Pelo facto de apresentarem menor grau de alteração meteórica dos que os xistos mosqueados e os xistos regionais que as envolvem, os índices de peraluminosidade destas rochas ($A/CNK = 2.54 - 3.65$; Fig. 7) reproduzem talvez mais fielmente os índices originais dos metassedimentos encaixantes.

As corneanas mosqueadas constituem provavelmente uma fácies intermédia entre as corneanas granoblásticas de grão fino, que caracterizam a orla metamórfica mais interna do contacto com o granito, e os xistos mosqueados, que formam a margem mais exterior desse contacto metamórfico.

Relativamente às corneanas, os xistos mosqueados da orla do contacto e os xistos regionais encaixantes apresentam em geral taxas de oxidação bastante superiores (50 – 98%) e tendência para composições bastante aluminosas ($A/CNK = 3.07 - 3.58$ e $2.98 - 3.61$, respectivamente), denotando a predominância de filo-silicatos na sua constituição; duas amostras de xistos mosqueados, extremamente oxidadas, são exemplo da intensa lixiviação dos álcalis com o avanço da alteração ($A/CNK = 4.19$ e 4.98 ; Fig. 7).

A maior susceptibilidade destas rochas à alteração meteórica deve-se sobretudo à presença de elevados teores de filo-silicatos e consequente textura intensamente foliada, em que a água circula muito mais facilmente do que nas rochas compactas e mais ricas em quartzo e plagioclase do contacto interno com o plutão.

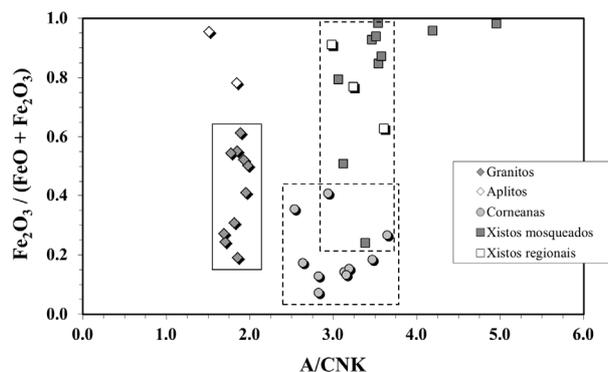


Fig. 7. Diagrama $Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)$ vs A/CNK , sendo $A/CNK = Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$: as rochas graníticas marginais do plutão de Penamacor-Monsanto apresentam graus de oxidação bastante variáveis e caracterizam-se por índices de peraluminosidade superiores a 1; as corneanas e os xistos mosqueados da orla metamórfica apresentam índices de A/CNK distintamente mais altos, mas graus de oxidação muito variáveis, sendo estes sistematicamente inferiores nas corneanas.

Fig. 7. $Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)$ vs A/CNK plot, with $A/CNK = Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$: marginal granitic rocks from the Penamacor-Monsanto pluton show wide-ranging oxidation ratios and are characterized by peraluminosity indices above unity; hornfels and spotted-schists from the contact zone have distinctly higher A/CNK indices, with varying oxidation ratios, which are consistently lower in hornfels.

Tal como referimos para as corneanas, os xistos mosqueados apresentam nuances texturais e até químicas que parecem estar mais relacionadas com a litologia específica em cada ponto do contacto do plutão com o encaixante, do que com variações dos efeitos decorrentes do próprio metamorfismo térmico em zonas diferentes do contacto, como se verifica da consulta da Tabela 3.

As paragénese mineral de auréolas de contacto em encaixante metapelítico são sensíveis à pressão e à temperatura que constituem um poderoso método para distinguir diferentes tipos bóricos de metamorfismo de contacto (Pattison & Tracy, 1991).

Tal como referem estes autores para casos similares, os xistos mosqueados e as corneanas da orla de contacto do plutão de Penamacor-Monsanto ocorrem espacialmente restritos e são geralmente rochas de grão fino, contendo frequentemente minerais alterados; nas zonas mais externas dessa auréola, as texturas e a composição mineralógica acabam por gradar para as condições térmicas que caracterizaram o metamorfismo regional.

