

RECURSOS MINERAIS METÁLICOS

4ºAno – 1º Semestre

Unidade de Trabalhos Práticos nº1

Jazigos Magmáticos



McBirney and Noyes (1979) J. Petrol., 20, 487

Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da
Universidade de Lisboa

Lisboa, 2006

1. Nota introdutória

Os jazigos magmáticos correspondem a jazigos formados por processos **magmatogénicos**, como sejam a cristalização fraccionada, a diferenciação magmática, ou a mistura de magmas. Esta tipologia de jazigos inclui para além dos pegmatitos, abordados numa UTP própria, mineralizações de REE, Nb, Ti, Zr, U, Th, (P, F, Cu, Ba, Sr) associadas a rochas carbonatíticas, mineralizações diamantíferas associadas a kimberlitos, e mineralizações de **Cr, Ti, Fe, Ni, Cu** e **EGPt** (elementos do grupo da platina) associadas a rochas **máficas-ultramáficas**. A presente UTP apenas diz respeito a este último grupo de mineralizações, espacial e geneticamente associadas a rochas magmáticas máficas e ultramáficas. Importa portanto relembrar a classificação deste tipo particular de rochas, que assenta fundamentalmente na proporção relativa de olivina, clinopiroxenas, ortopiroxenas e plagioclases (Fig. 1)

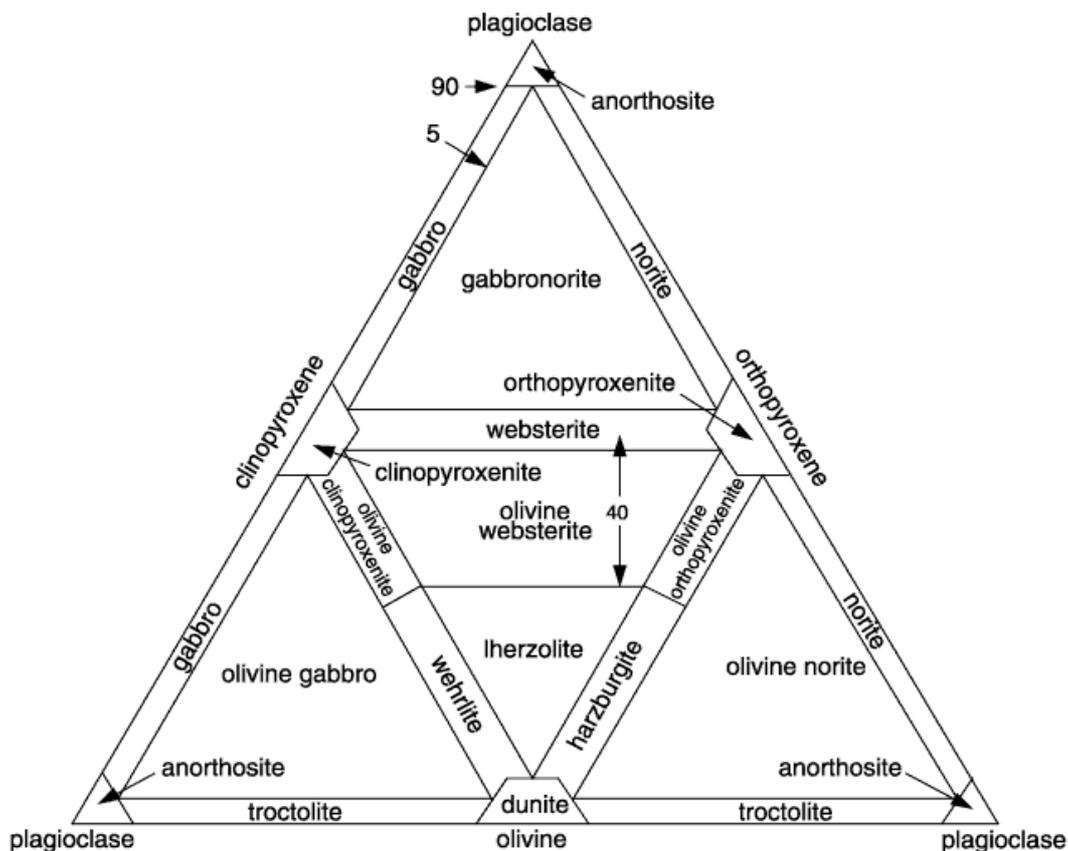


Figura 1 – Classificação das rochas magmáticas máficas e ultramáficas (Streikensen, 1974)

