

CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E GEOQUÍMICAS DAS MINERALIZAÇÕES FERRO-TITANO-VANADÍFERAS EM GABROS DO COMPLEXO ÍGNEO DE BEJA

A. P. Jesus¹, A. Mateus^{1,2}, J. Figueiras^{1,2}, V. Oliveira³, P. Conceição¹, C. Rosa³

¹Centro de Recursos Minerais, Mineralogia e Cristalografia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, creminer@fc.ul.pt

²Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, geofcul@fc.ul.pt

³Instituto Geológico e Mineiro, Beja, igmebeja@ip.pt

ABSTRACT

In the Odivelas-Ferreira do Alentejo area, the gabbroic domain of the Beja Igneous Complex includes three major Series that display distinct mineralogical-geochemical characteristics and preserve an heterogeneously developed magmatic layering. Series I comprises three different Groups of gabbroic layers variably enriched in interstitial Ti-magnetite (\pm Ti-maghemite) and ilmenite that show always significant amounts of V. In the Lower Group of Series I, troctolitic lenses, oxide-rich mafic cumulates and irregular masses of variable dimension of oxide ores occur within the olivine leucogabro sequence. The ores are chiefly composed of V-Ti bearing ferromagnetic spinels that chemically correspond to solid solutions between Ti-magnetite and Ti-maghemite; V-rich ilmenite and late hematite are also present. Ore genesis is envisaged as a result of relatively late magmatic segregation processes that enabled the crystallisation of Mt-Usp aggregates subsequently strongly oxidised under high temperatures and non-equilibrium conditions.

RESUMO

Na região de Odivelas-Ferreira do Alentejo, o domínio gabróico do Complexo Ígneo de Beja comporta três Séries que apresentam diferentes características mineralógicas e geoquímicas e preservam bandado magmático com desenvolvimento heterogéneo. A Série I integra três Grupos de rochas gabróicas variavelmente enriquecidas em Ti-magnetite (\pm Ti-maghemite) e ilmenite intersticiais que, por norma, revelam conteúdos apreciáveis em V. No Grupo Inferior da Série I, níveis troctolíticos, cumulados máficos enriquecidos em óxidos e minérios de Fe-Ti-V ocorrem no seio da sequência de leucogabros olivínicos. Os minérios são constituídos por espinelas ferromagnéticas ricas em Ti e V, cuja composição química corresponde a soluções sólidas entre a Ti-magnetite e a Ti-maghemite; ilmenite vanadífera e hematite tardia ocorrem acessoriamente. A génese destes minérios aparenta resultar de processos relativamente tardios de segregação magmática que conduziram à cristalização de agregados de Mt-Usp subsequentemente sujeitos a forte oxidação sob temperaturas elevadas em condições de não-equilíbrio.

INTRODUÇÃO

No Complexo Ígneo de Beja é possível identificar várias unidades com diferentes características petrológicas e geoquímicas. A Unidade Odivelas, assim definida por ANDRADE (1984), compreende diferentes domínios rochosos que, não raras vezes separados por importantes zonas de cisalhamento, integram sequências vulcânicas, intrusões hipabissais ou séries gabróicas bandadas (*e.g.* SANTOS *et al.*, 1990). A WNW de Odivelas, no seio do domínio gabróico, ocorrem acumulações anómalas de óxidos ferromagnéticos que, na década de 60, foram prospectadas para ferro, realizando-se então 6 poços exploratórios de pequena profundidade, dos quais apenas os desmontes e os relatórios técnicos a eles referentes se encontram acessíveis. Com o propósito de caracterizar a extensão e natureza mineralógico-geoquímica destes minérios, bem como as fácies gabróicas que os enquadram, procedeu-se ao levantamento cartográfico da região envolvente dos domínios rochosos enriquecidos em óxidos ($\approx 9 \text{ km}^2$) à escala 1:15000. Os resultados obtidos revelam que, para além da presença de domínios fortemente metassomatizados na proximidade de diversos acidentes tectónicos, existe um bandado magmático (já identificado por SILVA *et al.*, 1970), com atitude geral variável entre NW-SE e E-W, inclinando menos de 30° para SW-S. Ao bandado sobrepõe-se, por vezes, uma foliação subparalela, mimetizada por achatamento e orientação preferencial dos grãos de plagioclase e piroxena, atribuível a mecanismos de compactação síncronos da cristalização; apenas em alguns dos locais adjacentes a importantes corredores de cisalhamento, se verifica

divergência entre a atitude da foliação e do bandado, o qual, por sua vez, também se orienta de forma anómala.