Os factores cinéticos tipicamente associados a intrusões de granitos podem ser relevantes para a interpretação das texturas encontradas nas rochas da auréola de contacto em estudo: em muitos casos, as rochas mais próximas do bordo da intrusão, e que constituem a auréola de contacto, foram sujeitas a taxas de aquecimento mais rápidas (e provavelmente a taxas de arrefecimento também mais rápidas) do que as rochas típicas resultantes de metamorfismo regional, daí resultando as texturas

de grão fino, sem porfiroblastos, como encontradas nas corneanas da orla mais interna deste contacto.

A presença provável de cordierite como fase porfiroblástica quer nalgumas corneanas, quer na maior parte dos xistos mosqueados, como assinalada também por Gama Pereira (1976) nas corneanas das auréolas de contacto de granitos desta região, está condicionada pela composição específica do protólito metassedimentar e remete-nos para fácies metamórficas de baixo grau (< 450°C), ou baixo a intermédio (450-650°C) e baixa-P (≤ 4 kbar); mesmo em protólitos muito aluminosos, a andaluzite está geralmente ausente até ao desaparecimento completo da moscovite e do quartzo, sob estas condições P-T (Pattison & Tracy, 1991).

Estas paragénese das rochas do contacto com porfiroblastos de cordierite poderão ser explicadas por reacções prógradadas de desidratação, do tipo “moscovite + clorite + quartzo = cordierite + biotite + H₂O”, como referem Pattison & Tracy (1991).

5.3. Turmalinitos

Os turmalinitos descritos acima, particularmente importantes na região de Medelim, no contacto do granito com as rochas da orla metamórfica, poderão corresponder à turmalinização de rochas do encaixante xisto-grauváquico ou a precipitação directa de turmalina, em resultado da acção de fluidos magmáticos residuais, enriquecidos em elementos como o B (\pm F, Li, Sn) e circulando em fracturas da zona de contacto do plutão, como descreve Shelley (1993) para ocorrências idênticas encontradas junto ao contacto com granitóides de tipo-S e na vizinhança de filões e pegmatitos, onde se concentrou o fluxo de elementos raros.

As evidências texturais relativas ao primeiro tipo de turmalinitos descrito parecem suficientes para afirmarmos que se trata de rochas metassomáticas de substituição, resultantes da substituição por turmalina de níveis biotíticos em metassedimentos quartzo-micáceos bandados, por acção de fluidos tardi-magmáticos enriquecidos em B em vários pontos da orla de contacto do plutão de Penamacor-Monsanto. São conhecidos muitos casos idênticos deste tipo de turmalinização por substituição, em contextos metapelíticos associados a intrusões graníticas, quer no Maciço Ibérico (e.g., Pesquera *et al.*, 2005), quer noutros enquadramentos (e.g., Slack *et al.*, 1993; Garba, 1996).

Os outros turmalinitos, que contêm turmalina azul grosseira e geralmente exibindo formas euédricas bem desenvolvidas, assemelham-se aos associados a plutões graníticos peraluminosos da Cornualha, no sudoeste de Inglaterra (London & Manning, 1995), e poderão corresponder a material precipitado directamente a partir de fluidos tardi-magmáticos enriquecidos em B e outros componentes, nas fracturas que cortam a zona de contacto.

5. Conclusões

Apesar de algumas limitações na extensão da amostragem que serviu de base ao presente trabalho, parecem claros alguns aspectos importantes relacionados com o maciço granítico de Penamacor-Monsanto e a sua auréola de metamorfismo de contacto.

As rochas graníticas marginais deste plutão são monzogranitos e granodioritos peraluminosos relativamente heterogéneos, quer no detalhe textural, quer mineralógico, mesmo dentro de cada fácies definida por Neiva & Campos (1992, 1993).