As seqüências máficas e ultramáficas ocorrem principalmente em 2 contextos geológicos distintos:

- 1- Intrusões bandadas em ambientes cratónicos estáveis (Fig. 2)
- 2- Associados a complexos ofiolíticos em cinturas orogénicas (Fig. 3)

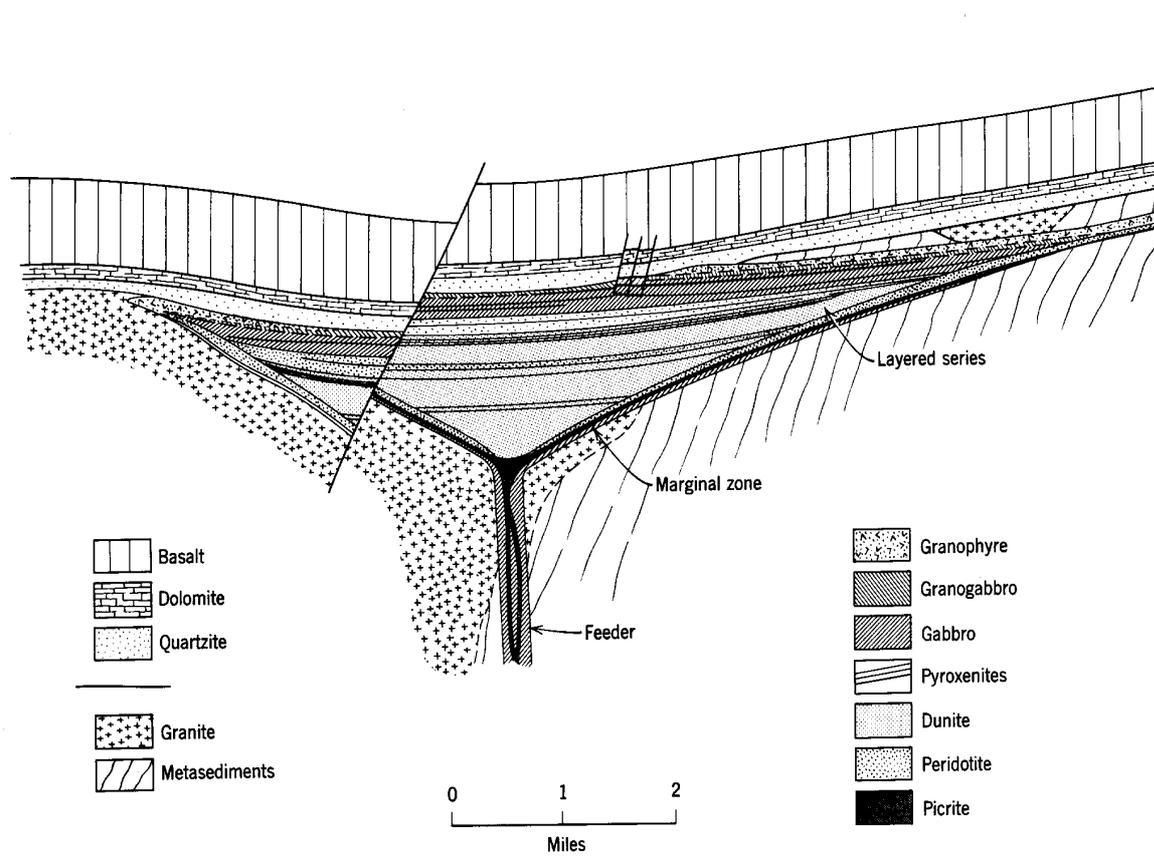


Figura 2 –Diagrama esquemático de uma Intrusão bandada típica baseado na intrusão de Muskox, EUA. Segundo Irvine and Smith (1967)