A cartografia realizada permitiu identificar três Séries magmáticas que, da base para o topo, se sucedem de NW para SE, e cujas características mineralógico-geoquímicas denunciam certa megaciclicidade dos processos magmáticos (IRVINE, 1987). A Série I compreende três Grupos distintos. O Grupo Inferior integra predominantemente uma sequência de leucogabros olivínicos, por vezes apenas leucogabros, no seio da qual se identificaram níveis de natureza troctolítica e corpos lenticulares (e/ou blocos?) de cumulados máficos enriquecidos em óxidos intersticiais, para além de massas irregulares de minério ferromagnético com dimensões variáveis. O Grupo Intermédio compreende essencialmente uma sequência de leucogabros, sobre a qual se desenvolve um nível (possivelmente descontínuo) de anortositos; as rochas constituintes deste Grupo contactam gradualmente com as que formam os Grupos Inferior e Superior. O Grupo Superior, consiste, por sua vez, numa sequência monótona e relativamente maciça de leucogabros olivínicos com algumas lentículas descontínuas de anortositos. A passagem à sequência gabróica da Série II é geralmente sublinhada por decréscimo acentuado da abundância relativa dos óxidos intersticiais. Na Série II o bandado (WNW-ESE a E-W, <30° SSW-S) apenas é reconhecível nos domínios de interface entre as litologias identificadas (gabros olivínicos, leucogabros olivínicos grosseiros e raras lentículas descontínuas de anortositos). A Série III ocorre a Sul da área cartografada, sendo difícil apreciar o contacto estabelecido com a Série II em virtude da extensa cobertura sedimentar detrítica; a caracterização sumária das litologias inclusas na Série III, bem como das mineralizações sulfuretadas nela identificadas, podem ser consultadas em MATEUS *et al.* (neste mesmo volume). O presente resumo tem como objectivo primordial a apresentação sumária das características apresentadas pelas rochas gabróicas da Série I, dando especial ênfase às que constituem o Grupo Inferior; as mineralizações ferro-titano-vanadíferas que se incluem neste contexto geológico serão também abordadas, discutindo-se sumariamente a hipótese de trabalho que actualmente se coloca relativamente à sua génese.

MATERIAIS E MÉTODOS

A amostragem das rochas gabróicas foi condicionada pela distribuição fortemente heterogénea dos afloramentos existentes na área cartografada, pelo que um número significativo de amostras foi colhido ao longo da ribeira de Odivelas e nas pedreiras existentes na região. As amostras de minérios foram colhidas junto aos antigos trabalhos de prospecção. Todas as amostras foram cortadas com serras diamantadas. A análise petrográfica (em microscópio óptico de luz transmitida e reflectida) e subsequente contagem de pontos (400 por lâmina delgada) recaíram sobre domínios representativos de cada exemplar não metassomatizado. A composição química dos principais silicatos e óxidos foi determinada com a microsonda electrónica JEOL JXA 733 de três canais (Centro de Geologia - FCUL) equipada com os cristais TAP, LIF e PET; as análises pontuais foram efectuadas com um feixe fino (5 μm), 25 nA de corrente de emissão e 15kV ou 18 kV de potencial de aceleração para as análises de silicatos ou de óxidos, respectivamente; o tempo de contagem foi de 20 s; a calibração do equipamento teve lugar antes, durante e após cada sessão de trabalho, recorrendo à análise de padrões minerais. Após conveniente pulverização, porções maciças de minério foram analisadas por difractividade de Raios X, usando para o efeito a radiação Cu K α e o difractivómetro Philips PW 1710 equipado com um monocromador de grafite; o goniómetro usado apresenta uma fenda fixa divergente e uma fenda receptora com 0,2 mm; as contagens foram realizadas de modo contínuo em incrementos 2 θ de 0,02°, envolvendo tempos de contagem de 1,250 s; a identificação das fases minerais presentes foi efectuada com base na comparação entre as reflexões detectadas nos registos efectuados e as indicadas em fichas PDF(ICDD-JCPDS); os registos foram corrigidos, sempre que possível, utilizando o quartzo como padrão interno. As análises químicas multi-elementares de rochas e minérios foram efectuadas no Activation Laboratories Ltd. (Canadá); a análise de rochas gabróicas em domínios adjacentes à zona mineralizada envolveu o conjunto de métodos listados no código de encomenda 4 LITHORES QUANT; para as restantes (incluindo exemplares representativos de domínios rochosos variavelmente metassomatizados) utilizaram-se os procedimentos implícitos no código 4 LITHORES; a análise dos minérios foi executada de

