
RECURSOS HÍDRICOS E GEOLÓGICOS DE TRÁS-OS-MONTES

EDITORES: CARLOS BALSA • JOSÉ AGUIAR • ORLANDO RODRIGUES



RECURSOS HÍDRICOS E GEOLÓGICOS DE TRÁS-OS-MONTES

EDITORES: CARLOS BALSA · JOSÉ AGUIAR · ORLANDO RODRIGUES

.....

Título: Recursos Hídricos e Geológicos de Trás-os-Montes
Editores: Carlos Balsa
José Aguiar
Orlando Rodrigues
Autores: Carlos A. A. Leal Gomes
Carlos Meireles
Elisa Preto Gomes
Emílio Urbano
Hélder I. Chaminé
João Farinha Ramos
John Morris Pereira
José Martins Carvalho
José Teixeira
Liliana Freitas
Luís Sousa
Manuel Antunes da Silva
Marina Paiva
Paulo E. Fonseca
Paulo José de Vítor Ferraz
Paulo Roberto Gomes Brandão
Rosário Carvalho
Edição: Instituto Politécnico de Bragança · 2024
5300-253 Bragança · Portugal
www.ipb.pt
Design: Luís Ribeiro
Serviços de Imagem do Instituto Politécnico de Bragança
Impressão: Rainho & Neves
ISBN: 978-972-745-338-2
ISBN digital: 978-972-745-337-5
Depósito legal: 533619/24

.....

Índice

Recursos Hídricos e Geológicos de Trás-os-Montes	9
Uma visão integrada dos Recursos Hídricos Subterrâneos e dos Recursos Hidrogeológicos de Trás-os-Montes	13
José Martins Carvalho, Marina Paiva, Rosário Carvalho, Paulo E. Fonseca, Liliana Freitas, José Teixeira & Helder I. Chaminé	
1. Introdução	13
2. Esboço das Condições Geológicas e Geomorfológicas Regionais	17
3. Características Hidrogeológicas Regionais.....	23
4. Massa de Água A1 – Veiga de Chaves.....	40
5. Águas Minerais Naturais e Recursos Geotérmicos	44
6. Reflexões Finais	70
Agradecimentos	76
Referências	76
A Exploração das Águas Minerais Naturais. Sua Gestão e Aplicação...	97
Manuel Antunes da Silva	
Introdução	97
Monitorização do recurso e da exploração	98
Manutenção das captações	104
Proteção do recurso	111
Aplicações da água mineral natural.....	116
Bibliografia	117
Recursos minerais de Trás-os-Montes e Alto Douro.....	121
Elisa Preto Gomes & João Farinha Ramos	
1. Introdução	121
2. Alguns aspectos da geomorfologia da região de Trás-os-Montes e Alto Douro	123
3. Alguns aspectos da geologia de Trás-os-Montes e Alto Douro	125
4. Recursos minerais metálicos.....	127
5. Recursos minerais não metálicos.....	144
6. Conclusões.....	155
Bibliografia e Webgrafia.....	156
Panorâmica sobre condições naturais de ocorrência de minérios de lítio no Norte de Portugal – Perspectivas de valorização e produtos de alteração e decaimento.....	159
Carlos A. A. Leal Gomes	
1. Introdução	159
2. Situação dos recursos de Li em Portugal – propriedades da ocorrência natural.....	167

2.2. Variáveis Mineralúrgicas e Metalúrgicas - Tecnologias de Processamento.....	175
2.3. Variáveis Relativas a Ordenamento, Ambiente, Produção e Mercado.....	177
3. Diligências e Operações de Valorização.....	180
3.1. Valor Conhecido das Jazidas.....	181
3.2. Compatibilidade de Produção entre Produtos Cerâmicos e Minérios de Li.....	183
3.3. Compatibilidade entre Minérios de Li e outros Minérios.....	184
3.4. Territorialidade das Ocorrências de Materiais e Recursos em Portugal.....	187
4. Paradigmas de Prospecção – síntese conclusiva das propriedades das jazidas.....	189
Bibliografia recomendada e utilizada.....	195
Anexo	
Sobre os produtos de alteração dos materiais litínicos, com influência na diversidade de minérios ou mesclas cerâmicas.....	197
O Tungsténio em Trás-os-Montes.....	215
Paulo José de Vitor Ferraz	
1. Importância Internacional.....	218
2. Importância Nacional.....	220
3. Importância Local.....	222
Fontes bibliográficas.....	233
Mineralizações de Ouro de Trás-os-Montes e ocorrências conhecidas	235
John Morris Pereira	
1. Introdução.....	235
2. Contexto geológico.....	236
3. Principais mineralizações de ouro de Trás-os-Montes.....	240
Bibliografia.....	259
Jazigo de ferro de Moncorvo, a maior reserva de ferro da Europa Ocidental – caracterização estratigráfica, estrutural, petrográfica, geoquímica e ambiente de sedimentação.....	263
Emílio Urbano	
Elisa Preto Gomes	
Carlos Meireles	
Paulo Roberto Gomes Brandão	
1. Introdução.....	263
2. Breve Resumo Histórico sobre a Exploração Mineira do Jazigo de Ferro de Moncorvo.....	264
3. Caracterização e distribuição dos diferentes tipos de depósitos de	

ferro no tempo geológico	265
4. Caracterização geológica do jazigo de ferro de Moncorvo.....	268
5. Caracterização Estratigráfica e Estrutural dos alvos Felgueiras, Reboredo e Mua.....	275
6. Caracterização Mineralógica e Petrográfica do jazigo.....	288
7. Discussões e Interpretação dos Dados	296
8. Conclusões.....	305
9. Considerações finais.....	306
Bibliografia	307
Notas sobre as principais rochas ornamentais do nordeste de Portugal	315
Luís Sousa	
Resumo.....	315
1. Introdução.....	315
2. Principais centros produtores	321
3. Alguns tópicos de desenvolvimento.....	332
Referências bibliográficas.....	335

Recursos Hídricos e Geológicos de Trás-os-Montes

Seis anos volvidos sobre a publicação do livro *Recursos Geológicos de Trás-os-Montes – Passado, presente e perspectivas futuras* o Instituto Politécnico de Bragança (IPB) publica agora o livro *Recursos Hídricos e Geológicos de Trás-os-Montes*.

Com este novo livro sobre a mesma temática o IPB pretende completar a divulgação dos principais recursos hídricos e geológicos da região transmontana, dando agora maior destaque aos recursos hidrogeológicos, aos minerais metálicos e às rochas ornamentais.

A publicação deste livro insere-se na principal missão do IPB que é a criação de novos saberes e a sua divulgação com vista à promoção e valorização dos recursos endógenos da região transmontana.

A região de Trás-os-Montes possui uma grande abundância de recursos hídricos e hidrogeológicos que se materializa em inúmeras nascentes, muitas vezes de águas com mineralizações obtidas em grande profundidade, ao longo das grandes falhas que atravessam a região. Devido às propriedades terapêuticas conferidas pelas mineralizações, algumas destas águas são disponibilizadas engarrafadas ou aproveitadas em termalismo de saúde e de bem-estar.

De uma forma geral, os recursos hídricos subterrâneos são preciosos para a economia da região e para subsistência das suas populações. O estudo destes recursos é essencial para a sua correta exploração e gestão, de acordo com as boas práticas que garantam a sua qualidade e sustentabilidade. Estas imposições são ainda mais prementes no contexto atual das alterações climáticas, em que os períodos de seca prolongados são cada vez mais frequentes. Os estudos aqui apresentados constituem um contributo muito importante para o conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da região transmontana.

A exploração dos minerais metálicos teve o seu apogeu durante e após a segunda guerra mundial devido às necessidades da indústria militar e posterior reconstrução europeia. Desde aí, a globalização das economias relegou o interesse nas jazidas transmontanas para um segundo plano, de onde saem apenas, pontualmente, nos momentos de instabilidade económica ou política internacionais. Embora não se perspetive de imediato viabilidade económica para a exploração de grande parte destes recursos, a evolução da ciência e da tecnologia poderão, no futuro, possibilitar o seu aproveitamen-

to. Estes constituem, assim, reservas estratégicas cujo potencial depende muito do seu conhecimento. Para além dos bem conhecidos depósitos de Ferro de Torre de Moncorvo, Trás-os-Montes tem também importantes jazidas de Estanho, Volfrâmio e Ouro. Muitas destas jazidas foram objeto de trabalhos de prospeção e de investigação científica recentes, cujos resultados são apresentados neste livro.

Dos minerais metálicos, o Lítio é aquele que mais interesse desperta na atualidade. A razão prende-se com a as necessidades atuais de transição energética. No quadro técnico-científico atual, o Lítio é essencial ao fabrico das baterias que asseguram a locomoção a energia elétrica de veículos. Por continuar a ser um assunto na ordem do dia, inclui-se também neste livro um estudo atualizado sobre o potencial dos recursos de Lítio de toda a Região Norte de Portugal.

Existe na nossa região uma grande quantidade de núcleos de produção de rochas ornamentais com destaque para os granitos. Estes núcleos constituem importantes polos económicos que muito contribuem para a fixação das populações transmontanas. O estudo aqui apresentado faz uma descrição e caracterização dos principais núcleos extrativos de rochas ornamentais da região transmontana e analisa os aspetos inerentes ao seu desenvolvimento sustentado.

Estamos muito agradecidos a todos os autores, com destaque para o Prof. José Martins Carvalho, que muito se empenhou neste projeto, mas que, infelizmente, nos deixou sem ver a sua concretização. Os nossos sinceros agradecimentos também para Marina Paiva, Rosário Carvalho, Liliana Freitas, José Teixeira, Hélder Chaminé, Manuel Antunes da Silva, Elisa Preto Gomes, João Farinha Ramos, Carlos Leal Gomes, Paulo Ferraz, John Morris Pereira, Emílio Urbano, Carlos Meireles, Paulo Gomes Brandão e Luís Sousa e às suas instituições profissionais por terem aceite partilhar, através deste livro, os seus conhecimentos sobre os recursos hídricos e geológicos de Trás-os-Montes.

Esta publicação teve o apoio da Fortescue, uma empresa integrada de energia verde, tecnologia e metais, da Savannah Resources Plc, responsável pelo Projeto Lítio do Barroso, e do Super Bock Group.

Carlos Balsa
José Aguiar
Orlando Rodrigues

À memória do Prof. José Martins de Carvalho

1 capítulo

Uma visão integrada dos Recursos Hídricos Subterrâneos e dos Recursos Hidrogeológicos de Trás-os-Montes

José Martins Carvalho^{1,2,5}, Marina Paiva¹, Rosário Carvalho³, Paulo E. Fonseca³, Liliana Freitas^{2,5}, José Teixeira^{4,2} & Helder I. Chaminé^{2,5}

¹ TARH – Terra, Ambiente e Recursos Hídricos Lda, Sacavém, Portugal

² Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada, DEG, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Politécnico do Porto, Porto, Portugal

³ Instituto Dom Luiz, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

⁴ Centro CEGOT – UP, Departamento de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, Portugal

⁵ Centro GeoBioTec, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

Email: hic@isep.ipp.pt

“O que tem sido é que vai ser, e o que tem sido feito é o que vai ser feito; não há nada de novo sob o Sol.” (...) “O Homem não sabe o que virá depois dele.”

Eclesiastes

1. Introdução

A água subterrânea continua a desempenhar importante papel na subsistência dos habitantes e na atividade económica da região de Trás-os-Montes. São testemunhos dessa importância as captações e os fontanários existentes no centro dos aglomerados populacionais, bem como os poços com os seus engenhos e picotas, dispositivos comuns nas zonas onde a água subterrânea ocorre perto da superfície (Dias & Galhano 1986). Hoje, os campos e as periferias das povoações são salpicados de pequenas casetas albergando numerosas captações de água subterrânea, usadas predominantemente na rega de pequenas parcelas. E, para além disso, milhares de outros furos operam ou estão abandonados nos logradouros das casas ou mesmo dentro delas! Centenas de captações de água subterrânea, algumas gravíticas (muito convenientes em tempos de mudança do paradigma energético), continuam a abastecer pequenos aglomerados populacionais no Nordeste de Portugal.

Estas águas, aproveitadas na alimentação humana, na rega e na indústria, são recursos hídricos subterrâneos tutelados pela Agência Portuguesa do Ambiente conforme a Lei n.º 58/2005 de 29 de Dezembro (Lei da Água).

O saber e a intuição populares aperceberam-se, há muitas gerações, de que algumas águas subterrâneas são diferentes das usadas para beber, cozinhar ou regar. A essas águas, diferentes, especiais e/ou anómalas, a sabedoria popular atribuiu poderes curativos e à volta dessas manifestações acorreram pequenas multidões, gente ávida de conhecer tais virtudes. Nalguns desses pontos de encontro e de confraternização nasceram banheiras cavadas na pedra, banhos, balneários, de que o paradigma em Trás-os-Montes são as Caldas de Chaves, fruto do esplendor da civilização romana (e.g., Henriques 1726, Carneiro 2013, 2016, Vaz *et al.* 2015, Houten 2021). Cerca de uma centena dessas ocorrências são conhecidas na cultura popular pelas suas virtudes terapêuticas (Almeida & Almeida 1970, Termared 2011). Algumas delas são inequivocamente águas minerais, ou águas minerais naturais na acepção técnico-científica (e.g., Acciaiuoli 1952/53, Moitinho de Almeida 1970, Coteló Neiva 1982, Carvalho 1993a, 1996, 2006, Almeida *et al.* 2000, Calado 2001, Carvalho *et al.* 2005b, 2007, Termared 2011, Oliveira *et al.* 2012, Eggenkamp *et al.* 2015, Carvalho *et al.* 2016).

Os transmontanos da região de Vidago e de Pedras Salgadas, subtilmente, distinguem entre água (bem natural com que se alimentam, cozinham e regam as suas leiras) e “águas”, recurso raro e precioso, de alto valor económico acrescentado, que é usado em estabelecimentos termais e na indústria de engarrafamento. Os geólogos chamam minerais a muitas destas águas que, por qualquer característica físico-química (termalidade, sulfuração, CO₂, pH, etc.), são distintas das águas comuns da região.

Em toda a Europa, em termos normativos, para essas águas incomuns é usado o conceito de água mineral natural. Em Portugal entendem-se por águas minerais naturais “as águas bacteriologicamente próprias, de circulação subterrânea, com particularidades físico-químicas estáveis na origem dentro da gama de flutuações naturais, de que podem resultar eventuais propriedades terapêuticas ou efeitos favoráveis à saúde” (alínea b) do Art.º 2.º da Lei n.º 54/2015, de 22 de junho). Esta lei estabelece as bases do regime jurídico da revelação e do aproveitamento dos recursos geológicos portugueses que são tutelados pela Direção de Serviços de Recursos Hidrogeológicos e Geotérmicos da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG).

As águas minerais naturais, águas minero-industriais e as águas de nascente (“águas naturais de circulação subterrânea, bacteriologicamente próprias, que não apresentem as características necessárias à qualificação como águas

minerais naturais, desde que na origem se conservem próprias para beber”, apenas usadas na indústria do engarrafamento de água) são consideradas na legislação portuguesa como recursos hidrogeológicos sendo enquadradas pela atrás referida Lei n.º 54/2015, de 22 de junho. As águas minerais naturais são, geralmente, recursos de circuito hidrogeológico lento e profundo com longo tempo de residência no reservatório geológico que, por isso mesmo, adquirem características físico-químicas e organoléticas distintas das águas comuns.

As águas minerais de Trás-os-Montes estão geneticamente associadas a reservatórios crustais fracturados, profundos, onde águas meteóricas infiltradas adquirem componentes mantélicos emergindo ao longo de zonas de falhas geológicas profundas, que permitem uma rápida ascensão para a superfície.

Algumas dessas manifestações têm características de franca termalidade e, nessas condições, havendo procura, para além dos usos do foro da hidrologia médica, são possíveis usos directos do calor e mesmo a produção de electricidade. O caso das Caldas de Chaves é paradigmático em Portugal: com 77 °C num dos actuais furos de captação, a água mineral natural, também recurso geotérmico, é usada, desde 1982, no aquecimento da piscina municipal, de vários hotéis e do próprio balneário termal.

As águas minerais naturais distinguem-se da água subterrânea (recurso hídrico) por terem estabilidade físico-química ao longo do ano hidrológico e estarem bacteriologicamente puras na origem. Estas qualidades resultam de uma circulação profunda e lenta, em que os fenómenos de interação água-rocha, no caso de Trás-os-Montes, são o resultado de tempos de residência da ordem da dezena de milhares de anos, proporcionando águas com uma composição físico-química bem definida e específica. Cada água mineral natural apresenta, portanto, características próprias e únicas que resultam de um longo e complexo processo com numerosos e diversificados fatores intervenientes¹.

O presente trabalho está orientado numa perspectiva pluridisciplinar atendendo a que, tratando-se de aquíferos (formações geológicas que contêm água e de onde é possível extrair água de forma ambiental e eticamente responsável), há que abordar aspetos ligados ao reservatório geológico, às características hidrodinâmicas das formações geológicas e das captações e aos aspectos físico-químicos do recurso água.

1) <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/geologia/recursos-hidrogeologicos/> (consultado em Maio de 2021).

A nossa aproximação, mais do que uma abordagem científica que nos levaria a domínios profundos da hidrogeologia, da geotermia, da hidrologia médica e da gestão dos recursos hídricos, vai confinar-se a uma discussão sumária das condições de ocorrência dos recursos hídricos e dos recursos hidrogeológicos (hidrominerais e geotérmicos) da região de Trás-os-Montes, numa perspectiva utilitarista mas sempre numa busca de soluções baseadas em sólidos elementos técnico-científicos, numa gestão eco-responsável e ética. Com algum pragmatismo, os limites espaciais de Trás-os-Montes considerados nesta súpula, são a Norte, a fronteira com a Espanha, a Nascente e Sul o Rio Douro e a Poente o Rio Tâmega e as serras do Alvão e do Marão. Assim sendo, foram incluídos nesta síntese os concelhos de Alfândega da Fé, Bragança, Carrazeda de Ancieães, Freixo de Espada-à-Cinta, Macedo de Cavaleiros, Miranda do Douro, Mirandela, Mogadouro, Torre de Moncorvo, Vila Flor, Vimioso e Vinhais (do distrito de Bragança), Alijó, Boticas, Chaves, Montalegre, Murça, Peso da Régua, Ribeira de Pena, Sabrosa, Santa Marta de Penaguião, Valpaços, Vila Pouca de Aguiar e Vila Real (do distrito de Vila Real).

Para uma sub-região tão extensa (cerca de 10 000 km²), que corresponde aproximadamente à antiga província de Trás-os-Montes, as condições meteorológicas, a morfotectónica, a geologia regional, e a tipologia da procura da água são tão díspares que, dir-se-ia, a intenção de resumir o actual conhecimento sobre o tema num capítulo de livro é desproporcionado. E, por isso, a nossa perspectiva holística e globalizante – no sentido de que o estudo dos recursos hídricos e dos recursos hidrominerais e geotérmicos, todos integrando o ciclo da água – que moveu a presente síntese. É nesse contexto que as nossas limitações de informação levaram a que decidíssemos não incluir a questão da qualidade da água dos recursos hídricos subterrâneos neste trabalho. Esta opção, de resto, é suportada pelo facto de não ser esse, normalmente, o constrangimento à utilização da água subterrânea no abastecimento público e em actividades industriais e agrícolas na área e desse tema ter sido exaustivamente tratado por vários autores como Portugal Ferreira *et al.* (1981, 1984), Costa (1990), Pereira *et al.* (1992, 1999), Fernandes (1992), Alencão (1998, 2004), Alencão *et al.* (2000), Pacheco (2000), Oliveira (2001, 2015, 2017), Espinha Marques (2001), entre outros. O presente capítulo insere-se numa versão actualizada e alargada da obra “Recursos Geológicos de Trás-os-Montes” coordenada, na sua primeira edição, por Balsa & Sobrinho Teixeira (2018).

2. Esboço das Condições Geológicas e Geomorfológicas Regionais

A região de Trás-os-Montes localiza-se no Nordeste de Portugal Continental e integra-se no Maciço Hespérico, constituído, essencialmente, por um substrato rochoso de idade paleozóica e precâmblica e, localmente, recoberto por escassos depósitos detríticos argilo-arenosos, discordantes, de idade terciária e quaternária (e.g., Ribeiro 1974, Ribeiro *et al.* 1979, 2007, Pereira 2006, Cunha *et al.* 2019). A região de Trás-os-Montes insere-se do ponto de vista geotectónico regional, no contexto Peninsular, nas Zonas da Galiza – Trás-os-Montes e da Centro-Ibérica (Ribeiro *et al.* 2007, Meireles 2013, 2018).

A parte do Maciço Ibérico que ocupa o território português é composta por sequências autóctones, parautóctones e alóctones, imbricadas tectonicamente segundo uma geometria complexa de cavalgamentos, carreamentos e outros acidentes tectónicos (e.g., Ribeiro *et al.* 1979, Pereira 2006, Meireles 2013, 2018). As unidades lito e tectono-estratigráficas autóctones e parautóctones são constituídas essencialmente por xistos negros, xistos ardosíferos, grauvaques, micaxistos e quartzitos. As unidades tectonoestratigráficas alóctones, situadas no Nordeste Transmontano, integram um complexo ofiolítico, serpentinitos, gabros, diques e basaltos. As rochas ígneas incluem granitóides pré-orogénicos a sin-a tardi-orogénicos, relativamente às fases de deformação regional da orogenia varisca (e.g., Ferreira *et al.* 1987, Pereira 2006); foram ainda reconhecidas rochas de alto grau metamórfico (gnaisses, migmatitos e granitóides pré-variscos) na região de Trás-os-Montes (e.g., Ribeiro *et al.* 1964, Ribeiro 1974, Marques *et al.* 1991-92, Pereira 2006, Meireles 2013, 2018).

O soco cristalino e cristalofilino ocupa mais de 95% da área de Trás-os-Montes e inclui em termos genéricos (e.g., Ribeiro 1974, Oliveira *et al.* 1992, Pereira *et al.* 2001, Pereira 2006, Dias *et al.* 2012, Meireles 2013): (i) metamorfitos variados, xistos, anfíbolitos, gnaisses, quartzitos, (ii) formações ígneas e rochas granitóides de vários tipos que são acompanhados pelo habitual cortejo filoneano, predominantemente quartzoso e aplitopegmatítico e, por vezes, por rochas básicas, (iii) alguns retalhos de formações carbonatadas compactas, de reduzida extensão, espessura e continuidade lateral, e (iv) maciços de rochas básicas e ultrabásicas que são cavalgantes sobre séries essencialmente xistentas, mas com um desenvolvimento de rochas vulcânicas ácidas e básicas, por vezes notável.

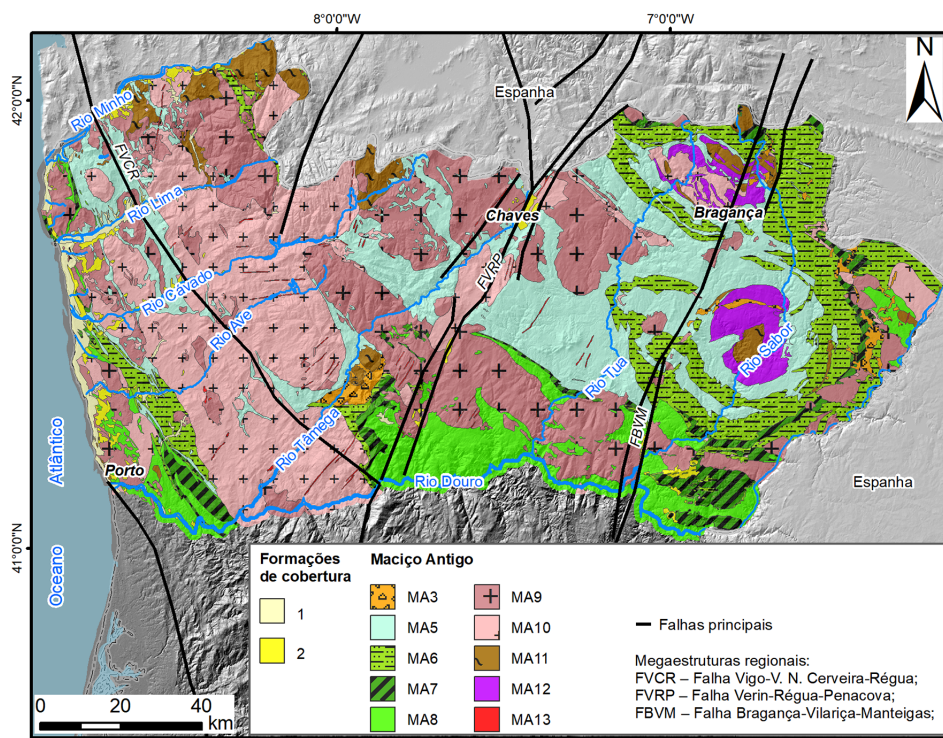
Do ponto de vista geológico estão incluídos no grupo das rochas metamórficas as unidades seguintes: (I) Precâmbrico, constituído por (e.g., Anthonioz

1972, Ribeiro 1974, Marques *et al.* 1991-1992, Pereira 2006, Meireles 2013): (a) rochas polimetamórficas, metabasitos (gabros, etc.) e ultrabasitos dos Maciços de Bragança, de Vinhais e de Morais (peridotitos, piroxenitos, etc.), (b) série xisto-arenítica, constituída por xistos e grauvaques, metassedimentos, e metavulcanitos de natureza porfiróide, (c) complexo xisto-grauváquico ante-ordovícico que é constituído por uma monótona e espessa série de xistos e grauvaques; (II) Paleozóico, incluindo formações xistentas e quartzíticas do Ordovícico, do Silúrico e do Devónico (Pereira *et al.* 2001, Pereira 2006). As principais bacias sedimentares da região em estudo, onde se encontram depósitos detríticos dos tipos acima descritos, localizam-se em Sendim, Vimioso, Castro Roupal (Morais), Mirandela, Torre de D. Chama, Vilariga, Chaves e Vilarelho da Raia. A presença de alguns depósitos plio-quadernários, discordantes sobre o substrato, representa, ou o testemunho do arrasamento do relevo e modelação da superfície do Maciço Ibérico, ou o resultado do entalhe da rede hidrográfica actual (e.g., Brum Ferreira 1980, 1991, 2003, Pereira 1999a,b, Araújo e Pérez-Alberti 1999, Teixeira 2011).

Em relação aos depósitos detríticos, conquanto o seu interesse hidrogeológico, na perspectiva da captação de água, seja assaz limitado (à excepção da Veiga de Chaves que constitui a massa de água A1 Veiga de Chaves na aceção da APA – Agência Portuguesa do Ambiente), importa referir os seguintes tipos (pormenores sobre as condições geológico regionais, por exemplo, em Pereira 1999a,b, Pereira *et al.* 2001, Pereira 2006, Cunha *et al.* 2019): (i) formações arcóicas e argilosas de idade incerta, eventualmente paleogénicas ou miocénicas; (ii) formações englobando grés, margas, calcários e conglomerados de idade também provavelmente paleogénica ou miocénica; (iii) formações argilo-siltíticas avermelhadas, de idade provavelmente pliocénica; (iv) formações conglomeráticas mal calibradas do tipo “raña”, de idade vilafranqueana, e (v) terraços e aluviões recentes.

Toda a complexidade e diversidade geológica é traduzida no esboço geológico regional do Norte de Portugal da Figura 1.

O Noroeste de Portugal corresponde a um amplo anfiteatro aberto a Oeste, com degraus sucessivos, descendo até à linha de costa, partindo dum rebordo de direcção aproximada NNW-SSE (desde a serra da Peneda até à serra da Cabreira). Um segundo rebordo pode ser encontrado mais a Leste, com direcção aproximada NNE-SSW, desde a serra do Alvão até à serra do Marão, e prolongando-se a sul do Douro até às serras de Montemuro e da Freita. Esta área foi profundamente rasgada por diversos cursos de água, que aproveitam, na sua grande maioria, falhas e fracturas crustais com orientação ENE-WSW (e.g., Birot 1945, Lautensach 1967, Ribeiro *et al.* 1987, Araújo & Pérez-Alberti 1999, Feio & Daveau 2004, Teixeira 2011).



Unidades Hidrolitológicas Regionais		ID
Formações de Cobertura	Aluviões e/ou eluviões; areias de dunas: depósitos sedimentares detriticos geralmente pouco consolidados	1
	Terraços flúvio-marinhos e conglomeráticos: depósitos sedimentares detriticos pouco consolidados	2
Máço Antigo	Depósitos arcóscicos: Depósitos sedimentares detriticos geralmente consolidados	MA3
	Metapelitos e psamitos avermelhados, vulcanitos básicos e ácidos, complexo filado-quartzoso, quartzitos	MA5
	Quartzo-filitos, filádios, xistos carbonosos com intercalações de ampelitos e liditos, complexo gresco-quartzítico, argilitos e conglomerados	MA6
	Quartzitos maciços, quartzitos xistóides e xistos ardosoferos intercalados	MA7
	Xistos, grauvaques, níveis metaconglomeráticos e complexo migmatítico-gnáissico	MA8
	Granito de grão médio a grosseiro de duas micas, com esparsos megacristais	MA9
	Granito de grão médio a fino essencialmente biotítico	MA10
	Gnaisses, migmatitos e granitos gnáissicos	MA11
	Rochas básicas e ultrabásicas (peridotitos, rochas máficas, gabros e anfibolitos: complexo ofiolítico s.l.)	MA12
	Filões e massas (quartzo, pegmatito e apilito-pegmatítico)	MA13

Figura 1: Esboço da geologia regional e das unidades hidrolitológicas do Norte de Portugal (adaptado de: INAG 1997, Carvalho 2006, Carvalho *et al.* 2007, 2021). Fundo geológico adaptado e simplificado de Oliveira *et al.* (1992) e de Pereira *et al.* (1989, 2001).

A partir do rebordo de direção NNW-SSE já mencionado, as altitudes sobem rapidamente, entrando-se no domínio de montanha (Ribeiro *et al.* 1987, Araújo & Pérez-Alberti 1999, Martins 2009). Assim, o relevo apresenta-se organizado sob a forma de grandes blocos, escalonados a diferentes altitudes, separados por falhas ou fracturas, aproveitadas pelos cursos de água, resultando em vales bastante encaixados. Como exemplo, podem

apontar-se o conjunto do qual fazem parte a Serra da Peneda (1373 m), a Serra Amarela (1361 m) e a Serra do Gerês (1548 m), todas situadas a Norte do vale do rio Cávado. O conjunto da serra do Gerês prolonga-se para leste atingindo 1525 m na serra do Larouco junto à fronteira com a Galiza. A sul do rio Cávado podem servir como exemplo as serras da Cabreira (1261 m) e um conjunto planáltico, designado por planalto do Barroso, com altitudes ligeiramente superiores a 1200 m (Teixeira 2011). A Leste desse primeiro rebordo montanhoso surge uma importante estrutura regional, com direção NNE-SSW, sendo as suas escarpas bem visíveis em fotografia aérea, nos mapas topográficos e terreno. Este lineamento tectónico corresponde à megaestrutura activa, falha Verín-Régua-Penacova, que deu origem a uma série de depressões tectónicas, onde se instalaram as povoações de Chaves, Vila Pouca de Aguiar e Vila Real (Teixeira 1948, Araújo & Pérez-Alberti 1999, Feio & Daveau 2004).

O grande acidente geológico Verín-Régua-Penacova marca a passagem para a unidade geomorfológica do Nordeste, em que no relevo predominam as formas planálticas, ou seja, o Planalto Transmontano (Ribeiro *et al.* 1987, Araújo & Pérez-Alberti 1999). Os relevos que aqui se encontram não atingem as altitudes alcançadas nas serranias da “barreira de condensação”, mas em geral, têm como base uma cota superior, próxima dos 700 m, o que leva a que os relevos pareçam, à primeira vista, muito menos imponentes. A leste desta importante falha, surgem as Serras da Padrela (1148 m), da Nogueira (1318 m) e de Bornes (1200 m). Estas duas últimas parecem já relacionadas com a movimentação de outra estrutura tectónica regional, também com direção NNE-SSW: a falha Bragança-Vilarica-Manteigas. Mais para Leste, a superfície topográfica torna-se cada vez mais regular, atingindo uma platitude quase perfeita na área de Miranda do Douro, a cotas situadas entre 700 m e 800 m (Araújo & Pérez-Alberti 1999, Feio & Daveau 2004). Este é o prolongamento para ocidente da grande superfície da Meseta setentrional. Junto a Miranda do Douro, o encaixe do Rio Douro é muito marcado, dando origem a paredes subverticais, sobretudo quando talhadas em rochas graníticas. À medida que se segue para jusante, este encaixe vai-se tornando cada vez mais imponente, originando a grandiosa paisagem do vale do Douro, onde o encaixe atinge cerca de 600 m do topo até à base da vertente, atingindo o seu expoente máximo na área entre Vila Real e Lamego, onde grandes montanhas se aproximam do rio (Serra do Marão, a norte do Douro, contrafortes da Serra do Montemuro, a sul) (Araújo & Pérez-Alberti 1999). A geomorfologia transmontana é bastante variada, com as imponentes Serras do Barroso, do Alvão e do Marão a estabelecerem a Oeste a transição para o Minho, que apresenta distintos aspetos morfológicos. A dominância

de rochas, de natureza granítica na parte ocidental e de rochas metamórficas xistentas na parte oriental, determina também aspetos morfológicos diferenciados. A parte ocidental apresenta regiões planálticas separadas por vales e depressões de origem tectónica, com escarpas, muitas vezes, abruptas resultantes da atuação recente de estruturas crustais, enquanto que na parte oriental predominam as superfícies de aplanamento, que se estendem para a Meseta Ibérica, por vezes deslocadas por importantes acidentes tectónicos, onde sobressaem imponentes relevos de dureza como são as cristas quartzíticas ou possantes filões quartzosos (pormenores em Brum Ferreira 1981, Ribeiro *et al.* 1987, Feio & Daveau 2004).

A falha Verín-Régua-Penacova, com direção geral NNE-SSW, estrutura regional que condiciona fortemente a morfologia regional, e que deu origem a uma série de depressões tectónicas, marca a passagem para a unidade geomorfológica do Nordeste, onde o relevo é menos acidentado e predominam as formas planálticas – Planalto Transmontano (Araújo & Pérez-Alberti 1999, Feio & Daveau 2004, Teixeira 2011). A Este da falha Verín-Régua-Penacova surgem as Serras da Padrela, da Nogueira e de Bornes, estas duas últimas já relacionadas com a movimentação de outra estrutura regional, também com a mesma direção, a falha Bragança-Vilariça-Manteigas (pormenores em Cunha *et al.* 2019, Galdeano *et al.* 2019). Ainda mais a Este, a superfície topográfica torna-se mais regular na área de Miranda do Douro com cotas entre os 700 e os 800 m, sendo o prolongamento para ocidente da grande superfície da Meseta Setentrional. A morfologia do vale do Douro é caracterizada por vales profundos e abruptos na parte oriental, no Douro Internacional e na sub-região do Douro Superior, onde o rio atravessa rochas sobretudo xistentas do Complexo Xisto-Grauváquico, muito condicionadas pela fracturação NNE-SSW. Na parte ocidental o relevo ainda imponente, apresenta topos mais adoçados, nomeadamente no maciço granítico de Vila Real-Carviçais.

A evolução geotectónica do soco ante-Varisco, imposta pela orogenia Alpina com a reactivação das falhas tardi-Variscas, está na origem dos actuais traços morfoestruturais da região (e.g., Brum Ferreira 1980, Ribeiro 1984, Cabral 1995, Vergés *et al.* 2019, Galdeano *et al.* 2019). Na região transmontana é de realçar as seguintes megaestruturas crustais profundas (pormenores em Feio 1985, Ribeiro 1984, Pereira & Ferreira 1985, Cabral 1989, Ribeiro *et al.* 1990, Brum Ferreira 1991, Cabral 1995, Oliveira & Portugal Ferreira 1995, Baptista 1998, Pereira 1999a,b, Dias *et al.* 2012, Cabral *et al.* 2019, Vergés *et al.* 2019, Galdeano *et al.* 2019): (i) a falha de Bragança-Vilariça-Manteigas, que passa por Bragança, Macedo de Cavaleiros, Vilariça e Vila Nova de Foz

Côa, e onde se formaram depressões em cujos fundos se acumularam depósitos detríticos; alguns destes depósitos, incluindo os de idade quater-

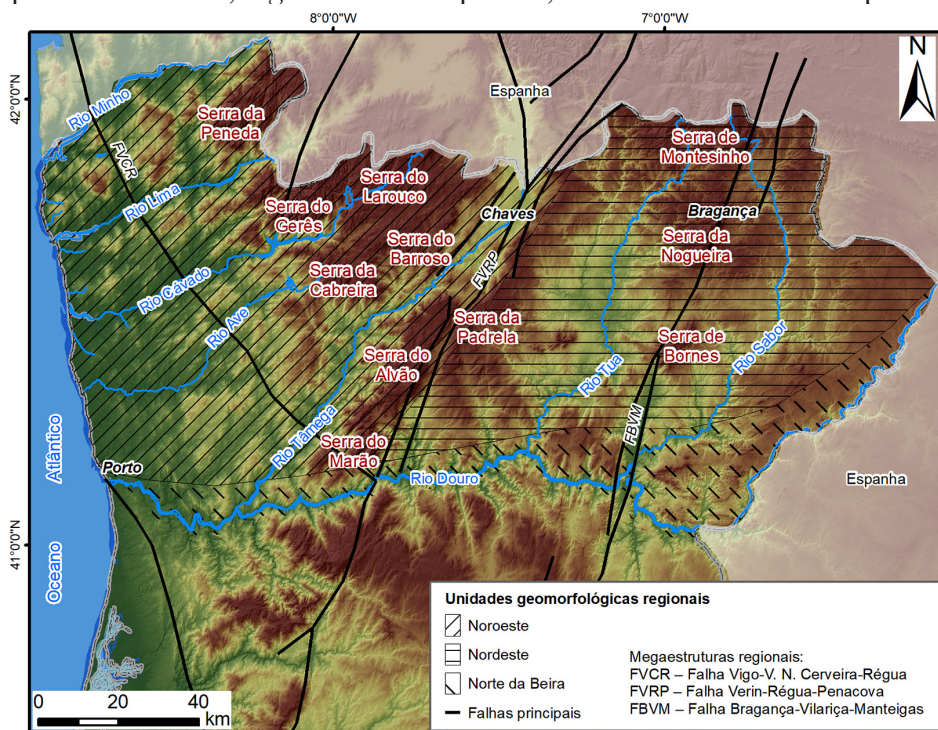


Figura 2: Esboço das unidades geomorfológicas regionais, a Norte do rio Douro (adaptado de Feio & Daveau 2004; segundo Teixeira 2011).

nária, foram afectados pelo ressoar desta megaestrutura activa nos tempos modernos; (ii) A falha Verín-Régua-Penacova, que condiciona a linha de depressões Régua-Chaves-Verín com deposição de depósitos detríticos que em Chaves podem alcançar até 1600 m de espessura (Monteiro Santos *et al.* 1995a,b, 1996, 1997).

De salientar, ainda, o conjunto de megaestruturas circulares ligados aos maciços de Vinhais-Bragança e Morais que dominam todo o esquema tectónico de Trás-os-Montes Oriental. Na região Norte de Portugal e, em particular, em Trás-os-Montes ocorre importante actividade neotectónica (e.g., Ribeiro 1984, Pereira & Ferreira 1985, Brum Ferreira 1991, Cabral 1989, 1995, Baptista *et al.* 1993, 1998, Baptista 1998, Calado 2003). Esta foi confirmada por sondagens de pesquisa e captação de água (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b) que revelaram espessuras de materiais sedimentares de mais de 100 m na Vilaríça e de mais de 220 m na Veiga de Chaves, a poucas dezenas de metros das falhas que delimitam a estrutura tipo *graben*.

A tectónica fracturante é dominada pela direcção NNE-SSW a NE-SW, além dos sistemas conjugados com orientação NNW-SSE a NW-SE, em relação à qual ocorrem importantes ocorrências de águas minerais (e.g., Choffat 1917, Freire de Andrade 1937, 1952, Teixeira 1948, Pereira & Ferreira 1985, Portugal Ferreira *et al.* 1992, 2003, Baptista *et al.* 1993, 1998, Oliveira & Portugal Ferreira 1995, Calado 2003, Carvalho & Chaminé 2016). Importa assim salientar que, os sistemas de megaestruturas dominantes (em especial, os de orientação NNE-SSW a NE-SW, NW-SE, ENE-WSW) e nós tectónicos associados, condicionam a génese de eventuais sistemas hidrominerais no soco cristalino e cristalofílico (Carvalho & Chaminé 2016).

As características da rede hidrográfica estão ligadas, fundamentalmente, à natureza das rochas, dos acidentes tectónicos e da tipologia climática. Assim, os cursos de água do Norte instalaram-se ao longo de zonas de fractura crustais, com traçados por vezes praticamente rectilíneos ao longo de três direcções preferenciais (Feio & Daveau 2004): ENE-WSW a E-W, NE-SW e NNE-SSW (Figura 2).

3. Características Hidrogeológicas Regionais

As condições hidrogeológicas de Trás-os-Montes resultam da evolução da geologia regional e da estruturação litológica, e são condicionadas pelas características da recarga (em particular, derivada dos aspectos geomorfológicos e climáticos). O traço comum a toda a região é a dominância de rochas cristalinas e cristalofílicas mais ou menos tectonizadas, fracturadas e alteradas, em que a circulação de água subterrânea se faz ao longo de descontinuidades (e.g., diaclases, falhas, fracturas, filões, ou contactos mecânicos entre tipos litológicos distintos).

Uma secção vertical típica, adaptada como representativa do comportamento do maciço das rochas cristalinas e metassedimentares da área (Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1987, Costa 1990, Pereira 1999, Carvalho 2006), pode ser esquematizada assim: (i) horizonte de alteritos ou rególito, que se desenvolve até um máximo de 10 m de profundidade, (ii) zona alterada, tipicamente até cerca de 55 m de profundidade, à excepção de sectores específicos controlados por fracturação intensa, (iii) rocha sã, a maior profundidade, onde a circulação da água se faz, essencialmente, por fracturas cuja ocorrência e intensidade diminui progressivamente.

Na vertical de um maciço rochoso como o de Trás-os-Montes pode generalizar-se o funcionamento hidráulico proposto por Lloyd (1999), Figura 3:

- i. Um subsistema superficial não confinado, instalado nos alteritos, com transmissividade baixa e coeficiente de armazenamento apreciável, onde estão instaladas captações do tipo poço;
- ii. Um subsistema pseudo-confinado a semi-confinado subjacente, com transmissividade global baixa, mas elevada nas zonas fracturadas, e baixo coeficiente de armazenamento (Carvalho 1993b).

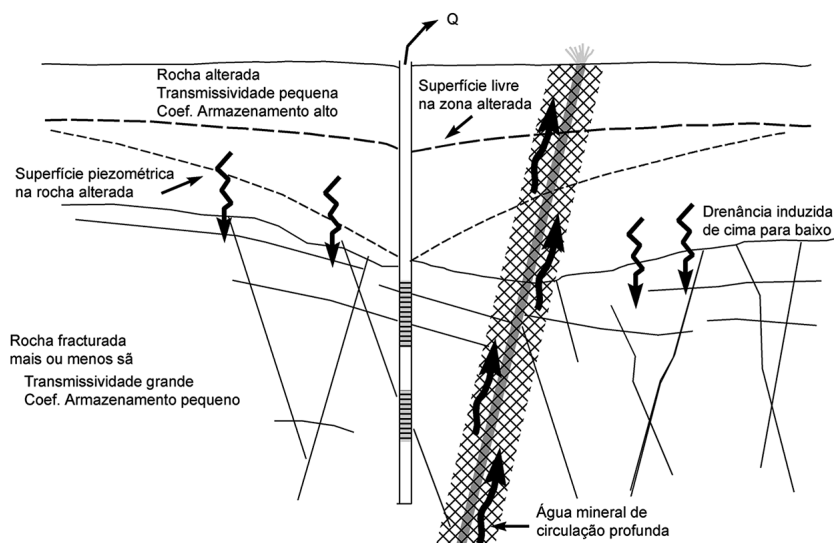


Figura 3: Esquema tipo das relações hidrodinâmicas em torno de um furo de captação em rochas cristalinas de Trás-os-Montes. A exploração do furo induz desequilíbrio entre a zona alterada e a zona fracturada, originando drenância de cima para baixo (adaptado de Carvalho 2006).

Com efeito, na zona alterada do maciço identificam-se aquíferos livres (subsistema superficial) com permeabilidade intersticial predominante. A superfície livre, quando existe, acompanha a topografia e está muito próxima do terreno. No subsistema (confinado a semi-confinado), onde está instalada a maior parte do circuito hidráulico, a água ocorre em zonas fracturadas, onde a circulação não é contínua. No seu conjunto o maciço tem um comportamento de aquitardo, dadas as baixas condutividades hidráulicas ocorrentes. Geralmente, as maiores condutividades hidráulicas são verificadas na transição rocha alterada – rocha sã e em zonas fortemente tectonizadas. A tipologia, intensidade e a distribuição da fracturação são os principais factores que influenciam o grau de conectividade entre fracturas e, conseqüentemente, os caudais disponíveis (e.g., Carvalho 1984, 1993b, 1996, 2006, Carvalho *et al.* 2000, 2003, 2005, 2007).

O comportamento hidrodinâmico dos diferentes níveis acima referidos é bem diferenciado do ponto de vista hidráulico (transmissividade, condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento). Existem condições de confinamento que aumentam com a profundidade e, por isso, o coeficiente de armazenamento decresce sendo correlacionável com a espessura total das zonas circuladas intra-macizo. A circulação da água, intra-macizo, é feita por drenância ao longo das zonas circuladas: essa circulação é maioritariamente de cima para baixo nas zonas de recarga e de baixo para cima nas zonas de descarga. Em torno de furos de captação em operação a drenância faz-se, necessariamente, de cima para baixo (Figura 3).

Na região predominam os valores de baixas condutividades hidráulicas e de baixos coeficientes de armazenamento (Carvalho *et al.* 2004, 2005a,b, Carvalho 2006). Parâmetros hidrodinâmicos que, como já se referiu, conferem a estas formações uma classificação próxima de aquitardo, isto é, de formações geológicas que cedem água com dificuldade. Além disso, nas zonas mais montanhosas os declives elevados favorecem o rápido escoamento das águas infiltradas. Apesar do ambiente hidrogeológico desfavorável para a circulação de águas subterrâneas é possível captar caudais modestos mas sustentados, por captação, para a satisfação de necessidades como o abastecimento público de pequenas aldeias, pequenas unidades industriais ou explorações agrícolas de pequenas dimensões (Carvalho 2001a,b, Carvalho *et al.* 2003, 2005a,b). Neste caso pode, então, dizer-se que estes ambientes geológicos são o suporte de aquíferos fissurados, descontínuos, muito dependentes do regime das precipitações. Tratando-se de aquíferos descontínuos, a distribuição da água subterrânea no espaço, no tempo e em profundidade é muito irregular e condicionada, a nível do reservatório, pela fracturação e pela alteração da rocha encaixante o que torna a pesquisa e a captação da água subterrânea associada a um elevado risco de insucesso (Carvalho 2006).

A circulação de águas minerais, nos sectores onde são captadas para balneários termais (e, eventualmente noutros domínios do espaço subterrâneo ainda não identificados à superfície), ocorre ao longo de grandes eixos de fracturação e em certos nós tectónicos geradores de permeabilidades que favorecem a ascensão de fluidos profundos (e.g., Portugal Ferreira *et al.* 1981, 1982, 1984, Oliveira & Portugal Ferreira 1995, Carvalho 1993a,b, Carvalho *et al.* 2005a,b, 2007, Carvalho & Chaminé 2016, 2017). Isto quer dizer que na zona de emergência das águas minerais ocorrem: (i) águas comuns em aquíferos não confinados nos alteritos, (ii) águas comuns dos ambientes, descontínuos, confinados e semi-confinados na rocha sã fracturada, (iii)

águas minerais ao longo da fracturação principal, que permite circulação profunda, ou em nós tectónicos. Adivinhe-se a complexidade de projectar e construir captações de águas minerais e de recursos geotérmicos neste contexto (a este propósito pode consultar-se Carvalho 2006).

A fracturação não é o único parâmetro que condiciona a circulação de água subterrânea em Trás-os-Montes (pormenores em Carvalho 1993b). A alteração meteórica, ou eventualmente deutérica, joga importante papel na criação de zonas com permeabilidade mista (intergranular e de fissuras) que têm um papel importante na modelação hidrogeológica dos aquíferos (Lachassagne *et al.* 2011, 2014, 2021).

A introdução e a banalização da perfuração com martelo de fundo de furo com ar comprimido (rotopercussão, na gíria comum, importada de Espanha) a partir dos anos setenta do século XX (Carvalho 1979, 1983, 1984), veio demonstrar que a relação custo/benefício dessas operações de pesquisa e captação até profundidades de 100 a 200 m tem uma procura, por utilizadores públicos e particulares, que se cifra na realização de largas centenas de furos por ano em Trás-os-Montes (Carvalho *et al.* 1993b). Portanto, hoje em dia, com as técnicas de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos de que se dispõe, o problema societal já não é tanto o do sucesso das operações de pesquisa e captação mas, como conciliar a procura e a exploração da água subterrânea com o objectivo do desenvolvimento sustentável dos recursos, na óptica da actual Lei-Quadro da Água, e dos imperativos das políticas de conservação da água.

As estruturas hidrogeológicas mais favoráveis para a ocorrência de águas subterrâneas estão abundantemente sumarizadas na bibliografia especializada (e.g., Castany 1982, Larsson 1984, Pereira 1992, Carvalho & Chaminé 2004, Bisson & Leher 2004, Fitts 2013, Fetter 2014). Carvalho (2006), designando essas estruturas por armadilhas hidrogeológicas, apontou, para além das feições geológicas que estão associadas ao controlo tectónico e litológico, à presença de pequenas bacias locais de enchimento ou zonas extensas de alteração, ligadas ou não a processos tectónicos, que podem constituir pequenos aquíferos freáticos ou favorecer as condições de recarga de subsistemas fissurados subjacentes (acrescentando armazenamento ao sistema). A excepção ao modelo generalizado de ocorrência de aquíferos fissurados em Trás-os-Montes é constituída pelas bacias sedimentares de Chaves, de Sendim, da Vilariga, de Vimioso e de outras de minúscula expressão onde a permeabilidade predominante é do tipo intergranular. Neste domínio, o aquífero da Veiga da Chaves reveste-se de importância regional, podendo jogar um papel relevante no uso conjunto de águas superficiais e águas sub-

terrâneas na zona envolvente, designadamente no abastecimento público à cidade de Chaves.

Do ponto de vista da gestão territorial, actualmente todos recursos hídricos subterrâneos de Trás-os-Montes estão integrados na massa de água *Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Douro* à excepção das formações detríticas da Bacia de Chaves que constituem a *Massa de Água AI – Veiga de Chaves*².

3.1. Condições de Recarga

De uma forma simplificada, a recarga das águas subterrâneas é condicionada por dois grandes factores: (i) a capacidade de ingestão e de infiltração dos terrenos (Schöeller 1962, 1967, 1983), portanto parâmetros associados às características geomorfológicas e hidro-litológicas, e, (ii) variáveis hidro-meteorológicas. É destas que trataremos aqui, na óptica da água meteórica disponível para a infiltração, recarga e circulação subterrânea.

A distribuição dos elementos climáticos principais (precipitação e temperatura), associada às características geológicas e geomorfológicas da região, assumem um controlo importante na evapotranspiração real, condicionando fortemente os excedentes e as disponibilidades de recursos hídricos subterrâneos (Carvalho *et al.* 2005a, Carvalho 2006).

O território interior de Portugal Continental exhibe características geográficas e climáticas específicas, que o diferenciam claramente de outras regiões europeias. As condicionantes principais do seu clima prendem-se, com a posição marginal do continente português relativamente ao Oceano Atlântico, numa latitude subtropical (Ribeiro *et al.* 1987, 1988). A influência mediterrânica faz-se sentir, sobretudo, nos meses de Verão, estando associada a temperaturas e insolação elevadas e a uma quase total ausência de precipitação. A influência atlântica caracteriza-se pelas superfícies frontais predominantes no Inverno e que, deslocando-se de Oeste para Este, são responsáveis pela maior parte da precipitação que ocorre. Assim, a um Verão quente e praticamente sem precipitação, opõe-se um Inverno com temperaturas suaves, mas bastante pluvioso, especialmente na fachada litoral ocidental ou neve, no interior e terras altas (Ribeiro *et al.* 1987, 1988). Por isso, o clima de Trás-os-Montes é, ainda, o resultado no clima continental das influências mediterrânica e atlântica (Ribeiro 1988). O clima da região Norte de Portugal é, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (McKnight & Hess 2000, Peel *et al.* 2007), temperado, com um Verão quente e seco (Csa), correspondendo o pico do calor ao longo do ano ao período de menores pre-

2) <https://snirh.apambiente.pt/> (consultado em Janeiro de 2021).

precipitações, e naturalmente maior secura, para as áreas do vale do Douro e a Sul da Cordilheira Central, e com um Verão seco e temperado (Csb), para a maior parte das áreas do Norte de Portugal e da Galiza (Peel *et al.* 2007, Teixeira 2011).

Na Figura 4 está representada a precipitação média anual na região de Trás-os-Montes com base no Atlas Digital do Ambiente³ (Quantidade Total de Precipitação da série 1982-1992). Constata-se que a oeste da falha Verín-Régua-Penacova os valores de precipitação são mais elevados, estando acima dos 1600 mm/ano, sendo exemplos as zonas das Serras do Alvão e do Marão. Na Serra de Montesinho também ocorrem precipitações elevadas, da ordem dos 1200 a 1400 mm/ano. Todo o restante território do nordeste transmontano é caracterizado por precipitações abaixo de 1000 mm/ano, chegando nas zonas de Valpaços, de Mirandela e de Torre de Moncorvo a valores entre 500 e 600 mm/ano e, porventura menos, no encaixado vale do Douro a montante do Pinhão.

O mapa da Figura 4 reflecte a precipitação média entre 1982 e 1992, sendo, por isso, expectável que actualmente as precipitações sejam mais baixas, fruto da variabilidade climática em curso.

3) <https://www.apambiente.pt>

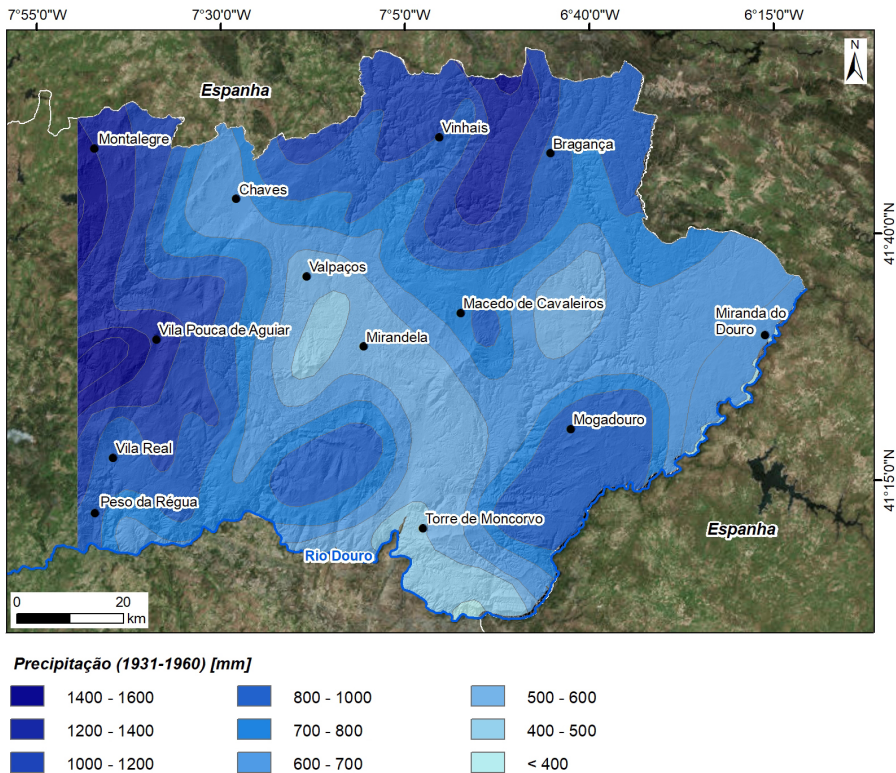


Figura 4: Precipitação média anual (mm) da região Transmontana (dados do Atlas Digital do Ambiente: 1982-1992).

A distribuição das temperaturas médias anuais segundo o Atlas Digital do Ambiente (Temperaturas da série 1982-1992), apresenta variações significativas, desde valores médios anuais altos, na ordem de 16 °C na região do vale do Douro, até temperaturas a rondar 7,5 °C a 10 °C, registadas no topo das serras do Marão, Alvão e Montesinho (Figura 5). De referir ainda as temperaturas elevadas registadas no vale do Douro e na Terra Quente Transmontana que apresentam um verão quente, seco e prolongado. Além da variação da temperatura com a altitude é de referir, também, a influência da continentalidade (Ribeiro *et al.* 1987, 1988). O relevo condiciona fortemente as temperaturas médias anuais às quais estão aliados valores diferentes nas amplitudes térmicas anuais, sendo estas mais baixas na fachada ocidental (cerca de 10 °C na região do Porto). Estes valores aumentam rapidamente para oriente.

O mapa da recarga regionalizada para a região do Nordeste de Portugal (Figura 6) foi extraído do estudo de LABCARGA (2017), onde foi desenvolvida uma metodologia, em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para

o apoio da gestão de recursos hídricos subterrâneos para a APA. A cartografia da recarga regionalizada foi genericamente baseada na actualização do Índice do Potencial de Infiltração – IPI (Teixeira 2011, Teixeira *et al.* 2013) e apoiado na cartografia do Índice Metros Caudal (IMC) (Carvalho 1993b, 2006). O IPI recorre a uma metodologia combinada baseada em modelos analíticos hierárquicos multi-critério e técnicas de geovisualização e análise geoespacial apoiadas por SIG (e.g., Saaty 1994, 2008, 2012, Dykes *et al.* 2005, Teixeira 2011, Teixeira *et al.* 2013, Malczewski & Rinner 2015, Brunelli 2015, Mu & Pereyra-Rojas 2017).

As classes mais representativas da recarga são a de 50-100 mm e a de 100-200 mm. As zonas de maior recarga situam-se, sobretudo, entre Vila Pouca de Aguiar e Vila Real e entre Vinhais e Macedo de Cavaleiros, estando particularmente relacionadas com zonas de maior precipitação e temperaturas do ar relativamente baixas. De forma simplificada, considerou-se que a recarga é equivalente à precipitação sendo incluídas, portanto, águas infiltradas que são devolvidas à linha de água muito rapidamente, isto é, com pouco tempo de residência no reservatório.

As taxas de infiltração correspondentes aos valores da Figura 6 são da ordem de 10% (Carvalho *et al.* 2000, 2003), consideravelmente mais baixas do que as consideradas por outros autores (e.g., Alencão 1998, 2004, Pereira 1999, Oliveira 2001, Lobo-Ferreira 1981). Ainda assim, os valores da recarga podem estar ligeiramente sobre-avaliados porque não têm em conta as alterações nos padrões de precipitação e de temperatura pós 1992 e que podem agravar-se num cenário de alterações climáticas, conforme referido anteriormente.

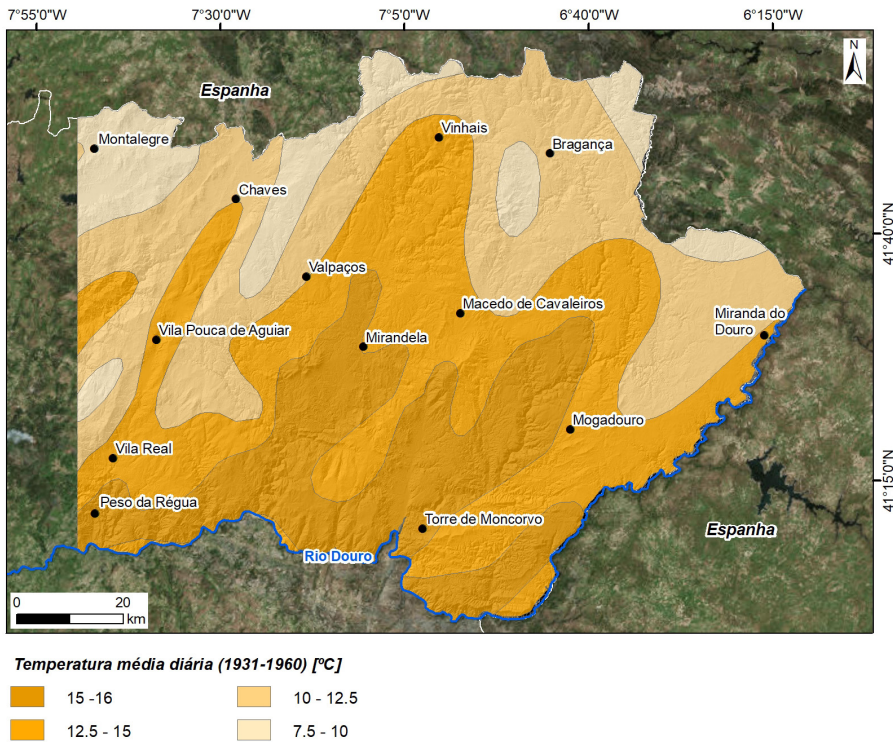


Figura 5: Temperatura média anual (°C) da região Transmontana (dados do Atlas Digital do Ambiente: 1982-1992).

3.2. Favorabilidade de Ocorrência de Águas Subterrâneas

O reservatório hidrogeológico em Trás-os-Montes, relembra-se, é composto quase exclusivamente por formações de natureza granítica e metassedimentar. A circulação de água nestas rochas de permeabilidade fissural faz-se, preferencialmente, por descontinuidades: diaclases, falhas, estruturas filoneanas, e contactos geológicos, embora a alteração dos maciços possa desempenhar um papel relevante no funcionamento hidráulico dos aquíferos. A presença de filões e filonetes, em particular de quartzo, é geralmente um factor de favorabilidade para a circulação da água subterrânea (Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1987, Costa 1990, Pereira 1992, 1999, Pereira & Almeida 1995). As estruturas filoneanas ocorrentes em alguns sectores são bastante numerosas, mas apresentam-se, geralmente, pouco possantes e pouco contínuas. Assim, o seu comportamento como dreno ou barreira hidrogeológica a nível regional no conceito de Bisson & Leher (2004) parece ser de pequena relevância, a não ser à escala local.

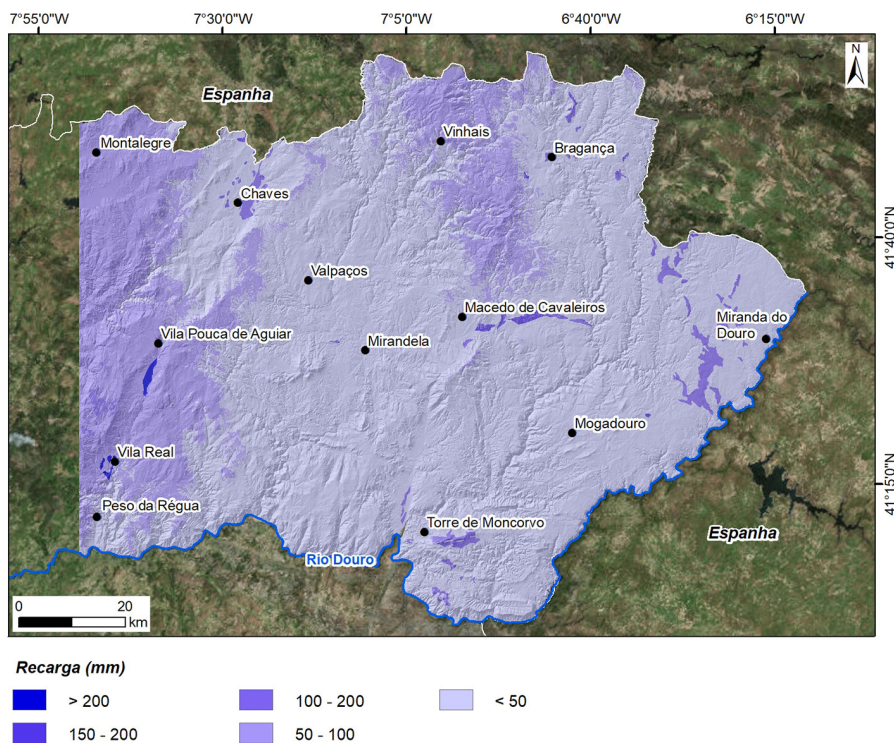


Figura 6: Recarga na região Transmontana (adaptado de LABCARGA 2017).

Os depósitos de vertente e os escassos depósitos de fundo de vale têm porosidade intersticial, são mal calibrados e pouco espessos. Têm um coeficiente de armazenamento relativamente alto, quando comparado com o da rocha, razão porque suportam pequenas emergências, geralmente perenes – embora com variabilidade sazonal apreciável – contribuindo para melhorar as condições de produtividade das formações subjacentes. Os recursos destes depósitos são tradicionalmente explorados por poços e/ou por captações horizontais pouco profundas.

3.3. Recursos Hídricos Subterrâneos e Caudais de Exploração

O conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos é um importante vector do ordenamento do território a uma escala macro, aquela que é feita pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Estes têm sido alvo de várias avaliações e actualizações periódicas, no contexto da cartografia nacional ou

regional⁴ (e.g., Moitinho de Almeida 1970, Paradela 1975, 1984, Gonçalves Henriques 1985, Almeida *et al.* 2000, Planos de Gestão de Região Hidrográfica – APA⁵).

Mais recentemente, os recursos de água subterrânea (expressos em L/s/km² na Figura 7) foram avaliados a partir da recarga e da distribuição da precipitação média anual (LABCARGA 2017). A produtividade é mais elevada nos sectores Serra da Padrela (Vila Real) e Serra de Montesinho (Bragança), com valores a rondar 7,5 a 10 L/s/km². As produtividades mais baixas ocorrem no vale do Douro, com valores inferiores a 1,5 L/s/km².

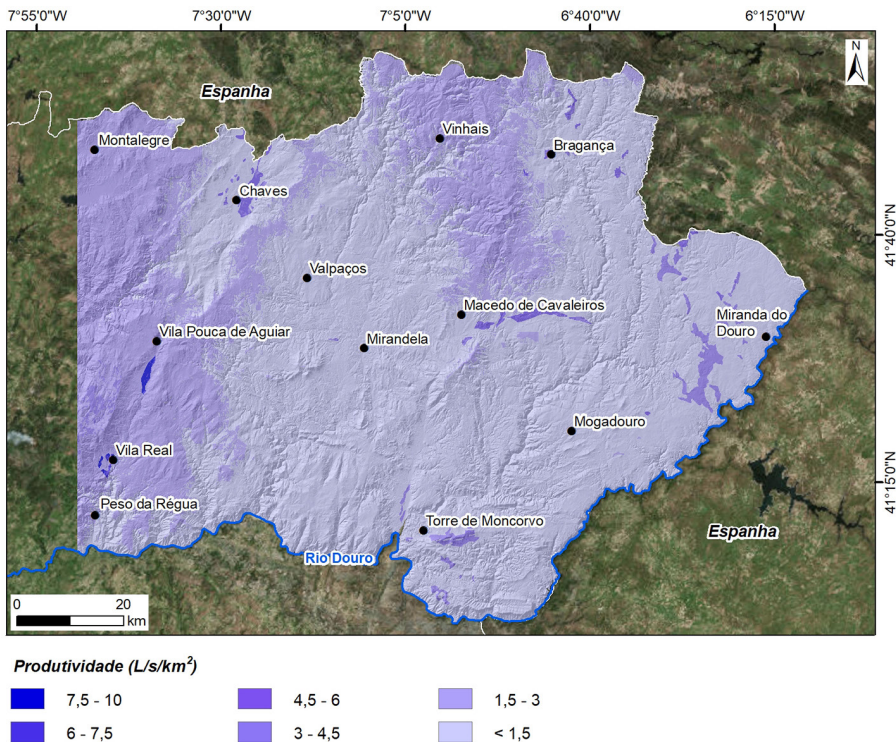


Figura 7: Produtividade da região Transmontana (adaptado de LABCARGA 2017).

- 4) Valerá a pena referir ao nível da abordagem conjunta dos recursos hídricos e dos recursos hidrominerais, que estes últimos correspondem a uma parcela ínfima das águas meteóricas infiltradas. No caso português, segundo Carvalho *et al.* (2018), o conjunto das águas minerais naturais e de nascente captadas em Portugal corresponde a 0,02% do total das águas subterrâneas extraídas e a 0,15% das necessidades de abastecimento público. Em Trás-os-Montes essas taxas serão ainda mais baixas, dado o pequeno número de manifestações e de explorações existentes.
- 5) Planos de Gestão de Região Hidrográfica – APA: <https://apambiente.pt/agua/1o-ciclo-de-planeamento-2010-2015>; <https://apambiente.pt/agua/2o-ciclo-de-planeamento-2016-2021>; <https://apambiente.pt/agua/3o-ciclo-de-planeamento-2022-2027>

O conhecimento dos recursos à escala territorial é satisfatório, mas importa abordar o problema ao nível do concelho, da freguesia ou do lugar. Por outras palavras, sabendo-se que o recurso é constituído por aquíferos com pequena inércia hidráulica (i.e., descontínuos, de pequena dimensão, com coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica reduzidos), como explorar, em estiagem, com coeficientes de segurança apropriados, alguns L/s/km² em zonas de forte déficite hídrico?

É óbvio que, a essa escala, a carta de produtividades é apenas um tecto a nível de uma visão estratégica da questão, pois essa generalização não resolve o problema do risco geológico de insucesso da implantação das pesquisas e captações e da correcta definição dos caudais de exploração das mesmas, factores que têm sido o “calcanhar de Aquiles” das políticas de abastecimento de água a pequenas povoações de Trás-os-Montes (Carvalho *et al.* 1993b). Estes abastecimentos públicos têm sido, regra geral, conduzidos na óptica dos furos de pesquisa e captação para usos privados, com nível tecnológico incipiente (técnica de perfuração eficiente, mas geralmente sem acompanhamento hidrogeológico), sem uma visão que enquadre hidrogeologia e engenharia de águas subterrâneas (e.g., Driscoll 1986, Sterrett 2007, Missetar *et al.* 2017, Glotfelty 2019).

O resultado desta aproximação tem sido um ciclo sem fim de construção de furos sempre que há um período de seca, não havendo um olhar crítico sobre a utilização racional dos recursos existentes à escala local, a não ser a da solução da adesão às redes de distribuição em alta, baseadas em águas superficiais.⁶ Não sendo conhecidos inventários regionais que englobem dados hidrogeológicos, ensaios de caudal, caudais e níveis, na nossa abordagem recorreremos a um programa de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos para agricultura em Trás-os-Montes (pormenores em Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1987a,b, Carvalho *et al.* 1993b, 2005, Carvalho 2006), que foi realizado no âmbito do PDRITM com coordenação da Direcção Regional de Agricultura de Trás-os-Montes e financiamento do Banco Mundial (Figura 8)⁷.

6) Neste contexto é gritantemente negativo o facto de não haver monitorização de níveis de água nas captações de água subterrânea de Trás-os-Montes: explorar captações sem controlo de níveis é como pilotar um avião sem altímetro! Nas captações tubulares de água o “*crash*” é a paragem do grupo eléctrico submersível por falta de água, situação inconcebível numa captação seriamente construída e gerida.

7) Este programa foi coordenado a nível dos Recursos Hídricos Subterrâneos pelo geólogo José Martins Carvalho, com o apoio dos engenheiros Joaquim Guedes e Manuel Areias e o suporte dos hidrogeólogos Yoav Harpaz e Haim Michelson da TAHAL, Telavive. Nele participaram, também, os geólogos estagiários da ACavaco Maria do Rosário Costa, Manuela Martins de Carvalho e Henrique de Sá Delgado e, actualmente, professores do ensino superior (UTAD, ISEP e UA, respectivamente).

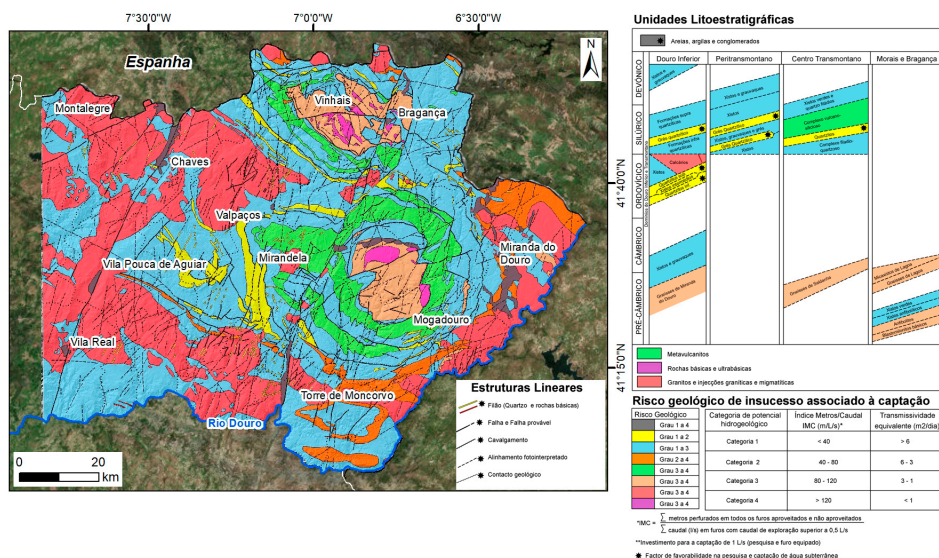


Figura 8: Carta de recursos hídricos subterrâneos de Trás-os-Montes (o risco geológico de insucesso associado à captação de água subterrânea numa dada área) é expresso pelo Índice Metro Caudal (IMC= \sum metros perfurados (m)/ \sum caudal dos furos, com Q>0,5 L/s). As transmissividades foram calibradas com ensaios de caudal nos furos produtivos (base geológica adaptada e revista de Ribeiro 1974, Ribeiro *et al.* 1979, Oliveira *et al.* 1992, Pereira *et al.* 2001). Revisto de Carvalho (2006).

As investigações realizadas incluíram a localização com critérios expeditos de obras de pesquisa e captação com acompanhamento hidrogeológico exaustivo, tendo sido realizados cerca de 300 furos até 100 m de profundidade e 70 poços, em 25 “áreas representativas” de 4 a 20 km². De acordo com o critério de apenas se aproveitar perfurações com caudal de exploração estimado superior ou igual a 0,5 L/s, foram entubados e completados cerca de 40% dos furos realizados⁸. Caudais de exploração sustentados superiores a 1 ou 2 L/s foram (e são) invulgares.

De notar que, os caudais de exploração foram definidos considerando, operação contínua de 20 horas por dia, durante todo o ano, respeitando os critérios de desempenho das captações enumerados por vários autores (e.g., Driscoll 1986, Carvalho 2006, Sterrett 2007, Misstear *et al.* 2017, Glotfelty 2019).

Carvalho *et al.* (2004) propuseram a designação de Coeficiente de Redução de Caudal (CRC) para a relação entre o caudal de exploração (Q_{expl}) e o

8) De notar que o caudal de exploração nada tem a ver com o que nas actuais práticas correntes em Portugal (e Trás-os-Montes em particular) se designa por caudal ‘air lift’, mas que é simplesmente o “soprar” o furo com ar directo para o seu desenvolvimento e limpeza final. No ‘air lift’ pode e deve haver controlo de níveis de água.

caudal máximo de perfuração (Q_{\max} Perf), a partir da análise de 251 furos no Maciço Antigo Português. Em Carvalho *et al.* (2006) fez-se aproximação semelhante, considerando duas populações distintas na Zona Centro-Ibérica, num total de 280 furos, e para ambas chegou-se a CRC de 0,27. Portanto, no Maciço Antigo do Norte e Centro de Portugal, com base num Coeficiente de Redução de Caudal (CRC) de 0,27, os caudais de exploração serão da ordem de 1/3 a 1/4 do caudal máximo de perfuração. Estes valores têm validade em Trás-os-Montes à luz dos resultados da população analisada no programa da DRATM (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b, Carvalho 1993a,b, 2006).

Em zonas de gradientes hidráulicos elevados, de pequenas áreas de contribuição para uma dada obra de captação, e em furos com rebaixamentos disponíveis diminutos (zonas captantes próximas da superfície), o CRC tende a ser consideravelmente mais pequeno. É mais alto em áreas aplanadas com fracturação ou fissuração bem distribuídas e captações com grande rebaixamento disponível.

Com base nos parâmetros hidrodinâmicos (a transmissividade foi calculada em modelo contínuo equivalente; Theis 1935, Cooper & Jacob 1946) e nas características dimensionais das captações, foi simulado o comportamento dos caudais e dos níveis para que não houvesse ralos a descoberto até ao início de nova época de recarga. Este critério⁹, ainda agora ignorado por muitos, é fundamental na fixação de caudais de exploração, decisão maior no desenvolvimento de recursos de águas subterrâneas¹⁰.

Para cada unidade litológica nas várias “Áreas Representativas” de Trás-os-Montes foi calculado o Índice Metros Caudal – IMC (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b, Carvalho *et al.* 2005a, Carvalho 2006). Este índice corresponde à relação, numa dada área, entre o número total de metros perfurados em todos os furos aproveitados e não aproveitados e o caudal total captado nos furos com mais de 0,5 L/s. O índice IMC é expresso em m/L/s (equação de dimensões inversa da transmissividade) correspondendo ao número total de metros a perfurar para captar 1 L/s. O IMC tem o significado físico da quantidade de metros a perfurar, entubar e ensaiar para obter um caudal (0,5 L/s) que permite, aproximadamente, a rega de um hectare ou

9) A não consideração do constrangimento de não haver tubos-ralo a descoberto é uma das grandes causas da descredibilização dos recursos de água subterrânea ao nível dos decisores.

10) O conhecimento da transmissividade e da curva característica de uma captação não basta para fixar caudais de exploração; é necessário prever a evolução dos níveis e dos caudais tendo em conta o modelo conceptual hidrogeológico e o dimensionamento da obra (e.g., Driscoll 1986, Sterrett 2007, Misstear *et al.* 2017, Glotfelty 2019). A confusão generalizada entre ‘caudal de perfuração’, ‘caudal de limpeza’, ‘caudal crítico’ e ‘caudal de exploração’ é frequente e dramática.

o abastecimento a uma povoação de 200 habitantes. Assim, numa dada área, é possível traduzir o risco geológico associado à prospecção e quantificar o custo da água em termos de investimento na pesquisa e captação.

Com base nesses pressupostos foi, então, possível elaborar uma carta de recursos hídricos subterrâneos para agricultura em Trás-os-Montes (Carvalho 1993b, 2006) e definir unidades hidroestratigráficas em que se propôs um zonamento hidrogeológico baseado no IMC, que caracteriza o risco geológico de insucesso associado à pesquisa e captação e, indirectamente, permite uma avaliação da transmissividade dos aquíferos (Carvalho 2006).

Na carta de recursos hídricos subterrâneos de Trás-os-Montes da Figura 7, que é herdeira das investigações então realizadas, deve ser realçado que os valores de transmissividade apresentados correspondem a furos com profundidades até 100 m. Nessa carta foram considerados furos produtivos os que têm caudais de exploração superiores a 0,5 L/s e níveis hidrodinâmicos máximos situados acima do topo do primeiro tubo-ralo¹¹. Ainda na Figura 7 são apresentadas classes de transmissividade do território de Trás-os-Montes considerando a relação entre a transmissividade (T) e o Índice Metros Caudal (IMC) deduzido por Carvalho *et al.* (2005a): $T=3 \times 1/\text{IMC}$, com T e 1/IMC em m²/dia. Em raras áreas, a transmissividade mediana alcança valores mais altos (e.g., Vinhas-Bagueixe com 17 m²/dia; Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b, Carvalho 1993b, Lobo-Ferreira & Leitão 1991). O Quadro 1 constitui uma síntese dos valores dos caudais de exploração e da transmissividade em Trás-os-Montes por grupo litológico.

Quadro 1: Síntese do caudal de exploração e da transmissividade do grupo litológico por captação em Trás-os-Montes (Carvalho *et al.* 2005a, Carvalho 2006).

Litologia	Caudal de Exploração (L/s)		Transmissividade (m ² /dia)	
	Mediana	Máximo	Mediana	Máxima
Metassedimentos (sem quartzitos)	0,50	3,0	2,3	63
Quartzitos	0,74	3,0	4,0	32
Granitóides	0,02	2,0	0,3	148

11) Os níveis dinâmicos foram obtidos a partir de simulação analítica dos parâmetros hidrodinâmicos transmissividade e coeficiente de armazenamento, para seis meses de operação contínua. Os valores de transmissividade (representativa do maciço em modelo contínuo equivalente) são necessariamente mais baixos que os obtidos para uma simples captação (e.g., Lima 2001, Carvalho 1993b, Carvalho *et al.* 2005a, Carvalho 2006, Oliveira *et al.* 2017) e que os de Pereira & Almeida (1995) ou de Pereira (1999), determinados com um modelo de porosidade dupla. De resto, comparar valores de transmissividade em furos de rochas cristalinas é tarefa complexa se não se tentar homogeneizar a população estatística (características físicas das captações, sobretudo a profundidade, o dimensionamento das mesmas e o modelo operativo da captação).

Às transmissividades indicadas no Quadro 1 correspondem valores de condutividade hidráulica da ordem de 3×10^{-3} a 4×10^{-2} m/dia, que em modelo contínuo equivalente são permeabilidades de siltes e de areias muito finas, isto é, formações geológicas com características de aquífero ou de aquífero pobre (Custodio & Llamas 1970, Fetter 2014).

A regionalização das produtividades das obras de captação numa perspectiva utilitarista pode, também, ser encarada com a aplicação da “classificação da magnitude e variância da transmissividade” de Krásny (1993). No caso das formações cristalinas e cristalofilinas de Trás-os-Montes, esse índice é de interesse limitado pois virtualmente quase todas as situações se encaixam na Classe IV, transmissividade de 1 a 10 m²/dia (transmissividade baixa), adequada para extracções menores para abastecimento local e, muito raramente, na Classe III, transmissividade de 10 a 100 m²/dia (transmissividade moderada), adequada para abastecimento de pequenas povoações.

Constata-se que o abastecimento de pequenas povoações de Trás-os-Montes se ajusta à Classe III e à Classe IV de Krásny (1993), pelo que se entende que o uso das águas subterrâneas para esse fim só deve ser posto de lado, depois de esgotados todos os meios de prospecção hidrogeológica julgados mais adequados e convenientes¹². Em sectores pontuais, muito tectonizados, particularmente se nele ocorrerem águas minerais com termalidade, as transmissividades (em modelo contínuo equivalente) disparam para valores superiores a 20 ou 30 m²/dia (e.g., Moledo, Ribeirinha) e mesmo uns extraordinários 740 m²/dia nas Caldas de Chaves nos metassedimentos silúricos com cortejo de quartzo filoneano ou de bandas quartzosas (Carvalho 1993a, Carvalho 2006).

Em consonância com estudos de referência (e.g., Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b, Pereira 1992, Carvalho 1993a,b, Pereira & Almeida 1994, 1995, Carvalho 2006) para a prospecção táctica a nível local, os grupos litológicos mais produtivos correspondem aos quartzitos e aos xistos. As formações metavulcânicas, os anfíbolitos e as rochas quartzosas correspondem aos grupos com maior IMC (menor risco de insucesso associado à prospecção). A ocorrência de filões e filonetes de quartzo, ainda que de dimensão centimétrica, corresponde a importante factor de favorabilidade para a implantação de captações do tipo furo verificando-se, amiúde, estreita correspondência entre zonas circuladas e níveis quartzosos. Por isso, filões e filonetes de quartzo são a principal armadilha hidrogeológica, prioritariamente a pro-

12) A ocorrência de transmissividades singulares importantes, como se mostra no Quadro 1, em quase todos os tipos litológicos de Trás-os-Montes mostra que para abastecimentos de alguma magnitude (abastecimentos públicos, pequenas indústrias e/ou alguma actividade agrícola) se justifica a realização de estudos hidrogeológicos integrados, incluindo meios geofísicos.

curar em qualquer das unidades litoestratigráficas definidas regionalmente. Nos grupos dos factores de favorabilidade e dos indicadores de prospecção (Carvalho 2006) a posição topográfica mais adequada corresponde aos vales e encostas (Pereira 1992, 1999, Pereira & Almeida 1997), mas certas encostas alcantiladas podem ser interessantes para a realização de furos horizontais. Contrariamente às práticas em uso, do ponto de vista técnico-económico, dificilmente se encontra justificação para as profundidades de pesquisa ultrapassarem 100 m, a menos que uma fundamentação hidrogeológica clara o determine. A simples implantação de furos de pesquisa e captação sobre alinhamentos estruturais fotointerpretados, sem confirmação no terreno, é passível de forte controvérsia.

É óbvio que a realização prévia de estudos de implantação de furos de pesquisa e captação, incluindo estudos de fotointerpretação e cartografia hidrogeológica a escalas variadas, de geologia estrutural e métodos geofísicos, diminui o risco geológico de insucesso (induzindo IMC's mais baixos). Contudo a relação custo-benefício desta aproximação pode ser desmotivadora dado o actual baixo custo da perfuração com martelo de fundo de furo. Finalmente, pensamos que não se concebe a localização de pesquisas e de captações para abastecimento público sem que se conheça o modelo hidrogeológico conceptual da área e, por isso, não seja possível antecipar a viabilidade de futuros Perímetros de Protecção de acordo com o Decreto-Lei n.º 382/99, de 22 de setembro¹³.

3.4. Características Físico-Químicas da Água Subterrânea

Embora não nos propuséssemos abordar aqui a questão das características físico-químicas das águas subterrâneas de Trás-os-Montes interessará referir que Fernandes (1992), Alencão (1998, 2004), Marques (1999), Pereira (1999), Pacheco (2000), Oliveira (2001), Eggenkamp *et al.* (2015), dentre outros, mostraram que as águas ocorrentes são generalizadamente hipossalinas ou fracamente mineralizadas e que as águas de rochas metassedimentares são ligeiramente mais mineralizadas que as de rochas granitóides. A esse respeito consultar as sínteses de Oliveira *et al.* (2012) e Oliveira (2015, 2017). Não considerando as particularidades das águas minerais e de circulação profunda que registam a presença de uma fase gasosa (águas gasocarbónicas) ou de espécie reduzidas devido a um potencial de oxidação-redução baixo (águas sulfúreas), as águas têm, em geral, pH neutro a ligeiramente ácidos e, do ponto de vista químico, são do tipo bicarbonatado sódico a bi-

13) Apenas uma notória iliteracia a nível da engenharia das águas subterrâneas dos participantes em tais actividades poderá explicar a aberração da ocorrência de captações para abastecimento público na valeta de estradas nacionais ou municipais, como não é raro encontrar.

carbonatado cálcico, com concentrações variáveis de potássio e magnésio. A variedade composicional em catiões está directamente relacionada com a composição mineralógica dos aquíferos.

Em situações de não contaminação, as águas são adequadas para produção de água para consumo humano e para agricultura, à luz do Dec.-Lei 236/98 (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b, 1988, 1989). Portanto, raramente o quimismo é constrangimento à utilização da água subterrânea nesta área do País, embora se conheçam situações pontuais de ultrapassagens dos valores limite para consumo humano, nomeadamente em relação ao fluoreto, ao ferro, ao arsénio e ao manganês.

4. Massa de Água A1 – Veiga de Chaves

A Massa de Água A1 – Veiga de Chaves inclui, em termos de mapeamento da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), o sistema aquífero instalado nas formações sedimentares que constituem o preenchimento da Bacia de Chaves (aluviões quaternárias, depósitos de terraço e formações sedimentares mais antigas, eventualmente ante-pliocénicas).

A Bacia de Chaves resulta de uma estrutura complexa, em ‘*graben*’, controlada maioritariamente por fracturação NNE-SSW de que a evidência maior à superfície é uma escarpa de falha a Este, de cerca de 450 m (de 350 m de cota no fundo do vale até 900 m nos planaltos da Bolidreira e de Nogueira da Montanha). A poente o relevo é menos vigoroso, em socacos, em direcção à serra do Larouco (e.g., Choffat 1917, Freire de Andrade 1937, Cavaca 1936, Zbyszewski 1938, Teixeira 1948, Teixeira *et al.* 1974). Fracturação intensa com orientação NNE-SSW, NNW-SSE e ENE-WSW controla os bordos da bacia e a respectiva estruturação interna. Particularmente as orientações NNE-SSW e NNW-SSE parecem ter um papel importante na emergência das águas termais de Chaves, situadas no limite SW do ‘*graben*’ (e.g., ACavaco 1981, Portugal Ferreira 1981, 1984, Carvalho & Silva 1988, Marques *et al.* 2000, Portugal Ferreira *et al.* 2003).

A área do sistema aquífero é da ordem dos 15,2 km² com um comprimento máximo entre Chaves e o limite Norte, em direcção a Verín (Galiza, Espanha), de quase 5 km e uma largura máxima de 3,4 km.

O conhecimento das condições hidrogeológicas da bacia de Chaves resulta do projecto, já referido, de desenvolvimento rural financiado pelo Banco Mundial (PDRITM) no final dos anos 80 do século XX e administrado pela

Direção Regional de Agricultura de Trás-os-Montes (DRATM)¹⁴. A nível hidrogeológico as investigações realizadas (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b) compreenderam trabalhos de inventariação hidrogeológica, prospecção geofísica e sondagens de pesquisa, ensaios de caudal e modelação numérica. No âmbito desse projecto foi caracterizado, até profundidades de cerca de 200 m, o sistema aquífero multi-camada da Veiga de Chaves, incluindo depósitos aluvionares descontínuos com cascalheiras (subsistema livre a semi-confinado), e inferiormente, um sub-sistema confinado, gresoso, constituído por alternâncias mais ou menos grosseiras e de argilas. O subsistema superficial era explorado através de poços e à época não eram conhecidos furos de pesquisa e captação de água na área.

Até essa data, considerando a notícia explicativa da Folha 6B (Chaves) da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 (Teixeira *et al.* 1974), não era atribuída grande importância ao controlo tectónico da bacia de Chaves e por isso, os depósitos detríticos eram considerados com algumas, escassas, dezenas de metros de espessura (Oliveira *et al.* 1982, Portugal Ferreira *et al.* 2003).

Uma prospecção geoelectrica com Sondagens Eléctricas Verticais (SEV)¹⁵ mostrou que a espessura dos materiais detríticos alcançava, pelo menos, 450 m, tendo a sequência geológica sido reconhecida com sondagens mecânicas. Duas dessas sondagens (AC1 e AC75), com pouco mais de 100 m de profundidade, permitiram caudais de exploração de 15 e 35 L/s, respectivamente (ACavaco 1987b). Os estudos e trabalhos realizados mostraram que o 'graben', em secção vertical, tem uma estrutura escadeada, controlada por falhas subverticais, com uma fossa na parte central do vale (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b, ACavaco 1987), (Figura 9).

Com base nestas investigações a Câmara Municipal de Chaves decidiu executar, de imediato, duas captações (ACPI e ACP2), com profundidades máximas até 218,5 m (ACavaco 1987) que vieram a mostrar caudais totais de 55 L/s. Estas duas captações e os dois furos de pesquisa AC1 e AC75 da DRATM permitiram, a partir de 1988, resolver o problema do abastecimento de água à cidade de Chaves, num momento em que a captação municipal por bombagem directa no Rio Tâmega estava em completa rotura técnica. O caudal de exploração para o conjunto dos quatro furos era de cerca

14) A equipa, que revolucionou os conhecimentos sobre a geologia e a hidrogeologia da Veiga de Chaves, foi liderada pelo Engenheiro Frederico Melo Franco e incluiu os então jovens geólogos Paul Holmes e José Martins Carvalho e os Engenheiros Joaquim Ferreira Guedes e António Sá da Costa, com o apoio dos hidrogeólogos Israelitas Yoav Harpaz e Haim Michelson.

15) Realizada pela, então, geóloga estagiária Maria do Rosário Costa e, actualmente, professora auxiliar na UTAD.

de 100 L/s (0,3 hm³/ano), caudal muito superior ao necessário para o abastecimento da cidade.

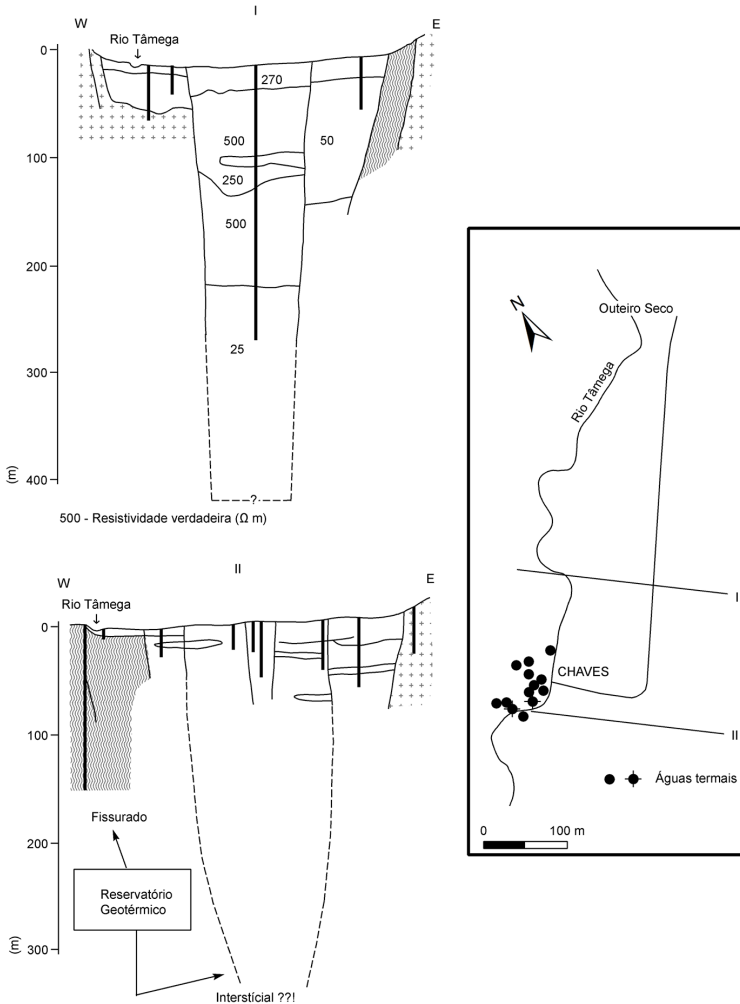


Figura 9: Perfis geológicos interpretativos simplificados da Veiga de Chaves, segundo Carvalho & Silva (1988). Note-se que os autores antecipavam já a possibilidade de ocorrência de um reservatório geotérmico instalado no bloco central mais abatedo da Veiga de Chaves.

A partir de 45 ensaios de caudal em sondagens de pesquisa e captação, realizadas especificamente pelo projecto da DRATM (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b), foi avaliada a transmissividade do aquífero, que se mostrou muito heterogénea, com valores entre 1 e 3000 m²/dia (com mediana de 42 m²/dia). Também foi possível determinar o coeficiente de armazenamen-

to (com um mínimo de 5×10^{-6} e um máximo de 3×10^{-2}), sendo os valores mais frequentes situados no intervalo $5,7 \times 10^{-5} - 8,3 \times 10^{-3}$, demonstrando situação de forte confinamento nos níveis produtivos mais profundos. Os níveis estáticos situavam-se à época, nas captações ACPI e ACP2 (Outubro e Novembro de 1986), a -3 e a -4 m ao terreno). As transmissividades nas captações ACPI e AP2 são da ordem de $85 \text{ m}^2/\text{dia}$ e $116 \text{ m}^2/\text{dia}$.

A recarga do sub-sistema superficial é feita directamente a partir da precipitação e do rio Tâmega e seus tributários. O subsistema profundo recebe recarga por drenância do aquífero superficial observando-se um atraso de três meses na resposta dos níveis ao início da recarga (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b, Almeida *et al.* 2000).

Em Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1987a) foi apresentado um balanço hídrico da Bacia de Chaves tendo sido determinado um valor de $2,4 \text{ hm}^3/\text{ano}$ para os recursos de água subterrânea, valor posteriormente reavaliado em $3,5 \text{ hm}^3/\text{ano}$, considerando a recarga induzida pela exploração prevista (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a). A recarga média a longo prazo, actualmente considerada no Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro¹⁶, é de $2,7 \text{ hm}^3/\text{ano}$. Determinações isotópicas nas águas provenientes do aquífero da Veiga de Chaves (Marques *et al.* 2000) indicam uma composição muito semelhante à das águas de recarga superficial, localizadas a uma altitude inferior a 660 m, em ambos os lados do ‘*graben*’ de Chaves e que as linhas de água locais deverão contribuir de “forma considerável” para a recarga do sistema aquífero da Veiga de Chaves.

Em 2001, a Câmara Municipal de Chaves aderiu ao Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento de Trás-os-Montes e Alto Douro (sistema de distribuição “em alta” actualmente detido pelas Águas do Norte, Grupo Águas de Portugal). Nesse contexto o sistema de captação, unicamente suportado em águas subterrâneas da Veiga de Chaves, funcionou a contento até 2009, ano em que as captações deixaram de ser utilizadas regularmente¹⁷. Com esta decisão, quiçá mais política que técnica, perdeu-se a possibilidade de integrar os recursos hídricos subterrâneos da Bacia de Chaves num esquema efectivo de uso conjunto com as águas superficiais, solução que traria manifestos ganhos ambientais e de custo final da água.

16) https://apambiente.pt/_zdata/Políticas/Agua/PlaneamentoeGestao/PCRH/20162021/PTRH3/PCRH3_Parte2.pdf (consultado em Janeiro de 2021).

17) Passando, eufemisticamente, à categoria de reserva estratégica, no dizer da terminologia oficial da APA.

5. Águas Minerais Naturais e Recursos Geotérmicos

No contexto transmontano existem águas qualificadas como águas minerais naturais que são usadas em hidrologia médica em balneários termais, para engarrafamento ou para ambos os fins. Algumas delas, tendo em conta a temperatura da água, são simultaneamente recursos geotérmicos. As águas minerais naturais qualificadas encontram-se maioritariamente na parte ocidental de Trás-os-Montes, enquanto as não qualificadas ocorrem, sobretudo, na parte oriental.

Em Portugal têm sido consideradas pela DGEG como recursos geotérmicos as águas que têm temperaturas superiores a 20 °C na emergência (DGEG 2017, 2021). Esta opção, no caso português (temperatura média do ar próxima de 16 °C), aproxima-se do critério de Schöeller (1962, 1982): uma água é termal (do ponto de vista geológico) se a sua temperatura for superior em 4 °C à temperatura média do ar da região. O uso de águas subterrâneas, quentes, em balneologia e balneoterapia, constitui uma aplicação geotérmica em usos directos. Contudo, no documento da DGEG (2017) considera-se uso geotérmico apenas a utilização das referidas águas termais em aplicações directas tais como aquecimento ambiente de casas, hotéis, estufas, etc, usos industriais e eventualmente a produção de electricidade.

Uma boa síntese das ocorrências de águas portuguesas com virtudes supostamente terapêuticas está disponível no ‘Novo Aquilégio’ (<http://www.aguas.ics.ul.pt/braganca>). Para o caso particular de Trás-os-Montes consulte-se ainda Almeida & Almeida (1970), Moitinho de Almeida (1970), TERMARED (2011) e Oliveira (2015, 2017).

5.1. Ocorrências Hidrominerais de Trás-os-Montes

Na Figura 10 são representadas as águas minerais naturais do território transmontano, qualificadas e não qualificadas pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). Dentro das águas minerais qualificadas à data de Dezembro de 2020 são apresentadas as águas minerais naturais cuja finalidade é o termalismo, o engarrafamento, ou ambas, que se encontram em exploração ou em exploração suspensa.

Valerá a pena sublinhar que, apesar do riquíssimo património hidromineral ocorrente e demonstrado neste capítulo, a nível balneotérmico apenas estavam em funcionamento regular em Janeiro de 2021¹⁸, segundo o sítio da Internet da DGEG¹⁹ os balneários termais de: Areal (Balneário Pedagógico de Vidago), Chaves; Caldas de Chaves, Chaves; Caldas de S. Lourenço,

18) Abstraindo das contingências decorrentes do surto pandémico do coronavírus de 2020/2021.

19) https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/geologia/recursos_hidrogeologicos/exploracao_de-aguas-minerais-naturais/termalismo/termas-em-atividade/ (consultado em Janeiro de 2021).

Carrazeda de Ansiães; Caldas Santas de Carvalhelhos, Boticas; Pedras Salgadas, Vila Pouca de Aguiar; Termas da Terronha, Vimioso, e Vidago, Chaves. Segundo a mesma fonte, estavam com a exploração suspensa: Águas de Vilarelho, Chaves; Caldas do Carlão, Murça; Caldas de Moledo, Mesão Frio; e Cardal, Vila Pouca de Aguiar.

Ainda no mesmo sítio da internet²⁰ em Trás-os-Montes estavam em exploração as oficinas de engarrafamento de Águas de Bem Saúde (Sampaio, Vila Flor), Água Campilho (Vidago, Chaves), Pedras Salgadas/Vidago/Areal (Bornes de Aguiar, Vila Pouca de Aguiar), e Caldas Santas de Carvalhelhos (Bessa, Boticas). Com actividade suspensa estavam as concessões Águas de Vilarelho, Chaves; Água Gostei, Bragança e Água de Sandim, Vinhais.

Será curioso assinalar que todas as manifestações acima assinaladas correspondem a explorações e sítios conhecidos há muitos anos, à excepção da 'Água Gostei', no concelho de Bragança, cujo contrato de exploração foi assinado em 2020 ao abrigo da lei 54/2015 de 22 de junho e Decreto-lei 86/90 de 16 de Março. É, também, do domínio publico que o processo de qualificação da 'Água da Abelheira' está em andamento²¹.