IDEALIZED CROSS-SECTION OF AN OPHIOLITE

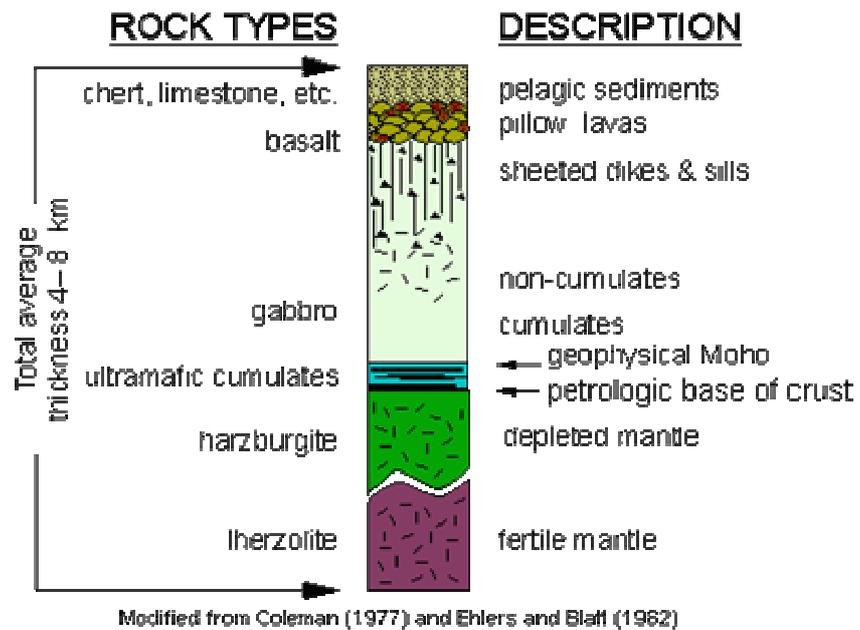


Figura 2 –Diagrama esquemático de uma sequência ofiolítica típica

2. Minérios de crómio

2.1 Mineralogia:

Principal: **cromite** (idealmente FeCr_2O_4 , embora contenha sempre quantidades significativas de MgO , Al_2O_3 e Fe_2O_3); as composições manifestadas pela cromite nos dois principais modos de ocorrência (ver abaixo) diferem de forma significativa:

- razões MgO/FeO mais elevadas nas cromites podiformes (1 a 2,3) que nas cromites em complexos ígneos bandados (0,6 a 1);
- conteúdos em Fe_2O_3 mais baixos (< 8 et%) e razões Cr/Fe mais elevadas ($\approx 1,5$ a $4,5$) em cromites podiformes, comparativamente às cromites inclusas em complexos bandados (≈ 10 a 24 wt% e $0,75$ a $1,75$, respectivamente);
- conteúdos em Al_2O_3 e em Cr_2O_3 correlacionáveis reciprocamente nas cromites podiformes ($\approx 6,5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 16$ wt% e $\approx 6 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 52$ wt%), variando largamente nas cromites características dos complexos bandados; a razão global $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Cr}_2\text{O}_3$ tende a ser bem mais elevada nas cromites podiformes.

Acessória: sulfuretos de níquel, cobre e ferro (pentlandite, pirrotite, calcopirite, gersdorffite, bornite, valerite)

Traco: minerais contendo Elementos do Grupo da Platina (EGPt), tais como ferroplatina, cooperite, laurite, stibiopaladinite, sperrillite, braggite níquelífera. Tendencialmente, os cromititos sem quantidades acessórias de sulfuretos apresentam concentrações em EGPt leves (Os, Ir, Rh, Rh) mais elevadas

2.2 Modo de ocorrência

Estes minérios apresentam dois modos básicos de ocorrência:

1) acumulações maciças basais em **intrusões ultramáficas-máficas bandadas** (*e.g.* Bushveld Complex – África do Sul, Stillwater Complex – Montana, EUA, Great Dyke - Rodésia)

2) massas irregulares inclusas em peridotitos variavelmente serpentinizados que se associam a cinturas orogénicas; estes cromititos, dando origem a pequenos depósitos, são, vulgarmente, denominados “**podiformes**” ou “tipo Alpino” (*e.g.* Maciço de Troodos – Chipre, para além de outros exemplos na Turquia, Urais, Filipinas e Cuba).