As rochas da auréola metamórfica obedecem também a padrões de metamorfismo de contacto previamente descritos em

contextos meta-pelíticos de baixo grau (e.g., Spry, 1974; Pattison & Tracy, 1991), equivalentes ao caso estudado: a uma estreita orla de corneanas quartzo-feldspáticas, de grão fino ou muito fino, resultante de aquecimento extremamente rápido pela intrusão granítica, seguem-se gradualmente corneanas mosqueadas e xistos mosqueados, que constituem as rochas melhor representadas, em extensão aflorante, desta auréola de contacto. A morfologia consistentemente ovalada e a presença frequente de micro-inclusões de quartzo e mica nos porfiroblastos-fantasma destes dois litótipos sugerem que estes porfiroblastos tenham sido originalmente cordierite, muito embora o seu aspecto macroscópico se possa confundir com o de andaluzite. A variabilidade textural encontrada dentro de cada um destes litótipos prende-se essencialmente, em nossa opinião, com a variabilidade mineralógica do próprio encaixante, que exhibe todas as gradações entre fácies filitosas e outras de carácter mais gresoso, ou mesmo grauvacóide. Uma das dificuldades no estudo das litologias deste contacto prende-se com o avançado estado de alteração meteórica que as afecta, em particular as rochas de textura foliada. Dada a impossibilidade de obter uma amostragem contínua de toda a orla do granito, é impossível afirmar se a estreita faixa de corneanas é ou não contínua, mas pensamos que ela seja particularmente importante nos locais do contacto onde o xisto regional exhibe fácies mais gresosas.

Independentemente das texturas diversas que apresentam as rochas da orla metamórfica do granito de Penamacor-Monsanto, as suas paragénese (quartzo + biotite + moscovite \pm plagioclase, ou quartzo + biotite + moscovite + cordierite \pm plagioclase) parecem indicar condições de baixa-P (≤ 3.5 kbar) e baixa-T (≤ 450 °C), pelo menos nos níveis mais superficiais da intrusão.

As rochas turmaliníticas aflorantes em vários pontos deste contacto, e em particular na localidade de Medelim, revestem-se de especial interesse por serem indicadoras da actividade de fluidos tardi-magmáticos enriquecidos em B, e talvez noutros elementos, e cuja circulação esteve certamente condicionada pelo padrão de fracturação que afecta o maciço granítico. Estão presentemente em curso estudos químicos e isotópicos das turmalinas destas rochas com o objectivo de melhor interpretar estas ocorrências.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Sr. Alberto Verde a produção das lâminas-polidas utilizadas neste estudo e aos alunos Vili Boykova Grigorova e José Virgílio Fonseca a preparação de algumas amostras para análise química de rocha-total.

Uma palavra de reconhecimento é também devida ao Professor Doutor Carlos Inverno (LNEG), que acompanhou parte da primeira missão de campo e forneceu algumas informações cartográficas úteis para a campanha de amostragem pretendida, e ao Dr. Luís Godinho, que amavelmente nos cedeu amostras suas de rochas turmaliníticas da área de Medelim que foram utilizadas neste estudo.

Este trabalho foi financiado pela FCT, através do Projecto METMOB – PTDC/CTE-GIX/116204/2009.

Referências

- Acciaoli, M.H., Santos J.F., Munhá, J.M. (2005). Ar-Ar dates for two different stages of the Variscan D3 recorded in metapelites of Serra da Freita (North - Central Portugal). *Geophys. Res. Abs.*, **7**, 10076.
- Antunes, I.M.H.R., Neiva, AMR, Silva, M.M.V.G., Corfu, F. (2009). The genesis of I- and S-type granitoid rocks of the Early Ordovician Oledo pluton, Central Iberian Zone (central Portugal). *Lithos*, **111**, 168-185.
- Azevedo, M.R., Valle Aguado, B., Nolan, J., Martins M., Medina J. (2005). Origin and emplacement of syn-orogenic Variscan granitoids in Iberia - the Beiras massif. In: Carosi R., Dias R., Lacopini D.,