acordo com as normas referenciadas no código 1H, determinando-se adicionalmente a concentração em FeO por titulação; todos os métodos analíticos utilizados e limites de detecção podem ser consultados em <http://www.actlabs.com>.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O exame petrográfico das litologias aflorantes e a subsequente avaliação da variabilidade composicional admitida pelos principais minerais que nelas ocorrem revela que os

Tabela 1						
Análises representativas de litologias constituintes dos três Grupos da Série I						
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	20.57	50.16	46.43	46.74	54.44	47.09
Al ₂ O ₃	2.90	19.90	17.85	17.01	27.68	18.55
Fe ₂ O ₃	47.46	5.59	10.18	11.51	0.69	13.85
MnO	0.37	0.11	0.19	0.13	0.01	0.15
MgO	18.16	7.19	5.70	6.81	0.13	5.30
CaO	8.84	12.11	9.54	13.06	9.97	9.27
Na ₂ O	0.38	3.11	3.54	2.65	5.93	3.69
K ₂ O	0.04	0.25	0.26	0.15	0.30	0.21
TiO ₂	1.27	0.59	3.48	1.63	0.10	2.30
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03
LOI	0.00	0.47	1.72	0.31	1.10	-0.32
V	438	155	466	532	10	506
Cr	63	<20	<20	237	<20	<20
Co	110	22	29	50	10	25
Ni	58	<20	<20	28	<20	<20
Cu	85	19	64	92	<10	16
Zn	114	<30	<30	56	<30	65
Sr	16	398	403	352	644	434
Y	11	6.5	6.2	8.5	1.1	4.5
Zr		12	20	16	7	10
Nb		<0.2	0.7	<0.2	<0.2	<0.2
Sb	<0.1	0.4	0.6	<0.2	0.2	<0.2
Cs	<1	0.2	0.5	0.2	0.3	0.2
Ba	<50	86	130	73	178	126
La	0.8	1.59	1.45	1.30	1.91	1.25
Ce	<3	3.75	3.13	3.43	3.40	2.76
Pr		0.52	0.46	0.55	0.35	0.39
Nd	<5	3.08	2.79	3.58	1.64	2.34
Sm	1.3	0.96	0.86	1.16	0.30	0.67
Eu	0.5	0.631	0.848	0.631	1.02	0.841
Gd		1.10	1.06	1.43	0.27	0.80
Tb	<0.5	0.21	0.19	0.27	0.03	0.14
Dy		1.19	1.16	1.57	0.17	0.82
Ho		0.24	0.22	0.31	0.03	0.16
Er		0.64	0.63	0.84	0.08	0.43
Tm		0.086	0.080	0.11	<0.005	0.06
Yb	1.3	0.54	0.49	0.68	0.06	0.36
Lu	0.19	0.078	0.073	0.097	0.008	0.054
Hf	<1	0.3	0.4	0.4	<0.1	0.3
Ta	<0.5	0.02	0.20	0.01	<0.01	0.04
Bi	0.7	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2

G. Inferior: 1 – Cumulado máfico; 2 – Leucogabro olivínico com enstatite; 3 – Leucogabro olivínico. G. Intermediário: 4 – Leucogabro; 5 – Anortosito; 6 – Leucogabro olivínico com enstatite. Óxidos de elementos maiores em %, elementos menores em ppm. Ferro total na forma de Fe₂O₃.