As escassas, embora economicamente muito importantes, intrusões bandadas que hospedam minérios de crómio localizam-se em ambientes tectonicamente estáveis. Nestas intrusões, o bandado composicional é devido aos processos de diferenciação magmática e pode apresentar grande extensão lateral. Neste contexto, as bandas cromitíticas apresentam espessura variável entre alguns milímetros a 20 metros e manifestam aspectos texturais diversos que, usualmente, denunciam **deposição** (acumulação) **gravítica**, como sejam terminações em cunha, contorções intra-formacionais, gradações triadas, *etc.*. Os níveis cromitíticos maciços podem passar gradualmente a níveis (bandas) relativamente ricos em silicatos (geralmente olivina e piroxena) e, destes, passar a dunitos ou a outros peridotitos.

Nos complexos ígneos bandados, a cromite forma, geralmente, grãos sub-euédricos (octaédricos) bem desenvolvidos, particularmente quando associada a quantidades substanciais de silicatos. Nos casos em que os silicatos são escassos, os grãos de cromite contactam uns com os outros, desenvolvendo, regra geral, junções poligonais. Pelo contrário, nos minérios podiformes a cromite aparece sob a forma de grãos arredondados (quando envoltos por silicatos) que tendem a formar agregados irregulares e muito fracturados onde as junções poligonais são escassas; na presença de maior quantidade de silicatos, estas cromites desenvolvem disseminações finas, revelando zonalidades composicionais (bordos mais ricos em ferro) adquiridas durante os processos de serpentinização (estes últimos estão invariavelmente presentes nas rochas ultramáficas dos complexos ofiolíticos).

Em ambos os modos de ocorrência, podem existir quantidades acessórias (mas rentáveis do ponto de vista económico) de sulfuretos ou arsenetos de Ni ou de minerais de EGPt. Nos complexos ígneos bandados, a paragénese mineral mais significativa (pirrotite-pentlandite-calcopirite \pm gersdorffite \pm bornite \pm valerite) é análoga à que caracteriza os minérios sulfuretados em domínios gabróicos pouco evoluídos (ver abaixo); a deposição destes minerais ocorre como resultado de uma série complexa de reacções de exsolução e de inversão. Em contexto ofiolítico, a maior parte do Ni é incorporado na olivina (podendo ser “libertado” durante os processos de serpentinização ou de meteorização), muito embora possam existir quantidades subordinadas e disseminadas de sulfuretos muito finos (e.g. pentlandite, pirrotite niquelífera e heazlewoodite) – tal é o caso das mineralizações que até ao momento se têm identificado no território português, designadamente no Complexo Ofiolítico de Beja-Acebuches. Acresce mencionar a presença de mineralizações cromitíticas no Complexo Alóctone Continental do Maciço de Bragança, localmente ricas em EGPt (subgrupo leve), as quais foram sujeitas a exploração durante o início do século XX.

2.3 Origem dos minérios

As bandas cromitíticas em complexos ígneos bandados devem a sua génese a processos de cristalização fraccionada e deposição gravítica nos níveis basais da câmara magmática, conforme é denunciado pelas texturas vulgarmente manifestadas por estes minérios. Neste contexto geológico, o carácter quasi-monominerálico e rítmico das bandas cromitíticas tem sido interpretado como resultado da dinâmica dos processos magmáticos em função das variações admitidas pela pressão, conteúdo em água, actividade do oxigénico e injecções múltiplas de magma durante a evolução da câmara magmática. A figura 4 mostra uma possível explicação para a deposição das bandas cromitíticas.