As águas minerais naturais não qualificadas, presentes na Figura 10, advêm do inventário do Atlas Digital do Ambiente (Carta Nascentes Minerais – Calado 1995), TERMARED (2011) e Oliveira *et al.* (2012). Para a descrição sumária do quimismo consideramos Almeida & Almeida (1970), Calado (2001), 'Novo Aquilégio'²² e o sítio do projecto Hidrogenoma da DGE²³ (pormenores em Lourenço & Pascoal 2019). Estes autores seguem, genericamente, o critério do Instituto de Hidrologia de Lisboa (Curto Simões 1993). Conformemente com essa abordagem consideramos as seguintes classes de águas: (i) Bicarbonatadas sódicas, apenas com a água mineral natural não qualificada da Ribeirinha); (ii) Sulfúreas, incluindo a maior parte das águas minerais naturais não qualificadas e que se situam na zona Nordeste da região, e, (iii) Gasocarbónicas, representadas pelas águas minerais naturais qualificadas que se situam sobretudo na zona da Falha Verín-Réguia-Penacova, mas também na falha de Bragança-Vilarica-Manteigas.

As indicações terapêuticas das águas minerais naturais qualificadas em Trás-os-Montes correspondem às seguintes patologias (e.g., Cantista 2008-2010, ATP 2009, Lourenço & Pascoal 2019): (i) Doenças do aparelho digestivo (so-

20) <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/geologia/recursos-hidrogeologicos/unidades-industriais-de-engarrafamento/> (consultado em Janeiro de 2021).

21) <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/geologia/recursos-hidrogeologicos/publicitacao/> (consultado em Janeiro de 2021).

22) <http://www.aguas.ics.ul.pt/index.htm> (consultado em Março de 2021).

23) <https://hidrogenoma.javali.pt/> (consultado em Março de 2021).

bretudo as gasocarbónicas); (ii) Doenças do aparelho respiratório (tanto as sulfúreas como as gasocarbónicas); (iii) Doenças de pele (tanto as sulfúreas como as gasocarbónicas); (iv) Doenças reumáticas e músculo-esqueléticas (tanto as sulfúreas como as gasocarbónicas); (v) Doenças do sistema nervoso (gasocarbónicas); (vi) Doenças metabólico-endócrinas (gasocarbónicas) e (vii) Doenças do aparelho circulatório (sulfúreas). Pormenores podem ainda ser consultados no sítio da *internet* do projecto Hidrogenoma da DGE (https://hidrogenoma.javali.pt/) e no sítio da *internet* das Termas de Portugal (https://termasdeportugal.pt/).

A composição físico-química das águas minerais está estreitamente associada às suas virtudes terapêuticas, por isso não surpreende que esse tema tenha sido o mais estudado. Destacam-se Almeida & Almeida (1970) que, como referimos, inventariaram cerca de cem nascentes “minero-medicinais” de Trás-os-Montes, desde as mais importantes termas até às mais ignotas manifestações a que o povo atribuía propriedades terapêuticas ou efeitos favoráveis à saúde. Acciaiuolli (1952/53), TERMARED (2011), Oliveira *et al.* (2012) e, outros, abordaram também essa faceta das águas minerais de Trás-os-Montes tentando associar-lhes a caracterização geológica local e/ou regional.

A partir dos finais da década de setenta, do século passado, assistiu-se a um notável desenvolvimento de trabalhos de hidrologia isotópica nas águas termais do Norte do País (e.g., Aires-Barros 1978, 1979, 1981, 1989, Moitinho de Almeida 1979, 1982, Ribeiro & Moitinho de Almeida 1981, Aires-Barros *et al.* 1991, 1994, 1995, 1998, Aires-Barros & Marques (1994), Marques 1993, 1999, Marques *et al.* 1999, 2000, 2003, 2006, 2010, 2012, 2019, Lima 2001, Lima & Oliveira 2007, Carvalho *et al.* 2007, Carreira *et al.* 2010, 2014, 2018, 2021, Eggenkamp *et al.* 2015, Marques 2017, Marques & Carreira 2019), que conduziram a inegáveis progressos a nível do conhecimento dos circuitos hidrominerais dessas águas.

Hoje há unanimidade internacional em relação à génese das águas minerais: por isso, comprovadamente, as águas minerais de Trás-os-Montes correspondem a águas meteóricas infiltradas com circulação lenta (milhares de anos) e profunda no caso das termas (com o “reservatório” situado a profundidades de dois ou três quilómetros) e que ascendem, até à superfície segundo os grandes eixos tectónicos, à fracturação associada e, sobretudo, em nós geoestruturais favoráveis. Alguns destes eixos tectónicos permitem a ascensão de gases de origem profunda que se incorporam nos aquíferos das águas minerais (Carvalho *et al.* 2006, 2007, Carreira *et al.* 2010).

Em relação à situação geológica e tectónica à mega-escala merecem menção os trabalhos específicos e pioneiros, porque numa óptica integradora, de Portugal Ferreira *et al.* (1981, 1984), que enquadraram as nascentes minerais de Trás-os-Montes no que designam por Província Transmontana. Nesta Província, segundo os mesmos autores “*as ocorrências situam-se normalmente onde os granitos assimilaram unidades do domínio sub-autóctone, ou, em alternativa, nos maciços de rochas básicas e ultrabásicas de Bragança e Morais. Na primeira situação temos as águas gasocarbónicas (Chaves, Vilarinho, Vidago, Sandim, Segirei e, na segunda, águas sulfúreas sódicas alcalinas (Santa Cruz, Alfaião, Abelheira). É ainda notável o conjunto das águas minerais da margem externa do arco transmontano (Carlão, S. Lourenço, Lagoaça e Moimenta da Raia)*” (Portugal Ferreira *et al.* 1981, 1984).

À escala local, Portugal Ferreira *et al.* (1981, 1984) referem, ainda, que as ocorrências de águas minerais estudadas na Zona Centro-Ibérica (sector de Portugal) são controladas por: (i) nós de falhas em que prevalecem falhas subverticais de rumo N10-15W, que se assumem como condutas preferenciais e se podem combinar favoravelmente com falhas N60-70E, ou com falhas N15-25E, (ii) as falhas N60-70E que tendem a estar representadas em todas as escalas, (iii) as manifestações dependentes das grandes falhas NNE-SSW que se localizam, geralmente, sobre o compartimento ocidental dessas estruturas, e, (iv) em todas as situações estudadas há filões de rochas básicas na vizinhança do domínio com hidrotermalismo.

Os modelos conceptuais elaborados com forte componente de geologia estrutural²⁴, em trinta e quatro campanhas de prospecção, pesquisa e captação realizados pela empresa ACAVACO (Carvalho 1993a)²⁵, permitiram reforçar e, sobretudo, transferir as captações tradicionais para captações tubulares (furos) na ordem dos 100 a 150 metros de profundidade.

Essa filosofia integrada e integradora de prospecção, pesquisa e captação, foi mais tarde, alargada a maiores profundidades tendo, a nível de Trás-os-Montes, sido alcançados cerca de 300 m de profundidade, na região de Vidago. Tal abordagem metodológica, combinando levantamentos geoelectricos, sondagens de pesquisa carotadas e/ou mistas com percussão pneu-

24) Cartografia geoestrutural na sua quase totalidade realizada e coordenada pelo geólogo M.R. Portugal Ferreira.

25) Intervenções coordenadas por J. Martins Carvalho com suporte técnico-científico de M.R. Portugal Ferreira e de J.A. Simões Cortez, com a participação de J. Ferreira Guedes e de J. Lopo Mendonça.

mática, ainda hoje é usada em captações a profundidades até 500 m no Maciço Antigo²⁶.

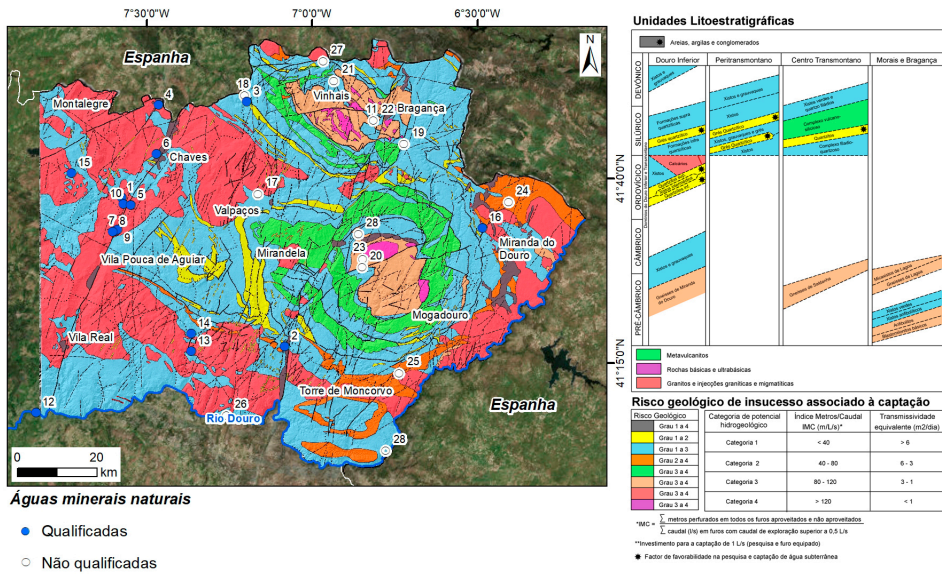
A realização de sondagens mecânicas em muitos pólos de águas minerais naturais permitiu o reforço de caudais, a captação em melhores condições higiénico-sanitárias e um enorme incremento do conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos. Paralelamente, os estudos hidrogeológicos de implantação conduziram a avanços significativos do modelo conceptual hidrogeológico dessas manifestações, particularmente ao nível da zona de descarga.

Todas essas actividades (Carvalho 1993, 1996, 2006) confirmaram que as águas minerais naturais de ciclo longo do Norte de Portugal estão situadas em zonas muito fracturadas, correspondentes aos grandes eixos tectónicos, evidência que é dada por: (i) enquadramento geomorfológico e estrutural; (ii) grandes anomalias geoelectricas; (iii) caudais e transmissividades claramente acima dos normais nos ambientes geológicos de rochas cristalinas e cristalofilinas com águas comuns; e, (v) temperatura (correlacionada positivamente com a transmissividade) que favorece uma ascensão mais rápida da água, conforme demonstrou Carvalho (1993).

Os ensaios de caudal e os resultados da monitorização em captações situadas em campos hidrominerais portugueses mostram que o caudal de exploração a prazo não é controlado pela transmissividade ao longo das fracturas principais, mas por fracturação menor associada àquelas, correspondente à “transmissividade de comportamento” de Martínez & Lopez (1984) associada a efeitos de barreira hidráulica ou de anisotropia hidrogeológica.

A comparação das medianas das transmissividades nas zonas de descarga das águas minerais de ciclo longo com as transmissividades definidas no Maciço Antigo, em águas não minerais (Carvalho 1993, 2006), confirma que as águas minerais ocorrem em zonas muito mais transmissivas que as das águas comuns, por isso mais fracturadas e/ou com maior conectividade hidráulica. A relação entre essas duas transmissividades atinge valores até 36 para 1, com mediana de 5 para 1.

26) Esta via foi iniciada pelo geólogo J. Martins Carvalho em S. Pedro do Sul (e.g., Carvalho 1994, 1995a,b,c, 1996a,b, ACavaco 1998c, 1991, 1994, 1998) e continuada pelos engenheiros J. Ferreira Gomes e J. Ferreira Guedes, entre outros, noutros pólos termais do Maciço Antigo (e.g., Ferreira Gomes *et al.* 2001, Ferreira Gomes 2007a,b, Guedes 2013, Ferreira Gomes *et al.* 2015, 2017a,b, Ferreira Gomes 2019). No caso da Fonte Santa de Almeida, junto ao rio Côa, foram alcançados 931,30 m com supervisão técnica e de execução dos engenheiros J.A. Simões Cortez e J. Ferreira Guedes (Guedes 2010). Operações deste tipo (que exigem abordagens tecnológicas mais pesadas) nem sempre foram coroadas de sucesso por deficiências no conhecimento do reservatório e/ou opções técnicas do projecto.



Águas minerais naturais

- Qualificadas
- Não qualificadas

Águas Minerais Naturais Qualificadas	Quimismo	Exploração	Suspensão
1 - Água Campinho / Vidago		E	-
2 - Águas Bem Saúde		E	-
3 - Águas de Sandim		-	E
4 - Águas de Vilarelho		-	T/E
5 - Areal / Vidago	Gasocarbónica	T/E	-
6 - Caldas de Chaves		T	-
7 - Cardal		-	T
8 - Pedras Salgadas / Fonte Romana		T/E	-
9 - Pedras Salgadas / Sabroso		T/E	-
10 - Vidago Salus		T/E	-
11 - Água Gostei		-	E
12 - Caldas de Moledo		-	T
13 - Caldas de São Lourenço	Sulfúrea	T	-
14 - Caldas do Carlão		-	T
15 - Caldas Santas de Carvalhelhos		-	T/E
16 - Termas da Terronha		T	-

T - Termalismo; E - Engarrafamento; T/E - Termalismo/Engarrafamento

Águas Minerais Naturais Não Qualificadas	Quimismo
17 - Ribeirinha	Bicarbonatada sódica
18 - Segreiros	Gasocarbónica
19 - Alfaião	
20 - Banhos da Abelheira	
21 - Banhos de Santa Cruz	
22 - Castro Avelãs	
23 - Escarledo	
24 - Fonte Santa Angueira	Sulfúrea
25 - Fonte Santa Lagoaça	
26 - Fonte Santa Seixo	
27 - Moimenta da Raia	
28 - Salzelas	
28 - Zambulhal / Fraga	

Figura 10: Águas minerais naturais de Trás-os-Montes: uma síntese.

Se se considerassem os valores mais elevados correspondentes aos locais mais transmissivos no Maciço Antigo, Monção, Chaves, S. Pedro do Sul (Carvalho 1996a, 2001) então as transmissividades nos aquíferos hidrominerais e nos de águas comuns difeririam em duas ordens de magnitude. Projectando os valores actualmente disponíveis de temperatura e de trans-

missividade para os pólos hidrominerais e geotérmicos de Trás-os-Montes de temperatura superior a 20 °C (Figura 11) confirma-se, inequivocamente, uma forte correlação entre os dois parâmetros. Nesta projecção foram usados os valores da transmissividade de segunda ordem (transmissividade de comportamento), correspondentes à evolução do reservatório a longo prazo.

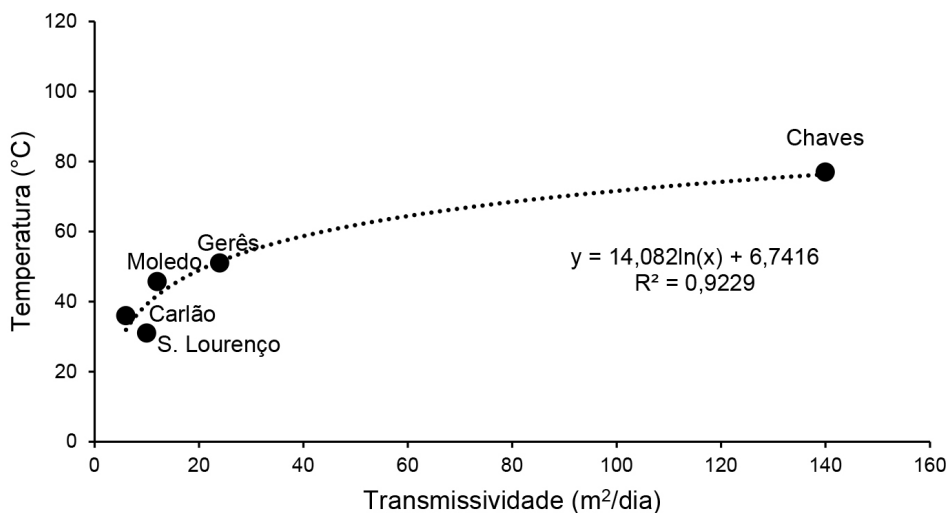


Figura 11: Transmissividade e temperatura nas captações de água mineral com maior termalidade de Trás-os-Montes (à população associou-se as Caldas do Gerês em circunstâncias hidrogeológicas semelhantes, ligeiramente fora do limite Oeste do mapa da Figura 1). Transmissividades de Carvalho (1993a), de Lima (2020), e de Espinha Marques (2001) e Espinha Marques *et al.* (2003a); Ensaio de caudal no Carlão de Gonçalves (2016); Temperaturas do arquivo TARH.

No que respeita à condutividade hidráulica em modelo contínuo equivalente das águas minerais de Trás-os-Montes é possível chegar aos valores indicados no Quadro 2, obtidos a partir das “transmissividades de comportamento” (Carvalho 1993a).

Os valores da condutividade hidráulica das águas minerais de Trás-os-Montes de menor termalidade têm condutividades hidráulicas próximas da das águas comuns da mesma região (da ordem de 3×10^{-3} a 4×10^{-2} mdia⁻¹). Já nas águas minerais mais quentes, tal como acontece com as transmissividades, os valores situam-se numa gama mais alta, de mais de uma ordem de magnitude. O maior contraste ocorre nas Caldas de Chaves. Em muitos pólos, particularmente nos de maior termalidade, verifica-se forte artesianismo positivo (e.g. Moledo: Seifert & Vicente (1968), Seifert (1969), Teixeira Duarte (1970), Simões Cortez (1980), ACavaco (1983, 1988a,b), Carvalho & Silva (1988), Espinha Marques (2001), Espinha Marques *et al.* (2003a); Carlão:

Gonçalves (2016); Caldas de S. Lourenço: Acciaiuoli (1952/1953), Almeida & Almeida (1970), Calado (2001)) que chegam a alcançar mais de 60 m acima do terreno. Também nos pólos de águas gasocarbónicas hipotermiais, casos de Pedras Salgadas e Bem Saúde, ocorre artesianismo moderado²⁷, claramente associado ou potenciado pelos fortes teores de CO₂ gasoso.

Quadro 2: Condutividades hidráulicas (k, mdia⁻¹) e temperaturas (°C) nos aquíferos hidrominerais e/ou geotérmicos de Trás-os-Montes (temperaturas compiladas do Projecto Hidrogenoma: <https://hidrogenoma.javali.pt/>).

Local	Condutividade hidráulica k (m/dia)	Temperatura (°C)
Água de Vilarelho	3×10^{-2}	16
Sandim	7×10^{-2}	16
Caldas de Chaves	1×10^0	77
Vidago	3×10^{-2}	15
Campilho	1×10^{-2}	20
Pedras Salgadas	1×10^{-1}	17
Sabroso	3×10^{-2}	15
Cardal ^(a)	1×10^{-2}	16
Carvalhos	3×10^{-1}	20
Caldas de Bem Saúde	7×10^{-2}	19
Caldas de Moledo	9×10^{-2}	44
Caldas de S. Lourenço	9×10^{-2}	34
Caldas de Carlão ^(b)	6×10^{-2}	35

(a) Oliveira (1995); (b) ensaio de caudal em Gonçalves (2016)

A compreensão, numa perspectiva sistémica, dos modelos conceptuais hidrogeológicos dos recursos hidrominerais e geotérmicos de Trás-os-Montes justifica que se aborde este tema pelas implicações científicas, técnicas e económicas na exploração dos recursos, até agora muito centradas em aspectos geológicos, físico-químicos e de hidrologia médica.

A avaliação dos recursos passa pela manutenção do necessário equilíbrio hidrodinâmico no sistema hidromineral, chave da perenidade da exploração. Trata-se de questão complexa e crucial pois as zonas de recarga do circuito hidromineral têm sido inferidas somente por via de estudos de hidrologia isotópica. As zonas de descarga estão razoavelmente reconhecidas, mas o restante percurso subterrâneo continua a ser uma incógnita, pois não se conhece suficientemente a geologia e a hidrogeologia profundas, bem como a hidrodinâmica global.

27) Este artesianismo é, por vezes, errático e nem sempre se manifesta, a não ser após estimulação mecânica dos furos (pormenores em Carvalho 2006).

O conhecimento das zonas de recarga (e da sua aptidão para infiltração) é fulcral para a questão da sustentabilidade dos caudais e da manutenção da qualidade físico-química (e bacteriológica) de um dado recurso. Para alguns autores (e.g., Aires-Barros *et al.* 1994, 1998; Marques *et al.* 2000, 2006, 2010, 2019, Lima 2001, Espinha Marques *et al.* 2003a,b, Lima & Oliveira 2007, Carreira *et al.* 2008, Marques & Carreira 2017, 2019) a área de recarga, de acordo com modelos geoquímicos de isótopos ambientais, estará situada nas zonas montanhosas envolventes.

Na Figura 12 representamos a altura do artesianismo registado nas captações (altura da água acima do solo com o furo ao caudal zero), designado simplesmente por artesianismo *vs* a diferença de cota entre as supostas áreas de recarga e de descarga nos pólos geotérmicos de Trás-os-Montes. O modelo de regressão linear obtido confirma uma tendência clara para as zonas de recarga se situarem em algumas das áreas montanhosas da envolvente. Isto é, pode aceitar-se que o artesianismo nas actuais captações de águas minerais quentes de Trás-os-Montes é função do gradiente hidráulico (aqui simplifadamente assumido equivalente à diferença de cota entre as áreas de recarga e as de descarga, geralmente situadas em vales).

Contudo, existe uma notável excepção, as Caldas de Chaves. Em Chaves nunca ocorreu artesianismo positivo (nas captações romanas, nas pós-renascentistas, ou nas do século passado) nem nas actuais. Será que essa circunstância está ligada à altíssima transmissividade (para rochas xistentas e graníticas) da zona de descarga que deforma o gradiente hidráulico? Será que o reservatório geotérmico de Chaves, conectado com aquíferos termais profundos da Veiga de Chaves, majora esse efeito? Ou será, simplesmente, que não é possível excluir a possibilidade de infiltração nos bordos do ‘*graben*’ (GeothermEx 2010)?

Esta questão, da maior importância para o aumento da exploração do recurso associado ao crescimento da rede de calor geotérmico de Chaves e para a sustentabilidade do Termalismo Médico nas suas termas impõe, portanto, a realização de estudos complementares de índole hidrogeológica, geotérmica e de engenharia de águas subterrâneas, complementares aos estudos de hidrologia isotópica já realizados.

Paralelamente com os estudos ao nível do recurso têm sido concretizadas operações geotérmicas em vários pólos de Trás-os-Montes²⁸ designadamente para aquecimento urbano (Chaves) e estufas (Chaves e Caldas de Carlão).

28) E também noutros locais do Maciço Antigo, particularmente em S. Pedro do Sul (e.g., Carvalho 1994, 1995a,b,c, Lourenço *et al.* 2010, Ferreira Gomes 2007a, 2019).

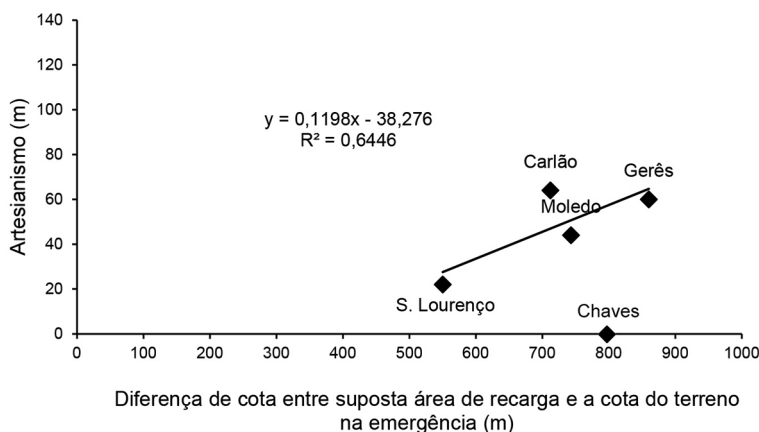


Figura 12: Artesianismo (m, ao terreno) e diferença de cota entre as supostas área de recarga e de descarga (m). À população analisada acrescentou-se as Caldas do Gerês em circunstâncias hidrogeológicas semelhantes, a Oeste do limite representado na Figura 1. Valores do artesianismo de Arquivos TARH, Lima (2001), Espinha Marques (2001), Espinha Marques *et al.* (2003a), Gonçalves (2016); e cotas de recarga de Marques (1999), Espinha Marques (2001) e Lima (2001).

A operação de Chaves para aquecimento urbano foi iniciada em 1983 e tem funcionado com pleno sucesso estando, agora, em fase de profunda dinamização (ver secção seguinte). As estufas geotérmicas de Chaves e do Carlão para a produção de produtos agrícolas²⁹ foram instaladas em 1989 (Carvalho 1996a) e abandonadas e desmanteladas um ou dois anos depois³⁰.

Na Figura 13 representa-se a ocorrência de pólos geotérmicos de Trás-os-Montes (temperatura superior a 20 °C), verificando-se que apenas está em operação um projecto geotérmico (para usos directos) em Chaves, embora as temperaturas e os caudais existentes permitissem o lançamento de pequenos empreendimentos em todos os outros pólos (Caldas de Moledo, Caldas de S. Lourenço e Caldas de Carlão) conforme se mostra no Quadro 3 onde estão indicadas as potências térmicas e a energia anual disponível com um factor de capacidade de 50%. As temperaturas relativamente baixas destes últimos três locais, a ausência de consumidores de calor consistentes e,

29) Financiadas por fundos comunitários: Projecto DGXII-Joule I – 1990/91.

30) Este facto ilustra bem que, a nível da geotermia industrial, não basta haver recurso, sendo necessária a presença de outras condições (aspectos sociológicos e económicos, consumidores, dinamizadores, promotores, etc.), o que torna a montagem técnico-administrativa e financeira destes projectos geotérmicos muito complexa e pouco apelativa a nível do mercado energético. Aliás, é bem conhecida a dificuldade da geotermia agir como factor dinamizador de novos projectos (leia-se novos consumos), devendo privilegiar-se o lançamento de empreendimentos geotérmicos para a satisfação de procura já instalada (Carvalho 1998, Carvalho & Costa 2002).

pensamos, alguma indiferença das populações locais conduzem a esta situação de ausência total de utilizações geotérmicas para além da balneologia.

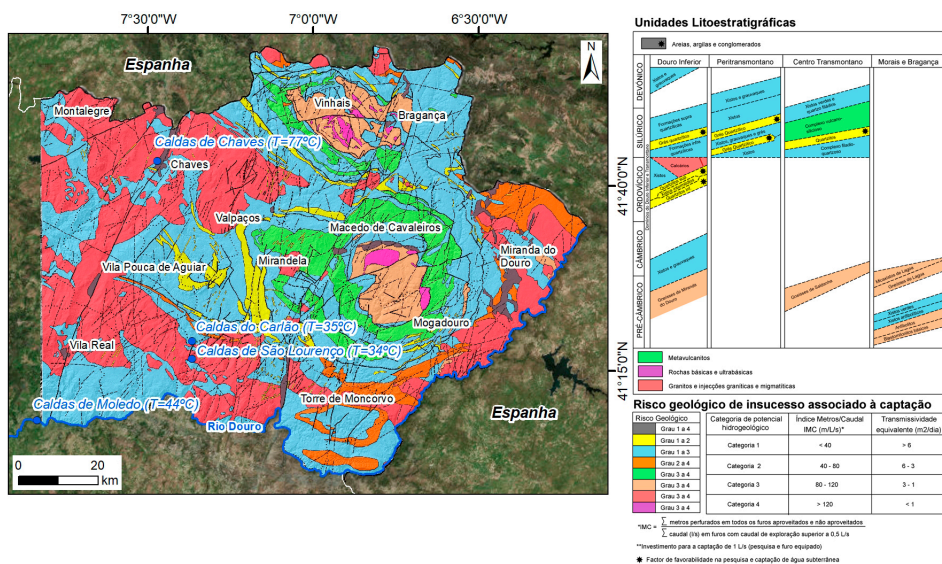


Figura 13: Recursos geotérmicos de Trás-os-Montes (recursos hidrominerais de temperaturas superiores a 20 °C).

Quadro 3: Potências e energia nos pólos geotérmicos de Trás-os-Montes (dados dos Arquivos da TARH, e de Espinha Marques 2001, Espinha Marques *et al.* 2003a, e Gonçalves 2016).

Local	Caudal (L/s)	Temperatura (°C)	Potência (MW)	Energia (TJ/ano)	Utilização
Caldas de Chaves	30,0	77	7,2	113	Termalismo e rede de calor; houve estufas nos anos 90 do século passado, mas foram abandonadas
Caldas de Carlão	9,5	35	0,6	10	Termalismo; houve estufas nos anos 90 do século passado, mas foram abandonadas
Caldas de S. Lourenço	5,0	34	0,3	5	Termalismo
Caldas de Moledo	10,0	44	1,0	16	Termalismo

Nota: Temperatura de rejeição de 20 °C; Factor de capacidade de 50%.

Não é de excluir a hipótese de, em locais específicos com condições geológicas e hidrogeológicas adequadas, existirem recursos geotérmicos complementares, o que nos remeteria para a geotermia não convencional do tipo *Enhanced Geothermal Projects* ou *Engineered Geothermal Projects* (EGS).

Um pólo emblemático da utilização dessas tecnologias poderia ser a região de Chaves³¹.

Também não trataremos aqui da geotermia superficial, geotermia de muito baixa temperatura que utiliza o calor do solo ou da água subterrânea em AVAC, com importantes vantagens energéticas e ambientais (e.g., Varet 1982, IGM 1998, Carvalho & Carvalho 2004, Coelho *et al.* 2010, Lund and Boyd 2015, Antics *et al.* 2016, DGEG 2017, 2021). Esta última tecnologia está em plena utilização em toda a Europa e é de esperar forte difusão em Trás-os-Montes, por analogia com a vizinha Galiza, onde se contam já algumas dezenas de aplicações em aquecimento de espaços domésticos e empresariais (ACLUXEGA 2019). É verdadeiramente a geotermia para todos e em qualquer lugar que tem contra si o facto do primeiro investimento ser mais pesado do que as soluções tradicionais. Mas os ganhos energéticos e ambientais são muito significativos a curto e médio prazo³².

5.2. As Caldas de Chaves

As nascentes termais da cidade de Chaves têm um passado glorioso, confirmado pela descoberta, em 2006, das Termas Romanas, junto à Ponte de Trajano, no centro histórico da cidade.

Nos tempos do império Romano os viajantes vindos da região da atual Galiza (cujo nome deriva de *Callaecia*, a província romana que ocupava toda a região a Norte do Rio Douro) atravessavam o rio Tâmega e deparavam, imediatamente à direita, na entrada da cidade de *Acqua Flaviae*, com um complexo termal majestoso com várias piscinas e outras estruturas balneares alimentadas por duas nascentes termais (actualmente com temperaturas de 66,5 °C).

Como pode ser visto agora no museu das termas Romanas sobre os vestígios arqueológicos, a tecnologia e a engenharia hidráulica era excelente e simples (Carneiro 2013, 2016, Paiva *et al.* 2022). Tudo funcionava por gravidade e não havia mistura das águas termais com as “comuns” da envolvente, além da necessária para se conseguir diluir e resfriar o recurso, propício à cura, bem-estar e lazer (Vasco *et al.* 2015, Joukes & Costa 2015, Carvalho & Chaminé 2017). Todas as facilidades que fazem parte dos modernos spas termais estavam presentes.

31) Estes projectos, de forte cariz tecnológico e de capital intensivo, bem-vindos em cenários de alternativa energética, podem ter implicações ambientais negativas, particularmente se inseridos nos Perímetros de Protecção das actuais estâncias termais, exactamente os sectores geologicamente mais apelativos. Há que fazer escolhas!

32) <https://www.egec.org> (consultado em Junho de 2021); ENERDATA – Global Energy Statistical Yearbook 2018 [<http://yearbook.enerdata.net/>] (consultado em Junho de 2021).

O ambiente termal deveria ser muito acolhedor para todos aqueles, como os soldados romanos da *Legio Septima Gemina*, que palmilhavam, com vigor, as estradas circundantes, mas também para os moradores locais, amantes do conforto e do convívio naquele espaço (Le Roux 2000). Impressiona ainda o rigor e o cuidado com que foi gerido o recurso termal, incluindo uma conduta dos excedentes (ainda hoje em funcionamento) para o rio Tâmega que nessa altura passava mais perto das instalações do que na actualidade. A imponente estação termal de cujos alicerces desfrutamos hoje como se ainda estivesse em atividade, tal é a qualidade de conservação das estruturas, constitui, aos nossos olhos, uma operação geotérmica com múltiplas finalidades combinando aquecimento do espaço, cura termal e bem-estar. Actualmente, as Caldas de Chaves com balneário termal situado no largo do Tabolado, a cerca de 400 m para Oeste das antigas termas romanas são umas das mais procuradas termas Portuguesas. Oferecem tratamentos no domínio da hidrologia médica e ainda programas de saúde e bem-estar muito procurados pelos aquistas mais apressados e/ou por aqueles que apenas pretendem relaxar a mente e o corpo num ambiente acolhedor. As indicações terapêuticas, oficialmente aprovadas, são para as patologias músculo-esqueléticas, patologias do aparelho digestivo e patologias das vias respiratórias (Carneiro 1964, ATP 2009).

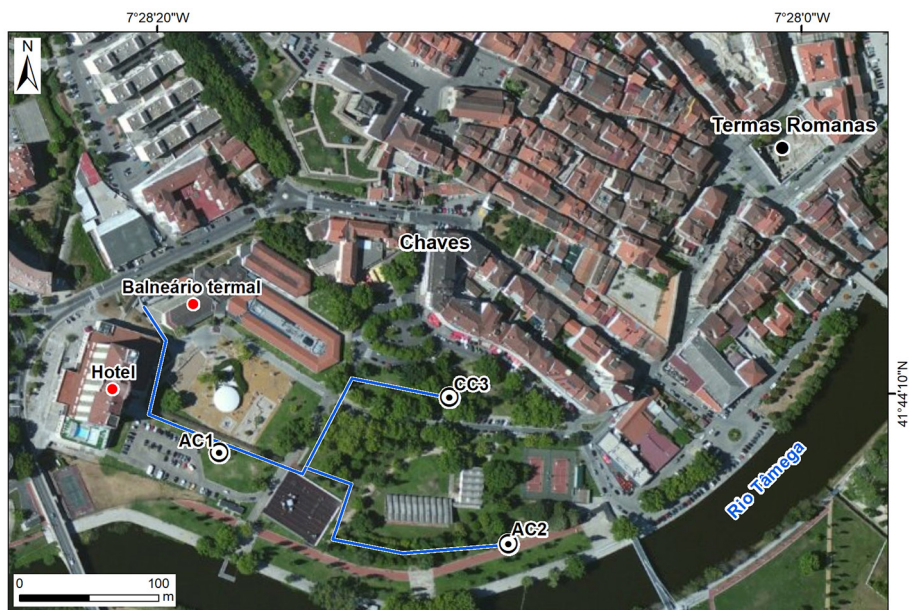
O pólo hidromineral e geotérmico de Caldas de Chaves está integrado na concessão hidromineral e geotérmica HM-9 Caldas de Chaves, com uma área de 50 hectares, centrada na actual estância termal nas Caldas do Tabolado. As captações das Caldas de Chaves dão corpo, a par com S. Pedro do Sul, às maiores ocorrências geotérmicas portuguesas do Maciço Antigo Português. Como afirmou magistralmente Henriques (1726) referindo-se às Caldas de Chaves “... estas são as melhores Caldas, que há neste reino” e ainda “nascem elas entre a muralha da fortificação da Praça de Chaves, e o rio Tâmega, numa grande planície, a que os naturais da serra chamam Tabolado, por ser lugar em que fazem os seus festejos de cavalo e os exercícios militares.”. Ou, nas singelas palavras de Carneiro (1964), a “*Rainha das Estâncias Termas Portuguesas*”.

A temperatura máxima alcança 77 °C na água do furo de captação CC3 e os caudais são notáveis (de 5 a 15 L/s por captação tubular de cerca de 150 m) para sistemas aquíferos em rochas cristalinas: Este recurso e a sua situação no centro de uma cidade com 20 000 habitantes, fazem desta concessão, e da área envolvente, um local com condições únicas em Portugal para constituir uma operação geotérmica a nível europeu. Não existe energia geotérmica industrial para usos directos sem coexistência espacial de recursos e consu-

midores. Porém, em Chaves esta condição existe quase perfeitamente para utilizações directas.

5.3. Modelo Conceptual do Aquífero Hidromineral e Geotérmico

A água mineral natural de Chaves é uma água mineral gasocarbónica, rica em bicarbonato de sódio com uma mineralização total (TDS) de 2560 mg/L, pH 7, CO₂ livre de cerca de 350-500 mg/L, condutividade eléctrica de 2,3 mS/cm, emergindo a uma temperatura até 77 °C nos actuais furos de captação incluídos no Plano de Exploração aprovado pela DGEG. Estudos realizados sobre a fase gasosa livre e dissolvida na água termal (composição química e isotópica dos gases) atribuem uma origem mantélica aos gases dissolvidos, com concentrações de CO₂ superiores a 90%, seguindo-se o N₂ e CH₄ (Carvalho *et al.* 2006, 2007, Carreira *et al.* 2010). Com a realização em 2014 do furo CC3 com 190 m de profundidade, a capacidade total instalada de extracção é de 30 L/s, embora o caudal de exploração autorizado seja de 15 L/s (Figura 14).



Águas minerais



Furos de captação de água



Conduitas de adução da rede de calor

Figura 14: Área de descarga do campo geotérmico (furos AC1, AC2 e CC3 no Tabolado), Termas Romanas e o actual balneário térmal (as linhas brancas/azuis são as conduitas de adução da atual rede de calor até ao balneário).

Embora a mineralização total da água seja relativamente baixa (TDS de 2560 mg/L), ocorrem precipitados abundantes durante o arrefecimento do fluido. Esta circunstância exige medidas de manutenção preventiva para controlar a qualidade das leituras nos dispositivos de monitorização e manter a eficiência nos permutadores de calor.

A descarga original das nascentes não está claramente documentada, mas dentro de grande parte da cidade de Chaves, numa área com cerca de 30 hectares, eram conhecidas manifestações de água termal (Rego Lima 1892), o que mostra a importância quantitativa do recurso e o papel que este jogou na instalação da cidade. Ao nível dos caudais primitivos no Tabolado é geralmente referido o caudal de cerca de 1 a 2 L/s, nas condições pristinas (Rego Lima 1892, Carvalho 2006).

A Bacia de Chaves, no extremo Sudoeste da qual se localiza a concessão hidromineral e geotérmica de Chaves, é controlada pela falha Verín-Réguia-Penacova. Esta falha regional corresponde a uma megaestrutura activa NNE-SSW com separação horizontal máxima de aproximadamente 3,4 km, desenvolvendo, devido à complexidade estrutural, um grande sistema de blocos crustais. A bacia corresponde ao abatimento de um bloco (*'graben'*) que existe na dependência da curvatura da estrutura principal, que migra da direcção NNE-SSW para N-S. De facto, esta realidade estava plasmada no primeiro modelo tectónico coerente da Bacia de Chaves, na zona de descarga, definido pelos estudos de ACavaco (1982a,b), Grade & Casal Moura (1982), Portugal Ferreira *et al.* (1982) e Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1987a,b). Nas publicações de Portugal Ferreira *et al.* (1992, 2003) este modelo é revisitado e no essencial reflecte o conhecimento anterior.

Os levantamentos geoeléctricos detalhados à escala local (ACavaco 1982a) confirmaram que a emergência de água termal no Tabolado está relacionada com um nó tectónico regional, resultante da intercepção de uma estrutura com orientação NNE-SSW com outra importante estrutura NNW-SSE (ACavaco 1982a,b, Portugal Ferreira *et al.* 1982). Os mesmos autores também inferiram, em 1982, a existência de outro sector favorável na área de Outeiro Seco, onde efetivamente alguns poços de água potável encontraram água com assinatura química anormal. Algumas dessas estruturas profundas (relacionadas com evidências tectónicas e zonas de fractura de rocha dúctil) foram comprovadas por medições da condutividade da água do(s) aquífero(s) ao nível da bacia de Chaves revelando anomalias condutivas ao longo dos principais eixos geoestruturais (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987a,b). Posteriormente, a Câmara Municipal de Chaves encomendou estudos geofísicos, nomeadamente levantamentos sísmicos de reflexão de alta resolução

e tomografias eléctricas (OCSA 2012), que permitiram esclarecer melhor o papel da fracturação à escala local a profundidades de mais de 600 m na área do Tabolado (Figuras 15 e 16).

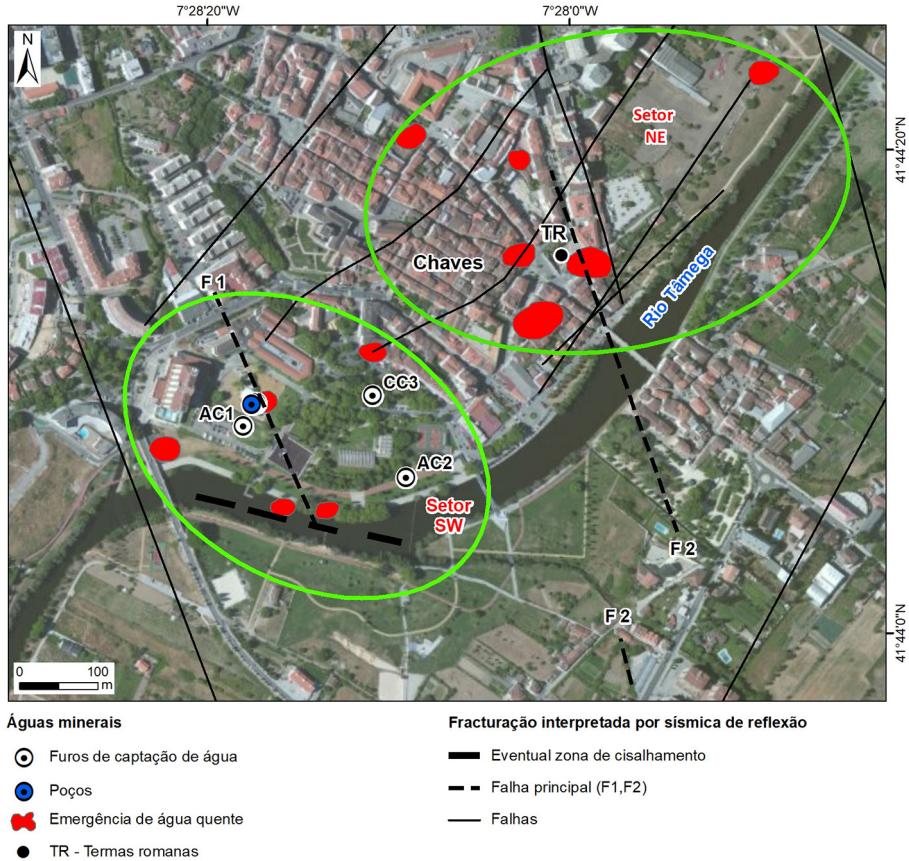


Figura 15: Localização dos furos de captação, antigas nascentes e modelo geoestrutural (adaptado de Rego Lima 1892, Carvalho & Silva 1988, OCSA 2012, Freitas 2015, Carvalho *et al.* 2017).

O campo geotérmico de Chaves, na perspectiva clássica, seria controlado, na zona de descarga, por filonetes de quartzo hidrotermal associados a tectónica recente e a rochas metassedimentares de fácies xistenta silúricas, nomeadamente, quartzofílicas e filíticas. Este dispositivo permitiria a rápida ascensão e armazenamento das águas meteóricas infiltradas em profundidade onde teriam adquirido temperaturas da ordem de $123\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ até a superfície (Moitinho de Almeida 1979, 1982)

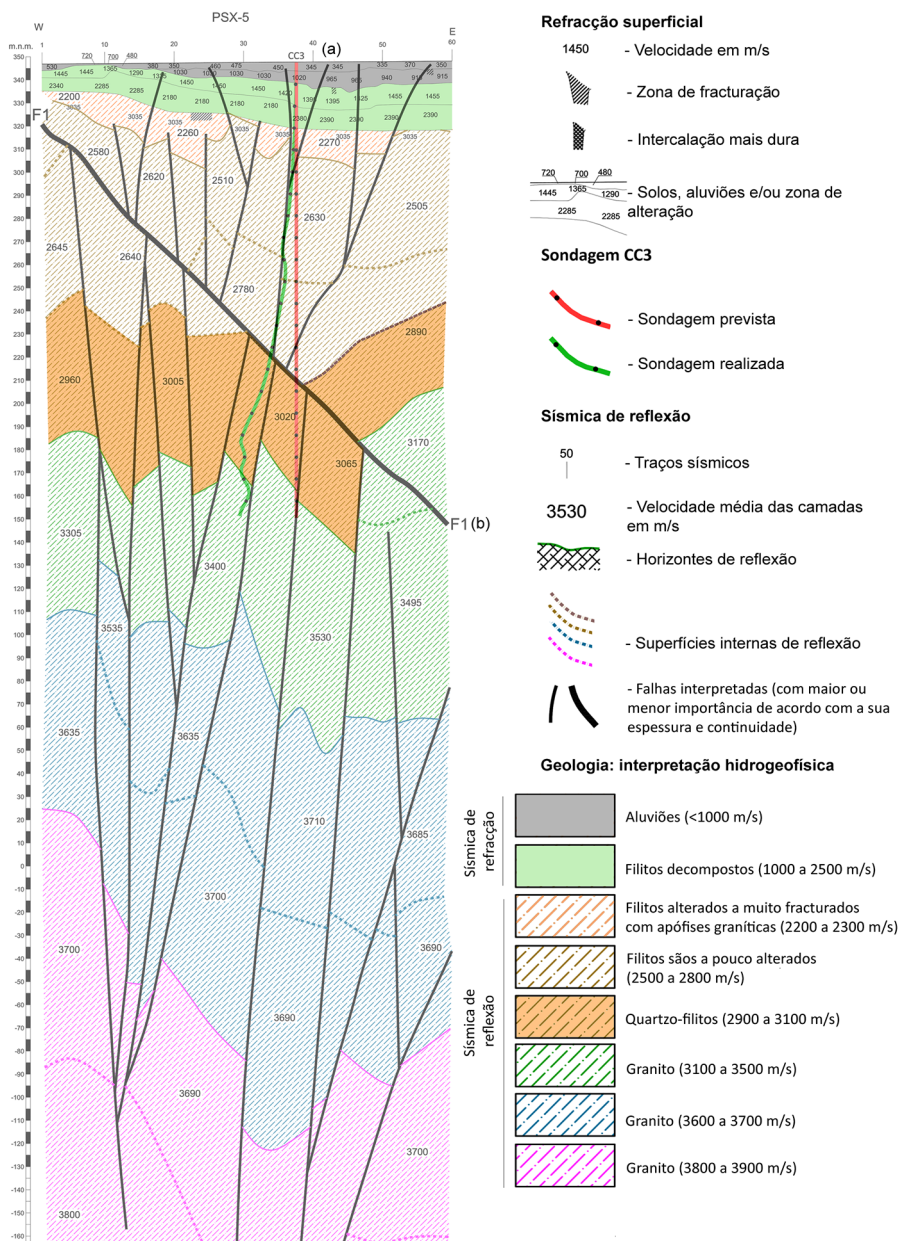


Figura 16: Projecção do furo CC3 num perfil sísmico E-W. A posição corrigida do furo CC3 (a vermelho) foi inferida com diagramas que incluem inclinómetro (adaptado e revisto de OCSA 2012, Freitas 2015, Carvalho *et al.* 2017).

Os quartzofilitos apresentam sistematicamente uma cobertura muito alterada que dá algum confinamento ao sistema. Os metassedimentos apresentam

transmissividades elevadíssimas (740 m²/dia) e alguma isotropia hidrodinâmica que conduziu, até agora, a uma taxa de insucesso nula na realização de pesquisas e captações até 200 m de profundidade. Essa cobertura metassedimentar de alta transmissividade é alimentada por fracturação instalada na rocha granítica subjacente, menos transmissiva (cerca de 60 m²/dia). O coeficiente de armazenamento é de cerca de 10⁻⁴.

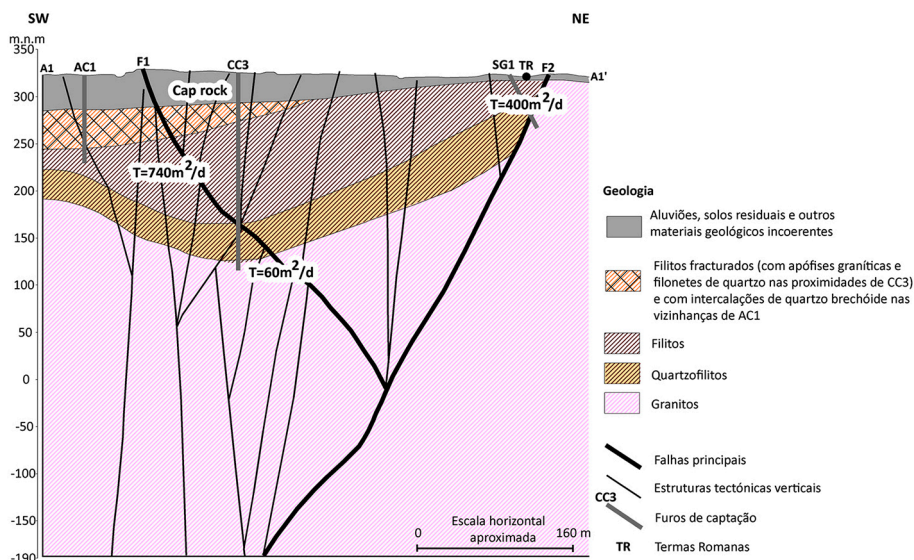
A sequência geológica geral na zona de descarga é a seguinte: (i) 0-10 m – depósitos aluviais (aquífero superficial de águas comuns em ligação hidráulica directa com o rio Tâmega), (ii) 10-25 m – filitos e quartzofilitos, silúricos, decompostos ou muito alterados (aquitardo), (iii) 25-180 m – filitos e quartzofilitos pouco alterados a sãos (aquífero geotérmico), e (iv) granito Varisco com permeabilidade descontínua nos eixos de estruturas mais penetrativas e abertas.

Na operação de perfuração do furo CC3 (Sondalis 2014, Freitas 2015), no Campo do Tabolado, foram reconhecidas rochas graníticas a partir de -190 m de profundidade sobre as quais repousam as rochas metassedimentares tal como fora previsto no estudo de reflexão sísmica de OCSA (2012). Durante a perfuração do furo CC3 o caudal chegou a 95 L/s quando se atravessaram as principais zonas fracturadas aos 180 m. Mas não há qualquer evidência de que extracções dessa magnitude sejam sustentáveis.

Conforme se representa na Figura 17 os fluidos geotérmicos ascendem de profundidades da ordem de 3000 m (Marques 1999) a 123 °C (Moitinho de Almeida 1979, 1982) através de duas megaestruturas muito penetrativas e espalha-se lateralmente através da rede de fracturação, particularmente importante nos quartzofilitos (Freitas 2015, Carvalho *et al.* 2017).

Não há registos de alguma vez ter havido artesianismo positivo nas Caldas de Chaves, como já se mostrou atrás. O abundante espólio fotográfico, do dealbar a meados do século XX, disponível nos arquivos da Câmara Municipal de Chaves, mostra o nível da água termal praticamente ao nível ou ligeiramente acima do rio Rivelas, afluente do Tâmega. Actualmente o nível piezométrico do sistema hidromineral e geotérmico é semelhante ao do Rio Tâmega que entretanto foi represado a jusante criando um pequeno espelho de água.

Os metassedimentos decompostos que capeiam superiormente o aquífero hidromineral tem um coeficiente de armazenamento de 5x10⁻³ a 3x10⁻⁴, determinado por ensaios de caudal. Este valor pode não ser apenas o efeito do pseudo-confinamento nas estruturas geológicas.



'Cap Rock' descontínuo (quartzofilitos e filitos decompostos)	
Aquífero fissural em quartzofilito e filito alterado e fracturado	
Principal transmissividade associada à direcção NNE-SSW	
Transmissividade (T)	1ª ordem - 740 m ² /dia
	2ª ordem - 400 - 60 m ² /dia
Coefficiente de armazenamento (S)	10 ⁻⁴
Superfície piezométrica do aquífero hidromineral e geotérmico próximo da superfície freática: Não há artesianismo positivo	
Fluxo subvertical na fracturação profunda; intra-granito sub-horizontal nos quartzofilitos e filitos	
Transmissividade nos aquíferos graníticos de água comum (T)	0,3 m ² /dia

Figura 17: Esquema do circuito hidromineral e geotérmico das Caldas de Chaves na zona de descarga.

Conforme tem sido referido neste documento, as transmissividades medidas no campo geotérmico de Chaves são extremamente altas em ambientes de rochas metassedimentares e/ou graníticas. Carvalho (1993a) referiu a transmissividade (T) de 720 m²/dia e um coeficiente de armazenamento (S) de 5×10^{-3} no furo AC2. Estes valores ajustam-se bem às determinações de Freitas (2015) no furo CC3 de T=740 m²/dia e de S de 3×10^{-4} . As transmissividades referidas atrás são as de primeira ordem; porém, o caudal de exploração é controlado pela fracturação menos productiva na ordem de 140-450 m²/dia (Carvalho 1993a, 1996, Freitas 2015) a transmissividade de comportamento ou transmissividade de segunda ordem. Está nesse limite inferior o valor determinado na captação SG1 das Termas Romanas anteriormente citadas.

A transmissividade de segunda ordem de Chaves (150-450 m²/dia) é muito mais elevada que a das águas minerais sem termalidade com a mesma composição química (Vilarelho, Vidago, Cardal, Sabroso e Pedras Salgadas (1-3 m²/dia) situadas a Sul na estrutura Verín-Régua-Penacova. Diferentes permeabilidades (duas ordens de magnitude) determinam velocidades ascensionais diversas e, por isso, temperaturas de emergência muito contrastadas.

A perspectiva de um reservatório comum a todas essas manifestações de águas gasocarbónicas é apoiada pelos estudos de Represas (2009) e Represas et al. (2013) nos quais aparece bem evidenciada uma anomalia gravimétrica muito importante (que chega a alcançar mais de 30 mGal) centrada na Veiga de Chaves mas cujos bordos, de forma mais esbatida é certo, se prolongam para NNW até Vilarelho da Raia e para SSW até aos sectores de Vidago, do Cardal e de Pedras Salgadas (Figura 18).

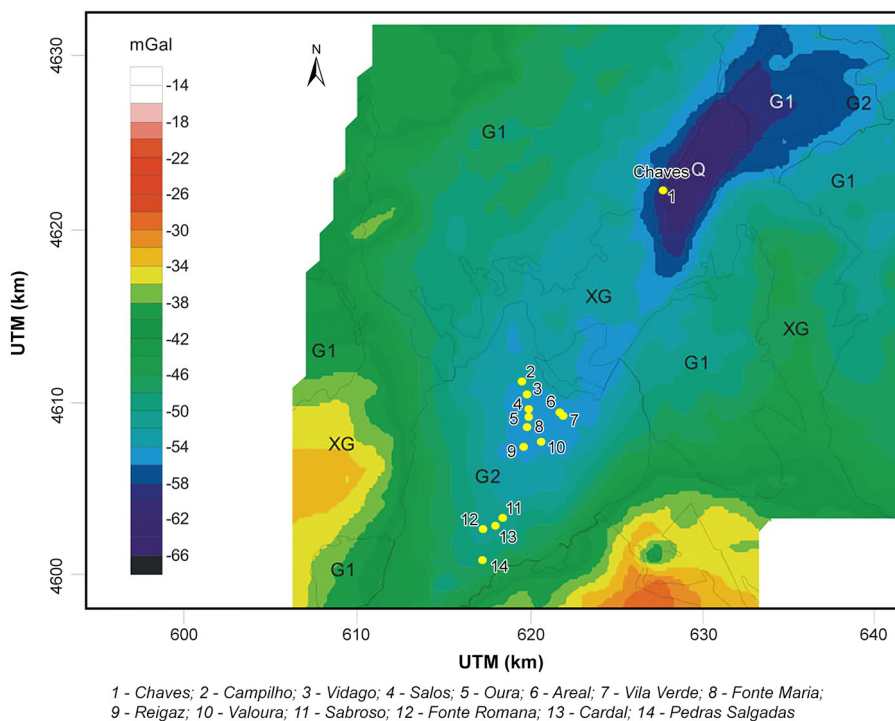


Figura 18: Levantamento gravimétrico na zona envolvente da megaestrutura Verin-Régua-Penacova, no sector Chaves-Vidago-Pedras Salgadas; Vilarelho da Raia situa-se fora do mapa no limite poente da grande anomalia gravimétrica, a azul (adaptado de Represas 2009).

Conforme anteriormente se explicitou, até meados da década de 1980 não havia referência à espessura do enchimento sedimentar da Veiga de Chaves, sendo aceite que não ultrapassaria algumas dezenas de metros, e que o controlo tectónico não seria decisivo para sua ocorrência. Carvalho & Silva (1988) mostraram que a espessura do enchimento do ‘*graben*’ deveria ser de, pelo menos, 450 m usando levantamentos geoeléctricos com sondagens eléctricas verticais (Figura 9).

Posteriormente, recorrendo a prospecção magneto-telúrica (MTT) e audio-magnético telúrica (AMT), Andrade Afonso *et al.* (1994, 1995), Monteiro Santos *et al.* (1994, 1995a,b, 1996, 1997), Duque *et al.* (1998) e GeothermEX (2010) reportaram que a espessura máxima dos depósitos sedimentares no centro do ‘*graben*’ deve variar de 1100 a 1600 m. Essas conclusões consolidam a perspectiva de Carvalho & Silva (1988) sobre a possibilidade de ocorrência em profundidade, na parte central do ‘*graben*’, de materiais aquíferos sedimentares, possivelmente em comunicação com uma importante armadilha fissural responsável pelo aparecimento de fluidos geotérmicos nas actuais manifestações de Chaves.

A confirmação deste modelo básico iria permitir, de uma nova forma, a exploração e o aproveitamento de fluidos geotérmicos em Chaves. Em termos de reservatório geotérmico teríamos, portanto, no centro do ‘*graben*’, um sistema geotérmico fissural profundo, alimentando materiais sedimentares com permeabilidade intersticial em que poços geotérmicos profundos (2000 m?) poderiam ser realizados com risco geológico relativamente pequeno.

A área de recarga do campo hidromineral e geotérmico de Chaves de acordo com modelos geoquímicos de isótopos ambientais (e.g., Aires-Barros *et al.* 1994, 1998, Aires-Barros & Marques 1994, Marques *et al.* 2000, 2006, 2010, Carreira *et al.* 2008, Marques & Carreira 2017, 2019) estaria localizada cerca da cota 900 m NGP (Figura 18), no Planalto da Bolideira, Serra da Padrela, a Leste da zona de descarga no centro da cidade de Chaves. A validação de um modelo conceptual hidrogeológico robusto até profundidades de cerca de 3000 m e tempos de residência de 8000 anos, como o proposto pelos autores atrás citados exige, naturalmente investigações hidrogeológicas de maior fôlego que envolvem um conhecimento adequado das condições hidrodinâmicas de subsuperfície em todo o circuito hidromineral.

Os dados de precipitação na Serra da Padrela (850 mm) e uma taxa de recarga conservadora, de 0,03 (Plasencia *et al.* 2015) para aquíferos graníticos a 400 m de profundidade no soco Varisco do Norte de Portugal são compatíveis com a área de recarga disponível na Bolideira e uma extra-

ção de 15 L/s na área do Campo do Tabolado. Contudo, nada se sabe em relação às características hidrodinâmicas a maiores profundidades. Por isso justificam-se investigações complementares, incluindo extenso trabalho de cartografia geoestrutural, hidrogeologia de campo, sondagens profundas e modelação de fluxo e de transporte de calor (Carvalho & Chaminé 2017). Em síntese, reforçando o que se referiu anteriormente, sabe-se que o fluido hidromineral e geotérmico de Chaves tem uma circulação longa, lenta e profunda mas, de momento, apenas as condições da zona de descarga na área do Tabolado são conhecidas com baixo grau de incerteza. Não parece sensato excluir a infiltração nos bordos do ‘graben’ tal como aponta GeothermEx (2010). A este propósito é interessante referir que Portugal Ferreira *et al.* (2003) sugeriram, claramente, a possibilidade de recarga intra ‘graben’ menorizando, aliás, a contribuição provinda dos “plateaux” marginais, rastreada com hidrologia de isótopos ambientais cuja “interpretação com recarga actual é discutível” (Portugal Ferreira *et al.* 2003).

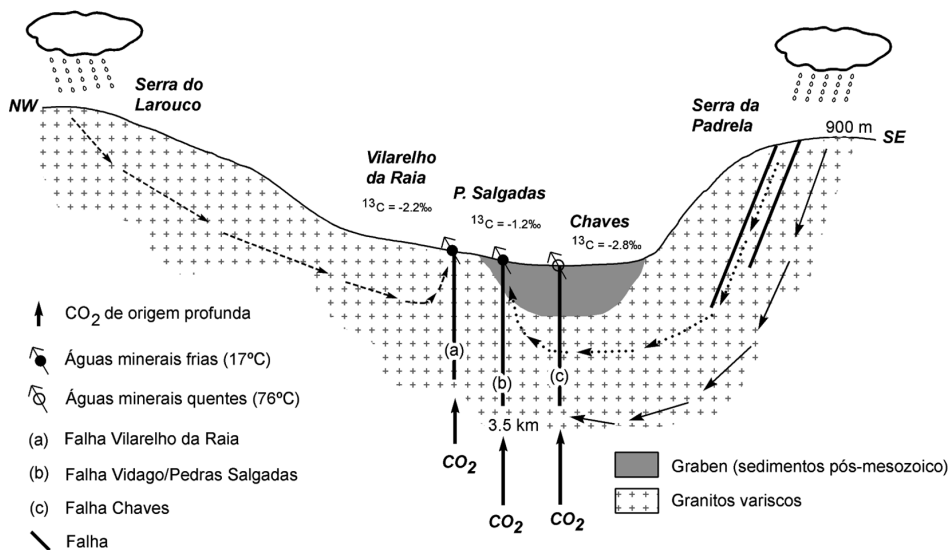


Figura 19: Modelo conceptual das Caldas de Chaves e das outras águas gasocarbónicas do Sector Pedras Salgadas-Vilarelho numa aproximação geoquímica de isótopos ambientais (Carreira *et al.* 2008). Veja-se, também, o modelo revisitado em Marques & Carreira (2017, 2019).

5.4. Extrações e Energia Disponível

Os poços superficiais de Freire de Andrade (1952) no largo do Tabolado em Chaves foram instalados directamente nos depósitos aluvionares dos rios Rivelas e Tâmega (que no local têm cerca de 10 m de espessura) assentes so-

bre as rochas metassedimentares silúricas, pontualmente cortadas por uma densa rede de filonetes de quartzo hidrotermal e forneceram água termal a 74 °C.

Carvalho & Silva (1988) referem que a superfície piezométrica do aquífero termal era superior à das águas freáticas pouco profundas, o que explicava a existência de ocorrências térmicas na albufeira da pequena barragem do rio Tâmega, em frente à *buvette* já referidas por Rego Lima (1892). Actualmente, o nível piezométrico do aquífero hidromineral e geotérmico está próximo ou ligeiramente inferior ao da superfície freática do aquífero aluvial.

Os actuais furos de captação AC1, AC2 e CC3 atingem, respectivamente, 100, 150 e 190 m de profundidade com caudais de exploração de 5, 10 e 15 L/s, respetivamente. Na captação CC3 as transmissividades de primeira ordem são de 740 m²/dia e os coeficientes de armazenamento de 7,5 x 10⁻³. A transmissividade média dos furos de água considerados produtivos na Zona Galiza – Trás-os-Montes e na Zona Centro-Ibérica (s.l.) em águas comuns encontra-se na faixa de 2 a 4 m²/dia (Carvalho 2006). Comparativamente, também, a transmissividade em S. Pedro do Sul (o segundo pólo geotérmico do Maciço Antigo Português, considerando a temperatura) é da ordem de 100 m²/dia (Carvalho 1996a,b). Portanto, em Chaves a transmissividade é quase uma ordem de magnitude superior à de S. Pedro do Sul e duas ordens de magnitude superiores á dos aquíferos comuns do Maciço Antigo.

As diagrfias termométricas realizadas no furo CC3 mostram uma inversão de gradiente a partir dos 150 m de profundidade. Essa circunstância deve ser considerada normal em meios fracturados e limita entusiasmos em relação ao incremento sistemático e gradual da temperatura na zona de descarga do campo geotérmico.

Carvalho (1995) afirmou que *“Chaves constitui uma localização excepcional, com consumos energéticos substituíveis por geotermia da ordem dos 3.000 tep³³. Há mais de uma dezena de anos a piscina municipal tem sido aquecida com água do furo da captação AC2 com 150 m de profundidade realizado com esse propósito em 1982. Um hotel e os novos Banhos Termais utilizam água quente geotérmica. Está em construção uma estufa. São utilizações desligadas, sem dimensão ou projecto estruturado, de eficiência energética questionável. Um projecto financiado pela União Europeia em 1989 incluía: (i) um ou dois furos geotérmicos, e (ii) a construção de uma rede de aquecimento urbano que nem sequer foi iniciada apesar do baixíssimo risco técnico e dos meios financeiros colocados à disposição do promotor, a Câma-*

33) Energia anual que corresponde a uma potência de cerca de 4MW.

ra Municipal de Chaves. Um projecto financiado pelo Programa Joule promoveu, numa perspectiva científica, o conhecimento do modelo conceptual do reservatório, Aires-Barros et al. (1994) e Andrade Afonso et al. (1995)”.

Mais de vinte e cinco anos depois, a situação pouco evoluiu.

A estufa geotérmica, construída a partir do Projecto Joule atrás citado, em Outeiro Jusão, na periferia de Chaves (Cruz & Lourenço 2006) funcionou apenas um ano e foi abandonada e totalmente desmontada. No entanto, o sistema de aquecimento da piscina funciona sem interrupções a partir do furo AC2 desde 1983, agora com novos e mais eficientes permutadores de calor. A rede de distribuição de calor aos Hotéis Acqua Flaviae, Jaime (actual Hotel Geriátrico) e, há poucos meses, ao Hotel Ibis, bem como o aquecimento do Balneário Termal, funcionam regularmente. Os usos geotérmicos são insuficientes para aproveitar o recurso geotérmico de forma eficiente: a água termal é rejeitada para o esgoto, no Rio Tâmega, a 60 °C, e ainda há a necessidade de operar torres de arrefecimento eléctricas para a produção de “água termal fria” para uso no Balneário Termal. A estas disponibilidades acrescenta-se o recurso constituído pelas águas termais até agora descarregadas pelo sistema geotérmico nas aluviões do Tâmega e na zona superior alterada dos materiais metassedimentares que não mereceram, até agora, qualquer aproveitamento geotérmico. Neste contexto, há também que considerar a utilização de efluentes de banhos termais, um fluido de grande valor energético, cuja utilização poderá ser prevista no contexto de uma operação geotérmica de superfície com bombas de calor. Apenas nas três captações AC1, AC2 e CC3, a potência actualmente disponível nas Caldas de Chaves é de 7,2 MW (Quadro 3).

Finalmente há que referir que o edifício das Termas Romanas irá ser climatizado geotermicamente (aquecimento e desumidificação) a partir de um furo inclinado com 66 m de comprimento localizado na periferia da instalação, no Largo do Arrabalde, que no ensaio de caudal debitou um caudal de 5,3 L/s à temperatura de 66,5 °C com um rebaixamento de apenas 1,15 m (Paiva *et al.* 2022). Mais uma vez foi comprovada a alta transmissividade do reservatório geotérmico (cerca de 400 m²/dia), aqui instalado numa zona de contacto das rochas metassedimentares com o granito. Esta captação foi construída em Julho de 2019. Será utilizado um caudal de cerca de 1 L/s dado que a potência de aquecimento a instalar será apenas de 110 kW. A obra de AVAC está em curso prevendo-se a entrada em funcionamento do Museu das Termas Romanas no segundo semestre de 2021.

A novidade é que com um atraso de mais de 35 anos (!!), Chaves vai assim entrar finalmente no roteiro das cidades europeias com redes de calor ali-

mentadas com geotermia. O Fundo de Apoio à Inovação (FAI) concedeu um importante financiamento a fundo perdido à Câmara Municipal de Chaves para construção de uma rede de calor com 1,5 km de comprimento para usos directos (aquecimento e climatização) a vinte edifícios públicos no centro da cidade de Chaves (Figura 20). A obra já foi consignada e foi iniciada no primeiro trimestre de 2021. A energia total substituída será de 47,5 TJ a que corresponde a potência de 1,51 MW com redução de emissões de gases com efeito de estufa de 1330 ton CO₂ Eq/ano.

Para investimentos da ordem de um milhão de Euros o tempo de retorno simples do empreendimento rondará os 4 anos.

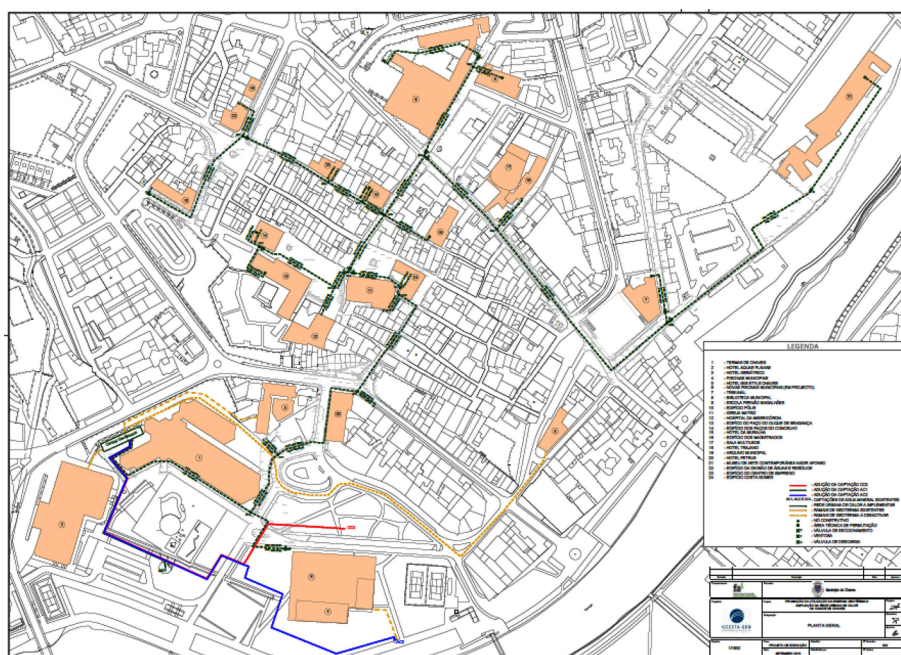


Figura 20: Planta de localização da rede de calor financiada em 2019 pelo Fundo de Apoio à inovação (FAI) em construção em Chaves (cartografia gentilmente cedida pela Câmara Municipal de Chaves).

5.5. O Futuro do Projecto Geotérmico de Chaves

A potência de 7,2 MW actualmente disponível em Chaves supera em muito as necessidades da balneoterapia e deve continuar a ser orientada para utilizações directas (aquecimento, desumidificação, preparação de água quente sanitária e, em cascata térmica, estufas e piscicultura). A estação de aquecimento é em Chaves de Outubro a Abril, tornando o recurso geotérmico particularmente adequado para usos directos incluindo aquecimento urbano.

A eventual extração de fluidos geotérmicos a pequena profundidade (estudos para o empreendimento Palácio da Água) aumentará ainda mais a disponibilidade de geocalor. A este respeito, é também importante destacar a possibilidade de integração dos efluentes do Balneário Termal, um fluido de grande valor energético, num sistema racional de utilização dos recursos existentes. Esta utilização pode ser considerada no contexto de uma operação adicional de geotermia superficial com bombas de calor geotérmicas. O uso conjunto de todos esses recursos levanta a questão da sustentabilidade do sistema geotérmico de Chaves, considerando a incerteza do modelo conceptual. A monitorização adequada do recurso na zona de descarga e os modelos de hidrologia isotópica também são importantes, mas é imperativo avançar para a modelação numérica, apoiada por novos trabalhos de campo para melhor identificar possíveis zonas de recarga e taxas de renovação de recursos. Por isso, urge aprofundar as investigações no sentido de estabelecer-se um *modelo conceptual integrador* que combine a caracterização, avaliação e modelação hidrogeológica, hidrológica isotópica e numérica. Este modelo deverá ainda integrar aspectos da sustentabilidade do recurso em termos ambientais, sociais, éticos e técnico-económicos, e a elaboração de cenários preditivos que integrem a incerteza geológica, o efeito da variabilidade e alteração climática baseado numa análise de perigosidade e multi-riscos, bem como a calibração do modelo e estudos de retro-análise ao longo do tempo.

A produção de energia eléctrica na região de Chaves a partir do recurso geotérmico existente é possível tecnicamente com minicentrals compactas do tipo Climeon³⁴ (Trota *et al.* 2019, Huttner 2020). Essa via foi abandonada pela Direção Técnica da Concessão com base em análise técnico-económica e ambiental, tendo-se optado decididamente, por uma estratégia de desenvolvimento do recurso geotérmico em torno da via convencional do desenvolvimento da rede urbana de calor de Chaves. Esta via é potenciada pela extraordinária convergência espacial do recurso e dos consumidores.

O modelo de Carvalho & Silva (1988) foi assumido e desenvolvido pela GeothermEx (2010) tendo sido proposto ao titular da licença ('Galena International Resources') levar a cabo investigações até cerca de 2000 m, tentando explorar aquíferos profundos no granito subjacente ao 'graben' onde ocorrerão temperaturas a 123 °C (Moitinho de Almeida 1982). Fluidos com temperaturas dessa magnitude podem ser usados para gerar electricidade em centais geotérmicas de fluido binário. Assim, a GeothermEx (2010) avaliou

34) <https://www.thinkgeoenergy.com/despite-challenges-climeon-positive-on-breakthrough-in-geothermal-business/> (consultado em Junho de 2021).

a energia térmica *in situ* com o método de Monte Carlo e concluiu que para uma área de 2,5 a 7 km², no ‘*graben*’ de Chaves, haveria energia térmica disponível de 11 MWe (20 anos). A GeothermEx (2010) considerava ainda que essa potência poderia ser ampliada para valores de 2,6 MWe por km² a 5 MWe por km² por 20 anos. Esses resultados sugerem que a energia eléctrica disponível é relativamente modesta e que o nível de investimentos seria muito alto.

Contudo, mais recentemente deu entrada na DGEG, em 2020 novo pedido para um contrato de prospecção e pesquisa, agora limitado ao ‘*graben*’ da Veiga de Chaves cujo desfecho final não é ainda oficialmente conhecido. A área requerida coincide quase completamente com as zonas de protecção intermédia e alargada da concessão hidromineral de Chaves e com a anomalia gravimétrica evidenciada pelas investigações geofísicas de Represas (2009) e Represas *et al.* (2013).

Sabe-se que no campo geotérmico de Chaves existe calor e água disponível para a recarga mas os limites do reservatório, a sua permeabilidade e a sua tipologia não são conhecidos. É um alvo apetecível: parece haver recursos consideráveis, consumidores de calor e pode pensar-se na produção de electricidade. Enfim, pode sonhar-se com um empreendimento geotérmico a nível europeu com fins múltiplos.

Quer se trate de um projecto clássico com a simples extração de fluidos (em furo único), com furos de reinjecção (para usos directos ou para produção de electricidade) ou de um sistema estimulado (EGS), como conciliar a existência dessa nova exploração com a balneoterapia nas Caldas de Chaves? Será lícita, ou melhor, a legislação Portuguesa permite a construção de furos de reinjecção no perímetro de protecção de um recurso hidromineral devidamente concessionado? Estamos em crer que não, e, assim, provavelmente o futuro da geotermia em Chaves passará pela exploração dos recursos em poço único na Veiga de Chaves para usos directos, de forma a reforçar a rede de calor agora em construção.

6. Reflexões Finais

Recursos hídricos, hidrogeológicos e geotérmicos são águas meteóricas infiltradas de maior ou menor tempo de residência no subsolo e/ou circulando a profundidades diferenciadas. Uns, os recursos hídricos, permitem a satisfação das necessidades básicas no consumo humano, na agricultura ou na indústria. Outros, os recursos hidrogeológicos (águas minerais naturais, águas minero-industriais e águas de nascente) e recursos geotérmicos são águas de grande valor acrescentado usados em balneários termais, indústria

de engarrafamento de água e para fins energéticos que podem ir até à produção de electricidade.

Todos são recursos geológicos inseridos no ciclo da água e como tal devem ser sustentavelmente geridos em harmonia com o ambiente, a sociedade e a ética (e.g., Llamas 1975, 2004, Leopold 1990, Custodio 2000, Datta 2005, Arrojo-Agudo 2010, Eurogeosurveys 2016, Tortajada & Biswas 2017, Chaminé & Gómez-Gesteira 2019, Abrunhosa *et al.* 2021, Carvalho & Chaminé 2023).

As comunidades humanas, nestes tempos de globalização e alterações climáticas, enfrentam ameaças nunca antes vividas e percepcionadas, nomeadamente, a diminuição da biodiversidade, a contaminação da água, do solo e do ar, o incremento dos desastres naturais e dos riscos geológicos, a variabilidade climática e a afectação da capacidade produtiva dos sistemas ecológicos (Attenborough 2020).

Para fixar populações e dar-lhes o máxima qualidade de vida num contexto sustentável Trás-os-Montes não pode seguir práticas consumistas desenfreadas que são o *alter ego* do Antropocénico. Coriat (2020) explicita bem a ameaça que o Antropocénico coloca sobre o Planeta e como é urgente transformar a gestão dos recursos naturais, incluindo a alteração do perfil agrícola, a diminuição do regadio, desenvolver o biológico e o autóctone, articular a criação de gado com o sequeiro e fomentar a produção tradicional da floresta (Nascimento 1999-2000). Esta questão é ainda colocada em perspectiva por Gleeson *et al.* (2020) pelas profundas modificações no ciclo da água e dos geossistemas no Antropocénico, ou pelo relatório da UNDP (2020) que defende, por exemplo, que se deverá caminhar no Antropocénico para uma gestão dos recursos hídricos em soluções baseadas na natureza. Assim, há que ter a percepção de que as alterações climáticas trarão várias ameaças às águas subterrâneas, a saber: (i) nas zonas onde os recursos de águas superficiais diminuir as águas subterrâneas jogarão papel acrescido no combate às secas e haverá aumentos das extracções, (ii) nos períodos de seca, que tenderão a ser maiores, haverá aumentos dos consumos domésticos e agrícolas, e, (ii) temperaturas mais altas levarão as plantas a consumir mais água, logo são de esperar, também, acréscimos nas extracções em agricultura.

A necessidade de pôr em prática estratégias de conservação da água impõe-se: assim, poupar e evitar desperdícios será o caminho certo, provavelmente conjugado com políticas de tarifcação da água, a todos os níveis da utilização. Outra via, a nível do recurso, será a da reutilização, o uso da chamada “água nova”, que pode, nalguns casos, revestir a utilização das águas usadas

e, ainda, formas engenhosas por exemplo a da condensação da humidade atmosférica, a “sementeira da água” e outras actividades ditas de Recarga Induzida de Aquíferos (i.e., MAR – Managed Aquifer Recharge; Dillon *et al.* 2009)³⁵.

Na base de todo um novo caminho de Transição Energética estará a implementação básica do nexa Água-Energia-Alimentação (Chang *et al.* 2016) que nas captações de água subterrânea significa, também, a preocupação com a eficiência energética³⁶. A eficiência energética nas captações de água subterrânea está estreitamente ligada ao respectivo projecto de execução, matéria em que, em Trás-os-Montes, há que reconhecê-lo, se está a níveis primários³⁷.

Não será descabido citar que a transição energética como refere o recente relatório do Banco Mundial de Arrobas *et al.* (2017) terá um efeito perverso, ou seja, um futuro com baixo carbono induzirá substancial incremento da procura de vários minerais e metais chave nas energias limpas para a indústria do solar, da eólica e da geotermia. Isto significa incremento da actividade mineira, que se quer cada vez mais responsável ambientalmente e do ponto de vista ético. Desta forma, como gerir os novos impactes ambientais e o ciclo da água assim perturbado nas áreas de intervenção dessa mineração?

Aspectos fundamentais básicos no desenvolvimento de recursos de água subterrânea incluem: (i) adequação do projecto de execução das captações à procura, (ii) o preço final da água à boca do furo é função dos custos de investimento, mas sobretudo dos de manutenção e dos energéticos (que podem alcançar 85% dos custos totais no período de vida útil da captação), e, (iii) o valor do projecto de captação corresponde a menos de 10% do custo da obra. Por isso, poder-se-á levantar a questão que pode implicar acréscimo do custo da água: como passar esta mensagem aos utilizadores da água e aos decisores técnicos e políticos?

A uso da água subterrânea no Maciço Antigo Português, e particularmente em Trás-os-Montes, ao nível da incerteza de ocorrência, do risco de insuces-

35) Nas rochas cristalinas da Serra de Monchique (Algarve) foi já realizado, com sucesso, um projecto experimental de Recarga Induzida de Aquíferos (MAR) financiado pelo Programa Life, o projecto SOWAMO – Sowing Water in Monchique Mountain (Carvalho *et al.* 2017, 2018, 2021).

36) Carvalho *et al.* (2018) concluíram que a poupança energética expectável com captações bem dimensionadas em Portugal deve alcançar cerca de 302,2 GWh/ano, quase o dobro da produção geotérmica da Ilha de S. Miguel!

37) A tecnologia hidrogeológica que prevalece em quase todas as situações em Portugal é a do vedor e na concepção, operação e dimensionamento dos caudais de exploração a do operador da máquina de perfuração.

so associado à prospecção e dos custos de desenvolvimento e de operação não estão dependentes de novos estudos à escala regional. O problema da utilização das águas subterrâneas em Trás-os-Montes é, de há muitos anos, a qualidade da operação ao nível local no mercado das captações municipais e dos privados. A prospecção e a captação são realizadas sistematicamente com recurso a tecnologia incipiente que amiúde põe em causa a conservação qualitativa e quantitativa do recurso e a credibilidade das águas subterrâneas.

Além disso, entendemos que, a nível local e regional, prevalece a visão tecnocrática de sucessivas gerações de gestores da administração regional e local que tendencialmente subestimam o papel das águas subterrâneas nos pequenos abastecimentos urbanos, sob o olhar complacente dos políticos e das populações.

Em contraponto a uma atitude activa na gestão dos recursos hídricos subterrâneos a nível estratégico (e.g., LABCARGA 2017) em Portugal a lassidão das políticas ligadas ao uso do domínio hídrico a nível tático, isto é, no terreno, tem permitido a proliferação de furos clandestinos, ou semi-clandestinos. Estas captações constituem-se numa questão de forte impacto e preocupação internacionais, como ilustra cabalmente Foster *et al.* (2021). Estes autores, numa visão global do problema, concluem que as culpas por esta situação não podem ser assacadas somente à Administração mas também, e diríamos nós, sobretudo aos utilizadores da água e aos executantes das captações. Foster *et al.* (2021) enumeram duas dezenas de factores que promovem a ilegalidade sendo claro que as populações não vêm a água subterrânea como uma prioridade. Cremos que está, de facto, na Sociedade Civil a chave para um uso mais racional e sábio das águas subterrâneas numa perspectiva de conservação. Enquanto a água não faltar nas torneiras pouco seremos capazes de mudar.

Acresce ainda, na nossa perspectiva, que se deveria ainda intervir de forma efectiva ao nível da educação escolar (desde o 1.º ciclo até ao secundário), mas especialmente na educação primária, dos alunos para o enraizamento claro do despertar e consolidar da consciência eco-responsável do papel, uso e protecção das águas subterrâneas nas comunidades e territórios. Veja, por exemplo, a experiência exemplar sobre o ensino das águas subterrâneas em escolas primárias no Paraguai (Houben 2019) e o papel do ensino da hidrogeologia nas escolas para formar melhores cidadãos (Carvalho & Amador 2002, Gleeson *et al.* 2012). Veja-se, também, o papel positivo nesta, mas ainda curto no alcance, das actividades de Geologia no Verão do programa Ciência Viva e, em particular, das inúmeras iniciativas ligadas às águas

subterrâneas pelo território português (vejam-se os exemplos ligados à hidrogeologia, recursos hidrominerais e geopatrimónio de hidráulica mineira e monástica promovido pelo ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, através do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada, em parceria com a Ciência Viva, nos últimos 15 anos; Chaminé 2016).

Nestes tempos de mudança do paradigma de ocupação do território e de mudança climática é importante que se intensifiquem políticas de cariz científico impactantes no ordenamento do território mas, também, acções de disseminação de boas práticas que fomentem nos habitantes um novo olhar sobre o uso da água e do seu papel nos ecossistemas. Porque não acções de extensão hidrogeológica centradas nas boas práticas de desenvolvimento, de monitorização e de gestão à escala local?

Bem sabemos que tempos houve em que os órgãos da Administração Portuguesa que tutelavam os recursos hídricos por um lado, e os recursos hidrominerais por outro, não dialogavam. Hoje não é assim: a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) e a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) deram as mãos e há claramente um olhar não comum, mas convergente, sobre a gestão dos perímetros de protecção dos recursos hidrominerais. E uma gestão partilhada está a ser iniciada, particularmente nas zonas de descarga dos circuitos hidrominerais, as que melhor são conhecidas, sendo certo que nessas áreas alguns problemas ambientais a curto prazo se colocam ou podem vir a colocar.

As zonas de recarga dos sistemas hidrominerais de ciclo longo (e vimos que há várias em Trás-os-Montes) não estão protegidas especificamente³⁸ e nessas áreas temos uma vulnerabilidade e um risco que podem fazer perigar a qualidade e a quantidade desses mesmos recursos. Como é que essas águas, que se querem isentas de qualquer contaminação, chegarão aos utilizadores daqui a 5 ou 10 000 anos, o tempo de residência suposto? E serão os usos actuais verdadeiramente impactantes na qualidade final na emergência, conhecendo-se as temperaturas e os processos de interacção água-rocha que estas águas sofrem no seu percurso subterrâneo? Respostas que não têm solução enquanto os modelos conceptuais dos aquíferos hidrominerais e geotérmicos não incluem hidrogeologia com meios pesados que não se sabe quem poderá financiar.

Contudo, não parece que esta limitação entrave a curto-médio prazo o desenvolvimento da actividade termal e do engarrafamento de água em Trás-

38) Sem prejuízo de algumas estarem, conjuntamente, em zonas de Reserva Ecológica Nacional (REN) ou outras áreas protegidas.

-os-Montes que atingiu patamares elevados a nível da revelação dos recursos e da sua exploração.

A energia geotérmica cada vez mais é vista como uma parte vital da 'transição energética' e uma parte essencial do pacote de ferramentas do desenvolvimento sustentável. Ganhar a ampla aceitação social da energia geotérmica é tarefa dificultada pela baixa consciência pública sobre a exploração geotérmica e pela pequena participação da comunidade no desenvolvimento de projectos energéticos. Portanto, a chave para obter aceitação social para novos projectos geotérmicos é a comunicação eficaz de conteúdos altamente técnico-científicos para públicos não técnicos, desde residentes locais até aos decisores políticos.

Em Trás-os-Montes, excluindo pequenas operações locais nos pólos termais, cujo arranque estará sempre dependente da procura termal e não terão grande expressão energética, existe a Bacia de Chaves, grande agregador de um projecto geotérmico a nível europeu. A energia geotérmica de baixa entalpia, como a dos pólos termais de Trás-os-Montes, é altamente adequada às necessidades existentes, já identificadas em intervenções anteriores, mas geralmente não incentiva novas atividades, como a piscicultura e estufas, caso ainda não estejam instaladas. Este facto ficou bem evidente no clamoroso fracasso das estufas do Projecto Joule em Chaves e nas Caldas de Carlão.

Novos desenvolvimentos da conversão do calor ocorrente a baixa temperatura em electricidade podem ser aplicados ao recurso geotérmico existente de Chaves e podem ser economicamente viáveis. Dever-se-á ter cuidado ao integrar este tipo de soluções para manter a sustentabilidade do sistema geotérmico e dos recursos hídricos que será necessário mobilizar.

O legado técnico e sociológico das Termas Romanas sugere, como prioridade, o desenvolvimento em Chaves de um projecto geotérmico de usos diretos, sustentado e sustentável, como o que se está a desenvolver apoiado pelo FAI. Este projecto deve ser ajustado ao recurso e à procura existentes, para valorizar a cidade e o Balneário Termal e dar conforto aos seus habitantes. E os projectos de expansão terão de integrar o recurso excedentário do actual projecto geotérmico (15 L/s ainda a 55 °C) que será rejeitado, sistematicamente, para o Rio Tâmega sem qualquer aproveitamento.

A necessidade de se aumentar a potência geotérmica existente actualmente, pois a procura térmica excede em Chaves as 3000 tep, obrigará à realização de um estudo de sustentabilidade do recurso, apoiado num modelo conceptual robusto que permita avanços da exploração geotérmica para além do Campo do Tabolado em direcção à Veiga de Chaves. Esse estudo terá de ser

complementado com actividades de prospecção e de avaliação-produção visando a caracterização do sistema geotérmico até às últimas consequências com uma visão integradora do reservatório principal na Veiga de Chaves e das manifestações secundárias periféricas de águas gasocarbónicas frias (de Pedras Salgadas a Vilarelho da Raia).

A produção de electricidade geotérmica na Veiga de Chaves, que se afigura tecnicamente promissora (embora ainda com escolhos técnico-económicos e ambientais por resolver), esbarra com dificuldades de integração no sistema hidromineral que suporta o Balneário Termal de Chaves. Passos para estudar essa possibilidade terão de ser dados apenas com forte apoio das populações envolvidas. De facto, o recurso hidromineral e geotérmico de Chaves é uma mais-valia das gentes de Chaves, dos Portugueses e dos visitantes, como refere Henriques (1726): “Água, que sendo pura, e boa, pode muito entre outras coisas, com que se rege a máquina do corpo, para o bom governo dele...”.

Agradecimentos

Os nossos sinceros agradecimentos aos coordenadores deste livro e ao Instituto Politécnico de Bragança, pelo gentil convite para participar na presente obra sobre os recursos hidrológicos e geológicos Transmontanos. Extensivos agradecimentos à Câmara Municipal de Chaves pelo seu apoio. O estudo insere-se, parcialmente, no quadro de apoio de re-equipamento promovido pelo Politécnico do Porto (LABCARGA | ISEP-IPP | PADInv'2007/08) e do Centro GeoBioTec | UA (UI4035/2011/2022). Gratos ainda pelo apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do Instituto Dom Luiz (UIDB/50019/2020), e da Fundação La Caixa – FCT (Programa Promove 2020, projeto AquaeVitae). Um agradecimento especial à Dr.^a Conceição Norberto, alfarrabista "livraria.ler.com.gosto", pela gentil partilha de uma cópia digital do mapa geológico de Rego Lima (1892). Por fim, o nosso bem-haja a todos os colegas, técnicos, sondadores, funcionários e gestores das empresas, dos concessionários, da academia, dos laboratórios do Estado e da administração que contactamos ao longo dos anos e que permitiram ampla troca de aprendizagens, de perspectivas e de informação vária.

Referências

Abrunhosa M., Chambel A., Peppoloni S., Chaminé H.I. (2021). Preface – Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development. Proceedings of the 1st Congress on Geoethics and Ground-

- water Management (GEOETH&GWM'20), Porto, Portugal 2020. Advances in Science, Technology & Innovation Series. Springer, Cham, p. xxi-xxvi.
- ACavaco (1981). Obra 1594. Furos de pesquisa de água mineral para a Câmara Municipal de Chaves. Relatórios Internos. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1982a). Estudo hidrogeológico das emergências de águas minero-medicinais de Chaves – Tarefa 1. Relatório para a Câmara Municipal de Chaves. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1982b). Estudo hidrogeológico das emergências de águas minero-medicinais de Chaves – Tarefa 2. Estudo geofísico e execução de furos de pesquisa. Relatório para a Câmara Municipal de Chaves. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1983). Nascente hidromineral nº 39 – Caldas de Moledo: estudo estrutural das nascentes. Relatório para a Junta de Turismo das Caldas de Moledo. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1987). Execução de dois furos de captação de água subterrânea no vale de Chaves. Relatório apresentado à Câmara Municipal de Chaves. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1988a). Furos de captação de água mineral nas Caldas de Moledo. Relatório elaborado para a Junta de Turismo das Caldas de Moledo. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1988b). Relatório hidrogeológico. Relatório para a Junta de Turismo das Caldas de Moledo. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1991). Projecto geotérmico de S. Pedro Sul. Fase 1. Estudo Prévio de Viabilidade. Relatório Final. Relatório para a Câmara Municipal de S. Pedro do Sul. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1994). Projecto geotérmico GE-306/94 PO de S. Pedro do Sul. Projecto de Execução. Programa THERMIE. Relatório para a Câmara Municipal de S. Pedro do Sul. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- ACavaco (1998). Furo AC1: relatório final. Relatório para a Câmara Municipal de S. Pedro do Sul. ACavaco Lda., Lisboa. (Relatório inédito).
- Acciaiuoli L.M.C. (1952/53). Le Portugal hydromineral. Direction Générale des Mines et des Services Géologiques, Lisbonne, I vol., 1952, 284 p.; II Vol., 1953, 574 p.
- ACLUXEGA (2019). Manual de climatización geotérmica. 2 edición, ACLUXEGA – Asociación Clúster da Xeotermia Galega, Xunta de Galicia, Vigo, 436 p.
- Aires-Barros L. (1978). Aproveitamentos geotérmicos: considerações gerais: a exploração das altas e baixas entalpias no território português. Boletim de Minas, Lisboa, 15(3/4):143-155.
- Aires-Barros L. (1979). Termometria geoquímica: princípios gerais, aplicações geotérmicas e casos portugueses. Comunicações Serviços Geológicos de Portugal, 64:103-132.
- Aires-Barros L. (1981). Sobre as potencialidades em geocalor de alguns pólos geotérmicos do continente português. Boletim de Minas, 18(2):1-8.
- Aires-Barros L. (1989). Recursos geotérmicos em Portugal. Anais da UTAD, Vila Real, 2:11-22.

- Aires-Barros L., Graça R.C., Marques J.M. (1991). Contribuição da geoquímica isotópica para a compreensão do sistema de alimentação superficial do aquífero geotérmico de Chaves. *Memórias e Notícias, Universidade de Coimbra*, 112:227-238.
- Aires-Barros L., Graça R.C., Marques J.M. (1994). The low temperature geothermal system of Chaves (Northern Portugal): a geochemical approach. In: *Geothermics'94 in Europe. Document du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 230:67-74.
- Aires-Barros L., Marques J.M., Graça R.C. (1995). Elemental and isotopic geochemistry in the hydrothermal area of Chaves / Vila Pouca de Aguiar (Northern Portugal). *Environmental Geology* 25(4): 232-238.
- Aires-Barros L., Marques J.M. (1994). Utilização de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos: o caso da interrelação entre as águas meteóricas locais e os recursos geotérmicos da região de Chaves. *Estudos, Notas e Trabalhos, IGM*, 36:53-66.
- Aires-Barros L., Marques J.M., Graça R.C., Matias M.J., Weijden C.H., Kreulen R., Eggenkamp H.G.M. (1998). Hot and cold CO₂-rich mineral waters in Chaves geothermal area (Northern Portugal). *Geothermics*, 27:89-107.
- Alençõo A.M.P. (1998). Os recursos hídricos na Bacia hidrográfica do Rio Pinhão. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real. 331 p. (Tese de doutoramento).
- Alençõo A.M.P. (2004). Estimativa da recarga de aquíferos em maciços fracturados pela análise de recessão de caudais de base das emergências naturais (Vila Real, Norte de Portugal). *APRH, Recursos Hídricos*, 25 (3):77-84.
- Alençõo A.M.P., Pacheco F.A.L., Portugal Ferreira M. (2000). A bacia hidrográfica do rio Corgo (NE de Portugal). Escoamento subterrâneo e parâmetros influentes. In: Samper J., Leitão T., Fernández L., Ribeiro L. (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'*. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones. A Coruña. AIH-Grupo Español & APRH. ITGE, Madrid. p.173-181.
- Almeida A., Almeida J. (1970). Inventário hidrogeológico de Portugal. Volume 2: Trás-os-Montes e Alto Douro. Instituto de Hidrologia. Lisboa.
- Almeida C., Mendonça J.L., Jesus M.R., Gomes A.J. (2000). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa and Instituto da Água, Lisboa.
- Andrade Afonso A.R., Mendes-Victor L.A., Portugal Ferreira M., Dupis A., Aires-Barros L., Monteiro Santos F. A., Trota A., Marques J.M., Moreira M., Ribeiro J., Oliveira A. (1995). Evaluation of geothermal resources in the Chaves region (North Portugal). In: *Proceedings of the World Geothermal Congress*, 2:1349-1353.
- Andrade Afonso A.R., Monteiro Santos F.A., Mendes Victor L.A. (1994). The resistivity method in the evaluation of geothermal resources-application to Chaves (Portugal) geothermal field. In: *Proceedings of the Symposium Geothermics'94 in Europe* (Edited by BRGM), Orléans Doc. no. 203, p. 43-50.

- Andrade C.F (1952). Algumas observações sobre a captação das águas termais de Chaves. Imprensa Médica. Lisboa, 16 p.
- Anthonioz P.M. (1972). Les complexes polymétamorphiques précambriens de Morais et Bragança (NE du Portugal): étude pétrographique et structurale. Mem. Serv. Geol. Port., Lisboa, 20(NS):1-192.
- Antics M., Bertani R., Sanner B. (2016). Summary of EGC 2016 Country update reports on geothermal energy. In: Europe, Proceedings EGC 2016, Strasbourg, paper K1:1-16.
- Araújo M.A., Pérez-Alberti A. (1999). Os meios geográficos do Noroeste Peninsular. In: Souto González X.M. (ed.), Geografia do Eixo Atlântico. Vigo, Eixo Atlântico do Noroeste Peninsular, p. 137-200.
- Arrobas D.L.P., Hund K.L., McCormick M.S., Ningthoujam J., Drexhage J.R. (2017). The growing role of minerals and metals for a low carbon future. World Bank Group, Washington D.C., 92 p.
- Arrojo-Agudo P. (2010). The ethical challenge of sustainability in water management. In: Environment at the crossroads: aiming for a sustainable future. Carcanet and Fundação Calouste Gulbenkian, Manchester, p. 32–60.
- ATP (2009). Manual de boas práticas dos estabelecimentos termais. Associação das Termas de Portugal, ATP, Lisboa, 84 p.
- Attenborough D. (2020). A life on our planet: my witness statement and a vision for the future. Witness books, Penguin Random House, London.
- Balsa C., Sobrinho Teixeira J. [eds.] (2018). Recursos geológicos de Trás-os-Montes: passado, presente e perspectivas futuras. Instituto Politécnico de Bragança, 283 p.
- Baptista J. (1998). Estudo neotectónico da zona de falha Penacova–Régua-Verin. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 344 p.
- Baptista J., Cabral J., Ribeiro A. (1998). Seismotectonics of Chaves and Moledo mineral springs in Penacova–Régua–Verin Fault Zone. Comunicações, IGM, 84(1):D69–D72.
- Baptista J., Coke C., Dias R., Ribeiro A. (1993). Tectónica e geomorfologia da região de Pedras Salgadas-Vidago e as nascentes minerais associadas. In: Chambel A. (ed.), Comunicações da XII Reunião de Geologia do Oeste Peninsular, Universidade de Évora, 1:125-139.
- Birot P. (1945). Sur la morphologie de Traz-os-Montes : vallée supérieure du Tâmega. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 173-174:108-120.
- Bisson R.A., Leher J.H. (2004). Modern groundwater exploration: discovering new water resources in consolidated rocks using innovative hydrogeologic concepts, exploration, drilling, aquifer testing and management methods. Wiley Interscience, 309 p.
- Brum Ferreira A. (1980). Surfaces d'aplanissement et tectonique récente dans le Nord de la Beira (Portugal). Revue Géologie Dynamique Géographie Physique, 22(1): 51-62.
- Brum Ferreira A. (1983). Problemas da evolução geomorfológica quaternária do noroeste de Portugal. Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, 5:311-332.

- Brum Ferreira A. (1991). Neotectonics in Northern Portugal: a geomorphological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 82:73-85.
- Brum Ferreira D. (1981). Carte géomorphologique du Portugal. *Memórias do Centro de Estudos Geográficos*, Lisboa, 54 p.
- Brunelli M. (2015). Introduction to the analytic hierarchy process. *SpringerBriefs in operations research*. Springer, Cham, 94 p.
- Cabral J. (1989). An example of intraplate neotectonic activity Vilarica Basin, Northeast Portugal. *Tectonics*, 8:285-303.
- Cabral J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. *Memórias, IGM*, Lisboa, 31:1-256.
- Calado C.M.A. (1995). Notícia explicativa da carta de nascentes minerais do Atlas do Ambiente. *Direção-Geral do Ambiente e Recursos Naturais*, Lisboa, 44 p.
- Calado C.M.A. (2001) A ocorrência de água sulfúrea alcalina no maciço hespérico: quadro hidrogeológico e quimiogénese. *Universidade de Lisboa*, Lisboa, 462 p. (Tese de Doutoramento).
- Calado C.M.A. (2003). Neotectónica e fluidos quentes de origem profunda no maciço Hespérico. *Ciências da Terra, Revista da UNL*, Lisboa, 5 (N.E.):D14-D17
- Cantista P. (2008-2010). O termalismo em Portugal. *Anais de Hidrologia Médica*, 3:79-107.
- Carneiro M.G. (1964). *As Caldas de Chaves: no passado, no presente e no futuro*. Livraria Editora, Braga, 43 p.
- Carneiro S. (2013). As termas medicinais romanas de Chaves. In: *Morais Arnaud J., Martins A., Neves C. (coords.), Arqueologia em Portugal 150 anos*, Associação dos Arqueólogos Portugueses, Lisboa, p. 793-802.
- Carneiro S. (2016). The water supply and drainage system of the roman healing spa of Chaves (*Acquae Flaviae*). In: *Fáilde-Garrido JM, Formella A, Fraiz-Brea JA, Gómez-Gesteira M, Pérez-Losada F, Rodríguez-Vázquez V (eds), Libro de Actas del I Congreso Internacional del Auga, Termalismo y Calidad de Vida*. Campus da Auga, Vicerrectoría del Campus de Ourense, Universidade de Vigo, Ourense p. 289-298.
- Carreira P.M., Marques J.M., Carvalho M.R., Capasso G., Grassa F. (2010). Mantle-derived carbon in Hercynian granites: stable isotope signatures and C/He associations in the thermomineral waters, N-Portugal. *Journal Volcanology Geothermal Research*, 189:49-56.
- Carreira P.M., Marques J.M., Carvalho M.R., Nunes D., Antunes da Silva M. (2014). Carbon isotopes and geochemical processes in CO₂-rich cold mineral water, N-Portugal. *Environmental Earth Sciences*, 71:2941-2953.
- Carreira P.M., Marques J.M., Graça R.C., Aires-Barros L. (2008). Radiocarbon applications in dating “complex” hot and cold CO₂-rich mineral water systems: a review of case studies ascribed to the northern Portugal. *Applied Geochemistry*, 23(10):2817-2828.
- Carreira P.M., Marques J.M., Guerra A., Nunes D., Espinha Marques J., Teixeira J., Chaminé H.I. (2021). *Caldelas and Gerês hydrothermal systems (NW Portugal): a comparative study based on geochemical and isotopic signatures*. *Environmental Earth Sciences*, 80:100.