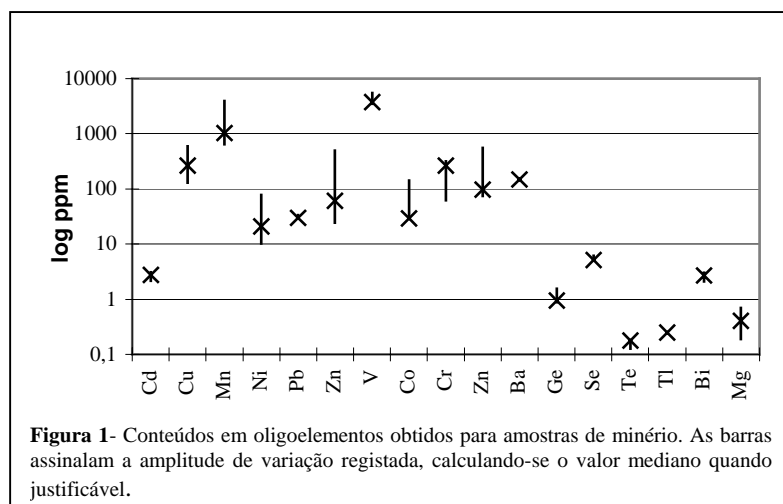
leucogabros olivínicos são preponderantemente constituídos por plagioclase An₄₇₋₆₁, clinopiroxena En₃₆₋₆₂Wo₃₇₋₄₆ e olivina Fo₅₂₋₆₀, compreendendo sempre quantidades acessórias de enstatite, espinelas ferrotitaníferas e de ilmenite. Os cumulados máficos apresentam variações modais que justificam a sua classificação como melanogabro olivínicos, websteritos e wehrlitos. Os melanogabros olivínicos são essencialmente constituídos por plagioclase An₄₄₋₅₀, clinopiroxena En₃₉₋₄₃Wo₃₇₋₄₃ e olivina Fo₄₂₋₄₈, para além de enstatite e de abundantes óxidos intersticiais (< 25% modal). Os websteritos contêm clinopiroxena En₃₉₋₄₂Wo₄₀₋₄₅, enstatite, olivina Fo₄₃₋₄₅ e cerca de 10% de óxidos intersticiais. Nos wehrlitos, pelo contrário, o conteúdo em óxidos (maioritariamente espinelas) pode atingir 28%; nestas rochas a clinopiroxena En₄₀₋₄₂Wo₄₀₋₄₄ e olivina Fo₄₇₋₆₁ constituem as restantes fases minerais dominantes. Os leucogabros, contendo plagioclase An₄₇₋₅₇, clinopiroxena En₄₄₋₄₅Wo₁₆₋₁₉, enstatite e olivina (muito alterada), podem também apresentar quantidades não negligenciáveis de óxidos intersticiais (< 10%). Nos anortositos, a plagioclase tem composição An₄₉₋₅₆.

Excepto nos cumulados máficos e minérios, a plagioclase é, sem dúvida, o mineral mais abundante; regra geral, integra uma matriz quasi-equigranular envolvendo os restantes minerais que, na maioria das situações, aparentam ter cristalizado posteriormente. A enstatite forma usualmente orlas em redor das olivinas (coronas de reacção). Não se observam quaisquer orlas de reacção entre os óxidos intersticiais e os silicatos. As fases hidratadas de origem não metassomática são escassas, sendo, contudo, digna de nota a presença esporádica de horneblenda castanha (com conteúdos em TiO₂ e Na₂O ≈ 2wt%) em torno de óxidos intersticiais, bem como o desenvolvimento muito tardio de horneblendas verdes (algumas com elevado conteúdo em ferro); estas últimas crescem sobre a matriz de plagioclase, selando em alguns casos filonetes transgranulares. Nos cumulados máficos, os silicatos desenvolvem vulgarmente contactos rectilíneos e pontos triplos, a menos que a quantidade de óxidos intersticiais o impeça.