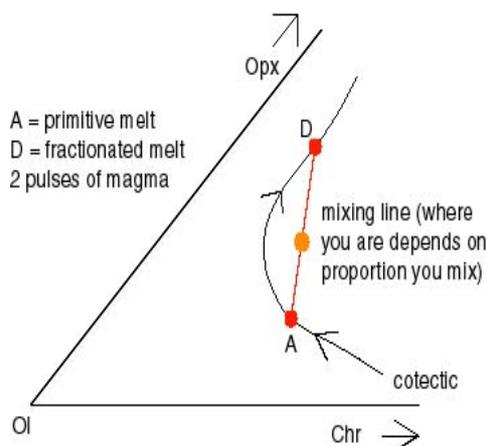


Figura 4 – Diagrama de fases para o sistema olivine-cromite-ortopiroxena

A origem dos níveis cromitíticos podiformes é muito diferente e, de certo modo, relaciona-se com a origem das rochas ultramáficas observadas em complexos ofiolíticos. De acordo com vários autores, as cromites podiformes formam, inicialmente, cumulos magmáticos (do mesmo modo que as cromites nos complexos ígneos bandados) em bolsas de magma que, numa etapa subsequente da evolução do sistema, experimentam segregação e ruptura mecânica episódica; estes dois últimos processos desenvolvem-se sincronamente com a cristalização magmática e alastramento do fundo oceânico, resultando “agregação em bola-de-neve”, rolamento intra-magma e deformação das pequenas bolsadas de cromitito no seio de peridotitos progressivamente hidratados.

3. Minérios sulfuretados de Ni-Cu

3.1 Mineralogia

Principal: pirrotite (ambas as variedades monoclinica e hexagonal), pentlandite, pirite, magnetite, calcopirite

Acessória: cubanite, mackinawite, minerais de EGPT, pentlandite argentífera

Secundária: milerite, violarite

3.2 Modo de ocorrência

Maciço a disseminado em, ou associado com, rochas máficas-ultramáficas intrusivas ou extrusivas (gabros, basaltos, peridotitos, noritos) que podem apresentar evidências de metamorfismo. Os exemplos maiores destes minérios encontram-se em Sudbury (Ontário, Canadá), Thompson e Lynn Lake (Manitoba, EUA), Noril'sk (Rússia), Kambalda (Austrália). Trabalhos de prospecção e pesquisa realizados nas últimas décadas colocaram em evidência mineralizações deste tipo na Zona de Ossa-Morena, designadamente em Agua Blanca; a exploração iniciou-se no último semestre de 2004. Presentemente, desenvolvem-se trabalhos de prospecção e pesquisa na unidade gábrica do Complexo Ígneo de Beja com o objectivo de delimitar massas mineralizadas passíveis de exploração económica.

Os minérios de Fe-Ni-Cu deste tipo formam acumulações maciças ou sub-maciças de sulfuretos, por vezes relativamente ricas em óxidos, que evoluem gradualmente para disseminações, em estreita associação com rochas ígneas máficas e ultramáficas (designadamente, noritos e basaltos). Na maioria dos depósitos, a pirrotite (vulgarmente, a variedade magnética monoclinica) constitui o principal mineral do minério, perfazendo mais de 80% do seu volume total. A calcopirite, fonte primária de cobre nestes minérios, ocorre sob a forma de agregados policristalinos irregulares que geram disseminações heterogéneas ou preenchem microfissuras transgranulares relativamente tardias. A pentlandite, constituindo a fase níquelífera (por vezes, também cobaltífera) primária, não é, geralmente, discernível a "olho nú"; a sua identificação, contudo, pode facilmente ser realizada ao microscópio óptico, reconhecendo-se dois modos essenciais de ocorrência: (1) agregados policristalinos granulares que selam descontinuidades diversas (filonetes); (2) exsoluções (lamelares ou com forma de "chama") no seio da pirrotite. A magnetite (frequentemente titanífera) pode, em alguns casos, ser um mineral essencial do minério, aparecendo sob a forma de grãos euédricos ou anédricos (por vezes com morfologia esferoidal), ou ainda formando cristais esqueléticos no seio das massas pirrotíticas. Quando titanífera, a magnetite pode também apresentar exsoluções lamelares de ilmenite ou de ulvoespinela. A pirite, invariavelmente presente nestes minérios, pode constituir uma fase mineral menor ou traço (no caso das mineralizações do distrito de Sudbury), ou, pelo contrário, representar uma fase mineral dominante (caso das mineralizações em Kambalda); na sua essência, tal fica a dever-se às amplitudes de variação admitidas pela actividade do enxofre durante a evolução do sistema mineralizante. A cubanite, quando identificada, desenvolve lamelas bem definidas no seio da calcopirite. A mackinawite é também comum como fase acessória e, regra geral, ocorre sob a forma de pequenos grãos irregulares ou desenvolve micro-agregados vermiculares.