- Carvalho J.M. (1979). Contribuição para a prospecção e pesquisa hidrogeológica no Maciço Hespérico Português. Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências de Lisboa, 16:305-326.
- Carvalho J.M. (1983). Captações profundas e protecção de águas minero-medicinais. In: Resumes del III Simposio de Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Asociación de Geólogos Españoles, Madrid, 9:375-385.
- Carvalho J.M. (1984). A metodologia de prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em formações cristalinas e cristalofílicas portuguesas. Volume d'Homage au Géologue G. Zbyszewski, Éditions Recherche sur les Civilisations, Paris. p. 137-153.
- Carvalho J.M. (1993a). Mineral and thermal water resources development in the Portuguese Hercynian Massif. In: Banks S.B., Banks D. (eds.), Proceedings of the XXIV of the International Association of Hydrogeologists, Hydrogeology of Hard Rocks, IAH, Oslo, 24(1):548-561.
- Carvalho J.M. (1993b). Ground water exploration in hard rocks for small scale irrigation in Trás-os-Montes, Portugal. In: Banks S.B., Banks D. (eds.), Proceedings of the XXIV of the International Association of Hydrogeologists, Hydrogeology of Hard Rocks, IAH, Oslo, 24(1):1021-1030.
- Carvalho J.M. (1994). Geothermal resources exploration in the Hercynian basement, S. Pedro do Sul, Portugal. In: Proceedings of the Symposium Geothermics'94 in Europe (Edited by BRGM), Orléans Doc. no. 203, p. 85-88.
- Carvalho J.M. (1995a). Low temperature geothermal reservoirs in the Portuguese Hercynian Massif. In: World Geothermal Congress, Florence. 2: 1343-1348.
- Carvalho J.M. (1995b). Desenvolvimento de recursos hidrominerais no Maciço Hespérico. In: Borges F.S., Marques M. (coords.), Resumos Alargados do IV Congresso Nacional de Geologia Memórias do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Universidade do Porto, Porto, 4:445-450.
- Carvalho J.M. (1995c). Recursos geotérmicos de Portugal Continental: da utopia à realidade. In: Borges F.S., Marques M. (coords.), Resumos Alargados do IV Congresso Nacional de Geologia Memórias do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Universidade do Porto, Porto, 4:851-856.
- Carvalho J.M. (1996a). Mineral water exploration and exploitation at the Portuguese Hercynian Massif. *Environmental Geology*, 27: 252-258.
- Carvalho J.M. (1996b). Portuguese geothermal operations: a review. *European Geologist*, European Federation of Geologists Magazine, 3-4: 21-26.
- Carvalho J.M. (1998). Combination of different heat users: principles and Portuguese case studies. *Economy of Integrated Geothermal Projects*, International Summer School, Course Text-Book. INOVA – Azores.
- Carvalho J.M. (2001a). As águas subterrâneas no abastecimento de núcleos urbanos no Norte de Portugal. *Tecnologia da Água*. Elsevier, Barcelona. Ano XXI, 4(1):4-18.
- Carvalho J.M. (2001b). Perímetros de protecção a captações de águas subterrâneas para abastecimento público. *Tecnologia da Água*. Elsevier, Barcelona. Ano XXI, 4(2):48-52.

- Carvalho J.M. (2006). Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas. Universidade de Aveiro, 292 p. + anexos (Tese de Doutoramento).
- Carvalho J.M., Amador F. (2002). Águas subterrâneas: uma abordagem metodológica. Cadernos Didáticos de Ciências, Departamento do Ensino Secundário, Ministério da Educação, Lisboa, p. 21-38.
- Carvalho J.M., Carvalho M.R. (2004). Recursos geotérmicos e seu aproveitamento em Portugal. Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe 29:97-118.
- Carvalho J.M., Chaminé H. I., Afonso M. J., Espinha Marques J., Medeiros A., Garcia S., Gomes A., Teixeira J., Fonseca P.E. (2005a). Productivity and water cost in fissured-aquifers from the Iberian crystalline basement (Portugal): hydrogeological constraints. In: López-Geta J.A., Pulido Bosch A., Baquero Úbeda J.C. (eds.), Water, mining and environment Book Homage to Professor Rafael Fernández Rubio. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, p. 193-207.
- Carvalho J.M., Chaminé H.I. (2004). O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). Geociências, Revista da Universidade Aveiro, 16(1-2):16-31.
- Carvalho J.M., Chaminé H.I. (2016). Mineral water resources development in crystalline rocks: challenges and possible solutions. In: Faílde-Garrido J.M., Formella A., Fraiz-Brea J.A., Gómez-Gesteira M., Pérez-Losada F., Rodríguez-Vázquez V. (eds), Libro de Actas del I Congreso Internacional del Agua, Termalismo y Calidad de Vida. Campus da Auga, Vicerrectoría del Campus de Ourense, Universidade de Vigo, Ourense, p. 39-53.
- Carvalho J.M., Chaminé H.I., Plasencia N. (2003). Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos do maciço cristalino do Norte de Portugal: implicações para o desenvolvimento regional. In: Portugal Ferreira M. (coord.), A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: Recursos Geológicos e Formação. Volume de Homenagem ao Prof. Doutor Coteló Neiva, Imprensa da Universidade, Série Investigação, Coimbra. 2:245-264.
- Carvalho J.M., Chaminé H.I., Teixeira J. (2016). O catálogo de águas termais do espaço SUDOE (INTERREG): a região Norte de Portugal no projecto TERMARED (2010-2011). In: Chaminé H.I., Afonso M.J., Galiza A.C. (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor – Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 541–542.
- Carvalho J.M., Costa L. (2002). Geotermia. In: Gonçalves H., Joyce A., Silva L. (eds.), Forum energias renováveis em Portugal: uma contribuição para os objectivos de política energética e ambiental). Agência para a Energia / Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (ADENE/INETI). p. 138-161.
- Carvalho J.M., Espinha Marques J., Afonso M.J., Chaminé H.I. (2005b). O caudal de exploração em captações de água mineral natural e de nascente em rochas cristalinas do maciço antigo português. In: Fernández Rubio R., Moreno-Zafra

- I., Grande-Herranz M.T. (eds.), *Proceedings del I Foro Ibérico sobre Aguas Envasadas y Balnearios*, Cátedra de Águas Envasadas y Termas ANEABE-ANBAL-ETSIM, Madrid, p. 133-144.
- Carvalho J.M., Espinha Marques J., Afonso M.J., Chaminé H.I. (2007). Prospecção e pesquisa de recursos hidrominerais e de água de nascente no Maciço Antigo Português. *Boletim de Minas*, 42(2):161-196.
- Carvalho J.M., Medeiros A.L.C., Garcia S. (2004). Caracterização hidrodinâmica da algumas áreas do Maciço Antigo Português. In: *Resumos das Actas do 7º Congresso da Água*, APRH, Lisboa. p. 1-16.
- Carvalho J.M., Plasencia N, Chaminé H.I., Rodrigues B.C., Dias A.G., Antunes da Silva M. (2000). Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. In: Samper J., Leitão T, Fernández L., Ribeiro L., (eds.), *Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones, Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica' (A Co-ruña)*. AIH-Grupo Español & APRH. ITGE, Madrid, p.163-172.
- Carvalho J.M., Silva L.F. (1988). Pólos geotérmicos de Trás-os-Montes: recursos e metodologias de desenvolvimento. *Anais da UTAD*, Vila Real, 2: 23-45.
- Carvalho J.M., Chaminé H.I. (2017). The hydromineral and geothermal field of Chaves (NE Portugal): a prospective approach. In: Sousa R., Abrunhosa M., Chambel A. (eds.), *Abstract Book & Field Guide GwFR'2017 – International Conference on Groundwater in Fractured Rocks*, 5-7 June 2017, Chaves, p. 16-24.
- Carvalho J.M., Chaminé H.I. (2023). The hydromineral and geothermal field of Chaves (NE Portugal): a prospective approach updated. In: Chaminé H.I., Fernandes J.A. (eds.), *Advances in Geoengineering, Geotechnologies, and Geoenvironment for Earth Systems and Sustainable Georesources Management*, ASTI Springer, Cham. (in press).
- Carvalho J.M., Nogueiro R., Carvalho R., Freitas H.N., Chaminé H.I. (2017). Field guide to the hydromineral and geothermal field of Chaves. In: Sousa R., Abrunhosa M., Chambel A. (eds.), *Abstract Book & Field Guide GwFR'2017 – International Conference on Groundwater in Fractured Rocks*, 5-7 June 2017, Chaves, p. 5-15.
- Carvalho M.R., Carreira P.M., Marques J.M., Capasso G., Grassa F., Antunes da Silva A., Matias M.J. (2006). Isótopos de carbono e de hélio nos gases dos sistemas hidrominerais gasocarbónicos associados ao acidente tectónico Régua-Verín. In: *Actas do VII Congresso Nacional de Geologia*, Évora, 4 p.
- Carvalho M.R., Carreira P., Marques J.M., Matias M.J., Capasso G., Grasso F., Antunes da Silva M. (2007). A origem dos gases e a sua influência na mineralização das águas gasocarbónicas associadas à estrutura Régua-Verín (Portugal). In: *Seminário Sobre Águas Subterráneas*, APRH, 12 p.
- Carvalho M.R., Carvalho J.M., Simões M., Oliveira M., Monteiro J.P., Abrunhosa M., Mendes P. (2018). Água subterrânea e energia. In: *Apresentação da Comissão Especializada das Águas Subterráneas à APRH 14º Congresso Nacional da Água, Gestão dos Recursos Hídricos: Novos Desafios*, Évora.
- Carvalho R.C., Carvalho T., Sousa F.R., Gil S. (2018). Sowing water in Monchique Mountain: a multidisciplinary MAR project for climate change adaptation.

- In: Calvache M.L., Duque C., Pulido-Velazquez D. (eds.), *Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area*. Springer, Cham. p. 75-83.
- Carvalho T., Carvalho R.C., Sousa R., Agostinho, R., Gil S. (2017). Semear água na Serra de Monchique (SOWAMO): resultados de um projecto de recarga induzida de aquíferos no maciço antigo. In: Livro de Resumos, 11.º Seminário sobre Águas Subterrâneas, Porto. p. 46-49.
- Carvalho T., Carvalho R.C., Carvalho J.M. (2021). Sowing water in Monchique Mountain: preliminary results from a MAR Project for climate change adaptation. In: Abstracts of the 47th IAH Congress 2021, Brazil.
- Castany G. (1982). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod Université, Paris, 236 p.
- Cavaca R. (1936). Condições geológicas do aproveitamento da Veiga de Chaves. Apêndice 2, Tomo I – Rega e Enxugo da Veiga de Chaves. Junta Autónoma das Obras de Hidráulia Agrícola, Lisboa.
- Chaminé H.I. (2016). Geologia no Verão – Ciência Viva e Ciência Viva em Rede, no ISEP: uma iniciativa do Departamento de Engenharia Geotécnica (2005–2016). In: Chaminé H.I., Afonso M.J., Galiza A.C. (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 543-545.
- Chaminé H.I., Gómez-Gesteira M. (2019). Sustainable resource management: water practice issues. *Sustainable Water Resources Management* 5:3–9.
- Chang Y., Li G., Yao Y., Zhang L., Yu C. (2016). Quantifying the water-energy-food nexus: current status and trends. *Energies*, 9(2):65.
- Choffat P. (1917) La ligne de dépression Régua-Verín et ses sources carbonatées: remarques et considérations. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 12:35-69.
- Coelho L., Cerdeira R., Garcia J., Sanner B., Abry M., Karytsas C. (2010). Development and demonstration of ground coupled heat pumps of high technology. In: *Proceedings World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, p. 25-29.
- Cooper H.H. Jr., Jacob C.E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions American Geophysical Union*, 27: 526-34.
- Coriat B (2020). *La pandémie, l'anthropocène et le bien commun. Les Liens qui Libèrent*, Paris. 304 p.
- Costa M.R. (1990). Critérios para selecção de locais favoráveis à ocorrência de águas subterrâneas em rochas cristalinas na região de Trás-os-Montes Oriental. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 81 p. (Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica).
- Cotelo Neiva J.M. (1982). *Geologia e águas mineromedicinais de Portugal*. Publicações Instituto Climatologia e Hidrologia da Universidade de Coimbra, 25:65-76.
- Cruz J., Lourenço C. (2006). Os recursos geotérmicos de baixa entalpia em Portugal Continental e seu tipo de aproveitamento. *Boletim de Minas*, 41(2):175-186.

- Cunha P.P., Vicente G., Martín-González F. (2019). Cenozoic sedimentation along the piedmonts of thrust related basement ranges and strike-slip deformation belts of the Iberian Variscan Massif. In: Quesada C., Oliveira J.T. (eds.), *The geology of Iberia: a geodynamic approach – Volume 4: Cenozoic Basins*, Springer, Cham, p. 131-165.
- Curto Simões M.M. (1993). Águas Minerais Portuguesas: da sua caracterização físico-química ao esboço de uma classificação. *Boletim de Minas*, 30:13-26.
- Custodio E. (2000). Some relevant ethical issues in relation to freshwater resources and groundwater. *Boletín Geológico Minero España* 111(6):121–130.
- Custodio E., Llamas M.R. (1970). Relatório do grupo de trabalho para as Caldas de Aregos. Direção Geral Geologia e Minas, Lisboa.
- Datta P.S. (2005). Groundwater ethics for its sustainability. *Current Science* 89(5):1–6.
- DGEG (2017). Geotermia: energia renovável em Portugal. DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia, Lisboa, 54 p.
- DGEG (2021). Avaliação do potencial de exploração dos recursos hidrominerais e geotérmicos e da sua utilização para temperaturas superiores a 25°C. DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia, Lisboa, 191 p.
- Dias J., Galhano F. (1986). Aparelhos de elevar a água de rega: contribuição para o estudo do regadio em Portugal. Edições D. Quixote, Lisboa, 248 p.
- Dias R., Araújo A., Terrinha P., Kullberg J.C. [Eds.] (2012). *Geologia de Portugal*. 2 volumes. Escolar Editora, Lisboa.
- Dillon P.J., Pavelic P., Page D., Beringen H., Ward J. (2009). Managed aquifer recharge. an introduction. *Waterlines Report Series*, National Water Commission, Canberra, Australia, 13:1-64.
- Driscoll F.G. (1986). *Groundwater and wells*. Johnson Screens, St. Paul, Minnesota, 1089 p.
- Duque R., Monteiro Santos F.A., Mendes-Victor L.A. (1998). Heat flow and deep temperatures in the Chaves Geothermal system, northern Portugal. *Geothermics*, 27:75-87.
- Dykes J., Maceachren A.M., Kraak M.-J. (2005). *Exploring geovisualization*. International Cartographic Association Elsevier, Oxford.
- Eggenkamp H.G.M., Marques J.M., Neves O. (2015). *A geochemical atlas of the Portuguese mineral waters*. Onderzoek en Beleving, Bussum, The Netherlands. 66 p.
- Espinha Marques J. (2001). *Estudo de sistemas hidrominerais: o caso de Caldas do Moledo*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto. 143 p. (Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica).
- Espinha Marques J., Carvalho J.M., Sodrê Borges F. (2003a). O sistema hidromineral de caldas do Moledo, Peso da Régua (Norte de Portugal). *Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe*, 28:127-145.
- Espinha Marques J., Marques J.M., Chaminé H.I., Gomes A., Fonseca P.E., Carvalho J.M., Graça R.C., Aires-Barros L., Sodrê Borges F. (2003b). Nascente termal do Poço Quente (Granjão-Caldas do Moledo, Norte de Portugal): morfoestrutura, geoquímica e hidrogeologia. *Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe*, 28:147-172.

- Eurogeosurveys (2016). Wonder water, the value of water: a geological journey around Europe's mineral springs, spas and thermal baths. Eurogeosurveys – The Geological Surveys of Europe, 137 p.
- Feio M. (1951). Notas geomorfológicas: a depressão de Régua-Verin. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 32:181-222.
- Feio M., Daveau S. (2004). O relevo de Portugal: grandes unidades regionais. Publicações da Associação Portuguesa de Gemorfólogos, Coimbra, 151 p.
- Fernandes L.F. (1992). Hidrogeologia de dois importantes aquíferos (Sabariz e Cova de Lua) do maciço polimetamórfico de Bragança. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 176 p. (Dissertação de Mestrado).
- Ferreira Gomes L.M. (2007a). Aproveitamento geotérmico em cascata em S. Pedro do Sul. Boletim de Minas, 42(2):7-19.
- Ferreira Gomes L.M. (2007b). Elementos construtivos e hidráulicos da nova captação de água mineral das Termas de Carvalhal – Castro Daire. Boletim de Minas, 42(2):137-147.
- Ferreira Gomes L.M. (2019). Termas de São Pedro do Sul: outros aproveitamentos da água termal que não terapêuticos. Geonovas, Revista da Associação Portuguesa de Geólogos, Lisboa, 32(1):3-22.
- Ferreira Gomes L.M., Afonso de Albuquerque F.J., Fresco H. (2001). Protection areas of the S. Pedro do Sul spa, Portugal. Engineering Geology, 60: 341-349.
- Ferreira Gomes L.M., Ferreira Guedes J.F., Gomes da Costa T.C., Ferreira P.J.C., Trota A.P.N. (2015). Geothermal potential of Portuguese granitic rock masses: lessons learned from deep boreholes. Environmental Earth Sciences, 73(6):2963-2979.
- Ferreira Gomes L.M., Trota A.P.N., Afonso de Albuquerque F.J. (2017b). Experience gained on direct use of low enthalpy energy in hotel do Parque, S. Pedro do Sul, Portugal. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95:022017
- Ferreira Gomes L.M., Trota A.P.N., Oliveira A.S., Soares Almeida S.M. (2017a). Reservoir considerations and direct uses of São Pedro do Sul hydromineral and geothermal field, Northern Portugal. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95:022018.
- Ferreira N., Iglésias M., Noronha F., Pereira E., Ribeiro A., Ribeiro M.L. (1987). Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: Bea F, Carnicero A., Gonzalo J.C., López Plaza M., Rodríguez Alonso M.D., (eds.), Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico – Libro de Homenaje a L.C. García de Figuerola. Editorial Rueda, Madrid, p. 37-51.
- Fetter C.W. (2014). Applied hydrogeology. 4th edition, Pearson New International ed., USA, 612 p.
- Fitts C.R. (2013). Groundwater science. 2nd Edition, Academic Press, Elsevier Inc., USA, 692 p.
- Foster S., Hirata R., Custodio E. (2021). Waterwells: how can we make legality more attractive?. Hydrogeology Journal, 29:1365-1368.

- Freire de Andrade C. (1937). Os vales submarinos portugueses e o diastrofismo das Berlengas e da Estremadura. Serviços Geológicos de Portugal, Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Casa Portuguesa, Lisboa, 236 p.
- Freire de Andrade C. (1952). Algumas observações sobre a captagem das águas termais de Chaves. Imprensa Médica, Lisboa, 16 p.
- Freitas H.N. (2015). Investigações hidrogeológicas da sondagem CC3 do aquífero termomineral de Chaves: implicações para o modelo conceptual. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 197 p. (Dissertação de Mestrado).
- Galdeano C.S., Azañón J.M., Cabral J. *et al.* (2019). Active faults in Iberia. In: Quesada C., Oliveira J.T. (eds.), The geology of Iberia: a geodynamic approach – Volume 5: Active Processes: Seismicity, Active Faulting and Relief. Springer, Cham, p. 33-75.
- GeothermEx (2010). Resource evaluation of the Chaves geothermal prospect. Galena International Resources, Richmond, California (Relatório Inédito).
- Gleeson T., Allen D.M., Ferguson G. (2012). Teaching hydrogeology: a review of current practice. *Hydrology Earth Systems Science* 16:2159–2168.
- Gleeson T., Wang-Erlandsson L., Porkka M., Zipper S., Jaramillo F, Gerten D., Fetzer I., Cornell S., Piemontese L., Gordon L., Rockström J., Oki T., Sivapalan M., Wada Y., Brauman K., Flörke M., Bierkens M., Lehner B., Keys P., Famiglietti J. (2020). Illuminating water cycle modifications and earth system resilience in the Anthropocene. *Water Resources Research* 56(4):10.1029/2019WR024957.
- Glotfelty M.F. (2019). The art of water wells: technical and economic considerations for water well siting, design, and installation. NGWA Press, Westerville, Ohio, 173 p.
- Gonçalves Henriques A. (1985). Avaliação dos recursos hídricos de Portugal Continental: contribuição para o ordenamento do território. Instituto de Estudos para o Desenvolvimento, Caderno 9, Lisboa, 151 p.
- Grade J., Casal Moura A. (1982). Bacia de Chaves: Estudo prospectivo dos seus corpos argilosos. *Geonovas, Revista da Associação Portuguesa de Geólogos*, Lisboa, 1(3):79-84
- Grade J., Casal Moura A. (1983). Depósitos argilosos de Trás-os-Montes. Estudo das suas potencialidades como fontes de matéria-prima para a cerâmica de construção – Acção 1: Bacia de Chaves; estudo dos seus corpos argilosos/ resultados preliminares da campanha de sondagens efectuadas pela Direção Geral de Geologia e Minas, Porto. (Relatório Inédito).
- Guedes J.F. (2010). Execução de um furo de captação profundo na Fonte Santa em Almeida: Furo AQ1. AQUALIS – Captações – Hidrogeologia e Sondagens Lda, Porto, 7 p. (Relatório inédito).
- Guedes J.F. (2013). Optimização de metodologias de construção de infraestruturas hidráulicas subterrâneas muito profundas, para captação de recursos hídricos e geotérmicos em maciços graníticos. Relatório do Programa de Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã. (Relatório Inédito).
- Henriques F.F. (1726). Aquilégio medicinal. Edição Fac-similada do IGM – Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa. 288 p.

- Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1987a). Estudo das águas subterrâneas do vale de Chaves e seus vales secundários. Tomo I – Vale de Chaves. Relatório para a DRATM, Mirandela & Lisboa. (Relatório inédito).
- Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1987b). Estudo de viabilidade da rega do vale de chaves e seus vales secundários e prospecção de águas subterrâneas em algumas Zonas de Trás-os-Montes. C — Prospecção de Águas Subterrâneas em algumas Zonas de Trás-os-Montes. Direção Regional de Agricultura de Trás-os-Montes, Lisboa. (Relatório inédito).
- Houben G.J. (2019). Teaching about groundwater in primary schools: experience from Paraguay. *Hydrogeology Journal*, 27:513–518.
- Houten P. (2021). Urbanisation in Roman Spain and Portugal: *Civitates Hispaniae* in the Early Empire. Routledge, Taylor and Francis Group, London, 480 p.
- Huttrer G.W. (2020). Geothermal power generation in the world 2015-2020: update report. In: Proceedings World Geothermal Congress 2020 Reykjavik, Iceland, p. 1-17.
- IGM (1998). Recursos energéticos em Portugal continental: baixa entalpia. IGM – Instituto Geológico e Mineiro e Ministério da Economia, 23 p.
- INAG (1997). Definição, caracterização e cartografia dos sistemas aquíferos de Portugal continental. Instituto da Água, INAG, Divisão do Recursos Hídricos, Lisboa, 236 p.
- Joukes V., Costa I. (2015). Eurocity Chaves-Verín: regional development strengthened by spa-linked research and professional education. In: Peris-Ortiz M., Álvarez-García J. (eds.), *Health and Wellness Tourism: Emergence of a New Market Segment*. Springer, Cham, p. 47-62.
- Krásny J. (1993). Classification of transmissivity: magnitude and variation. *Ground Water*, 31(2): 230-236.
- LABCARGA (2017). Desenvolvimento de métodos específicos para a avaliação da recarga das massas de água subterrâneas, para melhorar a avaliação do estado quantitativo (CPV 73000000-2). Relatório final para a APA – Agência Portuguesa do Ambiente. Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 447 p. + anexos (143 p.) (Relatório Inédito).
- Lachassagne P., Dewandel B., Wyns R. (2014). The conceptual model of weathered hard rock aquifers and its practical applications. In: Sharp J.M. Jr (ed.), *Fractured rock hydrogeology*, IAH Selected Papers N° 20, CRC, Boca Raton, p. 13–46.
- Lachassagne P., Dewandel B., Wyns R. (2021). Review: hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers: guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeology Journal*, 29:2561–2594.
- Lachassagne P., Wyns R., Dewandel B. (2011). The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23(3):145-161.
- Larsson I. (1984). Groundwater in hard rocks. *Studies and reports in hydrology*. Unesco, Paris, 33:1-228.
- Lautensach H. (1967). *Geografía de España e Portugal*. Ed. Vicens-Vives, Barcelona, 814 p.

- Le Roux P. (2000). Legio VII Gemina (pia) felix. In: Le Bohec Y., (ed.), *Les légions de Rome sous le Haut-Empire*, Lyon, p. 383-396.
- Leopold L.B. (1990). Ethos, equity and the water resources. *Environmental Science Policy and Sustainability* 32(2):16–41.
- Lima A.S. (2001). *Hidrogeologia de terrenos graníticos: Minho-Portugal*. Universidade do Minho, Braga, 451 p. (Tese de Doutoramento).
- Lima A.S. (2020). *Sondagem de pesquisa e captação de água mineral natural Caldas do Gerês. Relatório dos trabalhos realizados para a Empresa das Águas do Gerês S.A., Caldas do Gerês 21 p. + anexos (Relatório inédito)*.
- Lima A.S., Oliveira A.C.V. (2007). Conceptualização de modelos hidrogeológicos em águas sulfúreas. In: Chaminé H.I., Carvalho J.M., (eds), *O Valor Acrescentado das Ciências da Terra no Termalismo e no Engarrafamento da Água (II Fórum Ibérico de Águas Engarrafadas e Termalismo)*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, p. 141–160.
- Llamas M.R. (1975). Non economic motivations in ground water use: hydroschizophrenia. *Ground Water* 13(3):296–300.
- Llamas M.R. (2004). *Water and ethics: use of groundwater*. UNESCO Series on Water and Ethics, Essay 7. UNESCO, New York.
- Lloyd J.W. (1999). Water resources of hard-rock aquifers in arid and semi-arid zones. *Studies and Reports in Hydrology*, Unesco, Paris, 58:1-284.
- Lobo-Ferreira J.P. (1981). Mathematical model for the evaluation of the recharge of aquifers in semiarid regions with scarce (lack) hydrogeological data. In: Verrijt A., Barends F.B.J., (eds), *Proceedings of Euromech, A.A. Balkema, Rotterdam*,
- Lobo-Ferreira J.P., Leitão T.E. (1991). *Aplicação da modelação estocástica inversa e de um modelo de escoamento e de transporte de poluentes em meios fracturados à região de Bagueixe*. Memória 768, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 50 p.
- Lourenço C., Pascoal R. (2019). O estudo metagenómico das águas minerais naturais tendo em vista o reconhecimento científico das vocações terapêuticas. *Boletim de Minas*, 53 (Ed. Esp.):39-53.
- Lourenço M.C., Melo B., Rosa C., Rosa D. (2010). Geotermia em Portugal Continental: situação actual e novas oportunidades. *Boletim de Minas*, 45(2):105-116.
- Lund J.W., Boyd T.L. (2015). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. In: *Proceedings WGC 2015, Melbourne, paper #01000:1-31*.
- Malczewski J., Rinner C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. Springer, New York, 350 p.
- Marques F.O., Ribeiro A., Pereira E. (1991-92). Tectonic evolution of the deep crust: Variscan reactivation by extension and thrusting of Precambrian basement in the Bragança and Morais massifs (Trás-os-Montes, NE Portugal). *Geodinamica Acta*, 5(1/2):131-151.
- Marques J.M. (1993). *As águas termais e minerais de Chaves, Vilarinho da Raia, Vidago e Pedras Salgadas: uma perspectiva global, aplicação geotérmica*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 148 p. (Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica)

- Marques J.M. (1999). Geoquímica dos fluidos e da interacção água-rocha: os casos das águas mineralizadas quentes e frias de Chaves, Vilarelho da Raia, Vidago e Pedras Salgadas. IST, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa (Tese de Doutoramento)
- Marques J.M. (2017). Isotopes on the road. In: Sousa R., Abrunhosa M., Chambel A., (eds.), Abstract Book & Field Guide GwFR'2017 – International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, 5-7 June 2017, Chaves, p. 36-46.
- Marques J.M., Aires-Barros L., Graça R.C. (1999). Geochemical and isotopic features of hot and cold CO₂-rich mineral waters of northern Portugal: a review and reinterpretation. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 17:175-183.
- Marques J.M., Andrade M., Carreira P.M., Eggenkamp H.G.M., Graça R.C., Aires-Barros L., Antunes da Silva M. (2006). Chemical and isotopic signatures of HCO₃/Na/CO₂-rich geofluids, North Portugal. *Geofluids*, 6:273-287.
- Marques J.M., Cabeleira M.M., Aires-Barros L. (2000). Interacção entre as águas superficiais e profundas da região de Chaves. In: Samper J., Leitão T., Fernández L., Ribeiro L., (eds.), Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones, Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica' (A Coruña). AIH-Grupo Español & APRH. ITGE, Madrid, p. 237-259.
- Marques J.M., Carreira P.M. (2017). Questions and answers ascribed to Chaves CO₂-rich thermal waters conceptual model (N Portugal): a review. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17:654-657.
- Marques J.M., Carreira P.M. (2019). Geosciences in the assessment of thermal and mineral groundwater systems in N-Portugal: a review. *Sustainable Water Resources Management*, 5:1511–1523.
- Marques J.M., Carreira P.M., Aires, Goff F., Eggenkamp H.G.M., Antunes da Silva M. (2012). Input of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios and Sr geochemical signatures to update knowledge on thermal and mineral waters flow paths in fractured rocks (N Portugal). *Applied Geochemistry* 27:1471-1481.
- Marques J.M., Carreira P.M., Aires-Barros L., Monteiro Santos FA., Antunes da Silva M., Represas L. (2019). Assessment of Chaves low-temperature CO₂-Rich geothermal system (N-Portugal): using an interdisciplinary geosciences approach. *Geofluids*, Hindawi, ID:1379093.
- Marques J.M., Carreira P.M., Espinha Marques J., Chaminé H.I., Fonseca P.E., Monteiro Santos FA., Eggenkamp H.G.M., Teixeira J. (2010). The role of geosciences in the assessment of low-temperature geothermal resources (N Portugal): a review. *Geosciences Journal*, 14(4):423-442.
- Marques J.M., Espinha Marques J., Carreira P.M., Graça R.C., Aires-Barros L., Carvalho J.M., Chaminé H.I., Borges FS. (2003). Geothermal fluids circulation at Caldas do Moledo area, Northern Portugal: geochemical and isotopic signatures. *Geofluids*, 3(3):189-201.
- Martins B.M.S.C. (2009). A depressão de Régua–Chaves–Verin: contributo para a análise do risco de ravinamento. Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra, 396 p. (Tese de Doutoramento).

- McKnight T.L., Hess D. (2000). Climate zones and types: The Köppen System. Physical Geography: A Landscape Appreciation. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Meireles C.A.P. (2013). Litoestratigrafia do Paleozóico do sector a nordeste de Bragança (Trás-os-Montes). Instituto Universitário de Geologia Isidro Parga Pondal, Universidade A Coruña, Serie Nova Terra, nº 42, 471 p.
- Meireles C.A.P. (2018). Os granulitos do Tojal dos Pereiros (Bragança): como conciliar os geossítios com a expansão urbana?. In: Balsa C., Sobrinho Teixeira J., (eds.), Recursos Geológicos de Trás-os-Montes: Passado, Presente e Perspetivas Futuras. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, p. 239-267.
- Misstear B., Banks D., Clark L. (2017). Water wells and boreholes. 2nd Edition, Wiley-Blackwell, Chichester, 536 p.
- Moitinho de Almeida F (1970). Carta hidrogeológica de Portugal, na escala 1/1000000. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa.
- Moitinho de Almeida F (1979). Termómetros hidrogeotérmicos aplicados a águas de Portugal. In: Resumos das Comunicações do I Encontro de Geociências, FCUL, Lisboa.
- Moitinho de Almeida F (1982). Novos dados termométricos sobre as águas de Chaves e de S. Pedro do Sul. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, 68(2):179-190.
- Monteiro Santos FA., Andrade Afonso A.R., Dupis, A., Mendes-Victor L.A. (1994). Joint inversion of AMT and DC data: application to the Chaves geothermal field. In: Proceedings of the Symposium Geothermics'94 in Europe (Edited by BRGM), Orléans Doc. no. 203, p. 51-57
- Monteiro Santos FA., Andrade Afonso A.R., Mendes-Victor L.A. (1997). A study of Chaves geothermal field using 3D resistivity modelling. Journal of Applied Geophysics, 37:85-102.
- Monteiro Santos FA., Dupis A., Andrade Afonso A.R., Mendes-Victor L.A. (1995a). Magnetotelluric observations over the Chaves geothermal field (NE Portugal): Preliminary results. Physical Earth Planetary International, 91:208-211.
- Monteiro Santos FA., Dupis A., Andrade Afonso A.R., Mendes-Victor L.A. (1995b). Preliminary 3D modeling of the MT survey over Chaves Geothermal Field (NE Portugal). In: Proceedings of the International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics. Schlumberger-Doll Research, Ridgefield, USA, p. 577-585.
- Monteiro Santos FA., Dupis A., Andrade Afonso A.R., Mendes-Victor L.A. (1996). An audio-magnetotelluric survey over the Chaves geothermal field (NE Portugal). Geothermics, 25(3):389-40.
- Mu E., Pereyra-Rojas M. (2017). Practical decision making: an introduction to the Analytic Hierarchy Process (AHP) using super decisions V2. SpringerBriefs in operations research. Springer, Cham, 124 p.
- Nascimento H.O.P.N. (1999-2000). Agricultura e ambiente nas áreas de regadio de Gostei e Azibo (Trás-os-Montes). Geografia, Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 15/16 (I Série):19-48.

- OCSA (2012). Prospecção geofísica com sísmica de reflexão e tomografia eléctrica no Largo do Tabolado do Chaves. tomo 1: Trabalho de campo, interpretação e resultados. OCSA Prospecciones y Estudios S.L, Madrid, 61 p.
- Oliveira A.S. (2001). Hidrogeologia dos sistemas gasocarbónicos da Província Hidromineral Transmontana: Ribeirinha (Mirandela), Sandim (Vinhais), Segirei e Salgadela (Chaves). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 442 p. (Tese de doutoramento)
- Oliveira A.S. (2015). Águas subterrâneas do setor norte de Portugal continental: enquadramentos geográfico e geológico, tipologias e aproveitamentos. Boletín de la Sociedad Española de Hidrología Médica, 30(1):57-71.
- Oliveira A.S. (2017). Águas subterrâneas do sector Norte de Portugal Continental: enquadramentos geográfico e geológico, tipologias e aproveitamentos. In: Simões Cortez J.A., (coord.), Águas Minerais Naturais e de Nascente da Região Norte, Mare Liberum Editora, Aveiro, p. 51-83.
- Oliveira A.S., Albuquerque M.H., Guerreiro de Matos M. (1982). Bacia do Tâmega: relatório preliminar da hidrologia da Veiga de Chaves e região limítrofe. Relatório não publicado da DGHEA, Lisboa. (Relatório Inédito).
- Oliveira A.S., Almeida S.M.S., Reis A.R., Alencão A.M.P., Sousa L.M.O., Lourenço J.M.M. (2012). Águas minerais de Trás-Os-Montes e Alto Douro (NE de Portugal): sistematização e aproveitamentos. In: Lopes F.C., Andrade A.I., Henriques M.H., Quinta-Ferreira M., Barata M.T., Pena dos Reis R., (eds.), Para conhecer a Terra: memórias e notícias de Geociências no espaço lusófono. Imprensa da Universidade de Coimbra, p. 409-420.
- Oliveira A.S., Portugal Ferreira M.P. (1995). Controlo estrutural das emergências hidrominerais da região de Pedras Salgadas (Vila Pouca de Aguiar–Norte de Portugal). In: Borges F.S., Marques M., (coords.), Resumos Alargados do IV Congresso Nacional de Geologia Memórias do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Universidade do Porto, Porto, 4:485-489.
- Oliveira J., Costa M.R., Pereira B., Azevedo J. (2017). Hydraulic parameters of bedrock wells in the Minho region, northern Portugal. In: Sousa R., Abrunhosa M., Chambel A., (eds.), Abstract Book & Field Guide GwFR'2017 – International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, 5-7 June 2017, Chaves, p. 102-106.
- Oliveira J.T., Pereira E., Ramalho M., Telles Antunes M., Monteiro J.H. [coords.] (1992). Carta Geológica de Portugal, escala 1/500.000, 5ª edição. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. (2 folhas).
- Pacheco F.A.L. (2000). Hidrogeologia em maciços de rochas cristalinas (Morais-Chacim-Macedo de Cavaleiros): contribuição para a gestão integrada dos recursos hídricos da região. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 395 p. (Tese de Doutoramento).
- Paiva M., Carvalho R., Nogueiro R., Casal B., Carvalho J.M. (2022). Projeto geotérmico das termas Romanas de Chaves. In: Mendes M.P., Monteiro J.P., Simões M. et al. (Eds.), Livro de Resumos do 13º Seminário sobre Águas Subterrâneas, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, APRH, Lisboa, p. 5-7.

- Paradela P.L. (1975). Recursos aquíferos subterrâneos: produtividade. Instituto do Ambiente, Lisboa.
- Paradela P.L. (1984). Recursos aquíferos subterrâneos: produtividade. Notícia explicativa I.11. Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa, 15 p.
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology Earth System Sciences*, 11(5): 1633-1644.
- Pereira D. (1999a). O registo sedimentar em Trás-os-Montes oriental nas proximidades do limite Neogénico-Quaternário. *Estudos do Quaternário, APEQ*, 2:27-40.
- Pereira D. (1999b). Terciário de Trás-os-Montes Oriental: evolução geomorfológica e sedimentar. *Comunicações IGM*, 86:213-226.
- Pereira E. [coord.] (2006). Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal, na escala de 1/200.000, folha 2 (Trás-os-Montes). Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa. 119 p.
- Pereira E., Ferreira N. (1985). Geologia regional e controlo estrutural das nascentes termais de S. Pedro do Sul. *Comunicações Serviços Geológicos de Portugal*, 71(1):17-25.
- Pereira E., Ribeiro A., Carvalho G.S., Noronha, F., Ferreira N., Monteiro J.H. (1989). Serviços Geológicos de Portugal, Carta Geológica de Portugal, escala 1/200000. Folha 1, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Pereira E., Ribeiro A., Marques F., Munhá J., Castro P., Meireles C., Ribeiro M.A., Pereira D., Noronha F., Ferreira, N. (2001). Carta Geológica de Portugal, escala 1/200000. Folha 2, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Pereira M.R., Almeida C. (1994). Captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas: factores que influenciam a produtividade. In: Resumos das Comunicações do II Congresso Nacional da Água, 2:95-106.
- Pereira M.R., Almeida C. (1995). Caracterização hidráulica de aquíferos fracturados em Trás-os-Montes Oriental. *Revista de Recursos Hídricos, APRH*, 16(3):55-6.
- Pereira M.R., Almeida C. (1997). Influência da posição topográfica e da litologia na produtividade das captações em rochas fracturadas de Trás-os-Montes Oriental (Portugal). In: Yélamos J.G., Villaroya F, (eds.), *Hydrogeology of Hard Rocks, Some Experiences from Iberian Peninsula and Bohemian Massif*, Madrid, p. 67-78.
- Pereira M.R.C. (1992). Importância dos filonetes de quartzo na pesquisa de água subterrânea em rochas cristalinas. *Geolis*, Lisboa, 6(1/2): 46-52.
- Pereira M.R.C. (1999). Hidrogeologia das rochas fracturadas da Terra Quente Transmontana. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 299 p. (Tese de Doutoramento).
- Plasencia N., Carvalho J.M., Cavaco T. (2015). Groundwater monitoring impacts of deep excavations: hydrogeology in the Venda Nova repowering schemes (MW Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 73:2981-2995.
- Portugal Ferreira M., Oliveira A.S., Trota A.N. (1992). Chaves geothermal pole: geological survey – I and II. Joule I Program, DGXII, CEE. UTAD, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. (Internal Report).

- Portugal Ferreira M., Carvalho J.M., Mendonça J.L. (1981). As nascentes de águas minerais do Maciço Hespérico: tipologia das estruturas condicionantes e hidrogeoquimismo. In: Resumos das Comunicações do II Encontro Nacional de Geociências, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Portugal Ferreira M., Carvalho J.M., Mendonça J.L. (1982). Águas termo-minerais de Chaves (Trás-os-Montes, NE Portugal). In: Resumos da III Semana de Hidrogeologia, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Portugal Ferreira M., Carvalho J.M., Mendonça J.L. (1984). Águas minerais na Zona Centro-Ibérica (Sector de Portugal): metodologia, tipologias. In: Resumos do I Congresso Espanhol de Geología, Tomo IV, Asociación Española de Geólogos, Madrid.
- Portugal Ferreira M., Oliveira, A.S., Trota, A.N. (2003). Termas de Chaves: I – as bases tectónicas e litoestratigráficas para a modelação física e química do sistema hidrotermal. In: Portugal Ferreira M., (coord.), A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: Recursos Geológicos e Formação. Volume de Homenagem ao Prof. Doutor Coteló Neiva, Imprensa da Universidade, Série Investigação, Coimbra. 2:277-294.
- Rego Lima J.M. (1892). Reconhecimento geo-hidrológico de Chaves. Imprensa Nacional, Lisboa, 57 p.
- Represas P.M.M. (2009) Inversão conjunta de dados de gravimetria e resistividade. Universidade de Lisboa, Lisboa, 204 p. (Tese de Doutoramento).
- Represas P., Monteiro Santos F.A., Ribeiro J., Ribeiro J.A., Almeida E.P., Gonçalves R., Moreira M., Mendes-Victor L.A. (2013). Interpretation of gravity data to delineate structural features connected to low-temperature geothermal resources at Northeastern Portugal. *Journal of Applied Geophysics* 92:30–38.
- Ribeiro A. (1974). Contribution à l'étude tectonique de Trás-os-Montes Oriental. *Mémoires dos Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 24:1-168.
- Ribeiro A. (1984). Néotectonique du Portugal. In: Livro de Homenagem a Orlando Ribeiro. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, 1:173-182.
- Ribeiro A., Antunes M.T., Ferreira M.P., Rocha R.B., Soares A.F., Zbyszewski G., Almeida F.M., Carvalho D., Monteiro J.H. (1979). Introduction à la géologie générale du Portugal. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 114 p.
- Ribeiro A., Cramez C., Rebelo J.A. (1964). Sur la structure de Trás-Os-Montes (Nord-Est du Portugal). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 258:263-265.
- Ribeiro A., Kullberg M.C., Kullberg J.C., Manuppella G., Phipps S. (1990). A review of Alpine tectonics in Portugal: foreland detachment in basement and cover rocks. *Tectonophysics*, 184:357-366.
- Ribeiro A., Moitinho de Almeida M. (1981). Geotermia de baixa entalpia em Portugal Continental. *Geonovas*, Revista da Associação Portuguesa de Geólogos, Lisboa, 1(2):60-71.
- Ribeiro A., Munhá J., Dias R., Mateus A., Pereira E., Ribeiro L., Fonseca P.E., Araújo A., Oliveira J.T., Romão J., Chaminé H.I., Coke C., Pedro J. (2007). Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26:TC6009
- Ribeiro O., Lautensach H., Daveau S. (1987). Geografia de Portugal – Vol. I. A posição geográfica e o território. Edições João Sá da Costa, Lisboa, p. 1-334.

- Ribeiro O., Lautensach H., Daveau S. (1988). Geografia de Portugal - Vol II. O ritmo climático e a paisagem. Edições João Sá da Costa, Lisboa, p. 336-623.
- Saaty T.L. (1994). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6):19–43.
- Saaty T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Services Science*, 1(1):83–98.
- Saaty T.L. (2012). Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. 3rd edition, RWS Publications, Pittsburgh, 342 p.
- Schöeller H. (1962). Les eaux souterraines. Masson & Cie, Paris, 642 p.
- Schöeller H. (1967). Qualitative evaluation of groundwater resources. In: *Methods and Techniques of Groundwater Investigation and Development*. Water Resource Series, UNESCO, Paris, 33:44-52.
- Schöeller H. (1982). Sur les eaux thermominérales et leur origine. In: Romariz C. (ed.), 3ª Semana de Hidrogeologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, p. 37-43.
- Seifert H. (1969). Caldas de Moledo. *Boletim de Minas*, 6(1):66-68.
- Seifert H., Vicente, A. (1968). Caldas de Moledo. *Boletim de Minas*, 5(3):226-227.
- Simões Cortez J.A. (1980). Situação das captações das Caldas de Moledo. Relatório para a Junta de Turismo das Caldas de Moledo, Porto. (Relatório Inédito).
- Sondalis (2014). Relatório final de execução do furo CC3 em Chaves. Relatório final para a CMC. Sondalis – Captações de Água, Leiria (Relatório inédito).
- Sterrett R.J. [ed.] (2007). *Groundwater and wells*. 3rd edition, Johnson Screens, A Weatherford Company, New Brighton, 812 p.
- Teixeira C. (1948). A depressão de Chaves: génese e evolução. *Boletim do Museu Mineralógico e Geológico da Universidade de Lisboa*, 2:15-16.
- Teixeira C., Assunção C.T., Coelho A.V.P. (1974). Notícia explicativa da folha 6-B Chaves, Carta geológica de Portugal na escala de 1/50 000. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa. 35 p.
- Teixeira Duarte (1970). Captações de água termo mineral em Moledo. Relatório para a Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Teixeira Duarte Lda., Lisboa. (Relatório Inédito)
- Teixeira J. (2011). Hidrogeomorfologia e sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos. Universidade de Aveiro, Aveiro, 504 p. (Tese de Doutoramento).
- Teixeira J., Chaminé H.I., Carvalho J.M., Pérez-Alberti A., Rocha F. (2013). Hydrogeomorphological mapping as a tool in groundwater exploration. *Journal of Maps*, 9:263–273
- TERMARED (2011). Catálogo de mananciales termales del espacio Sudoe GALICIA/ Catálogo de nascentes termais do espaço Sudoe GALIZA/Catalogue des sources thermales de l'espace Sudoe GALICE. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, 135 p.
- Theis C.V. (1935). The lowering of the piezometric surface and the rate and discharge of a well using ground water storage. *Transactions of the American Geophysical Union*, 16:519-524.
- Tortajada C., Biswas A.K. (2017). Water as a human right. *International Journal of Water Research and Development*, 33:509–511.

- Trota A., Ferreira P., Gomes L., Cabral J., Kallberg P. (2019). Power production estimates from geothermal resources by means of small-size compact Climeon Heat power converters: case studies from Portugal (Sete Cidades, Azores and Longroiva spa, Mainland). *Energies*, 12:2838.
- UNDP (2020). The next frontier: human development and the Anthropocene. Human Development Report 2020, United Nations Development Programme, New York, 397 p.
- Varet J. (1982). Géothermie basse énergie: usage direct de la chaleur. Masson, Paris. 201 p.
- Vaz F.C., Martin-Seijo M., Carneiro S., Tereso J.P. (2015). Waterlogged plant remains from de roman healing spa of *Acquae Flaviae* (Chaves, Portugal): utilitarian objects, timber, fruits and seeds. *Quaternary International*, 404 (Part A):86-103.
- Vergés J., Kullberg J.C., Casas-Sainz, A. *et al.* (2019). An introduction to the Alpine Cycle in Iberia. In: Quesada C., Oliveira J.T. (eds.), *The geology of Iberia: a geodynamic approach – Volume 3: Volume 3: The Alpine Cycle*. Springer, Cham, p. 1-14.
- Zbyszewski, G. (1938). Observations sur un cas d'hydrologie souterraine dans le Nord du Portugal: le bassin de Chaves. *Revue de Géographie Physique et Géologie Dynamique*, 11(3):286-292.

2 capítulo

A Exploração das Águas Minerais Naturais. Sua Gestão e Aplicação

Manuel Antunes da Silva

Email: antunes.silva@superbockgroup.com

Introdução

A Água Mineral Natural é um Bem Dominial do Estado pelo que a sua exploração está sujeita à assinatura de um Contrato de Concessão no qual ficam estabelecidas as condições de exploração, os direitos e as obrigações do titular, Concessionário.

Este Contrato atribui uma área de exploração exclusiva, Área de Concessão, estabelecendo um Plano de Exploração onde são definidas, para cada captação, as suas características e as condições de exploração (caudal máximo, nível hidrodinâmico máximo, características e profundidade de instalação da bomba).

A Legislação aplicável, Lei 54/2015 de 22 de junho e Decreto-Lei 86/1990 de 16 de março, prevê ainda a obrigatoriedade de estabelecer um Perímetro de Proteção que visa a salvaguarda do recurso hidromineral desde a área de recarga do sistema aquífero até à captação/captações.

A gestão deste recurso está obrigatoriamente entregue à Direção Técnica da Exploração (Art.º 30.º, DL 86/90) que será exercida por elemento qualificado, com idoneidade técnica e disponibilidade, reconhecidas pela entidade de Tutela, para o desempenho do cargo.

A gestão e a aplicação/uso de uma Água Mineral Natural dependerão, do seu perfil hidroquímico, e das condições físicas na emergência, pelo que o detalhado conhecimento do recurso, das suas condições de recarga, circulação subterrânea e exurgência, são a base de uma correta e eficiente exploração. A cuidadosa execução do trabalho de prospeção e pesquisa, a definição de um modelo conceptual integrador do máximo de informação disponível, o planeamento pormenorizado da beneficiação de uma exurgência natural ou da construção de uma captação profunda, o correto acompanhamento da execução dos trabalhos de captação, são a base da garantia que as características do recurso se manterão ao longo do período de exploração.

A monitorização do recurso, o acompanhamento da extração e a manutenção das captações concorrem para assegurar que a destabilização imposta ao aquífero pela retirada de Água Mineral Natural tende para um reequilíbrio e nunca para uma sobre-exploração que levaria à não renovação do recurso, à sua adulteração e eventual desaparecimento.

Monitorização do recurso e da exploração

Os recursos que servem de base à produção de **Água Mineral Natural** terão, obrigatoriamente, que apresentar um perfil de qualidade irrepreensível de acordo com a legislação em vigor, no que respeita às suas características Microbiológicas e Físico-Químicas.

A Qualidade exigida na origem poderá ser progressivamente adulterada ao longo da exploração, caso não sejam respeitadas as condições hidrodinâmicas de extração definidas, captação a captação, garantindo a renovação do recurso e o equilíbrio do sistema aquífero.

Deste modo, a **monitorização** assegura que, em cada momento, a disponibilidade de recurso em quantidade e qualidade, está de acordo com o expectável e é produto de um trabalho contínuo de **conhecimento/avaliação hidrogeológica** do sistema, associado a uma correta **gestão da exploração**. Esta gestão, terá que respeitar as condições técnicas expressas no **Plano de Exploração** aprovado pela Tutela, balizada por detalhados dados qualitativos e quantitativos que permitirão aferir, com frequência, a adequabilidade da parametrização da exploração adotada e, eventualmente, atuar sobre as especificações de base adaptando-as às reações do sistema aquífero. A correta **monitorização** deve iniciar-se aquando da execução da captação, sendo a base de uma boa gestão e salvaguarda da disponibilidade de Recurso.

A nível da gestão global do aquífero, considerando o alto nível de qualidade que deve ser posto ao serviço do desenvolvimento e exploração de Águas Minerais Naturais, é absolutamente indispensável o cumprimento rigoroso das regras gerais de gestão de aquíferos e captações, tais como:

- (i) As extrações não devem ultrapassar 70% a 80% dos recursos renováveis;
- (ii) Para captações localizadas em aquíferos confinados, o rebaixamento não deve ser levado abaixo da base da camada confinante;
- (iii) Para captações situadas em aquíferos livres, o rebaixamento não deve exceder 50% a 60% da espessura saturada;
- (iv) A velocidade de entrada de água na captação deve ser respeitada, não excedendo 3 cm/s e os tubos-ralos das captações nunca deverão ficar a descoberto;

- (v) Não deve ser feita sobre bombagem relativamente à capacidade do aquífero e ao dimensionamento da captação;
- (vi) A operação de captação deve prever a colocação da bomba vários metros abaixo do nível dinâmico;
- (vii) Deve ser evitada a bombagem intermitente, ainda que para isso seja necessário instalar capacidade de armazenamento suplementar à superfície;
- (viii) Devem ser monitorizados, sistematicamente: a qualidade da água, os caudais de extração/escoamento e os níveis hidrodinâmicos;
- (ix) As captações, mesmo as abandonadas, devem ser inspecionadas regularmente para verificar o comportamento hidrodinâmico e prevenir riscos de contaminação;
- (x) Devem existir procedimentos de rotina para fazer face a uma qualquer situação de emergência (por exemplo, a existência de, pelo menos, uma captação de reserva).

O cumprimento sistemático destas normas, contribui para a diminuição drástica de ocorrências negativas associadas à qualidade e quantidade de água captada e da sua constância no tempo, princípios básicos inerentes à condição de água mineral natural.

A efetivação da monitorização hidrodinâmica, como instrumento de Gestão de uma Exploração de Água Mineral Natural, pressupõe uma definição prévia de parâmetros como: o Caudal de Exploração (CE) e o Nível Hidrodinâmico de Exploração (NHD) máximo a atingir. Estas parametrizações, inicialmente estabelecidas, aquando do estudo da captação e no arranque da atividade de extração, deverão ser validadas e/ou ajustadas, ao longo de toda a sua vida útil.

Uma captação só poderá ser dada como concluída, quando for conhecido o formato de exploração a adotar. Para tal, é imprescindível a realização de ensaios de bombagem, após as fases de: conclusão dos trabalhos de furação, entubamento e desenvolvimento. Com base na informação obtida durante da furação (tais como: tempos de furação, litologias atravessadas, produtividades obtidas, etc) e de ensaios complementares (ex: diagrfias, ...) são definidas as condições de efetivação dos ensaios de bombagem, escalonado e final.

O **caudal de exploração**, de uma captação de água mineral natural, constitui o caudal que é possível extrair tendo em conta constrangimentos técnicos, económicos e institucionais. Não corresponde, por isso, ao caudal máximo captável de uma obra ou aquífero hidromineral, mas ao que as condições hidrogeológicas, a captação, o enquadramento ambiental e as interações com

outros aquíferos permitem. Finalmente, para ser efetivo, o caudal de exploração é consagrado, legalmente, no Plano de Exploração, aprovado pela Tutela.

A fixação do caudal de exploração de uma captação de água mineral natural não corresponde à simples determinação do caudal crítico com um ensaio escalonado. Este caudal crítico será o limite superior fictício, o valor máximo, eventualmente aceitável. Corresponderá ao caudal de exploração se não houver sobreposição de outras limitações tais como:

- Interferências com outras captações da mesma concessão ou de concessões vizinhas;
- Interferências com aquíferos não minerais ou águas superficiais e mesmo eventuais imposições da Tutela.

O **caudal seguro** de um aquífero hidromineral pode ser encarado de forma semelhante ao de um aquífero normal. Corresponde ao caudal que pode ser **extraído** de um dado aquífero hidromineral, **sem indução de efeitos ambientais negativos**.

Na determinação do caudal seguro terá de atender-se às limitações que são impostas pela manutenção absoluta da composição físico-química e microbiológica da água, à tipologia dos reservatórios geológicos, às variações temporais e espaciais do regime hidrológico e ao conhecimento do circuito hidromineral. O caudal seguro pode ainda ser função da metodologia e das estratégias de exploração.

Quanto às Águas Minerais Naturais de origem profunda ou circuito hidráulico longo, as dificuldades para determinação dos recursos são maiores pois em muitos casos é grande a indefinição relativa ao seu modelo conceptual. As áreas de recarga são generalizadamente desconhecidas bem como o tempo de residência das águas, pelo que se deve recorrer à utilização de metodologias que permitam caracterizar estes dois itens de grande importância na modelização da circulação em profundidade (ex: determinação de alguns isótopos presentes na composição das águas).

Pode concluir-se que a avaliação dos recursos em aquíferos hidrominerais não é tarefa fácil podendo ser definida como o volume de água naturalmente ocorrente que pode ser extraído de um aquífero ou sistema aquífero atendendo a condicionamentos económicos e legais, sem alteração das qualidades intrínsecas da água ou indução de danos ambientais. Com base nesse conceito foi proposta por alguns autores, uma adaptação da metodologia de McKelvey modificada, fundamentada em resultados de ensaios de caudal para avaliação dos recursos geotérmicos de Trás-os-Montes (a proposta foi formulada em termos hidrogeológicos puros, e considera que é a disponi-

bilidade de fluido hidromineral que efetivamente condiciona a quantidade de calor).

O Plano de Exploração, tal como previsto no Art.º 26.º do Decreto-Lei 86/90, deve incluir “*a memória descritiva sobre as características do recurso e a descrição pormenorizada dos processos de exploração e a indicação dos caudais*”. Trata-se, portanto, de um documento que exige um conhecimento adequado do recurso de forma a justificar as metodologias de exploração propostas. Não pode, por isso, ser elaborado sem que o Diretor Técnico de Exploração tenha ideias claras sobre a disponibilidade do recurso hidromineral e as metodologias para o seu desenvolvimento e proteção.

O **Nível Hidrodinâmico de Exploração** (NHD) é o nível estabilizado da água de um furo, medido a partir do seu topo, após várias horas de bombeamento em caudal constante.

O acompanhamento destes parâmetros depende de vários fatores associados ao formato de exploração em uso.

Nas captações mais recentes a Tutela obriga à instalação de **sistemas de monitorização hidrodinâmica**, que permitem a leitura direta de dados referentes a este parâmetro. Geralmente constam de um caudalímetro, instalado na adução da água à armazenagem e de uma sonda de pressão que, submersa na própria captação, permite determinar a distância entre o seu topo e o nível da água. Estes sensores podem ser integrados em sistemas de armazenamento/processamento de informação possibilitando maior frequência na aquisição de dados, assegurando uma periodicidade pré-definida de acordo com a especificidade da exploração e do sistema aquífero, evitando a intervenção humana nas captações e, eventualmente, poderão emitir alarmes em circunstâncias potencialmente anómalas (tais como: avaria de bomba, deteção de valores não permitidos nos parâmetros monitorizados, entre outros...).

Estes equipamentos de aquisição de informação, terão que ser objeto de calibração periódica e a sua sensibilidade de leitura deve estar de acordo com as características da exploração.

Nos casos em que tais equipamentos não estejam instalados, a supervisão destes parâmetros não poderá ser descurada. A frequência e as metodologias de medição a estabelecer, dependerão sempre do modelo hidrogeológico conceptual subjacente, do tipo de captação (vertical, horizontal, bombada, artesiana...), da exploração (contínua ou descontínua) e do caudal (constante ou variável), devendo ser determinado um padrão que assegure o acompanhamento adequado das variações.

Na **Figura 1** apresenta-se um exemplo de uma instalação, com equipamentos para aquisição de valores do CE e do NHD. Neste exemplo, encontram-se também instalados sensores de pH, Condutividade Elétrica e Temperatura da Água.

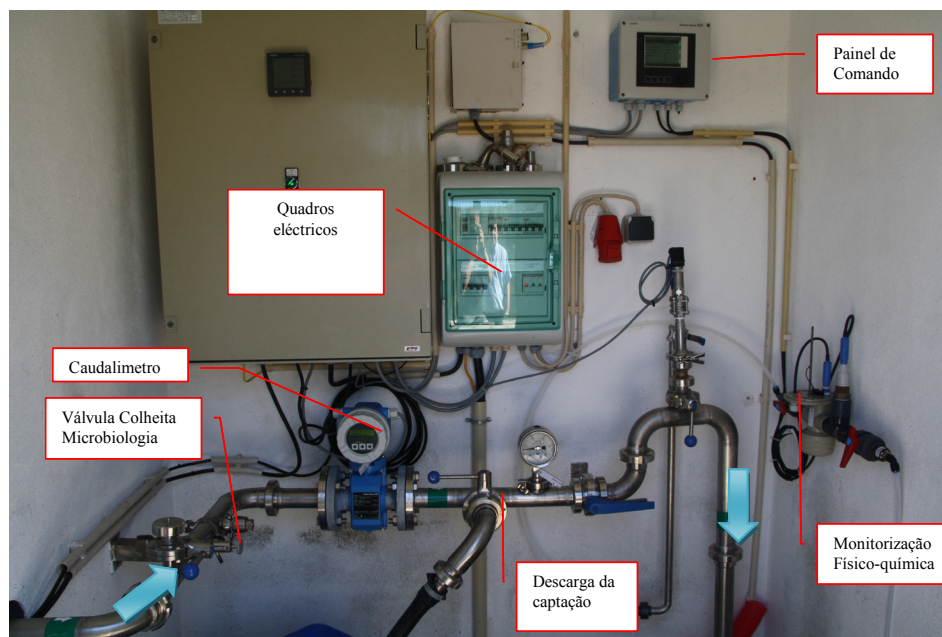


Figura 1: Exemplo de uma sala de captação equipada com sistema de monitorização.

A **ausência de microrganismos patogénicos e/ou poluentes** é uma das características de base à classificação de um recurso como Água Mineral Natural, que tem que ser mantida ao longo da exploração, **não sendo permitida qualquer forma de desinfeção** ao recurso.

A informação adquirida na **monitorização microbiológica**, sempre que sejam respeitadas as regras da boa prática na colheita de amostras e que a entidade que executa as determinações seja qualificada para o fazer, permite aferir das condições higio-sanitárias da estrutura de captação e detetar indícios de situações anómalas que, a manterem-se no tempo, poderão levar à impossibilidade de utilização do recurso captado em determinado local.

Menos comuns, mas com maior dificuldade de resolução, são os casos em que a classificação de uma amostra de água como imprópria reflete a afeção de todo o sistema aquífero, configurando a possibilidade de uma contaminação do recurso na origem.

Os resultados dos exames laboratoriais de qualquer amostra de água, são apenas representativos da água naquele momento e naquele ponto específico. A contaminação quando surge é, usualmente, intermitente e pode não ser revelada pelo exame de uma única amostra. O relatório, baseado numa única amostragem, pode apenas indicar que na altura do exame, os organismos em estudo (bactérias indicadoras de contaminação fecal ou indicadores da qualidade geral da água) se desenvolveram ou não, em determinadas condições laboratoriais, a partir da amostra de água. As técnicas de amostragem e transporte das amostras podem influenciar também os resultados, sendo nestes processos fundamental o uso das boas práticas.

Esta vertente da monitorização microbiológica encontra-se regulada por legislação específica e é objeto de programas anuais, estabelecidos pela Tutela.

A **monitorização** destes recursos é definida através de uma caracterização **Físico-Química, obrigatoriamente estável**, dentro de limites considerados aceitáveis, atendendo às flutuações naturais existentes.

Os parâmetros de monitorização mais comuns, na operação de extração, são: o pH, a condutividade e a temperatura da água na emergência.

A aquisição destes valores pode ser feita:

- a partir da colheita, no local da amostragem ou no laboratório;
- com recurso a instrumentação instalada na captação (ver Figura 1).

A seleção dos parâmetros a analisar deverá variar consoante a composição química do recurso e os riscos a que se encontra sujeita.

A **gestão da exploração** de uma Água Mineral Natural tem que **assegurar a estabilidade e a renovação do recurso**. A sua composição é fruto das condições de circulação subterrânea a que a água é sujeita (duração, pressão, temperatura e natureza das formações rochosas atravessadas), desde o local de recarga do sistema aquífero até ao ponto de extração. Qualquer alteração que se verifique no quimismo, refletirá sempre alguma modificação das condições de equilíbrio, na formação do recurso. A sobre-exploração deste, é uma das causas mais comuns para este tipo de alterações.

Desde 1986, a Tutela estabeleceu programas analíticos anuais de acompanhamento da evolução destes parâmetros captação a captação, constituídos por um conjunto de amostragens para determinação laboratorial dos constituintes de cada recurso. Esta é uma base de conhecimento fundamental para a avaliação dos sistemas aquíferos e da sua reação aos formatos de exploração em curso.

Tratando-se de recursos cuja variação físico-química será quase nula ao longo do tempo, a monitorização periódica estabelecida pela Tutela revela-se

uma ferramenta muito útil na avaliação do impacto da exploração no sistema aquífero e na evolução global do recurso. No entanto, o acompanhamento frequente, com a determinação expedita, de algumas das suas características, permite a deteção atempada de situações indesejáveis que poderão levar à degenerescência do recurso e, no limite, à sua desqualificação como Água Mineral Natural.

Manutenção das captações

Como todo o equipamento, as captações funcionarão tanto melhor quanto mais:

- Detalhado for o seu projeto de conceção (devidamente fundamentado em estudo hidrogeológico);
- Competente for a sua construção (respeitando o projeto, com acompanhamento técnico habilitado e definição devidamente fundamentada das condições de exploração);
- Correta e adequada for a sua exploração (acatando as condições definidas);
- Eficientes forem as ações de manutenção.

As captações são obras de engenharia, construídas de acordo com normas estabelecidas, com o objetivo de intersetar origens de água, em harmonia com o ambiente geológico onde se inserem e com o recurso que captam, necessitando, como qualquer equipamento, de manutenção, sendo esta de extrema importância para que a qualidade do recurso se mantenha, assim como para prevenir a diminuição da sua capacidade produtiva.

Os problemas de produtividade das captações podem advir do seu envelhecimento prematuro causado por uma conceção incorreta ou exploração/manutenção deficiente

O tipo de utilização a que uma captação de Águas Minerais Naturais está sujeita impõe, em muitos dos casos, uma exploração de 24 horas diárias, 365 dias por ano, de modo a assegurar a disponibilidade de recurso e a garantir a sua estabilidade duradoura. Este facto leva a que seja exigido à captação e ao sistema de bombagem um esforço permanente. O impacto no aquífero é obviado pela correta exploração do recurso tendo em consideração as características da água e do aquífero em que a captação está inserida. O desgaste dos equipamentos (captação e sistema de bombagem) tem que ter uma abordagem apropriada que permita a sua laboração ininterrupta e previna situações que potencialmente conduzam a paragens e/ou a interferências negativas no aquífero.

O correto funcionamento de uma captação deve ser continuamente avaliado de modo a garantir que o aparecimento de problemas que reduzam a disponibilidade do recurso, venham a aumentar os custos de exploração ou mesmo a impossibilitar a sua utilização, sejam atempadamente identificados e, na medida possível, debelados.

Alguns destes problemas poderão ocorrer devido a variações sazonais do próprio aquífero.

A monitorização da exploração é fundamental na deteção de variações:

- Anómalas de caudal (aumentos ou diminuições);
- Inesperadas do nível hidrodinâmico na captação (captações profundas);
- Na qualidade do recurso extraído (físico-química e bacteriologia);
- Nas condições de operação dos equipamentos de extração ou de adução.

A boa interpretação da variação destes parâmetros permitirá aferir do correto funcionamento da extração em cada momento.

Consideram-se dois tipos de parâmetros que, variando, podem alertar para a potencial existência de problemas no funcionamento da extração. Os hidrodinâmicos (do aquífero e da captação) e os qualitativos (do recurso).

A **alteração anómala do caudal de exploração, do nível da água na captação** (no caso das captações profundas), das **características do recurso** (físico-químicas ou microbiológicas) ou de alguns dos **parâmetros do equipamento de bombagem** (pressão, consumo de energia, etc.) deve ser considerada como o primeiro **sinal de alerta** para a ocorrência de algum processo irregular.

A deteção de desvios em qualquer dos parâmetros referidos deve despoletar ações de verificação dos mecanismos de monitorização, despiste de leituras incorretas e resolução de situações indesejadas.

A variação inesperada do caudal de exploração em emergências naturais, estando o sistema de aproveitamento devidamente instalado, refletirá, em princípio, a sazonalidade do sistema, no entanto em captações que dependam de sistemas de extração este parâmetro pode apresentar alterações inesperadas devidas:

- À ação humana, por alteração do *set-point* do equipamento de controlo ou do mecanismo que determina o caudal de extração;
- A avaria do equipamento de bombagem, por problema elétrico;
- Perda de eficiência do equipamento de bombagem por colmatção ou desgaste natural;
- A deficiência na captação.

O aproveitamento a partir de uma emergência natural encontra-se dependente das condições próprias do sistema pelo que qualquer variação encontrada no quimismo ou microbismo da água refletirá as condições naturais do sistema aquífero ou as que lhe sejam impostas por influência antrópica. As captações construídas em profundidade representam uma interseção pontual do aquífero. O seu caudal de extração poderá ser superior ao fluxo natural do sistema donde, a variação qualitativa do recurso, eventualmente, refletirá uma situação de sobre-exploração na qual as condições de formação que levaram à constituição do recurso foram alteradas. Esta razão leva, geralmente, à alteração progressiva, ao longo do tempo, das características do recurso.

No entanto, o próprio equipamento (captação e sistema de bombagem) pode, devido às suas características, provocar alterações no perfil qualitativo da água captada.

A **modificação do aspeto visual do recurso** captado, com o aparecimento de turvação, partículas em suspensão e/ou sedimentos está, comumente relacionada com alterações na captação.

A turvação (Figura 2) e as partículas em suspensão podem dever-se à alteração do quimismo da água por precipitação ou pela formação de coloides. Estes fenómenos resultam da alteração do equilíbrio físico-químico do recurso levando ao desenvolvimento de formas não dissolvidas de alguns elementos. O surgimento de partículas está invariavelmente associado ao revestimento da captação. Pode dever-se:

- Ao deficiente dimensionamento das zonas de ralos (Figura 3), que permite a entrada na captação de materiais provenientes da litologia envolvente, subsequentemente arrastados pela água bombeada;
- Ao desenvolvimento de aberturas no revestimento por fratura/corrosão;
- À deficiente ligação entre os troços do revestimento.

A manutenção deve atuar preventiva e corretivamente.

Dependerá da conjugação destes dois formatos: a garantia contínua de laboração e de disponibilidade de recurso.

Não havendo duas captações com comportamentos iguais, o plano de ações a empreender terá que ser devidamente ajustado às características da captação, do aquífero e ao perfil químico da água.

Pretende-se evitar situações de paragem parcial ou total da operação, com todos os custos que tais cenários poderão acarretar.

O estabelecimento de um conjunto de tarefas de avaliação de fácil execução, direcionadas para a deteção atempada das situações de alarme e dimensio-



Figura 2: Exemplo de turvação de uma amostra de água.

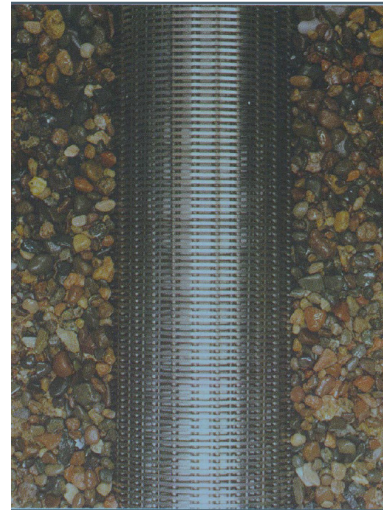


Figura 3: Exemplo de uma zona de ralo do revestimento de uma captação bem desenvolvida.

nadas para o sistema de captação em causa, permitirá assegurar a diminuição do aparecimento de perturbações graves (Figura 4) à normal exploração, programando atempadamente intervenções sobre os equipamentos.

Cada uma das ações que em seguida se descrevem (Tabela 1) devem ser desenvolvidas individualmente em cada captação sendo a periodicidade referida indicativa já que a mesma deve ser estabelecida com base num histórico de avaliações e intervenções, em constante atualização.

Tabela 1: Ações de avaliação do estado de uma captação

			Periodicidade
Avaliação	Visual	Instalação de superfície	Semanal
		Camara submersa	Quinquenal
	Hidráulica	Perda de Carga	Mensal
		Caudal de exploração	Contínuo
		Nível Hidrodinâmico	Contínuo
	Estrutural	Fundo da Captação	Quinquenal
		Maciço filtrante	Quinquenal
	Elétrica	Consumo	Semestral
		Tensão	Semestral



Figura 4: Exemplo de uma zona de ralos completamente colmatada por incrustação com minerais

Em função dos resultados da avaliação dever-se-á decidir qual a melhor forma de intervenção, acionando a que mais se adequa (Tabela 2).

Tabela 2: Intervenções de reabilitação de captações

			Periodicidade
Intervenção	Limpeza	Mecânica	Decenal
		Química	Decenal
	Retificação de condições	Cabeça da captação	Na sequência de avaliação não conforme
	Substituição	Bomba	
		Coluna de elevação	
		Captação	
	Regeneração	Tratamento Mecânico	
		Tratamento Químico	
	Reabilitação	Reencamisamento	

No caso de uma sondagem transformada em captação a decisão de intervenção que advenha de avaliações hidráulicas ou estruturais deverá ter como suporte o visionamento (endoscopia) da total extensão da coluna de revestimento da captação usando equipamento adequado (Figuras 5 e 6). Este processo consiste na filmagem a cores, do interior de uma captação de água subterrânea, em tempo real, podendo-se proceder ao registo simultâneo em suporte digital, sendo de fundamental importância na deteção de eventuais problemas ou patologias que afetem a eficiência de uma captação.



Figura 5: Equipamento para visualização do interior de uma captação

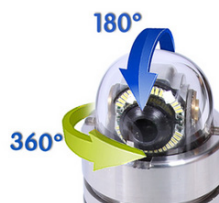


Figura 6: Modelo de câmara para inspeção visual de captações

A metodologia de execução de uma endoscopia consiste em introduzir a câmara de filmagem no interior do furo procedendo-se numa fase inicial à aferição do controlo da profundidade que é registado no monitor e na gravação. Quando se detetam aspetos de particular interesse na tubagem de revestimento, procede-se à sua filmagem lateral o que permite obter imagens da parede da tubagem de revestimento com a orientação adequada para análise.

A endoscopia deverá ser complementada com um relatório, o qual deverá incluir a gravação completa, em formato digital, das imagens recolhidas nas filmagens.

Neste relatório deverão constar, além das características dos equipamentos e da metodologia aplicada, um levantamento exaustivo sobre a estrutura da captação, uma análise comparativa deste levantamento com o diagrama construtivo final da captação fornecido pelo empreiteiro, a descrição do estado de limpeza da captação e respetivas profundidades, e a indicação e descrição detalhada de eventuais patologias identificadas.

Relativamente às formas de intervenção/manutenção, parte incidem sobre o equipamento de bombagem e cabeça da captação enquanto as restantes (limpeza, regeneração e reabilitação) constituem ações diretas sobre a estrutura da captação propriamente dita, sendo estas últimas traduzidas na aplicação de técnicas específicas (hidromecânicas, químicas e/ou de ondas de choque), de limpeza/desenvolvimento, com o objetivo de assegurar a re-

toma do caudal específico e reduzir as perdas de carga criadas na zona de influência e de entrada de água na captação.

Os métodos hidromecânicos consistem em operações de injeção de ar comprimido, de água sob pressão, de extração de água por aspiração ou por bombagem, ou operações de escovagem. O desenvolvimento e limpeza da captação visa basicamente desentupir os sectores parcial, ou totalmente colmatados, no sentido de se obter com a desobstrução, um maior afluxo de água ao furo e, conseqüentemente, incrementar a sua eficiência e o seu caudal específico. Com este objetivo cria-se uma alternância cíclica do sentido do fluxo da água, do interior do furo para o seu exterior e do exterior do furo para o seu interior. Essas variações acentuadas de gradientes hidráulicos promovem a mobilização das obstruções para o interior do furo e a sua remoção para o exterior.

Dependendo da avaliação feita à causa de perda de eficiência da captação, as técnicas hidromecânicas podem ser complementadas com a aplicação de técnicas químicas, cujo objetivo é o de atuar sobre as incrustações e/ou depósitos que existam com o propósito de desagregá-las, dispersá-las ou desfloculá-las de modo a facilitar a sua remoção. Após a atuação química torna-se necessário aplicar de novo as técnicas hidromecânicas para promover a mobilização e a extração dos resíduos acumulados.

Posteriormente à limpeza deve ser realizada uma endoscopia para se avaliar o grau de eficiência da intervenção. Com base no seu resultado poderá verificar-se a necessidade de repetição das operações de desobstrução e limpeza nalguns sectores ou da aplicação de bombagem com obturadores simples ou duplos, nalguns tubos ralos, a profundidades específicas.

Devido à grande quantidade de materiais e produtos introduzidos no interior do furo durante os processos de limpeza/desenvolvimento deve proceder-se a uma operação de desinfecção que consiste na injeção, para o interior da captação, a diferentes profundidades, de uma solução bactericida com uma concentração conhecida, a qual deverá permanecer no interior do furo durante um determinado período. O furo é posteriormente bombado, ou aspirado da base para o topo, até que deixe de ser detetado qualquer valor residual do bactericida aplicado.

Convém referir que não existem produtos milagrosos no mercado que erradiquem a contaminação por artes mágicas como muitos técnicos de vendas tentam convencer alguns donos de obra. Haverá que distinguir as situações entre uma contaminação microbiológica normalmente associada aos trabalhos de execução da captação, que na maioria dos casos é erradicada com uma ligeira desinfecção da captação, e entre uma contaminação do próprio

aquífero, cuja gravidade varia caso a caso, mas que no cenário mais desfavorável poderá não ter solução.

A desinfecção da captação deve ter um carácter pontual decorrente da contaminação cruzada associada aos trabalhos construtivos empreendidos, não devendo ser realizada de forma periódica ou sistemática, o que só poderá denunciar problemas de contaminação do aquífero ou deficiente isolamento do furo, apenas contribuindo para a degradação dos materiais da captação.

Proteção do recurso

A determinação, delimitação e fixação de perímetros de proteção a aquíferos e respetivas captações, constituem atos de natureza complexa que requerem estudos apurados e experiência comprovada produzindo impactos importantes nas explorações a que se destinam. Estes mecanismos de defesa e a metodologia que preside à sua determinação/fixação devem aplicar-se em sentido lato a todos os corpos de água destinada ao consumo e atividades humanas. As Águas Minerais naturais representam um caso particular de todos os outros recursos hidrogeológicos e, mesmo, hídricos. Na realidade, o conjunto legislativo publicado em Portugal, a 16 de março de 1990, sobre recursos geológicos, para os quais regulamentava a pesquisa, definição, defesa e exploração, consignava já a figura de perímetros de proteção para aqueles tipos de água. Foi este conjunto legislativo que transpôs pela primeira vez, de forma moderna, aquela figura de defesa da água em Portugal e lhes conferiu mecanismos de aplicação eficazes, ainda que, mercê das competências dos diplomas publicados, apenas limitasse a sua aplicação àquele tipo de águas.

À parte dos aspetos sanitários e imediatamente economicistas que podem resultar da sua fixação e aplicação, pois atualmente, a conservação da qualidade da água, constitui um ato de grande e crescente relevância económica, é necessário ter em conta as servidões administrativas decorrentes da fixação de perímetros, com as suas diversas zonas de atividade condicionada, vêm acarretar, impondo consequências de ordenamento do território, cujas implicações económicas atuam em conjunto com as anteriores, embora nem sempre no mesmo sentido.

É incontestável que se devam definir os perímetros suficientes para a proteção de um determinado aquífero e dos seus meios de exploração, isto é, as suas zonas de proteção não devem ter dimensões demasiado pequenas, sob pena de perderem a eficácia, nem ser exageradamente grandes, acarretando um cortejo de servidões administrativas com consequências desastrosas no desenvolvimento do território, podendo, inclusive, afetar a economia local.

É também consensual que a justeza e adequação destas dimensões serão tanto maiores quanto mais completo for o conhecimento científico e técnico de um aquífero e das suas captações a defender, nomeadamente tendo por base o modelo conceptual do sistema aquífero.

Os perímetros de proteção, tal como se encontram regulamentados nos países desenvolvidos, compreendem, de modo geral, três ou quatro zonas ou áreas. Nas zonas próximas ou imediatas (tal como refere a Lei Portuguesa) são praticamente proibidas todas as atividades antrópicas; nas zonas sucessivamente mais alargadas, as condicionantes e restrições tornam-se mais brandas e permissivas.

Regra geral, pode dizer-se que as zonas imediatas e intermédias dos perímetros de proteção devem defender a captação e o sistema aquífero aflorante das agressões bacteriológicas, virais e químicas e proporcionar um período de tempo suficiente para se organizarem todos os meios de defesa do recurso, antes de este ou das suas captações serem atingidos por um agente poluidor. Do ponto de vista científico, técnico e, mesmo, legal, nada impedirá a delimitação de várias zonas satélites, imediatas, intermédias ou alargadas, para o perímetro de um mesmo sistema aquífero e para a sua exploração. Em teoria também, as zonas de proteção afastadas (ou alargadas, como são definidas na Lei Portuguesa) devem incluir toda a área (ou áreas) de alimentação do sistema aquífero explorado; isto deve acontecer, porém, apenas nas zonas cársticas ou fissuradas, como é o caso num grande número de ocorrências de de Águas Minerais Naturais em Portugal.

Finalmente, não será demais lembrar a necessária colaboração entre os geólogos, os engenheiros de minas e os responsáveis ambientais e do ordenamento do território, para levar a cabo a delimitação e fixação de perímetros, de modo a que estes consigam dar resposta aos fins em vista, ou seja, uma proteção necessária e suficiente que maximize a defesa e valorização do recurso hidrogeológico e da sua exploração, permitindo o desenvolvimento da região onde este ocorre, com o fim de trazer benefícios a um património comum.

Os perímetros de proteção são formados ou integrados por áreas (ou zonas) cujas definições e condicionantes devem ter em vista a defesa quantitativa e qualitativa dos recursos hidrogeológicos (ou mesmo hídricos) e da sua exploração.

Para além dos conceitos teóricos e técnicos que devem presidir à sua delimitação e fixação, as diferentes áreas dos perímetros de proteção devem permitir a aplicação atempada de medidas de carácter logístico, paliativas ou corretivas, caso se verifique um acidente dentro de uma delas, ou res-

tringir de tal modo as atividades (em áreas próximas do recurso) de forma a que a ocorrência de tais acidentes tenha uma fraquíssima probabilidade de surgir, já que a intervenção corretiva não será passível de se desenvolver a tempo.

Pode recorrer-se a vários tipos de raciocínios no âmbito geral da hidrogeologia para estabelecer os critérios de base para a delimitação das zonas que constituirão os perímetros de proteção. Pode assim considerar-se:

- O poder depurador ou protetor do recobrimento e das rochas constituintes do aquífero
- Rebaixamento provocado
- Tempo de transporte
- Distância
- Direção dos fluxos no aquífero

Com a fixação de Perímetros de Proteção podem conseguir-se meios de defesa e efeitos de diversa ordem; isto significa que os objetivos a atingir podem ser vários e que dependem de fatores tão variados como o grau de conhecimentos sobre a zona, considerações relativas ao tipo de ordenamento territorial, vulnerabilidade reconhecida e causas poluentes atuantes ou potenciais. Assim podemos ter:

- a) A delimitação de zonas que permitam um **tempo de intervenção** suficiente para que a captação não seja afetada por poluição. O critério de definição principal será o tempo de transporte.
- b) A delimitação de zonas através das quais a **concentração de poluentes** ficará **atenuada** antes de atingir a captação. O critério de definição principal deverá basear-se no poder depurador e protetor (adsorção, filtração, biodegradação, diluição, período de vida dos microrganismos, etc.).
- c) A definição de um campo protetor **em redor da zona de captação** em grande parte da zona de chamada de águas. O critério de definição principal será o **rebaixamento e zona de chamada**.
- d) Proteção de toda a **zona de alimentação do sistema de captações**. O critério de definição principal tem por base os limites de fluxo ou da bacia de receção. Pode afetar a origem a fenómenos de sobre proteção.

Considerando tudo o que foi acima referido será fácil de entender que a definição do Perímetro de Proteção em cada Concessão de Água Mineral Natural terá a sua geometria própria dependente de todos os fatores descritos.

Nas imagens que se seguem (Figuras 7 a 10) encontram-se alguns dos perímetros implementados nas Concessões Hidrominerais da VMPS – Águas e Turismo, S.A. e da UNICER Águas, S.A.

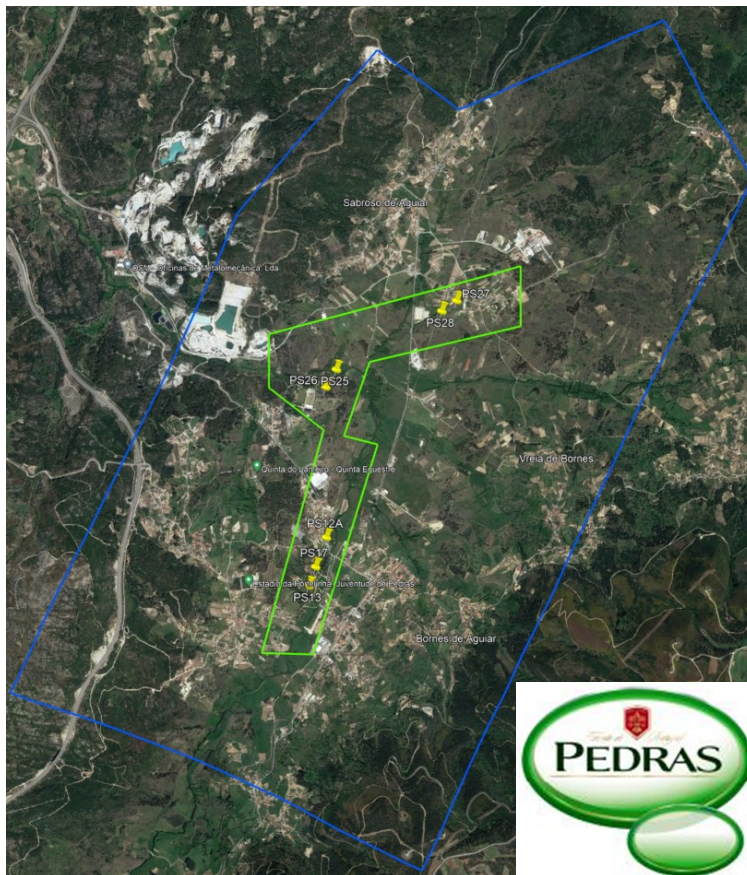


Figura 7: Perímetro de Proteção da Concessão Hidromineral de Pedras Salgadas

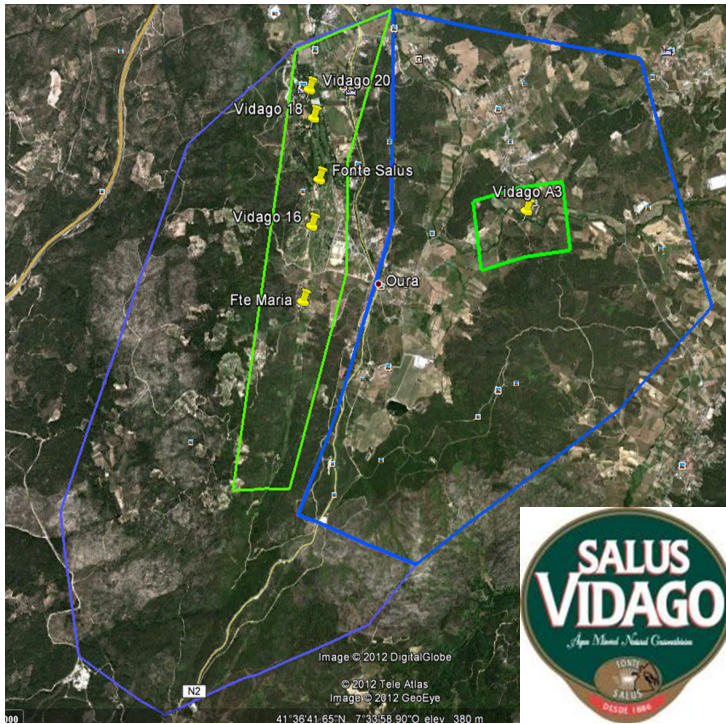


Figura 8: Perímetro de Proteção das Concessões Hidrominerais de Vidago e Areal

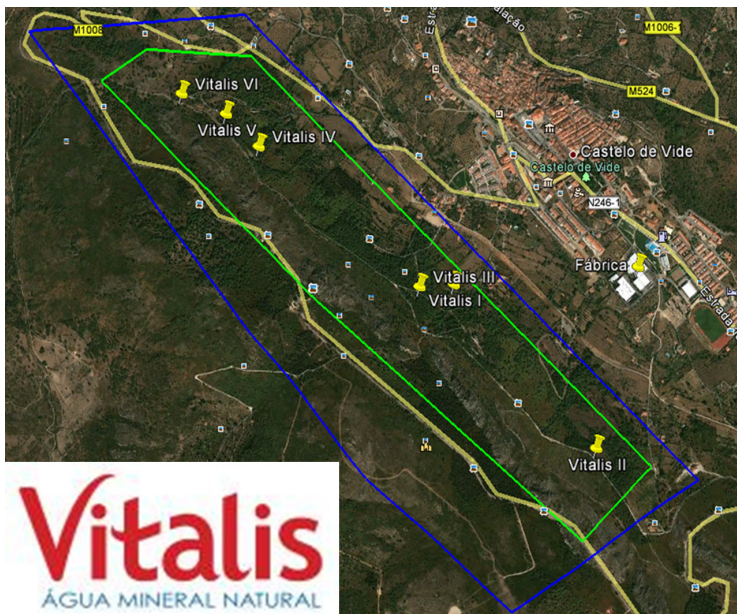


Figura 9: Perímetro de Proteção da Concessão Hidromineral de Ribeirinho e Fazenda do Arco (Castelo de Vide)

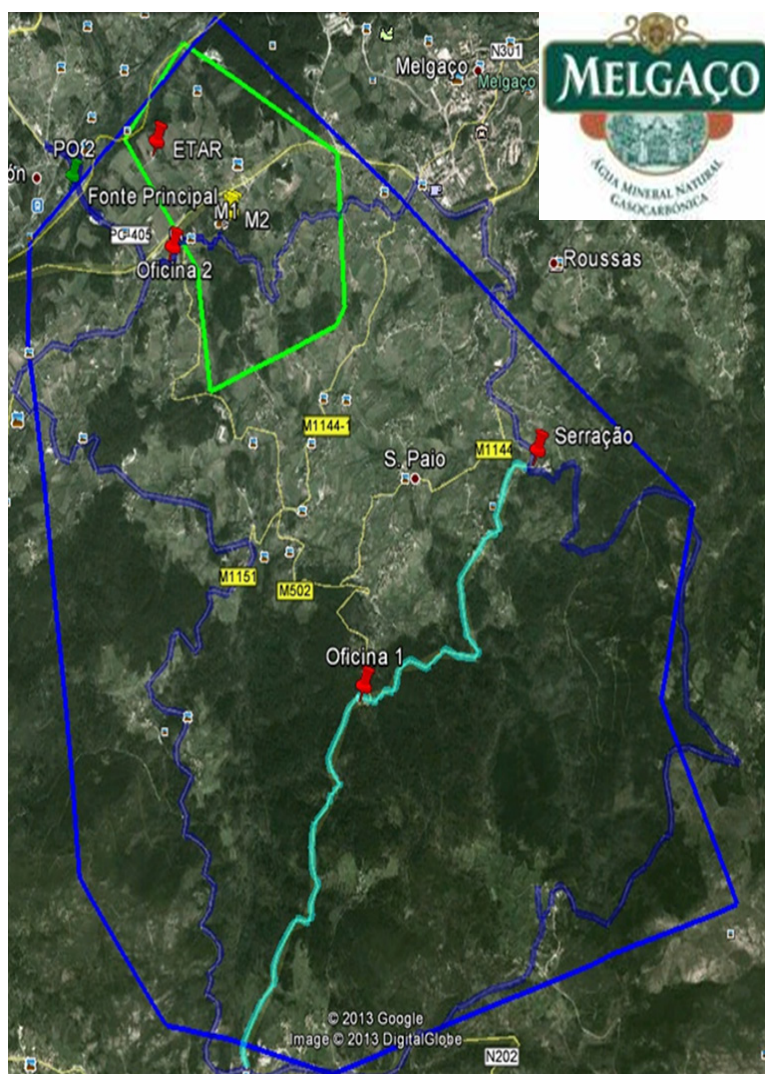


Figura 10: Perímetro de Proteção da Concessão Hidromineral de Melgaço

Aplicações da água mineral natural

A utilização de cada Água Mineral Natural estará sempre dependente das suas características físico-químicas e do volume disponível para exploração, podendo ser usada para Engarrafamento, Termalismo e Geotermia. No **engarrafamento**, a Água Mineral Natural captada é aduzida para uma unidade industrial onde se mantém armazenada até ao momento de ser acondicionada em vasilhas de diferentes volumes.

Em todo este processo não é permitido qualquer tipo de tratamento à Água Mineral Natural, sendo apenas autorizada a utilização de processos físicos, que não alterem as suas características físico químicas e microbismo natural. A Água Mineral Natural é disponibilizada para consumo tal como é captada. O **termalismo** faz uso do potencial terapêutico da Água Mineral Natural no ponto de captação por ingestão ou em instalações apropriadas (Balneário Termal, SPA Termal) com banhos, injeções, inalacões, pulverizações, associadas a práticas complementares como as massagens.

Neste âmbito a Água Mineral Natural tem que ter reconhecidas valências terapêuticas que irão definir o tipo de procedimentos médicos a serem prescritos pelo médico termal aos aquistas. Existem casos em que esta aplicação (termalismo) é concomitante com o engarrafamento.

A **geotermia** é aplicável a recursos com elevada temperatura de captação. Este calor pode ser aproveitado para a produção de energia elétrica, ou utilizado diretamente para aquecimento de estufas, secagem de madeira, frutos e vegetais, aquacultura, na produção de frio, no aquecimento ambiental e em balneoterapia, entre outros usos. As diferentes aplicações dependem da temperatura do fluido geotérmico, sendo habitualmente aceite que os recursos de alta entalpia são preferencialmente usados para a produção de eletricidade e os de baixa entalpia surgem em aplicações diretas do calor. Existem situações em que o aproveitamento geotérmico acontece simultaneamente com o termalismo.

Bibliografia

Lei 54/2015 de 22 de junho

(http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/lei_54_2015_regimejuridico.pdf)

Decreto-Lei 86/1990 de 16 de março

(http://dfm.drcamposcosta.pt/dfm/sites/default/files/lista_leg/Decretos-Lei/DL%2086-90.pdf)

Cadernos APIAM

(<http://www.apiam.pt/publicacoes/Cadernos-T%C3%A9cnicos/-/47/23/46>)

Coelho, Virginia M. T. et Uriel Duarte - PERÍMETROS DE PROTEÇÃO PARA FONTES NATURAIS DE ÁGUASMINERAIS Inst. de Geociências da Universidade de São Paulo;

Custodio, E., et al. (1977). "Combined use of surface and groundwater in Barcelona, Metropolitan Area (Spain)." Int. Ass. Hydrogeologists. Birmingham. V. XIII, 1, p. C14-27.

Cruz, José FA. (1999) – "Objectivos e Critérios para a Elaboração das Propostas de Fixação dos Perímetros de Protecção." Sessões Técnicas;

Environment Agency (2002) The Microbiology of Drinking Water - Part 1 -Water Quality and Public Health

Health Protection Agency - THE MICROBIOLOGICAL EXAMINATION OF WATER SAMPLES- QSOP 57 –

Henri Leclerc; Annick Moreau (2002) - Microbiological safety of natural mineral water - FEMS Microbiology Reviews 26207 ^ 222

Henrique Graça (2002). Controlo de Qualidade e Monitorização de Captações de Água Mineral ou de Nascente. Prospecção, Pesquisa e Captação de Águas Minerais Naturais, Recursos Geotérmicos e Águas de Nascente. IGM. Versão Online no site do INETI: http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/prosp_pesq/indice.htm

José Martins Carvalho (2002). Desenvolvimento e Gestão de Recursos Hidrominerais. Prospecção, Pesquisa e Captação de Águas Minerais Naturais, Recursos Geotérmicos e Águas de Nascente. IGM. Versão Online no site do INETI: http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/prosp_pesq/indice.htm

Gonçalves, Eduardo Jorge dos Santos (2009)- Caracterização hidrogeológica e definição de perímetros de protecção às captações de Ermida (Vilar da Veiga - Gerês);

Henriques, M.J., Oliveira, L., Lobo Ferreira, J.P. (2009) - “Delimitação de Perímetros de Protecção de Captações de Abastecimento Público de Água do Concelho de Pombal: Furos 12D(SL2), 12B(JK1) e 12C(MF7)”. Relatório 49/2009-NAS, 42 pp

Henriques, M.J., Oliveira, L., Lobo Ferreira, J.P. (2009) - “Delimitação de Perímetros de Protecção de Captações de Abastecimento Público de Água do Concelho de Pombal: Furos SO5 e 31D(MF16)”. Relatório 393/2009-NAS, 42 pp.

Lima, A. S.; Oliveira, A. C.; Costa, J. A. (2007) - Delimitação de Perímetros de Protecção de Recursos Hidrominerais: Proposta Metodológica Aplicada à Ocorrência de Caldas da Saúde (Noroeste de Portugal). Actas do 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, São Paulo, Brasil, 25 a 29 de Novembro de 2007, 20 p., publicação em CD-ROM;

Magno, Carlos E. F. (1999) – “Perímetros de Protecção de Águas Minerais Naturais” – Sessões Técnicas;

Waegeningh, H. G. van (1985) Overview of the protection of groundwater quality. In: MATTHESS, G.; FOSTER, S. S. D.; SKINNER, A. C. Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones. Hannover: Heise. UNESCO, International Association of Hydrogeologists, v. 6, p. 159-166.

<http://www.eau-forte.com/eaux-souterraines/maintenance-des-forages,12.html>

<http://www.astien.com/exploitation-nappe/entretien-forage-nappe.php>

<http://www.bwb.de/content/language2/html/1566.php>

www.hwe.org.ps

www.amerwestwater.com

<http://www.pigadi.com/index.php?id=22>

http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/ISWD%204000%20Well%20Rehabilitation.pdf

http://sonar-jet.com/Pages/about%20us_Page.html

<http://www.waterwelltechnology.com/vibe.htm>

<http://www.welenco.com/index.html>

http://www.sonic-umwelttechnik.de/pdf/Ultrasonic-well-rehabilitation_-_general_info..pdf

http://en.wikipedia.org/wiki/Groundwater_remediation

http://www.aquastream.com/tech_papers/kroeker_nuzman04.html

<http://nohydrofracturin.qwestoffice.net/rehabilitation.htm>

http://www.texas-geology.com/water_well_rehabilitation.html

<http://www.briodydrilling.ie/services-well-rehabilitation.asp>

<http://www.sswm.info/category/implementation-tools/water-sources/hardware/groundwater-sources/well-development-rehabilita>

3 capítulo

Recursos minerais de Trás-os-Montes e Alto Douro

Elisa Preto Gomes¹ & João Farinha Ramos²

¹ Departamento de Geologia, UTAD e Centro de Geociências da U Coimbra

² Geólogo aposentado do LNEG

Email: mgomes@utad.pt

1. Introdução

Trás-os-Montes e Alto Douro (TMAD) é uma das onze províncias tradicionais portuguesas que corresponde aos distritos de Vila Real e Bragança, bem como a quatro concelhos do distrito de Viseu (Armamar, Lamego, São João da Pesqueira, Tabuaço) e a um concelho do distrito da Guarda (Vila Nova de Foz Côa). Para simplificar neste trabalho referem-se apenas os recursos minerais dos distritos de Bragança e Vila Real como região de TMAD. Esta região é possuidora de paisagens e património natural e cultural de elevada qualidade, pelo que são várias as áreas classificadas a diversos níveis, destacando-se a Reserva da Biosfera Transfronteiriça da Meseta Ibérica com chancela UNESCO, o **Geopark Terras de Cavaleiros (GGTC)** reconhecido pelas Redes Europeia e Global de Geoparks da UNESCO em setembro de 2014 e como Geoparque Mundial da UNESCO em novembro de 2015 e integra, quase na sua totalidade, a **Rede Natura 2000**, estando referenciados **42 geossítios**. A UNESCO classificou como **Património da Humanidade**, os Sítios Pré-históricos de Arte Rupestre do Vale do Côa, **em 1998**, considerando como “**o mais importante sítio com arte rupestre paleolítica de ar livre**” e **em 2001**, o **Alto Douro Vinhateiro**. A Região do Barroso foi, em 2018, a primeira do país a integrar o Sistema Importante do Património Agrícola Mundial (GIAHS) pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO). De destacar a mais recente classificação municipal, em agosto de 2019, de um Geossítio como Monumento Natural Local, trata-se dos afloramentos de granulitos do *Tojal dos Pereiros*, na Zona Industrial de Bragança.