- Rosenbaum G. (Eds.), The southern Variscan belt, *Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition*, **19**, Paper 7.
- Bea, F., Sanchez González de Herrero, J.G., Serrano Pinto, M. (1987). Una compilación geoquímica elementos mayores para los granitoides del macizo Hespérico. In: Bea *et al.* (Eds.), *Geología de los granitoides y rocas asociadas del macizo Hespérico*. Ed. Rueda, 87-193.
- Conde, L.E.N., Rachinhas, P.C.R.S., Rabaça, T.J.L. (2000). Aspectos metalogenéticos da região de Castelo-Branco: parâmetros controladores das mineralizações e abordagem dos impactes ambientais associados. Dept. Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. *Relatório do Projecto Praxis XXI - 2/2.1/CTA/81/94*. Cap. IV: Geologia Regional, 13-17.
- Corretgé, L.G., Bea, F., Suárez, O. (1985). Las características geoquímicas del Batolito de Cabeza de Araya (Cáceres, España): Implicaciones petrogenéticas. *Trabajos de Geología*, **15**, 219-238.
- Dias, G., Simões, P.P., Ferreira, N., Leterrier, J. (2002). Mantle and Crustal Sources in the Genesis of Late-Hercynian Granitoids (NW Portugal): Geochemical and Sr-Nd Isotopic Constraints. *Gondwana Research*, **5**, 287-305.
- Diez Balda, M.A., Vegas, R., Gonzalez Lodeiro, F. (1990). Structure of autochthonous sequences of Central Iberian Zone. In: Dallmeyer R. D., Martinez Garcia (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, 172-188.
- Ferreira, N., Iglésias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A., Ribeiro, M.L. (1987). Granitoides da zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: F. Bea, A. Carmina, J.C. Gonzalo, M.L. Plaza, J.M.L. Rodrigues (Eds.), *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico. Libro Homenaje a L.C.G. Figueirola*. Editorial Rueda, Madrid, 37-53.
- Ferreira Pinto, A.F., Matos, C.A.R. (2000). Aspectos metalogenéticos da região de Castelo-Branco: parâmetros controladores das mineralizações e abordagem dos impactes ambientais associados. Dept. Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. *Relatório do Projecto Praxis XXI - 2/2.1/CTA/81/94*. Cap. V: Alguns Aspectos da Petrologia, 18-50.
- Gama Pereira, L.C. (1976). Notícia sobre o “Complexo Xisto-Grauváquico” entre Capinha e Penamacor. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*, **82**, 61-66.
- Garba, I. (1996). Tourmalinization related to Late Proterozoic-Early Paleozoic lode gold mineralization in the Bin Yauri area, Nigeria. *Mineral. Deposita*, **31**, 201-209.
- Julivert, M., Fontboté, J., Ribeiro, A., Conde, L. (1974). *Memória explicativa del Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares. Escala 1/1000000*. Inst. Geol. Min. España, Madrid, 133.
- London, D. & Manning, D.A.C. (1995). Chemical variation and significance of tourmaline from Southwest England. *Econ. Geol.*, **90**, 495-519.
- Neiva, A.M.R., Campos, T.F.C. (1992). Genesis of the zoned granitic pluton of Penamacor-Monsanto, Central Portugal. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*, **114**, 51-68.
- Neiva, A.M.R., Campos, T.F.C. (1993). The zoned granitic pluton of Penamacor-Monsanto, Central Portugal: hydrothermal alteration. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*, **116**, 21-47.
- Neiva, A.M.R., Gomes, M.E.P. (2001). Diferentes tipos de granitos e seus processos petrogenéticos: granitos hercínicos portugueses. *Memórias da Academia das Ciências de Lisboa*, **XXXIX**, 53-95.
- Neiva, A.M.R., Williams, I.S., Ramos, J.M., Gomes, M.E.P., Silva, M.M.V.G., Antunes, I.M.H.R. (2009). Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of Early Ordovician granodiorite and Variscan two-mica granites from the Gouveia area, Central Portugal. *Lithos*, **111**, 186-202.
- Oen, Y.S. (1970). Granite intrusion, folding and metamorphism in central northern Portugal. *Bol. Geol. Minero*, **LXXXI**, II-III, 271-298.