Em adição ao Cu e Ni, estes minérios constituem a principal fonte de EGPT que, por norma, são incorporados nas estruturas de diversos arsenetos (*e.g.* sperrillite – PtAs₂), sulfo-arsenetos (*e.g.* hollingworthite - RhAsS) ou fases de bismuto e antimónio (*e.g.* froodite – PdBi₂, insizwaite – PtBi₂; subdurite – PdSb), embora possam também existir teluretos (*e.g.* moncheite – PtTe₂; michenerite – PdBiTe) e ligas metálicas. A prata também ocorre em alguns minério, geralmente integrando a estrutura da pentlandite; quantidades significativas de Co e de Au podem, adicionalmente, caracterizar alguns minérios deste tipo.

3.3 G3nese dos min3rios

A g3nese dos min3rios sulfuretados magmatog3nicos 3, normalmente, considerada como o resultado da separa3o de um *melt* imisc3vel de sulfuretos-3xidos a partir de um *melt* silicatado saturado em enxofre imediatamente antes, durante, ou ap3s a sua instala3o crustal sob temperaturas $\geq 900^\circ\text{C}$. Neste contexto, os produtos resultantes da cristaliza3o do *melt* de sulfuretos-3xidos poder3o precipitar intersticialmente (*intercumulus*) na pasta silicatada precoce parcialmente cristalizada ou constituir "bolsadas" independentes, caso o *melt* seja separado previamente. As acumula3es sulfuretadas e de 3xidos resultantes variam assim de maci3as a disseminadas, podendo ainda apresentar caracter3sticas brech3ides. Quando a separa3o do *melt* ocorre em condi3es suba3reas ou submarinas, envolvendo extrus3es bas3lticas, os sulfuretos formam, geralmente, agregados g3ticulares milim3tricos a submilim3tricos que se dispersam no seio dos silicatos ou se disseminam intersticialmente na rede formada pelos silicatos.

Estudos de equil3brio de fases nos sistemas Cu-Fe-Ni-S e Fe-O-S revelam que a primeira fase sulfuretada (cuja deposi3o pode ser acompanhada por magnetite), corresponde a pirrotite niquel3fera e cupr3fera, vulgarmente denominada solu3o s3lida monosulfuretada (*mss* – *monosulphide solid solution*). Os limites composicionais admitidas por esta fase sob temperaturas $\geq 600^\circ\text{C}$ s3o compat3veis com a composi3o global manifestada pelos min3rios comuns deste tipo, sugerindo que os agregados observados de sulfuretos se formaram inicialmente como *mss*. Dur ante o arrefecimento subsequente, a magnitude de varia3o composicional de *mss* experimenta forte redu3o, permitindo o desenvolvimento de exsolu3es diversas: primeiro de calcopirite, logo seguida de pentlandite ou pirite (dependendo da composi3o global inicial), acompanhadas pela exsolv3ncia de diversos metais que, associando-se ao S, As, Bi, Te, Sb, poder3o dar origem a diversas fases minerais. A decomposi3o qu3mica de *mss* s3o 3 atingida na sua totalidade a $\approx 200^\circ\text{C}$, muito embora seja poss3vel exsolver pentlandite a partir de pirrotite niquel3fera at3 cerca de 100°C .

A meteoriza3o qu3mica dos min3rios sulfuretados de Fe-Ni-Cu conduz ao desenvolvimento de diferentes associa3es minerais, consoante a intensidade da altera3o e as condi3es de oxi-redu3o. De entre estas associa3es minerais destacam-se as predominantemente constitu3das por pirrotite monocl3nica (est3vel em condi3es de baixa temperatura), violarite e milerite.

4. Min3rios de Ti(-V)

4.1 Mineralogia

Principal: magnetite, ulvoespinela, ilmenite, r3tilo, hematite, apatite

Acess3ria: pirite, calcopirite, maghemite, pirrotite

Secund3ria: hematite, r3tilo, maghemite

4.2 Modo de ocorr3ncia

Estes min3rios formam n3veis finos ou bandas (por vezes lenticulares) espessas maci3as em seq3ncias anortos3ticas, gabr3icas e nor3ticas que constituem diversos complexos 3gneos intrusivos cujo bandado poder3 n3o ser discern3vel macroscopicamente. Exemplos maiores de min3rios deste tipo podem ser encontrados em Allard Lake (Quebec, Canad3), Tahawus (New York, EUA), Complexo de Bushveld (3frica do Sul), Egersund (Noruega). Min3rios deste tipo, particularmente ricos em V, podem ser encontrados em algumas s3ries da unidade gabr3ica do Complexo 3gneo de Beja.