A Região de Trás-os-Montes e Alto Douro (TMAD), com grande geodiversidade é, sem dúvida, dotada de enorme potencialidade, no que respeita a recursos geológicos. O aproveitamento dos mesmos poderá ajudar a redu-

zir o despovoamento do interior, criando emprego, pois a exploração dos recursos dum território é uma das atividades mais importantes na promoção do desenvolvimento das populações que o habita. Nesta região afloram diversos tipos de granitóides e rochas filonianas que intruíram formações metassedimentares autóctones e paraúctones de idade silúrica, ordovícica e câmbrica e alguns depósitos de rochas sedimentares eluvio-aluviais de idade pliocénica e holocénica. Estes tipos de rochas e a tectónica que as afetou explicam as numerosas ocorrências mineiras que, desde tempos imemoriais, vêm sendo exploradas pelos povos que por aqui passaram e se fixaram. Trata-se, de facto, de uma área onde abundam recursos minerais (metálicos e não metálicos), geotérmicos e hidrominerais, nomeadamente minerais portadores de W, Sn, Mo, Li, Nb, Ta, Au e Ag, quartzo, feldspato, argilas, areias, granitos industriais e ornamentais, águas minerais naturais, etc., que não passaram despercebidos aos povos, mesmo aos mais primitivos, que aprenderam a utilizá-los. Destaca-se ainda a presença de rochas básicas e ultrabásicas, alóctones, nos maciços de Bragança-Vinhais e de Moais e a ocorrência de platinóides associados a minérios de cromo, níquel e cobalto e relacionados com essas rochas.

A pesquisa de alguns destes recursos deve ter começado ao longo dos rios e linhas de água mais importantes onde procuravam água, peixe, seixos, e onde descobriram pepitas de ouro, grãos de estanho, etc. A tradição da exploração foi passando de geração em geração até aos tempos atuais, constituindo uma fonte de meios não desprezível para aquelas gentes rijas que habitavam territórios serranos de solos pobres e clima agreste. “*9 meses de Inverno e 3 de inferno*” é o ditado popular ainda hoje usado para caracterizar a grande variação térmica do clima da Terra Fria transmontana.

A exploração dos recursos minerais, deve de acordo com o Relatório de Brundtland (1987) ter em conta: 1. o ambiente e a conservação da natureza; 2. a economia e a competitividade e 3. o desenvolvimento social e a melhoria da qualidade de vida das populações. Entende-se por recursos minerais todas as substâncias concessíveis ou do domínio público do Estado e as massas de substâncias minerais não concessíveis, com aplicação industrial ou ornamental.

Com base numa classificação utilitária consideram-se quatro grandes grupos de recursos minerais:

1. Minérios metálicos (minerais e rochas de onde se podem extrair economicamente metais);
2. Minérios não metálicos (minerais e rochas com aplicação económica na indústria);

3. Minérios energéticos (minerais e rochas que podem fornecer economicamente energia);
4. Recursos hidrominerais e geotérmicos.

Em Trás-os-Montes e Alto Douro nos recursos minerais não metálicos consideram-se:

- Depósitos minerais (substâncias concessíveis): Talco, amianto, barite, quartzo/feldspato e caulino;
- Massas minerais (substâncias não concessíveis): argilas comuns, rochas industriais (granitos, peridotitos, anfíbolitos, calcários, areias comuns);
- Rochas ornamentais (granitos, ardósias, xistos, quartzitos, serpentinitos, mármore).

Os recursos energéticos são escassos nesta região, porém, merece referência a jazida mineral de urânio da Horta da Vilarça, no concelho de Torre de Moncorvo e o potencial geotérmico de baixa entalpia associado às águas termais de Chaves. Os recursos hidrominerais serão diversificados e distribuem-se sobretudo ao longo das grandes falhas como as da Vilarça (Manteigas-Vilarça-Bragança) e de Vila Real (Penacova-Régua-Verin).

Um importante recurso geológico a considerar atualmente é o património geológico, um recurso de não uso ou de uso indireto. Na região de Trás-os-Montes e Alto Douro estão referenciados diversos locais de interesse geológico que são representativos no inventário nacional de geossítios (Pereira & Pereira, 2014; Pereira *et al.* 2015).

Neste capítulo apresenta-se uma síntese das ocorrências de recursos geológicos- minerais metálicos e não metálicos da região de Trás-os-Montes e Alto Douro.

2. Alguns aspectos da geomorfologia da região de Trás-os-Montes e Alto Douro

A geomorfologia transmontana é bastante diversificada. As Serras de Gerês, Barroso, Alvão e Marão estabelecem a oeste a transição para o Minho, que apresenta aspetos morfológicos bem distintos desta região. Em Trás-os-Montes a parte mais significativa da drenagem faz-se na direcção NNE-SSW influenciada por grandes fraturas com aquela direcção (Pereira & Pereira, 2014; Pereira *et al.* 2015).

A predominância de rochas de natureza granítica e de rochas metamórficas xistentas respetivamente na parte ocidental e oriental, determinam também aspetos morfológicos diferentes. De facto, enquanto a parte ocidental é mais

ondulada com regiões planálticas separadas por vales e depressões de origem tectónica, com escarpas por vezes bastante abruptas, devido à atuação recente de falhas, a parte oriental é dominada por restos de superfícies de aplanamento, que se estendem para Meseta Ibérica, por vezes deslocadas por importantes acidentes tectónicos de onde sobressaem imponentes relevos de dureza correspondentes a cristas quartzíticas ou imponentes filões quartzosos. Os sistemas de fracturas NNE-SSW condicionam fortemente o aspecto da morfologia como é o caso da Falha da Vilarça, que condicionou as Serras de Nogueira e de Bornes e da Falha de Vila Real, responsável pelos relevos das serras do Alvão, Padrela, Falperra e Montemuro. Os relevos residuais de dureza que caracterizam também morfologicamente a parte oriental de Trás-os-Montes são constituídos predominantemente por quartzitos de idade ordovícica (485 a 443 Ma) e silúrica (443 a 419 Ma) com orientação predominante NW-SE por vezes rodando para E-W e desenhando dobramentos notáveis originados pela Orogenia Varisca. A morfologia do vale do Douro é também distinta de acordo com a natureza das rochas onde o rio se instalou e de acordo com a tectónica que o afeta. Enquanto na parte oriental, no Douro Internacional e na sub-região do Douro Superior, o rio atravessa rochas predominantemente xistentas, por vezes migmatizadas, do Grupo do Douro (antes designado como Complexo Xisto-Grauváquico) de idade câmbrica (541 a 485 Ma), com dobramentos com plano axial WNW-ESE que determinam relevos ondulados, muito condicionadas pela fracturação NNE-SSW e pelo entalhe vigoroso do rio Douro determinando vales profundos e abruptos, a ocidente, quando atravessa o maciço granítico de Vila Real-Carviçais o relevo ainda imponente revela topos mais adoçados. Uma parte importante do curso do Douro foi determinado pelo seu trajecto anterior ao entalhe vigoroso que levou ao canhão fluvial, mas está nitidamente afetado pela movimentação ao longo das fracturas NNE-SSW, NE-SW e NW-SE (Fig. 1) que o desviam bruscamente, como acontece no Pocinho, Régua ou Mesão Frio, etc.

Alguns dos aspetos mais peculiares da geomorfologia transmontana foram escolhidos como geossítios, com relevância internacional e correspondem a geoformas graníticas, fluviais e tectónicas (Fig. 1).

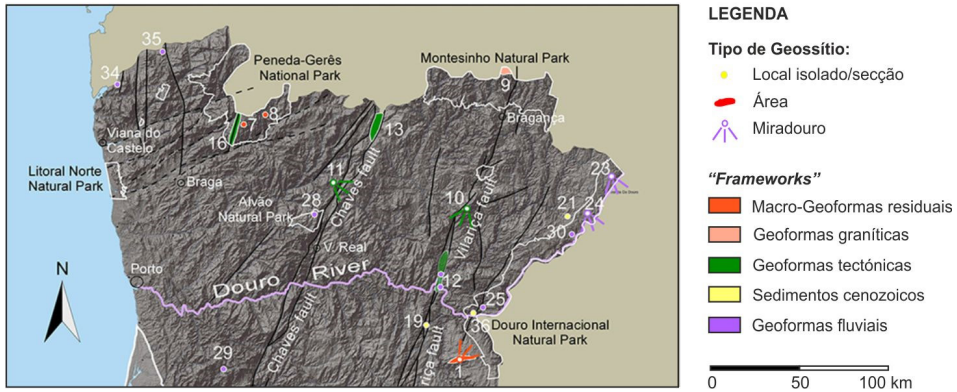


Figura 1: Geossítios com relevância internacional e áreas protegidas em TMAD: 9 - área da Cheira da Noiva, 10 - miradouro de Bornes, 11 - miradouro do Minhêu- Alvão, 12 - Bacia da Vila Rica, 13 - Bacia de Chaves, 21 - Sedimentos corte em Atenor, 23 - Miradouro de S. João das Arribas, 24 - Miradouro da Fraga do Puio, 25 - Sinclinal de Poiares e Ribeira do Mosteiro, 28 - Fugas do Ermelo; 30 - Cascata da Faia da Água Alta, 36 - sedimentos- corte em Barca de Alva

3. Alguns aspectos da geologia de Trás-os-Montes e Alto Douro

A área correspondente à região transmontana situa-se na fronteira entre a Zona Centro-Ibérica (ZCI) e a Zona da Galiza-Trás-os-Montes (ZGTM), onde se verifica a transição entre as unidades autóctones e unidades parautoctones/alóctones. TMAD ocupa a zona axial do chamado Terreno Ibérico, o qual durante o Precâmbrico sofreu uma evolução complexa com amalgamação de blocos continentais e formação de uma bacia de sedimentação que começou a ser preenchida por sedimentação arenosa, argilosa e carbonatada. Há cerca de 500 milhões de anos a fracturação de um enorme continente situado no hemisfério sul (Gondwana), resultou, assim, na abertura de um novo oceano (Reich). Em zonas mais profundas depositaram-se espessas camadas de sedimentos argilosos que dariam origem, milhões de anos mais tarde, aos diferentes estratos que se observam nas atuais áreas metassedimentares. Devido a alguma instabilidade gravítica e a pequenos abalos sísmicos formaram-se turbiditos. Durante o Câmbrico teve início a fase de sedimentação varisca. Na transição do Câmbrico para o Ordovícico as margens da bacia são afetadas pela deformação originando-se a emergência dos sedimentos da bacia e iniciou-se um ciclo sedimentar transgressivo com deposição de materiais mais grosseiros. Entre o Ordovícico superior e o Devónico assiste-se a uma série de episódios regressivos e transgressivos acompanhados de atividade vulcânica. No Devónico médio teve lugar

a colisão orogénica varisca que prosseguiu até ao Carbónico superior com deformação dos sedimentos, metamorfismo e o magmatismo orogénico intenso, que se distribui espacialmente segundo arcos que sublinham zonas de cisalhamento dúctil anteriores.

A zona da Galiza-Trás-os-Montes destaca-se da zona Centro Ibérica pela presença de complexos de rochas básicas e ultrabásicas, afetadas por metamorfismo de alta temperatura e pressão. Estas rochas que se formaram em níveis profundos da crosta e no manto superior afloram pelo dobramento intenso e erosão posterior dos materiais que as cobrem. Encontram-se cavalgando sobre o autóctone da zona Centro Ibérica e separadas deste pelo carreamento principal de Trás-os-Montes (MTMT) (Fig. 2).

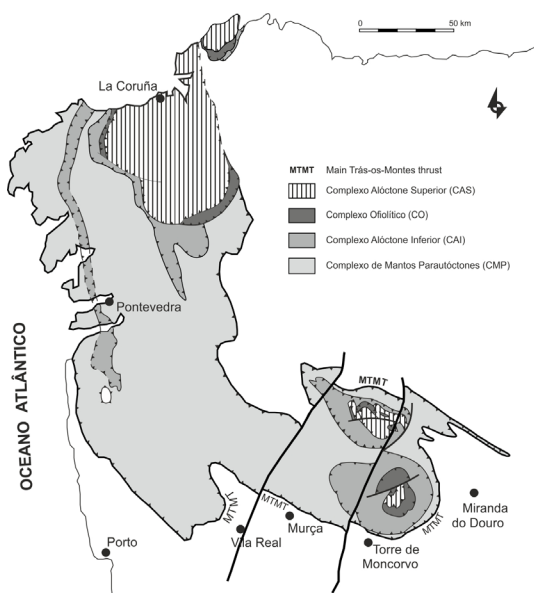


Figura 2: Complexo de mantos alóctones (Alóctone Inferior, Ofiolito e Alóctone Superior) e Mantos Parautoctones separados pelo carreamento MTMT do Autóctone da Zona Centro Ibérica, do NW Ibérico (Rodrigues *et al.* 2013).

Os terrenos que afloram na região norte de Portugal e NW Ibérico foram divididos em três grandes domínios estruturais:

- I - Terrenos autóctones – São terrenos que não sofreram movimentação durante a orogenia varisca e que afloram nos locais onde estão enraizados.
- II - Terrenos parautoctones – são terrenos que sofreram pequena movimentação (da ordem de dezenas de km) da zona de raiz até ao local onde afloram, durante a atuação da orogenia varisca.

III - Terrenos alóctones – terrenos formados pelo empilhamento de unidades litológicas cuja zona de raiz está muito distante do local onde ocorrem (mais de 100 km) e que sofreram movimentação durante os processos da orogenia varisca. Em geral trata-se de terrenos exóticos que apresentam características geológicas, estruturais e mineralógicas, muito distintas dos terrenos circundantes, como por exemplo os maciços básicos e ultrabásicos de Bragança – Vinhais e Morais, cuja raiz se admite no NW Ibérico.

Esses terrenos autóctones, parautóctones, e alóctones encontram-se intruídos por rochas granitóides e filonianas e cobertas por unidades cenozóicas de sedimentos recentes (Fig. 3).

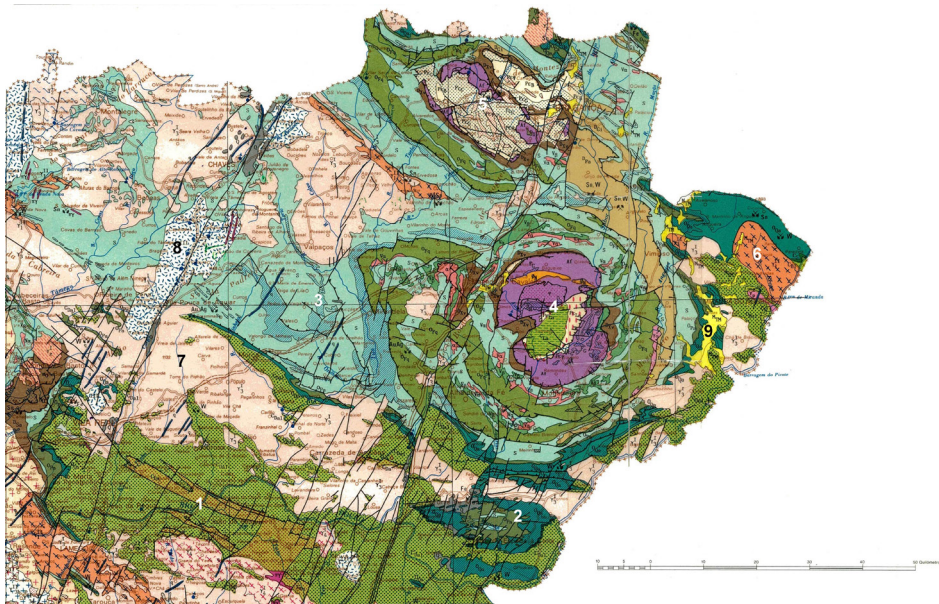


Figura 3: Geologia correspondente à maior parte dos distritos de Bragança e Vila Real, na Folha 2 extraída da carta geológica 1:500 000 (1992). Legenda: 1. Câmbrico, Grupo do Douro, 2. Ordovícico, 3. Silúrico, 4. Maciço de Morais, 5. Maciço de Bragança, 6. Granitos ante- a sin-D3, 7. Granitos sin-D3, 8. Granitos pós-tectónicos, 9. Sedimentos cenozóicos.

4. Recursos minerais metálicos

Atualmente na região de TMAD estão ativas poucas concessões de minérios metálicos, porém são diversos os depósitos minerais metálicos e não metálicos dos distritos de Vila Real e Bragança (Fig. 4). Trata-se duma região que desde tempos remotos foi sujeita a explorações mineiras, nalguns casos de

grandes dimensões, por povos pré-romanos e durante a ocupação romana da península, e sobretudo no século XX, terminando em Jales a exploração mineira em 1992.

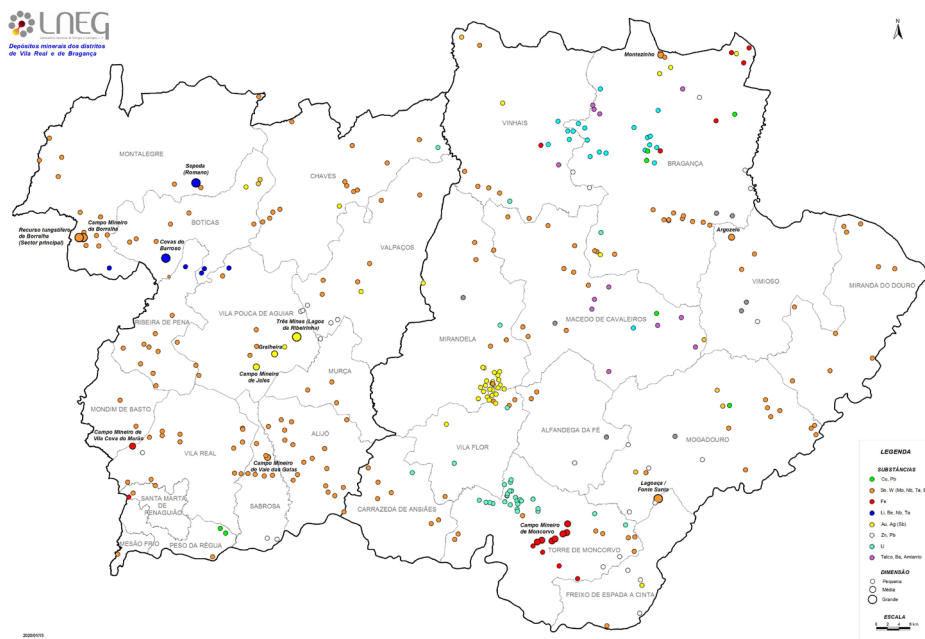


Figura 4: Localização de depósitos minerais metálicos e não metálicos de Vila Real e Bragança (fonte: LNEG, jan 2021).

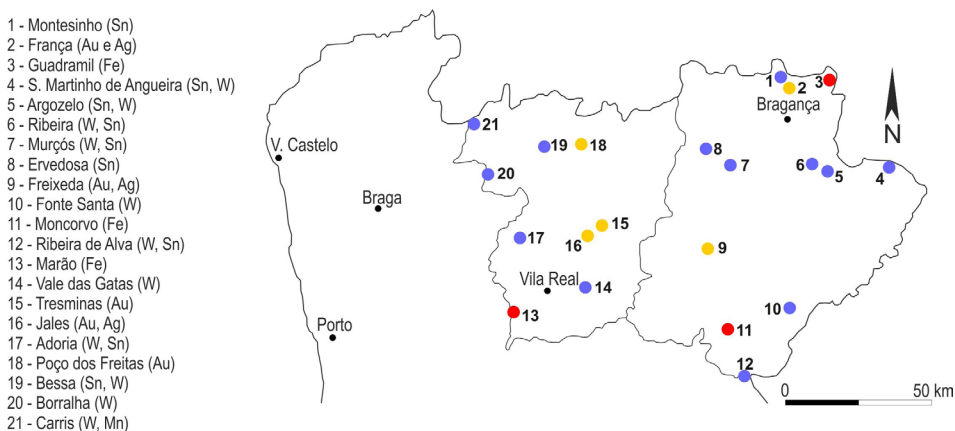
O legado das antigas minas constitui muitas vezes um problema ambiental no que se refere à segurança, poluição de aquíferos, solos ou ar com metais pesados disseminados dos materiais das escombrelas e impactos negativos na paisagem. A EDM (Empresa de Desenvolvimento Mineiro), detentora de capitais públicos, é o organismo responsável pela reabilitação das minas abandonadas em Portugal, tendo entre 2002 e 2008 despendido mais de 10 milhões de euros em 7 áreas mineiras degradadas na região de TMAD, melhorando a sua situação ambiental (Tab. 1).

As explorações de maior envergadura feitas pelos romanos em TMAD foram sem dúvida as explorações de ouro de Tresminas e Jales (Vila Pouca de Aguiar) e o Poço das Freitas (Boticas) (Fig. 5).

Também nas antigas minas de ferro de Moncorvo e Marão há vestígios de trabalhos feitos em data remota. Outras jazidas tiveram no passado larga exploração como são o caso de antigas minas de estanho dispersas por todo o Trás-os-Montes em especial concentradas na região de Ribeira de Pena-

Tabela 1: Antigas minas de TMAD intervencionadas pela EDM entre 2002 e 2008 (EDM)

Mina	Concelho (Distrito)	Metal	Valor (M€)
Jales	Vila Pouca de Aguiar (Vila Real)	Au(Ag)	5,7
Argozelo	Vimioso (Bragança)	Sn	2,2
Montesinho	Bragança	Sn	1,5
Fonte Santa	Freixo de Espada à Cinta (Bragança)	W	0,5
Ribeira	Bragança	Sn	0,3
Murçós	Macedo de Cavaleiros (Bragança)	W	0,4
Freixeda	Mirandela (Bragança)	Au(Ag)	0,2


Figura 5: Localização de antigas explorações mineiras nos distritos de Bragança e Vila Real (adp. de Moura, 2010)

-Boticas-Vila Pouca de Aguiar-Ervedosa e ainda as antigas minas de tungsténio e estanho da Borralha, Vale das Gatas, Cerva, Ribeira, Argozelo, Lagoaça, Murçós, etc. Das numerosas ocorrências mineiras conhecidas na região transmontana apresenta-se a seguir uma breve referência às principais explorações mineiras. A distribuição espacial das minas de Sn-W, Au e U não é aleatória, mas estão associadas em alinhamentos, correspondendo a cisalhamentos hercínicos (Pereira *et al.* 1993) (Fig. 6)

Ocorrências de ouro (Au) e ouro e prata (Au e Ag)

Diversas ocorrências de ouro em filões quartzosos, por vezes associados com aplito-pegmatitos foram objeto de trabalhos desde tempos pré-romanos. Os jazigos primários e secundários de ouro do Norte de Portugal têm sido alvo de explorações de maior ou menor envergadura. A antiga mina de Jales (Vila

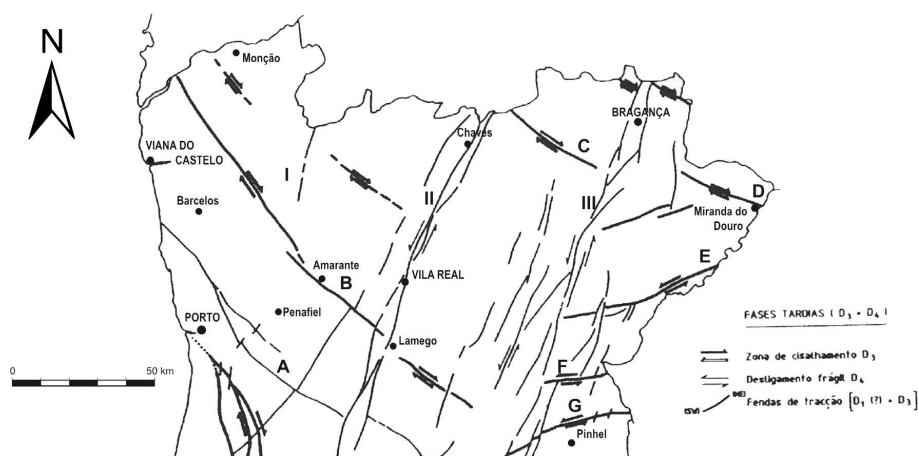


Figura 6: Localização na região Norte das principais zonas de cisalhamento dúctil e fraturas frágeis tardias, relacionadas com as fases D3 e D4 (Pereira *et al.* 1993).

Pouca de Aguiar) foi a mais importante do país tendo sido explorada desde tempos romanos até 1992. As minas de ouro primárias portuguesas são tipo filoniano com ganga quartzosa.

Os filões mineralizados ocorrem no seio dos granitos de duas micas (Jales e Poço das Freitas) quer no seio de rochas metamórficas de idade paleozoica (Gralheira, Vale de Campo, Vale d'Égua, Velhaquinhas, Penabeice, Freixeda, França). Estas ocorrências aparecem em contextos geológicos diversos (Figs. 3 e 7)

Jales – Vila Pouca de Aguiar: Os filões quartzosos de Jales foram explorados nos séculos I e II da era Cristã e de novo desde 1933 a 1992. O Couto Mineiro de Jales conta com 72 concessões e a mina de Jales teve a maior produção entre 1950 e 1955 atingindo no último ano a produção máxima de 896 kg de ouro. O filão campo tem direção NNE-SSW, pendor vertical, localiza-se na sua maior parte no seio do granito de duas micas e tem mais de 1 km de extensão. Quando passa do granito aos metassedimentos muda de direção, ramifica-se e perde interesse. Foi explorado em 16 pisos até 620 m de profundidade (Fig. 8). Quartzo, mica branca, feldspato, turmalina, fluorite, calcite, siderite, apatite, volframite, scheelite, arsenopirite, pirite, galena, esfalerite, calcopirite, estanite, *electrum* (liga natural de ouro e prata com mais de 20 wt% de prata) e diversos minerais de prata, estão presentes. O *electrum* associa-se à galena, calcopirite, arsenopirite ou pirite.

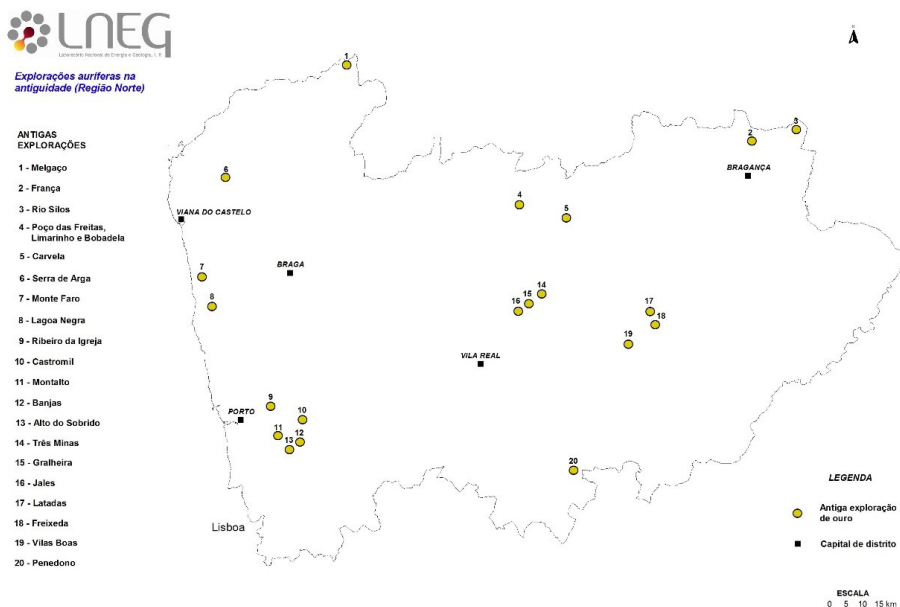


Figura 7: Localização na região Norte de explorações auríferas na antiguidade. (fonte: SIORMINP, LNEG).

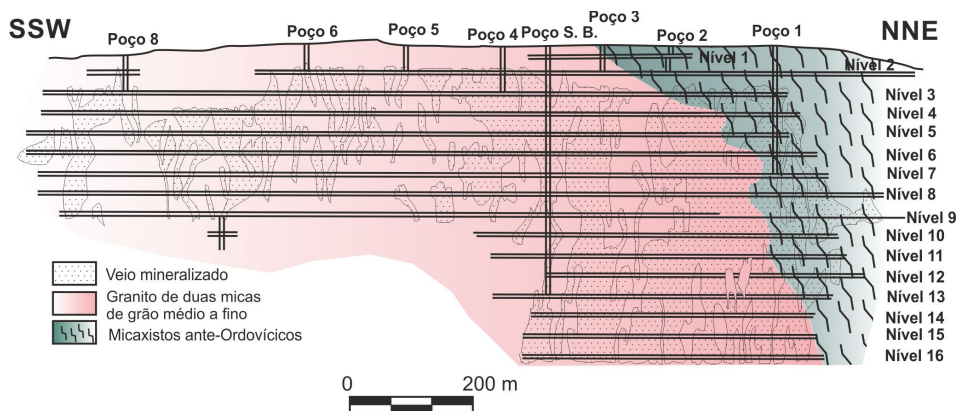


Figura 8: Pormenor dos poços, galerias e cartografia do filão de Campo nas minas de Jales (Neiva, 1992).

O filão Gralheira com direção WNW-ESE está encaixado nos xistos e quartzitos, tem 30 a 60 cm de espessura e foi reconhecido por sanjas e sondagens por cerca de 1300 m. O teor de ouro varia entre 0,02 g/t e 14 g/t. Tresminas – Vila Pouca de Aguiar: Constitui um dos mais importantes conjuntos de arqueologia mineira da época romana. Foi explorado até ao século II d.C. e calcula-se que terão sido extraídos cerca de 20 Mt de rocha mine-

realizada nas cortas de Covas (430x140x90 m), Ribeirinha (375x160x100 m) e Lagoinha ou Lagoinhos (170 m de comprimento). O desmonte foi feito a céu aberto. Admitindo um teor médio de 10 g/t, que terá rendido durante 150 anos uma produção média de 100 a 130 kg de ouro por ano. Segundo Ribeiro (1998) as cortas estão num alinhamento concordante com a estruturação geológica, resultante da Orogenia Varisca, com direção N120° e localizam-se no limite entre duas unidades metassedimentares. Trata-se de estruturas silicificadas auríferas, relacionadas com zonas de cisalhamento (N120° a N130°E) (Fig. 6). Durante cerca de dezoito séculos, este património mineiro permaneceu bem preservado, o que motivou a sua classificação como Imóvel de Interesse Público (1997). Mais recentemente, alguns componentes do sistema de abastecimento de água a esta zona mineira foram classificados como Monumento de Interesse Público (2012), e atualmente decorre uma candidatura para, juntamente com as Médulas, em Leão, Espanha, que completa em 2017 duas décadas como Património Cultural da Humanidade, serem classificadas pela UNESCO como Paisagem Cultural, categoria que dará a melhor resposta às tipologias do património a proteger nestes territórios. Tem grande interesse arqueológico e museológico. Localizado no centro da aldeia de Tresminas, nas imediações da Igreja de São Miguel, o núcleo museológico do Centro Interpretativo de Tresminas, composto por áreas expositivas interiores e no exterior permite o enquadramento histórico-arqueológico e natural da área mineira e coloca o visitante em contacto com a tecnologia aplicada em época romana para o máximo aproveitamento do ouro.

A ocorrência de ouro tem sido associada a fluidos tardios, predominantemente aquosos, de baixa salinidade sugerindo profundidades inferiores e 2 km (Noronha *et al.* 1993, Noronha, 1998, Noronha *et al.* 2013). O ouro em Jales e na Gralheira aparece associado com prata, na forma de *electrum* e com sulfuretos abundantes, enquanto em Tresminas é praticamente ouro nativo e são raras as presenças de prata e metais base (Rosa, 2003). Contudo, a mineralização não está associada a filões de quartzo, mas sim a metassedimentos silicificados que ocorrem no limite entre litologias ricas em matéria orgânica (xistos negros e alguns calcários negros) da Unidade de Fragas Negras e quartzofilitos da Unidade de Curros (Ribeiro, 1998). A geoquímica das inclusões fluidas mostraram que no Campo de Jales e na Gralheira a mineralização aurífera está associada a fluidos que homogeneizaram a 280 - 340 °C e com salinidades baixas compatíveis com as temperaturas e pressões de formação deduzidas para as moscovites hidrotermais do granito encaixante de Campo de 400 - 200 °C (Neiva, 1992), pelo que Rosa (2003) propôs que Campo, Gralheira e Tresminas seriam do tipo de jazigos de Au associados

à intrusão magmática. Para Campo e Gralheira, tal classificação parece ser apropriada, porém, para Tresminas ficam algumas reservas quanto à classificação, já que se trata duma mineralização muito invulgar e exótica, para a qual já se propuseram géneses tão díspares como fluidos metamórficos, exalativa sin-sedimentar e de paleo *placer* aurífero.

Freixeda – Mirandela: O ouro ocorre em filões e redes de filões (*stockwork*) com direções NE-SW com quartzo, arsenopirite, pirite, calcopirite, galena, esfalerite, ouro e prata. O ouro está em especial associado à arsenopirite. Foram explorados em especial 2 filões, S. Jerónimo e S.^{to} André, com cerca de 30 cm de espessura. No período de laboração entre (1952 a 1955) terão sido produzidos 140 kg de ouro e 2361 kg de prata. A antiga mina tinha 2 pisos e durante a laboração trabalhou com 14 g/t a 6 g/t. A cerca de 3 km para NW da antiga mina da Freixeda aflora o filão aurífero das Latadas, com cerca de 5 km de comprimento e 2 m de espessura com direção E-W e pendor 80° S, mas os teores revelados são genericamente baixos.

França – Bragança: Nesta antiga mina ocorrem filões quartzosos, com direção ENE-WSW com pendor entre 60° a 80° N, e possança média de 80 cm onde ocorrem quartzo, arsenopirite, pirite, galena, esfalerite, ouro, carbonatos, sericite, clorite, etc. Os teores variavam entre 0,4 g/t e 8 g/t em 3 pisos. Foi reconhecida por trabalhos mineiros em vários períodos desde épocas romanas à atual (1943 a 1947 e 1949 a 1988).

Outras ocorrências de filões de quartzo com mineralizações auríferas associados ao granito de Chaves, como o Poço das Freitas e Lameirinho (Boticas), tiveram importante lavra romana e mais recentemente foram alvo de trabalhos de pesquisa mineira. Atualmente estão integradas no Parque Arqueológico do Vale do Terva (PAVT). O vale superior do rio Terva conserva um notável conjunto de valores patrimoniais arqueológicos e naturais, associados a antigas minas romanas que testemunham uma longa e complexa evolução da sua ocupação, desde os mais recuados tempos da Pré-História recente até à atualidade. Carvela (Chaves) terá tido também trabalhos romanos, trata-se de filões centimétricos encaixados no contacto granito-xisto. Na região de Vila Pouca de Aguiar - Valpaços são conhecidas várias ocorrências, tratando-se de filões centimétricos encaixados em rochas xistentas. Em Lomba Grande (Vinhais) ocorre um filão NNE-SSW com 1 a 3 m de espessura, que foi sujeito a trabalhos de pesquisa e reconhecimento mineiro na década de 1990. Em Vila Meã (Miranda do Douro) e em Meirinhos (Mogadouro) ocorrem filonetes que podem atingir 30 cm de espessura encaixados em rochas xistentas e em Babe (Bragança), ocorrem filões e disseminações com Mn, Fe e Au encaixados nos xistos.

Aluviões mineralizados em Au ocorrem especialmente nas áreas adjacentes a regiões com mineralizações primárias em Trás-os-Montes como acontece nas regiões de Freixeda (Mirandela). Também na região de Jales (Vila Pouca de Aguiar) foram explorados aluviões auríferos e argentíferos por vezes com Sn associado.

Minérios de ferro (Fe)

Moncorvo: Na região de Moncorvo importantes bancadas de minério de ferro ocorrem associados aos quartzitos superiores do Membro Malhada da Formação Marão (Sá *et al.*, 2005) (Fig. 9). O Membro Malhada é constituído por sedimentos de plataforma pouco profunda depositados em zonas de alta a baixa energia, caracterizado por quartzitos puros com bancadas métricas a decimétricas de psamitos ricos em ferro e intercalações de metagrauvaques e xistos. Níveis conglomeráticos também estão presentes de forma restrita. A transição lateral das zonas ricas em ferro para zonas não mineralizadas e a presença de estruturas sedimentares reforçam o carácter sedimentar deste jazigo (d'Orey, 1999). A ocorrência de icnofósseis de *Cruziana*, e *Skolithos* indicam para esta formação a idade Arenigiano médio a superior (Sá *et al.*, 2005).

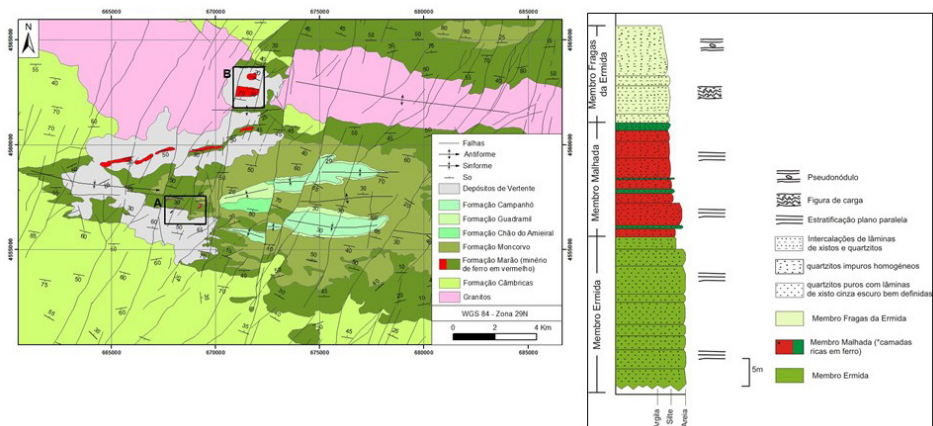


Figura 9: A) Mapa geológico simplificado do Sinclinório de Moncorvo, ao centro, e do Anticlinório de Carviçais, na porção superior do mapa (Urbano, 2017). O polígono A corresponde a área de Felgueiras e B a área da Mua, localizadas no flanco sul do Sinclinório Moncorvo e no flanco norte Anticlinório Carviçais, respetivamente. B) Log estratigráfico para as seqüências sedimentares cartografadas no flanco sul do Sinclinal Moncorvo feito com base nas sondagens. Escala 1:500 (Urbano, 2017).

A espessura do minério de ferro é muito variável, nos locais onde há camadas secundárias associadas à camada principal a espessura pode atingir mais de 70 m. Afloram no topo da serra de Reboredo e na sua vertente sul em Felgueiras, desde a região de Apriscos a ocidente até para lá dos vértices geodésicos Carvalhosa e Cabeço da Mua a este (Fig. 9). As bancadas de minério alternam com intercalações de xistos e quartzitos e desenham no seu conjunto um sinclinal complexo (sinclinório) com plano axial de direcção E-W. O complexo que inclui as camadas mineralizadas tem cerca de 150 ± 20 m de espessura. A atitude das camadas e o seu posicionamento no cimo da serra de Reboredo e do Cabeço da Mua possibilitaram a sua exploração a céu aberto. Na serra de Reboredo as camadas de minério são contínuas, mas, por vezes, contém intercalações de estéril. Têm em média cerca de 12 m de espessura embora em zonas localizadas possam atingir mais de 40 m. No Cabeço da Mua o minério forma uma camada contínua com cerca de 90 m de espessura máxima. O minério é predominantemente hematítico (também denominado especularítico), mas existe também minério magnético (minério martítico) que predomina em Felgueiras. Além da hematite e magnetite ocorrem limonite, quartzo, sericite, clorite, pirite, fosfatos, etc. Os fosfatos presentes (apatite, lazulite, rockbridgeite, etc.) determinam uma percentagem de fósforo compreendida entre 0,3 e 0,7 % o que coloca o minério numa categoria de valor inferior. A exploração deste minério é conhecida desde o tempo de D. Afonso III tendo sido o século XVI o período áureo. Durante a segunda guerra mundial teve alguma atividade. As reservas calculadas nas diversas parcelas do jazigo sondadas atingem mais de meio milhão de toneladas. É vasta a literatura, bem como numerosos os trabalhos de investigação e prospeção feitos no jazigo ao longo do tempo. Mais recentemente foram feitos trabalhos de prospeção no alvo de Felgueiras-Canada. Nos últimos anos muito se tem noticiado sobre a possível reabertura das minas de Moncorvo na zona do Reboredo e Cabeço da Mua. O *Museu do Ferro & da Região de Moncorvo* é uma espécie de *Centro Interpretativo* da região, que permite ao visitante ter uma ideia clara sobre a exploração do minério, ao longo do tempo.

De acordo com o Observador (2020/06/19) a Aethel Mining “batizou” a matéria-prima extraída do sítio da Cascalheira da Mua, na União de Freguesias de Felgar e Souto da Velha, no concelho de Moncorvo com o nome comercial de “muadense”. O “muadense” é um agregado de ferro natural que com o dobro do peso de outros materiais convencionais serve para a construção de molhes, quebra mares e outras estruturas de grande envergadura e tem estado a ser explorado no depósito de vertente do Felgar.

Guadramil – Bragança: No extremo NE de Portugal (Fig. 10) são conhecidas ocorrências de minério de ferro no antigo jazigo de Guadramil, formado por várias bancadas de minério predominantemente siderítico abaixo do nível freático. Estas bancadas estão intercaladas num complexo quartzítico e xistoso. A principal bancada com minério siderítico tem cerca de 46 m de espessura e estende-se por cerca de 4 km na direção NW-SE com pendores que variam de 40° S a vertical. O minério é essencialmente limonítico até ao nível freático e abaixo dele é de natureza siderítica com estrutura oolítica. As reservas totais atingem 5,5 Mt sendo 1 milhão respeitante a minério limonítico.

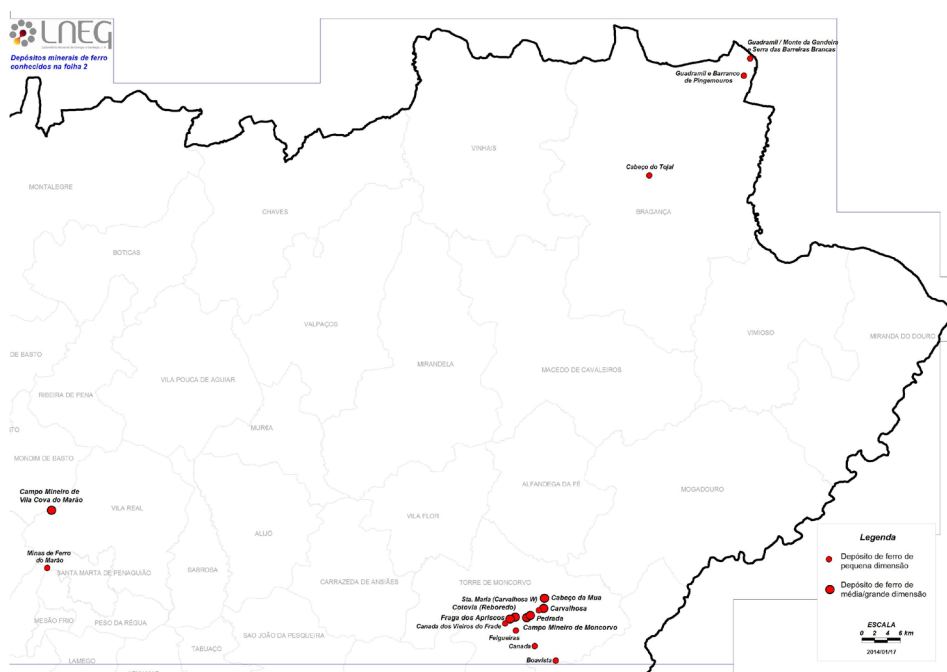


Figura 10: Localização dos principais depósitos de ferro (classificados por dimensão pequena e dimensão média/grande) no mapa da folha 2 (1:200 000) (fonte: SIORMINP, LNEG).

Serra do Marão: O ferro está distribuído por 2 conjuntos de antigas concessões: um, na região de Vila Cova e outro, nas Fragas da Ermida e Freita (Fig. 10). Em Vila Cova alguns autores admitem a ocorrência de uma única camada de minério dobrada enquanto outros admitem 5 camadas diferentes, 2 das quais têm 2,5 m e 3 m de espessura. Alternam com quartzitos e xistos cinzentos do Paleozoico (Ordovício 470 Ma). As camadas apresentam dobras com eixos de direção NW-SE. O minério é predominantemente mag-

netítico ocorrendo ainda quartzo, clorite, albita, apatite, biotite, limonite, granada, pirite e bismuto. A exploração foi feita a céu aberto e com lavra subterrânea, durante o período da II guerra mundial e durante 1979. O minério é de boa qualidade. Foram admitidas 3 Mt de minério na área de Vila Cova. O conjunto de Fragas da Ermida compreende 3 bancadas de minério com reservas estimadas em 10 Mt.

Ocorrências de estanho (Sn) ou com Sn dominante

A cassiterite é o principal mineral portador de estanho (Fig. 11). Filões de quartzo mineralizados em cassiterite ou com cassiterite predominante sobre outros minérios não são particularmente frequentes. Ocorrem em geral em filões com possança inferior a 1 m e extensão limitado a algumas centenas de metros. A mineralização ocorre dispersa no quartzo ou está enriquecida nos encostos onde ocorre associada a mica branca. Das antigas ocorrências conhecidas merecem destaque as antigas minas de Montesinho, Ervedosa ou Tuela e Ribeira (Fig. 5).



Figura 11: Amostras de cassiterite e de volframite das minas de Vale das Gatas, distrito de Vila Real, existentes no Museu de Geologia Fernando Real.

Montesinho – Bragança: A maior parte dos filões estão encaixados em xistos e quartzitos ordovícicos e em parte no granito de Montesinho. Os filões são numerosos e têm, em geral, espessura média de 60 cm, orientação NE-SW e andamentos de 300 m e atingem 100 m de profundidade. A cassiterite é o mineral útil. Foi bastante explorada desde 1958, tendo sido calculadas em 1981 reservas de 189 000 t e prováveis de 1 800 000 t. A mineralogia é relativamente simples (quartzo, moscovite, arsenopirite, cassiterite e outros óxidos), sendo o calibre da cassiterite grosseiro e permitindo boas recuperações. Esta mina está situada no interior do Parque Natural de Montesinho.

Ervedosa ou Tuela – Vinhais: A exploração começou em 1909 com trabalhos subterrâneos. A mina localiza-se na zona de bordadura do maciço de granito de duas micas, no contacto com os xistos do complexo parautoctone inferior de idade silúrica. A exploração fez-se ao longo de um filão principal de direção NW-SE pendendo 80° NE. O filão é espesso, mas pouco mineralizado, sendo cortado por uma rede de filões e filonetes bem mineralizados constituindo o jazigo de tipo *stockwork*, onde a mineralização é abundante. Os filões contêm quartzo, moscovite, cassiterite, arsenopirite, esfalerite, pirrotite, estanita, apatite, fluorite, columbo-tantalite e bismuto.

Ribeira – Parada: os filões mineralizados da mina da Ribeira estão essencialmente encaixados nas rochas xistentas do Silúrico. São filões e filonetes quartzosos com cassiterite e volframite com direção predominante NW-SE e pendor 70° SW. A mineralogia compreende moscovite nos encostos, apatite, quartzo, cassiterite, arsenopirite, volframite, scheelite, etc. O teor médio da mineralização rondava os 3,2 kg/t, sendo 2,6 kg/t de cassiterite e 0,6 kg/t de volframite.

Outras ocorrências de estanho por vezes com algum tungsténio associado em filões quartzosos e raros filões aplitopegmatíticos foram referidas em S. Martinho de Angueira (Miranda do Douro), Vale da Urze (Brunhosinho – Mogadouro), Trigueiriça (Rebordelo – Vinhais), Paredes – Teixugueiras (Bragança), Amedo (Carrazeda de Ansiães) e Fonte Figueira (serra do Marão).

Há aluviões estano-volframíticos diretamente relacionados com antigas áreas mineiras principais que exploraram estes metais, como por exemplo, Ribeira-Parada (Bragança), Murçós, Ervedosa, Carrazeda de Ansiães, Alijó, Vale das Gatas, Covas de Barroso, Beça, Cerdedo, Borralha, Adoria, Vieiros, Seixoso, Carrazeda de Montenegro, etc.

Ocorrências de estanho com nióbio (Nb) e tântalo (Ta)

Os aplitopegmatitos com estanho, nióbio e tântalo foram alvo de maior atividade mineira e constituíram uma das principais fontes de minérios de estanho com nióbio e tântalo associados. Mineralizações deste tipo ocorrem principalmente no exocontacto de alguns maciços de granitos de duas micas sintectónicos e tardi-tectónicos. As espessuras mais frequentes são 1 a 2 m. Formam filões e massas com extensão, em geral, de algumas centenas de metros e espessuras decimétricas a métricas (em geral inferiores a 3 m). A principal zona de ocorrência deste tipo de jazigos na região de Trás-os-Montes situa-se na região do Alto Tâmega, entre Ribeira de Pena e Boticas, sendo conhecidas muitas ocorrências mineiras de Sn (Nb, Ta), algumas das quais tiveram exploração intensa no passado. As direções mais frequentes

são NW-SE e NNE-SSW, ocorrem nos xistos que afloram entre os maciços graníticos das serras da Cabreira e do Barroso em Dornelas, Beça, Seixoso e Vinheiros. A mineralização de cassiterite e columbo-tantalite forma pequenos cristais em geral com calibre inferior a 5 mm que ocorrem dispersos na matriz aplito-pegmatítica. No que respeita à cassiterite os teores variam em geral entre 1 e 2 kg/t. Os minerais presentes são em geral quartzo, albita, feldspato potássico, moscovite, turmalina, apatite, cassiterite, columbo-tantalite, etc.

Em muitos outros locais foram explorados por vezes intensamente jazigos minerais de natureza semelhante às descritas. Salientam-se, entre outros, os de S. Julião de Montenegro (Chaves), S. João da Corveira e Carrazedo de Montenegro (Valpaços), Beça (Boticas), Ribeira de Pena – Boticas – Vila Pouca de Aguiar, Montalegre, etc.

Mineralizações de estanho, nióbio e tântalo, por vezes com ouro ou tungsténio ocorrem frequentemente em depósitos aluvionares recentes que resultam do desmantelamento de filões e massas de aplitopegmatíticos, mineralizados em Sn, Nb, Ta, e de filões de quartzo mineralizados em sulfuretos auríferos ou sulfuretos com tungstato, com estanho dominante. Localizam-se em geral nas linhas e cursos de água que drenam as áreas onde ocorrem filões e rochas mineralizadas. Muitos constituíram minas que laboravam a céu aberto e que tiveram grande atividade sendo responsáveis por parte significativa da produção de volfrâmio e estanho em especial durante os períodos de guerra. Trata-se em geral de depósitos pouco espessos que foram na sua maior parte explorados.

Ocorrências de tungsténio (W) ou tungsténio dominante

Tungsténio (do sueco *Tung* = pesado e *Sten* = pedra) ou volfrâmio (do alemão *Wolfram* = espuma de lobo) designam o mesmo elemento químico (W- tungsténio), sendo comumente a designação usada para o principal mineral portador que é a volframite (Fig. 11). Em Trás-os-Montes é muito mais conhecido como volfrâmio e aparece em mineralizações em filões de quartzo com volframite dominante e/ou scheelite, que ocorrem associados a diversos tipos de granitoides, quer biotíticos com foliação (Ifanes e Fonte Latassa -Miranda do Douro), Murçós – Agrochão (Bragança), quer granitos de duas micas foliados (S. Mamede de Riba Tua-Alijó, Vale das Gatas-Sabrosa, Chaves, Murça, Cerva – Ribeira de Pena, Argoselo - Vimioso, Fonte Santa – Mogadouro), quer associados a granitoides biotíticos tardios posteriores à deformação varisca (Borralha - Montalegre, Lamas de Olo – Vila Real).

De todas as ocorrências conhecidas salientam-se pela sua maior importância as antigas minas de Vale das Gatas, Borralha, Murçós e Argoselo. Gene-

ricamente pode dizer-se que a mineralogia deste tipo de filões compreende além do quartzo, a volframite, e/ou scheelite, por vezes a cassiterite a que se associam sulfuretos como arsenopirite, pirite, calcopirite, esfalerite, e por vezes minerais de prata e de bismuto.

Vale das Gatas – Sabrosa: A maioria das antigas concessões deste conjunto mineiro está encaixada no granito, próximo do contacto com os xistos da Formação Pinhão, do Grupo do Douro. O filão principal ocorre de Lacedaivas a Vinheiros e tem direção próxima de E-W e pendor cerca de 25° S, com espessura que varia de 20 a 50 cm. O jazigo está compartimentado por falhas em 4 zonas de exploração: Mina A, Mina B, Rebolais e Vinheiros. Quartzo, cassiterite, volframite, esfalerite, pirrotite, estanita, arsenopirite, galena, minerais de prata, bismuto, etc. são os principais minerais presentes. O teor médio do jazigo é de 4 kg/t e teve produção regular até à década de 1980.

Borralha – Montalegre: A antiga mina da Borralha foi das minas produtoras de volfrâmio mais importantes da Europa, ocupando o 1º lugar em Portugal até à entrada em produção da mina da Panasqueira. Distinguem-se dois tipos de estruturas mineralizadas: um conjunto de filões quartzosos orientados preferencialmente E-W com pendor 45 a 60° N e uma brecha de colapso com blocos de quartzo, xisto e granito cimentados por quartzo. A espessura dos filões varia de 0,5 m a 1 m. Produziu concentrados de volframite, scheelite, calcopirite a que se associam prata, bismuto e molibdénio. A produção foi ininterrupta entre 1903 e 1983, sendo a única mina que fazia metalurgia do W. Atualmente existe o Centro Interpretativo Minas da Borralha, integrado no Ecomuseu do Barroso, que guarda um importante espólio documental das minas e desenvolve diversas atividades, pois a história da exploração destas minas, bem como a riqueza natural e paisagística do meio envolvente, constituem potencialidades de atração turística.

Murçós – Agrochão: Os filões estão encaixados no granito biotítico sin-tectónico e no contato deste com metassedimentos e têm direção NW-SE com teor médio de 2 kg/t: quartzo, scheelite, arsenopirite, turmalina, pirrotite, volframite, etc., são os minerais mais frequentes. Teve produção importante a partir de 1971 e paralisou em 1976. Em 1979 foram calculadas reservas de 648 000 t de minério explorável. O Geoparque Terras de Cavaleiros quis preservar as memórias de antigos mineiros num documentário intitulado Minas de Murçós - “As estórias das suas gentes”.

Argozelo – Vimioso: Está inserida no eixo mineralizado que compreende além desta mina as minas da Ribeira, Parada, Murçós e Ervedosa. Na mina de Argozelo dois sistemas de filões mineralizados ocorrem, um com direção N-S e outro NE-SW. Quartzo, cassiterite, scheelite, moscovite, arsenopiri-

te, pirite, pirrotite, esfalerite, estanite, etc., são os principais minerais presentes. Alguns autores atribuem ao sistema filoniano de Argozelo continuidade em profundidade. O teor médio era de 2,5 kg/t de estanho e 1,5 kg/t de volfrâmio. Em 1992 foram estimadas reservas certas de 720 000 t e cerca de 1 000 000 t de reservas prováveis. Após a cessação da exploração registou-se um abatimento do terreno pelo que uma eventual retoma da exploração deve estar definitivamente comprometida. Atualmente existe o Centro Interpretativo das Minas de Argozelo, que ajuda a perpetuar a memória viva da extração de estanho e volfrâmio e da fundição de estanho naquele local, ligando esses espaços pelas Rotas do Mineiro a outros pontos de interesse, com percursos identificados no terreno.

Outras ocorrências de tungsténio, em filões de quartzo com wolframite, por vezes associado a molibdénio, que tiveram produção foram: Ifanes e Fonte Latassa (Miranda do Douro), Vale de Urze (Mogadouro), Lagoaça (Freixo de Espada à Cinta), Carviçais (Moncorvo), Vila Flor, S. Mamede de Riba Tua (Alijó), Justes, (Vila Real), Argeriz (Valpaços) Vilarelho da Raia (Chaves), Lamas de Olo (Vila Real), Adoria (Ribeira de Pena), Telões (Vila Real), Anelhe (Chaves), Carris (Montalegre).

Mineralização de tungsténio sobre a forma de scheelite em escarnitos derivados de metamorfismo de contacto ocorrem em Cravezes – Mogadouro e em Barca D'Alva. As rochas mineralizadas são corneanas calcossilicatadas parcialmente transformadas em *skarns* ou escarnitos. A mineralização de scheelite ocorre disseminada nos níveis calcossilicatados em especial em lenticulas de escarnitos. Quartzo, anfíbola, feldspato, pirrotite, ilmenite, arsenopirite, esfena, zoizite, apatite, calcite, granada, scheelite são os minerais mais frequentes.

Jazigos de cromo (Cr), níquel (Ni) e platina (Pt)

As ocorrências de cromite estão restritas às regiões de Bragança-Vinhais e às proximidades de Morais. A cromite ocorre associada a rochas serpentínicas e peridotíticas e ocorre, quer disseminada na rocha, quer formando concentrações em bandas, lenticulas e massas (cromititos) de formas e dimensões variáveis. Trata-se de jazigos primários ligados a processos magmáticos relacionados com rochas básicas e ultrabásicas. A principal ocorrência que teve exploração regular até 1958 foi a antiga mina de Abessedo onde o teor de Cr_2O_3 variava entre 40 e 48 % e algumas massas produziram 1500 t. Outras pequenas ocorrências tiveram produção no passado, como em Alimonde (Vinhais) (Fig. 12).

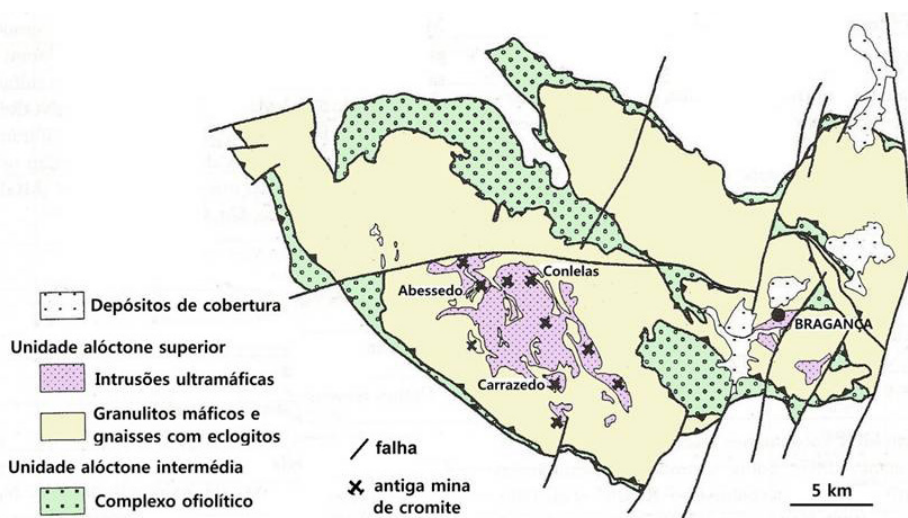


Figura 12: Mapa geológico simplificado do maciço de Bragança, com a localização das antigas minas de cromite. *In Moura, 2010, adp. de Pereira & Meireles (1998).*

Ocorrências pontuais de níquel e platinóides têm sido detetadas em bandas e lenticulas e bolsadas de rochas cromitíticas e magnetíticas em fissuras e cavidades da cromite e magnetite. Estas lenticulas estão intercaladas em rochas serpentíníticas e peridotíticas. A platina encontra-se em pequenos grãos micrométricos em cavidades e fraturas no seio da cromite e da magnetite sendo a sua presença detetada esporadicamente em Cabeço de Medeiros (Bragança), Vale da Cega (Vinhais), Abessedo, (Vinhais), Morais (Macedo de Cavaleiros). Segundo estudos recentes a Unidade de Pombais, pertencente ao ofiolito inferior do Maciço de Morais, parece ser a que revela maiores potencialidades. Em qualquer dos casos não parece existirem ocorrências com teores muito interessantes. Os metais, conhecidos como platinóides, são o ruténio (Ru), o ródio (Rh), o paládio (Pd), o ósmio (Os), o irídio (Ir) e a platina (Pt), trata-se de elementos que pelas suas propriedades específicas têm sido utilizados para as mais variadas aplicações industriais, como por exemplo na produção de catalisadores e de fármacos (Alves *et al.*, 2010). Trata-se de minérios muito interessantes, mas relativamente pobres e de potencial limitado.

Ocorrências de chumbo (Pb) e antimónio (Sb)

Trata-se de filões quartzosos encaixados em rochas xistentas. Alguns deles foram largamente explorados no passado. Os filões têm espessuras decimétricas a métricas e têm andamentos de 100 a 300 m. A mineralização é relativamente simples com quartzo, antimonite, bertierite, óxidos de fer-

ro, galena, etc. O conjunto maior de ocorrências situa-se entre Quintanilha (Bragança) e Campo de Víboras (Vimioso) ao longo do ribeiro das Maças. Outro alinhamento compreende Barca d'Alva – Lagoaça – Mogadouro. Outras ocorrências que tiveram produção no passado são Devesa de Cima (Bragança), Carreirão do Ferral (Bragança), Moinho da Gralheira e Moinho do Picão (Vimioso), Serrinha, Olgas e Terra da Mina (Mogadouro), Sítio da Coitadinha (Macedo de Cavaleiros), Cabecinha do Prado (Alfândega da Fé), Vale do Ninho (Mirandela), Ferronha e Cabeço da Roda (Freixo de Espada à Cinta). Na Coitadinha a mineralização ocorre associada a rochas metassedimentares, nomeadamente filitos, com minerais metálicos como a arsenopirrite, a pirrite, o ouro, a calcopirite, a esfalerite, a galena, a estibina, a bertierite, a calcostibite e os óxidos de antimónio (Sb); e não metálicos como o quartzo, a clorite e a calcite. Corresponde a uma mineralização epigenética epitermal de Sb-Pb (Au) (Correia, 2016).

Ocorrências de urânio (U)

Na região de Trás-os-Montes conhecem-se diversas ocorrências de urânio de pequena dimensão, repartidas pela faixa da Vilarça, faixa de Ervedosa, nos maciços de Vila Real – Vila Nova de Foz Côa, Miranda do Douro – Torre de Moncorvo. De todas merece destaque especial a da Horta da Vilarça pois trata-se dum jazigo de disseminação, onde estão reconhecidas várias ocorrências quer intragraníticas quer em metassedimentos ou junto ao contacto. A maioria das ocorrências são filonianas (filões e brechas) e algumas do tipo disseminação. A mineralização é constituída por minerais secundários de urânio: torbernite, autunite, saleíte, etc., sendo a pechblenda muito rara.

Ocorrências de lítio (Li)

Os aplitepegmatitos litiníferos com espodumena e petalite têm despertado ultimamente interesse como material cerâmico e como fonte de lítio. A região com maior potencial para o lítio é o Campo Pegmatítico do Barroso-Alvão, no qual estão definidas reservas de milhões de toneladas de mais de 1 % de Li_2O com origem em pegmatitos, quer de petalite quer de espodumena. A empresa australiana Dakota Minerals, que está a desenvolver a prospeção de lítio para baterias em Trás-os-Montes, confirma a existência, depois de mais de 50 perfurações feitas em Cepeda (Montalegre), de uma das maiores reservas da Europa, estimadas em 10,3 megatoneladas (milhões de toneladas) de pegmatito com lítio-césio-tântalo, onde se encontram concentrações de 1 % de óxido de lítio e de 0,05 % de estanho (*). Portugal é considerado um dos dez maiores potenciais produtores de lítio, a nível mundial, pelo

que o lítio será o metal estratégico mais importante para o séc. XXI, já que é largamente referido no estudo “Critical raw materials for the EU”.

Trabalhos de cartografia realizados nos filões aplitopegmatíticos da região de Ribeira de Pena – Boticas – Vila Pouca de Aguiar levaram à descoberta de espodumena, petalite e por vezes lepidolite em alguns deles. Os filões são em geral lenticulares e têm possanças de alguns metros até cerca de 30 m e extensões de centenas de metros e estão encaixados em xistos silúricos. Alguns destes filões foram reconhecidos com sondagens como aconteceu nos filões de Veral (Boticas), Adagói (Vila Pouca de Aguiar) e Alijó (Ribeira de Pena). Foram definidas áreas onde o mineral de lítio predominante é a espodumena e outras onde é a petalite. Dos quatro locais em Portugal que foram sondados para eventual exploração de lítio, só Covas do Barroso, em Boticas, “tem claramente viabilidade económica”, por conter espodumena (Alexandre Lima, declarações ao Observador).

A presença de minerais de lítio permite baixar o ponto de fusão das pastas cerâmicas pelo que tem vindo a despertar o interesse das empresas que exploram estas matérias-primas. Trata-se duma região com grandes potencialidades para produção de matérias-primas cerâmicas e de minerais de lítio em simultâneo.

5. Recursos minerais não metálicos

5.1. Substâncias Minerais Concessíveis

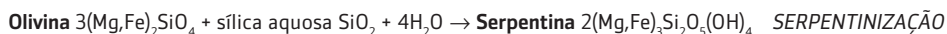
Compreendem minas ou ocorrências de talco, barite, quartzo e/ou feldspato, amianto em geral de pequena dimensão, algumas parcialmente exploradas no passado. Incluem-se ainda neste grupo as águas minerais naturais. Destes recursos têm importância a produção de talco, nomeadamente a concessão de Sete Fontes e a concessão Alto da Caroeira (Bragança), onde houve uma pequena exploração de barite e a concessão Seixigal (Vidago), que constituiu um importante produtor de quartzo e feldspato para a indústria cerâmica.

Talco

As principais ocorrências distribuem-se nas áreas de Bragança-Vinhais (Fig. 13) e Vale da Porca (Macedo de Cavaleiros) em associação com afloramentos de rochas ultrabásicas serpentínicas e outras dos complexos alóctones intermédio e superior que sofreram metassomatismo.

A esteatização, antecedida pela serpentinização, é promovida pela circulação de fluidos aquo-silicatados e carbonatados tardios ao longo de falhas

e carreamentos, sendo bem conhecidas as potencialidades desta matéria-prima mineral. As reações são as seguintes:



Na região de Bragança–Vinhais estão localizadas as principais reservas de talco do país sendo as ocorrências mais importantes Sete Fontes, Soeira n.º 1, Pena Maquieira, Castrelos, Serra de Soeira n.º 3. As reservas existentes estão preservadas por força da concessão de Sete Fontes (Fig. 13). Apesar de parcialmente inserida na área do Parque Natural de Montesinho, a concessão é anterior à criação do Parque, pelo que tem direitos adquiridos. De qualquer modo a exploração deste recurso mineral terá que ter em conta a minimização dos impactes ambientais originados. A concessão de Sete Fontes tem tido larga exploração e tem sido estudada em detalhe.

As ocorrências de talco de Macedo de Cavaleiros estão localizadas nas regiões de Vale da Porca, Talhinhas e Talhas. Trata-se de ocorrências lenticulares de pequena e média dimensão (não ultrapassam em geral duas centenas de metros e 10 m de espessura). As dimensões das lenticulas aflorantes levam a admitir que constituem cada um *per si* reservas limitadas. Na região de Vale da Porca são conhecidas várias ocorrências relacionadas com o afloramento de uma lenticula alongada NE-SW de rochas peridotíticas da unidade alóctone superior.

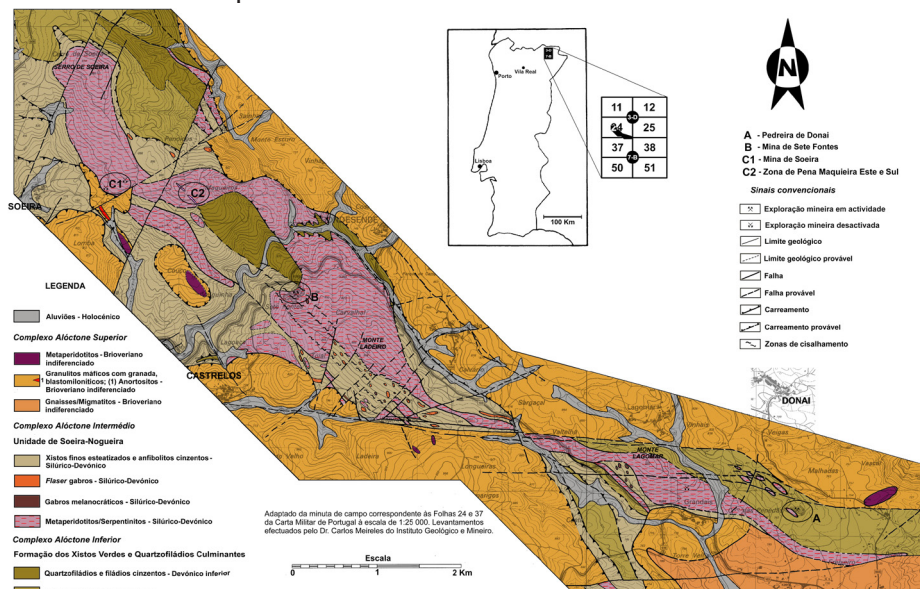


Figura 13: Carta geológica da área de Soeira-Castrelos-Donai com as explorações de talco no maciço de Bragança (in Teixeira, 2000, adap. Carta geológica 3D- Espinhosela).

Durante vários anos a exploração principal centrou-se na antiga mina Cabeço da Mina. Várias ocorrências lenticulares estão cobertas pelas concessões de Vale da Porca, Prado e Salselas. Na região de Talhinhos e de Talhas as ocorrências principais compreendem várias lentículas por vezes com disposição em “rosário” com espessura e extensão inferiores a 8 m e 200 m, respetivamente.

Amianto

Nome comercial dos minerais asbestiformes, fibrosos, dos grupos da serpentina (filossilicato) ou da actinolite (anfíbola- inossilicato) ocorre em pequenas jazidas com reservas conhecidas muito limitadas e em relação direta com os afloramentos de rochas serpentínicas dos complexos ofiolíticos de Bragança-Vinhais e de Morais. Preenche fraturas sob a forma de fibras “cross”, de dimensão pequena e média. As reservas são diminutas nas ocorrências conhecidas no Norte de Portugal, salientam-se as de Penouços, Serra de Soeira (Bragança), Morais, Lameirão, Penedros (Macedo de Cavaleiros). Áreas das antigas concessões mineiras, já foram libertadas e poderão ser utilizadas para outros usos. Atualmente o amianto está a ser banido das diversas aplicações industriais onde tem sido utilizado (fibrocimento, isolamento, etc.) pelo facto de ser considerado potencialmente cancerígeno.

Barite

São conhecidas 3 ocorrências de barite na região de Bragança: Alto da Caroeira, próximo de Aveleda, (Fig. 14) Edrosa e Rigueiral. As principais reservas estão localizadas na concessão Alto da Caroeira onde se admitem cerca de 4000 t de reservas. A barite é de origem sedimentar e forma lentículas com orientação NE-SW, interestratificados com níveis vulcano-sedimentares silúricos ricos em sulfuretos. Em Edrosa trata-se de pequenas lentículas de barite reconhecidas por trabalhos mineiros. Na ocorrência Rigueiral nunca houve trabalhos mineiros. As reservas de barite de Trás-os-Montes, apesar de limitadas, são das principais reservas disponíveis do país.



Figura 14: Exploração rudimentar de barite no Alto da Caroeira, Aveleda, em 2008.

Quartzo e Feldspato

São explorados como fontes de quartzo e feldspatos diversos tipos de rochas nomeadamente: pegmatitos graníticos, filões e massas aplitopegmatíticas, filões quartzosos, e depósitos de areias feldspáticas.

Os pegmatitos graníticos explorados são, em geral, do tipo cerâmico e formam jazigos algo irregulares embora predominem os pegmatitos em forma de pequeno batólito, filão ou lenticula. São frequentemente zonados contendo um núcleo predominantemente quartzoso, uma zona intermédia com quartzo e feldspato grosseiros por vezes com berilo e mica e uma zona periférica com quartzo, feldspato, mica de granulado fino. É nítida a associação dos principais corpos pegmatíticos cerâmicos com o afloramento do granito de grão grosseiro porfiróide, predominantemente biotítico. Este tipo de jazigos tem sido produtor importante de materiais cerâmicos, quartzo, feldspato sódico e potássico. Tiveram exploração intensa nas décadas de 1970 a 1990 para produção de quartzo enquanto se mantiveram em atividade as metalurgias de silício metal e ferro silício do nosso país. Alguns continuam a ter uma pequena produção de quartzo e de feldspato. Como ocorrência principal da região transmontana, destaca-se a mina Seixigal (Vilas Boas – Vidago). Este último foi largamente explorado até que se considerou aparentemente esgotado. Constituiu um importante fornecedor de feldspato e quartzo. São ainda de referir as ocorrências de Alto das Forçadas (Serra das Alturas), Alto da Corneta, Monte da Alvorada (Montalegre) e Avinhó (Murça).

Aplitopegmatitos são particularmente abundantes na região de Boticas – Ribeira de Pena – Vila Pouca de Aguiar onde foram largamente explorados no passado como minas de estanho (nióbio e tântalo). Alguns destes filões são hoje vistos como produtores de materiais cerâmicos em especial aqueles que contêm teores de lítio significativos (Fig. 15).



Figura 15: Exploração pela Felmica, de pegmatito com petalite ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_{10}$) para a cerâmica, em Lousas, Boticas (2017).

Filões Quartzosos

Afloram em geral na bordadura dos maciços graníticos, quer no interior quer na envolvente xistenta dos maciços graníticos. Podem ser filões quartzosos compactos, quer brechificados. Estes apresentam por vezes dimensões notáveis constituindo alinhamentos de lentículas que preenchem fraturas com direção preferencial NNE-SSW, NE-SW entre outras. O quartzo tem sido explorado para a indústria cerâmica, cargas, inertes etc. Em Trás-os-Montes salientam-se, entre outros, na região de Bragança, Santa Comba de Rossas e Quintela de Lampaças e na região de Chaves – Boticas, um conjunto de antigas concessões e ocorrências denominadas Monforte, Costa N.º1, Condamo N.º1, Alto Queimado, Serra da Olga, Serra da Ribeira, Serra do Ferro, Alto da Navalheira, Seixo Branco N.º 3. Este conjunto forma um extenso filão de quartzo brechificado com cerca de 28 km e que constitui ainda uma importante reserva de quartzo. Referem-se ainda as ocorrências da Serra das Alturas nas regiões de Bobadela e Sapelos, na serra da Padrela e na região de Mondim de Basto.

Caulinos

Na região transmontana conhece-se apenas a exploração de saibro caulínico, derivado de rocha aplito-pegmatítica alterada, que está ativa na região de Ribeira de Pena (Lamelas) sendo, como foi referido, o material explorado (quartzo, feldspato, caulino) aplicado na indústria cerâmica de barro branco.

5.2. Substâncias Não Concessíveis

Os recursos minerais existentes na região Norte que não pertencem ao grupo das substâncias concessíveis são argilas comuns, rochas industriais e ornamentais, areias, saibros e águas de nascente. Apesar de limitado o número de explorações de pedreiras, barreiros, areiros numa área onde ocorre uma tão grande variedade de rochas, produzem-se aqui alguns recursos minerais importantes para a economia da região e do país.

Argilas Comuns

Na região transmontana no que respeita à produção de argila são importantes os Barreiros da bacia de Chaves e das regiões de Sendas e Vale da Porca (Macedo de Cavaleiros), Babe (Bragança), Sendim (Miranda do Douro) e Variz (Mogadouro) que contribuem para o abastecimento da indústria cerâmica regional. As principais reservas de argilas situam-se na bacia de Chaves, na região de Vilar de Nantes sendo importante preservar os depósitos de sedimentos cenozoicos nomeadamente no planalto mirandês, com barreiros e areiros cuja exploração recorre normalmente à utilização de retroescavadoras.

Granitos

Rochas graníticas e granitóides de diferentes tipos afloram largamente em Trás-os-Montes ocidental (Fig. 3). São por isso frequentemente utilizadas na construção como pedra industrial e ornamental. A exploração da pedra granítica constitui em algumas áreas uma tradição de há muitos anos e representa o único recurso de que dispõem em áreas deprimidas e desertificadas do interior. No que diz respeito à produção de inertes (graníticos) as pedreiras existentes são suficientes para o abastecimento regional. Regista-se também uma produção significativa de inertes (areias) que abastecem a construção civil e obras públicas. Entre outras citam-se as regiões de Mondim de Basto (Sr.^a da Graça), os granitos amarelos de Vila Real e Serra da Falperra, o granito cinzento das Pedras Salgadas, o granito cinzento de Telões, o granito amarelo de Luzelos, o granito azul Tragal, o granito cristal azul Transmontano.

Granitos utilizados como pedra industrial

Grande número de explorações cujo fim principal é a produção de inertes - britas, gravilhas, areias, pó de pedra e rachão. São em especial preferidos os granitóides de granulado médio a fino sem foliação, mas os granitos porfiróides grosseiros e granitos de duas micas com foliação têm tido também utilização em certas regiões.

Como núcleos principais de produção da região transmontana salientamos: os granitos de duas micas que são explorados na região da Serra da Falperra e Parada de Cunhos (Vila Real), Sr.^a da Graça (Mondim de Basto), S.^{ta} Comba de Rossas (Bragança), Tó (Bemposta), Pisões (Montalegre), Samões (Chaves), Torre de D. Chama, Romeu. Granitos biotíticos são explorados em Ifanes e Vila Ch (Miranda do Douro), Rebordelo (Vinhais), Vilares (Boticas), Soutelo (Pedras Salgadas) e St.^o Estevão (Chaves).

Granitos utilizados como pedra ornamental

As condições geológicas e estruturais dos maciços, bem como as suas características físico-mecânicas, petrográficas e outras têm permitido o aproveitamento de muitos afloramentos de granitos para pedra ornamental, quer seja a produção de blocos para obtenção de chapa polida, quer artefactos diversos como cubos, guias, alvenarias, perpianho, estatuetas, etc.

Duma maneira geral trata-se de pequenas e médias pedreiras que são importantes na economia da região. No que diz respeito às cores são produzidos granitos cinzentos-claros (comercialmente designados brancos), granitos cinzentos azulados, granitos cinzentos escuros, granitos rosados e amarelos. A produção de granitos ornamentais transmontanos está concentrada em núcleos importantes, nomeadamente nas regiões da Serra da Falperra – Pinhão Cel (Vila Real – Sabrosa – Vila Pouca de Aguiar) (Fig. 16), Sr.^a da Graça (Mondim de Basto), onde se produzem granitos amarelos, e de Pedras Salgadas e Telões (Vila Pouca de Aguiar) onde se produzem granitos cinzentos porfiróides. Enquanto nas pedreiras de granito amarelo se exploram as zonas mais superficiais alteradas do maciço e raramente atingem 10 m de profundidade, nas pedreiras das Pedras Salgadas essa profundidade pode atingir mais de 60 m (Fig. 16).



Figura 16: Pedreiras de Granito Cinza em Pedras Salgadas e Amarelo Real, nas imediações de S. Bento, foto de Martinho Lourenço.

Os vários tipos de granitos ornamentais transmontanos estão estudados e constam do Catálogo de Rochas Ornamentais de Portugal “Cinzeno Pedras Salgadas”, “Cinza Telões”, “Azul cristal” (Águas Frias – Chaves), “Azul Tragal” (Bruçó-Mogadouro), “Amarelo Luzelos” “Amarelo Vila Real” e “Branco Candoso” (Carrazeda de Ansiães). Contudo, em numerosas pedreiras que estão dispersas pela região transmontana, como em Caçarelhos (Vimioso), Tó (Mogadouro), Carvalho d’Egas e Luzelos (Carrazeda de Ansiães), Meixide e Morgade (Montalegre), Cerdedo (Boticas) e Boticas também têm sido produzidos granitos amarelos. Granitos cinzentos também têm sido extraídos em Moimenta (Vinhais), Bruçó (Mogadouro), Águas Frias (Chaves). Granitos cinzentos claros têm sido produzidos em Candoso (Carrazeda de Ansiães). Há potencialidades para extrair granitos brancos em Romeu (Mirandela). Em termos de ordenamento do território e atendendo à sua importância para a indústria extrativa são de realçar as áreas de Pedras Salgadas para a qual está delimitada uma área cativa, a área da Serra da Falperra – Pinhão Cel – S. Bento (Vila Real – Sabrosa – Vila Pouca de Aguiar) onde se obtém uma parte muito significativa da produção de granito amarelo português e que foi objecto de delimitação duma área reservada para a indústria extrativa (Sousa, 2016). Também na região de Sr.^a da Graça (Mondim de Basto) foi definida uma área para extração de granitos (Amarelo Mondim) em equilíbrio com a preservação paisagística e o interesse turístico.

Calcários

Foram no passado explorados em S.^{to} Adrião (Vimioso) onde ocorrem também mármore e em algumas grutas da rocha calcária, alabastros. Os calcários e mármore afloram numa extensão aproximada de 5 km por 250 m de espessura máxima. Aqui ocorre o único afloramento de rochas carbonata-

das transmontanas com interesse económico. Outras ocorrências de rochas (meta)carbonatadas são conhecidas em Fonte Colaça, Montoito e Fonte Ladrão (Vimioso), S. Pedro de Sarracenos, Dine e Cova de Lua (Bragança), Salselas (Macedo de Cavaleiros), Gebelim (Alfândega da Fé), calcários negros são conhecidos em Abaças, Campanhó e Sobrido (Vila Real) e Adorigo (Tabuaço). Mármore ocorrem na região de S.^{to} Adrião (Vimioso) e mármore brancos finos de estrutura sacaróide de grande qualidade e mármore cinzentos em S. Pedro da Silva (Vimioso) e Castro Vicente (Mogadouro). Não têm produção atualmente para aplicação industrial ou ornamental.

Areias Comuns

As necessidades de areias para a construção civil têm vindo a ser superadas recorrendo a finos de britagem de granitos, crivagem e lavagem de depósitos sedimentares areno – argilosos de idade cenozoica, crivagem e lavagem de saibros e exploração de antigas escombrelas de minas de estanho. A exploração de areias no leito dos cursos e linhas de água está actualmente bastante condicionada por razões ecológicas e de impacto ambiental pelo que não ocorre actualmente qualquer exploração. No entanto, a pressão da construção civil exige a exploração de areias lavadas e calibradas de boa qualidade. Tem sido feita face à escassez de produção com as areias obtidas por drenagem do canal de navegabilidade do rio Douro e na região de Trás-os-Montes. Por crivagem e lavagem de depósitos areno argilosos e cascalhentos têm sido produzidos inertes em Caçarelhos (Vimioso), S.^{ta} Comba de Rosas e Sendas (Bragança), Vale da Porca (Macedo de Cavaleiros), Vila Nova das Patas e Carvalhais (Mirandela). Por crivagem e lavagem de saibros há explorações em Picote (Miranda do Douro), Bemposta (Mogadouro), Vilares da Vilariça (Alfândega da Fé), Moimenta (Vinhais), Vale da Telha (Valpaços), Samões (Vila Flor), Vila Verde da Raia, Mochos, Sto Estêvão e Ervededo (Chaves), Boticas, Rebordochão e Guilhado (Vila Pouca de Aguiar), Presandães (Alijó), Vilar de Viando (Mondim de Basto). Por exploração de antigas escombrelas de minas abandonadas em Vale das Gatas (Sabrosa) e Leirós (Vila Real). Têm sido localmente explorados inertes nos leitos de cursos de água como em Estevais (Moncorvo), Nogueira (Boticas) e Fontanelas (Régua).

Ardósias

Na região de Mascozelo - Pardelhas (Vila Real) têm estado a ser produzidas ardósias de qualidade razoável e havendo reservas importantes. Também na região de Montesinho (Bragança) afloram lousas, mas o facto de se situarem dentro do Parque Natural e tendo em atenção a sua inferior qualidade, devi-

do à fracturação do maciço e ao facto deste ser cortado por filonetes quartzosos e aplitopegmatíticos, levam a considerar esta área com menor potencial. Há ainda potencialidades a não desprezar para produção de rochas xistentas cliváveis com possibilidade de produção de diversos tipos de cores.

Quartzitos

Têm sido produzidos na região da Serra da Garraia (Murça) quartzitos xistentos de cor bege clara para obtenção de placas para pavimento. Insere-se na formação dos quartzitos superiores de idade silúrica. Trata-se duma pequena exploração artesanal, mas é a única que produz este material pelo que deve ser apoiada, contudo há potencialidades para outras explorações (Fig. 17).



Figura 17: Excerto da carta geológica nº2, escala 1:200 000, a este de Murça localizando a exploração de quartzitos da Serra da Garraia.

Peridotitos, Serpentinitos e Anfibolitos

No maciço de Morais peridotitos são explorados na estrada de acesso a Talhas e Talhinhas (Macedo de Cavaleiros), numa grande pedreira. São rochas muito fraturados e serpentinizados com veios de jaspe e opala. Peridotitos têm também sido explorados em Rica Fé (Bragança) (Fig. 4) para obtenção de placas e laje para pavimentos, são rochas negras e compactas. A sua alteração hidrotermal leva à formação de serpentinitos.

O serpentinito foi explorado na região de Donai e comercializado como “Verde Donai” (Bragança), porém a pedreira encontra-se abandonada. O afloramento de pequenas dimensões permitia, no entanto, obter blocos de pedra de grande beleza e de qualidade para produção de chapa polida (Fig. 18). Esta área deve ser protegida para a indústria extrativa.



Figura 18: Altar principal e pormenor deste e ambão em serpentinito de Donai, existentes na igreja matriz de Murçós.

Uma pedreira de anfíbolitos situa-se na Unidade Izeda-Remondes, pertencente ao Complexo Ofiolítico de Morais e foi explorada em Porrais (Mogadouro), atualmente esta ´ em exploração outra pedreira em Olmos (Macedo de Cavaleiros).

Xistos

Rochas xistentas (xistos, grauvaques, quartzitos, etc), são normalmente utilizadas como pedra de construção nas áreas rurais onde afloram rochas xistentas. São utilizados nas construções de muros, revestimentos de edifícios, pavimentos, etc. As explorações de xistos têm em geral pequena expressão na região. Têm sido produzidos nas regiões de Aveleda e Gimonde (Bragança) em Eucísia (Alfândega da Fé) e na região de Salgueiro para produção de placas clivadas para pavimento e revestimento. Trata-se de pequenas explorações para satisfazer a procura local, mas que devem ser apoiadas. As explorações de xisto do Poio em Vila Nova de Foz Côa estão em atividade desde 1850, período em que se fez sentir um forte incremento da atividade vitivinícola no Douro Superior. Durante décadas estas pedreiras foram o sustento de muitas famílias sendo sem dúvida um pilar económico no desenvolvimento do concelho e região. Daqui, partiram milhões de esteios de xisto que contribuem de forma decisiva para o carácter paisagístico da Região Demarcada do Douro. Atualmente são sobretudo para exportação e em grandes esteios, já que a relação feliz, que existe entre as estruturas geoló-

gicas (xistosidade e estratificação) quase perpendiculares, assim o permite. No Campus da UTAD dois grandes monólitos de xisto de Foz Côa marcam o início e o fim da Galeria Alumni.

Os xistos de Trás-os-Montes e Alto Douro foram considerados como um interessante recurso endógeno com a possibilidade de gerar valor acrescentado numa região economicamente desfavorecida (Noronha *et al.* 2011).

6. Conclusões

A presença na região de Trás-os-Montes e Alto Douro de rochas magmáticas de natureza ácida, básica e ultrabásica e metassedimentos, afetados pela orogenia varisca no final do Paleozoico, criou condições para a génese de uma grande diversidade de recursos metálicos. Posteriormente, a orogenia alpina e os processos erosivos desmantelaram a cadeia orogénica e expuseram à superfície ou próximo dela, esses materiais, permitindo a sua exploração e modelando a paisagem atual. A região de TMAD tem potencialidades para fornecer recursos minerais metálicos e não metálicos, sendo importante proceder-se à reavaliação desses recursos, usando novas metodologias de SIG, dado que alguns deles foram já intensamente explorados. É importante preservar esses recursos minerais e sensibilizar os autarcas e decisores políticos para a sua existência e situação real. Dada a dimensão do país, a região de TMAD ocupa um lugar destacado quer no que se refere a minérios metálicos, matérias-primas para aprovisionamento industrial, quer em recursos não metálicos, nomeadamente na exploração e transformação de granitos ornamentais.

A situação derivada da atividade mineira que explorou recursos minerais metálicos nos distritos de Bragança e Vila Real só localmente virá a ser reativada. Assim, a maioria dos locais poderá ser aproveitada para fins ambientais e culturais, bem como ser utilizada para a dinamização do turismo científico e em espaço rural, através da elaboração de roteiros turísticos que integrem a arqueologia industrial mineira como património geológico, ambiental e cultural, pois felizmente na maioria das situações a mãe natureza encarregou-se de remediar os antigos problemas ambientais causados pela indústria extrativa. O lítio é, no presente, o metal mais procurado na prospeção de novas áreas, podendo no futuro haver explorações sobretudo na região do Barroso-Alvão.

No que respeita aos recursos geológicos não metálicos de TMAD, que se incluem no grupo dos Depósitos Mineraiis, em termos de Ordenamento do Território, poderá dizer-se que as principais reservas estão protegidas por estarem abrangidas por concessões mineiras ativas. Os filões de pegmatitos

e aplitopegmatitos são as principais fontes de materiais cerâmicos. A exploração de granitos, quer para fins industriais, quer ornamentais, tem ainda grande potencial e deverá ser feita por forma a garantir as melhores técnicas de exploração e transformação em áreas licenciadas para o efeito.

Bibliografia e Webgrafia

- Alves, F. E., Priscila Pereira Silva, P.P. E Guerra, W. (2010) Química 119, Out/dez10, 27-33 In: <http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/649/article/30001594/pdf> consultado em 20 de dezembro 2020
- Brundtland, G.h. (1987). “Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: o nosso futuro comum”. Universidade de Oxford. Nova Iorque. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/12906958> consultado em 20 de dezembro 2020
- Correia, C.P.R. (2016) Mineralizações de Antimónio em Trás-os-Montes – O caso de estudo da mina do Sítio Da Coitadinha. *Tese de Mestrado em Geologia*, FCUP. Univ. Porto. 59pgs.
- D’orey, F. L. C. (1998). The Detrital Origin of the Moncorvo Ordovician Ironstones. *Ciências da Terra (UNL)*, 13, 131-140.
- Farinha, J. A. L. B. & Lima, A. M. C. (2000) – Estudo dos filões aplitopegmatíticos litíferos da região Barroso Alvão (Norte de Portugal). *Estudos Notas e Trabalhos Instituto Geológico e Mineiro*. Tomo 42. 3-49.
- Lourenço, J.M.M., Sousa, L.M.O., Oliveira, A.S. (2013) Rota da Pedra, ISBN: 978-972-704-374-3. Vila Real, UTAD. 107pgs.
- Moura, A.c. & Martins, O. R. (1983). *Catálogo de rochas ornamentais portuguesas*. Porto: Direcção Geral de Geologia e Minas.
- Moura, A. (2010) - Metais e Semi-metais de Portugal. Palimage, 156 pgs
- Neiva, A. (1992). Geochemistry and evolution of Jales granitic system, northern Portugal. *Chemie der Erde* 52: 225-241.
- Noronha, F. (1988) – Mineralizações. *Geonovas*. vol. 10. p. 37-5
- Noronha, F., Ramos, J. M. F. (1993) – Mineralizações auríferas primárias no norte de Portugal. Algumas reflexões. *Cuadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*. vol. 18. 133-146.
- Noronha, F., Ribeiro, M. A., Almeida, A., Dória, A., Guedes, A., Lima, A., Martins; H.C., Sant’Ovaia, H., Nogueira, P., Martins T., Ramos, R., Vieira, R. (2013) – Jazigos filonianos hidrotermais e aplitopegmatitos espacialmente associados a granitos (norte de Portugal). *Geologia de Portugal vol. I Geologia Pré-mesozóica de Portugal*. 403-438.
- Noronha, F., Aires, S., Carvalho, C., Ramos, J.F., Moura, C., Moura, R., Sant’ovaia, H., Ramos, V. (2011) Os Xistos como Recurso. O caso de Trás-os-Montes e Alto Douro. Livro de Actas em CD, do VI Seminário Recursos geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território, UTAD; Vila Real, 167-174.
- Nunes, A. F. (1983) – A geologia económica e a Indústria Mineira através dos tempos. *Geonovas*. N.º 5. 67--114.
- Pereira, E. & Meireles, C. (1998) Metais preciosos em Portugal. Situação da investigação geológica e mineira, *Est. Not. e Trabalhos*, IGM, T. 40, pp.3-34.

- Pereira, D.I., Pereira, P., Brilha, J., Cunha, P.P. (2015). The Iberian Massif Landscape and Fluvial Network in Portugal: a geoheritage inventory based on the scientific value. *Proceedings of the Geologists' Association*, 126 (2), pp. 252-265.
- Pereira D. I. & Pereira P. (2014). Relevo no âmbito da inventariação do património geológico português. *Geonovas*, 27, 77- 82
- Pereira, E., Ribeiro, A., Meireles, C. (1993) – Cisalhamentos hercínicos e controlo das mineralizações de Sn-W, Au e U na Zona Centro-Ibérica em Portugal. *Cuadernos Lab. Xeológico de Laxe*. vol. 18. 89-119.
- Ribeiro, M.A. (1998). Estudo litogeoquímico das formações metassedimentares encaixantes de mineralizações em Trás-os-Montes Ocidental. Implicações metalogénicas. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal., 231pp.
- Rodrigues, J. Pereira, E., Ribeiro, A., (2013) – Complexo de Mantos Parautóctones do NE de Portugal; estrutura interna e tectonoestratigrafia. *Geologia de Portugal vol. I Geologia Pré-mesozóica de Portugal*. 275-332.
- Rosa, D. (2003). Evolução do fluido mineralizante no distrito aurífero de Jales. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, nº esp. V, CD-ROM, B97-B100
- Sousa, L. (coord.) (2012). Os granitos de Vila Pouca de Aguiar como factor de desenvolvimento regional- Uma abordagem multidisciplinar. ISBN: 978-972-704-375-0.
- Sá, A. A., Meireles, C., Coke, C., Gutiérrez-Marco, J. C. (2005). Unidades litoestratigráficas do Ordovício da região de Trás-os-Montes (Zona Centro-Ibérica, Portugal). *Comunicações Geológicas*, I.N.E.T.I., t. 92, 31-74.
- Teixeira, R. J. S. (2000). Serpentina, asbesto e talco: Impacte ambiental das suas explorações no Nordeste de Portugal. Tese de mestrado, Univ. Coimbra, Portugal.
- Urbano, E.E.M.C. (2017). Génesse do jazigo de ferro de Moncorvo e avaliação do uso de equipamentos portáteis de FRX e DRX para a exploração mineral deste tipo de jazigos. Tese de doutoramento, UTAD. file:///C:/Users/USER/Downloads/VERSOFINAL2018-02-13.pdf

(*) <http://www.jornaldenegocios.pt/empresas/industria/detalhe/tras-os-montes-australianos-confirmam-uma-das-maiores-reservas-de-litio-da-europa> consultado em 20 de dezembro 2020

<https://geoportal.lneg.pt/pt/bds/siorminp/#!/> consultado em 20 de dezembro 2020

<http://edm.pt/> consultado em 20 de dezembro 2020

<http://www.dgeg.pt/> consultado em 20 de dezembro 2020

<https://observador.pt/2020/08/22/dos-locais-sondados-para-litio-so-boticas-tem-claramente-viabilidade-economica/> consultado em 20 de dezembro 2020

<http://tresminas.com/> consultado em 20 de dezembro 2020

<http://www.ecomuseu.org/index/pt-pt/visite/polos/ecomuseu-barroso-centro-interpretativo-das-minas-da-borralha> consultado em 20 de dezembro 2020

<http://geoparkterrasdecavaleiros.net/pt-pt/content/g05-minas-de-mur%C3%A7%C3%B3s> consultado em 20 de dezembro 2020

<https://observador.pt/2020/06/19/aethel-mining-estima-producao-de-300-mil-toneladas-de-concentrado-de-ferro-em-moncorvo-ate-final-do-ano/> consultado em 20 de dezembro 2020

<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/26833> consultado em 20 de dezembro 2020

<https://www.youtube.com/watch?v=HySkRAeKaNs> consultado em 20 de dezembro 2020

<https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/3043/1/Cap%203.pdf> consultado em 20 de dezembro 2020

4 capítulo

Panorâmica sobre condições naturais de ocorrência de minérios de lítio no Norte de Portugal – Perspectivas de valorização e produtos de alteração e decaimento

Carlos A. A. Leal Gomes

Lands/Lab2PT - Laboratório de Paisagens, Património e Território (FCT UID/AUR/04509/2013; FEDER COMPETE POCI-01-0145-FEDER-007528) e Escola de Ciências, Universidade do Minho, Braga, Portugal.

Email: carloslealdb@gmail.com

1. Introdução

Decidiram os editores da obra “Recursos Geológicos de Trás-os-Montes – Passado presente e perspectivas futuras” promover um segundo livro sobre este tema, incorporando conteúdos que não tinham sido tratados no primeiro. Também sugeriram revisões de outros que exigissem alguma atualização. No caso da panorâmica sobre recursos de lítio metálico (Li), pouco mudou no decurso dos três anos que transcorreram, facto a que não foi estranha alguma atenuação de movimentações ao nível dos processos de licenciamento de jazidas e também uma desaceleração observada na procura global de Li metálico. Os valores unitários do metal também sofreram decréscimos significativos e a situação de pandemia sanitária instalada contribuiu parcialmente para atenuar a tendência de interesse crescente que se esboçava, atrasando globalmente todas as intenções de investimento mais arrojado no sector extrativo.

Neste contexto, e procurando corresponder a uma intenção de alargamento do conteúdo, julgou-se pertinente e de utilidade científica e tecnológica anexar a esta panorâmica uma abordagem químico-mineralógica à diversidade de produtos de alteração de minerais de Li primários, que é típica, especialmente, de depósitos minerais aplito-pegmatíticos da região Ocidental de Trás-os-Montes. Tal diversidade implica uma heterogeneidade significativa e errática dos teores de Li observados nos pegmatitos já identificados. Por isso origina desafios tecnológicos complexos no que diz respeito às soluções de mineralurgia a adoptar para cada jazida e além disso promove uma tendência de empobrecimento dos teores recuperáveis face ao alastramento da alteração. Justificando-se uma familiarização do sector da mineração

pegmatítica com estas substâncias depressoras do teor, achou-se por bem construir em anexo como um atlas imageológico de feições litológicas (ilustrações de texturas e propriedades mineralógicas), que permitissem uma discriminação dos diferentes produtos de alteração em frentes de desmonte e em operações de beneficiação.

Em termos gerais, para caracterizar o aprovisionamento global do Li continua a ser adequado usar como referência o ano de 2017. Tem-se mantido o panorama aí observado no que respeita a trajetos de produção e mercado do Li, entendido como metal expresso numa molécula estável e apta do ponto de vista tecnológico. A transição energética mantém como vector essencial a modificação da locomoção automóvel, de “dependente da combustão de derivados do petróleo” para “dependente da eletricidade acumulada em baterias de iões de Li” e é responsável por uma parte importante das tendências de aprovisionamento.

Os relatórios da Comissão Europeia sobre a criticalidade dos metais no Espaço Europeu (em função da disponibilidade de recursos e fontes externas de aprovisionamento) continuam a situar este metal muito próximo do domínio dos metais críticos (Figura 1). Persiste a possibilidade de revisão do seu estatuto atendendo a que os fatores de classificação crítica são bastante volúveis. É exemplo disso o fato de a crise económica global de 2008 ter tido um forte impacto na procura do Li, influenciando menos o mercado de muitos outros metais. A procura de Li metálico (considerado como carbonato de Li equivalente – CLE – substância real ou virtual sob cuja forma é cotado e comercializado internacionalmente o Li metálico) desceu 20 e 30% em 2008 e 2009 e o montante das transações de compostos de Li diversificados desceu cerca de 43% neste período. Os preços do Li metálico caíram para cerca de 5000 dólares por tonelada no início de 2010.

O valor unitário actual do CLE é muito mais interessante, mas não é estável. A última revisão da Comissão Europeia dedicada ao preço dos metais, admitiu que se assistiria a um crescimento mais ou menos consistente das cotações até 2020. A sobre-capacitação de alguns fornecedores principais pode levar a quedas conjunturais do valor de mercado e também a grandes dificuldades de previsão da evolução dos preços a partir de 2020.

na reciclagem, privilegiando empresas envolvidas no aprovisionamento de materiais litiníferos, manufatura de baterias e reciclagem.

Um fato relevante, vem, contudo, refrear a aparente importância estratégica do Li para a locomoção. A nível empresarial estão já a ser investigadas alternativas à hegemonia energética prevista para o Li. A pesquisa mais séria conhecida diz respeito ao desenvolvimento de baterias recarregáveis de magnésio e enxofre que poderiam proporcionar o dobro da capacidade das atuais baterias de Li. Esta tecnologia e outras similares, ainda estão muito longe (no tempo) das condições de efetiva comercialização mas há que contar com a sua influência no futuro mercado do Li.

Ao nível da gestão de recursos naturais, o rápido crescimento da procura de Li para baterias de veículos está a causar alguma ansiedade dos mercados equacionando-se mesmo alguns cenários de penúria e exaustão, pela enorme concentração de componentes diferenciadas das fileiras e cadeias de valor em apenas alguns países: 80% da massa de recursos concentrada na América do Sul; 70% do Li fornecido por apenas três produtores que por isso monopolizam o fornecimento; 54% da procura centrada na Coreia do Sul, China e Japão.

Nestas circunstâncias será de considerar uma problemática de aprovisionamento com numerosos estrangulamentos e contenciosos previsíveis, similar àquela que se tem verificado no caso do petróleo?

A questão do Li deve ser examinada, tal como se faz com o petróleo à luz da sua divisão, entre a massa de recursos e a sua explorabilidade efetiva.

Uma avaliação atual da massa global de recursos acessíveis está patente no Quadro 1.

Quadro 1: Países que atualmente quase monopolizam a disponibilidade de massa global de recursos de Li.