Nestes casos, os grãos mistos anédricos de titanomagnetite-ilmenite são comuns; a titanomagnetite apresenta numerosas inclusões orientadas de pleonastos, bem como domínios de coloração violeta que correspondem a aumentos relativos da componente ulvoespinelífera. Na presença de agregados compostos, a espinela (variavelmente enriquecida em Ti) apresenta exsoluções lamelares de ilmenite as quais formam arranjos geométricos complexos, frequentemente reticulares. As ilmenites apresentam em todos os casos, finas exsoluções de hematite e conteúdos em $V_2O_3 \leq 2.3$ wt%; as espinelas ferro-titaníferas ($TiO_2 \leq 27.04$ wt%) apresentam também concentrações não negligenciáveis em $V_2O_3 (\leq 1.8$ wt%,).

As assinaturas químicas obtidas para exemplares representativos das diferentes litologias constituintes dos três Grupos da Série I são, na sua essência, consistentes com as abundâncias relativas determinadas para os vários minerais que as integram (Tabela 1). Acresce salientar os conteúdos relativamente elevados em Sr e Ba, passíveis de correlação com a maior ou menor predominância de plagioclase e de clinopiroxena. As concentrações em elementos do grupo das Terras Raras são baixas, como aliás é expectável em rochas gabróicas; os padrões de concentração destes elementos químicos normalizada relativamente aos condritos revelam a presença de anomalias positivas em Eu (tanto mais pronunciadas quanto maior é a quantidade de plagioclase) e declives geralmente negativos, com excepção dos casos em que a maior percentagem modal de olivina e/ou ortopiroxena justifica plenamente a subida registada para o ramo das terras raras pesadas.

No que respeita aos minérios ferromagnéticos importa dizer que estes compreendem uma matriz essencialmente (73 a 81%) composta por grãos equidimensionais e frequentemente poligonais de natureza maghemítica (1-3mm), ocorrendo ainda (4-15%) grãos anédricos



poi quilíticos de ilmenite de grande dimensão (< 15 mm). O conjunto é ocasionalmente cortado por veios dilatacionais zonados preenchidos por hematite \pm goethite. A ilmenite apresenta tonalidade rosada mais intensa que o habitual, raras exsoluções de hematite e conteúdos em V_2O_3 inferiores a 3.03 wt%. As espinelas matriciais não mostram exsoluções de qualquer tipo e exibem, por norma, coloração homogénea acastanhada se bem que processos tardios de oxidação conduzam localmente a transformações texturais e químicas destes agregados, permitindo a deposição de hematite ao longo de vénulas anastomosadas e/ou de microfracturas inter-transgranulares. A análise química pontual das espinelas ferromagnéticas revela conteúdos em $TiO_2 \leq 27.04$ wt%, $Al_2O_3 \leq 10$ wt%, $0.11 \leq V_2O_3 \leq 2.7$ wt% e quantidades traço de $ZnO (\leq 0.86$ wt%), $MnO (\leq 0.66$ wt%) e $Cr_2O_3 (\leq 0.14$ wt%). A composição química global dos minérios confirma a predominância do Fe_2O_3 (53.53 a 68.46 wt%) relativamente ao FeO (1.44-7.03 wt%) e concentrações em TiO_2 (6.4-10.05wt%) e em vanádio (3514 a 5520ppm) que atestam claramente a sua natureza titanovanadífera; conteúdos não negligenciáveis em vários oligoelementos foram adicionalmente obtidos (fig. 1).