Os minérios magmatogénicos de Fe-Ti(-V) são quase invariavelmente constituídos por grãos grosseiros (0,5-1,0 cm) de magnetite titanífera com ou sem ilmenite férrica. Os grãos podem ser monominerálicos, mas são frequentes os casos em que a magnetite apresenta lamelas de exsolução de ulvoespinela segundo os planos (100) ou de ilmenite segundo os planos (111). A hematite pode ainda estar presente sob a forma de grãos discretos, muito embora seja mais comum em coroas de oxidação da magnetite ou constituindo lamelas de exsolução na ilmenite. As espinelas referidas e a ilmenite podem também apresentar conteúdos elevados em vanádio; verifica-se também que, tendencialmente, a magnetite incorpora quantidades maiores de V, Cr e Al e menores de Mn e Mg que a ilmenite coexistente.

A análise dos equilíbrios de fase entre os diferentes óxidos de ferro e titânio – empreendida por Buddington e Lindsley (1964) e subsequentemente examinada em detalhe por diversos autores – revela que a solubilidade de FeTiO_3 (ilménite) em Fe_3O_4 (magnetite) é muito pequena, mesmo sob condições elevadas de temperatura. Deste modo, os intercrescimentos vulgarmente observados entre ilmenite e magnetite não podem ser explicados apenas com base em mecanismos de exsolução, requeendo oxidação *subsólida* prévia de magnetite-ulvoespinela e posterior desenvolvimento das lamelas ilmenite-hematite durante o percurso de arrefecimento do sistema magmático. Assim, a determinação da composição química apresentada pelos pares magnetite-ilménite coexistentes permite deduzir as condições de temperatura e de oxidação vigentes no momento da formação destes minerais.

4.3 Gênese dos minérios

Os grãos dispersos de magnetite titanífera e de ilmenite em rochas ígneas constituem fases acessórias normais que se desenvolvem juntamente com os silicatos envolventes durante o percurso de cristalização fraccionada. Contudo, a origem de minérios maciços maioritariamente constituídos por magnetite e ilmenite exige outros requisitos, para além dos processos de fraccionação. Os modelos petrogenéticos mais comuns (e que recolhem maior apoio na comunidade científica) envolvem a combinação dos efeitos gerados por cristalização fraccionada com a diferenciação gravítica ou, alternativamente, com a segregação de líquido residual (este último mecanismo geralmente invocado na presença de enormes acumulações de óxidos, não raras vezes formando corpos discordantes da estruturação apresentada pelo maciço ígneo envolvente).

5. Questionário

Thetford, Canadá

- 1- As amostras Thetford-1 e S-10 representam o minério de Cr característico do ofiolito de Thetford no Canadá. Caracterize a mineralogia e os aspectos texturais mais relevantes.

Troodos, Chipre

- 2- Caracterize do ponto de vista mineralógico e textural as amostras do ofiolito de Troodos.
- 3- Com base na figura 4 explique a textura e variação composicional observada na amostra bandada dunito-cromitito de Troodos.

Stillwater, USA

- 4- Caracterize a mineralogia silicatada das amostras SW (Stillwater) em termos das fases cumulus e intracumulus e localize cada uma delas no modelo apresentado na UTP para intrusões bandadas (Fig. 2).

Figueirinha, Portugal

- 5- Com base nas superfícies polidas e amostras de mão FG-6A e FG-6B caracterize do ponto de vista mineralógico e textural a paragénese opaca.
- 6- Qual a rocha em que esta mineralização ocorre? E qual o modo de ocorrência dessa mineralização.

Agua Blanca, Espanha

- 7- Identifique a paragénese sulfuretada da amostra AB-1.

Odivelas, Portugal

- 8- Descreva a mineralogia e textura das amostras ODV-5-A-1, ODV-5-A-2, e ODV-5-4 com recurso às amostras de mão e lâminas polidas.