Ordem	País	Massa potencial milhões de toneladas (Mt)
1	Bolívia	9.0
2	Chile	7.5
3	Argentina	2.5
4	China	2.5
5	USA	2.5

Estes valores estão em mutação constante pois numerosos projetos de prospecção e reavaliação de reservas estão em curso e têm efetivamente proporcionado resultados capazes de influenciarem os valores globais. No caso da Argentina, por exemplo, os quantitativos de reservas duplicaram em 2 anos (2009-2010).

Além dos países acima referidos, Austrália, Brasil, Canadá, Portugal e Zimbabuê têm recursos significativos. Assim sendo, de acordo com estimativas do United States Geological Survey (USGS), o total global de Li situar-se-á entre 25 e 28 Mt que convertidos em CLE seriam mais de 137 Mt.

Recentemente apareceram os primeiros estudos de síntese fundamentados sobre a ecotoxicidade associada com a expansão da procura e consequente incremento previsível da produção de lítio, a qual, por sua vez, influencia os impactos ambientais associados, uma vez que serão explorados diferentes tipos de recursos e qualidades de minérios. Uma questão de interesse consiste em saber se isso levará a mudanças significativas nos impactos ambientais causados ao longo do tempo pelo usufruto dos recursos de Li primários. Estudos de 2020 efetuados no Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade da Califórnia podem ser representados pelas perspectivas patentes na Figura 2 (sinóptica) em que se compara o impacte previsível relacionado com exploração dos diferentes tipos de materiais fonte.

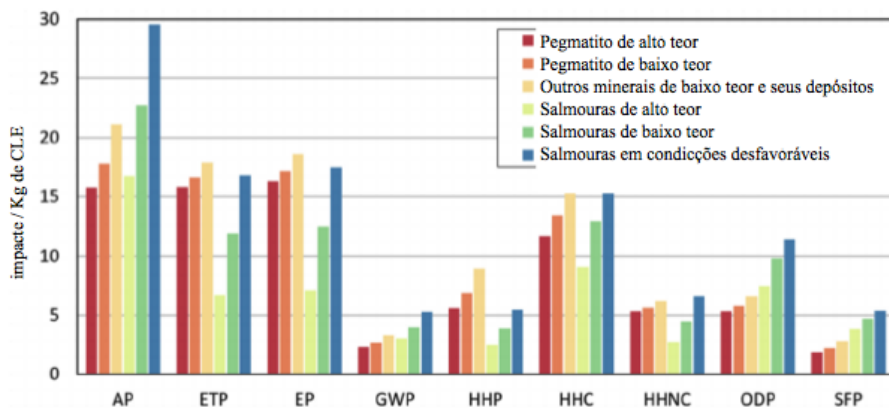


Figura 2: Avaliação do impacto das diferentes vias de produção de lítio com diferentes fontes. *Acrónimos:* AP, potencial de acidificação em g de SO_3 - eq; ETP, potencial de ecotoxicidade em CTUe; EP, potencial de eutrofização em g de N - eq; GWP, potencial de aquecimento global em kg de CO_2 - eq; HHP, particulado volante prejudicial para saúde humana em g de $PM_{2,5}$ - eq; HHC, toxicidade cancerígena em $CTUh \times 10^9$; HHNC, toxicidade não cancerígena em $CTUh \times 10^7$; ODP, potencial de decaimento do ozono em $mg \times 10^7$ de CFC - 11 - eq; SFP, potencial de formação de "smog" em $kg \times 10$ de O_3 - eq.

Também do ponto de vista tecnológico as maiores dificuldades com que se depara a produção de minérios de Li dizem respeito à diversidade de tipos genéticos de depósitos minerais e suportes geológicos em que o Li se expressa na natureza. Não existem rotinas únicas nem diagramas de processo protocolares de aplicação generalizada.

Os ambientes evaporíticos e as salmouras em bacias endorreicas proporcionam as soluções altamente salinas que têm estado na base da maior parte da produção (Figura 3). Mais recentemente, em resposta à valorização das matérias-primas minerais litiníferas e dos concentrados que se podem obter a partir de rochas, têm-se considerado cada vez mais os materiais litológicos muito embora o seu processamento metalúrgico seja muito mais energeticamente intensivo e pressuponha mais etapas de tratamento e equipamentos mais complexos, cuja optimização da eficiência, em muitas situações, ainda se encontra em fase experimental.

Na valorização em bolsa muitas empresas que se propõem abordar depósitos de tipo mineralógico tendem a fazer a sua promoção própria invocando o conhecimento e a disponibilidade de rotinas de processamento mais ou menos inéditas que permitiriam minorar os custos de beneficiação dos minérios e de metalurgia.

Assiste-se, pois, a uma componente especulativa importante na discussão da viabilidade e competitividade de produção de Li a partir de minerais, atendendo não só aos factos anteriormente apontados como também à grande diversidade de minerais a partir dos quais a extração de Li pode ser equacionada (Quadro 2).

A diversidade mineralógica é ainda um problema importante e os métodos de concentração mineralógica mais tradicionais e rotinados são eficazes apenas para a espodumena que sendo rica em Li é, contudo, um mineral relativamente escasso no conjunto dos depósitos minerais portugueses.

As principais substâncias atualmente consideradas fontes de Li e os tipos de depósitos em que se encontram em condições exploráveis podem ser representadas pelos padrões que constam do Quadro 3.

Prevalece a importância das salmouras obtidas em lagos salgados (ou “salares”, como se designam na América do Sul), algumas concentrações em materiais argilosos, pórfiros hipabissais e produtos de alteração de rochas. Também começam a ser relevantes, os pegmatitos, considerados como a principal fonte de Li em Portugal. Nos “salares” encontram-se as maiores tonelagens embora os teores sejam bastante baixos. Por outro lado, a metalurgia do Li é mais simples. Nos pegmatitos ocorrem teores mais altos, mas as tonelagens são mais baixas e o processamento mineralúrgico a metalúrgico é tecnologicamente mais complexo, muito mais influenciado negativamente pelos consumos energéticos altos e pelo impacto ambiental mais significativo.

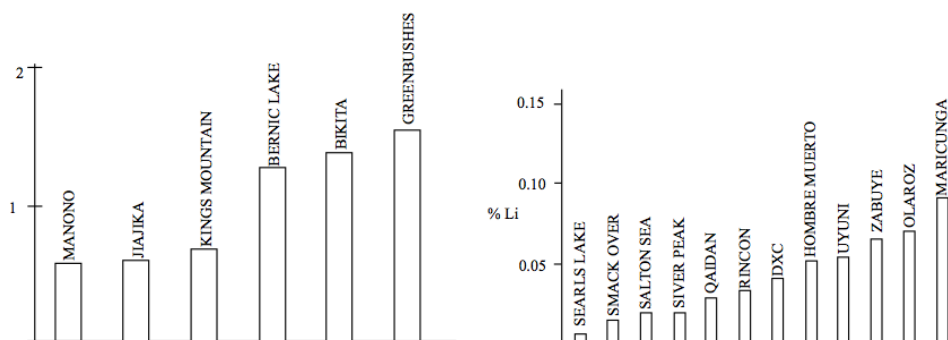


Figura 3: Concentrações médias de Li em pegmatitos e salmouras e em alguns jazigos de “classe mundial” sujeitos a pesquisa ou exploração atual.

Quadro 2: “Check-list” dos portadores mineralógicos de Li já convertidos para o cortejo dos minérios possíveis em território Português. Nota: Embora isso aconteça muito raramente em Portugal, em outros territórios, os fosfatos da série amblygonite – montebrasite figuram entre as fontes de Li mineralógico viáveis.

Minério ou mistura	Acronímico	Composição estequiométrica ou composição química de referência	% peso de Li_2O	Termos extremos de séries isomórficas ou componentes mineralógicos principais em misturas naturais (rochas e “ <i>tout-venants</i> ”)
<i>petalite</i>	PET	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	± 4.0	_____
<i>lepidolite (sensu lato)</i>	LEP	$\text{K}(\text{Li}, \text{Al}, \text{Rb})_2(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$	< 4.0	<i>polilitionite - trilitionite</i>
<i>zinwaldite</i>	ZIN	$\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH}, \text{F})_2$	< 4.0	<i>siderofilite - polilitionite</i>
<i>espodumena II</i>	ESP II	$\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2 \pm \text{SiO}_2$	± 7.7	_____
<i>espodumena I</i>	ESP I	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	± 8.1	_____
<i>mesclas porfíricas ou pegmatíticas c/ amblygonite (A)</i>	MA	_____	< 0.5	<i>amblygonite-montebrasite \pm quartzo \pm feldspatos \pm micas</i>
<i>mesclas aplito-pegmatíticas alteradas c/ montmorilonite (M)</i>	MM	_____	< 0.5	<i>(montmorilonite, hectorite) + bikitaite + (petalite, espodumena \pm quartzo) + quartzo + feldspatos + micas</i>

O termo pegmatito aqui usado abrange variações de fácies de aplito a leucogranito e pegmatito em sentido estrito – no caso Português não são de considerar as concentrações de minerais de Li em zonas individualizadas no interior de grandes pegmatitos como sucede por exemplo na Austrália e na maioria dos países africanos (Quadro 3 e Figura 4). É nesta encruzilhada que se encontram os recursos de Li de Portugal.

Quadro 3: Principais fulcros de disponibilidade de recursos calculados e de reservas confirmadas. Recursos de Li à escala global considerados no início da inflexão da procura (crescimento) de 2010.

Fórmulas de cálculo de recursos: $Li P = T \times C$, em que Li P = recursos de Li em **pegmatitos e outros depósitos litológicos**; T = toneladas de material produtivo ("tout-venant" sem incluir estéril encaixante); C = concentração de Li no material produtivo. $Li S = A \times E \times P \times D \times C$, em que Li S = recursos de Li em **salmouras**; A = área do aquífero; E = espessura do aquífero; P = porosidade do aquífero; D = densidade da salmoura; C = concentração de Li na salmoura.

Depósito	País	Tipo de depósito	Concentração média (% Li)	Recurso "in situ" (Mt de Li)
Uyuni	Bolívia	salmoura	0.05	10.20
Atacama	Chile	salmoura	0.14	6.30
Kings Mountain Belt	USA	pegmatitos	0.68	5.90
Qaidan	China	salmoura	0.03	2.02
Kings Valley	USA	rocha sedimentar	0.27	2.00
Zabuye	China	salmoura	0.07	1.53
Manono, Kitotolo	Congo	pegmatitos	0.58	1.15
Rincon	Argentina	salmoura	0.03	1.12
Vale de Jadar	Sérvia	rocha sedimentar	0.01	0.99
Hombre Muerto	Argentina	salmoura	0.05	0.80
Greenbushes	Austrália	pegmatitos	1.59	0.60
Bikita	Zimbabué	pegmatito	1.40	0.10
Mar Morto	Israel	salmoura	0.001	---
outros	vários depósitos no Brasil, Canada, China e Portugal	pegmatitos	---	0.15



Figura 4: Exemplo de concentração de espodumena (cristais prismáticos alongados brancos) na zona intermédia interna, a muro, no corpo principal do grupo pegmatítico de Naipa, Província Pegmatítica da Zambézia, Norte de Moçambique.

2. Situação dos recursos de Li em Portugal – propriedades da ocorrência natural

Na situação nacional é ainda maior a incerteza relativa ao futuro dos recursos de Li. A tipologia dos minérios adstritos aos recursos base, recursos potenciais e reservas, inscritos na pirâmide de McDivitts para o território de Portugal, consta da Figura 5.

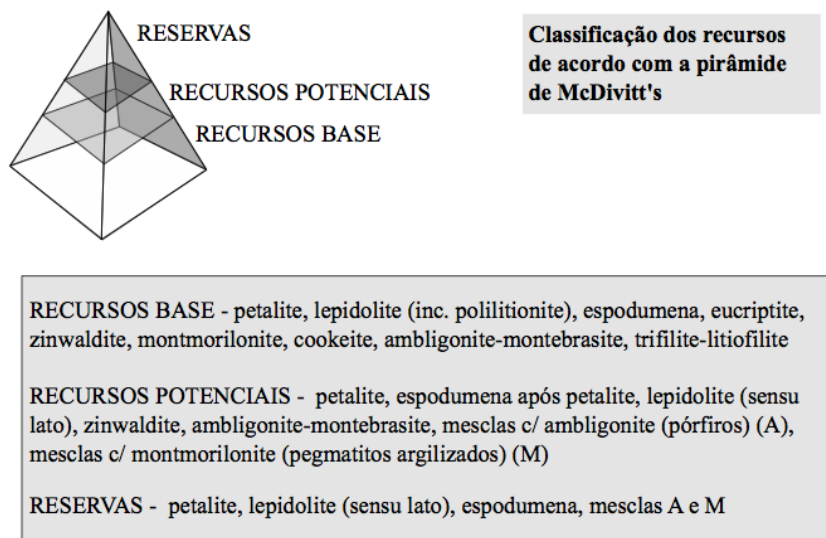


Figura 5: Pirâmide de McDivitts para a tipologia dos recursos de minerais de Li em Portugal.

Ainda não existe um modelo orientador da valorização dos projetos mineiros dedicados ao Li em Portugal, que considere a diversidade de depósitos minerais pegmatíticos que aqui ocorrem, a diversidade dos potenciais minérios que eles comportam e as diferentes combinações paragenéticas desses minerais.

As variáveis a considerar são as seguintes:

- variáveis naturais;
- variáveis mineralúrgicas;
- variáveis metalúrgicas;
- variáveis relativas à constituição de fileiras de produção e mercado (comercialização);
- variáveis relativas a diretivas que vigoram em Portugal e regem o ordenamento territorial e a atividade mineira ou supervisionam o impacto ambiental associado à atividade extrativa.

2.1. Variáveis Naturais

As variáveis naturais a considerar na beneficiação de minérios de Li e na subsequente metalurgia, são fundamentais pois, embora todos os depósitos portugueses sejam litológicos, exibem uma grande diversidade.

2.1.1. Diversidade e penalização de minérios

A equivalência petrogenética dos minérios pegmatíticos principais, petalite e espodumena e, frequentemente, a transformação isoquímica, *petalite* → *espodumena* + 2 *quartzo*, não são acompanhadas de uma equivalência tecnológica dadas as diferenças de conteúdos máximos de Li_2O dos dois minerais, respectivamente, 4% e 8% e também dada a diferença significativa das suas propriedades físicas. Também por este motivo, é grande a diversidade de relações teor/tonelagem que caracterizam muitos depósitos pegmatíticos, por vezes situados num mesmo enxame filoniano, e sobretudo, os conteúdos de Li dos concentrados que se espera obter podem ser muito diferentes de corpo para corpo.

Também a lepidolite, um outro importante portador de Li, surge em regra finamente intercrescida com quartzo ou albitite, em proporções variáveis, o que reduz os conteúdos de Li_2O característicos destas micas para valores de 2.5% em concentrados difíceis de purificar.

Frequentemente a petalite apresenta-se cookeitizada e as suas maiores concentrações em estruturas de “comb-layering” estão muitas vezes montmorilonitizadas, na melhor das hipóteses, hectoritizadas (transformadas em hectorite, uma montmorilonite com algum Li), sempre sujeitas a importante lixiviação de álcalis. Persiste “in situ”, gibsite residual, que pode ser destituída de Li. Parte desta alteração será de génese hidrotermal mas, provavelmente, em menor magnitude deverá ter existido meteorização responsável pela formação de paragénese argílicas mais complexas e também pela última concentração residual de gibsite.

A alteração deutérica mais pervasiva da espodumena pode dar lugar à formação de eucryptite (na dependência de albitização) ou bikitaite por hidratação reacional. Qualquer destes processos faz baixar os conteúdos de Li_2O dos concentrados espoduménicos para valores inferiores a 6.5% e os conteúdos de Li_2O dos concentrados de petalite ou lepidolite/zinwaldite para valores inferiores a 2.5%. É pois de considerar, na potencialidade das jazidas e no cálculo de reservas, um fator adicional de depreciação natural de recursos, ou seja, a deformação e alteração hidrotermal a supergénica das gangas e minérios e o seu alcance e pervasividade.

Após a análise das combinações dos fatores acima expostos é possível sintetizar no gráfico da Figura 6, as tipologias de minérios em função do jazigo

mineral que os comporta e em função dos terrenos hospedeiros dos jazigos e também as correspondentes relações deduzidas de teor/tonelagem.

Em resultado, percebe-se que em geral os jazigos pegmatíticos portugueses, prospectivamente com algum interesse (teor > 1 % de Li_2O), são pequenos (tonelagem = 25 a 75 kt), apresentando petalite > espodumena. Ou seja os recursos encontram-se dispersos por numerosos pequenos depósitos pegmatíticos sobretudo situados em terrenos encaixantes de protogénese metavulcanossedimentar de idade Silúrica, especialmente expressos no Alto Minho e em Trás-os-Montes Ocidental. Foi também pela importância desta rúbrica e pela sua expressão em território Transmontano que se acrescentou a esta nova versão um anexo de estampas ilustrativo dos produtos de alteração litínicos e das consequências que eles impõem ao usufruto dos principais recursos de Li.

2.1.2. Tipologia e zonografia regional das jazidas

As jazidas de Li principais ocorrem no Norte e Centro de Portugal, predominando as de tipo aplito – pegmatítico, aqui referidas, de forma abrangente, como pegmatitos graníticos, ou simplesmente pegmatitos, com morfologia filoniana, tabular a lenticular.

recursos potenciais e reservas	valores médios de quantitativos de reservas em quilotoneladas (KT)	símbolo
petalite	corpo pegmatítico em enxames filonianos implantados em terrenos Silúricos ou Câmbricos, metassedimentares a metavulcânicos	○
lepidolite (sensu lato)	grupo de pegmatitos interconectados em enxames filonianos implantados em maciços graníticos ou em terrenos metassedimentares a metavulcânicos	◇
zinwaldite	massa metassomática, contígua a depósitos filonianos de lepidolite encaixados em granitos essencialmente biotíticos	◆
espodumena II	espodumena pós-petalítica ou equivalente em corpo pegmatítico paradigmático implantado em terreno Silúrico	□
espodumena I	espodumena primária em corpo pegmatítico paradigmático implantado em gnaisses e terrenos metassedimentares	■
mesclas c/ amblygonite (A)	mistura com amblygonite predominante em pegmatito, pórfiro granítico a microaplito (também inclui micas de Li)	◆
mesclas c/ montmorilonite (M)	mistura com argila (montmorilonite a hectorite) predominante em aplito-pegmatito decomposto	◆

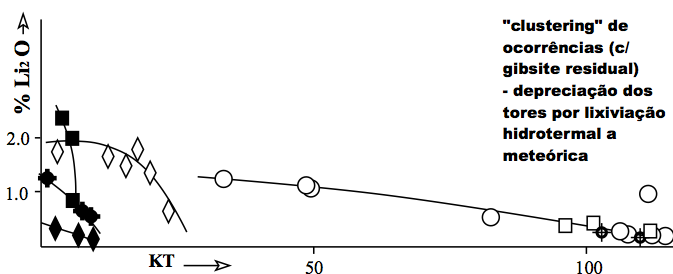


Figura 6: Propriedades dos depósitos minerais identificados em Portugal – tipologia de minérios e relações teor/tonelagem com dados analíticos provenientes de campanhas de prospecção e monitorização mineira dedicadas a matérias-primas cerâmicas pegmatíticas.

Também tem sido equacionada a valorização económica de algumas rochas hipabissais de afinidade granítica residual (inscritas no sistema apogranítico) que podem ser referidas como pórfiros microleucograníticos as quais ocorrem sob a forma de “stocks” intrusivos e filões (diques), estes caracterizados por uma grande continuidade aflorante. Estas jazidas são, no entanto, mais raras; as mais conhecidas situam-se na região Centro.

Os pegmatitos produtivos que constituem os atuais alvos de pesquisa para concentrações de Li, incluem-se na classe com elementos raros, família LCT, e os seus tipos paragenéticos são muito diversificados (Figuras 7 e 8). Quanto à sua distribuição regional organizam-se em campos que se alinham paralelamente à disposição plutónica dos maciços graníticos da Zona Centro Ibérica. Sendo assim, o conjunto de campos pegmatíticos configuram uma cintura, referida como Cintura Pegmatítica Centro Ibérica tanto por razões geográficas como estruturais e metalogénicas. Esta Cintura faz parte da Província Pegmatítica Varisca. Os seus lineamentos de referência são corredores de cisalhamento de diferentes ordens que manifestam indícios de transporte tectónico, tangencial a transcorrente, atribuídos à 2.^a e 3.^a fases de deformação Varisca (Figura 7).

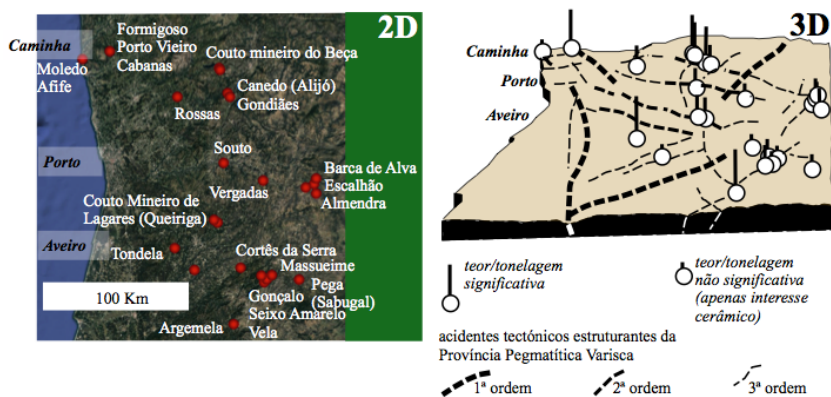


Figura 7: Locais chave na prospecção de Li metálico centrados em antigos trabalhos mineiros dos ciclos do Sn e das matérias-primas cerâmicas “alitinadas” e correspondente implantação na matriz estrutural da Província Pegmatítica Varisca. Nota: observam-se, qualitativamente, algumas relações teor/tonelagem representativas.

Um perfil conceptual NW-SE, transverso às estruturas de 1.^a e 2.^a ordem, exhibe uma organização estrutural dos granitóides e uma distribuição espacial dos pegmatitos dos diferentes tipos similar à que está patente na Figura 8. A diversidade de formas, tamanhos e conteúdos mineralógicos dos pegmatitos é muito grande e também é muito variado o posicionamento dos con-

juntos pegmatíticos, tanto em termos de expansão lateral como vertical. No entanto, tendo em conta o que se observa nas figuras 7 e 8, na maior parte das regiões pegmatíticas, a superfície topográfica expressa na imagem da Figura 7, intersecta um intervalo de cotas de cerca de 600 m onde se localizam, na sua maioria, os principais fulcros de pesquisa atuais.

- LCT 1
 - TUR - BALOUCA
 - PET+AMB+TUR - ESP+AMB - GONDIAES, FORMIGOSO
 - AMB+TUR - VERDES, MASSUEIME
 - LEP+POL+TUR - LOUSADO, SOUTO

- LCT 2 - LEP+TUR - AFIFE - VIANA DO CASTELO
- LCT 3 - PET+LEP+AMB+TRI-LIT - QUEIRIGA
- LCT 4 - ZIN+LEP+AMB - REAL
- LCT 5 - TRI-LIT+AMB-MON - S.ª ASSUNÇÃO
- LCT 6 - AMB-MON - MASSUEIME
- LCT 7 - LEP+TUR+PET+POL - VELA (ZIN NO ENCAIXANTE)

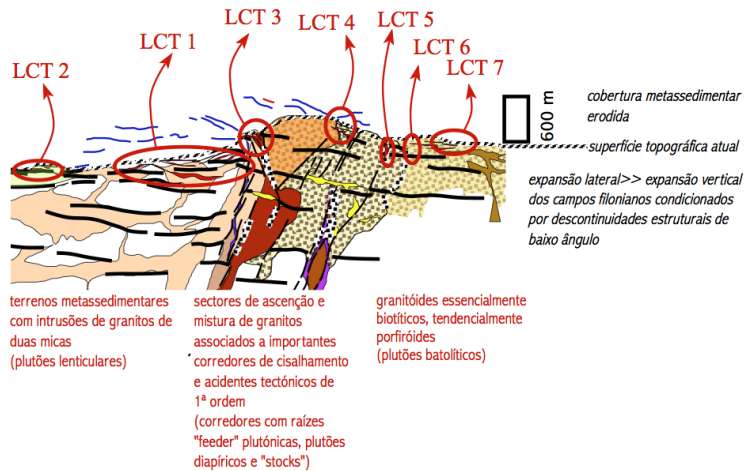


Figura 8: Tipologia paragenética e distribuição vertical e horizontal dos pegmatitos da família LCT numa secção transversal padrão de direção NE-SW da Cintura Pegmatítica Centro-Ibérica.

A posição deste intervalo de cotas coincide grosseiramente com a interferência de estruturação Varisca entre a Zona Centro-Ibérica e a Zona de Galiza Trás-os-Montes. Nesta interface está alojada grande parte da intrusão de granitos Variscos produtivos (especializados em Li) e a estruturação epi-granítica dos campos filonianos de tipo LCT que por isso afloram abundantemente (Figura 8 e 9).

Se alguns pegmatitos cerâmicos podem estar implantados na dependência de corredores verticalizados de cisalhamento tardio e de “mingling” magmático, situados no interior de plutões graníticos de textura porfiróide essencialmente biotítica, os pegmatitos LCT mais interessantes, por seu lado,

relacionam-se com granitos de duas micas cuja conformação é laminar com expansão horizontal prevaemente, determinada pelas descontinuidades estruturais resultantes do transporte tectónico tangencial. Estas estruturas facilitam a diferenciação morfoscópica e morfométrica dos enxames filonianos e constituem volumes precursores da delaminação onde se alojam granitos e pegmatitos filiados (Figura 9).

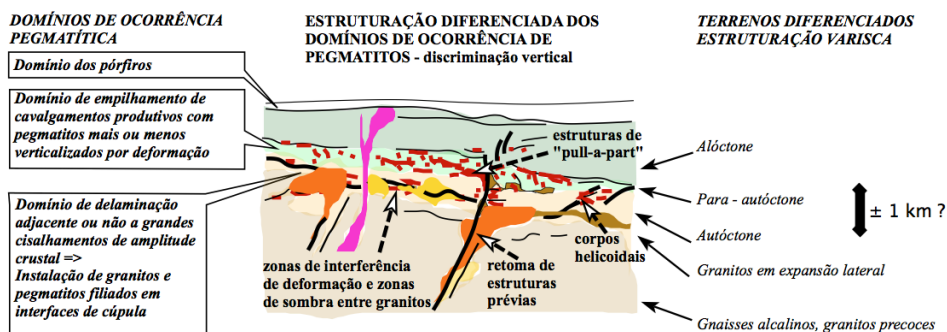


Figura 9: Domínios principais na distribuição vertical dos aplito-pegmatitos litiníferos – hipotética concentração de pegmatitos LCT na interface entre terrenos alóctones e para-autóctones no sector de mantos transportados.

Sendo assim, no contexto da estruturação da Cintura o intervalo vertical produtivo para o Li aflora em grande parte e deverá ter uma pequena expansão em profundidade. Outrossim a diversidade observada de formas, tamanhos e paragêneses deverá estar completa na sua amplitude lateral e expressa no conjunto das ocorrências aflorantes.

Só no caso dos pórfiros microleucograníticos as mineralizações de Li não estão dependentes do alastramento lateral da instalação dos campos pegmatíticos LCT. Corresponde-lhes uma implantação quase epizonal secante àquela disposição (ver domínio dos pórfiros na Figura 9).

2.1.3. Morfometria, morfoscopia e continuidade das jazidas

A diversidade morfológica e a dimensão das jazidas é ilustrada pela diversidade já conhecida dos depósitos em lavra ou em prospecção pontual de feldspatos “alitinados” (materias-primas vitro-cerâmicas). Aliás é sobre estes pegmatitos, em muitos casos já explorados no ciclo do Sn (primeira metade do século XX) e no ciclo cerâmico (desde os anos 80 até agora), que está centrada e irá desenvolver-se a pesquisa de base para o próximo ciclo de aproveitamento do Li metálico que se perspectiva. Muitos desses locais paradigmáticos estão indicados na Figura 7, anterior, onde também se refere

a importância relativa do interesse cerâmico e as previsões de conteúdo litinífero que foram estimadas de forma muito rudimentar.

Nas Figuras 10 e 11 apresentam-se blocos diagramas ilustrativos dos alvos estaníferos ou cerâmicos potencialmente convertíveis em alvos litiníferos. A sua tipologia paragenética já foi objeto de referência na Figura 8.

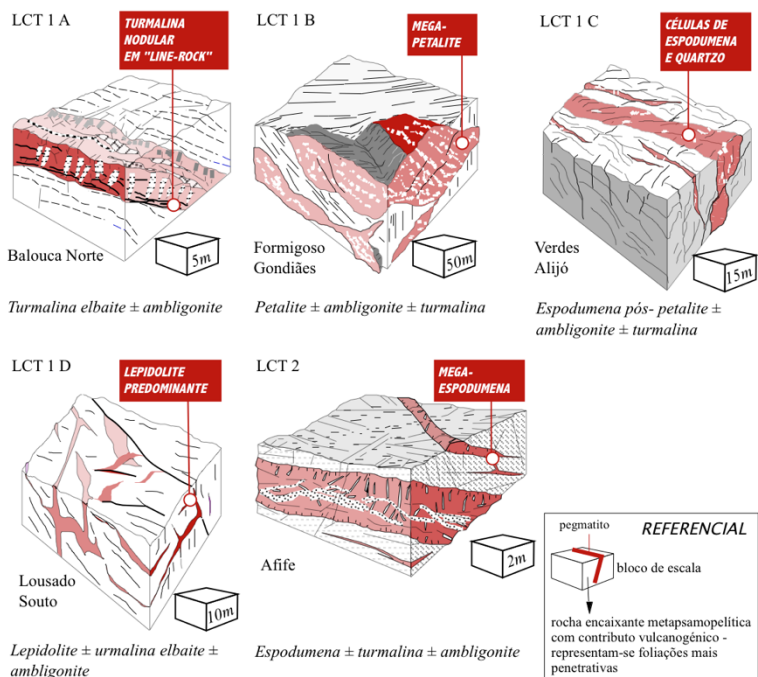


Figura 10: Blocos padrão representativos dos pegmatitos LCT alojados em rochas meta-vulcano-sedimentares – apenas no caso LCT 2 o encaixante é um gnaiss de duas micas, turmalina e granada com numerosos encaves restíticos, schliereníticos e domínios para-migmatíticos. Localizações tipo nas Figuras 7 e 8.

2.1.4. Heterogeneidade estrutural interna das jazidas – factores de concentração e dispersão dos minérios

A dimensão das jazidas pegmatíticas pode considerar-se pequena (Quadro 4) quando comparada com grandes pegmatitos litiníferos como Rubicon (Namíbia), Bikita (Zimbabué), Muiane (Moçambique), Greenbushes (Austrália) ou Tanco (Canadá) que podem ser considerados como depósitos de classe mundial onde a ocorrência dos minerais de Li tem quase sempre uma distribuição heterogénea. Por isso nesses casos se equaciona o desmonte seletivo ou exclusivo de unidades internas enriquecidas sobretudo em espodumena, petalite ou lepidolite.

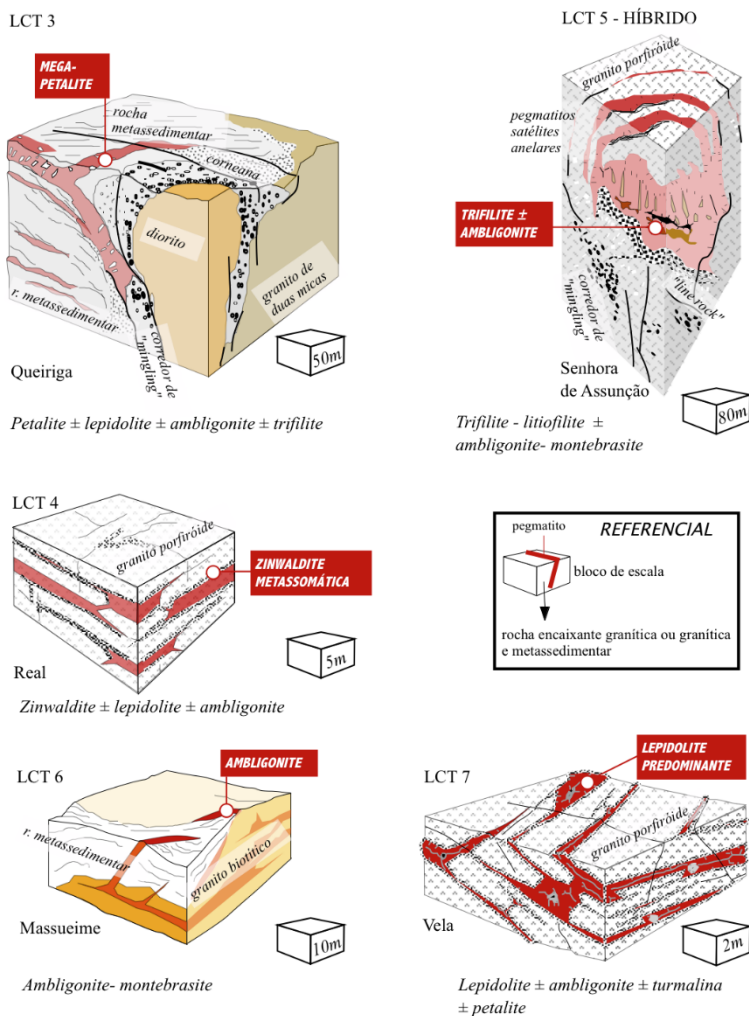


Figura 11: Blocos padrão representativos dos pegmatitos LCT ou híbridos alojados em rochas graníticas ou junto do contacto destas com rochas metassedimentares. Localizações tipo nas Figuras 7 e 8.

No caso das jazidas pegmatíticas portuguesas esta hipótese não se colocou dado que a distribuição dos minerais de Li é bastante mais errática ou, na melhor das hipóteses, verifica-se uma disseminação mais ou menos homogénea dos portadores de Li. Nestas condições o apuramento de concentrados depende exclusivamente da mineralurgia de todo o "tout-venant" pegmatítico extraído de forma não selectiva.

Por maioria de razões no caso dos poucos pórfiros que são já conhecidos (e também alvos de exploração para materiais cerâmicos) a mineralurgia

e a metalurgia são fundamentais para a valorização. Os minérios ocorrem numa disseminação muito fina. Os teores característicos são os mais baixos que é possível enfrentar em suporte litológico e, portanto, há que encontrar compromissos muito estritos entre os calibres de libertação dos minérios e a preservação do teor. A alternativa para o apuramento do CLE será o uso de processos de lixiviação que ainda não estão em rotina, muito menos em Portugal. Mas mesmo a recuperação de um pré-concentrado exportável, destinado a este tipo de processamento, irá debater-se com a dificuldade imposta pela disseminação fina e diversidade dos minérios (essencialmente fosfatos, mas também micas) e pelo baixo teor no total desmontado.

Quadro 4: Quantitativos máximos de reservas prováveis por modelo e por corpo mineralizado (em kt). A localização e descrição dos tipos LCT encontram-se nas Figuras 6, 9 e 10.

LCT	Minerais de lítio indiferenciados	Pegmatito indiferenciado
1	A - 0.05 ; B - 100; C - 80; D - 3.	A - 500 ; B - 1500 ; C - 1000 ; D - 10.
2	1	3
3	20	1200
4	0.5	20
5	0.3	500
6	0.4	50
7	12	50

Ainda dentro das variáveis naturais que influenciam a heterogeneidade interna das jazidas há que ter em conta, mais uma vez, a alteração hidrotermal e a meteorização que podem produzir uma forte lixiviação de metais alcalinos e do Li, especialmente, deixando massas pegmatíticas antes enriquecidas em petalite e/ou espodumena agora transformadas em associações de cookeite, montmorilonite e no limite, gibbsite, das quais grande parte do Li original foi lixiviado. Na Figura 6 observa-se uma concentração de projecções da relação teor/tonelagem, que diz respeito a pegmatitos de maiores dimensões, onde os baixos teores estão em grande parte relacionados com a lixiviação do Li por alteração.

2.2. Variáveis Mineralúrgicas e Metalúrgicas - Tecnologias de Processamento

As variáveis mineralúrgicas a considerar para o apuramento eficiente do Li mais uma vez refletem a diversidade de depósitos possíveis – variabilidade ao nível de uma mesma divisão regional, campo, enxame ou grupo filoniano

– e a dimensão pequena de cada depósito individual, onde, adicionalmente, se verifica uma grande diversidade paragenética nas associações mineralógicas portadoras de minerais com Li (a título de exemplo, ver as ilustrações da Figura 12).

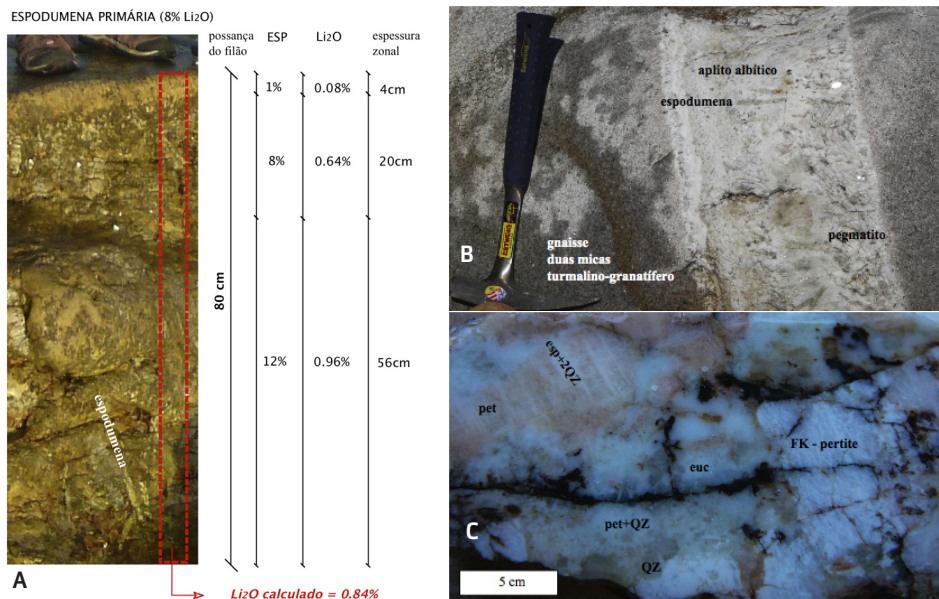


Figura 12: Ilustração da diversidade paragenética de associações com espodumena e petalite: A – pegmatito zonado com espodumena primária (\pm turmalina rossmanite) na região de Afife entre Viana do Castelo e Caminha; B – aplito pegmatito com espodumena primária (\pm amblygonite-montebrasite) na região de Moledo, Caminha; C – espodumena + quartzo (esp+2QZ) ou (esp+QZ) pós-petalite (pet) \pm eucryptite (euc) \pm feldspato potássico (FK) em amostra do Formigoso, Ponte de Lima – esta associação tem expressão muito generalizada ocorrendo nos maiores aplito-pegmatitos instalados em terrenos Silúricos tanto na região de Caminha a Ponte de Lima, como em Trás-os-Montes (Montalegre ou Boticas por exemplo).

A diversidade de minérios num mesmo depósito será a maior dificuldade a suplantar na produção de concentrados.

Se a obtenção de concentrados de espodumena tem protocolos e diagramas de processo já estabelecidos e eficientes, os concentrados de petalite são mais difíceis de apurar e mais ainda quando os dois minerais surgem em conjunto, como sucede em muitos dos jazigos, com mais altos teores e tonelagens, situados no Minho e em Trás-os-Montes. Acresce que minérios onde predominem fosfatos ou micas podem também ser parte da complexidade paragenética a que há que fazer face na beneficiação. Todos estes minerais portadores de Li têm propriedades físicas e químicas muito distintas

e frequentemente os seus contrastes e o contraste relativamente às gangas não podem ser abordados de forma imediata com os métodos de separação mineralúrgica mais correntes.

A possibilidade de fazer convergir toda essa diversidade, proveniente de depósitos distintos ou de depósitos individuais heterogêneos, para oficinas mineralúrgicas comuns como se faz hoje com as mesclas alitinadas destinadas à cerâmica, ainda está muito longe de poder vir a ser uma prática corrente e mais ainda, a necessária versatilidade dos protótipos de oficinas de tratamento ainda não foi assumida como prioridade na pesquisa desenvolvida tanto nos diferentes serviços do “Sector Público” como a nível empresarial.

Também aqui, como tinha sido sugerido para os pórfiros, seria de equacionar a produção de pré-concentrados e a sua exportação com vista ao apuramento final em CLE onde esta tecnologia estivesse disponível. Acontece que todos estes protocolos de procedimento ainda não estão clarificados e em qualquer caso a sua adopção significa uma depreciação da cadeia de valor e da fileira situada em Portugal.

Mesmo no caso de uma produção doméstica centralizada dos pré-concentrados, ainda há muitas incertezas no que respeita à sua exequibilidade, atendendo à versatilidade que seria necessária para fazer face às diferentes paragénese e tipos de depósitos pegmatíticos que caracteristicamente ocorrem em Portugal.

Depois coloca-se ainda uma questão de competitividade desta cadeia mineralúrgica e metalúrgica face às que se aplicam a vulcanitos alterados com jadarite, aplitos alterados, depósitos de hectorite, “brines” em associações e sequências evaporíticas e “brines” subterrâneos (por exemplo, em captações petrolíferas) e ainda outras possíveis fontes. Pode, pois, dizer-se que em termos tecnológicos ainda não se atingiu em Portugal o momento ideal de valorização dos recursos de Li disponíveis, e grande parte do trabalho terá de ser feito ao nível do planeamento, ordenamento da atividade extractiva e conservação dos recursos.

2.3. Variáveis Relativas a Ordenamento, Ambiente, Produção e Mercado

Em contexto europeu, embora assumida a criticalidade do Li, existem conflitos de interesse nítidos entre o usufruto dos recursos e das eventuais reservas de Li como CLE, face ao aproveitamento dos recursos de matérias primas cerâmicas alitinadas (oriundas das mesmas jazidas) e o uso das mes-

mas unidades territoriais, em que ocorrem as jazidas pegmatíticas, no desenvolvimento de outras apetências que possam ser consideradas mais úteis em sede de ordenamento.

Em território produtivo do Norte de Portugal e para o ano de 2017 os estrangulamentos mais significativos até agora identificados foram:

- locais classificados como de interesse arqueológico;
- zonas a utilizar como volumes de armazenamento de água em albufeiras;
- parques naturais e nacionais e reservas de interesse ecológico paisagístico e turístico - um exemplo muito típico é o da ocorrência de um campo filoniano produtivo no litoral e zona intertidal do Alto Minho – Figura 13);
- também importantes marcas turísticas e ecológicas territoriais podem por em causa as intenções de exploração, por exemplo, a marca Serra de Arga no caso do Alto Minho.



Figura 13: Vista aérea sobre o afloramento de parte de um enxame filoniano mineralizado com Li (espodumena primária, ambligonite, turmalina, lepidolite) que dada a sua localização na Praia de Moledo e dada a tipologia de ordenamento atribuída ao local, dificilmente virá a ser objeto de qualquer intervenção extrativa.

Em sede de planeamento regional e ordenamento territorial, conhecidas as potencialidades, os maiores estrangulamentos a que há que fazer face constam do Quadro 5.

Quadro 5: Estrangulamentos do usufruto de recursos potenciais de CLE em contexto de planeamento e ordenamento.

<i>Estrangulamentos</i>	<i>Mineralurgia</i>	<i>Natureza e Processos</i>
	<i>Metalurgia</i>	<i>Centralização e Competitividade</i>
	<i>Ordenamento</i>	<i>Plano de barragens</i>
		<i>Áreas protegidas</i>
	<i>Indefinição/Ambiguidade da procura</i>	<i>Cotação (valor unitário) – Sua previsão</i>

Na previsão de futuras tendências de mercado há fatores intrínsecos naturais e domésticos e influências internacionais que terão que ser considerados nas suas conjugações possíveis e cujo alcance não é ainda completamente conhecido:

- geografia dos pólos consumidores e das unidades de tratamento metalúrgico e mineralúrgico;
- localização de plantas e fábricas (com influência na determinação das distâncias e custos de transportes);
- custos específicos de produção por unidade de medida de produto, em especial na comparação com a utilidade cerâmica, mais próxima, conhecida e rotinada, com fileiras de orgânica fluida já implementadas no contexto nacional;
- geografia do aprovisionamento em sede de concorrência internacional, considerando a maior favorabilidade para a atividade extrativa por parte da massa crítica territorial em áreas produtivas da África, Ásia (China) e América do Sul (antevendo mudanças e consequências dessas mudanças);
- concorrência de outras matérias primas e fontes emergentes - jadarite (Europa), hectorite (USA), várias fontes pegmatíticas no Canadá, várias fontes pegmatíticas na Austrália e incremento dos quantitativos de recursos por desenvolvimento da pesquisa em ambientes evaporíticos não só salmouras da América do Sul mas também depósitos de afinidade salina com outras localizações.

Atualmente assiste-se a um esforço de prospecção significativo, mas não equilibrado nem estabilizado no seu balanço entre valorização dos projectos de prospecção e valorização dos projectos mineiros, propriamente ditos, e sem que haja um conhecimento consolidado do valor dos potenciais produtos - ausência de um conhecimento objetivo do que deve ser o produto ou produtos mineiros nacionais conversíveis em CLE.

A sustentabilidade desta situação é precária e assenta na divulgação excessivamente otimista de resultados de prospecção e de experimentação mineralúrgica e metalúrgica. Procura-se estribar os projetos em transações em bolsa de valores e/ou no acesso a financiamentos pouco escrutinados, capazes de aceitarem argumentos justificativos eivados de alguma ausência de rigor e de juízo sobre o que são de fato projetos promissores, sem transições decepcionantes para a fase de mineração efetiva.

Também seria mais necessário, porque a isso se prestam os jazigos pegmatíticos, promover aproveitamentos integrais e integrados das massas mineralizadas em todos os pegmatitos sujeitos a intervenção.

3. Diligências e Operações de Valorização

Do que atrás ficou dito se extrai que não há ainda uma ideia clara do que constitui minério de Li, massa mineral produtiva conversível em CLE em condições tecnológica e economicamente viáveis. Também não existe uma noção clara do que pode ser encarado como jazigo pegmatítico para produção de Li metálico.

Pensa-se que o que tem mobilizado as empresas com projetos em curso é a possibilidade de por projeto se conseguirem contabilizar massas de um milhão de toneladas de pegmatito a cerca de 1% de Li_2O . Estes objetivos representam marcos de pesquisa demasiado simplificados e simplistas para justificar o progresso dos programas de prospecção, mesmo nas transições entre as fases mais iniciais das operações estratégicas.

Pouco tem sido considerado sobre as profundidades de acesso viáveis. Em 2014, o fator de conversão do valor unitário por tonelada entre mescla cerâmica e CLE era $1 \text{ t Li}_2\text{CO}_3 = 125 \text{ t Mescla Alitinada}$. Ainda para 2014 e invocando padrões que foram estabelecidos pelo BRGM (“Bureau de Recherches Géologiques et Minières” de França) para a viabilidade das operações dedicadas a matérias primas pegmatíticas, pode projectar-se a seguinte hierarquia de profundidades máximas viáveis para a intervenção extrativa:

- < 30 m – Qz + Feld. (Mesclas Alitinadas);
- 30 – 100 m – 1000 kt de Pegmatito com $\text{Li}_2\text{O} > 1\%$;
- 100 – 200 m – 3000 kt de Pegmatito com $\text{Li}_2\text{O} > 3\%$.

Este paradigma hierárquico uma vez ajustado ao caso português sugere as profundidades viáveis máximas que constam do Quadro 6.

Quadro 6: Profundidades de referência para o desmonte de massas minerais aplito-pegmatíticas com ou sem minerais de lítio.

<i>Profundidades viáveis de intervenção</i>	<i>Matéria prima ou produto final pretendido</i>	<i>Proveniência da indicação relativa à barreira de profundidade</i>
<30 m	Materiais cerâmicos quartzo-feldspáticos (não alitinados)	BRGM – anos 80 do século XX
<40 m	Produtos feldspáticos alitinados (com minerais de Lítio)	Prática de rotina das empresas portuguesas com maiores produções – anos 1989 a 2012
<80 m	Li metálico	Compromisso para uma viabilidade prospectiva face às profundidades identificadas com mais frequência em relatos de trabalhos de prospecção pontual posteriores a 2005
<120 m	Li metálico ± produtos cerâmicos quartzo-feldspáticos ± minérios de Ta, Sn, Nb ± berilo ± agregados e produtos de cantaria	Viabilização complexa com ordenamento da actividade extractiva muito exigente tendo em perspectiva o aproveitamento integral e integrado das jazidas – protocolos ainda não estabelecidos nem em contexto prospectivo

3.1. Valor Conhecido das Jazidas

O valor atual das jazidas e propriedades mineiras é emanado do aproveitamento cerâmico. Aliás todos os alvos de pesquisa atuais se centram em fulcros de alvos pegmatíticos testados ou explorados para produção de matérias primas vitro-cerâmicas e estes, em muitos casos, tinham já sido abordados no ciclo extractivo dedicado ao Sn, na primeira metade do século XX. As empresas que lideram o mercado das pastas cerâmicas em Portugal e que têm concessões no Alto Minho, Trás-os-Montes e Beiras, têm sido abordadas por agentes e atores internacionais no sentido de considerarem a conversão dos seus licenciamentos mineiros para a produção de concentrados de Li, contratualizando programas de prospecção e pesquisa para perímetros mineiros antes exclusivamente dedicados à produção cerâmica. A motivação para esses projetos de conversão baseia-se em análises químicas de rocha total de amostras em canal que proporcionaram composições químicas consideradas interessantes no ciclo cerâmico (Quadro 7 e 8), que são também julgadas promissoras em termos de valorização de CLE.

Quadro 7: Composição química de fácies aplito-pegmatíticas (% peso). TiO_2 , CaO, MgO, P_2O_5 , MnO abaixo dos níveis de detecção; pcel – pegmatito com células oclares espoduménicas; ap – aplito; apesp – aplito com fenocristais de espodumena; appet – aplito com fenocristais de petalite. P.F. – “perda ao fogo” que indicia argilização.

	pcel	Pcel	pcel	pcel	ap	apesp	apesp	appet
SiO_2	73	75	73	73	71	76	72	72
Al_2O_3	16	16	17.6	18.1	18.2	16.6	18.5	17.6
Fe_2O_3	0.53	0.25	0.42	0.26	0.26	0.55	0.23	0.39
Na_2O	4.1	4.5	2.4	2.4	9.4	1.3	2.7	3.0
K_2O	2.9	2.3	1.9	3.3	<0.5	2.0	4.4	2.4
Li_2O	0.59	0.69	2.1	1.6	0.17	2.2	1.4	1.2
P.F.	1.4	0.84	0.9	1.8	0.44	1.1	0.8	2.1

Quadro 8: Selecção representativa de conteúdos de alcalis obtidos por análise química de amostras em canal (fluorescência de Rx e espectrometria de absorção atómica) (valores em % peso); a – pegmatitos com espodumena + quartzo após petalite em variados estados de argilização; u – unidades petalíticas em pegmatitos com diferentes estados de argilização; b – variabilidade representativa em pegmatitos petalíticos; e – variabilidade representativa em aplito-pegmatitos com espodumena primária do litoral a Norte de Viana do Castelo.

	Li_2O	Na_2O	Al_2O_3	K_2O	Li_2O	Na_2O/K_2O	Na_2O+K_2O
a	0.78	4.1	17.0	2.5	0.78	1.64	6.6
a	0.70	4.2	16.0	2.6	0.7	1.62	6.8
a	0.59	4.1	16.0	2.9	0.59	1.41	7.0
a	0.67	4.3	17.0	2.5	0.67	1.72	6.8
a	0.69	4.5	16.0	2.3	0.69	1.96	6.8
u	1.40	3.5	17.6	2.0	1.40	1.75	5.5
u	1.60	2.4	18.1	3.3	1.60	0.73	5.7
p	2.10	2.4	17.6	1.9	2.10	1.26	4.3
p	2.50	2.4	18.7	1.9	2.50	1.26	4.3
p	1.20	3.0	17.6	2.4	1.20	1.25	5.4
e	1.40	2.7	18.5	4.4	1.40	0.61	7.1
e	2.20	1.3	16.6	2.0	2.20	0.65	3.3
e	0.17	9.4	18.2	0.5	0.17	18.80	9.9

Algumas amostras de rocha total de granitos de duas micas analisadas nas mesmas condições e colhidas em maciços circunscritos rodeados de terrenos meta-vulcano-sedimentares Silúricos proporcionaram concentrações situadas no intervalo, 61- 802 ppm de Li metálico, coerente com a especialização litínifera de muitos destes granitos. Frequentemente o núcleo dos plutonitos graníticos é mais pobre em Li que o seu bordo em coerência com a expansão lateral que é postulada na expansão lateral de granitos, apogra-

nitos e sistemas filonianos associados, defendida nos modelos conceptuais das Figuras 8 e 9.

Alguns exemplos de locais já explorados em ciclos extrativos anteriores, encarados agora como alvos para CLE, constam das Figuras 14, 15, 16 e 17.

3.2. Compatibilidade de Produção entre Produtos Cerâmicos e Minérios de Li

A sobreposição geográfica bastante estrita entre jazigos cerâmicos e potenciais jazidas de Li, exige algum cuidado ao nível do ordenamento da atividade extrativa, tentando equacionar em cada caso a compatibilidade de aproveitamento das mesclas cerâmicas após recuperação de concentrados ou pré-concentrados adequados para obtenção de CLE.



Figura 14: Mina de Alvarrões; Cabanas, Região da Guarda; Exploração de mistura feldspática alitinada, em aplito–pegmatitos LCT, lepidolíticos. Representa o ciclo extrativo cerâmico atual.

Antes disso terá que haver um juízo rigoroso sobre limiares de composição modal a ter em conta no momento crítico da atribuição de protocolos de mineração diferenciados no termo dos programas de prospecção pontual, já que os minérios são também minerais industriais vitro-cerâmicos (ver Quadro 9).

Quadro 9: Depósitos pegmatíticos ou porfíricos com apetência cerâmica estabelecida, hipoteticamente conversíveis em jazigos minerais de Li – em fase de prospecção pontual.

<i>Campos pegmatíticos do Minho - Serra de Arga, Braga, Litoral Norte, Veira do Minho</i>		<i>Campos pegmatíticos de Trás-os-Montes</i>		<i>Grupos pegmatíticos, filões individualizados e "stocks" de pórfiros do Douro e das Beiras</i>	
<i>Cabanas</i>	<i>PET, ESP II, MM</i>	<i>Alijó 1</i>	<i>ESP II</i>	<i>Tondela</i>	<i>MA</i>
<i>Formigoso</i>	<i>PET, MM</i>	<i>Alijó 2</i>	<i>ESP II, PET</i>	<i>Queiriga</i>	<i>PET, LEP</i>
<i>Porto Vieiro</i>	<i>PET, MM</i>	<i>Veral</i>	<i>ESP I e II</i>	<i>Souto</i>	<i>LEP</i>
<i>Lousado</i>	<i>LEP, PET</i>	<i>Gondiães</i>	<i>PET, ESP II, MM</i>	<i>Covelinhas</i>	<i>LEP</i>
<i>Balouca</i>	<i>LEP</i>	<i>B e ç a Norte</i>	<i>PET, MM, LEP</i>	<i>Vela</i>	<i>LEP, ZIN</i>
<i>Afife</i>	<i>ESP I</i>			<i>Seixo Amarelo</i>	<i>ZIN, LEP</i>
<i>Pedras Ruivas</i>	<i>ESP I</i>			<i>Gonçalo</i>	<i>LEP, PET</i>
<i>Rossas 1</i>	<i>LEP</i>				
<i>Rossas 2</i>	<i>MA</i>				

Pode já adiantar-se um quadro tipológico com os minerais portadores de Li específicos de cada local chave e propor alguns índices qualitativos de prevalência desses minerais e da qualidade industrial que os caracteriza. Estes podem ainda ser usados no juízo sobre a atribuição de uma finalidade industrial ou metalúrgica às diversas massas mineralizadas e no auxílio aos atos de ordenamento territorial (Quadro 10).

3.3. Compatibilidade entre Minérios de Li e outros Minérios

Também se verifica uma sobreposição geográfica entre antigas minas de Sn em aplito-pegmatitos e potenciais jazidas de Li.

Em sede de ordenamento da atividade extrativa, aquela constatação alerta para a necessidade de compatibilizar o aproveitamento dos minérios de Li e outros minérios de metais raros que podem ocorrer em massas mineralizadas comuns.

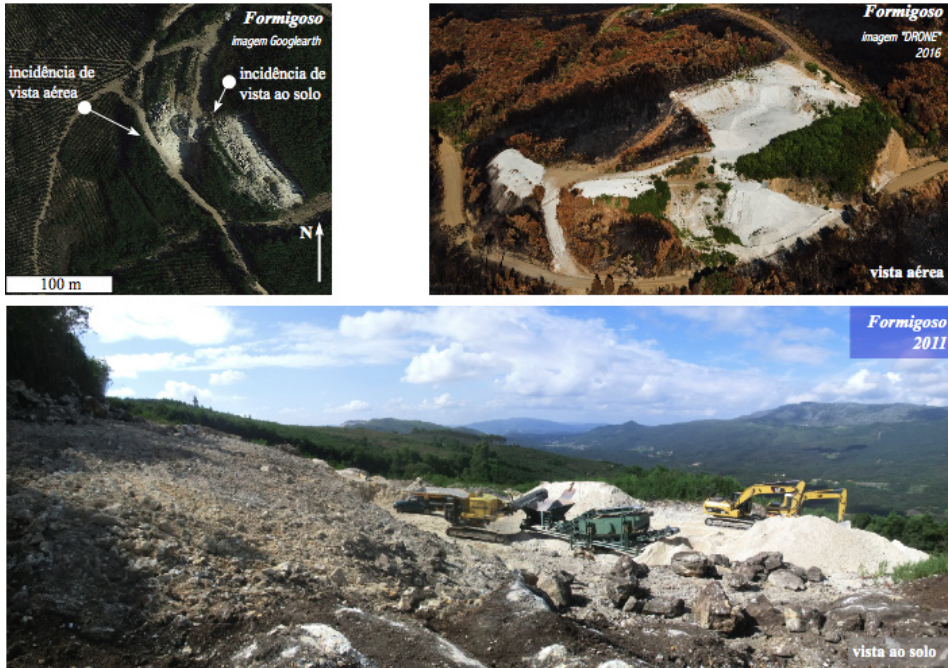


Figura 15: Mina do Formigoso – Serra de Arga, Ponte de Lima – exploração de mistura felspática alitinada, em aplito – pegmatito LCT petalítico. Representa o ciclo extrativo cerâmico atual.

Quadro 10: Prevalência e qualidade industrial dos minerais de Li presentes nos diferentes tipos paradigmáticos de pegmatitos. IQPI – Índice qualitativo de prevalência = 0 – 10; IQUI – Índice qualitativo de qualidade industrial; 0/1 (conteúdo de Li insignificante; conteúdo de Li significativo); A – interesse cerâmico; B – interesse metálico.

		LEP, PO	TRIF	AMB	ZIN	COOK	ARG	PET	ESP	EUC	TUR	IQUI
IQPI	LCT 1 A	1	0	1	0	2	2	0	1	0	5	0 A
	LCT 1 B	1	0	1	0	1	3	9	1	0	1	1 AB
	LCT 1 C	1	0	1	0	1	1	5	5	1	0	1 AB
	LCT 1 D	6	0	3	0	3	1	1	1	1	3	0 AB
	LCT 2	0	0	1	0	1	1	0	8	1	1	0 BA
	LCT 3	2	2	2	0	1	0	8	1	2	0	1 AB
	LCT 4	1	1	1	8	2	0	0	0	0	0	0 AB
	LCT 5	0	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0 AB
	LCT 6	2	3	8	2	2	1	0	0	2	0	0 BA
	LCT 7	9	0	4	8	4	1	2	1	1	4	1 AB

No Quadro 11 estão presentes algumas destas ocorrências combinadas cujo estudo deve influenciar o desenho dos diagramas de processo pois alguns dos outros minérios presentes nos pegmatitos podem suplantar em valor

unitário o valor dos minerais de Li e podem existir em concentrações não negligenciáveis. Nesta aceção é de realçar o caso dos minérios de Nb e Ta, sobretudo os mais ricos em Ta, cuja presença nos depósitos pegmatíticos se correlaciona estritamente com as maiores concentrações de Li.



Figura 16: Minas de Trás-os-Montes em Alijó e Gondães – exploração de mistura felspática alitinada, em aplito – pegmatitos LCT, petalítico - espoduménicos. Representa o ciclo extrativo cerâmico atual.

Quadro 11: Combinações paragenéticas de minérios que podem ocorrer associados aos minérios de Li nos tipos de pegmatitos que se têm considerado. *M* – *Microlite*; *CT* – *Columbite, Tantalite*; *IX* – *Ixiolite*; *PI* – *Pirocloro*; *BE* – *Berilo*; *FN* – *Fenacite*; *BT* – *Bertrandite*; *HE* – *OH-Herderite*; *BN* – *Bismutinite*; *PO* – *Polucite*; *CS* – *Cassiterite*; *KS* – *Kesterite*; *ET* – *Estanite*; *MO* – *Molibdenite*; *VF* – *Volframite*; *UR* – *Uraninite*; *AU* – *Autunite*; *TH* – *Thorbernite*; *UF* – *Uranofana*; *UMC* – *Uranomicrolite*.

	LCT 1				LCT 2	LCT 3	LCT 4	LCT 5	LCT 6	LCT 7
	A	B	C	D						
Nb, Ta	M, CT	CT		M, CT	CT	CT	CT	CT,M,IX,PI	CT	CT,M,SP,AP
Be	BE			BE	BE	BE,BT	BE	BE,FN,BT	HE	BE
Bi								Bi, BN		
Cs				PO						PO
Sn	CS	CS	CS	CS		KS,ET,CS	CS		CS	CS
Mo								MO		
W						VF		VF	VF	
U				UR,UMC				UF,AU,TH,UR		UMC

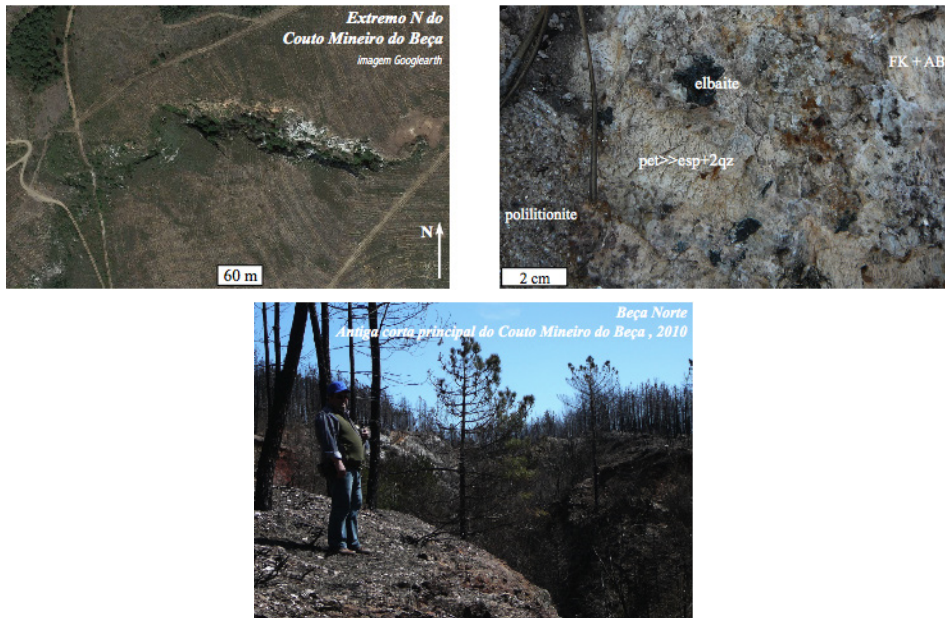


Figura 17: Mina do Beça (corte principal) – Trás-os-Montes – exploração de cassiterite em pegmatito LCT petalítico-espodumênico. Representa o ciclo extrativo do Sn na primeira metade do século XX.

3.4. Territorialidade das Ocorrências de Materiais e Recursos em Portugal

A territorialidade das jazidas depende estritamente da disposição da Cintura pegmatítica Centro-Ibérica e as áreas potenciais dependem dessa configuração, podendo definir-se corredores com interesse prospectivo considerando a localização dos fulcros e alvos estratégicos mais paradigmáticos: Terrenos Silúricos do NW – Serra de Arga a Seixoso – **SAS**; Terrenos Silúricos de Trás-os-Montes ocidental – Beça e Alijó – **TMO**; granitóides do triângulo Viseu-Guarda-Castelo Branco (Gonçalo, Vela e Seixo Amarelo) – **VGCB**; alinhamentos do Douro a Sabugal e Almendra – **DSA**.

Também se pode considerar a existência de alguns fulcros individualizados que embora sendo parte da organização lineamentar acima referida têm características peculiares e anómalas que os isolam das tendências de mineralização mais generalizadas. Os casos mais conhecidos são os seguintes:

- Queiriga – Grande “sill” proximal das minas do Rebentão – **QR**;
- Tondela – Grande filão – **TD**;
- Argemela – “Stock” e rochas filonianas associadas – **AG**.

Para esses corredores e fulcros, na Figura 18 faz-se uma classificação relativa do interesse prospectivo para Li_2O e indicam-se as tipologias das massas de recursos no referencial de McKelvey, considerando a informação disponível em 2017.

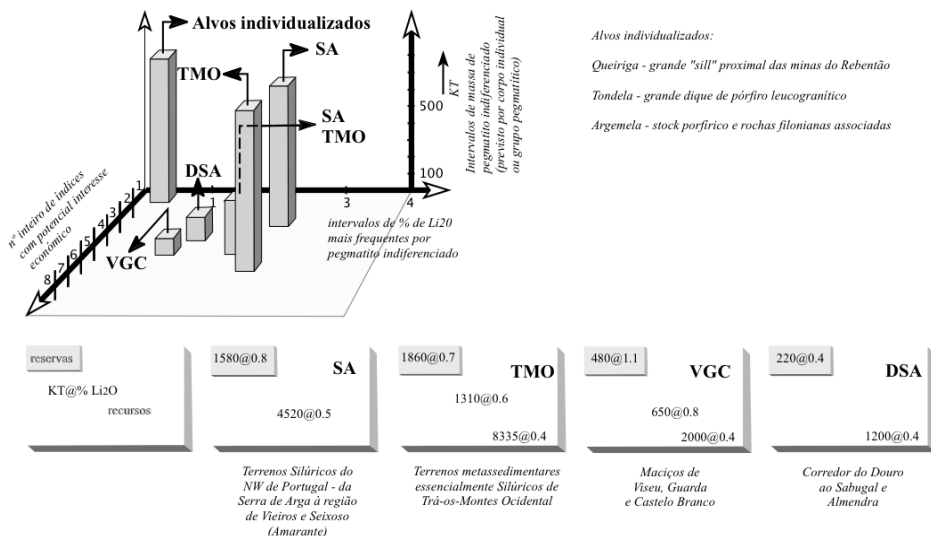


Figura 18: Classificação dos recursos hipotéticos e especulativos (tonelagem@teor) e reservas estimadas para as principais áreas e fulcros potenciais definidos na Cintura Pegmatítica Centro-Ibérica – implantação em referencial de McKelvey, relativa a 2017. Os acrónimos dos diagramas de McKelvey são explicados no texto.

Na Figura 19, usando ainda a matriz de McKelvey, projeta-se a classificação das regiões geográficas mais promissoras, que são parte dos corredores antes referidos (Figura 18), as quais podem ter potenciais ambivalentes entre apetência litinífera e vitro-cerâmica. Sugere-se aí uma hierarquia zonográfica regional e também o valor relativo atual das matérias primas em função da viabilidade económica e tecnológica do seu aproveitamento e em função da certeza geológica da sua ocorrência.

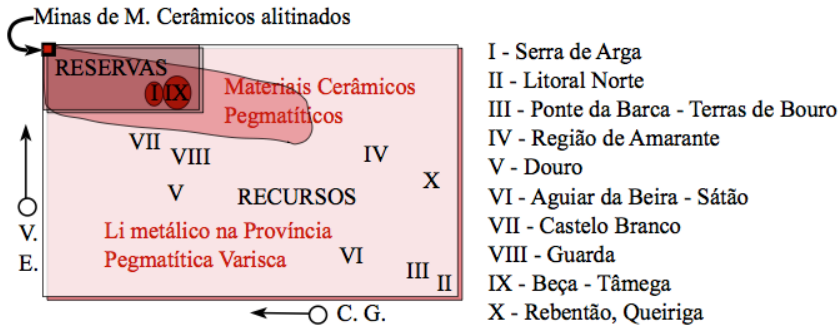


Figura 19: Classificação dos recursos minerais de Li numa hierarquia zonográfica regional situada no referencial de McKelvey.
 C.G. – certeza geológica da ocorrência; V.E. – viabilidade económica do aproveitamento.

4. Paradigmas de Prospecção – síntese conclusiva das propriedades das jazidas

Do que ficou exposto percebe-se que existe interesse prospectivo para os índices litiníferos portugueses coincidentes ou não com jazidas de Sn e jazidas de materiais cerâmicos, expressas nos mesmos corpos pegmatíticos ou porfíricos. No entanto, ainda não foram provadas reservas tecnologicamente viáveis, compatíveis com rotinas de processamento em vigor, ou rotinas que já se conheçam e estejam em condições de virem a ser implementadas. Mesmo assim, o Quadro 12 adianta já uma primeira classificação para eventuais alvos de prospecção em pegmatitos da Cintura Centro – Ibérica, com base em intervalos de conteúdos de Li_2O .

Quadro 12: Classes de conteúdos de Li_2O para alvos pegmatíticos de cada tipo paragenético com base em análises de amostras colhidas em canais transversais à direção de depósitos com morfologia filoniana.

<i>Tipo de depósito mineral</i>	<i>Nº de índices</i>	<i>Possança</i>	<i>Conteúdo de Li_2O (%)</i>
aplito-pegmatito com ambligonite-montebrasite	8	<150 cm	0.03 – 0.80
pegmatito com trifilite-litiofilite	3	<80 cm	0.05 – 0.10
aplito-pegmatito com espodumena	9	<150 cm	0.30 – 1.40
aplito-pegmatito com petalite e petalite / espodumena	80	<1800 cm	0.40 – 2.30
pegmatito com lepidolite e petalite	22	<300 cm	0.50 – 2.10
aplito com turmalina	3	<200 cm	0.01 – 0.10
aplito estéril por vezes com alguma ambligonite	28	<800 cm	0.00 – 0.06

Dessa classificação sobressaem os números de alvos para cada classe de conteúdos, percebendo-se que os terrenos mais promissores são os terrenos Silúricos onde se alojam os aplito-pegmatitos com petalite, petalite e espodumena (incluindo, espodumena após petalite) que simultaneamente têm maiores dimensões (indicados pelas possanças) e conteúdos também mais elevados de Li potencial.

Para auxílio à prospeção podem assumir-se as geometrias expostas nas secções conceptuais que constam da Figura 20, construída tendo em conta os elementos estruturais que constam das Figuras 8, 9, 10 e 11.

No Quadro 13 encontra-se uma primeira avaliação da massa provavelmente disponível em jazidas para as quais já existe um aceitável cálculo das relações teor/tonelagem. Dessa avaliação percebe-se que não se verificam, concretamente, as condições de explorabilidade que têm vindo a ser discutidas:

- relações teor/tonelagem com viabilidade económica acima do limite mínimo estratégico – 1000kt @ 0.8 - 1.0% Li_2O ;
- barreiras de profundidade de acesso adequadas às relações teor/tonelagem com viabilidade económica;
- volume de encaixante previsível, reduzido, nas traçagens que se prevêem económicas;
- baixa penalização por argilização e lixiviação do Li;
- homogeneidade de distribuição de minérios com granularidade grossa.

Com base nos modelos conceptuais que foram apresentados e nos jazigos pegmatíticos previsíveis, nas suas dimensões e nas características e penalizações prováveis das massas úteis e minérios, pode propor-se a sinopse de propriedades do Quadro 14. Estas reflectem as características naturais mais prováveis dos depósitos litiníferos que podem vir a ser considerados económicos. Há que identificar em cada novo projeto quais são os tipos análogos de perfis conceptuais das jazidas que estão em pesquisa (Figura 20). Depois há que relacioná-los com as sinopses de características apresentadas no Quadro 14. Estas representam patamares de paragénese, qualidade, massa e teor, que são considerados aceitáveis em contexto de aproveitamento cerâmico de mesclas alitizadas, mas são encarados apenas como indicadores e guias na edificação de projetos viáveis em valorização de CLE.

Resta verificar num futuro mais ou menos próximo se existe capacidade de acolhimento e tolerância tecnológica para a grande diversidade de massas mineralizadas que irão chegar à mineralurgia e metalurgia.

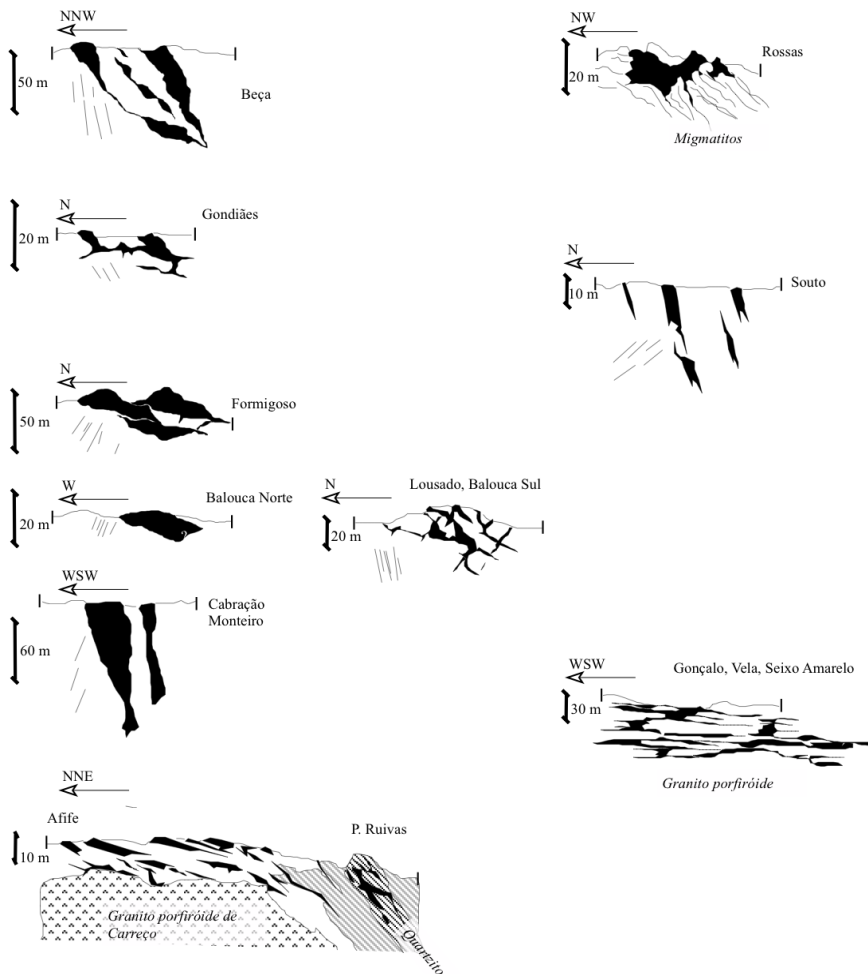


Figura 20: Perfis conceptuais em conjuntos de corpos aplito-pegmatíticos mais correntes, portadores de minerais de Li paradigmáticos: Beça e Gondiaes em Trás-os-Montes Ocidental; Rossas em Viera do Minho; Souto na Margem Sul do Rio Douro; Formigoso, Balouca e Cabração em Ponte de Lima; Afife e Pedras Ruivas em Viana do Castelo; Gonçalo, Vela e Seixo Amarelo na Guarda. Quando não é referido no perfil, o encaixante é meta – vulcano – sedimentar Silúrico, sendo indicada em cada perfil a inclinação predominante da foliação mais penetrativa.

Do ponto de vistas das composições e das propriedades físicas e químicas dos minérios, não são previsíveis grandes tonelagens homogêneas e os jazigos conhecidos têm em geral pequenas dimensões. Há, pois, que decidir se uma fileira em território nacional deve parar na produção de pré-concentrados ou se é de planear um ordenamento da atividade extrativa que pondere acrescentar mais valor levando a cadeia até operações metalúrgicas.

Quadro 13: Alguns exemplos de recursos (reservas indicadas) adotando uma perspectiva conservadora e naturalista. A jazida de Cabanas, ainda não mencionada, situa-se no Campo aplito-pegmatítico da Serra de Arga no Alto Minho.

	até à profundidade de (em m) de:	disponibilidade provável de Li ₂ O	classes de massas de aplito-pegmatito e de conteúdos de Li ₂ O correspondentes	massa de concentrado previsível (kt)	conteúdo mineralógico (% Li ₂ O no concentrado)
Beca Grupo Norte	85	2.5 kt @ 0.1% 1.0 Mt @ 0.4%	450 kt @ 0.9% 130 kt @ 1.8%	58	PET (3.5) PET± ESP (4.1)
Alijó Extensão Sul	45	850 kt @ 0.1% 500 kt @ 0.9%	160 kt @ 2.5%	50	ESP (6.0)
Formigoso Massa Sul	45	750 kt @ 0.3% 200 kt @ 0.9%	50 kt @ 2.1%	20 (PET) 5 (ESP)	PET (3.1) ESP (6.1)
Cabanas Socavões	35	500 kt @ 1.4% 200 kt @ 0.9%	100 kt @ 2.2%	20	PET (3.6)
Tondela	80	4 Mt @ 0.3%			micas ± amb ± rocha porfírica (0.3-3.1%)
Vela	40	250 kt @ 1.2%			micas ± amb (2.8-3.1)
Queiriga Domínio Sul	150	4 Mt @ 0.5% 500 kt @ 2.0%	250 kt @ 2.8%	180	PET (3.5)

Quadro 14: Dimensão possível das jazidas no contexto da Província Pegmatítica Varisca, considerando os resultados referíveis a um corpo isolado, ou um grupo de 2 ou 3 corpos contíguos ou ainda um grupo de vários corpos de pequenas dimensões, suficientemente próximos para justificarem a exploração numa corta mineira comum.

jazigos	granulometria dos minerais	% Li ₂ O possíveis	tonelagem potencial	minérios	distribuição dos minérios nos depósitos	alteração/ diluição	penalizações
pórfiros	fina a muito fina, homogénea	0.3 – 0.5	> 5Mt	ambigonite – montebrasite e micas de Li (pode ser aproveitada a massa mineral no seu conjunto)	disseminação dispersa, localmente, homogénea	incipiente, não significativa	óxidos de Fe e presença de micas de Fe sem Li
aplito-pegmatitos lepidolíticos	muito heterogénea, bandada	1.0 – 1.2	< 200 kt	ambigonite- montebrasite "lepidolite" ± petalite - zinwaldite (no encaixante)	muito heterogénea mesmo em corpos de pequenas dimensões	incipiente a mediana	zinwaldite no encaixante, ambigonite – montebrasite alterada
aplito-pegmatitos petalíticos	heterogénea, (por vezes a petalite é muito grosseira)	0.4 – 1.5	< 1.1 Mt	petalite, montmorilonite e espodumena equivalente a petalite ou pseudomórfica com quartzo após petalite	heterogénea bandada, "comb layered"	média a profunda, hidrotermal a supergénica após transformações em "subsolvus"	cataclase, argilização, deposição de óxidos de manganés, presença de sarcopside e siderito e gibsitização (pode atingir >50% da massa pegmatítica)
aplito-pegmatitos c/ espodumena	heterogénea a homogénea grosseira	0.8 – 1.8	< 50 kt	espodumena	heterogénea bandada a zonada	incipiente a mediana	argilização, coqueitização
aplito-pegmatitos c/ ambigonite	homogénea, tendente a ser mais grosseira	0.1 – 2.2	< 50 kt	ambigonite ± taeneolite	heterogénea zonada com unidades de substituição enriquecidas em micas de Li	incipiente a mediana	alteração da ambigonite

Tudo isto dependerá fortemente da evolução do mercado e da produção efetiva até que se atinja alguma forma de estabilidade entre viabilidade, credibilidade dos diversos projetos e inclusão no ordenamento territorial. No contexto português ainda não se atingiu o momento de partida mais adequado em que todas as indeterminações estejam levantadas, tanto da parte das características das ocorrências naturais como da parte das tecnologias e rotinas de beneficiação e produção de Li em suporte químico utilizável ou comercializável (CLE).

Na atribuição de concessões e licenciamentos vários, como na fiscalização das operações mineiras e de prospecção por parte da tutela estatal é de privilegiar sempre os conceitos de aproveitamento integral e integrado em jazidas e grupos de jazidas, sobretudo, procurando não comprometer a coexistência da potencialidade cerâmica.

O aproveitamento cerâmico tem longa tradição e “*know how*” na indústria nacional e já neste século importantes investimentos foram feitos pelos agentes nacionais mais significativos no sentido da modernização das fábricas de pasta cerâmica, que hoje absorvem, com grande tolerância, uma massa importante de produtos por vezes de baixo “*rank*”.

Eventuais projetos mineiros dedicados ao Li devem sempre equacionar o complemento ou suplemento cerâmico desde a prospecção à mineralurgia e os organismos e laboratórios do estado devem estar atentos e pugnar pela verificação de diretivas de aproveitamento integral.

Da mesma forma, também é fundamental no caso português a consideração dos recursos associados de minérios, especialmente, dos concentrados de Ta (com teores de Ta_2O_5 acima de 30%) que acompanham os teores mais altos de Li_2O nas mesmas massas mineralizadas. Na verdade seria mais racional, em lugar do “Objectivo Lítio”, no caso dos pegmatitos portugueses, em especial dos que são maiores e mais ricos e se situam no Alto Minho e Trás-Os-Montes Ocidental, postular como motor da pesquisa e prospecção o “Objectivo LCT”, mais consentâneo com a tipologia destes pegmatitos, da sua especialização metalogénica (Li, Cs e Ta) e das suas mineralizações. Nos pegmatitos com lepidolite, bastante mais pequenos, pode mesmo dizer-se que se afigura como mais interessante a perseguição do “Objectivo Tântalo”. Neste quadro prevê-se que reúnam as condições para jazigos LCT os seguintes “*spots*” orogénicos Variscos expressos em território do Norte e Centro de Portugal:

- **Sistemas apograníticos transicionais:** “*stocks*” e diques de pórfiro, grandes “*sills*” enraizados e cúpulas ocultas – discretos com sinais

pouco evidentes e guias indefinidos à superfície, difíceis de detectar mas altamente compensadores.

- *Junções filonianas de pares de pegmatitos com “comb layering” interno e determinante petalítico.*
- *Grupos de pequenos filões com conexão interna e determinante lepidolítico.*
- *Grupos de pequenos filões com conexão interna e determinante espoduménico.*

Todos eles têm potencialidade cerâmica associada. Pela via da co-produção cerâmica é possível que algumas jazidas com recursos marginais de Li venham a ser viabilizadas pelo aproveitamento integrado.

Bibliografia recomendada e utilizada

- Ad hoc Working Group, 2014. Report on Critical Raw Materials for the EU. *European Commission, 41p.*
- Ambrose, H., Kendall, A., 2020 - Understanding the future of lithium - Part 2. *Journal of Industrial Ecology* 2020;24: 90–100. <https://doi.org/10.1111/jiec.12942>.
- Bobos, I., Vieillard, P., Charoy, B., Noronha, F., 2007 - Alteration of spodumene to cookeite and its pressure and temperature stability conditions in Li-bearing apfite-pegmatites from Northern Portugal. *Clays and Clay Minerals* 55(3): 295-310.
- Centre for sustainable mineral development (2016). Lithium. *Brithish Geological Survey, 39p.*
- Dias, P., Leal Gomes, C. (2005) - Tipologia dos materiais cerâmicos petalíticos provenientes de aplito-pegmatitos graníticos da Cintura Centro-Ibérica. *Actas IV Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território. Vila Real. publicação em cd-rom.*
- Leal Gomes, C., 1994. Estudo Estrutural e Paragenético de um Sistema Pegmatóide granítico - O campo Aplito - Pegmatítico de Arga - Minho. *Tese de Doutoramento, Univ. Minho, Braga, 695.*
- Leal Gomes, C., 2005. Contributo para a sistemática dos pegmatitos graníticos referentes à Cintura Varisca Centro - Ibérica - Características a considerar e quadro tipológico. *Geonovas, 19: 35-45.*
- Leal Gomes, C., 2015. O determinante petalítico dos teores máximos de lítio em pegmatitos Variscos do NW de Portugal – aproximação paragenética e geoquímica. *Comunicações Geológicas* 102, Especial I, 53-56.
- Leal Gomes, C., Leterrier, J., 1995. Evolução geoquímica em sistemas pegmatóides graníticos – tendências primárias do sistema de Arga – Minho - N de Portugal. *Memórias no4, publ. mus. lab. min. geol., Univ. Porto, 735-740.*
- Leal Gomes, C., Lopes Nunes J., 1990. As paragénese correspondentes à mineralização litinífera do campo aplito-pegmatítico de Arga - Minho (Norte de Portu-

- gal). *Memórias e Notícias, publ. mus. lab. mineral. geol., Univ. Coimbra*, 109: 131-166.
- London, D., 1984. Experimental phase equilibria in the system LiAlSiO_4 - SiO_2 - H_2O : a petrogenetic grid for the lithium - rich pegmatites. *Amer. Mineral.*, 69: 995-1004.
- Martins, L.; Oliveira, D.; Silva, D.; Viegas, H.; Villas Boas, R. / Eds.. 2011. Valorização de pegmatitos litiníferos: *DGEG/LNEG/ADI/CYTED, Lisboa, Portugal*. 82 p.
- Moura, S., Fernandes, J., Leal Gomes, C., Dias, P., Lopes Nunes, J., 2009. A fase petalite nos recursos base de materiais cerâmicos pegmatíticos do Norte de Portugal – materialografia e potencialidades da Província Varisca. *KÉRAMICA, Rev. Ind. Cer. Portuguesa*, 299(XXV): 6-20.
- Pereira, M., Leal Gomes, C., 2014. Paragéneses contrastantes no campo pegmatítico de Arga (NW de Portugal), diversidade e equilíbrio. *Comunicações Geológicas*, 101: 181-185.
- PROSPEG (2013) – Relatório do Projecto de prospecção, análise distanciada e detecção remota de pegmatitos. Agência de Inovação, Universidade do Minho, Sinergeo LDA -Vila Verde, GGC LDA – Porto: 144 p.
- SEE (2017) - Relatório do Grupo de Trabalho “Lítio”, elaborado por despacho nº 15040/2016 da Secretaria de Estado da Energia (SEE).
- Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa (2017-2018) - Lítio, *Edição Especial do Boletim de Minas*, Vol. 52, Ed.: Leal Gomes, C. et al.

Anexo

Sobre os produtos de alteração dos materiais litínicos, com influência na diversidade de minérios ou mesclas cerâmicas

Neste anexo, além da apresentação de etapas marcantes da intervenção extractiva sobre pegmatitos cerâmicos com Li na região de Trás-os-Montes, ilustram-se aspectos macroscópicos do metassomatismo e meteorização, que têm boa expressão na região ocidental desta antiga província administrativa.

Na sua maioria as associações e minerais secundários foram logo evidentes nos primeiros trabalhos de pesquisa pontual que iniciaram o ciclo extractivo cerâmico dedicado às mesclas quartzo feldspáticas com minerais de Li, industrialmente, referidas como “alitinadas” (2002/3 em diante) - programas de sondagens e reconhecimentos de trabalhos mineiros antigos do ciclo do estanho.

Numa eventual fase de beneficiação de minérios estes aspectos irão ter importância decisiva no apuramento dos concentrados de minérios de Li. Justificam uma sistematização das paragénese afectadas pelo decaimento dos teores de Li por alteração. Tal sistemática é efectuada por discriminação petrográfica, mesoscópica a microscópica, difractometria de r-X (*DRX*) e análise química, em modo rocha total, para as associações mineralógicas tipomórficas.

A *DRX* teve lugar num equipamento X’Pert Pro – MPD – Philips Analytical com ampola de cobre e monocromador de grafite (colheita de dados entre 2 e 70° (2 θ)) e o processamento dos dados foi realizado pelo programa X’Pert Software – Philips Analytical. As análises químicas foram efetuadas por ICP-MS (*inductively coupled plasma mass spectrometry*), espectrometria de absorção atómica e fluorescência de raios – X.

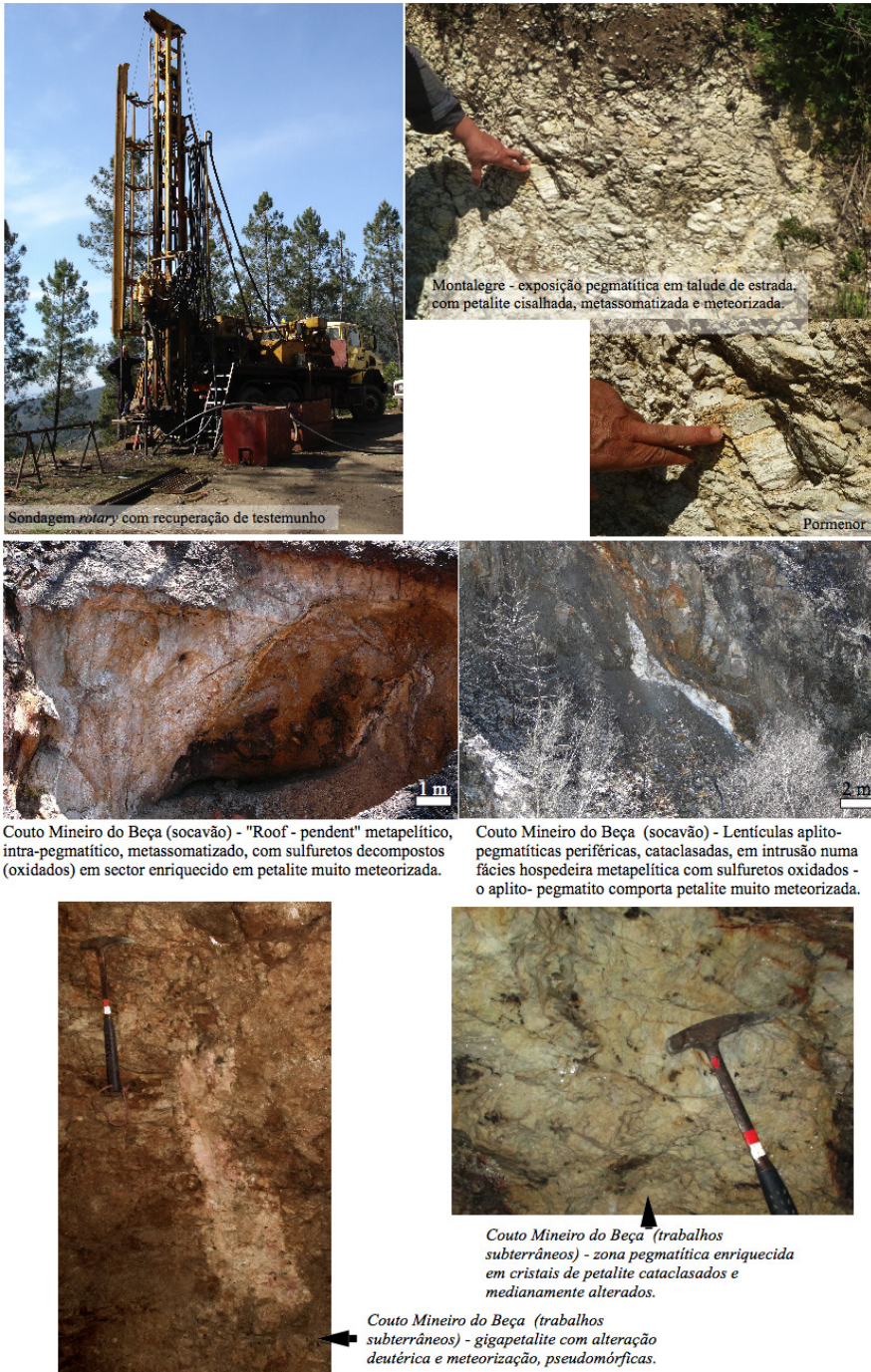
Em resultado, foi produzido um atlas de padrões ilustrados, incluindo difractogramas e imagens de litótipos, texturas e paragénese. Estas últimas seleccionaram-se de forma a permitirem discriminar, por comparação macroscópica, o universo abrangente das diferentes associações minerais com produtos de decaimento das paragénese primárias com petalite e espodumena.

Estes produtos estão bem expressos na região de Montalegre (petalite dominante) e Boticas (espodumena dominante). As estampas iniciais são representativas dos trabalhos levados a cabo nestes tipos de jazidas, enquanto

intervenções extractivas dedicadas a produtos vitro-cerâmicos. Daí provém uma grande parte das amostras ilustradas.

Os padrões texturais e composicionais representados são úteis para orientar a lavra e balizar, tanto o tratamento de “tout-venants” decorrentes de desenvolvimento industrial cerâmico como também os que se destinam à produção de concentrados de minérios de Li.

É de salientar que o decaimento do Li por alteração pode não penalizar a apetência cerâmica das jazidas, especialmente no caso das mesclas aplito-pegmatíticas apenas com alteração hidrotermal, mas penaliza a percentagem de recuperação de Li (através da beneficiação de minérios) pelo efeito da diversificação de minerais portadores de Li secundários e pela lixiviação litínica associada.



Estampa 1: Região de Montalegre – imagens obtidas em trabalhos de pesquisa pontual desenvolvidos no início do ciclo extrativo cerâmico (2002 a 2004).



27/04/2009 – antes do 1º desmonte



05/05/2009 – antes do 1º desmonte a fogo



29/04/2009 – decapagem inicial e furação



05/05/2009 – momento do 1º desmonte a fogo ("rock blasting")

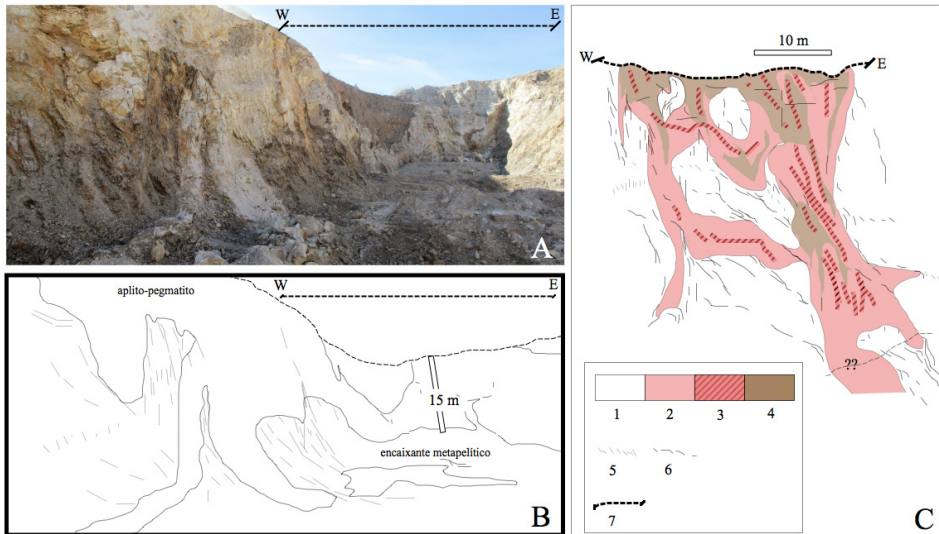


04/05/2009 – exploração superficial com "ripper"
- início da extração e furação



05/05/2009 – após o 1º desmonte a fogo

Estampa 2.1: Tempo zero da monitorização paragenética do ciclo extractivo cerâmico na corta mineira de Alijó, Canedo, Ribeira de Pena - a mina encontra-se em lavra activa em 2020 e produz mesclas quartzo-feldspáticas alitinadas.



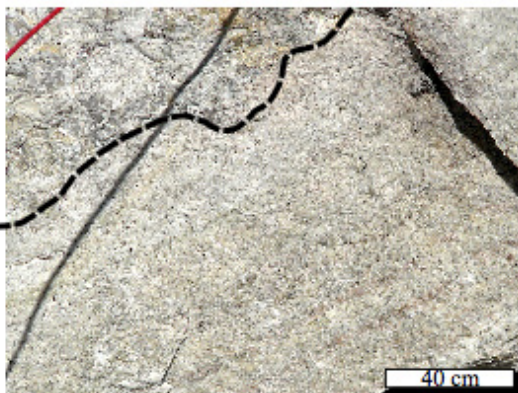
Estampa 2.2: Corta mineira de Alijó, Canedo, Ribeira de Pena, em 2018 - sector norte.

A - imagem obtida de Sul para Norte; B - redução geométrica das relações de intrusão / deformação, observáveis nos taludes de desmonte; C - corte transversal W - E, interpretativo, com as estruturas confinantes e internas principais; 1 - rochas metapelíticas regionais (micaxistos com esparsos porfiroblastos de andaluzite); 2 - aplito - pegmatitos com espodumena predominante; 3 - bandas com esboço de estrutura em pente com espodumena e estruturas em paliçada de espodumena e quartzo após petalite; 4 - domínios com alteração deutérica a supergénica ; 5 - bandas "kink" com desenvolvimento de cinemática tangencial que transitam do encaixante para os níveis mais filíticos do interior dos aplito-pegmatitos; 6 - trajetórias, em plano vertical, da foliação mais penetrativa expressa na rocha regional.

Estrutura interna e zonalidade aplito-pegmatítica

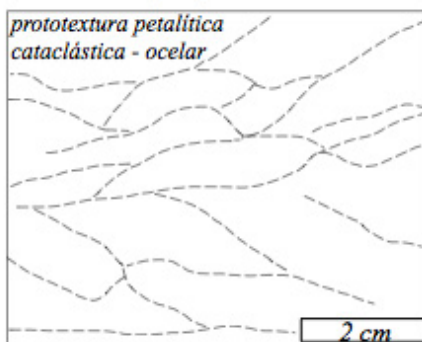
zona com textura ocelar grosseira e espodumena + quartzo em paliçada

zona com textura bandada fina e leitos de espodumena + quartzo em paliçada

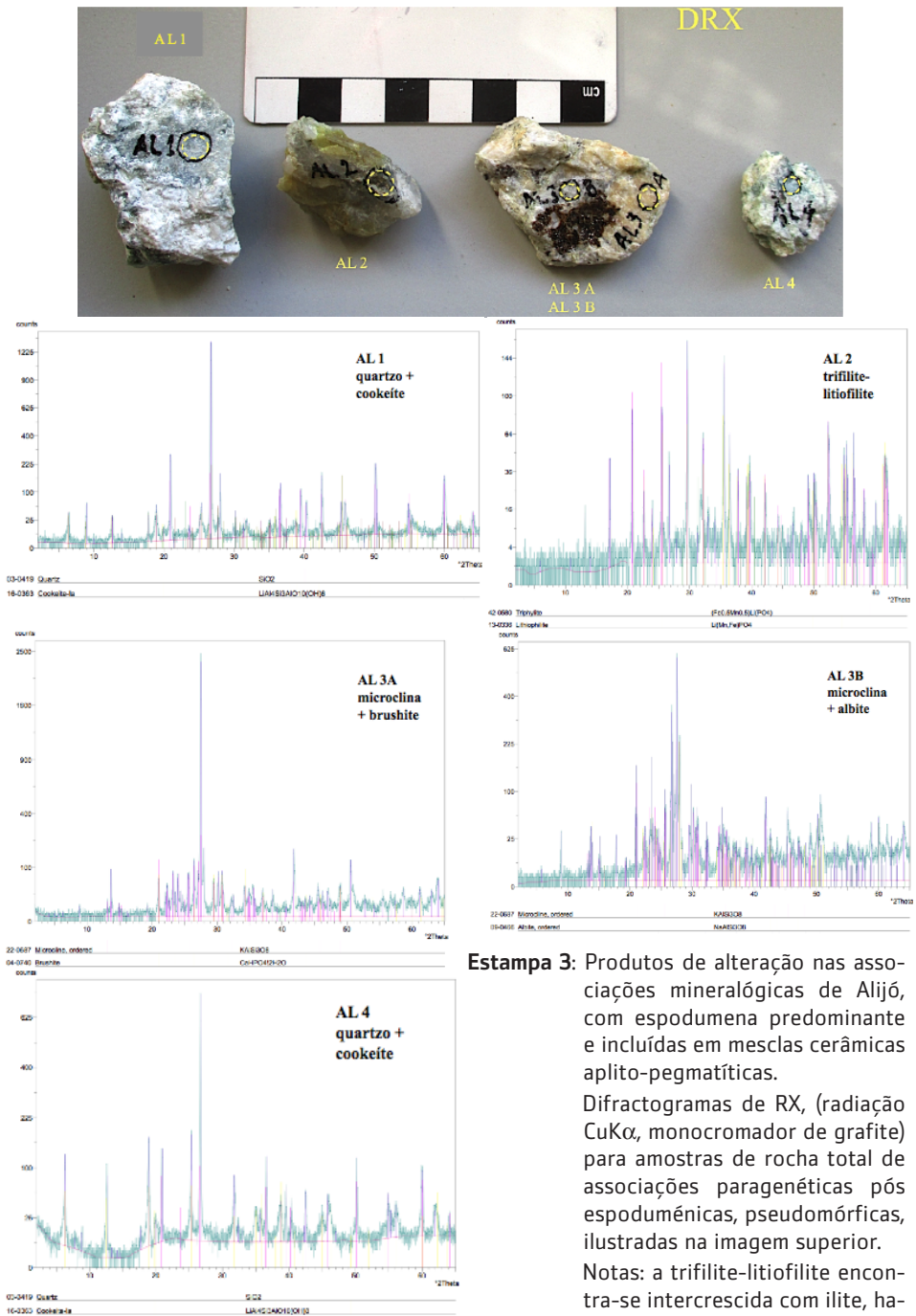


Fabric mesoescalar na zona ocelar grosseira

- texturas em paliçada de espodumena e quartzo em ocelos pós-petalíticos



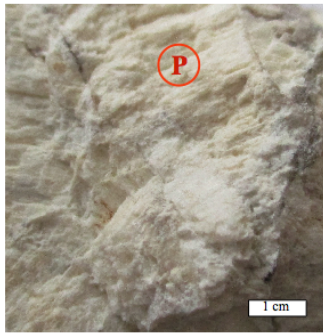
Estampa 2.3: Minerais primários e produtos de reequilíbrio em *subsolvus* - estruturas fantasma de imbricação ocelar de protopetalites - correspondentes à zonalidade interna do pegmatito: Alijó, Canedo, Ribeira de Pena.