loração homogénea acastanhada se bem que processos tardios de oxidação conduzam localmente a transformações texturais e químicas destes agregados, permitindo a deposição de hematite ao longo de vénulas anastomosadas e/ou de microfracturas inter-transgranulares. A análise química pontual das espinelas ferromagnéticas revela conteúdos em $TiO_2 \leq 27.04$ wt%, $Al_2O_3 \leq 10$ wt%, $0.11 \leq V_2O_3 \leq 2.7$ wt% e quantidades traço de $ZnO (\leq 0.86$ wt%), $MnO (\leq 0.66$ wt%) e $Cr_2O_3 (\leq 0.14$ wt%). A composição química global dos minérios confirma a predominância do Fe_2O_3 (53.53 a 68.46 wt%) relativamente ao FeO (1.44-7.03 wt%) e concentrações em TiO_2 (6.4-10.05wt%) e em vanádio (3514 a 5520ppm) que atestam claramente a sua natureza titanovanadífera; conteúdos não negligenciáveis em vários oligoelementos foram adicionalmente obtidos (fig. 1).

Não sendo de esperar a cristalização de espinelas maghemíticas primárias nas condições físico-químicas de formação das rochas encaixantes, coloca-se o problema da determinação das condições em que a maghemitização ocorreu. Termodinamicamente, a oxidação total do Fe em magnetites e ulvoespinelas deveria conduzir à formação de hematite, a menos que as condições em que a oxidação se dá desfavoreçam cineticamente a inversão estrutural espinela-hematite. Em condições supergénicas superficiais esse não é normalmente o caso e, de facto, nos minérios

em estudo, a hematite observada restringe-se ao preenchimento tardio de espaços abertos no seio dos agregados maghemíticos. Por outro lado, a maghemitização das espinelas ferromagnéticas intersticiais dos gabros não ocorre ou apenas se detecta de forma incipiente. Tudo isto sugere que o processo de oxidação que levou à formação do minério maghemítico ocorreu a alta temperatura (< 600°C) e em zonas relativamente localizadas de forte potencial de oxidação, tendo os restantes catiões existentes na espinela original (especialmente Al e V) actuado como estabilizadores da respectiva estrutura (BANERJEE, 1991). As relações texturais estabelecidas entre os óxidos e os silicatos sugere, por último, que a génese das acumulações anómalas de magnetite e ulvoespinela pode ser imputável a processos relativamente tardios de segregação magmática.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio de Carlos Carvalho e de Octávio Chaveiro na concretização das tarefas relacionadas com a difractometria de RX e com a microssonda electrónica, respectivamente. Todas as análises químicas, bem como as actividades de campo desenvolvidas por A. Mateus e A. P. Jesus foram financiadas pelo projecto 12/2.1/CTA/82/94 – PROGEREMIN.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. A. (1984) - "Sobre a originalidade (ou talvez não) do Maciço de Beja no Sudoeste Peninsular". *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra*, **97** – 115-132.
- BANERJEE S. K. (1991) – "Magnetic properties of Fe-Ti Oxides. In: Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance" (Lindsley, D. H. – ed.), *Reviews in Mineralogy*, **25**, Mineralogical Society of America - 107-128.
- IRVINE T. N. (1987) – "Glossary of terms for layered intrusions". In: *Origins of Igneous Layering* (Parsons, I. – ed.), D. Reidel Publishing Company: 641-647
- MATEUS, A.; JESUS, A. P.; CONÇEIÇÃO, P.; OLIVEIRA, V.; ROSA, C. (Presente Volume) – "Natureza mineralógica e geoquímica das mineralizações sulfuretadas em gabros do complexo ígneo de Beja; algumas questões relativas à sua génese."
- SANTOS, J. F. ; ANDRADE, A. S. ; MUNHÁ, J. M. (1990) - "Magmatismo Orogénico Varisco no Limite Meridional da Zona de Ossa Morena". *Comun. Ser. Geol. Portugal*, Lisboa, **76**: 91 - 124.
- SILVA, L. C.; QUADRADO, R.; RIBEIRO, L.; (1970) - "Nota prévia sobre a existência de uma estrutura zonada e de anortositos no maciço gabro-diorítico de Beja". *Bol. Mus Lab. Mineral. Geol. Univ. Lisboa*, **11**: 223 – 232.