- Oliveira, J.T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M.T., Monteiro, J.H. (1992). *Carta Geológica de Portugal na escala 1/500 000*, (5ª Ed). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Pesquera, A., Torres-Ruiz, J., Gil-Crespo, P.P., Jiang, S.Y. (2005). Petrographic, chemical, and B-isotopic insights into the origin of tourmaline-rich rocks and boron recycling in the Martinamor antiform (Central Iberian Zone, Salamanca, Spain). *J. Petrol.*, **46**, 1013-1044.
- Pattison, D.R.M., Tracy, R. J. (1991). Phase equilibria and thermobarometry of matapelites. In: Kerrick, D.M. (ed.), *Contact Metamorphism. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, **26**, 105-206.
- Ramírez, J.A., Grundvig, S. (2000). Causes of geochemical diversity in peraluminous granitic plutons: the Jalama pluton, Central-Iberian Zone (Spain and Portugal). *Lithos*, **50**, 171-190.
- Reavy, R.J. (1989). Structural controls on metamorphism and syn-tectonic magmatism: The Portuguese Hercynian collision belt. *J. Geol. Soc. London*, **146**, 649-657.
- Ribeiro, A., Quesada, C., Dallmeyer, R.D. (1990). Geodynamic Evolution of the Iberian Massif. In: Dallmeyer R.D., Martinez Garcia (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, 399-409.
- Ribeiro da Costa, I., Antunes, I.M., Guimarães, F., Ramos, J.M.F., Recio, C., Barriga, F.J.A.S., Mourão, C. (2012a). Compositional trends in tourmalines from granites and quartz-tourmaline rocks from the Penamacor-Monsanto pluton (Eastern Central Portugal). *22nd V.M. Goldschmidt Conference, Montréal*, 2012). Abstract #220CD.
- Ribeiro da Costa, I., Antunes, I.M., Guimarães, F., Rodrigues, P.C.R., Barriga, F.J.A.S., Mourão, C., Farinha Ramos, J.M., Récio, C. (2012b). Transition metals responsible for striking colour variation in tourmalines: an EMP study of tourmalines from granites and quartz-tourmaline rocks associated to the Penamacor-Monsanto pluton (Eastern Central Portugal). *First European Mineralogical Conference, Frankfurt*, 2012). Abstract EMC2012-414.
- Roger, F., Respaut, J.P., Brunel, M., Matte, P., Paquette, J.L. (2004). Première datation U-Pb des orthogneiss ocellés de la zone axiale de la Montagne noire (Sud du Massif Central): nouveaux témoins du magmatisme ordovicien dans la chaîne Varisque. *C. R. Geoscience*, **336**, 19-28.
- Schermerhorn, L.J.G. (1956). Igneous, metamorphic and ore geology of the Castro Daire - São Pedro do Sul - Satão region (northern Portugal). *Comun. Serv. Geol. Portugal*, **37**, 1-617.
- Shelley, D. (1993). *Igneous and Metamorphic Rocks under the microscope: classification, textures, microstructures and mineral preferred orientations*. Chapman & Hall, London, 445.
- Slack J.F., Palmer M.R., Stevens B.P.J., Barnes R.G. (1993). Origin and significance of tourmaline-rich rocks in the Broken Hill district, Australia. *Econ. Geol.*, **88**, 505-541.
- Sousa, M.B. (1985). Perspectiva sobre os conhecimentos actuais do Complexo Xisto-Grauváquico de Portugal. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra*, **100**, 1-16.
- Spry, A. (1974). *Metamorphic Textures*. Pergamon Press, Oxford, 2nd edition, 350.
- Strecheisen, A. L. (1976). Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: a provisional attempt. *Neues Jahrb. Mineral., Monatsh.*, **1**, 1-15.
- Ugidos, J.M. (1990). Granites as a paradigm of genetic processes of granitic rocks: I-types vs S-types. In: Dallmeyer, R.D., Martinez, E. (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 189-206.
- 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.
- Vernon, R.H., Clarke, G.L. (2008). *Principles of Metamorphic Petrology*. Cambridge University Press, New York, 446.
- White, A. J. R., Chappell, B. W. (1988). Some supracrustal (S-type) granites of the Lachlan Fold Belt. *R. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, **79**, 169-181.
- Whitney, D.L., Evans, B.W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am. Mineral.*, **95**, 185-187.