Estampa 3: Produtos de alteração nas associações mineralógicas de Alijó, com espodumena predominante e incluídas em mesclas cerâmicas aplito-pegmatíticas.

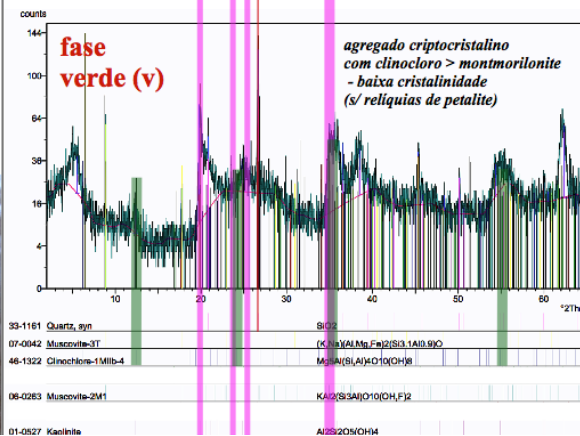
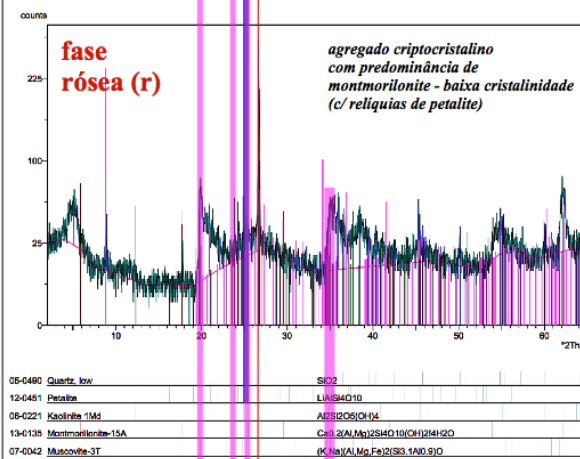
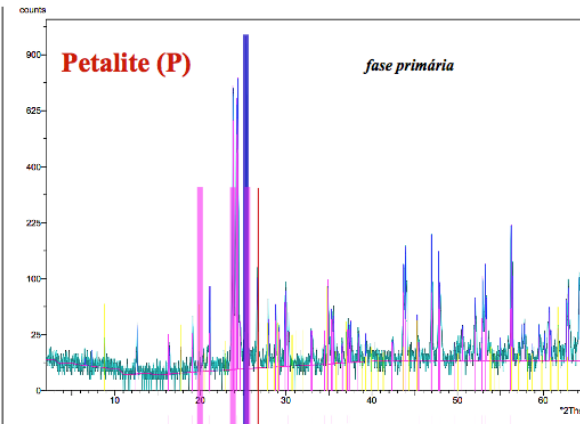
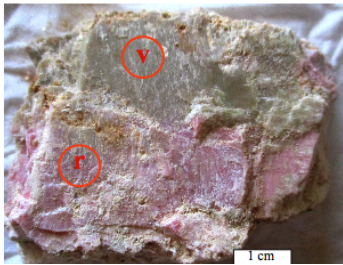
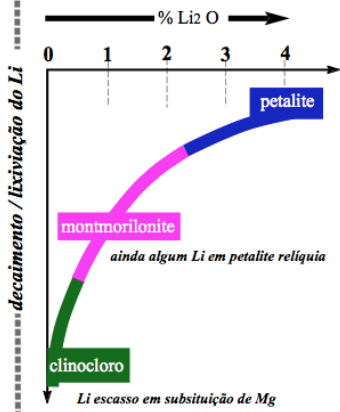
Difractogramas de RX, (radiação $\text{CuK}\alpha$, monocromador de grafite) para amostras de rocha total de associações paragenéticas pós espoduménicas, pseudomórficas, ilustradas na imagem superior.

Notas: a trifilite-litiofilite encontra-se interescrescida com ilite, haloisite e cookeite; a associação cookeite \pm quartzo é prevalectente.



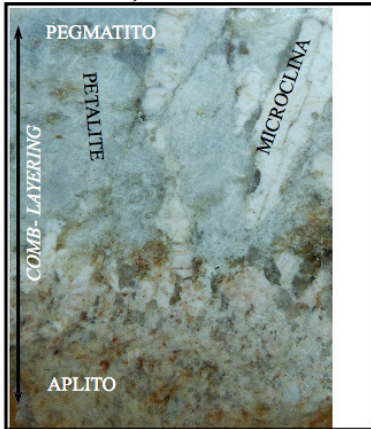
ALTERAÇÃO DIRECTA DA PETALITE

SUBSTITUIÇÃO QUASE PSEUDOMÓRFICA DEUTÉRICA DE BAIXA EMPERATURA

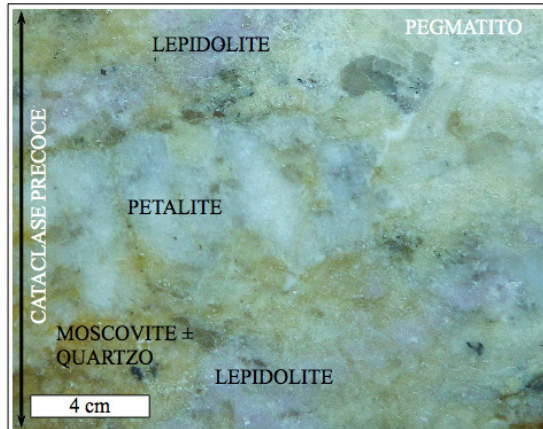


Estampa 4: Produtos de alteração principais - termos extremos - nas associações mineralógicas do Beça com petalite predominante e incluídas em mesclas cerâmicas aptilo-pegmatíticas.

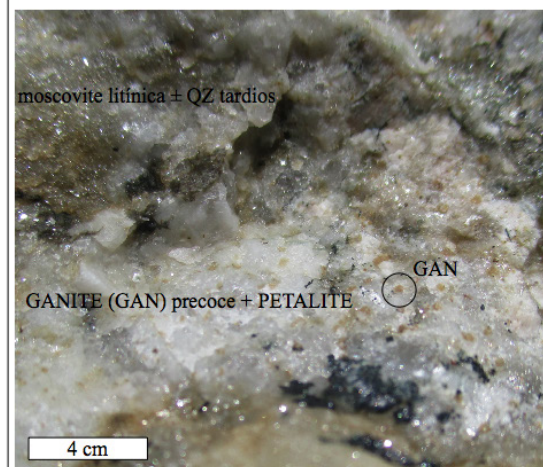
FRACÇÃOÇÃO PRIMÁRIA



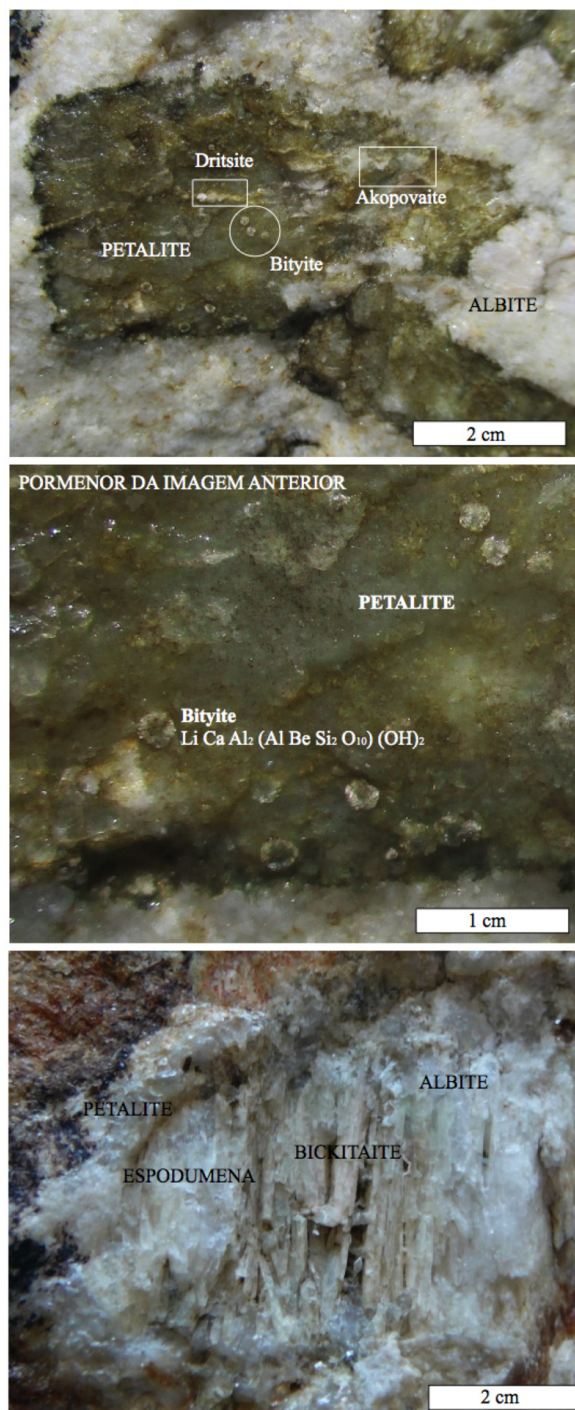
METASSOMATISMO POTÁSSICO - II



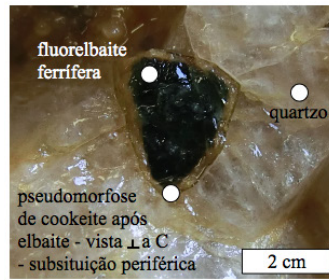
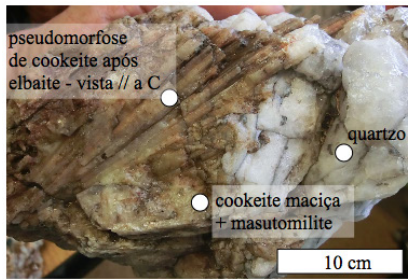
METASSOMATISMO SÓDICO - I



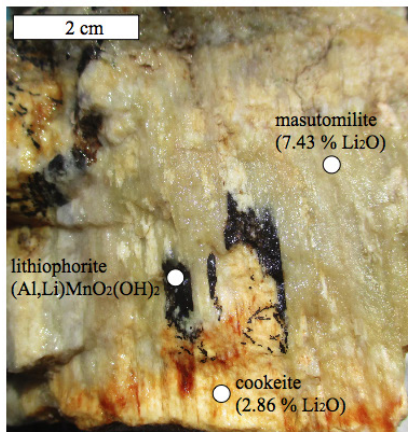
Estampa 5: Evidências mesoscópicas principais de estádios precoces de alteração deutérica ou metassomatismo, responsáveis pelo decaimento dos conteúdos de Li_2O a partir de associações com petalite de fracciação primordial.



Estampa 6: Imagens mesoscópicas de alguns outros modos de ocorrência de acessórios dos produtos principais de metassomatismo sódico - fase primordial: petalite.

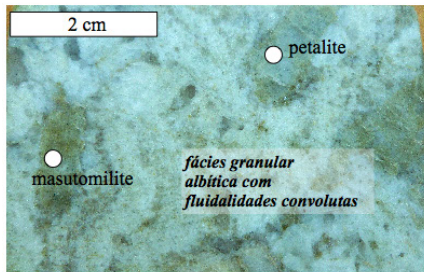


amostras de mão de afloramento

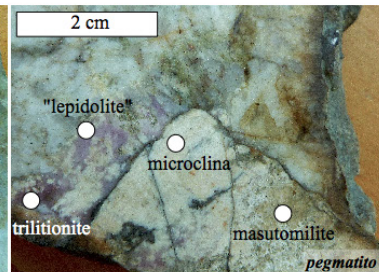


amostra de mão de trabalhos mineiros antigos

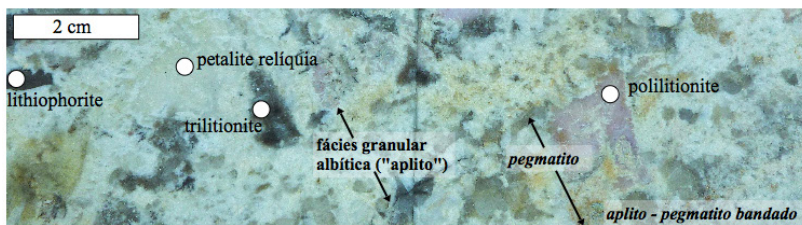
Nota: a discriminação mineralógica foi baseada em difractometria de raios X



amostra de testemunho de sondagem

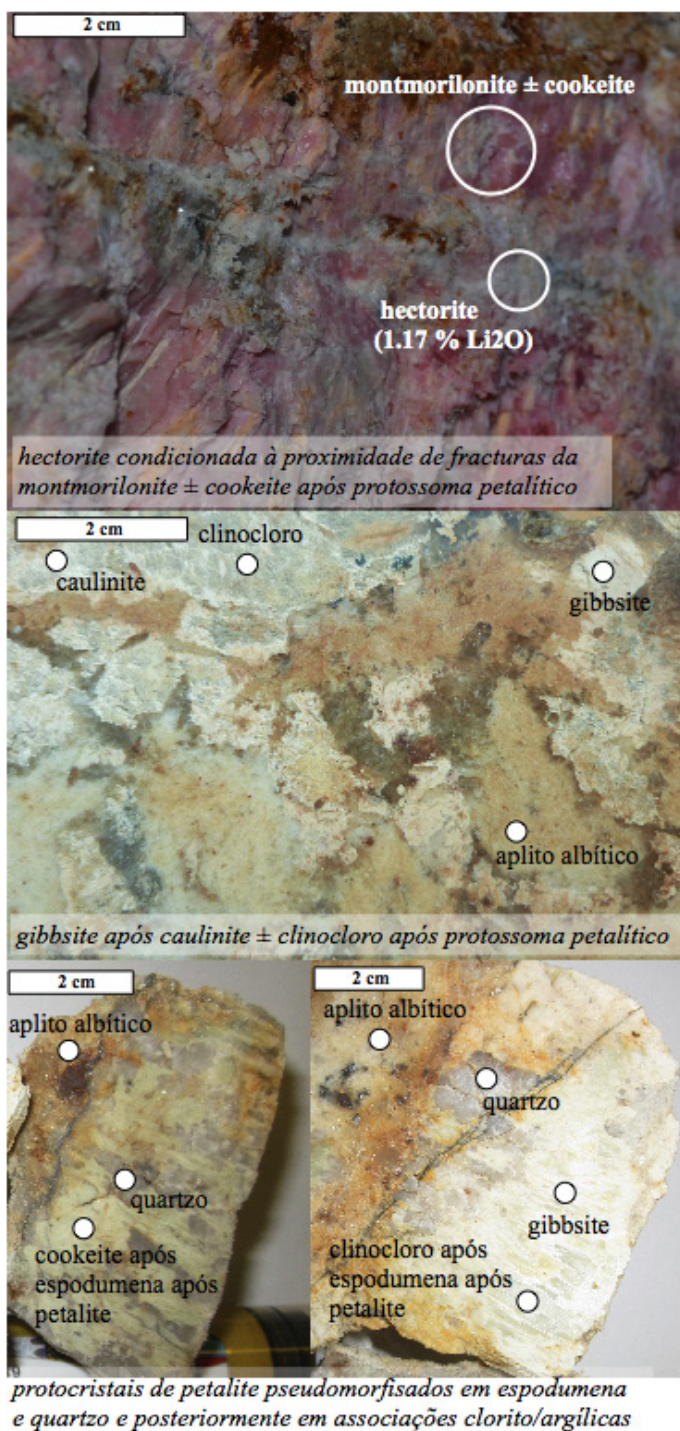


amostra de mão de trabalhos mineiros antigos

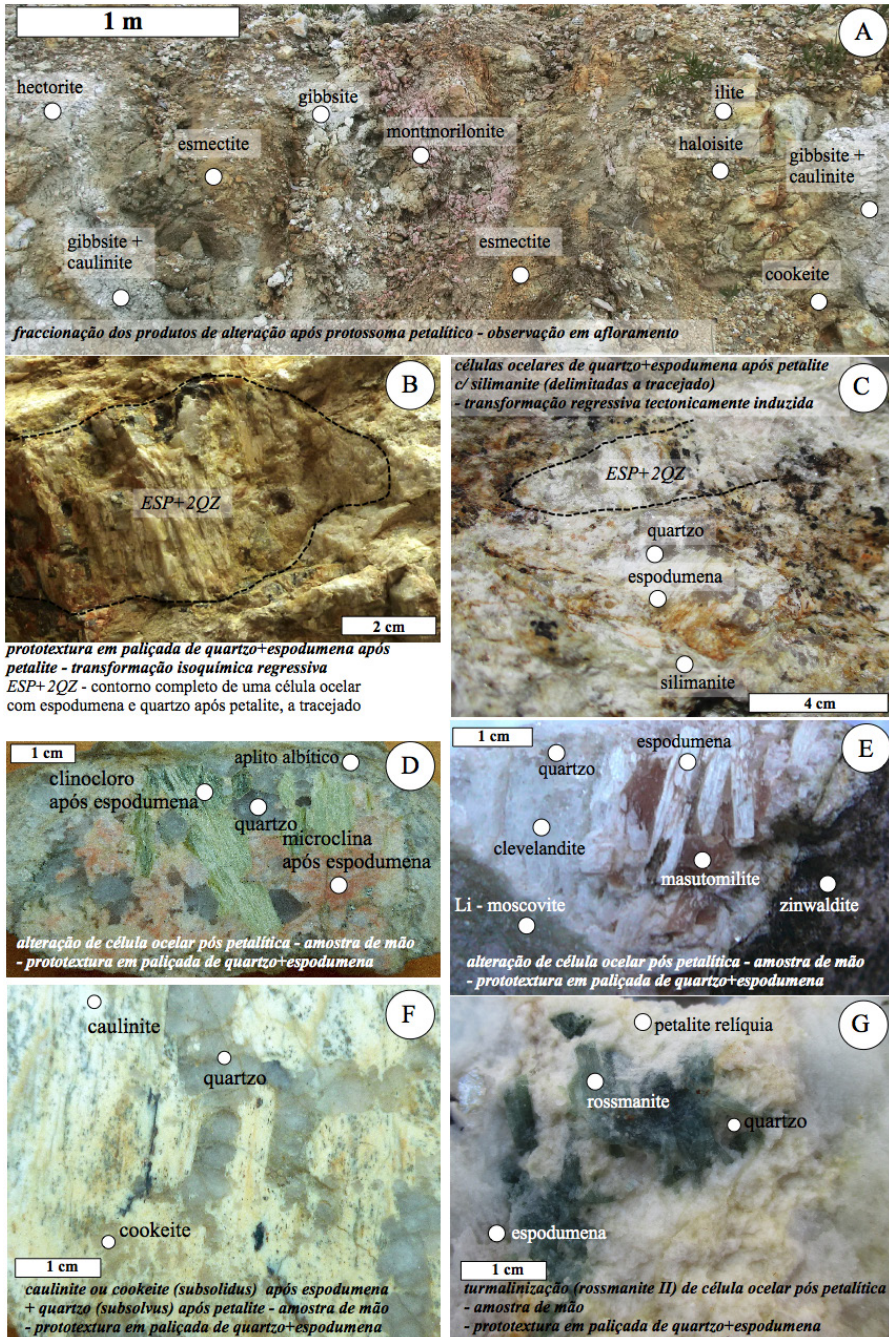


amostra de testemunho de sondagem

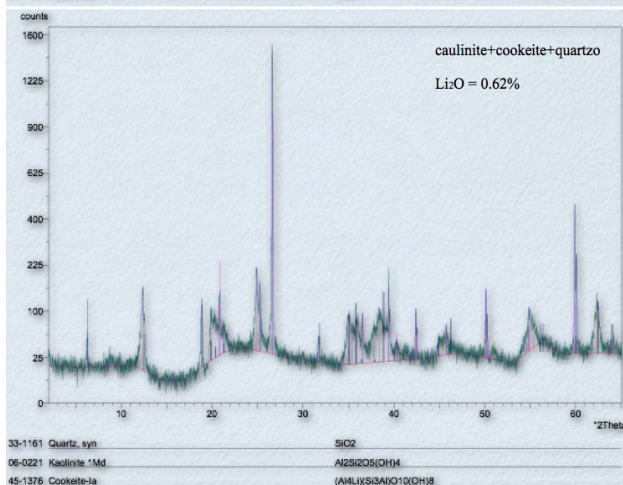
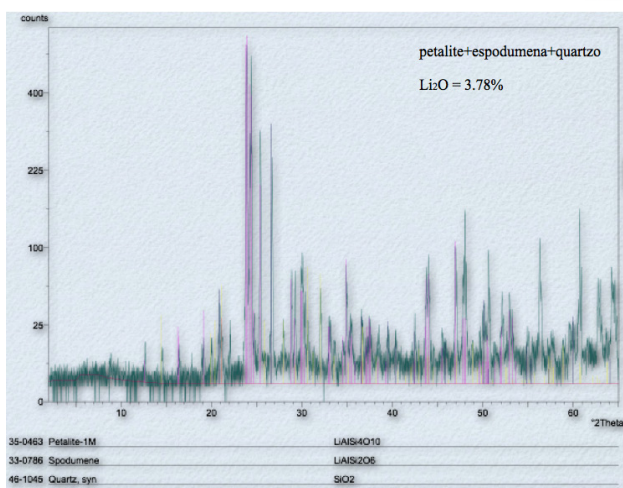
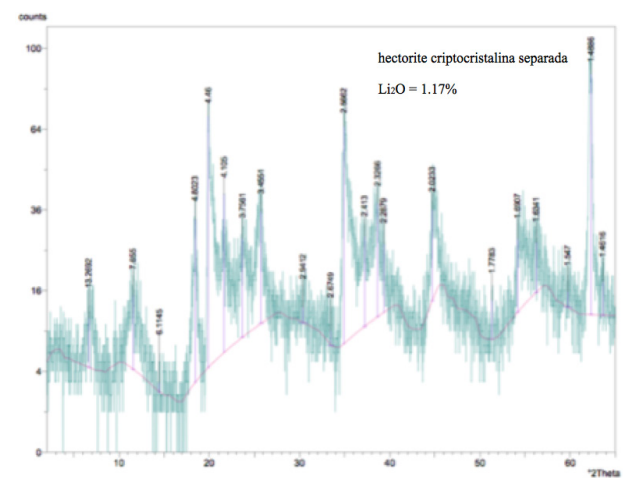
Estampa 7: Aspectos tipomórficos da alteração clorito-fílica - imagens macro, escala mesoscópica, amostras de mão. Nota: derradeira fixação do lítio na lítioforite dendrítica ou de impregnação intersticial.



Estampa 8: Aspectos tipomórficos da alteração clorito-argílica - imagens macro, escala mesoscópica, amostras de mão. Nota: derradeira fixação do lítio na hectorite.

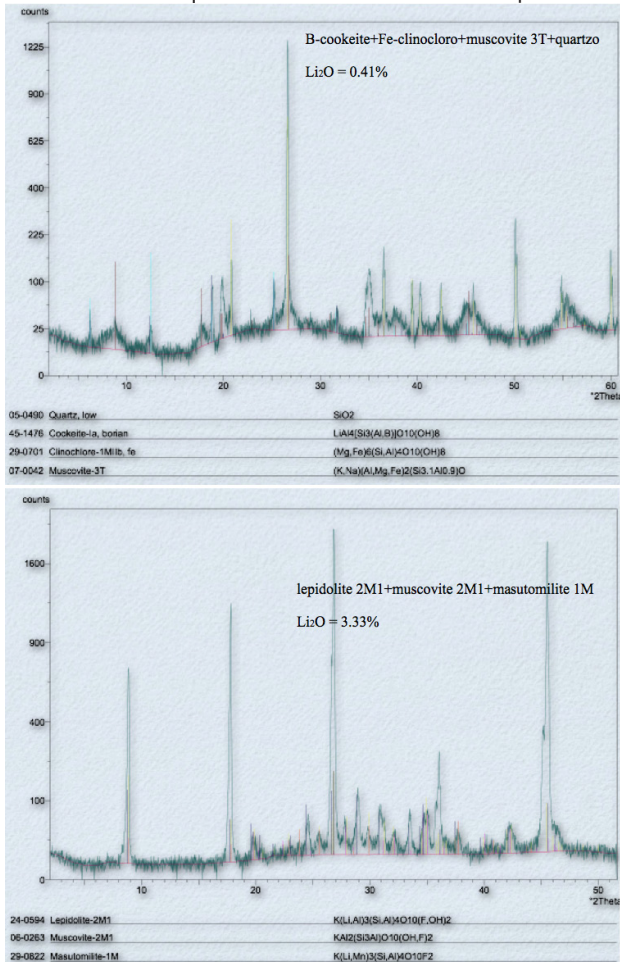


Estampa 9: Aspectos tipomórficos da sobreposição de vários estádios de evolução tardia - subsolvus a subsolidus - imagens macro, escala mesoscópica, do afloramento à amostra de mão. Nota: em todos os casos o protossoma primordial é petalítico ou resulta do equilíbrio subsolvus, isoquímico, de petalite para espodumena e quartzo (expressos em texturas em paliçada com contornos oclares).

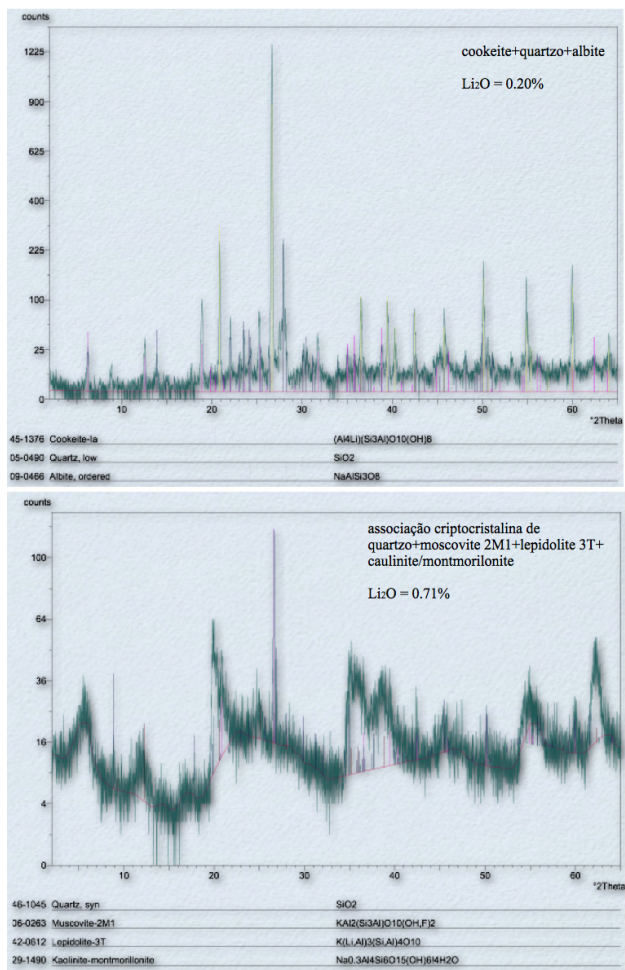


Estampa 10: Configurações de difractogramas padrão para associações mineralógicas repre-

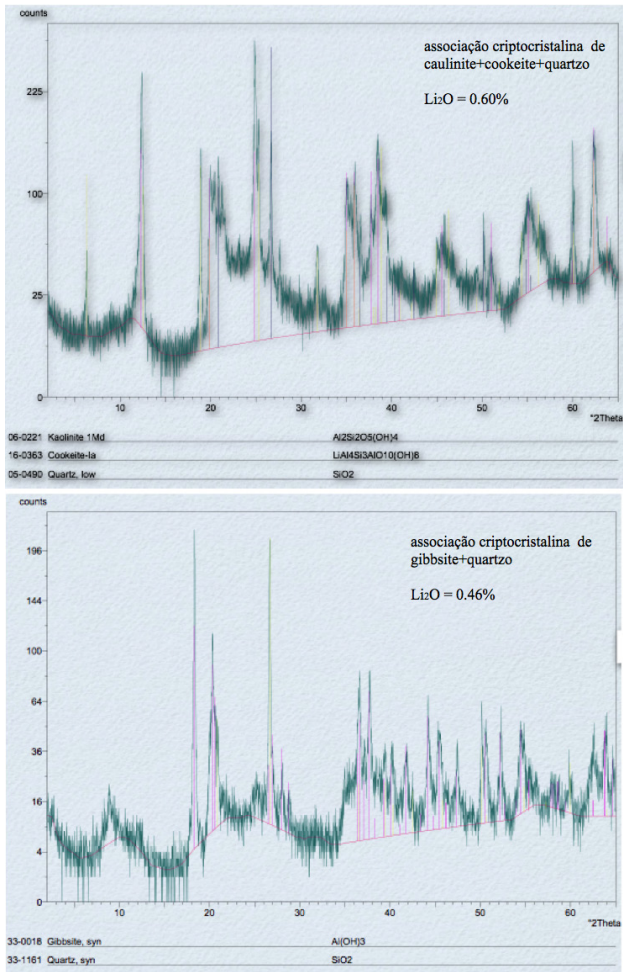
sentativas de diferentes estádios de evolução em subsolidos e correspondentes resultados de análise química de conteúdos de lítio expressos como Li₂O.



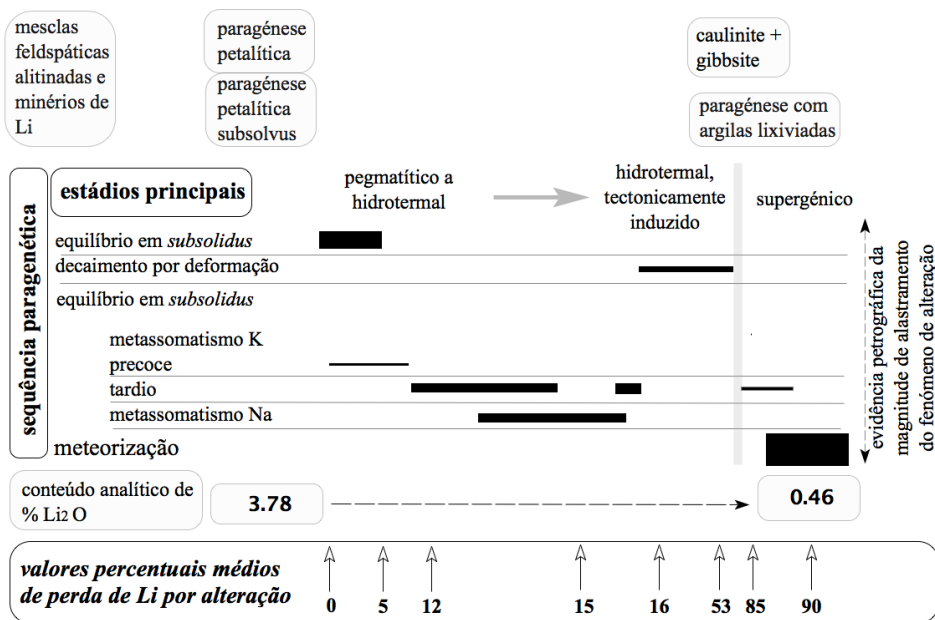
Estampa 10 (continuação)



Estampa 10 (continuação)



Estampa 10 (final)



Estampa 11: Diagrama de síntese das perdas de Li em diferentes estádios de alteração (de subsolvus a *subsolidus*) a partir de paragéneses pegmatíticas precoces de protossoma petalítico.

5 capítulo

0 Tungsténio em Trás-os-Montes

Paulo José de Vitor Ferraz

Email: paulojvferraz@gmail.com

Nestas notas referentes ao Tungsténio em Trás-os-Montes, julgo ser importante enquadrar a forma como o tema será abordado.

Assim, em primeiro lugar, irei contextualizar o assunto, fazendo referência ao elemento químico e aos minerais que são portadores de Tungsténio, passando depois a referir a importância desse elemento, numa perspetiva pessoal, a nível Internacional, Nacional e, por último, para a região de Trás-os-Montes.

O Tungsténio (W) é o elemento químico que possui o número atómico 74. Foi descoberto em 1781 e isolado pela primeira vez como metal em 1783. Este elemento não aparece na natureza na sua forma nativa e, por isso, geralmente está combinado com outros elementos químicos.

É um elemento que apresenta características muito próprias. Possui o mais alto ponto de fusão (3422 °C), relativamente a todos os outros metais, sendo o segundo mais alto quando comparado com os restantes elementos químicos (apenas o carbono possui ponto de fusão mais elevado). Também, é muito resistente à corrosão e apresenta uma densidade muito elevada (19.3 g/cm³).

Os minerais de Tungsténio não são abundantes no nosso planeta, sendo este elemento explorado economicamente a partir de dois minerais principais, um tungstato (volframite - (Fe,Mn)WO₄), e um carbonato (scheelite, CaWO₄).

A volframite é um mineral escuro, cuja variedade mais rica em Fe, de cor preta, é designada por ferberite e a mais rica em Mn, normalmente com cor castanho-escuro, é denominada por hubnerite (Figura 1).

Quanto à scheelite, é um mineral de cor normalmente branca a creme, sendo muitas vezes difícil de distinguir a olho nu, dado que frequentemente se encontra associada a outros minerais com características óticas semelhantes, tais como, quartzo, feldspato ou carbonatos. Assim, para que seja possível a sua identificação em amostra de mão e, principalmente aferir a sua quantidade relativa, é necessário recorrer a uma característica muito típica deste mineral, a fluorescência. Na realidade, é normal que a procura de scheelite

seja efetuada à noite, por existir pouca claridade, com o recurso a uma lâmpada de luz ultravioleta (UV) de baixa frequência. Desta forma, a scheelite revela-se com uma cor intensa azul esbranquiçado (Figura 1). Como apontamento curioso é de notar que a sua prospeção através deste método pode comportar alguns “perigos”, tais como o de tentar recolher uma rocha com scheelite, quando na realidade o que temos no terreno pode ser... um escorpião, que também apresenta fluorescência numa cor muito parecida com a da scheelite. Também não se deve olhar diretamente para a lâmpada UV quando ligada.



Figura 1: Diferentes minerais de volfrâmio: a – **ferberite** (Minas da Panasqueira, 18x13 cm); b – **hubnerite** (Black Pine Mine, 6,0 x 3,6 x 3,5 cm); c – **scheelite** (Mt Xuebaoding, 6,2 x 4,4 x 3,3 cm). (Fonte: Wikipedia).

A transformação industrial do volfrâmio terá começado em 1847, em plena Revolução Industrial. Conforme referido, os concentrados de minerais de Tungsténio produzidos em explorações mineiras são, normalmente, de volframite e de scheelite e é a partir destes dois minerais que se produzem diversos compostos químicos utilizados para inúmeros fins, sendo essenciais na fabricação de um grande número de produtos utilizados no nosso dia a dia.

As características muito próprias do Tungsténio, nomeadamente a sua densidade, dureza e temperatura de fusão, levam a que este elemento possa ser utilizado com finalidades muito diversas, que podem ir desde a eletrónica (placas para vibração de telemóveis ou terminais elétricos), ao desporto (bolas de golfe ou setas para atirar a alvos), às indústrias automóvel e bélica (endurecimento de aço), a tintas, a lubrificantes de alta temperatura, e ao setor da saúde (instrumentação de dentista ou de blocos operatórios), entre outros.

As matérias-primas são essenciais ao funcionamento eficiente da economia Europeia e ao bem-estar das suas populações. Deste modo, a publicação pela Comissão Europeia de dois documentos (“Iniciativa Matérias-Primas da UE”, em 2008 e “Matérias-Primas Críticas para a UE”, em 2010), conduziu à publicação em 2013 pelo Estado Português de um documento re-

lacionado com a “Estratégia Nacional dos Recursos Geológicos – Recursos Minerais”.

Este documento pareceu à altura ser bastante importante para o desenvolvimento do setor mineiro em Portugal, mas na prática verificou-se que nada se alterou de forma substancial. Diria até que, de então para cá se tornou ainda mais difícil todo o processo de abertura de uma mina em Portugal.

O Tungsténio é, assim, um elemento químico de enorme importância estratégica para a Europa, fazendo parte da lista de “*Raw Materials*” apresentada pela própria União Europeia (UE). Isto significa que, existe o perigo real de que a indústria europeia não consiga ser abastecida através da sua produção interna. Assim, uma interrupção total da importação de minerais de Tungsténio, poderia levar a que a indústria e, conseqüentemente, a economia da União Europeia ficasse severamente afetada, ou mesmo que colapsasse.

É ainda importante referir que, atualmente, cerca de 80% dos concentrados de volfrâmio produzidos no nosso planeta têm origem na China, o que coloca a UE numa situação de enorme dependência deste país, quanto ao fornecimento do Tungsténio necessário para o funcionamento da sua atividade industrial. deste modo, a UE estará neste momento, completamente dependente das políticas comerciais chinesas.

A nível Nacional, a importância do Tungsténio é histórica e a sua exploração foi levada a cabo principalmente no Norte de Portugal, com especial relevo na zona de Trás-os-Montes, onde se localizam inúmeras antigas minas de volfrâmio (Figura 2).

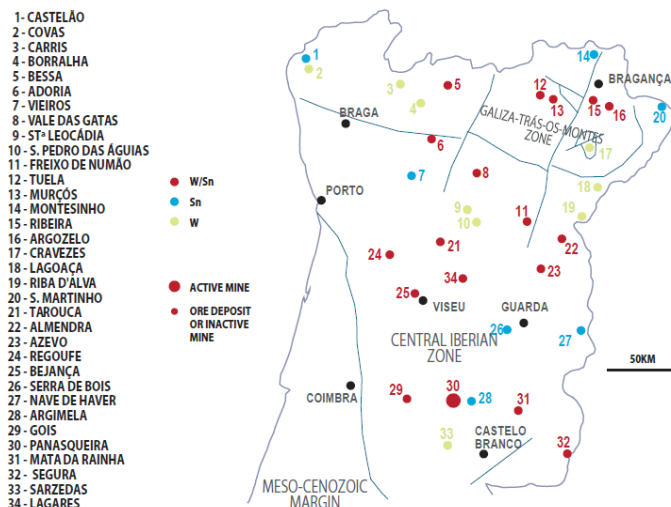


Figura 2: Localização das principais ocorrências de volfrâmio no Norte e Centro de Portugal. (Fonte: Martins, L. P., 2012).

Muitas destas minas, apenas foram exploradas durante a primeira metade do século XX, com especial incidência nos períodos referentes às duas Guerras Mundiais. A grande procura de Tungsténio para a produção de material bélico (armamento) fez com que as cotações do volfrâmio disparassem e levaram a que alguns pudessem enriquecer de forma abrupta. A maioria dos que nas minas trabalhavam nunca chegou a encontrar fortuna e delas apenas obteve sofrimento e fraca remuneração. Para isso, basta lembrar que a atividade mineira realizada nessas pequenas explorações se limitava a seguir a mineralização que aflorava e estendia-se em profundidade através de galerias e poços precários, onde a qualquer instante poderia ocorrer uma derrocada. Para além dos acidentes, que causavam mortes e feridos, também a silicose, doença causada pela inalação de finas partículas de sílica (quartzo), acabava por “minar” a saúde dos trabalhadores dessas minas. As antigas explorações mineiras de volfrâmio em Portugal foram na sua maioria pequenas, quer no volume de minério conhecido, quer no teor em WO_3 , razões pelas quais quase nunca conseguiram sobreviver a períodos de cotações baixas.

É, no entanto, de referir que, muitas vezes, o problema real, e que ainda hoje persiste, é o desconhecimento da verdadeira grandeza dos recursos geológicos presentes, razão pela qual a prospeção e a pesquisa geológica se tornam essenciais para conhecer a realidade do país quanto ao seu verdadeiro potencial mineiro, permitindo ainda obter instrumentos e dados que ajudem na tomada de decisões acertadas.

Trás-os-Montes e Alto Douro é de longe a região portuguesa com maior ocorrência de explorações de Tungsténio, apesar de atualmente já não existir nenhuma mina em funcionamento. A importância do Tungsténio para esta região deve ser observada segundo três pontos de vista distintos, obrigando-nos desde logo a reconhecer a sua importância internacional, nacional e local.

1. Importância Internacional

Uma vez que os minerais de Tungsténio são utilizados em muitas indústrias consideradas essenciais para o desenvolvimento económico da sociedade atual, e que esta “industrialização” é essencial para que se possa manter e/ou melhorar os padrões de vida da sociedade, torna-se crítico garantir o abastecimento destes minerais à indústria da União Europeia.

Independentemente da posição individual de cada um quanto à relação benefício/prejuízo referente à atividade mineira, e para o caso concreto das minas de Volfrâmio, só através de uma procura incessante de novos recur-

sos, que garantam o suprimento contínuo destes minerais, se conseguirão manter as comodidades existentes na nossa sociedade e usufruir dos avanços tecnológicos que atualmente existem. Assim, e para que este desiderato seja alcançado, a Europa em que nos inserimos terá de procurar mais e melhor informação para garantir o fornecimento de elementos críticos, tais como o Tungsténio, de forma a que possa, se necessário, tornar-se auto-suficiente. O mercado de Tungsténio é bastante fechado. Não existem muitos produtores de APT (paratungstato de amónia), pelo que não existem muitas informações públicas relativas à cotação e ao mercado de concentrados deste metal. A cotação para concentrados de Tungsténio é apenas publicada semanalmente, à sexta-feira.

Normalmente, um concentrado será considerado como vendável, quando apresenta um teor de trióxido de Tungsténio superior a 65%. No entanto, podem existir diversos elementos penalizantes nos concentrados obtidos, como o Arsénio, o Urânio ou o Tório, entre outros, os quais poderão afetar de forma decisiva a qualidade deste produto para uso industrial, bem como diminuir o valor do concentrado.

De acordo com a World Mining Data, Portugal encontrava-se no 8.º lugar mundial, relativamente à produção estimada para o ano de 2014, com a indicação de 671 toneladas de W produzidas (Tabela 1).

Tabela 1: Produção de volfrâmio e posição ocupada pelos principais países produtores de volfrâmio a nível mundial, nos quais se inclui Portugal. (Fonte: Horgan, S., 2016).

	2010		2011		2012		2013		2014	
	Ton.	Posição	Ton.	Posição	Ton.	Posição	Ton.	Posição	Ton.	Posição
China	66 900	1ª	69 900	1ª	67 600	1ª	71 400	1ª	67 700	1ª
Rússia, Ásia	2 765	2ª	3 311	2ª	3 639	2ª	3 101	2ª	2.210	2ª
Canadá	400	9ª	1 956	3ª	2 025	3ª	2 392	3ª	2.132	3ª
Ruanda	501	7ª	598	7ª	1 041	5ª	1 319	4ª	1.288	4ª
Bolívia	1 203	3ª	1 124	4ª	1 247	4ª	1 253	5ª	1.251	5ª
Áustria	977	4ª	861	5ª	706	7ª	850	6ª	819	6ª
Mongólia	58	-	84	-	117	-	249	-	765	7ª
Portugal	799	3ª	819	6ª	763	6ª	692	7ª	671	8ª
Brasil	166	-	244	-	381	10ª	494	9ª	600	9ª
Espanha	210	10ª	337	10ª	303	9ª	487	10ª	556	10ª

Fonte: World Mining Data 2016

É certo que, durante os últimos anos terão existido algumas variações significativas nas produções dos países referidos na Tabela 1, dado que os valores oficiais, que constam na tabela, não estão atualizados. Deste modo, será certo considerar que atualmente a China continua a ser o grande produtor

mundial de Tungsténio e que países como a Áustria e a Espanha deverão ter baixado a produção. Quanto a Portugal não terá havido grande variação. Com base nestes dados, é fácil verificar que a dependência da União Europeia em relação ao Volfrâmio proveniente da China é realmente muito grande, o que estrategicamente poderá ser considerado muito perigoso para a própria Europa.

Assim, é extremamente importante que os Estados que integram a União Europeia proporcionem condições para a execução de prospeção e pesquisa que possam revelar novas fontes para a obtenção de recursos de Tungsténio dentro do seu próprio território, e que, ao mesmo tempo, prepare a UE para uma eventual quebra de fornecimento a partir da China.

Em Portugal, como já foi referido, apenas na região norte do país se conhecem ocorrências relevantes de Tungsténio, com alguma possibilidade de serem economicamente rentáveis.

A exploração de volfrâmio no passado foi responsável, não apenas pela muita riqueza e esbanjamento existentes durante o funcionamento das minas, mas também pela situação de miséria que se instalou nas regiões mineiras, quando estas minas foram simplesmente abandonadas sem qualquer projeto alternativo, visando o seu encerramento e posterior monitorização.

Essa exploração, muitas vezes desenfreada, e outras vezes diminuta, esteve sempre intimamente ligada, como já atrás referido, com períodos de maior necessidade de Tungsténio, principalmente relacionados com as grandes guerras registadas no século XX. A necessidade súbita de Tungsténio fez nessa altura subir a cotação dos concentrados e permitiu a abertura ou reabertura de inúmeras pequenas minas que deram trabalho a milhares de pessoas.

2. Importância Nacional

Considera-se que a produção de riqueza advém do setor primário, ou seja, só a pesca, a agricultura e a exploração mineira aportam à economia um valor realmente “novo”. Assim, as restantes atividades não corresponderão a mais do que transformações e trocas de valores / dinheiro, que apenas serão possíveis após a existência de produtos criados por este setor.

Não se pretende com isto retirar a importância atribuída à transformação e à criação de valor acrescentado existente após a produção mineira, mas creio que muitas vezes, e erradamente, há algum menosprezo social por este setor, de que o Tungsténio é uma parte importante, e fundamental para o desenvolvimento das Sociedades modernas.

Atualmente em Portugal existem apenas três minas de minerais metálicos em funcionamento, nomeadamente, as minas de Neves de Corvo e de Aljustrel, que produzem concentrados de cobre (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb), e a mina da Panasqueira, na zona Centro do país, que produz concentrados de volframite (FeWO_4), cassiterite (SnO_2) e calcopirite (CuFeS_2).

Além destas minas, existem em Portugal diversos jazigos minerais de Tungsténio localizados no Norte do país, sendo que muitos se situam na região de Trás-os-Montes.

É de salientar que Trás-os-Montes contribuiu durante muitos anos para que Portugal fosse um grande exportador de concentrados de Tungsténio. Para além de inúmeras pequenas explorações existiram minas como a Borralha, Fonte Santa, Vale das Gatas, Argozelo e Murçós, que alcançaram uma dimensão maior.

Na Tabela 2, apresentam-se alguns dados estatísticos referentes às ocorrências de minas de volfrâmio em Portugal. Assim, da sua análise verifica-se que cerca de 48% de todas as ocorrências foram registadas na região de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Tabela 2: Distribuição das minas de volfrâmio por distrito.

Cálculos auxiliares				
Total		Distrito	nº	% Volfrâmio
303	100%	Porto	0	0%
		Braga	24	8%
		Vila Real	117	39%
		Viana do Castelo	20	7%
		Aveiro	69	23%
		Bragança	26	9%
		Guarda	26	9%
		Viseu	21	7%

Fonte: Boletim de Minas, Amorim, 2015.

Este cenário colocou Portugal como um país de enorme relevância na produção e no fornecimento de volfrâmio a nível mundial, principalmente no decorrer da 2.^a Grande Guerra, onde o Governo vigente pretendeu manter o país numa posição de neutralidade. Nessa altura, as minas então em atividade vendiam o seu produto aos dois oponentes, tendo o nosso país sido muitas vezes acusado, quer por ingleses quer por alemães, de estar a beneficiar o oponente. Na realidade, as minas portuguesas iam fornecendo o volfrâmio aos dois beligerantes, chegando a existir minas separadas por poucos quilómetros, em que uma era controlada por técnicos alemães e a outra era controlada por técnicos ingleses.

Essa situação atingiu um ponto tão extremo, que levou em 1945 o Governo de Portugal a proceder ao encerramento, por decreto, das minas de volfrâmio existentes em todo o país, a bem da manutenção da posição de neutralidade assumida.

Atualmente, a única exploração de volfrâmio ativa em Portugal é a das Minas da Panasqueira, situada no distrito de Castelo Branco, a qual constitui desde há décadas uma importante mina de categoria mundial, não só pela sua antiguidade (iniciou a exploração na década de 90 do século XIX) mas, principalmente, pela qualidade do concentrado de WO_3 produzido e pela tonelagem de minério que ainda consegue extrair. Deve-se exclusivamente a esta mina, o facto de Portugal ser ainda considerado o maior fornecedor a nível europeu, de concentrados de volfrâmio e de se encontrar ainda no top 10 dos países maiores produtores mundiais.

3. Importância Local

As ocorrências e as antigas minas de volfrâmio nacionais localizam-se essencialmente na metade norte de Portugal, sendo que a província de Trás-os-Montes e Alto Douro possui, não apenas indícios de zonas com volfrâmio ainda não explorado, bem como, muitos outros indícios de pequenas explorações e vestígios de minas de maior dimensão, tais como, Borralha, Lagoaça e Murçós.

Todas estas minas constituíram focos de emprego e de riqueza, principalmente em alturas em que a cotação dos concentrados de volfrâmio era mais elevada. A riqueza criada foi, muitas vezes, fugaz e passageira. De facto, nesses períodos ainda não existia um programa que conduzisse a uma diversificação e a um investimento em atividades diversificadas, que permitisse a produção de riqueza após o término da exploração mineira, definitivo (por exaustão dos depósitos minerais) ou temporário (em consequência de descidas, por vezes abruptas, na cotação dos minérios).

Neste contexto, assistiu-se ao surgimento de pequenas aldeias mineiras, por vezes votadas ao abandono, mas que deixam ainda sentir o pulsar das populações que as habitaram e que na mina trabalharam, sendo que, por esta razão se pretenda ainda contribuir para a sua preservação.

Desta forma, creio que a preservação das fabulosas explorações mineiras que foram criadas durante a ocupação Romana é tão importante como a das explorações mineiras desenvolvidas já mais tarde durante o Século XX, e muito provavelmente daquelas que teremos a necessidade de fazer no futuro.

A própria evolução do Homem está intimamente ligada à utilização dos recursos minerais e, como tal, exige o desenvolvimento da exploração mineira. A preservação das minas e das aldeias mineiras que lhes estão intrinsecamente associadas, é tão importante como a abertura de novas minas, sempre de acordo com o que é considerado ambientalmente e socialmente aceitável em cada momento da História.

Não se deve, nem podem classificar ou catalogar comportamentos ou ideias sem as enquadrar no seu tempo.

Assim, à luz do conhecimento atual, a preservação e a conservação de zonas mineiras revelam-se localmente muito importantes, não apenas do ponto de vista tecnológico e cultural, mas, também, por constituírem um foco importante de atração turística. A criação de novas minas poderá também dar um contributo muito interessante e porventura decisivo em todos estes aspetos. Mais importante do que “ver como era”, será observar a evolução e procurar entender que a “forma de fazer” no presente não é a mesma que no passado, e que as prioridades atuais são bastante distintas. Este aspeto dá ainda mais força ao que antigamente foi feito, mas certamente um maior conforto pela forma como se verificará a qualidade do que é agora executado. A título de exemplo, veja-se a baixa prioridade atribuída pelos Romanos à segurança e ao ambiente local nas explorações mineiras por eles desenvolvidas, e o nível de preocupação que tais aspetos merecem nos tempos atuais durante a exploração de uma mina moderna.

Apenas a conjugação do passado com o presente, sem exclusões mútuas, poderá constituir uma alavanca que não crie apenas valor acrescentado num determinado momento, mas que possa prolongar no tempo esse mesmo valor acrescentado, permitindo fazer com que as populações se possam fixar nestas zonas atualmente em fase de desertificação, quando não mesmo desertificadas e/ou em ruínas.

Haverá sempre mais interesse em comparar-se como era antigamente com o que é feito atualmente, do que se centrar apenas em um dos lados, sem contraditório. A acrescentar a isto penso, também, que se nada de importante se fizer durante o período de uma geração, então essa geração será sempre vista como uma página “negra” da História da Civilização, onde nada de relevante se criou tendo em vista a constituição de um legado para as gerações vindouras.

Deste modo, as explorações mineiras de volfrâmio do século XX constituem uma marca indelével que está e ficará para sempre na História contemporânea, juntamente com tudo o que de “bom e mau” trouxeram, mas cujo

contributo se tornou fundamental para o avanço da Ciência / Tecnologia e da própria Sociedade dos tempos modernos.

Por tudo isto, as comunidades mineiras, com o seu trabalho árduo e simples, tendo sempre por detrás equipas técnicas que, muitas vezes, acabam por ficar na penumbra, mostraram e continuam a mostrar ao Mundo que, por cada utensílio novo, por cada inovação tecnológica, há sempre um enorme contributo do suor, das lágrimas, dos sorrisos, do trabalho e da felicidade de gentes simples chamadas de “Mineiros”.

Neste sentido, a região que mais contribuiu para a produção de volfrâmio em Portugal foi, sem dúvida, a região de Trás-os-Montes e Alto Douro. A título de curiosidade podemos apresentar a distribuição das principais minas de volfrâmio em Portugal, estando atualmente a sua grande maioria inativas, juntamente com outros jazigos de W conhecidos (Figura 2). Verifica-se assim que na região de Trás-os-Montes e Alto Douro existem inúmeras pequenas explorações de volfrâmio (W), estando muitas destas ligadas também à exploração de estanho (Sn).

Sem querer ocupar muito tempo com pormenores técnicos relativos à sua origem, pode afirmar-se que deste ponto de vista, os jazigos de Tungsténio podem corresponder a vários tipos, mas, de uma forma simplificada, são apresentados os seguintes, segundo F. Horsnail (1979):

- 1 - Jazigos de “*Skarn*”;
- 2 - Jazigos hidrotermais;
- 3 - Jazigos em pórfiros graníticos;
- 4 - Jazigos vulcanogénicos.

De uma forma geral, as mineralizações de Tungsténio do norte de Portugal, nomeadamente as do tipo “*skarn*” e os filões hidrotermais, apresentam-se controladas por estruturas tectónicas de âmbito regional, especialmente relacionadas com a ocorrência de rochas graníticas, estando ambas associadas com as fases de deformação atribuídas à orogenia Hercínica, que decorreu durante o Paleozóico. Estas mineralizações distribuem-se pelos terrenos das Zona Centro-Ibérica (ZCI) e Zona Galiza Trás-os-Montes (ZGTM), tendo levado Neiva (1944) a definir a existência de uma “Província metalogenética estano-tungstífera Ibérica”.

Quanto aos jazigos filonianos de Tungsténio, Pereira et al. (1993) indicam que estes se encontram associados a estruturas herdadas dos cisalhamentos Hercínicos, bem como, com a ocorrência de fraturas relacionadas com a instalação de cúpulas de granitóides mais tardios. No primeiro caso, a sua distribuição ocorre ao longo de alinhamentos paralelos com a estruturação Hercínica, bem como, com fraturas posteriores, relacionadas com a fase

Tardi-Hercínica. Quanto ao segundo caso, as mineralizações de W estão geralmente associadas com a ocorrência de rochas graníticas pós-tectónicas, as quais intruíram e metamorfizaram o encaixante de natureza metassedimentar (Noronha *et al.*, 2013)

Na região de Trás-os-Montes e Alto Douro os jazigos explorados são essencialmente dos tipos “*skarn*” e hidrotermais, sendo que, muitas vezes os de origem ou com contribuição hidrotermal possuem estanho associado. No geral, todas as ocorrências estão associadas direta ou indiretamente com a presença de litologias graníticas, tanto relacionadas com o desenvolvimento de auréolas de metamorfismo de contacto ou com a atividade hidrotermal ao longo de fraturas e “*stockworks*”.

Nos jazigos do tipo “*skarn*”, os quais derivam de fenómenos de metamorfismo induzido por rochas normalmente graníticas em contacto com camadas de rochas calco-silicatadas, explora-se essencialmente scheelite, enquanto que, nos jazigos hidrotermais o mineral explorado é, normalmente, a volframite. Quanto ao estanho, que muitas vezes também acompanha esta mineralização, encontra-se principalmente em cassiterite. A scheelite pode, também, ocorrer neste tipo de jazigos, normalmente associada com as fases mais tardias.

De salientar que, a produção de concentrados de volfrâmio é, muitas vezes, mais fácil e/ou eficaz no caso da volframite. Isto significa, também, que a recuperação no processo de beneficiação do minério é, normalmente, superior quando se trata de volframite. No entanto, para ambos os casos, é necessário não pulverizar demasiado a volframite ou a scheelite, uma vez que, quanto mais fina for a sua granulometria, pior será a sua recuperação, com consequências diretas no teor em WO_3 do concentrado final.

O processo de beneficiação dos minérios de volfrâmio é essencialmente gravítico. No caso da volframite, uma separação magnética posterior permite a separação deste mineral de outros, tais como a scheelite ou a cassiterite. No caso da scheelite, a sua separação da cassiterite é ainda mais complicada, obrigando a uma separação electrostática que se revela muitas vezes bastante sensível, o que afetará a recuperação e a qualidade do concentrado final de WO_3 .

Os processos de tratamento dos minérios de volfrâmio produzidos nas minas de Trás-os-Montes e Alto Douro não fugiam à regra, e de uma forma geral seguiam as normas aqui descritas, conforme se pode verificar em alguma bibliografia ou, mesmo, através das ruínas das antigas instalações industriais e de algumas máquinas guardadas e preservadas em pequenos museus espalhados por toda esta região.

A dimensão das minas de volfrâmio que funcionaram na região de Trás-os-Montes e Alto Douro é bastante variável, existindo minas com uma dimensão assinalável e ainda outras muito mais pequenas e artesanais. Das mais importantes, podemos salientar as seguintes: Mina da Borralha, Mina de Fonte Santa, Mina de Vale das Gatas, Mina de Argozelo e Mina de Murçós. Seguidamente, apresentarei uma descrição geral de cada uma dessas minas.

1. Mina da Borralha (Montalegre)

A Mina da Borralha, situada na freguesia de Salto, concelho de Montalegre, foi durante muitos anos uma importante fonte de Tungsténio, sendo a principal mina portuguesa a explorar este minério até ao final da década de 1930, tendo cessado a sua atividade em 1986 (Figura 3). Esta mina foi uma das principais produtoras de wolframite e scheelite da Europa, antes da entrada em produção da Mina da Panasqueira, localizada na região da Beira Baixa (Gomes & Ramos, 2018; in: Balsa & Teixeira, 2018).



Figura 3: Vista das antigas instalações mineiras da Mina da Borralha, Montalegre. (Fonte: <https://www.vieiradominho.tv/minas-da-borralha-podem-reabrir/>).

Trata-se de um jazigo do tipo filoniano com uma predominância clara da wolframite, em que as estruturas mineralizadas incluem dois tipos de filões (Noronha, 1983):

1. Filões verticais: com direção N 70-130°E e inclinação muito variável, entre 45 e 90°;
2. Filões deitados: com direção muito variável e pouco inclinados.

De uma forma geral, as estruturas mineralizadas que caracterizam este jazigo incluem os filões quartzosos (espessura de 0.5 a 1.0 m), com orientação predominante segundo E-W e pendor de 45-60° para N, e uma brecha de colapso constituída por blocos de quartzo, xisto encaixante e granito, cimentados por quartzo (Gomes & Ramos, 2018; in: Balsa & Teixeira, 2018).

Existem atualmente projetos de prospeção e pesquisa, os quais visam avaliar ainda a possibilidade de exploração de volfrâmio nesta área, principalmente a partir de uma outra estrutura bastante conhecida neste jazigo, designada de brecha de S.^{ta} Helena.

O atual projeto de prospeção parece ter potencial para, no caso de ser mais aprofundado, se conseguir chegar a uma definição de recursos e reservas, o que conduzirá a uma avaliação económica que poderá determinar o seu futuro. Apesar de não constituir o único projeto visando uma avaliação do potencial ainda existente junto a antigas explorações mineiras de Tungsténio na região de Trás-os-Montes e Alto Douro, aparentemente será aquele que se encontrará mais próximo de reunir um conhecimento suficiente, com vista a suportar a tomada de decisões económicas.

Nesta região, existe ainda uma comunidade organizada que tem como objetivos a preservação da cultura e do conhecimento do passado e dos feitos dos seus ancestrais, ao longo do período de desenvolvimento da antiga Mina da Borralha.

Aqui, bem como em todos os locais onde existam antigas comunidades mineiras que pretendem orgulhosamente preservar o seu passado, será importante manter uma boa relação de abertura, de modo a que quem prospeeta e explora possa também aprender com o passado e para que as comunidades consigam, também, participar do futuro. Assim, atualmente existe o Centro Interpretativo Minas da Borralha, o qual inclui um vasto espólio de informação relativa à atividade extrativa que foi desenvolvida nestas minas.

2. Mina de Fonte Santa - Lagoaça (Freixo de Espada à Cinta)

A Mina de Fonte Santa (ou de Lagoaça) situa-se no concelho de Freixo de Espada à Cinta, na antiga freguesia de Lagoaça, atualmente designada de União das Freguesias de Lagoaça e Fornos. Esta mina foi desenvolvida através de uma exploração a céu aberto, bem como, por pequenos trabalhos de lavra subterrânea (Figura 4). A exploração de Tungsténio nesta mina iniciou-se em 1941, sendo que o pico da exploração ocorreu em 1953, tendo encerrado a sua atividade em 1982 (Gomes & Antunes, 2010).



Figura 4: Vista das antigas instalações mineiras da Mina de Fonte Santa.

(Fonte: <https://edm.pt/projetos/recuperacao-ambiental-da-area-mineira-de-fonte-santa/>).

No início da sua exploração, o principal objetivo consistiu na produção de concentrado de volframite. No entanto, cerca de um ano após o início do seu desenvolvimento, verificou-se que o mineral de Tungsténio mais abundante era a scheelite, pelo que este passou a ser o alvo principal dos trabalhos mineiros.

De acordo com Iglesias & Ribeiro (1981), o jazigo de volfrâmio de Fonte Santa é constituído por filões de quartzo com scheelite, sendo que estes e a cúpula granítica subjacente se encontram deformados pelo cisalhamento Bemposta-Moncorvo (In: Pereira et al., 1993). A área mineralizada apresenta uma orientação segundo ENE-WSW, que é paralela com as estruturas regionais, sendo que as zonas mineralizadas se apresentam controladas por fatores litológicos e estruturais. Assim, os filões de quartzo podem ser lenticulares e afetados pela orogenia Hercínica ou, ocupar fendas de tração associadas com o cisalhamento principal (Gomes & Antunes, 2010).

Em 2006, muitos anos após o abandono da exploração, ocorreu a rotura de uma barragem de rejeitados, tendo provocado estragos até uma distância de cerca de 5 km do local. Também, resultou no arrastamento de materiais de granulometria mais fina a mais de 2 km, tendo estes teores bastante elevados de W e As, porventura muito acima dos valores permitidos em solos para utilização na agricultura.

Na sequência deste desastre, foram efetuados em 2007 trabalhos de recuperação ambiental, pela EDM (Empresa de Desenvolvimentos Mineiro, S.A.) com investimentos superiores a meio milhão de euros.

3. Mina de Vale das Gatas (Sabrosa)

A Mina de Vale das Gatas situa-se nas freguesias de S. Lourenço de Riba Pinhão e Souto Maior, ambas no concelho de Sabrosa. Esta mina trabalhou entre 1883 e 1986, tendo terminado a exploração (Figura 5) de forma abrupta.



Figura 5: Vista das antigas instalações mineiras da Mina de Vale das Gatas. (Fonte: <https://www.avozdetrasosmontes.pt/noticia/1735>).

As estruturas mineralizadas correspondem a filões de quartzo com volframite, sulfuretos, cassiterite e scheelite associados ao granito de Vale das Gatas, muito próximo do contacto com os xistos do Complexo Xisto-Grauváquico da Zona Centro-Ibérica (ZCI). O filão principal com espessura variável de 20 a 50 cm, tem uma orientação aproximada segundo E-W e pendor de 25° para S (Ávila, 2010; Gomes & Ramos, 2018; in: Balsa & Teixeira, 2018).

A mineralização principal é constituída por volframite, mais próximo do termo hubnerite (MnWO_4), ocorrendo também scheelite (CaWO_4) e cassiterite (SnO_2). O teor médio do jazigo situou-se em 4 kg/t (Gomes & Ramos, 2018; in: Balsa & Teixeira, 2018).

4. Minas de Argozelo (Vimioso)

As minas de Argozelo localizam-se na freguesia com o mesmo nome, no concelho de Vimioso. A primeira concessão desta área remonta ao ano de 1898, sendo que a atividade mineira se iniciou ainda antes de 1913 e se prolongou até 1986 (Figura 6).

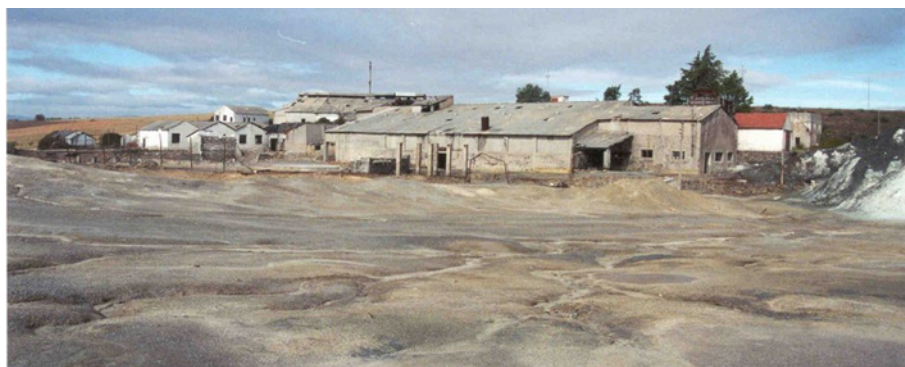


Figura 6: Vista das antigas instalações mineiras da Mina de Argozelo.
(Fonte: <https://edm.pt/projetos/recuperacao-ambiental-da-area-mineira-de-argozelo/>).

Historicamente, esta área teve dificuldades com o abastecimento de água às populações, sendo que, durante a década de 40 e devido ao desenvolvimento da mina em profundidade esta situação se agravou, tendo-se tornado num sério problema a nível local.

A mina explorou essencialmente um filão de quartzo com volframite, scheelite e cassiterite, mas apenas em 1941 conseguiu obter um separador magnético que permitiu realizar a separação destes dois últimos minerais.

Do ponto de vista geológico, o jazigo compreende dois sistemas distintos de filões mineralizados com orientação N-S e NE-SW, sendo que os minerais económicos presentes são a scheelite e a cassiterite. Estes filões apresentavam teores médios de 2.5 kg/t de Sn e 1.5 kg/t de WO_3 (Gomes & Ramos, 2018; in: Balsa & Teixeira, 2018).

No ano de 1958, a mina foi adquirida pela empresa Minargol (Complexo Mineiro de Argozelo, S. A.), que intensificou e mecanizou ainda mais a lavra, o que levou a que a mina se desenvolvesse até aos 170 metros de profundidade, com o desenvolvimento de 7 pisos e, ao mesmo tempo, desse emprego a cerca de 160 trabalhadores.

Em 1985, devido à existência de problemas de estabilidade geotécnica (muitas galerias localizavam-se pouco abaixo da superfície), bem como, ao abatimento do poço mestre, verificou-se o fecho da mina.

Desde há vários anos que a área se encontra concessionada à EDM para trabalhos de prospeção e pesquisa, sendo que os resultados práticos destes trabalhos, nomeadamente de testemunhos de sondagens revelaram teores máximos de SnO_2 (10.2 %) e de WO_3 (1.92 %). Atualmente, existe um Centro Interpretativo das Minas de Argozelo, com vista a preservar a memória da exploração mineira desse local.

5. Minas de Murçós

As minas de Murçós, cuja exploração foi mais recente que as anteriores minas descritas, localizam-se na freguesia de Murçós, concelho de Macedo de Cavaleiros, distrito de Bragança. Depois de a concessão ter sido atribuída em 1948, as minas funcionaram até à década de 1970 (Figura 7).



Figura 7: Vista das antigas instalações mineiras da Mina de Murçós.
(Fonte: <https://edm.pt/projetos/recuperacao-ambiental-da-area-mineira-de-murcos/>).

Tal como no caso de Argozelo, este jazigo de Tungsténio insere-se na Zona Galiza Média - Trás-os-Montes, fazendo parte da Província Metalogenética tungsténio-estanífera do NW da Península Ibérica, mais propriamente, no extremo SE da faixa mineira Laza-Rebordelo-Agrochão.

Correspondem essencialmente a depósitos com scheelite e rara cassiterite, tendo sido exploradas em cortas a céu aberto separadas por algumas centenas de metros ao longo de um contacto litológico (granitóides/xistos).

A mineralização encontra-se associada a uma rede de filões quartzosos com orientação NW-SE, mineralizados em scheelite (CaWO_4) e com pouca cassiterite (SnO_2), instalados em zonas de cisalhamentos conjugados, que afetaram os granitóides aflorantes (granito biotítico de Rebordelo), bem como, no contacto destes com os metassedimentos encaixantes de idade Silúrico. O teor médio destes filões era de 2.0 kg/t (Balsa & Teixeira, 2018). A scheelite e, em menor grau a volframite, constituem os minerais económicos mais frequentes. Também, a presença de redes de filões de aplito-pegmatitos ricos em turmalina e granada, sugerem a existência de uma cúpula subjacente do tipo endogranítico, com metassomatismo de contacto.

Em 2008, as minas de Murçós foram alvo de intervenções levadas a cabo pela EDM, tendo em vista a sua recuperação ambiental (EDM, 2011). De-

vido à utilização de material extraído da mina para a manutenção dos caminhos que existem nesse local, é bastante comum a observação de scheelite sob luz ultravioleta de baixa frequência, ao longo dos mesmos.

De referir ainda que, dentro da mesma faixa mineira, mas um pouco mais para NW, existe uma outra mina de volfrâmio (Agrochão), em que as estruturas mineralizadas apresentam aparentemente as mesmas características geológicas. No entanto, atualmente apenas se conseguem observar as suas escombrelas que ocorrem em flanco de encosta.

Existem, ainda, concessões ativas e pedidos de concessão para prospeção desta área, bem como, da sua envolvente.

Para além destas minas de maior relevância, existiram dezenas de outras explorações de volfrâmio mais pequenas por toda a região e que, como tal, não as referenciamos.

Contudo, é de referir que segundo algumas “estórias” que se contam, e creio que por vezes confirmadas, existiriam algumas minas de volfrâmio que não teriam teores económicos do mineral em causa. Diz-se ainda que, seriam antes pequenas minas de chumbo, o qual após ser queimado ficaria negro e, ao mesmo tempo, passando por volfrâmio no concentrado final de volframite. Uma vez que o chumbo tem, também, uma densidade muito elevada, esta seria uma forma menos séria de alguns “mineiros” ganharem a vida, pois estariam a vender o chumbo recolhido ao preço do volfrâmio.

Para além destas curiosidades, referem-se ainda inúmeras ocorrências e concessões mineiras para scheelite e/ou volframite. Estas encontram-se situadas, principalmente, na zona norte do território nacional, as quais estiveram em funcionamento ao longo do tempo, mas acabariam por encerrar devido à crise mundial do Tungsténio em 1985, originada pela “inundação” do mercado com volfrâmio, a partir de largas exportações provenientes da China. Assim, numa fase posterior não se verificou a possibilidade de retoma da sua atividade, dada a queda abrupta da cotação, assim como, a reduzida dimensão da maior parte das explorações e/ou baixo teor do minério nelas extraído.

Não posso terminar sem antes referir que, “o Passado é tão importante como o Futuro” e que, como tal, deveremos sempre preservar esse passado, mas sem hipotecar o futuro, razão pela qual a prospeção e a exploração do Tungsténio em Trás-os-Montes são tão importantes, quanto a preservação dos indícios das explorações mais antigas. Em ambos os contextos, poderão surgir oportunidades que tragam grandes benefícios às populações locais, permitindo mesmo a fixação dessas populações, por forma a procurar “combater”

a desertificação contínua que se vem observando no interior do país, e de que Trás-os-Montes não é exceção.

Só assim, o povo destas terras deverá conseguir estar de bem consigo próprio, sabendo que ao mesmo tempo que honra os seus antepassados, pode manter o olhar num futuro mais risonho.

Fontes bibliográficas

- Ávila, Paula Freire (2010) – Visita à Mina do Vale das Gatas. Actas do X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa – XVI Semana de Geoquímica, Porto, 28 de Março a 1 de Abril de 2010, p. 55-61.
- Balsa, Carlos; Teixeira, João Sobrinho (2018) – Recursos geológicos de Trás-os Montes – Passado, presente e perspectivas futuras. Instituto Politécnico de Bragança, 283 pp.
- Amorim, Ana Bela C. Coelho (2015) – O Arquivo das Minas do Norte de Portugal (1839-2011). Construção do Arquivo Digital de Informações. Boletim de Minas, Vol 50 (Nº 2), p. 75-92.
- EDM (2011) – A herança das minas abandonadas. O enquadramento e a actuação em Portugal. Direcção Geral de Energia e Geologia, Empresa de Desenvolvimento Mineiro, 172 pp.
- Gomes, M.E.P.; Antunes, I.M.H.R. (2010) - Geoquímica de sedimentos de corrente e solos da antiga mina da Fonte Santa (Lagoaça, NE Portugal). In Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 10, Porto, 28 de Março a 1 de Abril - Desafios científicos para um futuro de cidadania responsável : actas. Porto : CGPLP. P. 543-550
- Horgan, Sara (2016) – Evolução da produção de volfrâmio em Portugal. Boletim de Minas, Vol 51 (Nº 1), p. 3-12.
- Horsnail, R. F. (1979) – The geology of tungsten. Proceedings of the First International Tungsten Symposium, p. 18-31.
- Iglesias, M.; Ribeiro, A. (1981) - La zone de cisaillement ductile de]uzbado (Salamanca)-Penalva do Castelo (Viseu): un linéament réactivé pendant l'orogénese hercynienne? Como Servo Ceo/. de Portugal, 67 (1): 89-93.
- Martins, Luis Plácido (2012) – Mineral Resources of Portugal. Direcção Geral de Energia e Geologia, 71 pp.
- Neiva, J. C. (1944) - Jazigos Portugueses de Cassiterite e de Wolframite. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal. Tomo XXV. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa.
- Noronha, F (1983) - Estudo metalogénico da área tungstífera da Borralha. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Porto, 413 p.
- Noronha, F.; Ribeiro, M. A.; Almeida, A.; Dória, A.; Giedes, A.; Lima, A.; Martins, H. C.; Sant'ovaia, H.; Nogueira, P.; Martins, T.; Ramos, R.; Vieira, R. (2013) – II.1.8. Jazigos filonianos hidrotermais e aplitopegmatíticos espacialmente associados a granitos (norte de Portugal). Geologia de Portugal, Volume I – Geologia Pré-

- Mesozóica de Portugal. Eds.: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, Escolar Editora, p. 403-436.
- Pereira, Eurico; Ribeiro, António; Meireles, Carlos (1993) – Cisalhamentos hercínicos e controlo das mineralizações de Sn-W, Au e U na Zona Centro-Ibérica, em Portugal. Cuaderno Laboratorio Xeolóxico de Laxe - Coruña, N° 18, p. 89-119.

6 capítulo

Mineralizações de Ouro de Trás-os-Montes e ocorrências conhecidas

John Morris Pereira

Email: johnmorrispereira@gmail.com

1. Introdução

São incontáveis as publicações em torno das várias ocorrências de ouro conhecidas na Região de Trás-os-Montes, até porque algumas das mais importantes minas de ouro da Península Ibérica, desde Épocas anteriores ao Império Romano, se situavam nesta área geográfica. De referir as Minas de Poço-das-Freitas / Limarinho / Bobadela em Boticas, o Complexo Mineiro de Três-Minas e as Minas de Jales, que à semelhança de quase todas as ocorrências de ouro à superfície apresentavam já sinais de exploração pré-industrial. Como referido por Noronha, F. e Ramos, J. M. F. (1993) “*Hoje a situação é bastante diferente uma vez que não existem minas ativas explorando jazigos primários*” de ouro, situação que se mantém inalterada após 28 anos, e após o encerramento das Minas de Jales em 1992.

Na Região de Trás-os-Montes as ocorrências auríferas são predominantemente do tipo filoneano com ganga quartzosa (mais ou menos complexa) com a exceção da ocorrência de Três-Minas, onde há um controlo, ou relação com níveis litológicos (metassedimentos silicificados) específicos Noronha, F. e Ramos, J. M. F. (1993). No caso das ocorrências em filões observam-se evidências de que há controlo estrutural, na maioria dos casos corredores de cisalhamento, alguns dúcteis como o caso de Três-Minas (N100 a N130), outros tardios associados à evolução das estruturas frágeis N20E a N70E (e respetivos sistemas conjugados) como o caso de Jales, Gralheira, Carvela e Freixeda, e em alguns casos estas ocorrências encontram-se em zonas de interseção destes dois alinhamentos. As mineralizações ocorrem em contextos variados, desde granitos (hercínicos) a metassedimentos (na sua maioria paleozoicos) Noronha, F. e Ramos, J. M. F. (1993) podendo em alguns casos ocorrer um mesmo “campo filoneano” em duas unidades litológicas distintas (Jales e Freixeda).

É com base nestas premissas que se tenta apresentar uma atualização da informação recolhida na última década (ou duas) com base em trabalhos de

prospecção e pesquisa com vista a definir Recursos e Reservas que permitam a exploração dos mesmos em regimes avançados e a respeitar critérios ambientais e sociais cada vez mais elevados, aproximando a exploração de recursos de operações sustentáveis e minimizando todos os impactos inevitáveis deste tipo de operações.

2. Contexto geológico

A Região de Trás-os-Montes encontra-se situada no Maciço Ibérico, o mais ocidental de todos os maciços da cadeia Hercínica europeia, que juntamente com o maciço Armoricano forma uma importante megaestrutura, o Arco Ibero-Armoricano (Dias e Ribeiro, 1995).

O Maciço Ibérico está dividido em terrenos alóctones e terrenos autóctones (Dallmeyer e Martinez-Garcia, 1990). Sendo constituído por várias unidades geológicas com características tectono-estratigráficas distintas, de natureza predominantemente continental, em que a ocorrência de litologias de natureza oceânica marcam a separação entre as unidades que compõem a estrutura do orógeno, bem como os cisalhamentos que separam terrenos que evoluíram contiguamente durante o desenvolvimento do processo orogénico que decorreu no final do Paleozoico (Quesada, 1991).

Independentemente da delimitação das várias zonas singulares integrantes do Maciço Ibérico, a sua posição relativa ao orógeno Hercínico evidencia uma notável simetria bilateral que permite distinguir as zonas mais internas, com idade entre o Proterozoico e Paleozoico Inferior, onde a deformação foi mais intensa e onde ocorreu metamorfismo regional e magmatismo sin-orogénico mais abrangentes, das zonas mais distais, com idade compreendida entre o Devónico e Carbonífero, onde a deformação foi menos intensa e mais tardia, assim como o metamorfismo e magmatismo (Pereira, 1988). Estes aspetos evidenciam a ocorrência de uma “onda” orogénica que ocorreu desde as zonas mais internas para as mais externas (Ribeiro, 1980).

O autóctone Ibérico de natureza continental, ocupa a maior parte do Maciço Ibérico, sendo representado na base por pelitos e grauvaques de idade Pré-Câmbrica, sendo que os depósitos de cobertura se encontram representados através de espessas pilhas de arenitos, xistos e calcários, com idades compreendidas entre o Câmbrico e o Devónico (Matte, 1991; Quesada, 1991). Das zonas que representam estes terrenos destaca-se a Zona Centro-Ibérica (Ribeiro, 1980) constituída por metaquartzitos, metagruvaques e metaquartzovaques) e filitos, cortada por intrusões graníticas ou granitóides sin-orogénicos e tardios.

A zona NW do Maciço Ibérico, onde se enquadra a totalidade da Região de Trás-os-Montes, regista uma das secções mais completas e contínuas da Cadeia Varisca onde é possível estabelecer a transição entre unidades alóctones, parautóctones e unidades autóctones (Ribeiro, 1974; Ribeiro *et al*, 1990a). O grande carreamento de Trás-os-Montes (MTMT) separa as zonas Galiza Trás-os-Montes (ZGTM) e Centro-Ibérica (ZCI), diferentes dos pontos de vista paleogeográfico e tectónico (Ribeiro *et al*, 2006).

Na ZGTM (Julivert *et al*, 1980; Iglésias *et al*, 1983; Farias *et al*, 1987; Arenas *et al*, 1988) podem distinguir-se vários conjuntos tectono-estratigráficos, integrando um empilhamento de mantos de carreamento (Ries & Shackleton, 1971; Iglésias *et al*, 1983):

- O conjunto inferior, parautóctone, compreende os domínios Parautóctone Inferior (DPI) e Parautóctone Superior (DPS; Rodrigues *et al*, 2003);
- O conjunto superior, alóctone, engloba os Complexos Alóctones (designação proposta por Arenas *et al*, 1986) para substituir a anterior denominação de “unidades” considerando que os fragmentos de terrenos continentais e oceânicos, aí representados, exibiam histórias tectono-termais e estruturais complexas e distintas (ver também Martínez Catalán *et al*, 1997).

Os domínios parautóctones, onde o deslocamento foi inferior, apresentam formações com litologias, e respetiva estratigrafia, essencialmente, equivalentes às do autóctone da ZCI. Esta equivalência, que é imediata no caso do DPI, verifica-se em parte no DPS, apesar da complexa estruturação interna deste domínio (Rodrigues *et al* 2006 e Ribeiro *et al*, 2006).

Nos Complexos Alóctones, foi possível reconhecer três grandes unidades em que a unidade intermédia, constituída pelo Complexo Ofiolítico (Iglésias *et al*, 1983; Munhá *et al*, 1990; Pereira *et al*, 2004; Arenas *et al*, 2004), separa o Complexo Alóctone Superior (CAS), caracterizado como um terreno exótico continental (no sentido de Coney *et al*, 1980), do Complexo Alóctone Inferior (CAI), representante da margem estirada do Terreno Ibérico (Ribeiro *et al*, 1990b).

Os dados avançados sugerem que o Complexo Ofiolítico se implantou, por obdução, sobre a margem do Terreno Ibérico, correspondendo o CAS à margem oposta do oceano correspondente (o Rheic, situado entre Avalónia e Armórica) - (Ribeiro *et al*, 2006). Alguns autores invocam, no entanto, a presença de materiais gerados numa bacia marginal (Paleotethys) entre Armórica e Ibéria (Matte, 1986; 1991; Ribeiro *et al*, 1990a; 2003; Martínez Catalán, 1990; Rey *et al*, 1997; Martínez Catalán *et al*, 1997, 2002; 2004).

Na região de Trás-os-Montes oriental, os complexos alóctones afloram em duas regiões, Bragança e Morais, correspondendo a esta última, os mais meridionais Complexos Alóctones do NW Ibérico (Ribeiro *et al.*, 2006).

O perfil geológico efetuado entre o soco pré-varisco de duas regiões extremas do País: Espinho, a Oeste; e Miranda do Douro, a Este – evidencia estruturação varisca e as posições relativas dos terrenos autóctones, paraúctones e alóctones, incluindo a fronteira ZOM-ZCI (Figura 1). Configuram-se, neste corte, as unidades alóctones da região de Morais, (Ribeiro *et al.*, 2006).

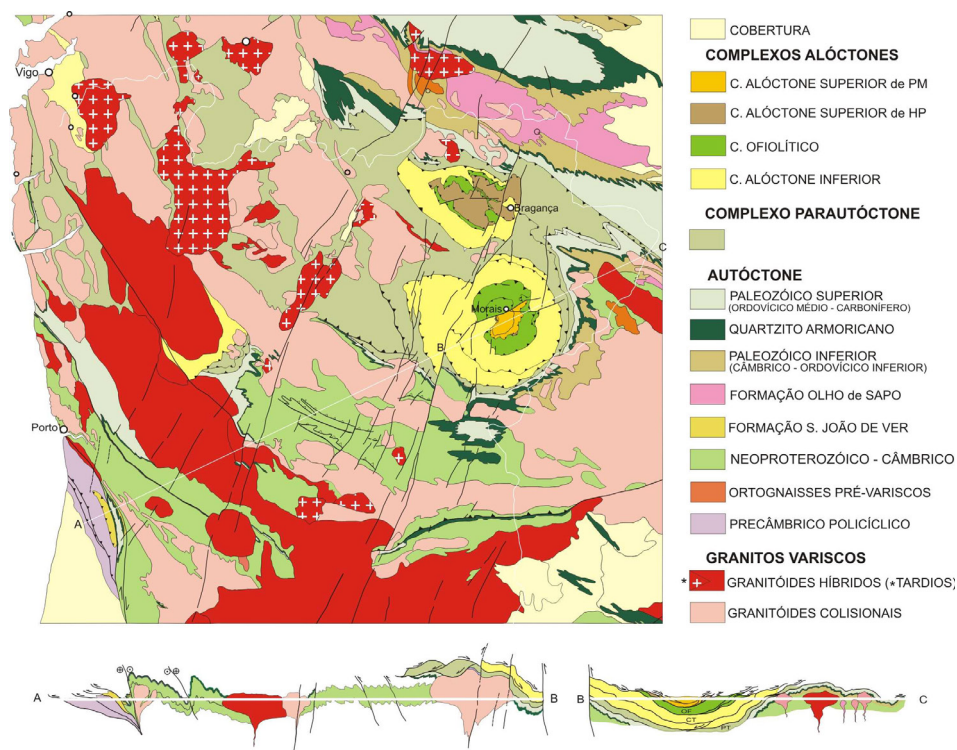


Figura 1: Mapa esquemático geral da região NW do Maciço Ibérico, onde se encontram representados os Complexos Alóctones de Bragança e Morais e o Domínio Paraúctone (Ribeiro *et al.*, 2006).

A mineralogia das principais ocorrências de ouro na Região de Trás-os-Montes (e das mais conhecidas) é, na sua maioria constituída por paragénese onde o ouro está em associação com sulfuretos, em especial a arsenopirite, e em alguns casos aprisionado na estrutura mineral da mesma, dificultando os processos de beneficiação e obrigando à inclusão de novas tecnologias de processamento.

Noronha, F. e Ramos, J. M. F. (1993) resumem os possíveis estádios das associações minerais a cinco:

- um estágio mais precoce caracterizado pela associação de óxidos e silicatos entre os quais rutilo, feldspatos, cassiterite e volframite;
- um estágio ferro-arsenífero caracterizado principalmente pela associação de arsenopirite, pirite e bismutinite;
- um estágio intermedio zinco-cuprífero caracterizado pela associação da calcopirite com a blenda;

e finalmente dois estádios mais tardios;

- o plumbo-antimonífero caracterizado pela ocorrência de galena e sulfossais; e
- o antimonífero caracterizado pela associação de antimonite e bertierite.

Noronha, F. e Ramos, J. M. F. (1993) resumem as possíveis formas de ocorrência do ouro:

- sob a forma de ouro nativo (pobre em prata) geralmente em inclusões nos sulfuretos do estágio ferro-arsenífero
- sob a forma de electrum, com teores variáveis de prata, quase sempre nos espaços interanulares, em fraturas e em cavidades dos sulfuretos e na ganga quartzosa.

Com base nas associações é possível definir do ponto de vista químico-mineralógico três tipos principais de ocorrências, sendo que o terceiro e mais comum na Região de Trás-os-Montes é a associação dos outros dois tipos, que ocorrem em separado. Caracterizado pela associação (As-Fe-Bi-Au-Ag-(W-Mo-Sn-Cu-Pb-Zn)¹ que corresponde a uma associação mineralógica principal de arsenopirite-pirite-bismutinite-bismuto-ouro-electrum-(tungstato-cassiterite-estante-molibdenite-calcopirite-blenda-galena-sulfossais) em sobreposição com a associação (As-Fe-Pb-Zn-Cu-Au-Ag-(Sb-Cd) que corresponde a associação arsenopirite-pirite-galena-calcopirite-blenda-ouro-electrum-(sulfossais), a mais complexa que ocorre em Jales, Freixeda e Três-Minas Noronha, F. e Ramos, J. M. F. (1993).

Na sua grande maioria, as ocorrências de ouro em Trás-os-Montes apresentam um forte controlo estrutural, com ligação a zonas de cisalhamento que devido à sua evolução complexa contribuem para um enriquecimento em ouro, em etapas sucessivas e complexas, em regimes de deformação que vão desde o dúctil (D3) ao frágil (tardio) e que perduram desde cerca dos 300 aos 280 ma. Noronha, F. e Ramos, J. M. F. (1993).

1) Arsénio-Ferro-Chumbo-Zinco-Cobre-Ouro-Prata-(Antimónio-Cádmio)

3. Principais mineralizações de ouro de Trás-os-Montes

Observando os dados da base de dados com as “Ocorrências e Recursos Minerais Portugueses” - SIORMINP do LNEG, podem encontrar-se mais de 46 ocorrências de ouro situadas na Região de Trás-os-Montes (Tabela 1) de entre as quais se destacam as mais conhecidas: as Minas de Poço-das-Freitas / Limarinho / Bobadela, no Vale do Rio Terva em Boticas, o Complexo Mineiro de Três-Minas e as Minas de Jales em Vila Pouca de Aguiar, e as Minas da Freixeda em Mirandela e Vila Flor.

Tabela 1: Principais Mineralizações De Ouro De Trás-Os-Montes (SIORMIN - LNEG).

OCORRÊNCIA	CONCELHO
Jariça / Lomba Grande	VINHAIS
Pinheiro Novo	VINHAIS
Poço das Freitas, Limarinho e Bobadela	BOTICAS
Leiranco	BOTICAS
Carvela (Tresmundes)	CHAVES
Outeiro Seco	CHAVES
Argeriz	VALPAÇOS
Campo Mineiro de Jales (Campo e Desvio) e Gralheira	VILA POUCA DE AGUIAR
Três Minas (Lagos da Ribeirinha)	VILA POUCA DE AGUIAR
Revel	VILA POUCA DE AGUIAR
Alto das Vinhas / Quintela de Lampaças	BRAGANÇA
França / Pingão dos Quintais, Fonte Cova e Covas Altas	BRAGANÇA
Rio Silos e Vale do Cancelo	BRAGANÇA
Caminho Largo	FREIXO DE ESPADA À CINTA
Mirandeses	MIRANDELA
Cabeço Figueiro, Monte Figueiro, Mouros, Vale das Vinhas, Vale do Seixo - Trindade e Moinho do Videira, Lombo da Veiga, Malhadas e Ribeira da Freixeda	MIRANDELA
Latadas (S. Salvador - Vila Verde)	MIRANDELA
Pedra Luz	MIRANDELA e VILA FLOR
Mina da Freixeda	MIRANDELA e VILA FLOR
Relva, Seixual, Tombeiras e Vilas Boas	VILA FLOR
Meirinhos (Santo António-Marta)	MOGADOURO
Penas Róias e S. Martinho do Peso	MOGADOURO
Quinta da Terrincha	TORRE DE MONCORVO

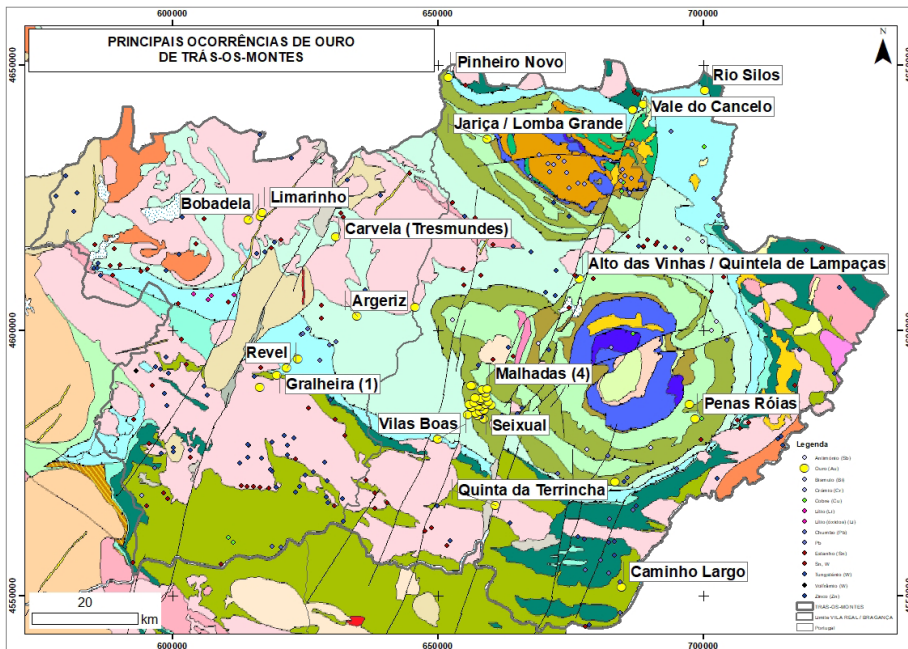


Figura 2: Mapa de Localização das Principais Mineralizações De Ouro De Trás-Os-Montes (SIORMIN - LNEG).

A informação histórica de todas as ocorrências pode ser encontrada em arquivos Nacionais (LNEG e DGEG) em inúmeras publicações resultantes de projetos de investigação académica, tendo, na sua maioria, resultado de trabalhos de prospeção e pesquisa de ouro (e outros metais) levados a cabo por empresas privadas, com o objetivo de definirem Recursos e Reservas (definição das Normas Técnicas Internacionais CRISCO) que permitam a exploração económica e racional dos mesmos.

3.1. Mina de Jales e Gralheira – Vila Pouca de Aguiar

A Mina de Jales, em tempos conhecida como Mina dos Mouros, situada na região de Vila Pouca de Aguiar (Trás-os-Montes) foi explorada desde os tempos Romanos até fins de 1992, a mineralização ocorre em filões hidrotermais de quartzo (Filão Campo N020-40E e Filão Desvio N295-90° a 80° SE).



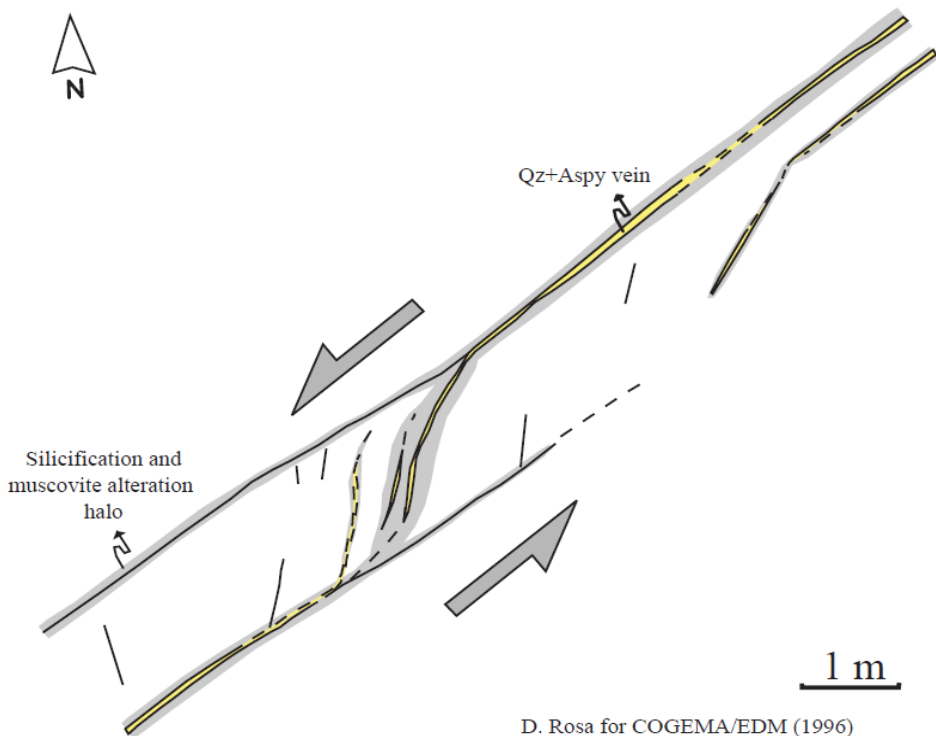
Figura 3: Estrutura do elevador principal das antigas Minas de Jales.

Entre 1983 e 1989 esta mina produziu cerca de 25 toneladas de Ouro e 100 toneladas de prata (Neiva & Neiva, 1990) que corresponde a um valor bruto de 1 250 000 000 Euros ao preço atual do mercado, tendo sido definidas reservas potenciais em 1975 de 15 toneladas de ouro com teores de corte entre 7 e 11 gramas de Ouro (Carvalho, A. 1979). As explorações antigas atingiam os 150 m tendo sido atingidos os 620 m de profundidade (Piso 16^o) antes de ter cessado as operações.



Figura 4: Perfil da Mina de Jales no final das operações.

O Filão de Campo está reconhecido numa extensão superior a 1600 m encaixado em granito (na seção mais a Sul) e em metassedimentos no terço mais a Norte, onde sofre um desvio ao encaixar-se na foliação/xistosidade, tornando-se mais irregular em possança e teores (A. Carvalho, 1979). Com matriz quartzosa e mineralizado em pirite, calcopirite, galena e arsenopirite, contando também com minerais acessórios como a mica branca, feldspato, turmalina, fluorite, calcite, siderite, apatite, volframite, scheelite, esfalerite, estanita, electrum (liga de ouro e prata associada à galena, calcopirite, arsenopirite e/ou pirite) e diversos minerais de prata (Neiva, 1992). Tendo sido descrito (Rosa, D. 199X) como estruturalmente ligado a cisalhamentos esquerdos N050 dilatados localmente (echelon) interpretado a partir de observações em Quintã (Filão N010 a N020).



D. Rosa for COGEMA/EDM (1996)

Figura 5: Filões em echelon, entre filões N050 relacionados com cisalhamentos esquerdos (zona Quintã – Campo).

A estrutura da Gralheira com direção WNW-ESSE está encaixado nos metassedimentos e quartzitos, tem 30 a 60 cm de espessura e foi reconhecido por mais de 1300 m, com teores até 14 g/t de Ouro (Gomes M. & Ramos, J. M. F. - 2017) e foi, mais recentemente alvo de prospeção e pesquisa intensa,

tendo sido publicado em 2008, pela Kernow Resources um modelo de Recursos Inferidos de mais de 7.500.000t a 1.61 g/t de ouro e 8.55 g/t de prata, totalizando mais perto de 400.000 onças (mais de 12.000kg) de ouro e mais de 2 000 000 de onças (mais de 65.000kg) de prata, calculados com recurso a métodos digitais e de acordo com critérios e padrões elevados.

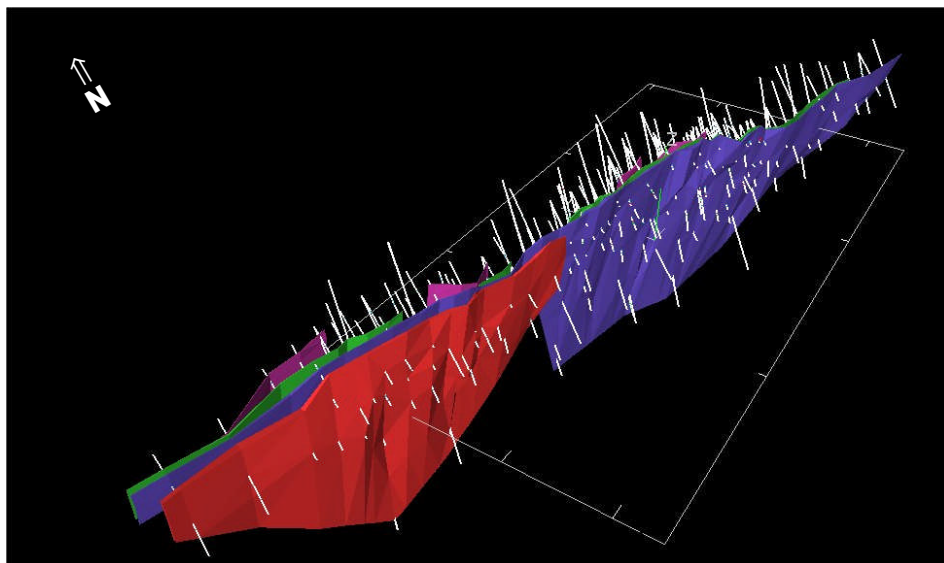


Figura 6: Modelo publicado da estrutura de Galheira (2008) – vista 3D de topo sudoeste. São visíveis a branco as sondagens e a colorido as estruturas planares (filões) definidas dentro da estrutura da Galheira.

Após este estudo a Galheira foi novamente alvo de estudos e avaliação das suas extensões laterais e em profundidade, contudo, sem resultados públicos publicados que permitam mais conclusões sobre o seu potencial e geologia. Em termos genéticos, são apresentadas várias teorias possíveis, mas todas relacionadas com Intrusões Graníticas: Brink (1960) propõe dois períodos metalogénicos: um mais precoce, auro-argentífero, relacionado com os granitos de duas micas (“older granites” -308 MA) e outro mais tardio, tungstífero, relacionado com os granitos biotíticos (“younger granites” -290 MA); Thadeu (1977) considera as mineralizações auríferas como sendo Hercínicas e relacionadas com os granitos Hercínios, referindo contudo que a sua idade e o tipo de granito devem ser avaliados; Schermerhorn (1981) considera as mineralizações de Au como tendo uma idade Autuniana e concretamente considera o jazigo de Jales como estando relacionado com os “younger granites”; e mais recentemente Neiva e Neiva (1990) e Neiva (1992) sugerem também uma relação genética das mineralizações auríferas de Jales com

fluidos hidrotermais resultantes dum processo de cristalização fracionada de granitos de duas micas (Noronha, F. e Ramos, J. M. F. - 1993).

3.2. Três Minas – Vila Pouca de Aguiar

Alguns quilómetros a NNE de Jales, pode ser encontrada a exploração de Três Minas, onde existem imponentes explorações a céu aberto feitas em tempos Romanos (Cortas de Covas, Ribeirinha e Lago Pequeno). A Corta Ribeirinha é a maior, com 350 m de comprimento por 110 m de largura e 100 m de altura, que correspondeu a um desmonte de 9,45 Mt. e a Corta de Covas com 480 m de comprimento por 60 m de largura e 80 m de altura, que correspondeu a uma exploração de 6,20 Mt de Minério tal e qual.



Figura 7: Vazio de escavação em Três-Minas
(<https://tresminas.com/complexo-mineiro-romano>).

No seu conjunto estas zonas formam uma espécie de massas lenticulares alongadas descontínuas que podem atingir 100 m, 300 m ou mesmo os 500 m de extensão, correspondentes às cortas que foram abertas e possanças até 50 m (Carvalho, A. 1979).

Não há grandes referências à cerca da quantidade de metal produzido a partir destas escavações, não há dados concretos relativamente aos teores de exploração dessa época, mas as amostragens possíveis apontam para teores bastante baixos (Carvalho, A. 1979). Alguns autores (Gomes M. & Ramos, J. M. F. - 2017) arriscam estimativas com teores de 10 g/t de ouro, que terão rendido 100 a 130kg de ouro por ano, durante 150 anos.

O jazigo de Três Minas é diferente do comum na Região, talvez com características únicas no seu género, não se trata de filões bem definidos, mas antes de zonas mineralizadas na mesma direção dos metassedimentos encaixantes N 115-120°E, sob a forma de veios quartzosos paralelos, inseridos nos próprios xistos segundo os mesmos planos de xistosidade. Esses filões encontram-se mineralizados em pirite e arsenopirite, a que o ouro se associa (Carvalho, A. 1979). Ribeiro (1998) atribui a instalação desses filões a processos de silicificação relacionados com zonas de cisalhamento, no limite entre litologias ricas em matéria orgânica (xistos negros e alguns calcários negros) da Unidade de Fragas Negras e quartzofilitos da Unidade de Curros. Havendo mesmo autores – Oliveira e Farinha (1987) e Oliveira (1990) – que não rejeitam a possibilidade destas ocorrências estarem relacionadas com processos sedimentares antigos (paleoplacers).

A ocorrência de ouro tem sido associada a fluidos tardios, predominantemente aquosos, de baixa salinidade sugerindo profundidades inferiores e 2 km (Noronha e Ramos, 1993; Noronha, 1988; Noronha *et al.*, 2013). Quando comparado como o ouro em Jales e na Gralheira aparece associado com prata, na forma de electrum e com sulfuretos abundantes, enquanto em Tresminas é praticamente ouro nativo e são raras as presenças de prata e metais base (Rosa, 2003).

Em 1997 esta exploração mineira é classificada como Imóvel de Interesse Público em 1997 e em 2012, alguns componentes do sistema de abastecimento de água a esta zona mineira foram classificados como Monumento de Interesse Público. Em 2017 iniciou-se um processo de candidatura, para, juntamente com Las Médulas, em Leão, Espanha, que completa em 2017 duas décadas como Património Cultural da Humanidade, serem classificadas pela UNESCO como Paisagem Cultural, categoria que dará a melhor resposta às tipologias do património a proteger nestes territórios. É considerado por muitos um património de grande interesse arqueológico e museológico.

3.3. Minas de Poço-das-Freitas / Limarinho / Bobadela – Boticas

O Poço das Freitas (Boticas), teve uma importante lavra Romana e mais recentemente foi alvo de trabalhos de pesquisa mineira. Atualmente está integrado no Parque Arqueológico do Vale do Terva (PAVT). O vale superior do rio Terva conserva um notável conjunto de valores patrimoniais arqueológicos e naturais, associados a antigas minas romanas que testemunham uma longa e complexa evolução da sua ocupação, desde os mais recuados

tempos da Pré-História recente até à atualidade (Gomes M. & Ramos, J. M. F. - 2017).



Figura 8: Vazios de escavação no Poço das Freitas – Limarinho.

Os registos históricos das bases de dados nacionais (LNEG) apresentam resultados e relatórios dos trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro, executados no final da década de 50, nomeadamente trincheiras e 14 sondagens preliminares na área, e informação produzida pela COGEMA no final da década de 90, onde constam mais 32 sondagens na área do Poço das Freitas. A COGEMA (Griveaud & Dixsaut, 1989), conduziram um estudo estrutural da mineralização do Limarinho, Poço das Freitas e Bobadela, concluindo que estes sofreram 7 estágios diferentes de fracturação/ cisalhamento e de filões. Apresenta um modelo que liga as 3 áreas a um evento de instalação único, em que os sistemas filonianos foram formados em zonas de extensão nas interceções N-S e NE-SW (060) falhas “strike-slip” ativas durante um regime dúctil no final da instalação do granito.

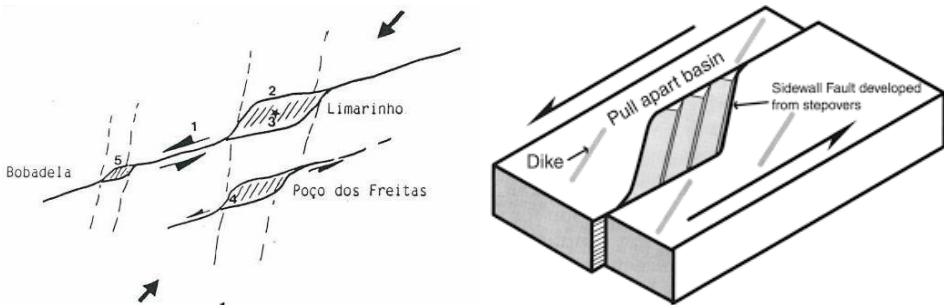


Figura 9: Ilustração do modelo de formação dos filões da Zona do Limarinho-Poço das Freitas – Boticas – (COGEMA).

Em suma, segundo a COGEM, a mineralização aparenta ser claramente controlada por um prisma de deformação, estabelecido por um cisalhamento esquerdo que, aparenta encaixar num modelo de “pull-apart basin”.

Mais recentemente a área voltou a ser avaliada, tendo sido novamente alvo de sondagens, desta vez na área do Limarinho (a norte do Poço das Freiras) e com base em toda a informação recolhida o depósito foi modelado com a utilização de tecnologias digitais, tendo resultado num modelo geológico que se enquadra nos modelos iniciais de instalação, mas do qual não há ainda resultados públicos sobre o recurso inicialmente apontado pela COGEMA.

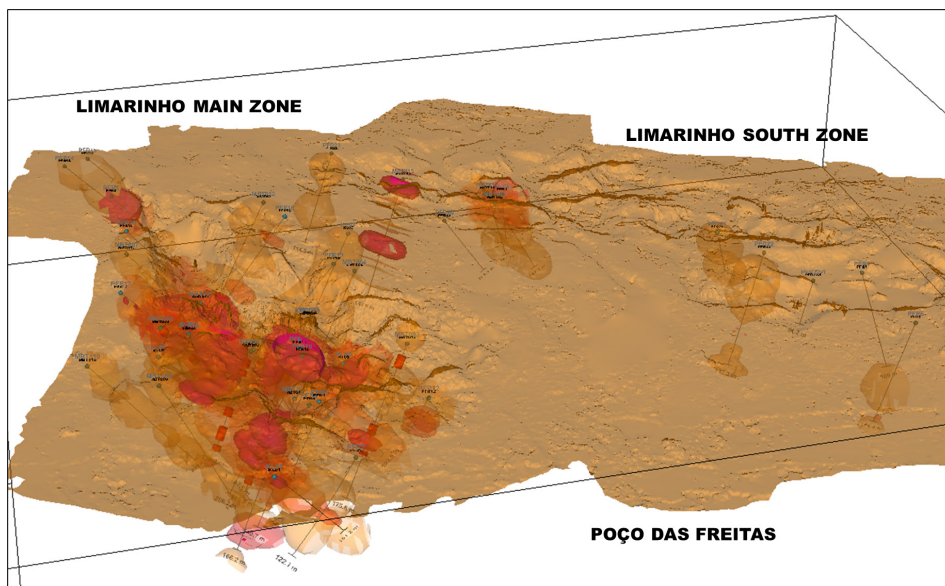


Figura 10: Esquema 3D da distribuição do ouro na zona do Limarinho-Poço das Freiras.

3.4. Mina da Freixeda - Mirandela

A Mina da Freixeda localiza-se no Complexo Alóctone Inferior (CAI), denominado Domínio Centro-Transmontano por Ribeiro (1974), que aflora em torno dos maciços de Bragança e Morais. O CAI caracteriza-se pela abundância de manifestações vulcânicas e pela presença de fácies especiais, sobrepondo-se ao Domínio Peritransmontano por intermédio de um importante carreamento. A mina ocupa principalmente a formação filitoquartzítica do Ordovícico Superior (Parra & Lopes, 1999), ou seja o Complexo Filitoquartzoso.

A mina da Freixeda faz parte da Província Metalogenética Auro-argentífera de Portugal. No que concerne ao controlo litológico-estratigráfico, estas jazidas encontram-se regra geral, no seio dos quartzitos, de idade Ordovícica

e nos xistos negros do Ordovícico e Silúrico, e mais raramente, são intragraníticos ou ocorrem no Complexo Xisto-Grauváquico. O controlo litológico nos quartzitos e granitos, é resultante da maior competência dos materiais propiciando, por um lado, fendas mais abertas e, por outro lado, maior reativação das heterogeneidades mecânicas, enquanto nos xistos negros resulta fundamentalmente de ação química (Pereira *et al.*, 1993).

As ocorrências de ouro (prata, cobre, chumbo e zinco) são filonianas, em stockworks² e massas silicificadas em metassedimentos, afetados por cisalhamentos, carreamentos e deslizamentos tardios (Parra & Lopes, 1999; Almeida & Noronha, 1988). Os filões da área de Freixeda são paralelos ou subparalelos. Constituem um sistema de filões com ganga quartzosa, em parte recristalizada, fortemente cataclasada e impregnada de sulfuretos que ocupam numerosas fraturas e microfissuras (Parra & Lopes, 1999).

Toda a área se encontra afetada por uma série de fracturas hercínicas extensas (com várias centenas de quilómetros), que correspondem à zona de falha de Bragança - Vilariga. Esta estrutura, é muito favorável à ocorrência de mineralizações metálicas. Os filões de S. Jerónimo e Santo André, têm respetivamente 0.25 e 0.15 metros de possança e distam cerca de 100 m um do outro, com orientação N30° a N50°E para o primeiro e N50° a 80°W para o segundo (Parra & Lopes, 1999) e reconhecidos ao longo de 900 m, com teores médios conhecidos de 5 g/t de ouro e 25 g/t de prata (Carvalho, A. 1979). Algumas cortas de exploração da antiguidade chamaram a atenção para estas ocorrências, e foi entre 1946 e 1955 que se abriram galerias de traçagem e expuseram zonas bastantes ricas, algumas com teores de exploração de 30 g/t de ouro e 500 g/t de prata, com máximos de 118 g/t de ouro e 2.416 g/t de prata. A média estimada (Carvalho, A. 1979) apontava para 13 g/t de ouro e 200 g/t de prata. Havendo registos de produção de 140 kg do ouro e 2.361 kg de prata, entre 1952 e 1955.



Figura 11: Instalações antigas das Minas da Freixeda.

O ouro ocorre nos filões, com uma relação direta com a intrusão granítica a sul (e por baixo) Maurel-Palacin (1985), Maurel-Palacin *et al.* (1987) e Almeida e Noronha (1989) consideram as mineralizações de Pedra Luz-Freixeda relacionadas com os granitos de duas micas tardi a pós-tectónicos e propõem um modelo de zonalidade peribatolítica para relacionar as mineralizações de W com as de Au-Ag. Quanto a origem dos fluidos mineralizadores são a favor da hipótese de que estes seriam fluidos residuais de diferenciação magmática não excluindo a possibilidade de grandes circuitos convectivos para justificar a mobilização dos elementos metálicos.

Nos filões da Freixeda, os minerais opacos distribuem-se numa ganga, com textura xenomórfica granular, composta essencialmente de minerais silicatados onde domina o quartzo e a clorite (Montes, 2005). A observação no microscópio de luz refletida de algumas lâminas de amostras dos filões de Freixeda (Montes *et al.* 2007), permitiu ver que os sulfuretos mais comuns são a arsenopirite (predominante), a pirite, a blenda, a galena, a calcopirite e os sulfossais de prata (Ag), chumbo (Pb), Ferro (Fe) e Antimónio (Sb).

A arsenopirite dos filões apresenta como fórmula química geral – FeAsS – no entanto algum arsénio foi substituído por antimónio. A pirite contém algum As, que pode atingir 1.74% e a blenda contém cádmio (Cd). Os sulfossais mais comuns são a jamesonite, e a rayite ($Ag_2Pb_8Sb_8S_{21}$) – Pereira, M. *et al* (1988).

3.5. Latadas - Mirandela

Latadas é o nome de um extenso filão, com 6 km, que vai desta última localidade até Vila Verde (Mirandela), orientado E-0, com pendor 80°S e pos-

sança entre 1 m a 2 m podendo, excecionalmente, atingir 8 m. Alem do filão de Latadas há mais dois idênticos e paralelos embora de menor extensão e possança (Ribeiro 1974).

Em Latadas estiveram ativas várias concessões mineiras durante as décadas de 50 e 60: Latadas, Portela n N.º 1, Vale do Pereiro, Mouros N.º 1 e Mouros N.º 2 são localizadas no Filão de Latadas, num filão N082 com pendor que varia entre vertical e 82º para Sul.

Situa-se numa zona com várias transições entre unidades geológicas: OVQ – Complexo filado-quartzoso, uma espessa e monótona série de xistos escuros, carbonados localmente com intercalações de quartzitos cinzentos; SVS – Complexo Vulcano Silicioso: alternância de xistos escuros com fácies ácidas e básicas; e SPQ – Formação de Quartzitos Superiores: um conjunto situado no cimo da série constituído por possantes bancos de quartzitos intercalados nos xistos.

Supõe-se que a deposição do ouro e de prata no denominado filão de Latadas se tenha efetuado de forma evolutiva:

- a) Enchimento inicial de falha com quartzo branco, quase desprovido de sulfuretos (arsenopirite, pirite e pirrotite), com raras pontuações de scheelite e muito pouco ouro. Este quartzo, que designamos por Qz1, não se apresenta cataclasado.
- b) Movimentos cisalhantes que cataclasaram o Qz1 e ascensão de fluídos mineralizantes com precipitação de sulfuretos – abundante arsenopirite e também pirite e pirrotite que formam moscas e ninhos nas juntas, fraturas e cavidades e lâminas milimétricas em fissuras subparalelas da ganga quartzosa. Denominamos de Qz2 este quartzo cataclástico, às vezes cloritizado e com encraves lenticulares dos xistos encaixantes, que apresenta ligeira alteração amarela.
- c) Reativação tectónica, recristalização parcial do Qz2 e nova formação de sulfuretos – abundante arsenopirite, blenda e galena e pouca pirite, calcopirite, tetraedrite e ouro. Designamos por Qz3 este quartzo cinzento com tons azuis.
- d) Ação tectónica que produziu a brechificação quer do quartzo filoniano quer dos xistos encaixantes e instalação de riolito (ou dacito) com sulfuretos na falha produzida. Formou-se assim a rocha que designamos por brecha riolítica.

Entre as localidades de São Salvador e Vila Verde, a sua possança média é de 1 a 2 m, no sector mineralizado atinge perto de 7 m. A mineralização não está distribuída de forma homogénea sobre todo o filão. A porção mais rica situa-se de um lado e outro do Vale do Seixo onde foram efetuados os traba-

lhos de reconhecimento do S.F.M. incluindo amostragens em trincheiras e/ou canais dentro de galerias abertas pelo S. F. M. na década de 60.



Figura 12: Filão das Latadas - Setor Vale Pereiro.

Em 1997 foram efetuadas duas sondagens na zona de Vale do Seixo, e foram efetuadas mais amostras em canal e subterrâneo, obtendo valores máximos de 18.64 g/t Au e 179.0 g/t Ag na amostragem em canal e de 2.10 m a 15.26 g/t Au (com 55 cm a 56.75 g/t Au) e 49.8 g/t Ag na Sondagem SLAT1.

3.6. Carvela – Chaves

A Mina de Carvela terá tido também iniciada por trabalhos romanos, e terão sido trabalhados alguns filões centimétricos encaixados no contacto granito-xisto (Gomes M. & Ramos, J. M. F - 2017).

De acordo com Farinha Ramos, J. (LNEG), a mineralização ocorre em filões e filonetes de ganga quartzosa com sulfuretos de arsenopirite, pirite, galena, blenda, etc. O ouro nativo e alguns sulfossais de prata como a “Ourayite/Schapbaquite” ocorrem predominantemente no seio da arsenopirite.

O Serviço de Fomento Mineiro realizou trabalhos de pesquisa mineira, com abertura de uma galeria travessa em Fontela, próximo da povoação de Tremundes e um poço de cerca de 17 m. O poço foi aberto no lugar de Corga (Carvela) em granito, aparecendo um filão de quartzo com aplito associado. O poço seguiu o filão de quartzo impregnado com arsenopirite. Em amostras recolhidas nesses trabalhos os teores de ouro variaram de vestígios até 11 g/t e os de prata de 0 g/t a 6.2 g/t de ouro. Os trabalhos realizados levaram a admitir, à data, a existência de cerca de 250 000 t de minério com um teor médio de 0.5 g/t de ouro.

No final dos anos 90 a COGEMA retoma os trabalhos e efetua 37 sondagens que confirmam a continuidade em profundidade e calcula um potencial de 20 600 onças de ouro a 2 g/t.

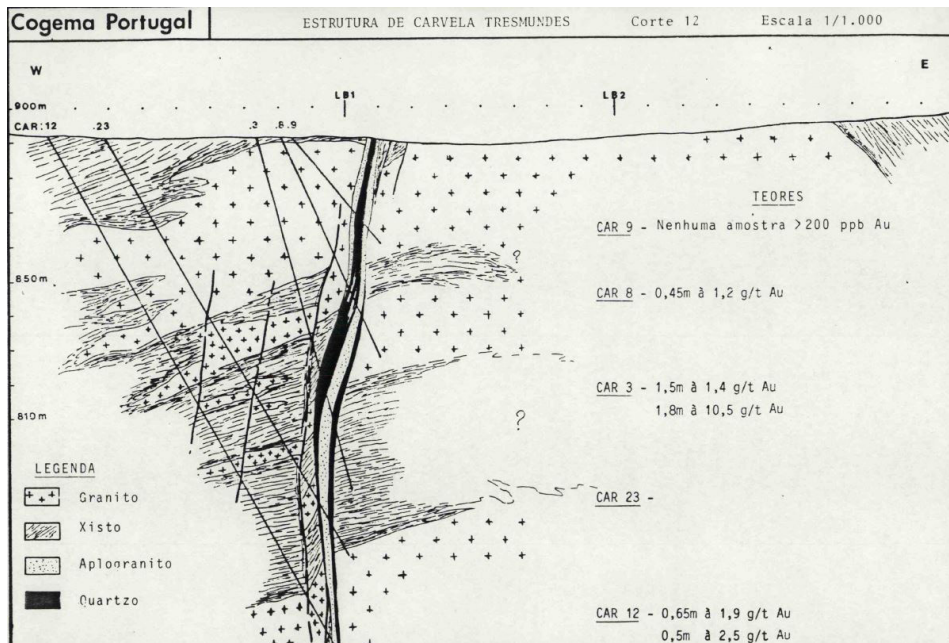


Figura 13: Perfil do filão de Carvela (COGEMA).

3.7. França – Bragança

A Mina de França possui trabalhos de exploração muito antigos e teve alguma atividade em tempos modernos, entre 1946 e 1951, quando se procedeu ao desentulhamento dos trabalhos antigos. Nessa altura foram reportados teores até 8 g/t de ouro e 50 g/t de prata, tendo sido parados os trabalhos por questões de contexto económico (Carvalho, A. 1979).

Os trabalhos desta mina, que se espalham pelo vale do ribeiro do Pingão, pequeno afluente do Sabor, serviram para o desmonte de um filão com 1 m de possança, numa extensão de 300 m até 70 m de profundidade (três pisos), orientados ENE-WSW com pendor entre 60 e 80° para Norte. Além deste filão, que tem o nome de “Pingão dos Quintais”, um outro, paralelo, denominado “Cavagem”, também foi explorado, havendo ainda mais 8 filões reconhecidos na área, todos orientados segundo o rumo de NW com pendente para o Norte (Carvalho, A. 1979).

Os filões de ganga quartzosa são mineralizados em arsenopirite, pirite, galena, blenda, ouro, e contém carbonatos, sericite e clorite. Os teores variavam

entre 0.4 g/t e 8 g/t em 3 pisos. E considera-se a mineralização como relacionada com a estrutura da Falha da Vilariça.

3.8. Outras ocorrências conhecidas

Na região há dezenas de ocorrências descritas como menos relevantes, mas deve referir-se que muitas não tem trabalho suficientes para as desclassificar, e por isso são incluídas como zonas que poderão num futuro próximo ser alvo de estudos mais aprofundados e quem sabe minas de grande importância local.

3.8.1. Leiranco – Boticas

A ocorrência do Leiranco situa-se a poucos quilómetros do centro de Boticas, nas imediações do Parque Eólico, e a aproximadamente 5 km a oeste de Limarinho, representada por um “enxame” de filões cobrindo uma área de aproximadamente 300 m por 300 m, interpretada como uma zona extensional em relação próxima com a zona de cisalhamento Cervos-Sapiãos orientados NW-SE. Mineralizados com arsenopirite, predominantemente N040 a N060 e sub-verticais, hospedados em granito grosseiro de 2 micas, por vezes contendo valores de ouro acima das 2 g/t.



Figura 14: Sistema de veios de quartzo mineralizados em arsenopirite identificados perto do cume do Leiranco. Direita: Detalhe da mineralização.

3.8.2. Alto das Vinhas / Quintela de Lampaças – Bragança

Caracterizadas como ocorrências de Ouro, filonianas, *stockworks* (filões com distribuição irregular e em elevado número) e massas silicificadas em metassedimentos Paleozoicos, afetados por cisalhamentos, carreamentos ou desligamentos tardios, de origem epigenética hidrotermal, com

evidências de alteração supergénica. A mineralização primária surge 75 a 100 m abaixo da superfície topográfica e caracteriza-se pela associação quartzo+sulfuretos+carbonatos, sendo os sulfuretos mais comuns a Arsenopirite (Mispíquel), Bornite (Cobre abigarrado), Calcopirite, Dolomite (Espato áspero), Esfalerite, Galena, Hematite (Oligisto), Pirite, Siderite (Espato ferroso).

Localmente observam-se brechas siliciosas lixiviadas, em alguns casos rica em óxidos e hidróxidos de ferro, polifásicas, orientadas N60°E com possança variável de 0.5 a 20 m e disposição em echelon, que se estendem por 2 Km, associadas à falha da Vilariga. - Dr. Parra, A. Eng. Dias, M. (2000) Eng. Filipe, A. (TECNIBASE - LNEG)

3.8.3. *Rio Silos e Vale do Cancelo - Bragança*

As ocorrências de Ouro em Rio Silos e Vale do Cancelo são filonianas, stockworks (filões com distribuição irregular e em elevado número) e massas silicificadas em metassedimentos Paleozoicos, Filitos, psamitos e grés carbonosos da Formação de Ribeira de Silos, afectados por cisalhamento (D3), carreamentos ou desligamentos tardio. Possivelmente associados com as mineralizações de Ferro (brechas) relacionadas com processos supergénicos, descritos como possíveis secreções laterais dos minerais portadores de ferro. Dois filões de quartzo auríferos descritos (TECNIBASE - LNEG) estão associados a uma brecha gossinizada ferrífera instalados em zona de cisalhamento dúctil D3 e brecha sedimentar. Os filões auríferos orientam-se N070 e subverticais com possança decimétrica, relacionados com eventos variscos, e mineralizados em Arsenopirite e Pirite.

3.8.4. *Guadramil - Bragança*

Em Guadramil são descritos trabalhos mineiros da época dos Romanos, com poços e galerias abertas para explorar filões com teores, de acordo com os trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro (durante os anos 40 e 50) entre 11.2 e 56 g/t Au, com mineralização de ouro no encaixante com teores de ouro de 3.7 g/t.

A mineralização tem uma associação com ferro e manganés, que ocorre associada a processos metamórficos, sob a forma de estratos, contendo siderite e hematite (supergénica), interestratificadas na Formação do Quartzito Armoricano, dobradas em anticlinal, orientadas N351 com pendores 70° para NE e aflorantes numa faixa de terreno com 4000 m de extensão por 400 m de largura.

3.8.5. *Outeiro Seco / Vilela Seca – Chaves*

A ocorrência de Outeiro Seco é referência na Veiga de Chaves como um dos locais onde em Tempos Romanos (e posteriormente) foram localmente exploradas pequenas porções de aluvião com ouro.

Mais recentemente a área foi alvo de trabalhos de prospeção e pesquisa onde foi também confirmada a ocorrência de filões centimétricos N020 a N040 e N150 a N160, com sulfuretos (arsenopirite e pirite) intragraníticos, contendo ouro em teores que localmente ultrapassam as 2 g/t de ouro.



Figura 15: Exemplo de filão mineralizado em Vilela Seca.

E identificada uma área a Norte de Outeiro Seco (Vilela Seca) maioritariamente em metassedimentos Silúricos, com filões que pelas suas características se consideram do mesmo sistema tardio. E a montante dos depósitos aluvionares da Veiga de Chaves, onde foram referidas as explorações Romanas.

3.8.6. Caminho Largo – Freixo de Espada à Cinta

Em Freixo de Espada a Cinta, observam-se ocorrências de ouro, filonianas e stockworks em sequências turbidíticas, Precâmblicas e/ou Câmbricas, de origem epigenética, hidrotermal. Em Caminho Largo observam-se três filões de quartzo paralelos, orientados N325 com pendor 80° para SW e posanção até 1.5 m, contendo mineralização de Arsenopirite e ouro - Dr. Parra, A. Eng. Filipe, A. 1998 (TECNIBASE - LNEG).

3.8.7. Miradeses e Meirinhos – Mirandela

Em Miradeses encontram-se ocorrências de ouro em filões de quartzo instalados em falha NNE-SSE, relacionados com intrusões de granitos tardios

(tardi a pós-F3) e classificados como de origem hidrotermal, contendo arsenopirite, ouro e prata.

3.8.8. *Meirinhos – Mogadouro*

Em Mogadouro, Meirinhos, ocorrem filões que podem atingir 30 cm de espessura encaixados em rochas xistentas, onde foi identificada a presença de ouro, e que não foram ainda estudados em detalhe.

3.8.9. *Penas Róias e S. Martinho do Peso – Mogadouro*

As ocorrências de ouro de Pena Róias encontram-se disseminadas e em estruturas filonianas ligadas a distintas formações vulcano-sedimentares, é descrita como sendo singenética, vulcanogénica, dentro do Complexo Vulcano-silicioso do Maciço de Morais (Silúrico).

As disseminações de ouro são visíveis em níveis quartzosos ricos em hematite e pirite e em níveis de escarnitos ácidos com sulfuretos, estes níveis têm 1 m de espessura máxima e estão intercalados na sequência vulcano-sedimentar, e em geral, os níveis auríferos estão subjacentes a gossan com Cu, Pb e Zn, com amostras a revelarem teores 0.65 e 0.46 g/t de ouro.

E em São Martinho as disseminações de ouro encontram-se em níveis quartzosos ricos em hematite e pirite e em gossan que em geral não excedem 0.20 m.

3.8.10. *Quinta da Terrincha – Torre de Moncorvo*

A ocorrência da Quinta da Terrincha, é uma brecha tectónica, relacionada com evolução da estrutura da Falha da Vilarça, com mineralização disseminada em ouro e prata.

Descrita como de origem hidrotermal com alteração supergénica, em brechas tectónicas quartzosas, polifásicas, por vezes com cimento ferruginoso, orientadas NNE e associadas à falha da Vilarça. Instaladas no Granito de duas micas de Estevais (tarditectónico em relação a F3). Contendo minerais como a Arsenopirite (Mispíquel), Calcopirite, Goethite (Minério de ferro acicular), Hematite (Oligisto), Pirite, Siderite (Espato ferroso), Goethite e Quartzo

3.8.11. *Argeriz – Valpaços*

Em Argeriz, Valpaços, encontram-se estruturas filonianas (NE-SW), *stockworks* e massas silicificadas, em metassedimentos paleozóicos, afetados por cisalhamentos, carreamentos ou desligamentos tardios. Essas mineralizações são descritas como sendo de origem epigenética, hidrotermal, mineralizadas em ouro, instaladas na Unidade de Santa Maria de Émeres (Silúrico) – (Parra, A., Eng. Filipe, A. e Falé, P. (2002))

3.8.12. *Revel – Vila Pouca de Aguiar*

As ocorrências de ouro identificadas em Revel (Vila Pouca de Aguiar) são de dois tipos, detríticas - Eluvionares e Aluvionares, e epigenéticas hidrotermais - Filonianas e *stockworks* espacialmente relacionadas com granitos, em zonas de cisalhamento.

As ocorrências hidrotermais com ouro são descritas como filões quartzosos orientados NE-SW e 80° NW, com possança de 0.3 a 2.0 m, localizados na zona de contacto do granito de duas micas da Gralheira (sin-F3) com a Unidade de Curros (Silúrico – Devónica), contendo ouro, prata e galena (chumbo), localmente com ocorrências de Cassiterite (estanho)

3.8.13. *Vilas Boas – Vila Flor*

Em Vila Flor (Vilas Boas) ocorrem filões que podem atingir 30 cm de espessura encaixados em rochas xistosas. Formam estruturas filonianas, *stockworks* e massas silicificadas em metassedimentos Paleozoicos, afetados por cisalhamentos, carreamentos ou desligamentos tardios, de origem epigenética, hidrotermal, contendo arsénio, prata e ouro.

Localmente observa-se um feixe de filões de quartzo brechificado e brechas quartzo-ferruginosas auro-argentíferas em metassedimentos silúricos afetados por cisalhamento secundário em metassedimentos silúricos – (Meireles, C., Parra, A. Dias, M. (2000)).

3.8.14. *Lomba Grande – Vinhais*

Em Lomba Grande e Jariça (Vinhais) ocorre um filão NNE-SSW com 1 a 3 m de espessura, que foi sujeito a trabalhos de pesquisa e reconhecimento mineiro na década de 1990.

As ocorrências de ouro encontram-se disseminadas e em estruturas filonianas ligadas a distintas formações vulcano-sedimentares, contendo arsénio, ferro, prata e ouro, instaladas no Complexo vulcano-sedimentar afetado por cisalhamento e perto do contacto com anfíbolitos do Maciço de Bragança.

Localmente observa-se um feixe de filões quartzosos em fraturas de cisalhamento, com rumo N010 com pendor de 25° a 30° e possança entre 1 e 3 metros, mineralizados em Arsenopirite (Mispíquel), Calcopirite, Esfalerite, Galena e Pirite.

3.8.15. *Pinheiro Novo – Vinhais*

Em Pinheiro Novo, as ocorrências de Ouro são Detríticas - Eluvionares e Aluvionares, ocorrem num Depósito conglomerático do Pliocénico inferior (Terciário)

Bibliografia

- Almeida, A. & Noronha, F. (1988). Fluid associated with Wand Au-Ag deposits of the Mirande-la area, NE Portugal: an example of peri-granitic zoning. *Bull. Mineral.*, 111, 331-341.
- Blake, R. A. (1939) - Minas de Jales.
- Brink, A. H. (1960). Petrology and geology of the Vila Real -Sabrosa-V.P. Aguiar region, northern Portugal. *Corn. Sew. Geo. Portugal*, T. 43.
- Bonnemaison, M. & Marcoux, E. (1990). Auriferous mineralization in some shear-zones: a three-stage model of metallogenesis. *MM. Deposita*, 25, 96-104.
- Cathelineau, M., Boiron, M. C., Essaraj, S., Dubessy, J., Lespinasse, M. & Poty, B. (1993). Fluid pressure variations in relation to multistage deformation and uplift: a fluid inclusion study of Au-quartz veins. *Eur. J. Mineralogy*, 5, 107-121.
- Carvalho, Adalberto Dias. Breves referencias sobre jazigos auríferos portugueses *Bol. Minas, Lisboa*, 16 (3/4) Jul./Dez. 1979, p. 139-150.
- Cerveira, A. (1947). Notas sobre uma mina de ouro da serra da Louzl. *Bot Soc. Geol. Portugal*, VI, 3, 245-254.
- Cerveira, A. (1952). Relações entre os jazigos hipogénicos portugueses de ouro e tungsténio. *Bot Soc. Geol. Portugal*, 10, 133-144.
- COGEMA (1988). Relatório Interno Instituto Geológico e Mineiro (IGM) – TECNIBASE LNEG.
- Couto, H., Roger, G., Moelo, Y. & Bail, H. (1990). Le district antimoine-or Durico-Beirido Portugal: Evolution paragenetique et geochemique; implications metallogeniques. *MM. Deposita*, 25 (supp), 69-81.
- Doria, A., Boiron, M. C. & Noronha, F. (1991). Metamorphic fluids in quartz veins and their surroundings. An example of an Au district of northern Portugal. *Plinius*, 5, 60-61.
- Farias P, Gallasteghi G, González Lodeiro F, Marquinez J, Martini Parra LM, Martínez Catalán JR, Pablo Maciá JG, & Rodriguez Fernández LR (1987). Aportaciones al conocimiento de la estratigrafia y estructura de Galicia Central. *Anais da Faculdade de Ciências do Porto*.
- Ferreira, M. R. Portugal (1971). Jazigos uraníferos portugueses. Jazigos de Au-Ag sulfetados do Norte de Portugal. Livro guia da excursão n.º 5, I. C.H.L.A.G.E. Lisboa.
- Ferreira, N., Iglesias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A. & Ribeiro, M. L. (1987). Granitoides da zona Centro-Iberica e seu enquadramento geodinamico. In: *Geologia de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hesperico*, Libro homenaje a L. C. Garcia de Figuerola, 37-51, Ed. Rueda, Madrid.
- Gomes M. E. P. E Farinha J. M. F Recursos geológicos de Trás-os-Montes. IPB. 2018.
- Gouanvic, Y., Courrioux, G. & Ovejero, G. (1981). Contrôle structural de la repartition des indices d'or filoniens du nord ouest de la Peninsule Iberique, *Cuad. Geologia Iberica*, 7, 353-367.
- Grivaud, A. 1990. Concessão de Freixeda – Relatório de Síntese (IGM) – TECNIBASE LNEG.

- Iglesias, M. & Choukroune, P. (1980). Shear zones in the Iberian arc. *Journ. Struc. Geol.*, 1, 2, 63-68.
- Iglesias, M. & Ribeiro, A. (1981). Zones de cisaillement ductile dans l'arc Ibero-Armoricain. *Corn. Sew. Geol Portugal*, 67, 85-87.
- Maurel-Palacin, D. (1985). Etude des filons polymetalliques (W, Au, Ag...) au sud de Mirandela (Tras-os-Montes Portugal). Relations avec les granites. These de 3.^o cycle, Univ. P. M. Curie (Paris VI), Memoire des Sciences de la Terre n.^o 85-01, 214 pp.
- Maurel-Palacin, D., Noronha, F. & Roger, G. (1987). Les massifs granitiques de Santa Combada Vilariga et de Pedra Luz (Tras-os-Montes, Portugal) et les mineralisations associees. Universidade do Porto, Faculdade de Ciencias, Museu e Laboratorio Mineralogico e Geologico, Memorias n.^o 1, 303-336.
- Montes, R. (2005). Impacte Ambiental causado pela Mina de Freixeda (Mirandela) – Aplicação Científico-Didáctica. Tese de Mestrado em Biologia e Geologia para o Ensino, UTAD, 143p.
- Montes, R., Gomes, M.e.p. E Pereira, M. R. (2004). Contaminação de solos por metais pesados na área envolvente da mina de Freixeda – Mirandela, Programa e Resumos, p. 91, e Actas em CD, I Cong. Ibérico de Ciência do Solo, Bragança, 7 p.
- Montes, R., Gomes, M.e.p. E Pereira, M. R. (2007). Mineralogia e Geoquímica dos Filões
- Neiva, A. M. R. (1992). Geochemistry and evolution of Jales granitic system, northern Portugal. *Chem. Erde*, 52, 225-241.
- Neiva, J. M. C. & Chorot, J. L. Pastora (1945). Alguns jazigos de ouro do alto Minho. *Est. Not. Trab.*, I, 3 e 4, 190-265.
- Neiva, J. M. C. & Neiva, A. M. R. (1990). The gold area of Jales (northern Portugal). *Terra Nova*, 2, 243-254.
- Noronha, F. (1988). Mineralizações. *Geonovas*, 10, 37-54.
- Noronha, F., Doria, A., Ribeiro, M. A. & Nogueira, P. (1993). Gold mineralizations on the Vila Pouca de Aguiar metasedimentary area. *Cen-tro de Geologia da Universidade do Porto. Relateio* 19 pp.
- Noronha, F. e Ramos, J. M. F. Mineralizacoes auríferas primarias no norte de Portugal. Algumas reflexões. *Cuaderno Lab. Xeoloxico de Laxe Coruna*. 1993. Vol. 18, pp. 133-146.
- Noronha, F., Ribeiro, M. A., Almeida, A., Dória, A., Guedes, A., Lima, A., Martins, H.C., Sant´Ovaia, H., Nogueira, P., Martins T., Ramos, R., Vieira, R. (2013) – Jazigos filonianos hidrotermais e aplitopegmatitos espacialmente associados a granitos (norte de Portugal). *Geologia de Portugal vol. I Geologia Pré-mesozóica de Portugal*. 403-438.
- Oliveira, J. M. S. (1990). Geological, mineralogical and lithogeochemical studies in the Gois and Vila Pouca de Aguiar-Vila Real region, Portugal. *Est. Not. Trab., D.G.G.M.*, 32, 35-75.
- Oliveira, J. M. S. & Farinhaj, A. (1987). Estudos de geoquímica aplicada na região aurífera vizinha de Tres Minas (Vila Pouca de Aguiar, Norte de Portugal). *Est. Not. e Trab. D.G.G.M.*, 29, 3-25.

- Oliveira, J. T., Pereira, E. (1992). Carta geológica de Portugal na escala 1:500 000, coordenadores, 5ª edição.
- Parra, A., Lopes, J. (1999). Sistema de Informação de Ocorrências e Recursos Minerais Portugueses. (SIORMINP).
- Pereira, E., Ribeiro, A., Meireles, C. (1993) – Cisalhamentos hercínicos e controlo das mineralizações de Sn-W, Au e U na Zona Passado, presente e perspectivas futuras - Centro-Ibérica em Portugal. Cuadernos Lab. Xeolóxico de Laxe. vol. 18. 89-119.
- Pereira, M. R. C. Mina da Freixeda: impacto na qualidade dos solos e das águas da região envolvente - Excursão C.
- Ribeiro, A. Pereira E., Ribeiro M. L. e Castro P. Unidades Alóctones Da Região De Morais (TRÁS-OS-MONTES ORIENTAL). 2006.
- Ribeiro, M. A. (1998). Estudo litogeoquímico das formações metassedimentares encaixantes de mineralizações em Trás-os-Montes Ocidental. Implicações metalogénicas. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Portugal., 231pp.
- Rodrigues, J. Pereira, E., Ribeiro, A., (2013) – Complexo de Mantos Parautóctones do NE de Portugal; estrutura interna e tectonoestratigrafia. Geologia de Portugal vol. I Geologia Pré-mesozóica de Portugal. 275-332.
- Rosa, D. (2003). Evolução do fluido mineralizante no distrito aurífero de Jales. Ciências da Terra (UNL), Lisboa, nº esp. V, CD-ROM, B97-B100.
- Rosa, D. (2001) Metallogenesis of the Jales Gold District, northern Portugal. Tese Phd Colorado School of Mines.
- Schermerhorn, L. J. C. (1981). Framework and evolution of hercynian mineralization in the Iberian meseta. Leidse Geol. Med., 52, 1, 23-56.
- Sousa, M. B. & Ramos, J. M. F. (1987). Mineralogia e geologia da jazida estanífera de Vale de Figueiras (Covelinhas, Peso da Regua, NE Portugal), Mem. Not. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra, 103, 13-32.
- Sousa, M. B. & Ramos, J. M. F. (1991). Características geológico-estruturais e químico-mineralógicas das jazidas auríferas da região de Penedono-Tabuago (Viseu-Portugal). Est. Not. e Trab. D.G.G.M., 33, 71-96.
- Thadeu, D. (1977). Hercynian paragenetic units of the portuguese part of the hesperic massif. Bol. Soc. Geol Portugal, 20, 247-276.
- SIORMINP (LNEG) - <https://geoportal.lneg.pt/pt/bds/siorminp>
- TECNIBASE - <https://geoportal.lneg.pt/pt/bds/tecnibase>

7 capítulo

Jazigo de ferro de Moncorvo, a maior reserva de ferro da Europa Ocidental – caracterização estratigráfica, estrutural, petrográfica, geoquímica e ambiente de sedimentação

Emílio Urbano

Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Elisa Preto Gomes

Departamento de Geologia, UTAD e Centro de Geociências da U Coimbra

Carlos Meireles

Laboratório Nacional de Energia e Geologia (UGHGC), S. Mamede de Infesta, Matosinhos. Comité Nacional para o Programa Internacional das Geociências, IUGS/ UNESCO, Portugal.

Paulo Roberto Gomes Brandão

Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Email: emilioevorbano@gmail.com

1. Introdução

As matérias-primas minerais passaram por um período de grande valorização entre 2005 e 2012 (Erten & Ocampo, 2012) devido, principalmente, à forte procura por parte do mercado chinês, levando a um aumento significativo da produção de minérios de ferro nas minas em laboração em todo o mundo e à procura de novos jazigos (USGS, 2017). Paralelamente, observou-se uma queda gradual no teor de ferro das minas em laboração. Por exemplo, o teor médio do minério produzido na China caiu de 31% em 2000 para 18% em 2013 (USGS, 2017). Mais recentemente, a rutura das barragens de rejeitos em Mariana e Brumadinho, no Brasil, criou um risco de quebra no fornecimento mundial de minério de ferro de alto teor devido à interdição pelas autoridades de algumas minas neste país. Mais recentemente, durante o período da pandemia da COVID-19, o mundo voltou a ver a cotação do minério de ferro passar por forte valorização.

Neste contexto, o Jazigo de ferro de Moncorvo volta a ser desafiado a sustentar uma exploração contínua de minério de ferro. Estimativas indicam recursos prováveis de até 1000 Mt de minério (Orey & Rebelo, 1983; Orey, 1999), o que é relativamente excepcional para este tipo de depósito (*ironstones*). Segundo Petranek & Van Houten (1997), são poucos os *ironstones* com

recursos que podem chegar a valores tão elevados. Embora geograficamente a localização do jazigo de Moncorvo esteja próxima de grandes centros consumidores, a falta de infraestruturas para o escoamento do minério (zonas de armazenamento, terminais de carga, caminhos de ferro e terminais portuários adequados) ainda são grandes entraves logísticos. Assim, o Jazigo de Ferro de Moncorvo constitui a maior reserva deste metal ainda por explorar na Europa Ocidental (Orey, 1999).

A viabilidade de exploração de uma mina é uma questão extremamente complexa que depende de fatores económicos, políticos, sociais, ambientais e técnicos. Do ponto de vista técnico, o principal desafio que ainda persiste é a separação e remoção do fósforo do minério de ferro. Porém, o desenvolvimento de novos processos mais eficientes de concentração e o aproveitamento de subprodutos poderão viabilizar, num futuro próximo, a exploração do ferro de Moncorvo (Figueiras *et al.*, 2015).

Além dos fatores económicos, também existem importantes motivos científicos suportados na tese de doutoramento na qual este capítulo se baseia (Urbano, 2017), nomeadamente a origem do ferro e os processos geológicos que levaram à formação do jazigo. Desta forma, este capítulo visa apresentar uma atualização do conhecimento da génese do Depósito de Ferro de Moncorvo.

2. Breve Resumo Histórico sobre a Exploração Mineira do Jazigo de Ferro de Moncorvo

Os primeiros indícios da exploração do ferro de Moncorvo remontam ao período pré-romano, seguido por um período de exploração regular desde o reinado de D. Afonso III (séc. XIII), com intensa atividade mineira entre os séculos XIV e XVIII (Sampelayo, 1929; Orey, 1999).

Na segunda metade do século XIX, surgem as primeiras empresas mineiras interessadas na exploração das reservas de ferro de Moncorvo e a realização dos primeiros estudos sobre viabilidade técnica e económica (Custódio, 2009). Porém, somente nos anos 50 do século XX acontece o primeiro e único período de exploração industrial de minério na Serra da Carvalhosa pela empresa Ferrominas, SARL, do Grupo Champalimaud, enquanto que a empresa Minacorvo, do grupo alemão Thyssen, retomava a exploração no Cabeço da Mua. A corrida à exploração do ferro observada neste período foi fruto da elevada procura causada pela reconstrução da Europa após a Segunda Guerra Mundial. Contudo, na década seguinte, a queda do preço do minério de ferro, a intensificação do comércio transoceânico e a entrada em

operação de grandes minas com um custo operacional bem menor, nomeadamente no Brasil e Austrália, levou a Ferrominas à falência.

Ainda nos anos 60, a empresa Minacorvo realizou estudos técnicos para a abertura de uma mina no Cabeço da Mua com a construção de uma lavaria piloto na região; porém a mina não chegou a entrar em operação. Nos anos 70, houve uma nova tentativa de relançar a exploração protagonizada pelo empresário do ramo siderúrgico, António Chapalimaud, com vista ao aproveitamento do minério de Moncorvo na siderurgia localizada no Seixal. A ideia fracassou por causa da grande distância entre a mina e a indústria e o elevado custo de transporte. Após as mudanças políticas ocorridas em 25 de abril de 1974, a Ferrominas tornou-se uma empresa pública e todas as concessões mineiras passaram a concentrar-se nas suas mãos, com o objetivo de proporcionar uma exploração em larga escala e competitiva no mercado internacional. Entretanto, o projeto foi abandonado pelo governo português em 1986 após a entrada do país na então Comunidade Económica Europeia. Posteriormente, na passagem para o século XXI, ocorre um novo ciclo de valorização do ferro impulsionado pelo forte crescimento da economia chinesa. Uma vez mais, o minério de ferro de Moncorvo voltou a chamar a atenção das empresas do setor mineiro. Em 2007 a empresa MTI assinou um contrato de prospeção e pesquisa das antigas concessões da Ferrominas na Serra do Reboredo e na Mua (flanco norte do Sinclínório de Moncorvo) e em 2011 a empresa CPF celebrou com o Estado Português um contrato, já finalizado, para os direitos de prospeção e pesquisa no flanco sul do Sinclínório de Moncorvo, onde estão localizados os alvos de Felgueiras e Canada. Mais recentemente, em 2019, a empresa Aethel adquiriu os direitos para controlar a mina de ferro de Moncorvo à MTI, com o propósito de colocar a mina em operação até o final de 2020.

3. Caracterização e distribuição dos diferentes tipos de depósitos de ferro no tempo geológico

A génese das rochas sedimentares ricas em ferro foi assunto de intensa discussão entre os cientistas no último século devido à sua importância económica e científica (James, 1954; Young, 1989; Petranek & Van Houten, 1997; Klein, 2005; Clout & Simonson, 2005; Bekker *et al.* 2010; Pufahl *et al.*, 2010). Existe uma grande complexidade deste tipo de rochas em termos de estruturas, mineralogia, ambiente de sedimentação, associações litoestratigráficas e idade. Com base nestes critérios, a literatura científica separa estas rochas em dois grupos principais: *banded iron formations* (BIFs) e *ironstones*.

James (1954) definiu inicialmente as BIFs como rochas sedimentares de origem química, com mais de 15% de Fe e caracterizadas pela alternância de lâminas constituídas, geralmente, por chert e minerais de ferro (óxidos, silicatos, carbonatos ou sulfuretos). A espessura dessas lâminas varia na ordem de milímetros a poucos centímetros, sendo responsável pelo aspecto listrado destas rochas. Além disto, as BIFs caracterizam-se por apresentarem idades que vão desde o Arcaico até o Neoproterozoico (Klein, 2005; Bekker *et al.*, 2010; Pufahl, 2010).

Por outro lado, os *ironstones* são definidos como rochas sedimentares detríticas com enriquecimento em ferro sin-deposicional, podendo variar entre siliciclásticas, siliciclásticas-argilosas e siliciclásticas carbonatadas (Young, 1989; Petranek & Van Houten 1997). A textura mais marcante dos *ironstones* são os oólitos formados por minerais portadores de ferro, porém, mais raramente, estes podem estar ausentes. O principal ambiente de sedimentação dos *ironstones* é o marinho, mas também se podem formar em ambiente lacustre, deltaico e fluvial (Siehl & Thein, 1989).

A formação das rochas sedimentares ricas em ferro é marcada por picos ao longo do tempo geológico, muitas vezes associada à combinação de uma série de fenómenos específicos, como a formação de grandes províncias ígneas, ciclos de transgressão e regressão marinha, períodos de glaciação e mudanças físico-químicas da atmosfera e oceanos (Figura 1; Van Houten & Arthur, 1989; Petranek & Van Houten, 1997; Bekker, 2010; Pufahl, 2010).

Apesar do Arcaico não ter sido o principal período de formação das BIFs, ele foi marcado pela formação de um número expressivo destes depósitos, caracterizados por sedimentos ricos em pirite e magnetite depositados em ambiente marinho profundo, tectonicamente ativo e próximo de arcos vulcânicos (Klein, 2005; Bekker *et al.*, 2010). No Proterozoico ocorre o principal período de formação das BIFs, entre 2.8 e 1.85 Ga, com maior intensidade em 2.45 Ga durante o Grande Evento de Oxidação (GEO) (Holland, 2002; 2006). Neste intervalo inicia-se o processo de oxidação da atmosfera e oceanos (Kasting 2001; 2004; Kasting & Catling, 2003) que, com a participação direta ou não de bactérias, foi capaz de oxidar o Fe^{2+} dissolvido e propiciar a deposição das principais BIFs em ambientes de plataforma marinha (Clout, 1973; Konhouser *et al.*, 2002; Bekker *et al.*, 2010). Neste processo, o Fe^{2+} dissolvido nas águas profundas dos oceanos seria transportado até as zonas rasas e oxidantes, através das correntes de ressurgência (Klein, 2005, Bekker *et al.*, 2010; Pufahl, 2010).

À 1.85 Ga, assiste-se uma longa interrupção na formação das BIFs, que reaparecem somente no Neoproterozoico, entre 750 e 600 Ma. As BIFs forma-

das neste período estão relacionadas, pelo menos em parte, com o fenómeno global de glaciação conhecido por *Snow Ball Earth* (Yeo, 1981; Hoffman, 1998; Klein & Ladeira, 2004; Le Heron *et al.*, 2013). Outra característica contrastante em relação às BIFs do Arcaico e Paleoproterozoico é a presença de altas concentrações de Mn, chegando, por vezes vezes, a formar depósitos economicamente importantes (Yeo, 1981).

Em relação aos *ironstones*, estes depositaram-se principalmente em três tipos de bacias sedimentares: bacias anarogénicas com estabilidade prolongada; margens cratónicas em períodos de divergência ou convergência de placas tectónicas; ou em bacias formadas internamente às cadeias orogénicas durante períodos de deformação reduzida (Petranek & Van Houten, 1997). Normalmente, a formação dos *ironstones* está relacionada com períodos de acumulação de sedimentos mínima ou ausente, geralmente no fim ou no início de ciclos de regressão ou transgressão marinha. Estes depósitos ainda podem ocorrer associados com fosfatos (disseminados, em nódulos ou lentículas), camadas de carvão, *hard grounds*, evaporitos e até laterites (Petranek & Van Houten, 1997), o que indica um vasto leque de ambientes e condições de sedimentação.

Curiosamente, ao analisar a distribuição dos períodos de formação de depósitos de Fe e P na Figura 1, observa-se praticamente uma relação inversa entre a formação das BIFs e dos depósitos de fósforo sedimentar, mas não em relação aos *ironstones*. Isto indica que, a partir do Fanerozoico, houve mudanças significativas nos oceanos, na atmosfera e nos processos geológicos responsáveis pela formação dos depósitos de ferro (Pufahl, 2010). A partir do Fanerozoico observa-se um considerável incremento no teor de P presente nos depósitos de ferro, designados de *ironstones* (Petranek *et al.*, 1997; Mucke & Farshad, 2005), em comparação com os teores observados nas BIFs (Spier *et al.*, 2003; Klein & Ladeira, 2004; Bekker *et al.*, 2010). Isto deve-se ao facto da disponibilidade do P ser regulada pela abundância de matéria orgânica (Heggie *et al.*, 1990) e, por sua vez, a sua fixação associada aos óxidos e hidróxidos de ferro é favorecida nas águas marinhas fanerozoicas, por estas serem consideravelmente menos saturadas em sílica livre (Konhauser *et al.*, 2007).

Assim, levando em consideração o exposto anteriormente, pode-se afirmar que as BIFs e os *ironstones* registam ao longo do tempo geológico as mudanças nos processos responsáveis pela sua formação, bem como a evolução dos oceanos, da atmosfera e até mesmo da vida na Terra.

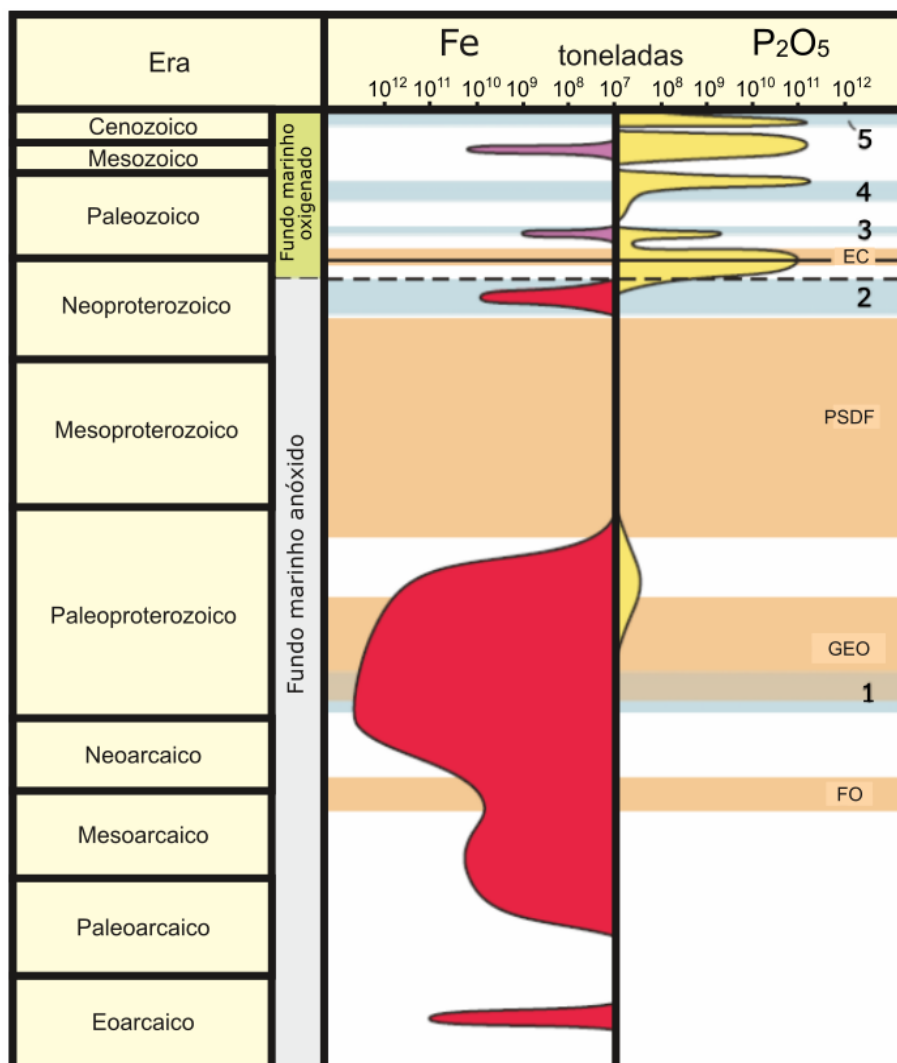


Figura 1: Distribuição dos depósitos de ferro ao longo do tempo geológico (extraído de Urbano, 2017, adap. de Pufahl, 2010).

4. Caracterização geológica do jazigo de ferro de Moncorvo

4.1 Enquadramento geológico

O jazigo de ferro de Moncorvo localiza-se na Zona Centro Ibérica (ZCI), uma das unidades geoestruturais da Península Ibérica definidas por Julivert *et al.* (1972). Esta zona geoestrutural é formada por materiais autóctones, de idade neoproterozoica e paleozoica, depositados na plataforma do continen-

te Gondwana (Figura 2). Uma das características da ZCI, é a discordância basal do Ordovícico sobre as sequências do Câmbrico e Neoproterozoico, designadas inicialmente de “Complexo Xisto-Grauváquico” (Carrington da Costa, 1950) e, posteriormente, classificadas como Supergrupo Dúrico-Beirão (Pereira, 1987). Na região de Moncorvo enquadra-se no Grupo Douro (Sousa, 1982). Esta discordância de 1.^a ordem é atualmente referida de discordância toledânica (Lotze, 1956; Gutiérrez-Marco *et al.*, 2002). Curiosamente, na região de Moncorvo está descrita a única exceção, em toda a ZCI: na terminação periclinal do setor ocidental, na Quinta da Ventosa, o contacto entre o Ordovícico e as unidades do Grupo do Douro é aparentemente concordante (Ribeiro & Rebelo, 1971; Rebelo & Romano, 1986). Já no setor oriental de Freixo de Espada-à-Cinta, o contacto é claramente discordante.

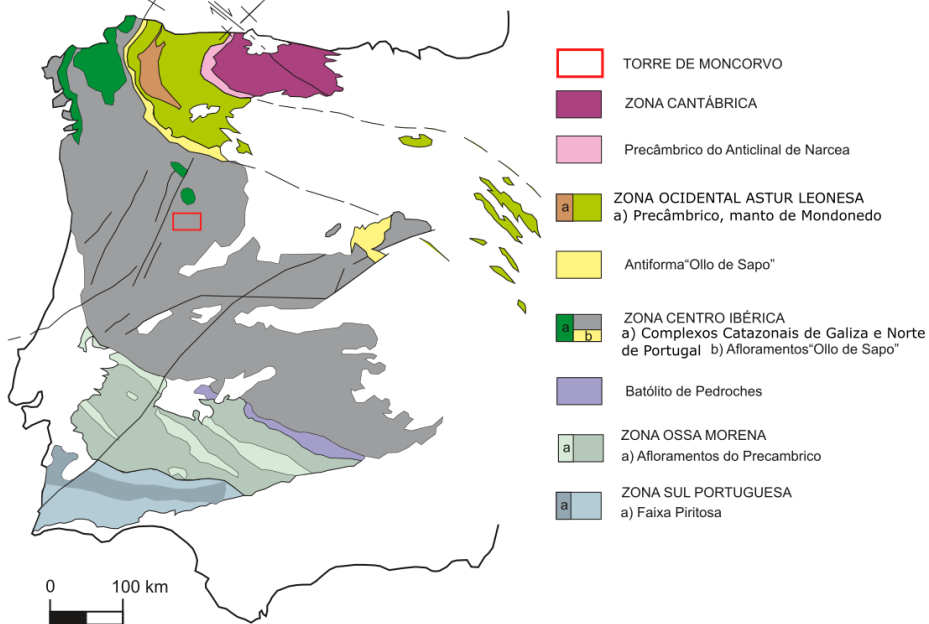


Figura 2: O Maciço Ibérico e suas subdivisões (Julivert *et al.*, 1972).

4.2. Tectónica e Deformação

A região de Moncorvo fazia parte do fundo do paleo-oceano Rheic, na plataforma marinha do paleocontinente Gondwana. Pelos dados paleogeográficos, paleontológicos e paleomagnéticos, estima-se que no Ordovícico Inferior, este continente estivesse situado, a latitudes médias (40 °S - 45 °S), deslocando-se para latitudes mais elevadas (60 °S) no Ordovícico Superior (445-443 Ma) (Figura 3). Ao longo de toda esta plataforma marinha, depo-

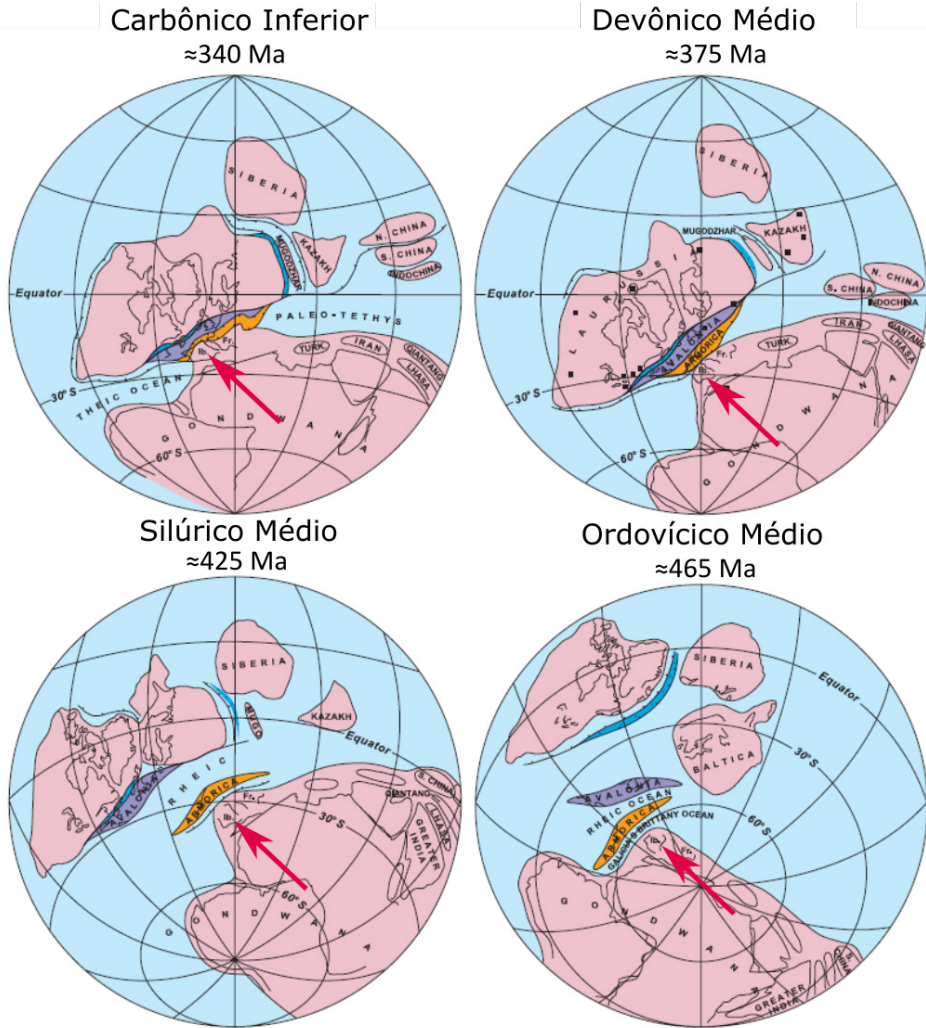


Figura 3: Reconstrução e evolução tectónica dos continentes Gondwana e Laurussia e das microplacas Avalónia e Armórica (adaptado de Matte, 2001). A seta vermelha indica a localização de Portugal.

sitou-se uma formação quartzítica muito extensa e contínua, apresentando sempre as mesmas características em todo o atual sudoeste europeu (Península Ibérica e França), ocorrendo também na Boémia e norte de África. Esta formação geológica é conhecida por “fácies do quartzito Armoricano” (Hamman *et al.*, 1982; Paris & Robardet, 1990; Cocks, 2000) e caracteriza-se pela presença de quartzitos, por vezes maciços, que para o topo da sequência vão diminuindo de espessura e alternando com xistos, siltitos e níveis de ferro.

Atualmente, no território português, podem-se observar estas litologias, nomeadamente na serra de Buçaco, no sinclinal Valongo - Satão, na serra do Marão e em toda a província transmontana, desde Moncorvo até Guadramil. Em Moncorvo a acumulação de ferro atingiu quantidades muito superiores às dos outros locais, possivelmente pela combinação de fatores paleogeográficos e paleoambientais que permitiram a formação das grandes reservas de ferro.

No Silúrico inferior estima-se que a atual Península Ibérica continuasse a latitudes frias e o continente Gondwana a “migrar” para latitudes mais quentes como o comprovam a presença de calcários no Silúrico superior e no Devónico Inferior. O Silúrico na Península Ibérica tem um carácter terrígeno e faunas pelágicas. As rochas mais características são os xistos negros, carbonosos, ricos em graptólitos (Gutiérrez-Marco *et al.*, 1998).

No início do Devónico (419 a 359 Ma), as placas tectónicas dos continentes Laurussia e Gondwana entraram no processo de colisão denominado na Europa de Orogenia Varisca ou Hercínica e Apalachiana, na América do Norte. No início desse processo, o movimento das placas tectónicas terá sido essencialmente convergente, desencadeando a formação de grandes frentes de deformação com subducção e obducção de crosta oceânica. É nesta fase inicial (D_1) que são formadas as principais estruturas de deformação da ZCI, como o Sinclínório de Moncorvo e o Anticlinório de Carviçais. O desenvolvimento da Orogenia Varisca dá início à formação de grandes frentes de carreamento (D_2) representadas na região de Torre de Moncorvo pelos carreamentos de Souto da Velha e Ribeira do Inferno, a nordeste do Jazigo de Ferro de Moncorvo. Apesar da sua importância regional, esta fase de deformação não chega a afetar significativamente as rochas do Sinclínório de Moncorvo.

Durante o Carbónico (359 a 299 Ma), ocorre uma transição no movimento das placas tectónicas de compressional para transpressional (gerando o 3º episódio de deformação varisca, D_3). Esta mudança é caracterizada pela formação de zonas de cisalhamento transcorrentes com direção NW-SE e suas conjugadas ENE-WSW, acompanhadas pela instalação de grandes volumes de granitóides sin a pós-colisionais, como o granito de Carviçais. Já a deformação tardi-varisca é marcada pela reativação de estruturas pré-existentes em regime frágil, gerando uma fraturação mais ou menos intensa e a formação de um conjunto de desligamentos esquerdos com direção N-S a NNE-SSW (e.g. falha da Vilariça). A reativação destas estruturas durante a Orogenia Alpina é responsável pelo soerguimento e rebaixamento de blocos, principalmente no flanco sul do Sinclínório de Moncorvo (Ribeiro

& Rebelo 1971; Rebelo & Ribeiro 1977; Dias, 1986; Dias & Ribeiro, 1995; Pereira *et al.*, 2014).

A primeira fase de deformação (D_1) da Orogenia foi responsável pela formação de grandes estruturas com eixo de direção E-W, de que são exemplos o Sinclínório de Moncorvo e o Anticlínório de Carviçais, e metamorfismo regional (Figura 4). Essas megaestruturas podem apresentar dobras parasíticas em várias escalas, como seqüências de anticlinais e sinclinais com dezenas de metros de comprimento. Tanto o plano axial das dobras D_1 quanto a xistosidade (S_1) apresentam direção E-W e mergulhos moderados para o sul. Uma forte linha de estiramento mineral pode ser encontrada principalmente em Mua, que mergulha suavemente para WNW. Embora presente a poucos quilómetros a norte, a segunda fase da Orogenia varisca não afetou o depósito de Moncorvo (Dias, 1986).

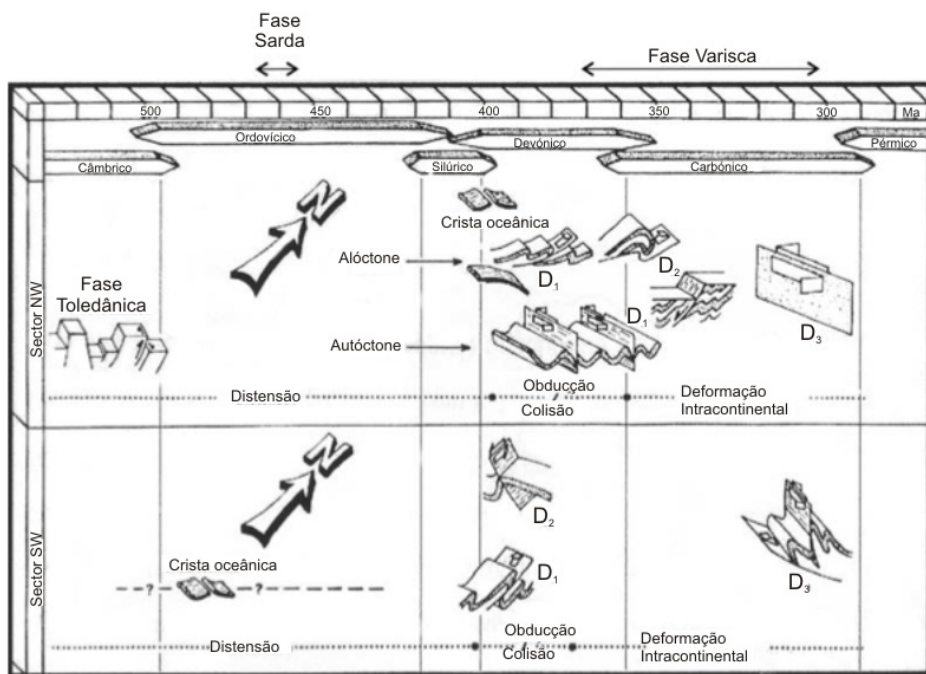


Figura 4: Evolução cronológica das três fases de deformação dúcteis que afetaram a região setentrional do autóctone da ZCI (extraído de Urbano (2017), adaptado de Dias & Ribeiro, 1995).

A terceira fase varisca é caracterizada pela formação de um grande sistema de zonas de cisalhamento com direção NW-SE e a intrusão de granitos ao longo do seu par conjugado (ENE-WSW). Como resultado, formaram-se cristais de andaluzite, na seqüência estratigráfica, devido ao metamorfismo

de contato produzido pela intrusão dos granitos (Ribeiro & Rebelo 1971; Rebelo & Ribeiro 1977; Dias, 1986; Orey, 1999; Pereira *et al.*, 2014).

Finalmente, a fase varisca tardia é marcada pela formação de um sistema de falhas *strike-slip* com direção N-S a NNE-SSW, fraturamento intenso e movimento vertical de blocos, das quais se destaca a falha da Vilariga-Bragança-Manteigas (VBM). Além disto, este processo causou a formação de um fluxo de fluido hidrotermal considerável, conforme documentado por veios maciços de quartzo hospedados nestas falhas (Pereira *et al.*, 2014; Mateus *et al.*, 2015; Oliveira, 2015).

4.3 Estratigrafia

A partir do trabalho de Ribeiro & Rebelo (1971) começa a construir-se um conhecimento consistente e coerente sobre a geologia regional com a apresentação da estratigrafia e a estrutura do jazigo e das rochas envolventes. Apesar da grande estrutura do Sinclínório de Moncorvo já aparecer em seções geológicas em trabalhos mais antigos, o seu primeiro mapa geológico completo foi publicado por Rebelo & Romano (1986), trabalho esse que definiu informalmente as unidades ordovícicas e silúricas. Por outro lado, a sequência litoestratigráfica do Ordovícico de Trás-os-Montes foi alvo nos últimos anos de revisão e apresentação formal das suas unidades (Sá *et al.*, 2005; Sá, 2005; Meireles, 2013). Em Moncorvo, a sequência é formada pelas seguintes unidades da base para o topo (Figura 6):

- Formação Vale de Bojas (equivalente da formação Quinta da Ventosa, segundo Sá *et al.*, 2005):
 - Membro Freitas - bancadas de metaconglomerados maciços com diminuição dos clastos vulcano-sedimentares para o topo; ocorrem intercalações decimétricas a métricas de meta-arenitos e meta-siltitos; idade: Arenigiano inferior. A sua espessura é de cerca de 150 ± 20 m.
- Formação Angueira:
 - Membro Constantim (equivalente à designação informal “membro dos quartzitos inferiores”, segundo Ribeiro, 1974): alternâncias de níveis decimétricos a centimétrico de psamitos, arenitos, quartzitos cinzentos e xistos negros. A sua espessura é de cerca de 150 ± 10 m.
 - Membro Cicouro (equivalente ao “membro dos xistos intermédios”, segundo Ribeiro, 1974): essencialmente xistos carbonosos, finos e monótonos; idade: Arenigiano inferior. A sua espessura é de 300 ± 20 m.
- Formação Marão (equivalente da “formação quartzitos superiores”, segundo Ribeiro, 1974):

- Membro Ermida - quartzitos impuros e compactos, por vezes com conglomerados na base, com estreitas intercalações pelíticas cada vez mais frequentes em direção ao topo; é comum a presença de icnofós-sies *Skolithos* e fósseis de conchas; possui cerca de 130 m de espessura. A sua espessura é de cerca de 50 ± 10 m.
- Membro Malhada - alternâncias de bancadas de quartzitos puros e bancadas quartzíticas ricas em ferro, com níveis decimétricos de xistos, psamitos e filitos negros; pode atingir até 110 ± 20 m de espessura.
- Membro Fragas da Ermida (equivalente aos “psamitos superiores”, segundo Sá *et al.*, 2005): intercalações de níveis milimétricos a centimétricos de psamitos de cor clara com níveis centimétricos a decimétricos de filitos carbonosos; observam-se raras intercalações de quartzitos na base; idade: Arenigiano médio/superior; apresenta cerca de 100 m de espessura. Espessura $100 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$.
- Formação Moncorvo (equivalente à “formação Xistenta”, segundo Sá *et al.*, 2005), sequência espessa e monótona de xistos ardosíferos; é comum a presença de pirite oxidada; idade: Arenigiano superior - Dobrotiviano inferior. Espessura de 210 ± 20 m.
- Formação Chão do Amieiral - nível de ferro oolítico, na base, margas e xistos negros, filitos e psamitos; idade: Berouniano médio - superior. Apresenta espessura de 80 ± 10 m.
- Formação Guadramil - na base, xistos gresosos com clastos de diversas naturezas (quartzitos e filitos) e dimensões compreendidas entre 0.2 e 8 cm, transitando no topo para xistos gresosos com pirite singenética; idade: Hirnantiano. Espessura de 135 m, no estratotipo (Meireles, 2013).

O Jazigo de Ferro de Moncorvo ocorre no Membro Malhada da Formação Marão (Andar Floiano da escala global, 478 - 470 Ma). O Membro Malhada é constituído por sedimentos de plataforma pouco profunda depositados em zonas de alta a baixa energia, caracterizado por quartzitos puros com bancadas métricas a decimétricas de psamitos ricos em ferro e intercalações de metagrauvaques e xistos. Níveis conglomeráticos também estão presentes de forma restrita. A transição lateral das zonas ricas em ferro para zonas não mineralizadas e a presença de estruturas sedimentares reforçam o carácter sedimentar deste jazigo (Orey, 1999). A ocorrência de *Cruziana* e *Skolithos* indica para esta formação a idade Arenigiano médio a superior (Sá *et al.*, 2005).

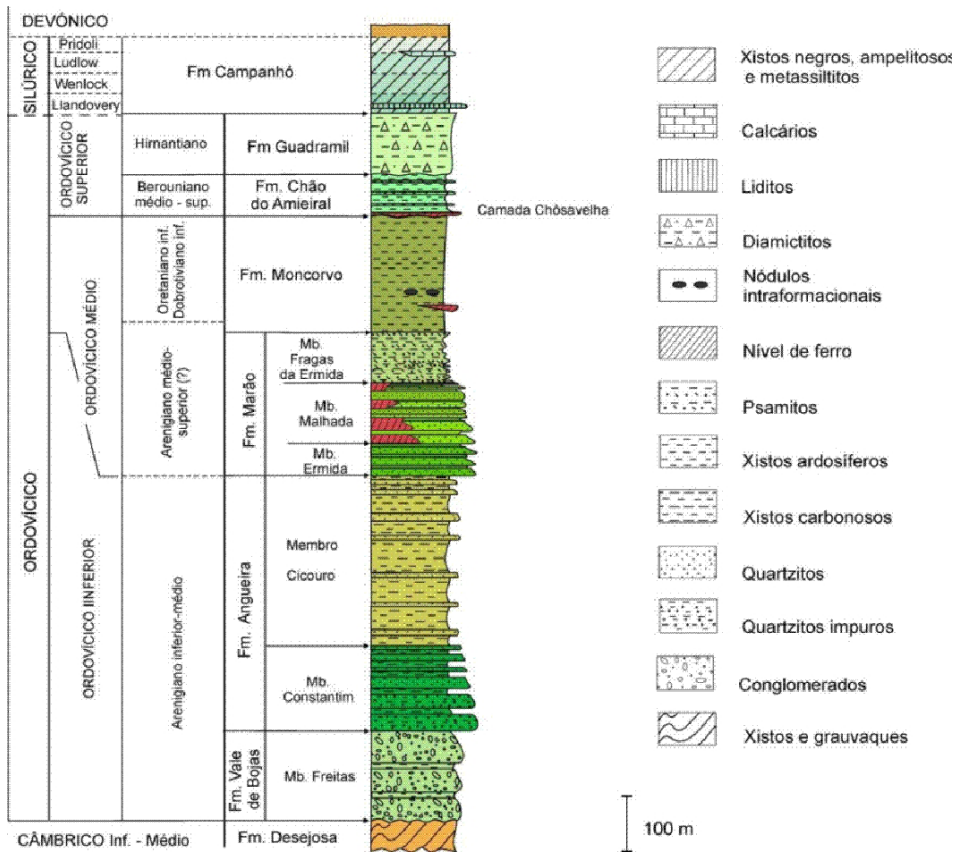


Figura 6: Coluna litoestratigráfica de Moncorvo (adaptado de Meireles, 2013, in Urbano, 2017).

5. Caracterização Estratigráfica e Estrutural dos alvos Felgueiras, Reboredo e Mua

Com o objetivo de possibilitar uma melhor compreensão da génese do Jazigo de Ferro de Moncorvo foram selecionadas duas áreas, em posições distintas na bacia, para a realização de trabalhos de campo detalhados: uma localizada no flanco sul do Sinclínório de Moncorvo, próximo da aldeia de Felgueiras e a outra no flanco norte do Anticlinório de Carviçais, a Mua. Além destas duas áreas, foram feitas observações e colhidas amostras na Serra do Reboredo, localizada no flanco norte do Sinclínório de Moncorvo. A Serra do Reboredo é o local onde ocorre a maior extensão de afloramentos de quartzitos com ferro e, assim, é subdividida em depósitos menores: Carvalhosa, Pedrada, Reboredo e Apriscos (figura 7). Desta forma, através da cartografia geoló-

gica e análise de testemunhos de sondagem, foram identificadas e descritas as unidades litoestratigráficas presentes nas áreas de estudo, bem como as principais estruturas de deformação.

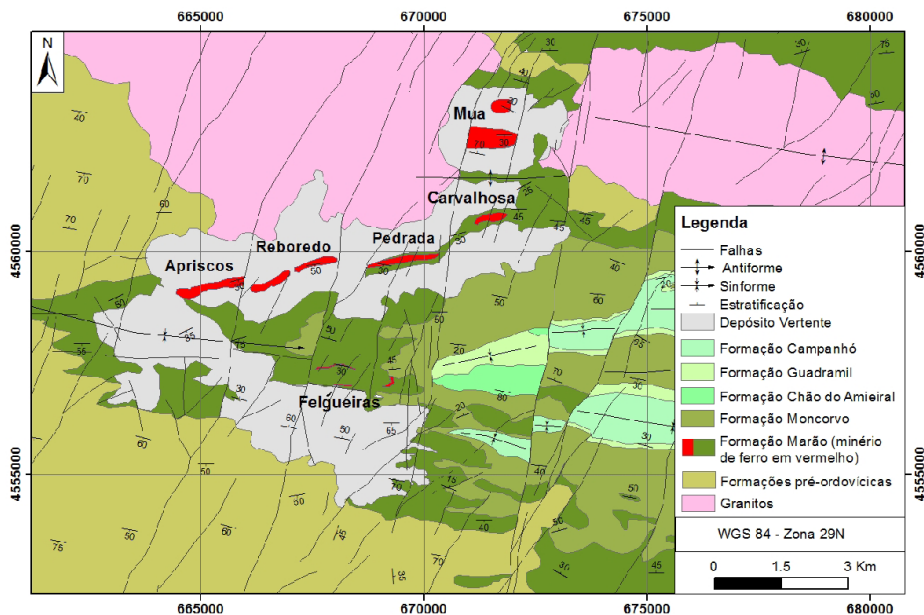


Figura 7: Mapa geológico simplificado do Sinclínório de Moncorvo e Anticlinório de Carviç (adaptado de Orey, 1999, *in* Urbano, 2017).

5.1. Felgueiras

Na área de Felgueiras, bancadas decimétricas de quartzitos puros (orto-quartzitos), cinza, às vezes rosados, e com grão variando de silte a areia média dominam na base da sequência. A sua principal estrutura sedimentar é a laminação plano paralela, típica de areias finas e siltes (Figura 9 - A). Outra característica marcante é a presença de icnofácies *Daedalus* e *Skolithos*, particularmente abundantes na porção sul da área cartografada (Figura 9 - B). Em direção ao topo, observa-se a presença cada vez mais frequente de lâminas muito bem definidas de xistos cinza escuros intercaladas com orto-quartzitos, frequentemente com figuras de carga e pseudonódulos. Estas características indicam que se trata do Membro Ermida da Formação Marão. A transição para a unidade superior acontece com o aparecimento da primeira bancada de quartzito com óxidos e silicatos de ferro intercalados com a sequência sem ferro. Estes óxidos são magnéticos e as bancadas apresentam cor verde escura. Estes níveis secundários de ferro ocorrem ao longo da

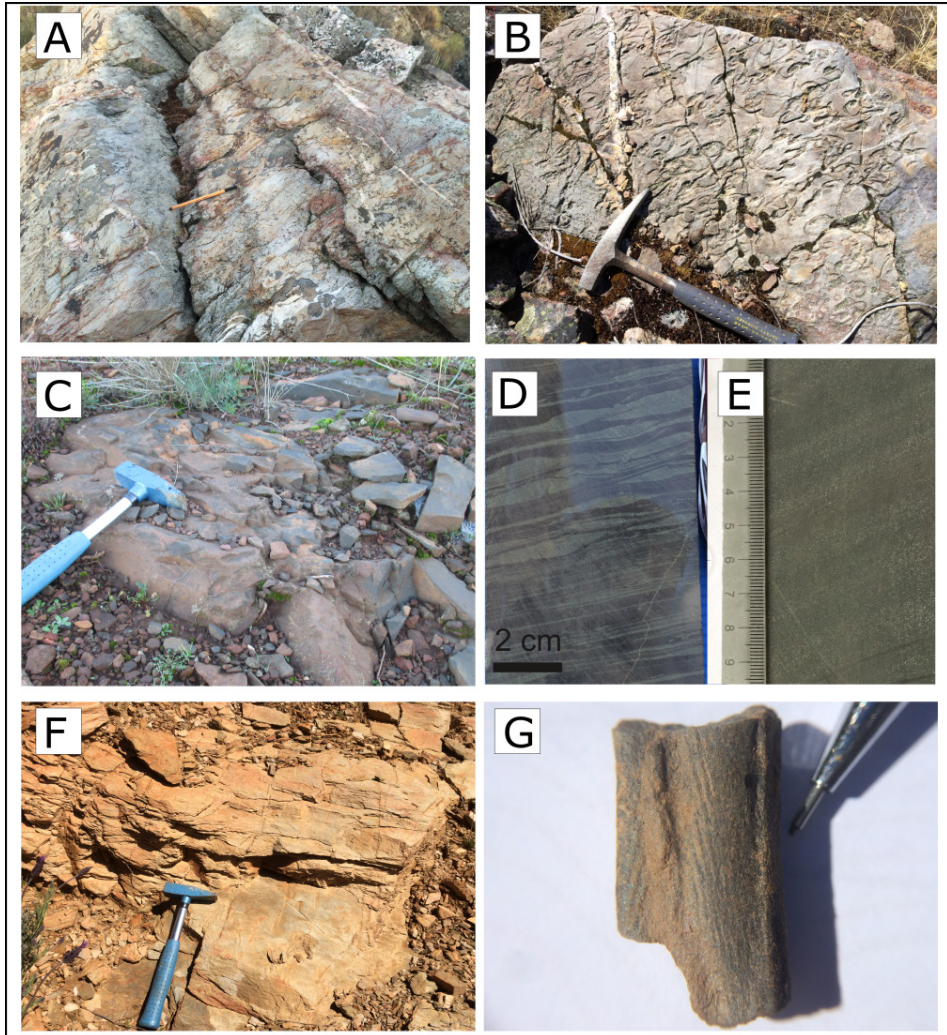


Figura 9: Afloramentos e amostras ilustrando aspectos de campo da Formação Marão. A - Bancadas maciças de quartzitos puros separadas pela estratificação relacionadas ao Membro Ermida. B - Icnofácies *Daedalus* nos quartzitos do Membro Ermida. C - Quartzito rico em magnetite e silicatos de ferro com aspecto maciço. D e E - Quartzito rico em ferro estratificado devido a alternância granulométrica e maciço (Membro Malhada). F - Alternância de lâminas de metassiltitos e xistos com cor cinza prata a alaranjado que se deve a alteração supergênica. Aspecto de campo do Membro Fragas da Ermida. G - Icnofácies *Cruziana* encontrado no Membro Fragas da Ermida. Extraído de Urbano (2017).

base desta unidade de forma espaçada e apresentam espessura que varia de alguns centímetros até 2 metros.

Em seguida, ocorre a sequência rica em ferro constituída por quartzitos com ferro e intercalações de lâminas de quartzitos e xistos, que caracterizam o

Membro Malhada da Formação Marão. Esta sequência é formada por uma camada principal rica em óxidos e silicatos de ferro, com uma espessura média de 15 metros, textura variando entre granular e xistosa e cor variando de cinza escuro a preta com tons verdes (Figura 9 - C). Em geral, a granulometria dos quartzitos com ferro varia de areia fina a média e as suas principais estruturas são, bancadas maciças, laminações plano-paralelas, figuras de carga e pseudonódulos (Figura 9 - D e E).

A transição para a unidade superior é marcada pelo desaparecimento da última camada rica em ferro e a passagem para uma sequência de xistos e psamitos com progressiva redução da componente arenítica e aumento da componente pelítica. Esta sequência é caracterizada por xistos gresosos, quartzitos impuros e alternâncias de lâminas de quartzitos cinza claros e lâminas de xistos cinza escuros (Figura 9 - F). Relativamente ao conteúdo paleontológico, alguns exemplares das icnofácies *Cruziana* foram encontrados nesta unidade (Figura 9 - G). As principais estruturas sedimentares presentes nesta sequência são a laminação plano paralela, estrutura maciça, figuras de carga, pseudonódulos e pequenos canais, porém os pseudonódulos possuem dimensões maiores do que nos intervalos anteriores.

Em relação às estruturas da deformação da região estudada, observam-se dobras associadas à 1.^a fase da Orogenia Varisca (D_1) em diversas escalas (Figura 10 - A e B). A estrutura afetada por D_1 é a estratificação sedimentar, caracterizada por apresentar uma direção geral E-W e mergulho para S-SSW Porém observa-se com menor frequência o seu mergulho para N-NNE (Figura 10 - A). Esta variação de direção do mergulho do acamamento sedimentar (S_0) está relacionada com dobramentos de 2.^a ordem internos ao Sinclínório de Moncorvo. As dobras D_1 são homogêneas, todas do tipo cilíndrico e com vergência para N. Segundo a classificação de Fleuty (1964; 1987), estas dobras variam entre abertas e fechadas, em geral formando ângulos entre 30° e 100°. O eixo das dobras é rectilíneo e com mergulho suave para ESE, porém a sua inclinação pode chegar até a 30° (Figura 10 - C). As características das dobras D_1 são mais facilmente observadas nas porções NE e SW da área, onde predominam as bancadas de quartzitos do Membro Ermida (Anexo 1).

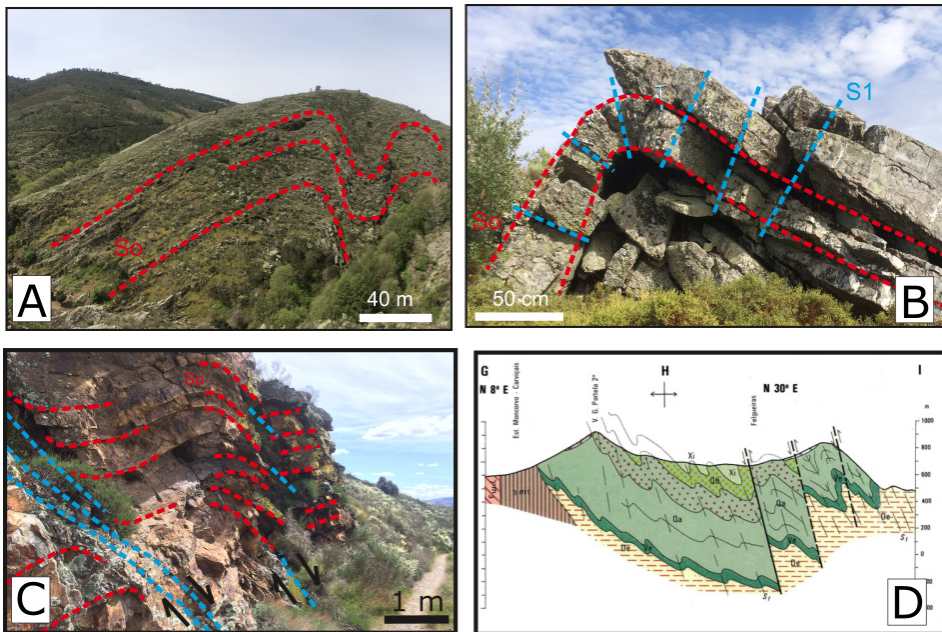


Figura 10: A e B - Sequência de antifomas e sinformas associados a D_1 no flanco sul do Sinclinório de Moncorvo indicando vergência da deformação para norte, próximo à Vila de Felgueiras. C - Dobras com família de falhas normais mergulhando para Sul associadas à partição da deformação D_1 . D - Seção geológica vertical do Sinclinório de Moncorvo da carta 11-C mostrando as dobras D_1 com vergência para Norte e as falhas inversas associadas. Extraído de Urbano (2017).

Associada aos dobramentos D_1 , também se observou a formação de uma clivagem metamórfica S_1 . Esta estrutura é caracterizada pelo desenvolvimento de uma clivagem xistenta ou clivagem de fractura conforme a litologia do afloramento, apresentando padrão em leque (Figura 10 - B). Em geral, o ângulo de cruzamento entre S_0 e S_1 é menor do que 60° , porém este ângulo tende a aumentar à medida que nos aproximamos da zona de charneira das dobras, culminando na perpendicularidade entre as duas. Em geral, a direção de S_1 é ESE-WNW e o seu mergulho para SSW (Figura 11 - B).

As lineações observadas são formadas pela interseção entre S_0 e S_1 (L_{inter}) ou pelo estiramento mineral (L_{est}) e, em geral, mergulham suavemente para E/ESE, embora possam mergulhar com menor frequência para W/WNW (Figura 11 - D e E). A dispersão observada na projeção das medidas da L_{inter} revela uma situação semelhante à descrita por Dias (1986), que deverá estar relacionada com a presença de dobras transectadas, como explica este autor. Eventualmente, a partição da deformação levou ao rompimento do flanco curto das dobras D_1 e formação de falhas inversas, caracterizando um regi-

me de transpressão como sugerido por diversos autores (Figura 10 - C) (Dias et al., 2003; Moreira et al., 2010; Dias et al., 2013). Estas falhas apresentam direção predominante E-W e mergulho para S. Apesar de se ter observado esta estrutura em poucos afloramentos, a realização da cartografia e cortes geológicos levou à sua interpretação numa área mais ampla, assim como indicado no corte geológico da carta 11-C (Figura 10 - D).

As estruturas de deformação tardi-variscas manifestam-se através de sistemas de fraturas e zonas de falhas com direção N-S a NE-SW, causando o deslocamento vertical de blocos por dezenas de metros e colocando lado a lado unidades estratigráficas diferentes.

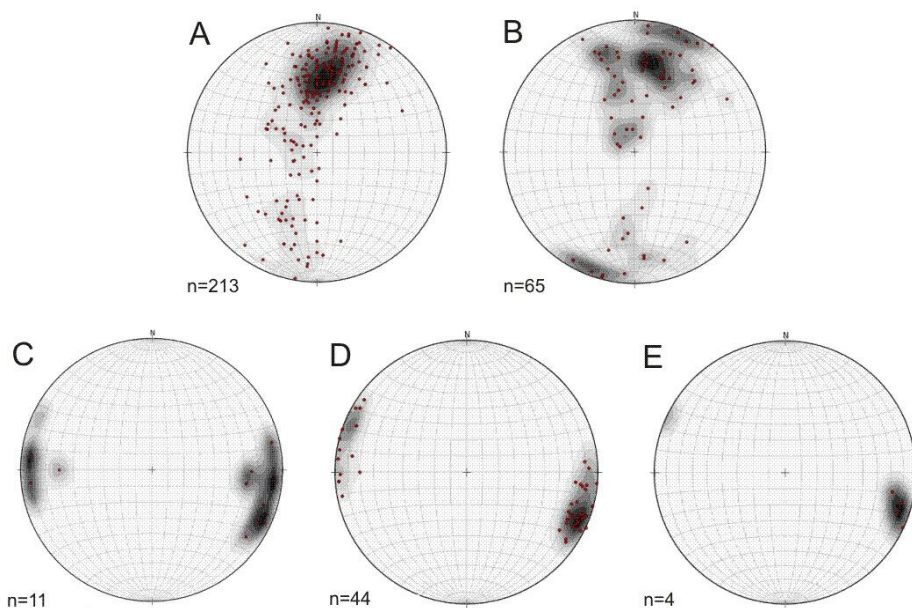


Figura 11 - Projeções estereográficas de igual área e hemisfério inferior para o setor de Felgueiras, flanco sul do Sinclínório de Moncorvo. A - S_y , densidade máxima de 10.5% no plano 186/50. B - S_y , densidade máxima de 8.1% no plano 192/56. C - Eixo de dobras, densidade máxima de 20% em 94/7. D - Lineação de interseção (L_{inter}), densidade máxima de 28.6% em 7/111. E - Lineação de estiramento mineral (L_{est}), densidade máxima de 50% em 07/107. Extraído de Urbano (2017).

5.2. Reboredo

A sequência rica em ferro na Serra do Reboredo é formada por quartzitos que variam de finos a grossos e, eventualmente, apresentam seixos dispersos. A sua matriz é formada por óxidos de ferro e moscovite, enquanto que os grãos de quartzo podem variar da fração silte até seixo (Figura 12- A). Os seixos geralmente não ultrapassam os 2 centímetros de diâmetro e variam

de arredondados a subangulosos. As bancadas formadas por estes quartzitos com ferro variam desde poucos centímetros até dezenas de centímetros de espessura. Os óxidos de ferro presentes nestes quartzitos são predominantemente granulares e, em geral, apresentam carácter magnético, embora possam ocorrer de forma lamelar mais localizada. Fosfatos azulados da série lazulite-scorzalite também podem estar presentes de forma disseminada como grãos do tamanho de areia fina.

Em relação às estruturas sedimentares presentes na sequência rica em ferro, observam-se marcas de onda, estratificação plano paralela e convoluta (Figura 12 - B, C, D). Estas estruturas são muitas vezes identificadas devido à alternância rítmica de lâminas, ora ricas em óxidos de ferro, ora pobres em óxidos de ferro.

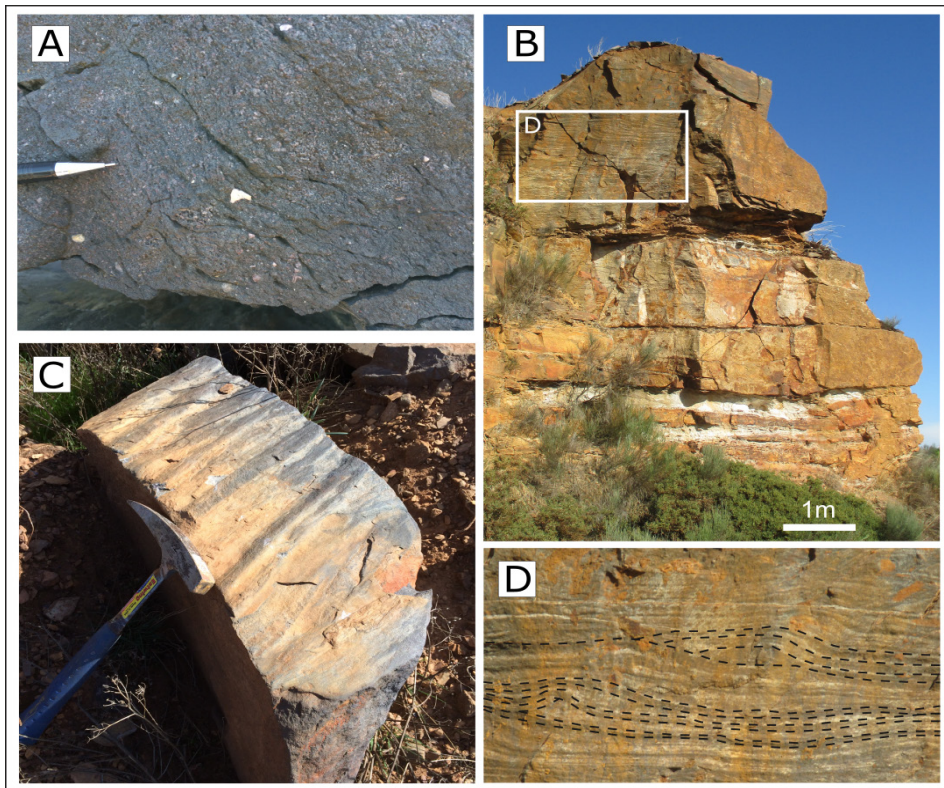


Figura 12: A - Quartzito rico em óxidos de ferro com grânulos de quartzo e textura maciça. B - Bancadas de quartzitos com ferro com intercalações na base de quartzitos finos e xistos cinza claros. C - Marcas de onda em quartzito rico em óxidos de ferro. D - Alternância de lâminas com concentrações variáveis de óxidos de ferro e grãos de quartzo. As linhas tracejadas ressaltam a estratificação convoluta. Extraído de Urbano (2017).

5.3. Mua

A última área abordada em detalhe neste estudo é a Mua, a qual apresenta a maior espessura contínua enriquecida em ferro no Jazigo de Moncorvo, com cerca de 90 m (Orey & Rebelo, 1983). Por este motivo, diversos estudos mineiros foram realizados neste local com vista à sua exploração, como aqueles executados pelas antigas empresas Minacorvo e Ferrominas (Catarino, 2009; Custódio, 2009). Entretanto, do ponto de vista geológico, pouco se sabe do que gerou tal acumulação de ferro com características tão distintas dos outros jazigos de ferro associados à Formação Marão, nomeadamente os jazigos da Serra do Marão (Vila Cova), Guadramil (Neiva, 1949) e Zamora (Fernandez & Moro *et al.*, 1998).

Em relação a estratigrafia na região da Mua, observou-se, abaixo da sequência rica em ferro, uma sequência metassedimentar constituída por alternâncias de bancadas de quartzitos impuros e, principalmente, xistos gresosos cinza claros (Figura 13 - A). Em relação ao conteúdo paleontológico, Sampeylo (1929) refere a presença das icnofácies *Cruziana* e *Skolithos* neste nível estratigráfico, apesar de não terem sido observadas durante a cartografia geológica. Assim, apesar da escassez de afloramentos, esta unidade também parece ser correlacionável com o Membro Ermida (Sá, 2005; Sá *et al.*, 2005). A transição entre esta sequência e a superior, rica em ferro, é marcada pela intercalação cada vez mais frequente de bancadas com ferro, até que as bancadas sem ferro desaparecem. Esta sequência rica em ferro, correlacionável ao Membro Malhada, é composta por quartzitos e metaconglomerados com óxidos de ferro. O carácter conglomerático de algumas destas rochas deve-se à presença dispersa de clastos com comprimento entre 2 mm e 7 cm (Figura 13 - B). A matriz destes quartzitos e metaconglomerados é composta por hematite, moscovite e grãos de quartzo. A hematite ocorre com hábito principalmente lamelar na porção sul da Mua, enquanto que o hábito granular predomina na porção norte, desde o seu cume até a região próxima da aldeia de Felgar. Além disso, também se observam como fases acessórias fosfatos da série lazulite-scorzalite e rockbridgeite, o último formado pela alteração do primeiro (Figura 13 - C e D) (Orey & Rebelo, 1983).

Já as principais estruturas sedimentares observadas, foram a estratificação entrecruzada e laminações plano paralelas (Figura 13 - E e F). Outra característica marcante é a presença frequente de nódulos e lenticulas metassiliticas ao longo da sequência. Estas estruturas são formadas por diferentes proporções de quartzo, moscovite e fosfatos com granulometria do tamanho silte, podendo formar desde quartzitos impuros até xistos. O tamanho destas estruturas varia de poucos milímetros até cerca de 10 cm.

Quanto à caracterização estrutural, a principal estrutura na região da Mua é um sinclinal assimétrico com centenas de metros de comprimento com gênese associada a 1.^a fase da Orogenia Varisca (Ribeiro, 1974; Dias, 1986; Pereira *et al.*, 2014). Esta estrutura é facilmente identificada pois a superfície dobrada é sempre o acamamento sedimentar (S_0) (Figura 14 - A). A atitude média dos flancos do Sinclinal da Mua foi calculada a partir de medidas de S_0 ($n=76$) e, em seguida, foi possível calcular o seu plano axial e eixo (Figura 14 - B). O valor médio do ângulo de mergulho do flanco sul é consideravelmente maior do que o do flanco norte, 37° ($n=62$) e 14° ($n=14$), porém o primeiro pode chegar facilmente a valores iguais ou superiores a 60° ($n=11$). A assimetria entre os flancos do Sinclinal da Mua e a sua vergência para N podem ser visualizadas através dos Perfis Geológicos A-B e C-D (Anexo 2) e do Perfil Mua – Carvalho (Figura 14 - C).

As outras dobras formadas durante a 1.^a fase de deformação apresentam dimensões na ordem de decímetro a centímetros, são do tipo cilíndrico e, em geral, são abertas (abertura entre os flancos entre 120° e 70°), porém podem variar de suaves (180° a 120°) a apertadas (70° a 30°) (Figura 14 - D e E). É interessante notar que estas dobras formam-se sempre nos leitos de quartzitos finos e xistos cinza claros, o seu eixo é retilíneo e mergulha para WNW com um ângulo sempre menor do que 10° . Em diversos locais ocorrem dobras com vergência quer para N, quer para S, formadas por vezes nos mesmos leitos (Figura 14- F). Esta situação difere do padrão das dobras da área de Felgueiras no flanco sul do Sinclínório de Moncorvo, onde predominam dobras somente com vergência para N.

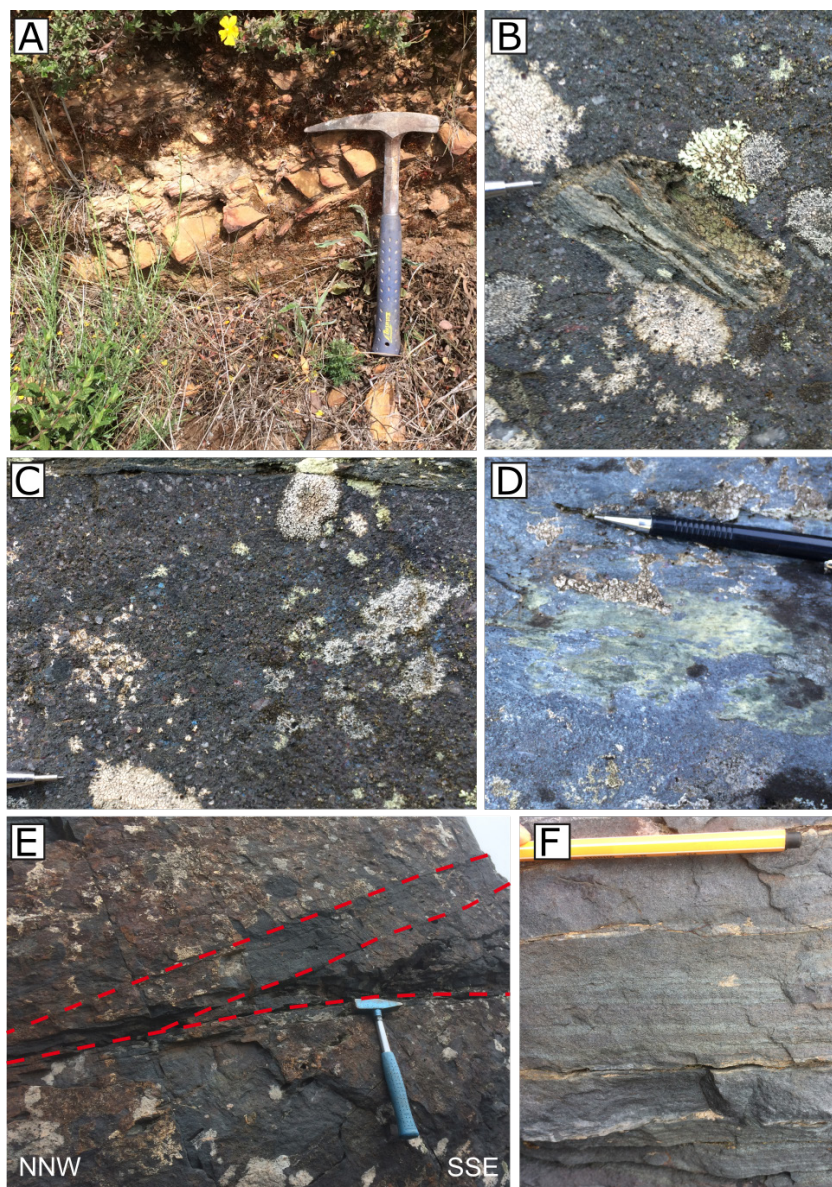


Figura 13: Afloramentos da região do Cabeço da Mua. A - Intercalação de bancadas de quartzitos e xistos abaixo da sequência rica em ferro. B - Quartzito com clastos de fragmentos líticos e matriz formada por óxidos de ferro, moscovite e fosfatos. C - Quartzito com quartzo, moscovite e hematite. Como fase acessória observam-se grãos azuis de lazulite-scorzalite disseminados na rocha. D - Película de rockbridgeite (verde clara) ao longo de uma superfície no quartzito com óxidos de ferro. E - Estratificação entrecruzada em quartzitos ricos em óxidos de ferro. F - Laminação plano paralela formada por concentrações variáveis de hematite e quartzo. Extraído de Urbano (2017).

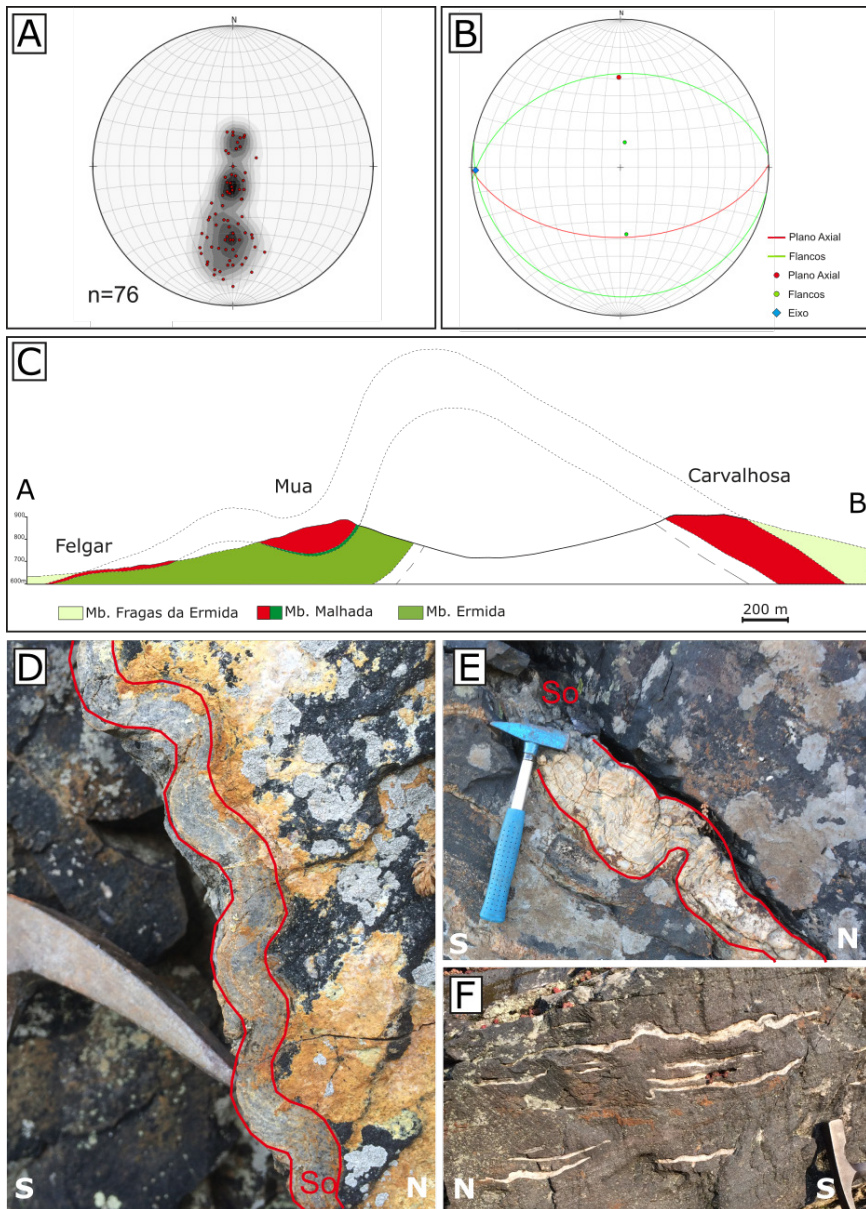


Figura 14: Projção estereográfica de igual área do hemisfério inferior: A - Acamamento (densidade máxima de 13,6% no polo 180/79); B - Projção dos flancos norte e sul, plano axial e eixo do Sinclinal da Mui. C - Perfil geológico da região entre a Mui e Carvalhosa evidenciando a assimetria entre os flancos do Anclinório de Carviçais. A localização deste perfil encontra-se na Figura 7. D, E e F - Quartzitos finos e xistos cinza claros com dobramentos variando de abertos a apertados e no meio a sequência rica em ferro. Observa-se vergência da deformação para S e N. Extraído de Urbano (2017).

Em relação à clivagem metamórfica (S_1), em geral é do tipo em leque convergente. No flanco norte do Sinclinal da Mua esta estrutura ocorre de forma muito restrita como uma clivagem de fractura em leitos competentes. Já no flanco sul, S_1 é formada pela reorientação dos minerais placóides e lamelares, como a moscovite e hematite (Figura 15 - A). Seu carácter penetrativo está diretamente relacionado com o desenvolvimento da lineação de estiramento mineral (L_{est}) (Figura 15- B).

No flanco sul do Sinclinal da Mua, em geral, S_1 possui direcção E-W e mergulho superior a 65° para norte (Figura 15 - C). Raramente observa-se a formação de uma outra clivagem xistenta (S_1') com mergulho para sul (Figura 15 - D). Na verdade, S_1' forma-se onde S_1 apresenta um padrão anastomosado e, em intervalos regulares, formam-se clivagens com mergulho em direcção ao sul (Figura 15 - E e F). Esta observação é suportada pelo facto de que S_0 se mantém constante, ou seja, S_1' não é resultado do dobramento de S_1 . Assim, quando S_1' atinge o seu máximo desenvolvimento no flanco sul, assiste-se ao início da transposição de S_0 e a formação de estruturas em lápis. A L_{est} em geral mergulha suavemente para NW (Figura 16 - C) e é marcada pela reorientação e alongamento de minerais tabulares, clastos de conglomerado e estruturas sedimentares segundo esta direcção. Os principais minerais que são reorientados segundo a L_{est} são a moscovite e, sobretudo, a hematite lamelar (Figura 16 - A). Este último forma agregados policristalinos que frequentemente contornam os grãos de areia de quartzo e produz uma superfície com aspecto liso. A moscovite pode ser observada disseminada na matriz da rocha ou também na forma de agregados fortemente alongados segundo esta lineação (Figura 16- B).

Por último, o sistema de falhas com direcção NNE-SSW, paralelo à Falha da Bragança-Vilariça-Manteigas, assume um papel importantíssimo na estruturação da Mua pois limita a leste e a oeste a sequência rica em ferro. A falha a oeste é facilmente reconhecida a noroeste do jazigo por causa de um possante filão de quartzo com cerca de 20 m de espessura que a preenche. Segundo Pereira et al. (2014), o movimento deste sistema de falhas é esquerdo, porém com uma componente vertical capaz de causar o soerguimento e/ou abatimento de blocos tectónicos (Dias, 1986).

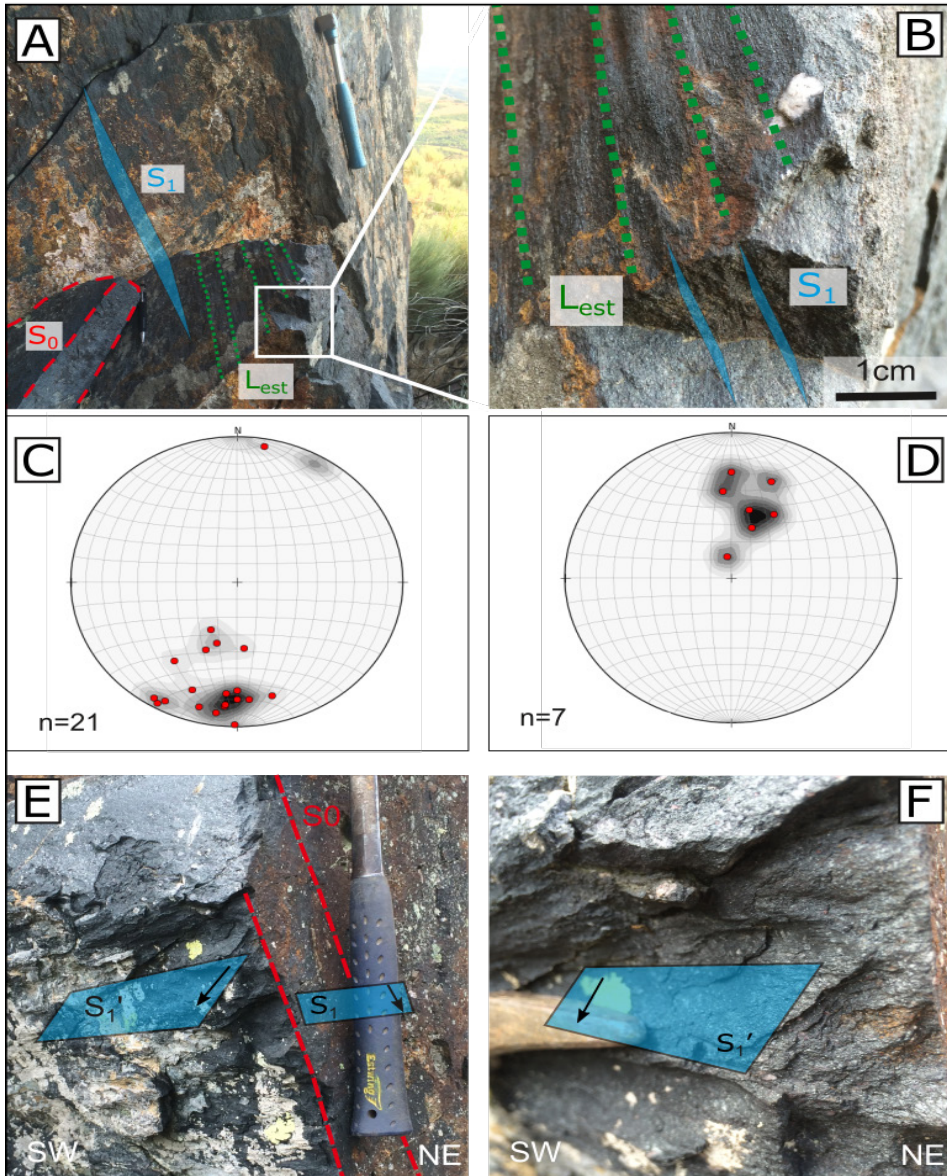


Figura 15: A - Afloramento onde se nota a estratificação (S_0), clivagem xistenta (S_1) e lineação de estiramento mineral (L_{est}). B - Observa-se que L_{est} é formada pela orientação de moscovite e hematite lamelar e que esta estrutura é paralela à S_1 . C - Clivagem xistenta S_1 (densidade máxima de 24% no polo 180/21). D - Clivagem xistenta S_1' (densidade máxima de 21,2% no polo 17/52). S_1' forma-se onde a partição da deformação propiciou o desenvolvimento de planos de desligamento discretos. E e F - Afloramento onde se observa a relação entre S_0 , S_1 e S_1' . S_0 e S_1 mergulham para norte e S_1' para sul. Extraído de Urbano (2017).

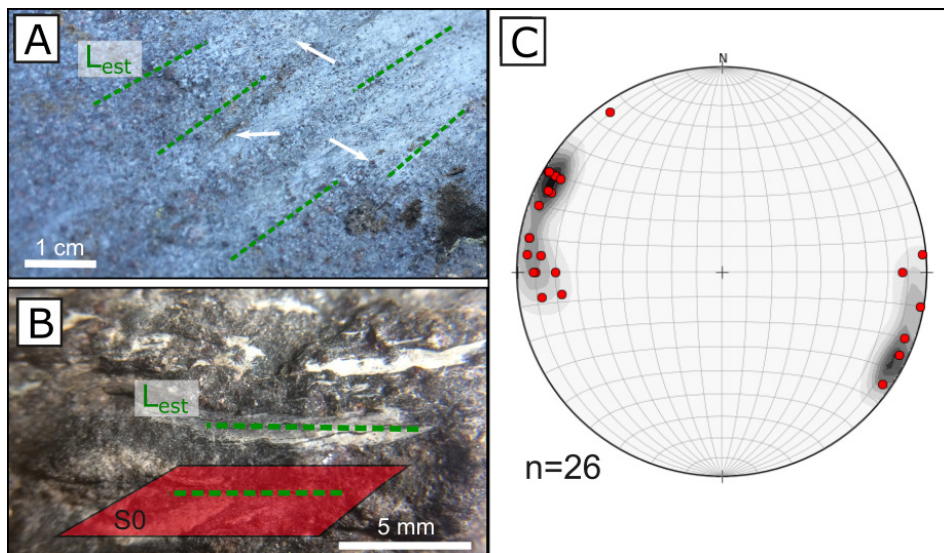


Figura 16: A - Lineação de estiramento mineral formada por agregados policristalinos de hematite especularítica. Grãos detríticos de quartzo envolvidos por micro lâminas de especularite (setas brancas). B - Lentículas de moscovite e agregados de hematite especular alinhadas segundo o estiramento mineral. C - Lineação de estiramento mineral (densidade máxima de 34% em 7/300). Extraído de Urbano (2017).

6. Caracterização Mineralógica e Petrográfica do jazigo

6.1. Principais minerais portadores do ferro

O ferro (Fe) é o elemento químico mais abundante na Terra, correspondendo a cerca de 32.07 % da sua composição total. Contudo, a sua concentração na crosta é de cerca de 10 % e no núcleo 89 % (Morgan & Anders, 1980). Assim, não é de surpreender que este elemento esteja presente na composição química de mais de 800 minerais. Neste texto os termos minerais de minério e minerais de ganga são utilizados para referir os minerais passíveis e não passíveis de serem explorados economicamente, respetivamente. Alguns dos principais minerais de minério de Fe e de ganga são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Principais minerais de minério de Fe e de ganga.

Adaptado de Clout & Manuel (2015).

	Mineral	Composição Química	Descrição
Minerais de Minério	Hematite	Fe ₂ O ₃	Formado por dois átomos de Fe ³⁺
	Magnetite	Fe ₃ O ₄	Formado por dois átomos de Fe ³⁺ e um Fe ²⁺
	Goethite	FeOOH	Formado por um átomo de Fe ³⁺
Minerais de Ganga	Quartzo	SiO ₂	Grupo da sílica
	Caulinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Argila dioctaédrica
	Gibbsite	Al(OH) ₃	Hidróxido de Alumínio
	Moscovite	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	Mica dioctaédrica
	Biotite	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	Mica trioctaédrica
	Clorite	(Fe, Al, Mg) ₃ (Si, Al) ₂ O ₅ (OH) ₄	Filossilicato (Grupo da Clorite)
	Pirite	FeS ₂	Sulfureto de Fe
	Pirolusite	MnO ₂	Óxido de Mn
	Siderite	FeCO ₃	Carbonato de Fe
	Ankerite	Ca(Fe, Mg, Mn)(CO ₃) ₂	Carbonato do grupo da Dolomite

6.2. Diversidade mineralógica do jazigo

Diversos estudos petrográficos sobre o minério de ferro de Moncorvo foram realizados principalmente nas serras de Reboredo e Mua procurando desenvolver uma classificação de acordo com os minerais de minério predominantes (Neiva, 1949; Orey, 1979; Orey & Rebelo, 1983; Orey, 1999). Na Tabela 2 apresenta-se uma síntese das diferentes classificações de minério propostas por esses estudos e as suas principais zonas de ocorrência.

Tabela 2: Síntese das propostas de classificação dos minérios de ferro das serras do Reboredo e da Mua e suas principais zonas de ocorrência (Urbano *et al.*, 2015).

Tipo de minério	Zona de Ocorrência
Magnetítico	Abaixo dos 100 m de profundidade na Serra de Reboredo e é acompanhado de chamosite, uma clorite com ferro.
Magnetito-lamelar	Em diferentes profundidades na Serra de Reboredo, tornando-se mais escasso à medida que a profundidade aumenta.
Martítico	Entre zero e 100 m de profundidade na Serra de Reboredo e no flanco norte do sinclinal da Mua.
Limonítico	Tanto na superfície quanto em níveis muito profundos na Serra de Reboredo.
Lamelar-martítico	Predomina em todo o flanco sul do sinclinal da Mua (80% das reservas desta área de acordo com os cálculos da época).

O estudo petrográfico realizado por Urbano *et al.* (2015) no minério de ferro do flanco norte e sul do Sinclínório de Moncorvo revelou algumas semelhanças e diferenças com os sistemas de classificação propostos pelos auto-

res citados anteriormente. Urbano *et al.* (2015) descreveram dois tipos de minérios de ferro: o reduzido e o oxidado. Os minérios reduzidos são constituídos por magnetite, clorite (chamosite), biotite e apatite. Já os minérios oxidados são aqueles constituídos, principalmente, por óxidos-hidróxidos de Fe (goethite), hematite e quartzo. Esta terminologia foi definida com base no predomínio de minerais portadores de Fe^{2+} ou Fe^{3+} (óxidos e silicatos), o que confere ao minério uma cor cinza esverdeado ou cinza acastanhado, respectivamente. Utilizando-se a classificação apresentada na tabela 2, os minérios reduzidos enquadram-se nos minérios do tipo magnetítico; assim assemelham-se aos minérios que ocorrem abaixo de 100 metros de profundidade na serra do Reboredo, enquanto os minérios oxidados enquadram-se nos minérios do tipo martítico e, principalmente, goethítico da Serra do Reboredo.

Apesar dos minérios da Serra do Reboredo e Mua poderem ser enquadrados na classificação proposta por Urbano *et al.* (2015), esta não é a mais adequada para classificar estes minérios em toda a sua complexidade mineralógica, visto que esta é essencialmente química. A forma mais correta seria classificá-los em termos da sua composição mineralógica: a Figura 17 apresenta um esquema de classificação baseado nos principais minerais de minério e de ganga (Urbano, 2017). Em relação à classificação proposta por Urbano *et al.* (2015), esta é mais adequada para os minérios do flanco sul, servindo para diferenciar os minérios alterados supergenicamente (minérios oxidados), dos não alterados (minérios reduzidos).

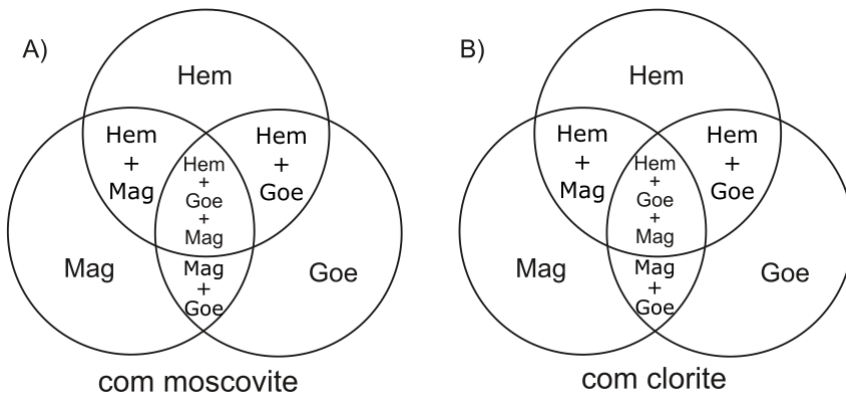


Figura 17: Sistema de classificação para os dois principais conjuntos de minério, A e B, e seus subgrupos intermédios. Hem=hematítico, Mag=magnetítico, Goe=goethítico. Extraído de Urbano (2017).

Com base nos dados de campo, petrográficos e na pesquisa bibliográfica, pode-se afirmar que os minérios do tipo A, com moscovite, estão presentes somente na Serra do Reboredo e na Mua, enquanto que os minérios do tipo B, com clorite, se encontram no flanco sul do Sinclínio de Moncorvo, próximo de Felgueiras, e na Serra do Reboredo abaixo dos cem metros de profundidade (Orey & Rebelo, 1983; Urbano *et al.*, 2015).

6.3. Caracterização Petrográfica dos minérios de ferro

Uma inspeção minuciosa de lâminas petrográficas possibilitou a descrição da mineralogia e microtextura das diferentes áreas do depósito de ferro de Moncorvo. Para não ser demasiado exaustivo são apresentadas, sumariamente, as características dos minérios de ferro.

O quartzo é o principal mineral de ganga e está presente nos dois tipos de minérios. A moscovite (Figura 18 - A) é o segundo mineral de ganga mais abundante para os minérios do tipo A, enquanto para os minérios do tipo B é a chamosite (Figura 18 - B). Os principais fosfatos dos minérios do tipo A são os minerais da série lazulite-scorzalite, apatite e rockbridgeite (Figura 18 - C e D). Já para os minérios do tipo B o principal mineral portador do fósforo é a apatite quando pouco ou não alterado supergenicamente, enquanto que, quando alterados, o fósforo encontra-se contido na goethite (Figura 18 - D, E, F). Em relação aos óxidos de ferro, estes podem ocorrer na forma de magnetite, hematite ou goethite, sendo que a hematite ocorre na forma de martite ou especularite. A martite é uma pseudomorfose resultante da transformação da magnetite em hematite por oxidação, mas preservando o hábito cúbico inicial (Figura 18 - G e H). A especularite é formada em zonas com um maior grau de deformação, tem hábito placóide com o seu eixo principal bem mais alongado do que os outros (Figura 18 - H), enquanto a goethite é formada pela alteração dos outros óxidos de ferro (Figura 18 - E e F).

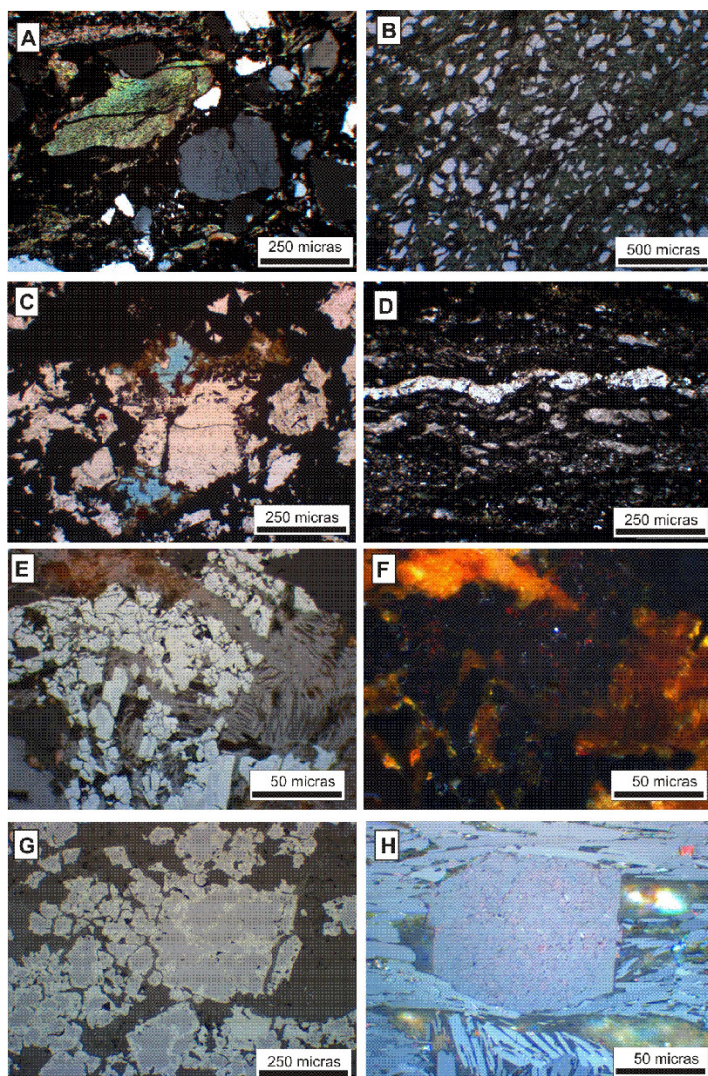


Figura 18: A - Moscovite, grãos de quartzo e óxidos de ferro opacos. B - Cristais de chamosite, com pleocroísmo verde “garrafa” e grãos de quartzo. C - Cristais de lazulite-scorzalite com forte pleocroísmo azul parcialmente transformados em rockbride (cor castanho). D - Níveis de apatite (mineral translúcido) intercalado com níveis de óxidos de ferro (mineral opaco). E - Agregado policristalino de óxidos de ferro (cinza claro) alterado para agregado fibroso de goethite (cinza escuro). F - Cor de reflexão interna da goethite que varia de amarela, laranja a castanho. G - Agregado policristalino de magnetite (cinza) parcialmente alterado nos bordos para hematite (cinza claro). H - Grão de magnetite completamente martitizado envolto por cristais de hematite na forma de specularite. A, B, C, D Luz transmitida; E, F, G, H Luz refletida; nicóis paralelos (B, C, D, E, G) e cruzados (A, F, H). (Extraído de Urbano, 2017).

6.4 Caracterização Geoquímica

Elementos maiores e traço foram analisados em 67 amostras (7 da Mua, 6 do Reboredado e 54 de Felgueiras) do Depósito de Ferro de Moncorvo. A amostragem nas áreas de estudo foi realizada no decorrer das atividades de levantamento geológico à escala 1:5000 e, em Felgueiras, os dados geoquímicos de sondagens (50 amostras) foram cedidos pela empresa CPF (Companhia Portuguesa do Ferro). As amostras de sondagem apresentam em média 2 m de comprimento e foram classificadas de acordo com a litologia predominante, podendo ser com ferro ($> 15\%$ de Fe_2O_3) ou sem ferro.

A classificação geoquímica de Herron (1988) permite separar principalmente quartzitos, arcose e xistos, em função do seu grau de maturidade sedimentar (Rollinson, 1996). Aplicando-se esta classificação às amostras de Moncorvo, observa-se que predominam arenitos e xistos ferruginosos em Felgueiras e arenitos ferruginosos na Mua e Reboredado (Figura 20). Além disso, verificam-se algumas diferenças entre a classificação petrográfica e a classificação geoquímica, o que pode ser explicado pelas amostras de sondagem compreenderem intervalos de 2 m de comprimento em média, contendo diferentes proporções de quartzitos e xistos com e sem ferro. Contudo, apesar destas diferenças pontuais, nota-se que a classificação geoquímica das amostras em geral é coerente com a classificação petrográfica.

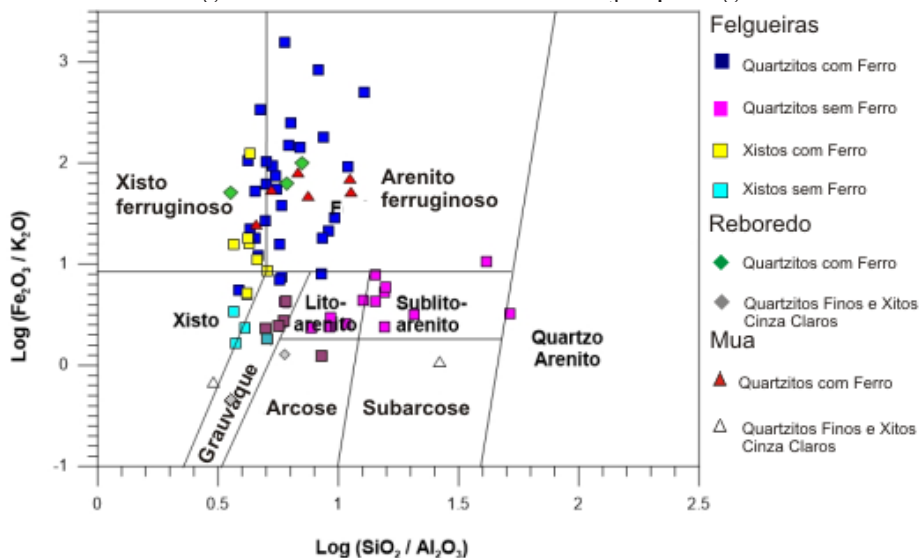


Figura 20: Classificação geoquímica das amostras de Moncorvo. Adaptada de Herron, 1988, in Urbano (2017).

Quanto a correlação entre os elementos químicos, a correlação negativa entre Fe_2O_3 total (t) e SiO_2 é a característica mais marcante, causada pelo au-

mento relativo de óxidos de ferro e diminuição dos silicatos, principalmente do quartzo detrítico. Este processo, a sedimentação do ferro, é indicado pelo vetor 1 (figura 21 - A). A mesma correlação negativa é observada entre Fe_2O_3 (t) e Al_2O_3 , mas exclusivamente para as litologias ricas em ferro (figura 21 - B). As litologias sem Fe, quartzitos e xistos de Felgueiras, apresentam uma correlação positiva entre estes dois elementos, devida ao aumento da componente pelítica, representado principalmente pela moscovite (vetor 2). Estes dois padrões são observados em todas as áreas do Depósito de Moncorvo: Mua, Reboredo e Felgueiras.

Por outro lado, a relação positiva entre Fe_2O_3 (t) e CaO e P_2O_5 é bem marcada em Felgueiras, enquanto que na Mua e Reboredo não há correlação entre Fe_2O_3 (t) e CaO e a correlação de Fe_2O_3 (t) e P_2O_5 não é tão forte quanto em Felgueiras (figura 21 - C, D). Isso certamente é causado pelo predomínio da apatite no depósito de Fe, em Felgueiras, e pela presença de outros fosfatos na Mua e no Reboredo, como lazulite-escorzalite, crandalite e rockbridgeite.

Um padrão diferente é observado no metassiltito e nos filitos cinza claros da Mua e Reboredo que apresentam um enriquecimento tão forte em P_2O_5 que uma das amostras não foi colocada no diagrama devido ao seu alto teor (10,17%). Este processo, o enriquecimento de P_2O_5 (vetor 3), ocorreu independentemente da sedimentação de Fe_2O_3 como sugere o diagrama (figura 21 - D). Este comportamento também é observado entre o Fe_2O_3 (t) vs Sr e ETR+Y (Elementos Terras Raras e Ítrio) através do vetor 1 e o vetor 3 (figura 21 - E, F).

Já a correlação entre Fe_2O_3 (t) e V é positiva e com uma dispersão surpreendentemente baixa em todo o depósito (figura 21 - G). Isso indica claramente uma relação direta entre o enriquecimento desse elemento e o processo de sedimentação do ferro (vetor 1). Finalmente, a correlação negativa de Zr e Fe_2O_3 é semelhante à de SiO_2 , sugerindo uma diminuição da sedimentação detrítica e aumento da contribuição química para o depósito (figura 21 - H).

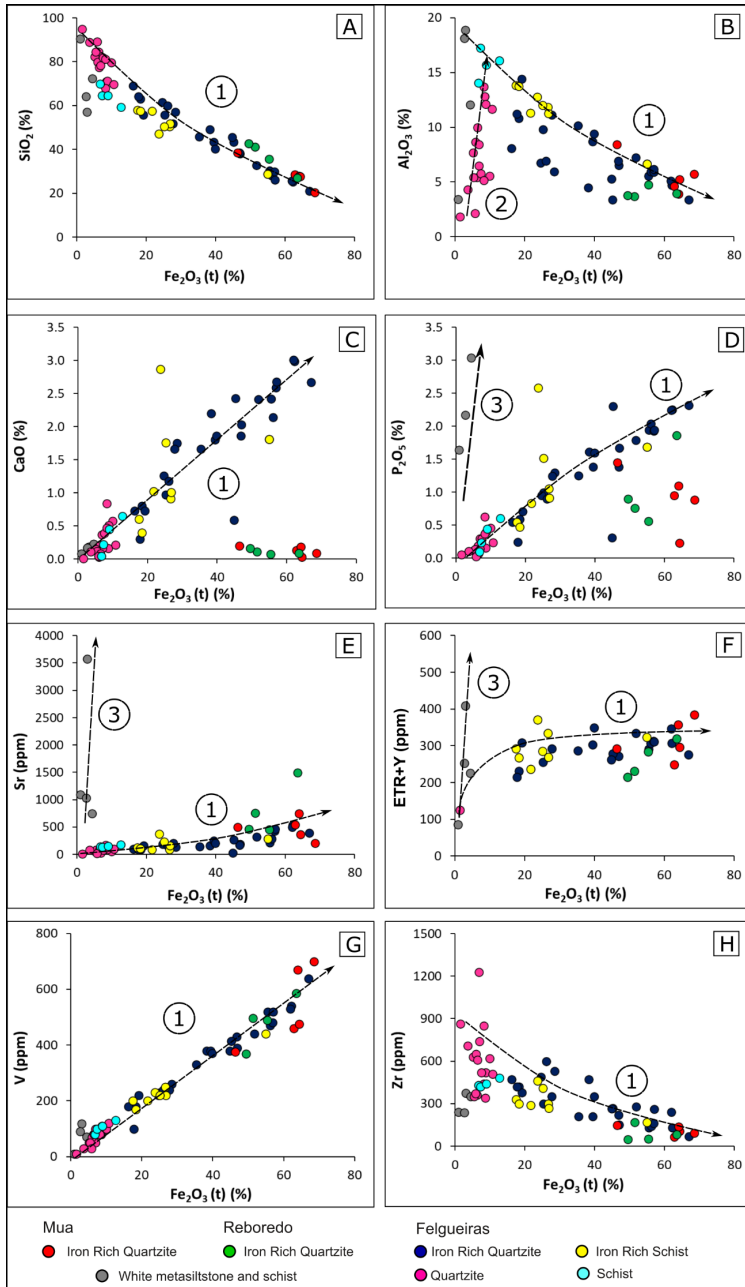


Figura 21: Diagramas de correlação entre Fe_2O_3 (t) e alguns elementos principais e traço do *Ironstone* de Moncorvo. A - SiO_2 e Fe_2O_3 (t). B - Al_2O_3 e Fe_2O_3 (t). C - CaO e Fe_2O_3 (t). D - P_2O_5 e Fe_2O_3 (t). E - Sr e Fe_2O_3 (t). F - REE + Y e Fe_2O_3 (t). G - V e Fe_2O_3 (t). H - Zr e Fe_2O_3 (t). t = total. Adaptado de Urbano (2017).

7. Discussões e Interpretação dos Dados

Em relação à sequência estratigráfica das áreas cartografadas, foram observadas algumas semelhanças e diferenças importantes a serem consideradas para a interpretação do ambiente de sedimentação do ferro.

Os quartzitos do Membro Ermida em Felgueiras, preservados dos processos de alteração metassomática, apresentam quantidades de plagioclase e moscovite menor do que 5% do volume total da rocha, o que classifica o seu protólito como um quartzo-arenito, segundo Pettijohn et al. (1972) (Figura 22). Por outro lado, as lâminas de xistos cinza escuros que ocorrem intercaladas no meio destes quartzo-arenitos apresentam uma quantidade de moscovite e quartzo com comprimento menor do 30 μm , superior a 75 % do volume total da rocha, indicando que seu protólito é um pelito (Figura 22). Em relação a classificação de Herron (1988), observa-se que a amostra de quartzito também é classificada como um quartzo-arenito, enquanto que as amostras de quartzitos com laminações de xistos são classificadas como grauvaque, litoarenito e sublitoarenitos, dependendo da abundância destas lâminas (Figura 20)

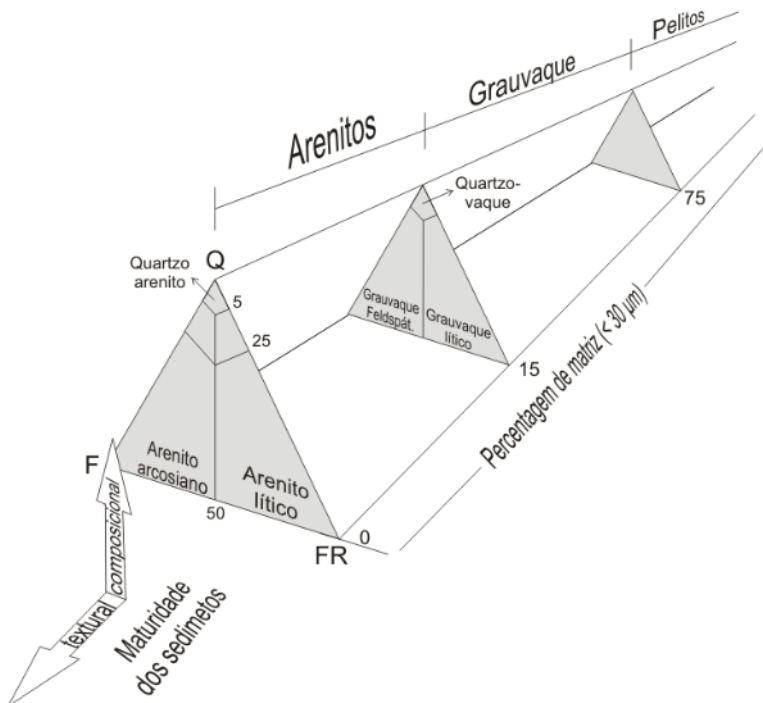


Figura 22: Classificação de arenitos, grauvaques e pelitos em função da quantidade de grãos de quartzo (Q), fragmentos de rocha (FR), feldspato (F) e matriz (<30 μm). Adaptado de Pettijohn et al. (1972).

A maturidade composicional dos quartzos-arenitos é elevada devido à pequena quantidade de feldspato, fragmentos líticos e argila, assim como a sua maturidade textural. Quanto ao grau de arredondamento e à forma dos grãos de quartzo, estes são muito variáveis. Contudo, a presença frequente de minerais pesados com formato esférico e arredondados indica que estas deveriam ser as características dominantes nos grãos de quartzo antes de sofrerem diagênese e metamorfismo. Além disto, o predomínio dos minerais pesados do tipo ultra estáveis (zircão, turmalina e rútilo), em relação aos menos estáveis, é outro indicador de elevada maturidade destes arenitos (Suguio, 1994). Isto indica que os quartzitos do Membro Ermida de Felgueiras apresentam maturidade textural variável entre madura e supermadura (Folk, 1951).

Em relação à sequência detrítica que aflora abaixo das camadas ricas em ferro na região da Mua, observou-se que esta parece ter uma componente pelítica relativamente maior do que em Felgueiras (intercalações de xistos gresosos e quartzitos finos impuros). Embora tenham sido encontrados poucos afloramentos que permitissem uma caracterização litoestratigráfica detalhada, a descrição feita por Sampelayo (1929) sobre a predominância de quartzitos e a presença das icnofácies *Cruziana* e *Skolithos* abaixo dos níveis ricos em ferro na Mua sugere que se trata da mesma unidade estratigráfica presente em Felgueiras, o Membro Ermida.

Desta forma, as características apresentadas em relação ao Membro Ermida nas regiões de Felgueiras e Mua sugerem um ambiente de sedimentação costeiro, do tipo plataforma marinha pouco profunda dominada pela ação de ondas (Johnson & Baldwin, 1986). Contudo, para uma classificação mais precisa do ambiente de sedimentação, como planície de sub ou intermaré, é necessário um levantamento mais rigoroso da distribuição das estruturas sedimentares, maturidade dos sedimentos e icnofácies.

Em direção ao topo da sequência estratigráfica, observam-se nas duas áreas que a transição para a unidade superior (Membro Malhada) ocorre gradualmente através da intercalação cada vez mais frequente de bancadas de quartzitos com ferro a meio da sequência sem ferro. Quanto à sequência rica em ferro em Felgueiras e Mua, ambas apresentam óxidos de ferro e fosfatos, mas diferenciam-se quanto a algumas características sedimentológicas e petrográficas como a presença de filossilicatos de ferro.

Em Felgueiras, a sequência rica em ferro é composta por bancadas centimétricas a decimétricas de quartzitos impuros, xistos gresosos e intercalações de lâminas de quartzitos finos e xistos (Figura 9 - C, D, E). A textura dos grãos de quartzo encontra-se substancialmente modificada por processos

de alteração metassomática/metamórfica, porém observa-se que estes grãos apresentam granulometria variável entre areia fina a muito fina; pontualmente aparecem ocorrências de areia média a muito grosseira. Em relação aos minerais pesados, observou-se a presença bem mais escassa destes grãos em relação aos quartzitos do Membro Ermida. Assim, se considerarmos que os filossilicatos e óxidos de ferro constituem parte da matriz ($<30 \mu\text{m}$) e levando em conta a ausência de feldspatos e fragmentos líticos, o protólito da sequência rica em ferro em Felgueiras irá variar entre um pelito e um quartzoaque rico em ferro, dependendo da proporção dos grãos na fração areia e $< 30 \mu\text{m}$. De acordo com a classificação de Herron (1988), o protólito da maior parte das amostras variará entre arenito e pelito ferruginoso.

Assim, o ambiente de sedimentação desta unidade também deve ter sido uma plataforma marinha, porém um pouco mais profunda pois a energia de transporte terá sido menor para permitir a deposição da matriz silto-argilosa (provavelmente abaixo do nível de base das ondas). Além disto, as estruturas sedimentares preservadas, como laminações plano paralelas, figuras de carga e pseudonódulos, são características de ambientes de sedimentação com energia de transporte relativamente mais baixa e menor grau de retrabalho sedimentar relativamente aos quartzitos puros do Membro Ermida.

Já na Mua, o Membro Malhada é caracterizado petrograficamente por bancadas de quartzitos com seixos (Figura 13 - B e C) e intercalações de níveis centimétricos a decimétricos de metassiltitos finos a xistos cinza claros formados por quartzo, moscovite e fosfatos (Figura 14 - D, E, F). Além da granulometria significativamente maior dos quartzitos com seixos, a presença de fragmentos líticos é um outro indicador de maturidade sedimentar menor do que a observada em Felgueiras (Figura 13 - B). Desta forma, o protólito das rochas ricas em ferro na Mua varia entre um quartzoaque até um grauvaque lítico rico em ferro, dependendo da proporção entre fragmentos líticos e grãos de quartzo (Figura 21). Segundo Folk (1954), deve-se acrescentar o termo “com seixos” devido a presença de 5% a 30% de seixos em relação ao volume total da rocha.

Em relação ao ambiente de deposição da sequência rica em ferro na região da Mua, este deve ter sido uma plataforma marinha com energia de fluxo variando fortemente num período de tempo muito curto para permitir a deposição dos quartzitos ferríferos com seixos intercalados com bancadas de metassiltitos finos a xistos cinza claro com fosfatos. A presença de estratificações entrecruzadas de grande porte nos quartzitos ferríferos com seixos indica momentos de alta energia de transporte, superior ao observado em Felgueiras.

Por outro lado, o processo de sedimentação dos metassiltitos finos e xistos cinza claros está relacionado a deposição de sedimentos muito finos (areia fina, silte e argila) durante períodos de redução drástica da energia do transporte. A granulometria fina e a presença de estrutura interna maciça e laminações plano paralelas sugerem uma deposição por decantação de sedimentos em suspensão ou por transporte abaixo da velocidade crítica para a formação de marcas de ondulação.

Em relação ao transporte do ferro em Moncorvo, parece ser mais provável que o principal mecanismo tenha sido através de nanopartículas ou colóides de oxihidróxidos de ferro férrico do que na forma de grãos detríticos de óxidos de ferro (Orey, 1999; Raiswell, 2011). Inclusive, partículas coloidais de oxihidróxidos de Fe e Mn possuem a capacidade de absorver moléculas inorgânicas/orgânicas devido a sua carga eletrostática superficial (Figura 23). Estas moléculas podem ser compostas por diferentes metais traço, como os ETRs, Ba, Cu, Pb, Zn, Ni, Co e V, e são incorporados na estrutura do óxido de ferro no momento da sua formação, assim como acontece com os nódulos de Fe-Mn no fundo dos oceanos (Koschinsky & Hein, 2017). Isto, por sua vez, explica a elevada concentração destes elementos encontrada nas análises da sequência rica em ferro em Moncorvo (Figura 21 - F e G).

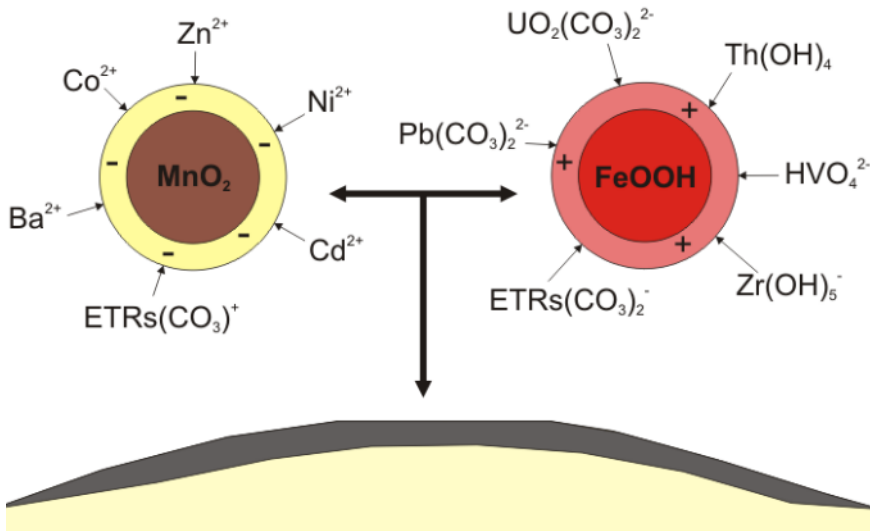


Figura 23: Esquema simplificado do processo de adsorção de metais traço na superfície de partículas de Fe e Mn. Após a precipitação, estes metais entram na estrutura dos óxidos de ferro. Adaptado de Koschinsky & Hein, 2017, *in* Urbano (2017).

Logo após a deposição dos colóides de oxihidróxidos de ferro no leito marinho, iniciou-se o processo de diagênese. Abaixo da interface sedimento/

água, o meio pode tornar-se anóxico devido ao consumo do oxigênio por organismos que decompõem a matéria orgânica presente no meio dos sedimentos, causando a formação de magnetite e apatite (Pufahl, 2010; Taylor & MacQuaker, 2011). Este modelo de diagênese mineral controlado pela ação de micro-organismos parece encaixar-se bem em Moncorvo, especialmente na sequência de Felgueiras, onde se observa uma relação direta entre a concentração de magnetite, apatite e grafite através da intercalação de microlâminas no meio de uma matriz composta essencialmente por magnetite, chamosite e anite. Na Mua, os grãos de lazulite-scorzalite com esfericidade variando de alta a baixa e bem arredondados também podem ter uma origem orgânica (Figura 18 - C).

Retomando a questão da deposição do ferro, a alternância de lâminas, ora ricas em grãos de quartzo, ora ricas em minerais de ferro, tanto em Felgueiras como na Mua e Reboredo, indica, provavelmente, variações na energia do fluxo e/ou suprimento de sedimentos na bacia, na qual, durante períodos de menor energia, as partículas coloidais de ferro seriam depositadas intercaladas aos períodos de maior energia (Figura 9- D e E; Figura 12 - F). Apesar das evidências da origem coloidal do ferro, alguns grãos de magnetite com núcleo de cromite foram identificados em Moncorvo (Orey, 1999; Oliveira, 2015). Orey (1999) atribui uma origem detrítica para estes grãos e, conseqüentemente, para todo o jazigo. Contudo, estes grãos com núcleo de cromite representam somente uma pequena fração dos grãos da sequência rica em ferro na Mua e Reboredo, não podendo ser generalizada a todo o jazigo. Além disso, parece pouco provável que a origem do jazigo de Moncorvo esteja relacionada com a erosão de uma BIF como sugere este autor, pois grãos de magnetite com núcleo de cromite não é algo muito comum nas BIFs.

Em relação aos oólitos, estas estruturas não foram observadas na sequência rica em ferro em Moncorvo. Durante a deposição do ferro provavelmente as condições hidrodinâmicas e a taxa de sedimentação não devem ter sido as mais propícias para a formação desta estrutura.

Após a deposição dos colóides de oxihidróxidos de ferro, a formação dos minerais de ferro dependerá das condições físico-químicas do meio (Pufahl, 2010). A discussão da autigênese/diagênese dos minerais de ferro de Moncorvo será feita em relação aos dois principais conjuntos de minério apresentados na seção 6.2: óxidos e hidróxidos de ferro com moscovite (tipo A) e com clorite (tipo B).

A hematite e a magnetite provavelmente formaram-se inicialmente durante a autigênese / diagênese do jazigo de ferro de Moncorvo (Pufahl, 2010). A

matéria orgânica presente nos sedimentos deve ter sido fundamental para que o meio se tornasse redutor, pois esta seria decomposta por bactérias. Hoje, essa matéria orgânica encontra-se na forma de grafite. Contudo, ainda é necessário explicar o porquê da sequência rica em ferro em Felgueiras possuir uma grande quantidade de chamosite e anite e no Reboredo a moscovite ser predominante. Esta diferença está certamente relacionada ao facto da magnetite se formar em condições de Eh-pH diferentes dos silicatos de ferro (Figura 24). Num meio redutor a hematite é a primeira a formar-se, seguida pela magnetite e depois por filossilicatos de ferro, à medida que este meio se torna mais redutor. Contudo, isto ocorre somente em condições de baixa concentração de S e CO_2 , caso contrário formar-se-ão pirite e siderite (Taylor & Curtis, 1995; Taylor & MacQuaker, 2011). Assim, pode deduzir-se que na região da Mua e Reboredo, as condições de sedimentação eram redutoras, mas não o suficiente para permitir a formação de filossilicatos de ferro como em Felgueiras.

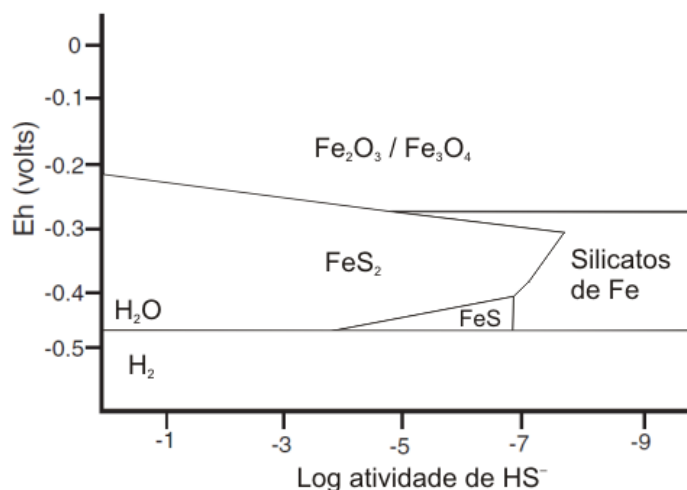


Figura 24: Diagrama de Eh vs atividade de HS^- com os campos de estabilidade de óxidos, silicatos de sulfuretos de ferro. Adaptado de Taylor & Curtis, 1995, in Urbano (2017).

Por outro lado, em Felgueiras ocorreram condições para a formação de magnetite e silicatos de ferro, possivelmente a berthierina. Este mineral é uma fase metaestável que se converte para chamosite quando a temperatura é superior a 100°C (Curtis, 1995; Maynard, 1986). Já em relação à moscovite presente na sequência rica em ferro da Mua e Reboredo, pelo menos parte deste mineral deve ter-se formado a partir da diagénese/metamorfismo da illite (Merriman & Frey, 1999). Desta forma, apesar das rochas presentes

no Sinclínório de Moncorvo terem passado por metamorfismo regional de fácies xisto-verde, a sua mineralogia reflete a composição do seu protólito e as condições físico-químicas do ambiente de sedimentação.

Na verdade, o nível estratigráfico formado por minérios do tipo B no Reboredo, geralmente abaixo dos 100 m de profundidade, indica uma transição das condições físico-químicas do ambiente de sedimentação de sul, Felgueiras, para norte, Mua.

Em relação às sequências estratigráficas relacionadas ao Jazigo de Ferro de Moncorvo, estas são sumarizadas nas colunas apresentadas na Figura 25. Quanto às correlações, observa-se na base das duas colunas a presença de uma sequência arenosa fina caracterizada por estratificações plano paralelas e bioturbações das icnofácies *Skolithos* e *Cruziana*. Acima desta, em todas as áreas, ocorre a sequência rica em ferro caracterizada por quartzoaque. Na Mua, os quartzoaques ricos em ferro apresentam seixos e uma espessura próxima dos 50 metros. No entanto, sondagens realizadas pela Ferrominas E.P. indicam até 110 metros de espessura (Orey & Rebelo, 1983; Catarino, 2009). Por outro lado, em Felgueiras, a espessura média da sequência rica em ferro é de cerca de 15 metros. Em relação à unidade a teto da sequência rica em ferro, Membro Fragas da Ermida, esta só foi observada em Felgueiras e é caracterizada por um aumento da componente pelítica.

Assim, com base nas características descritas anteriormente, é apresentada uma tentativa de correlação entre as colunas estratigráficas destas áreas (Figura 25). É possível observar nas três áreas a transição de uma sequência arenítica fina sem ferro para uma sequência arenítica com ferro, porém, enquanto que em Felgueiras ocorre uma redução da granulometria da base para o topo, o mesmo não ocorre nas outras áreas. Além disso, o facto de não ser observável a unidade acima das sequências ricas em ferro na Mua devido à sua erosão não permite saber que tipo de variação granulométrica ocorre em direção ao topo da sequência. É possível que tenha ocorrido uma redução granulométrica, pois foram observados xistos nos blocos à leste e à oeste separados da Mua por zonas de falha com direção N-S.

Em relação ao ambiente de sedimentação da Formação Marão, as pesquisas anteriores apontam para uma deposição em plataforma marinha costeira dominada pela ação de ondas e associada a um evento transgressivo (Sá, 2005; Sá *et al.*, 2005). Com base nos dados sedimentológicos, petrográficos e geoquímicos (vetores 1 e 2 na figura 21) apresentados para os membros Ermida, Malhada e Fragas da Ermida na região de Moncorvo, é provável que a sedimentação destas unidades tenha ocorrido neste mesmo contexto sedimentar. Assim, o Membro Ermida ter-se-ia depositado num ambiente de plataforma pouco profunda, acima do nível de base das ondas.

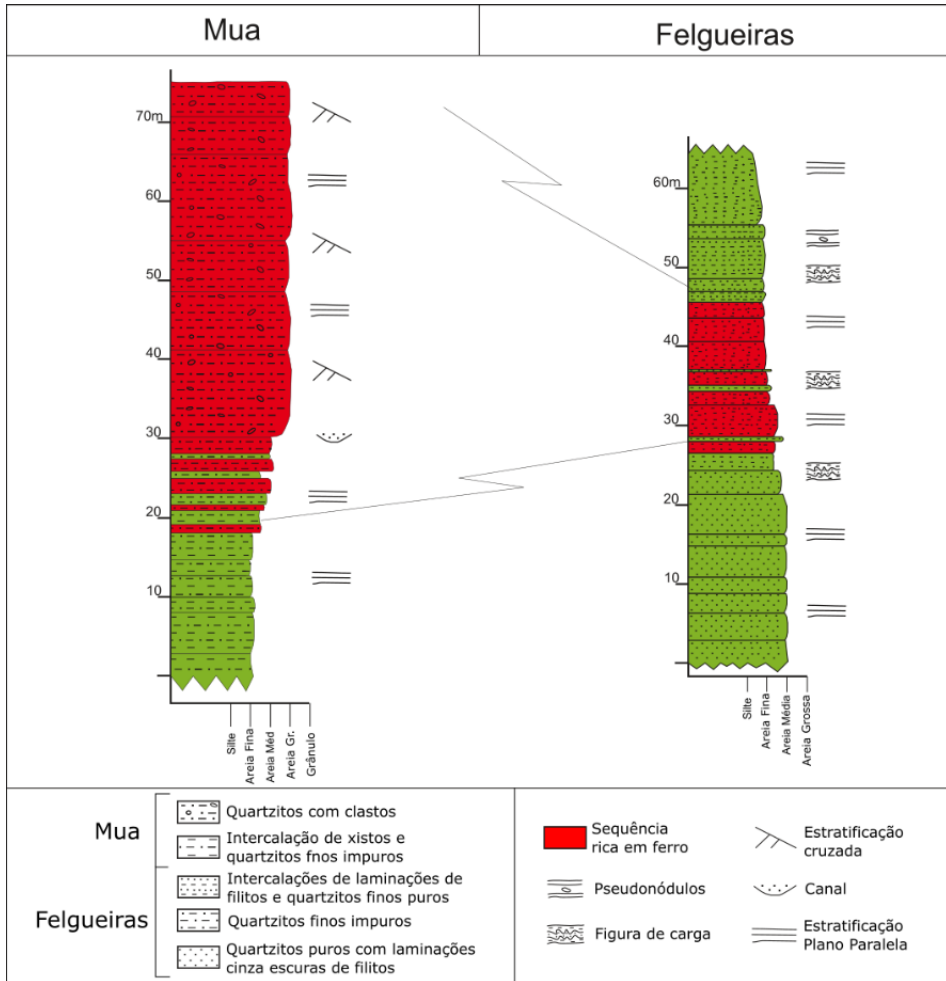


Figura 25: Colunas estratigráficas apresentando a sequência rica em ferro de Moncorvo presente na Mua e Felgueiras (Urbano, 2017).

Em seguida, no início da transgressão marinha, ocorre a sedimentação do Membro Malhada. A sequência rica em ferro em Felgueiras foi depositada numa plataforma marinha em condições mais distais, pois predominam sedimentos com granulometria mais fina (formados por areia média/fina, silte e argila), estratificações plano paralelas e mineralogia formada sob condições anóxicas com Eh mais negativo para permitir a formação de silicatos de ferro.

Já as sequências ricas em ferro da Mua e Reboredo devem ter sido depositadas numa plataforma intermédia, mais próxima da costa, por causa da sua granulometria mais grosseira e estruturas sedimentares de ambiente com

maior energia de transporte. Além disto, na Mua e Reboredo, a bacia de sedimentação deve ter tido uma geometria diferente da de Felgueiras para permitir a acumulação de uma sequência rica em ferro mais espessa (até 120 m), talvez na forma de uma depressão. Já as condições físico-químicas na Mua e Reboredo eram anóxicas, mas não o suficiente para permitir a formação de filossilicatos de ferro, como em Felgueiras. Na Serra do Reboredo, a presença de quartzitos com magnetite e clorite na base da sequência rica em ferro seguida por quartzitos com martite e moscovite no topo (Orey & Rebelo, 1983) sugere uma transição de um meio mais anóxico para um menos anóxico (Figura 26).

Posteriormente, a deposição da sequência rica em ferro chega ao fim e inicia-se a deposição de uma sequência predominantemente pelítica, o Membro Fragas da Ermida. Além da granulometria fina, a presença de icnofácies *Cruziana* e ausência *Skolithos* nesta unidade, pelo menos nas áreas cartografadas, são indicativos de sedimentação em ambiente marinho mais profundo numa costa dominada pela ação de ondas (Johnson & Baldwin, 1986).

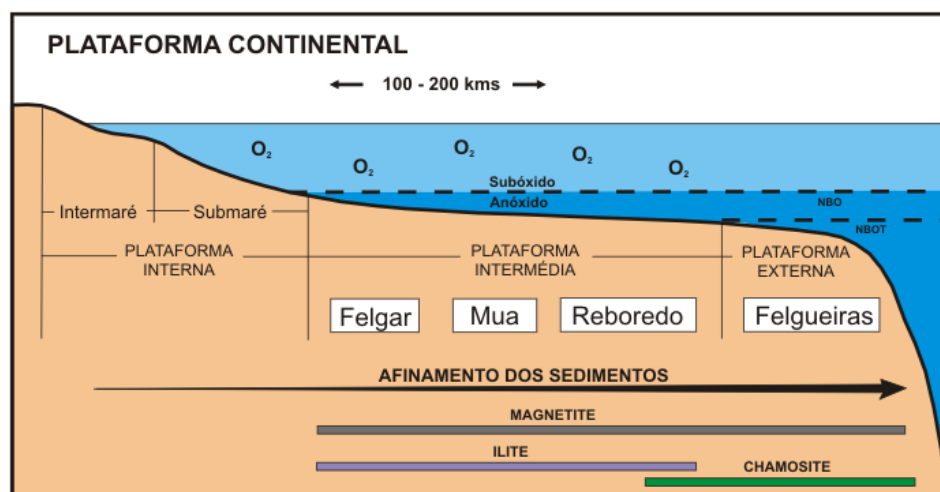


Figura 26: Ambiente de sedimentação da sequência rica em ferro de Moncorvo com as suas diferentes regiões indicadas. Adaptado de Pufahl, 2010, in Urbano (2017).

Por outro lado, Orey (1999) interpreta que a sedimentação do ferro da Formação Marão em Moncorvo tenha ocorrido em lagunas costeiras com influência de deltas. Contudo, não são apresentadas evidências contundentes, como bioturbações exclusivas deste tipo de ambiente (fósseis de plantas, por exemplo). Por outro lado, o modelo de deposição proposto para os *ironstones* arenigianos de Moncorvo numa plataforma marinha no início de uma transgressão encontra-se de acordo com a interpretação da sedimentação de

outros *ironstones* ao longo da plataforma gondwânica durante o Ordovício (Gutiérrez-Marco *et al.*, 1984; Young, 1992; Fernández & Moro, 1998).

A elevada concentração de V em rocha total indica uma possível contribuição de vulcanismo máfico na formação destas rochas (Figura 21 - G). Como referido por Fernández & Moro (1998), esta contribuição poderia ser através de vulcanismo submarino ou do intemperismo e erosão de rochas desta natureza no continente. Na região de Eucísia, próximo de Moncorvo, ocorrem rochas vulcânicas básicas interestratificadas com a sequência sedimentar de Arenigiano inferior-médio (Formação Eucísia), um pouco mais antigas do que a Formação Marão (Sá, 2005; Sá *et al.*, 2005).

8. Conclusões

Após a apresentação, discussão e interpretação das informações relativas ao Jazigo de Ferro de Moncorvo, é possível tirar as seguintes conclusões:

- Existem fortes evidências de que a sequência rica em ferro arenigiana no Sinclínório de Moncorvo tenha sido depositada numa plataforma marinha durante uma transgressão.
- A principal forma de transporte do ferro da zona fonte até o local de deposição deve ter sido na forma de partículas coloidais de oxihidróxidos de ferro férrico.
- A principal fonte do ferro do jazigo de Moncorvo foi o continente, porém é possível que tenha havido alguma contribuição de vulcanismo na formação do jazigo, o qual pode ter sido direta ou indiretamente.
- Apesar dos efeitos do metamorfismo, a diferença observada entre os minerais portadores do ferro presentes na sequência rica em ferro no flanco sul e flanco norte do Sinclínório de Moncorvo deve-se essencialmente às condições físico-químicas do ambiente de sedimentação.
- É provável que micro-organismos tenham contribuído para a formação de um ambiente anóxico no local de deposição dos colóides de ferro através da decomposição da matéria orgânica presente nos sedimentos.
- Os minerais de ferro formados no momento da deposição ou durante a diagénese em Felgueiras devem ter sido a berthierina, chamosite e magnetite, enquanto que na Mua e Reboredo deve ter sido a hematite ou magnetite.
- O principal fosfato formado durante a deposição do ferro em Felgueiras foi a apatite, enquanto que na Mua ter-se-ão formado fosfatos de Fe e ETRs.

- A primeira fase de deformação da Orogenia Varisca foi a principal evento a produzir o dobramento, quer no flanco sul quer no flanco norte do Sinclinório de Moncorvo.
- A partição da primeira fase de deformação varisca (D_1) foi responsável pela formação da xistosidade penetrativa no flanco sul da Mua, além da formação de porfiroclastos, lineação mineral e estiramento de elementos que compõe a estratificação, como os nódulos cinza claros e seixos.
- O Sinclinório de Moncorvo foi afetado principalmente pelo metamorfismo regional na fácies dos xistos verdes, até à zona da biotite. Na região da Mua e Reboredo, a intrusão do granito Carviçais causou o metamorfismo de contato na sequência rica em ferro.

9. Considerações finais

Ao longo do último século uma série de trabalhos mineiros foram realizados pelas empresas que passaram pelo Jazigo de Moncorvo a fim de se avaliar a viabilidade técnica e económica para a sua exploração. Apesar disso, pouco foi deixado na forma de registos sistemáticos para consulta pública ou privada para a reavaliação dos dados técnicos e resultados. Poucos estudos técnicos científicos foram publicados até hoje, sendo que o mais completo e abrangente destes é de Orey & Rebelo (1983), feito com base em relatórios internos da Ferrominas E.P. Neste estudo, os autores apontam para a existência de reservas certas e prováveis na ordem de 550 Mt com um teor médio de 36% de Fe e 0.5% de P, podendo chegar a 1000 Mt. Mais recentemente, trabalhos de prospeção no alvo de Felgueiras-Canada mostram que o potencial económico de Moncorvo ainda não é totalmente conhecido. Características como a massa total, o teor de Fe e a espessura das camadas de minério, são importantes do ponto de vista económico e científico, uma vez que são poucos os depósitos do tipo *ironstones* Fanerozoicos que chegam a atingir tais dimensões. É vasta a literatura, bem como são numerosos os trabalhos de investigação e prospeção feitos no jazigo de Moncorvo ao longo do tempo. O Museu do Ferro & da Região de Moncorvo é uma espécie de Centro Interpretativo da região, que permite ao visitante ter uma ideia clara sobre a exploração do minério, ao longo do tempo. Nos últimos anos muito se tem noticiado sobre a possível reabertura das minas de Moncorvo na zona do Reboredo e do Cabeço da Mua.

O Jazigo de Moncorvo constitui uma importante reserva de minério de ferro que poderá ser explorada no futuro. A viabilidade da exploração de uma mina é uma questão extremamente complexa que depende de fatores eco-

nómicos, políticos, sociais, ambientais e técnicos. Do ponto de vista técnico, o principal desafio que ainda persiste é a separação e remoção do fósforo do minério de ferro de Moncorvo, que ainda não é possível realizar-se de forma economicamente viável. Porém o desenvolvimento de novos processos de concentração mais eficientes e o aproveitamento de sub-produtos, como o Fósforo e os elementos do grupo das terras raras, poderão viabilizar, eventualmente num futuro próximo, a exploração do ferro de Moncorvo (Figueiras *et al.*, 2015; Ofoegbu, 2019).

Bibliografia

- Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapez B., Hofmann A., Konhauser K. O., Rouxel O. J. (2010). Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes. *Economic Geology*, 105: 467-508.
- Carrington da Costa, J. S. (1950). Notícia sobre a carta geológica do Buçaco, de Nery Delgado. *Publ. Especial, Serv Geológicos de Portugal*, Lisboa, 1-27.
- Catarino B. (2009) - Modelação tridimensional de uma jazida mineral prospectada por sondagens e objectivando a sua exploração a céu aberto. *Dissertação de mestrado*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, p. 84.
- Clout J. & Manuel J. R. (2015). Mineralogical, chemical, and physical characteristics of iron ore. In: *Iron Ore - Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, p. 45 a 84.
- Clout, P.E. (1973). Paleocological significance of the banded iron-formation. *Economic Geology* 68, 1135-1143.
- Clout J. M. F. & Simonson B. M. (2005). Precambrian Iron Formations and Iron Formation-Hosted Iron Ore Deposits. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 643-679.
- Cocks, L. R. M., (2000). The Early Palaeozoic geography of Europe. *The Journal Geol. Society, London*, 157, 1-10.
- Curtis C. D. (1985) - Clay mineral precipitation and transformation during burial diagenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, volume 315, p. 91-105.
- Custódio J. (2009) - O Ferro como Património Industrial de Moncorvo: História, Mineração e Indústria. In: Sousa F. (coord.), Moncorvo, da Tradição à Modernidade. CEPESE: Centro de Estudos da População, Economia e Sociedade, Porto, p. 1-374.
- Dias, R. (1986). Estudo de um sector do autóctone de Trás-os-Montes Oriental e ENE de Torre de Moncorvo. *Dissertação de Mestrado*. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 1-153.
- Dias, R. & Ribeiro, A. (1995). The Ibero-Armorican Arc: a collision effect against an irregular continent? *Tectonophysics*, 246, 113-128.
- Erten B. & Ocampo J. A. (2012) - Super-cycles of commodity prices since the mid-nineteenth century. DESA Working Paper N° 110, p. 1-29.

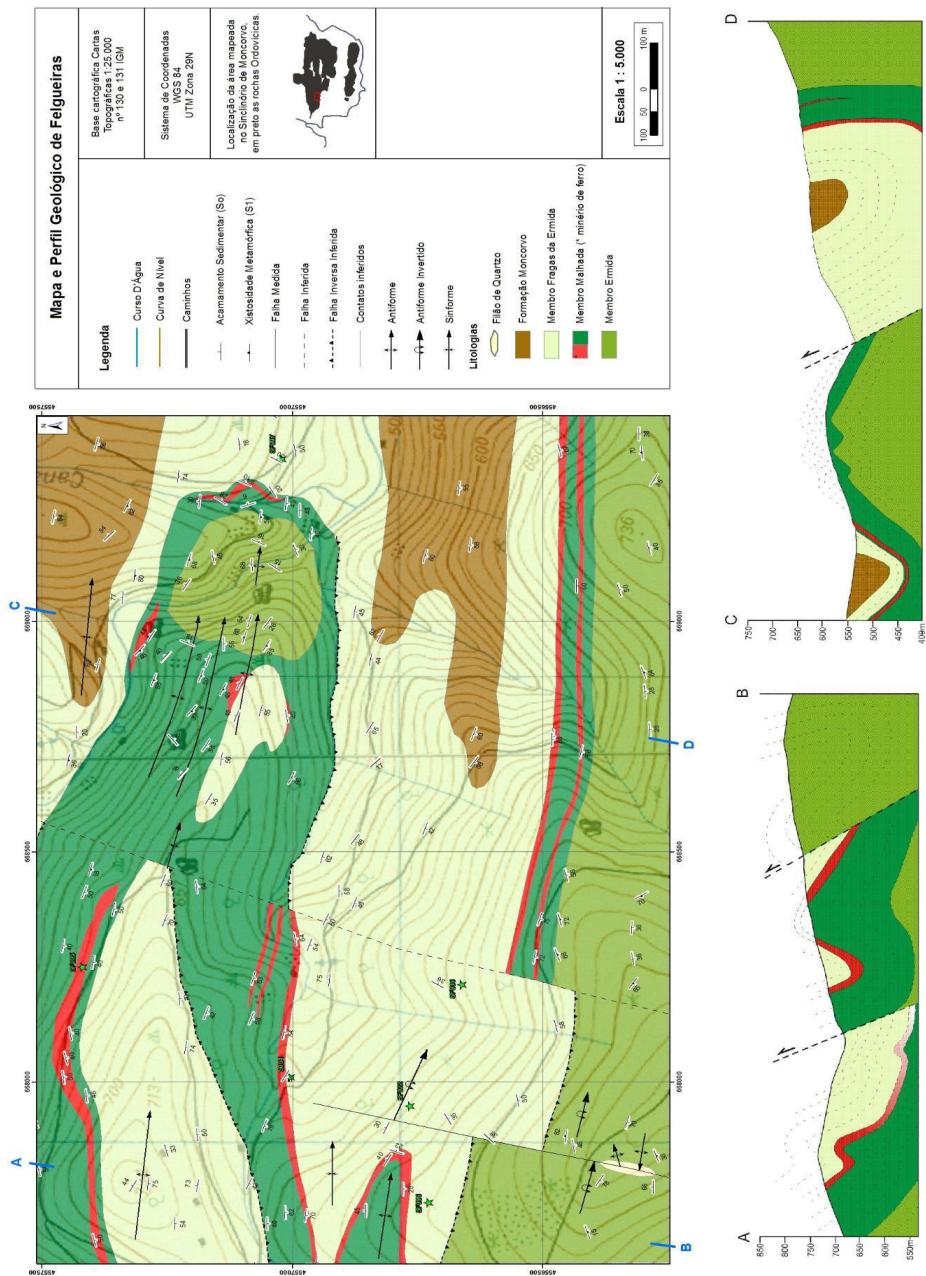
- Fernández A. & Moro M. C. (1998) - Origin and depositional environment of Ordovician stratiform iron mineralization from Zamora (NW Iberian Peninsula). *Mineralium Deposita*, volume 33, p. 606-619.
- Figueiras, J.; Mateus, A.; Rodrigues, P.; Oliveira, M.; Ribeiro, P.; Meira, J.; Sobreiro, S. (2015). Phosphate phases in the Moncorvo iron ores; consequences to the mineral resource characterization and its economic assessment. Livro de Resumos do X Congresso Ibérico de Geoquímica/XVIII Semana de Geoquímica, Editor: LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 76-79.
- Folk R. (1951) - Stages of textural maturity on sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, volume 21, p. 127-130.
- Gutiérrez-Marco J. C., Lunar R., Amoros J. L. (1984) - Los depositos de hierro oolítico en el ordovícico de España, significado paleogeográfico. I Congreso Español de Geología. Tomo II, p. 501-525.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Robardet, M. & Piçarra, J.M. (1998). Silurian Stratigraphy and Paleogeography of the Iberian Peninsula (Spain and Portugal). Proceedings 6th Int. Graptolite Conference (GWG-IPA) & 1998 Field Meeting, IUGS Sub-commission on Silurian Stratigraphy (J.C. Gutiérrez-Marco & I. Rábano, eds.). Temas Geológico-Mineros ITGE, vol. 23, Madrid, 13-44.
- Gutiérrez-Marco, J.C., Robardet, M., Rábano, I., Sarmiento, G.N., Lancha, M.A.S.J., Araújo, P.H. & Pieren Pidal, A.P. (2002). Ordovician. In: Gibbons, W. & Moreno, M.T. (Eds.): The Geology of Spain. Geological Society, London, 31-49.
- Hamann, W., Robardet, M., Romano, M., Gil Cid, M.D., Gutiérrez-Marco, J.C., Herranz, P., Marcos, A., Martín, J., Peláez, J.R., Pérez Estaún, A., Prieto, M., Rábano, I., San José, M.A. de, Truyóls, J., Vegas, R., Vilas, L., Villas, E., Villena, J. (1982). The Ordovician System in southwestern Europe (France, Spain and Portugal). IUGS Publ. 11, 1-47.
- Heggie, D.T., Skyring, G.W., O'Brien, G.W., Reimers, C., Herczeg, A., Moriarty, J.W., Burnett, W.C. and Milnes, A.R., (1990). Organic carbon cycling and modern phosphorite formation on the East Australian continental margin: an overview, in Notholt, A.J.G. and Jarvis, I., eds., Phosphorite Research and Development: Geological Society of London, Special Publication 52, p. 87- 117. An important contribution to understanding phosphogenesis in nonupwelling environments.
- Herron M. M. (1988) - Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, volume 58, p. 820-829.
- Hoffman P. F., Kaufman A. J., Halverson G. P., Schrag D. P. (1998). A Neoproterozoic snowball Earth: *Science*, v. 281, p. 1342–1346.
- Holland H. D. (2002). Volcanic gases, black smokers, and the Great Oxidation Event. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 21, 3811–3826.
- Holland H. D. (2006). The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 361, 903–915.
- Johnson H. D. & Baldwin C. T. (1986) - Shallow Siliciclastic Seas. In: Reading H. G. (Eds). Sedimentary Environments and Facies. Blackwell Scientific Publications, p. 1- 591.

- Julivert, M., Fontbote J. M., Ribeiro A., Conde L. (1972) - Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares, 1:1.000.000, Inst. Geol. Min. España.
- Julivert, M., Fontbote, J., Ribeiro, A. & Conde, N. (1974). Memoria explicativa del Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares a escala 1:1 000 000. – Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Spain, 133 p.
- Lotze, F. (1956). Über sardischen Bewegungen in Spanien und ihre Beziehungen zur assyrischen Faltung. *Geotekt Symp. zu Ehren Hans Stille*, 129-139.
- Kasting, J.F. (2001). The rise of atmospheric oxygen. *Science*, 293, 819-820.
- Kasting, J.F. (2004). When methane made climate. *Scientific American*, 291, 78-85.
- Kasting, J.F. & Catling, D. (2003). Evolution of a habitable planet. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41, 429-463.
- Klein C., & Ladeira E. A., (2004). Geochemistry and mineralogy of Neoproterozoic banded iron-formations and some selected, siliceous manganese formations from the Urucum district, Mato Grosso do Sul, Brazil: *Economic Geology*, volume 99, p. 1233–1244.
- Konhauser, K.O., Hamade, T., Raiswell, R., Morris, R.C., Ferris, F.G., Southam, G., and Canfield, D.E. (2002). Could bacteria have formed the Precambrian banded iron-formations? *Geology*, 30, 1079-1082.
- Konhauser, K.O., Lalonde, S.V., Amskold, L., and Holland, H.D., (2007). Was there really an Archean phosphate crisis?: *Science*, v. 315, p. 1234.
- Koschinsky A. & Hein J. R. (2017) - Marine Ferromanganese Encrustations: Archives of Changing Oceans. *Elements*, volume 13, p.177-182.
- Le Heron D. P., Busfield M. E., Le Ber E, Kamona A. F. (2013). Neoproterozoic ironstones in northern Namibia: Biogenic precipitation and Cryogenian glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, volume 369, p. 48-57.
- James H. L. (1954). Sedimentary Facies of Iron Formation. *Econ. Geol.*, 49 (3): 235-293.
- Klein C. (2005). Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geological setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry and origin. *American Mineralogist*, 90: 1473-1499.
- Mateus, A.; Figueiras, J.; Oliveira, M.; Ribeiro, P.; Meira, J.; Sobreiro, S.; Rodrigues, P. (2015). The Moncorvo iron ores revisited. Livro de Resumos do X Congresso Ibérico de Geoquímica/XVIII Semana de Geoquímica, Editor: LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 104-107.
- Mateus A., Figueiras J., Oliveira M., Ribeiro P., Meira J., Sobreiro S., Rodrigues P. (2015) Novas perspectivas sobre os minérios de ferro de Moncorvo. Livro de Resumos do X Congresso Ibérico de Geoquímica/XVIII Semana de Geoquímica, Portugal, p. 104-107.
- Maynard J. B. (1986) Geochemistry of oolitic iron ores, an electron microprobe study. *Economic Geology*, volume 81, p. 1473-1483.
- Meireles, C.A.P. (2013). *Litoestratigrafia do Paleozoico do sector a nordeste de Bragança (Trás-os-Montes) - Serie Nova Terra*, nº 42. Instituto Universitário de Geologia “Isidro Parga Pondal”, Univ. Coruña, 471pp, 5 Anexos, 1 mapa geol.
- Merriman R. J. & Frey M. (1999) - *Pattern of very low grade metamorphism in metapelitic rocks*. In: Frey M. & Robinson D. (Eds) *Low-grade metamorphism*. Oxford, Blackwell Science, p. 61-107.

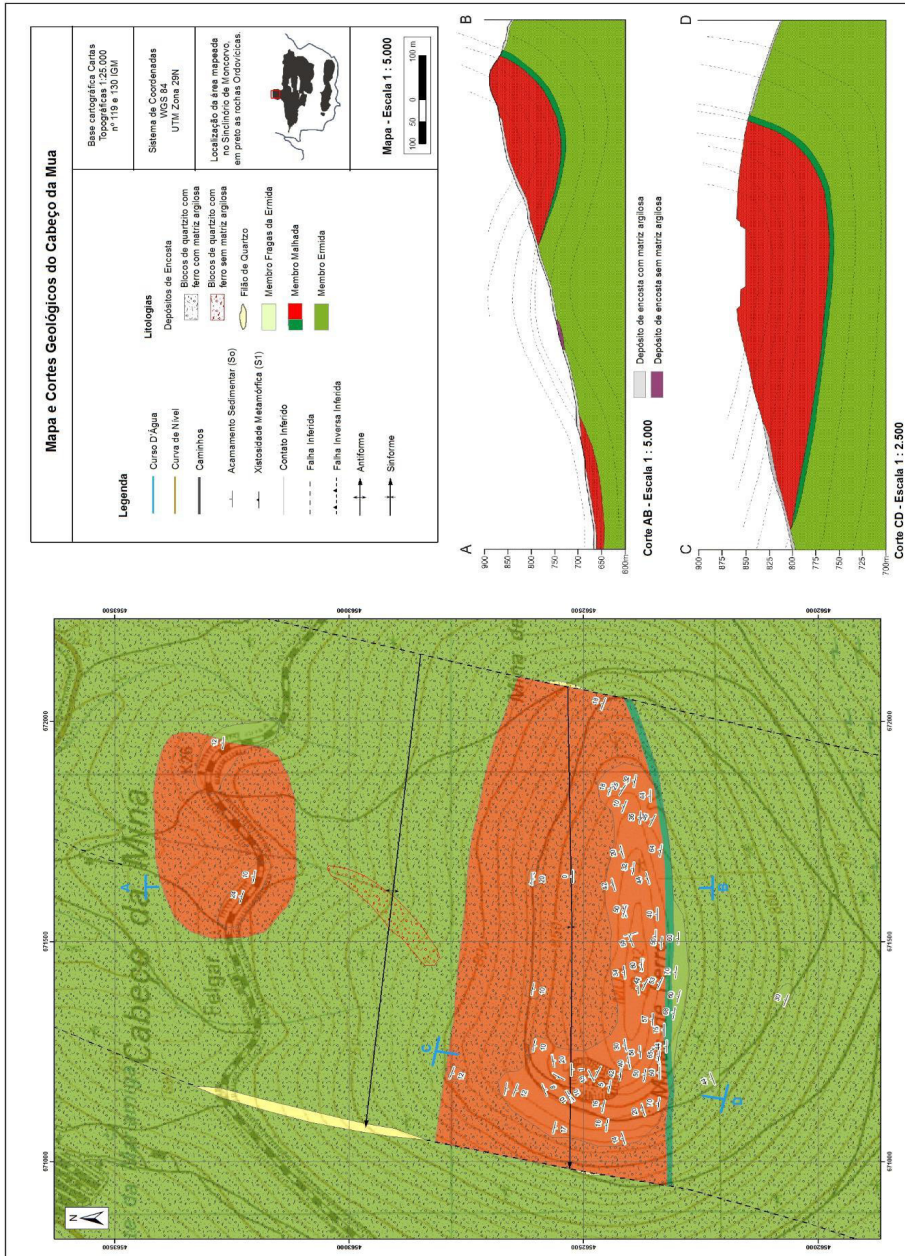
- Morgan, J. W.; Anders E. (1980). Chemical composition of Earth, Venus, and Mercury. *Geophysics*, vol. 77, n. 12, p. 6973-6977.
- Mucke, A. & Farshad, F. (2005). Whole-rock and mineralogical composition of Phanerozoic ooidal ironstones: Comparison and differentiation of types and subtypes. *Ore Geology Reviews*, 26, 227–262.
- Neiva, J. M. C. (1949). Geologia dos minérios de ferro portugueses – Seu interesse para a siderurgia. *Memórias e Notícias do Museu e Lab. Min. e Geol. da Universidade de Coimbra*, n° 26.
- Ofoegbu, S. U. (2019). Technological Challenges of Phosphorus Removal in High-Phosphorus Ores: Sustainability Implications and Possibilities for Greener Ore Processing. *Sustainability*, 11, 6787, doi:10.3390/su11236787
- Oliveira, M. F. B. (2015). Controlos lito-estratigráficos, mineralógicos e geoquímicos da jazida de ferro da Carvalhosa (Serra de Reboredo, Torre de Moncorvo). Mestrado em Geol. Económica, Universidade de Lisboa, 1-203.
- Orey, F. L. C. (1979). Report on the Mineralogy of Samples of Split cores Obtained from Boreholes Drilled at Pedrada and Reboredo Sections, Moncorvo Iron Ore Deposit, Northern Portugal. Ferrominas E.P., relatório interno, 1-89.
- Orey, F. L. C. & Rebelo, J. L. A. (1983). The nature of the refractory iron ores at Moncorvo, northeastern Portugal. Special Publication, *Geological Society of South Africa*, 7, 253-260.
- Orey, F. L. C. (1999). The Detrital Origin of the Moncorvo Ordovician Ironstones. *Ciências da Terra (UNL)*, 13, 131-140.
- Paris, F. & Robardet, M. (1990). Early Palaeozoic palaeobiogeography of the Variscan regions. *Tectonophysics*, 177, 193-213.
- Pereira E. S. (1987) - Estudo geológico - estrutural da região de Celorico de Basto e a sua interpretação geodinâmica. *Tese de Doutoramento*, Fac. Ciências Univ. Lisboa, p. 274.
- Pereira, E., Rodriguez, J., Ribeiro, A., Dias, R., Rebelo, J. A., Silva, A. F. (2014). Notícia Explicativa da Folha 11-D (Carviçais) da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Lab. Nac. de Energia e Geol., Lisboa, 1-62.
- Petranek J. & Van Houten F.B., (1997). Phanerozoic ooidal ironstones. *Czech Geological Survey Special Papers* 7, p. 1-71.
- Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R. (1972) - Sand and Sandstone. Springer Verlag, p. 1-618.
- Pufahl, P.K., (2010). Bioelemental sediments. In: James, N.P., Dalrymple, R.W. (Eds.), Facies Models 4. *Geological Association of Canada*, St. John's, pp. 477–503.
- Raiswell R. (2011) - Iron Transport from the Continents to the Open Ocean: The Aging-Rejuvenation Cycle. *Elements*, volume 7, p. 101-106.
- Rebelo, J. A. & Ribeiro, A. R., (1977). Relatório preliminar sobre a geologia do jazigo de ferro de Moncorvo. Serviços Geológicos de Portugal, relatório interno, 1-95.
- Rebelo J. A. & Romano M. (1986). A Contribution to the Lithostratigraphy and Palaeontology of the Lower Palaeozoic Rocks of the Moncorvo Region, Northeast Portugal. *Comun. Serv. Geol. Portugal*, 1986, t. 72, fasc. 1/2, pp. 45-57.
- Ribeiro A. (1974) - Contribution à l'étude Tectonique de Trás-os-Montes Oriental. Serv. Geol. Portugal, Mem. n° 24 (Nova Série), Lisboa, p. 168.

- Ribeiro, A. & Rebelo, J. (1971). Estudo geológico da região de Moncorvo e em especial, do seu jazigo de ferro. I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Econômica, 983-990.
- Sá, A.A. (2005). *Bioestratigrafia do Ordovício do nordeste de Portugal*. Tese de doutoramento (n. publ.). UTAD, 571 p.
- Sá, A. A., Meireles, C., Coke, C., Gutiérrez-Marco, J. C. (2005). Unidades Litoestratigráficas do Ordovício da região de Trás-os-Montes (Zona Centro-Ibérica, Portugal). *Comunicações Geológicas*, I.N.E.T.I., t. 92, 31-74.
- Sampelayo P. H. (1929) - Criadero del mineral de hierro de Moncorvo (Portugal). *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, volume 2, p. 3-86.
- Siehl, A., Thein, J. (1989). Minette-type ironstones. In: Young, T.P, Taylor, W.E.G. (Eds.), Phanerozoic Ironstones. *Geological Society, Special Publication*, vol. 46, pp. 175– 193.
- Sousa, M. B. (1982). Litostratigrafia e estrutura do “Complexo xisto-grauváquico ante-ordovícico” - grupo do Douro (Nordeste de Portugal): estudo no sector geográfico de Pinhão-S.João da Pesqueira-Tabuaço-Paredes da Beira. Tese de Doutoramento (n. publ.), Univ. Coimbra, 222 p.
- Suguio K. (1994) - Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância económica. Edgard Blücher LTDA, p. 1-500.
- Taylor K. G. & Curtis C. D. (1995) - Stability and facies association of early diagenetic mineral assemblages; an example from a Jurassic ironstone-mudstone succession. U.K. *Journal of Sedimentary Research*, volume 65, p. 358-368.
- Taylor K. G. & MacQuaker J. H. (2011) - *Iron Minerals in Marine Sediments Record Chemical Environments*. Elements, volume 7, p. 113-118.
- Urbano, E. E. M. C., Meireles, C. A. P., Gomes, M. E. P., Figueiredo, N., Botelho, S., Brandão, P. R. G. (2015). Estudo petrográfico comparativo entre os minérios de ferro do flanco norte e do flanco sul do Sinclinal Moncorvo. Livro de resumos VIII Seminário de Recursos Geológicos, Ordenamento do Território e Ambiente, UTAD, Vila Real, Portugal.
- Urbano, E. E. M. C. (2017). “Gênese do jazigo de Ferro de Moncorvo e avaliação do uso de equipamentos portáteis de FRX e DRX para a exploração mineral deste tipo de jazigos” Tese de doutoramento (n. publ.), UTAD, 342 pp. + 2 Anexos
- USGS (2017) - Global iron ore production data; Classification of reporting from the USGS. *Mining Engineering*, p. 20-23.
- Van Houten F. B. & Arthur M. A. (1989). Temporal patterns among Phanerozoic oolitic ironstones and oceanic anoxia. *Geological Society, London, Special Publications*, volume 46, p. 33-49.
- Yeo G.M. (1981). The Late Proterozoic Rapitan glaciation in the northern Cordillera: *Geological Survey of Canada Paper* 81-10, p. 25–46.
- Young T. P. (1989). Phanerozoic Ironstones: an Introduction and Review. *Geological Society, London, Special Publications*, volume 46, p. IX-XXXV.
- Young T. P. (1992) - Ooidal ironstones from Ordovician Gondwana: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, volume 99, p. 321-347.

Anexo 1: Mapa e perfis geológicos da região de Felgueiras (Urbano, 2017).



Anexo 2: Mapa e perfis geológicos da região da Mua (Urbano, 2017).



8 capítulo

Notas sobre as principais rochas ornamentais do nordeste de Portugal

Luís Sousa

Departamento de Geologia e Centro de Geociências, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Email lsousa@utad.pt

Resumo

No nordeste de Portugal localizam-se alguns dos principais núcleos de pedreiras de rocha ornamental, com predomínio dos granitos. Neste trabalho apresentam-se os principais fatores que condicionam a exploração de rochas ornamentais. Os principais núcleos extrativos, granito de Pedras Salgadas, granito de Mondim de Basto, granito Amarelo Real e xisto de Vila Nova de Foz-Côa, são caracterizados de forma sucinta, com menção das potencialidades e constrangimentos. Como desenvolvimentos futuros referem-se a importância do ordenamento do território no desenvolvimento sustentado das zonas extrativas e as vantagens da modelação da fraturação natural na maximização do rendimento das pedreiras.

1. Introdução

Certos produtos naturais, embora disponíveis na crosta terrestre, não apresentam uma distribuição homogénea, estando antes concentrados em locais determinados pelo condicionalismo geológico. Tal facto leva a que os denominados recursos geológicos se afirmem como importantes para o desenvolvimento económico das nações.

Há milénios que utilizamos os materiais geológicos nas mais variadas situações, desde a construção de abrigos rudimentares formados apenas pela sobreposição de toscos fragmentos de rocha até aos sofisticados aparelhos eletrónicos que permitem enviar missões a outros planetas ou à mera utilização dos telefones móveis. A capacidade de utilizar os materiais geológicos é uma medida do grau de desenvolvimento tecnológico das sociedades e dos países.

O setor das rochas ornamentais em Portugal é, desde há muitas décadas, um dos mais dinâmicos, encontrando-se entre os dez mais importantes a nível

mundial, apesar das constantes mudanças no *ranking* em virtude de existirem países com estádios de desenvolvimento diferentes (ANIET, 2017). Em 2017 o valor da produção das rochas ornamentais em Portugal foi de $179,6 \times 10^6 \text{€}$, $46,9 \times 10^6 \text{€}$ dos quais relativos a granitos (DGEG, 2018). No mesmo ano as exportações de rocha ornamental totalizaram $386 \times 10^6 \text{€}$, na sua maioria constituídas por mármore e calcário. As projeções apontam para a continuação do crescimento acelerado deste setor (Fig. 1), sendo importante que as empresas nacionais e as entidades com responsabilidade partilhem esforços para manter Portugal como um dos países de topo neste setor.

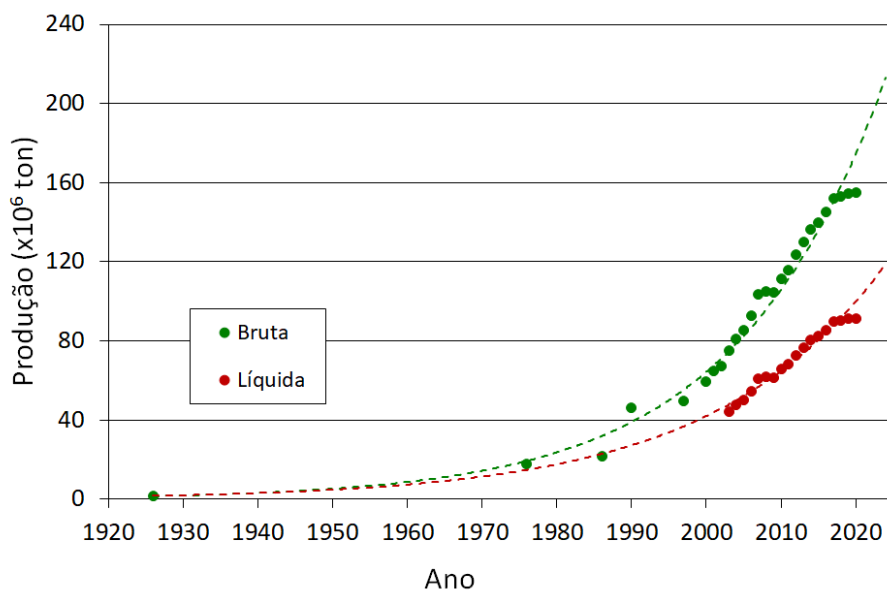


Figura 1: Estimativa da produção bruta e líquida de rocha ornamental (baseado em Montani, 2017; 2021).

No norte do país localiza-se a maior percentagem de empresas do setor das rochas ornamentais, sobretudo associadas à extração e transformação de granito, um reflexo da predominância dos afloramentos graníticos e da existência de núcleos tradicionais de extração. Nos últimos anos não se verificou uma alteração significativa do número de unidades extrativas, assim em 2017 encontravam-se em atividade 337 pedreiras de rocha ornamental em Portugal, 111 de granito (DGEG, 2018), na sua maioria localizadas no norte do país. De um modo geral, os núcleos principais de extração resultam da evolução das pequenas pedreiras que começaram a sua industrialização na segunda metade do século passado. Em muitos locais há evidências de

pequenas pedreiras artesanais (Fig. 2) que alimentavam as necessidades das povoações vizinhas.

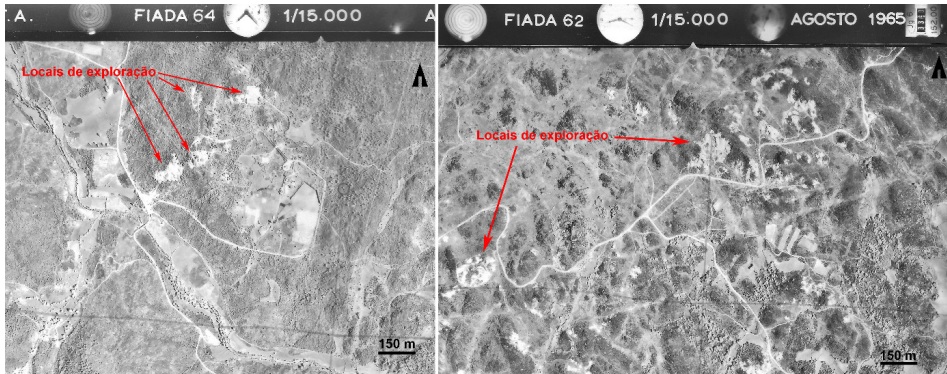


Figura 2: Fotografias aéreas obtidas em 1965 onde é possível observar locais de extração de granito (esquerda - Pedras Salgadas, Vila Pouca de Aguiar; direita - S. Bento, Vila Real).

A geologia do nordeste de Portugal é muito variada, com diferentes tipos de rochas com características suscetíveis de serem utilizados como rocha ornamental. A identificação e delimitação das zonas favoráveis para a extração de rocha ornamental requerem a avaliação dos fatores que influenciam o valor do material que se pretende obter. A indústria das rochas ornamentais necessita de blocos de grande volume de material tão homogêneo quanto possível, considerando as naturais variações das rochas, pelo que a fraturação é um fator limitante. No entanto, há um conjunto vasto de fatores que importa considerar, uns relacionados com as propriedades da rocha, outros relacionados com as características do jazigo e ainda os fatores de explorabilidade (Tabela 1). A importância de cada um dos fatores varia consoante o local, o tipo de rocha em causa e até ao longo do tempo de acordo com o mercado, mas todos eles devem ser equacionados sempre que se pretenda avaliar o potencial de uma zona/rocha (Carvalho *et al.*, 2008; Sousa, 2012).

Tabela 1: Fatores que condicionam a exploração de rochas ornamentais (adaptado de Muñoz de la Nava *et al.* (1989), Sousa (2000, 2012)).

Propriedades da rocha	Alterabilidade	Deterioração atual Deterioração potencial Oxidações Sulfuretos
	Propriedades físico-mecânicas	Absorção de água Peso específico Resistência à compressão Resistência à flexão Resistência ao desgaste etc.
Propriedades do jazigo	Acessibilidade	Topografia Tipo de acessos Distância aos centros consumidores
	Qualidade do afloramento	Alteração Terrenos de cobertura Estéril Morfologia
	Homogeneidade	Heterogeneidades texturais e cromáticas (mulas, fitas, gravatas, etc.) Cor Textura Dimensão do grão Variações de fácies Oxidações Orientações (levante, correr e contra)
	Fraturação do jazigo	Famílias de diaclases Disposição relativa Densidade de fraturação Corredores de fraturação
Fatores de Explorabilidade	Aceitação no mercado Reservas Impacte ambiental Frentes potenciais Infra-estruturas industriais Presença de pedreiras ou minas Ordenamento do território Disponibilidade de zonas	

As características texturais e a cor são os principais fatores que determinam a procura de uma determinada rocha para fins ornamentais. Por exemplo, as qualidades estéticas de um granito dependem da sua composição, das dimensões dos seus minerais e do respetivo arranjo, e a respetiva valorização varia ao longo do tempo em função da procura. Heterogeneidades naturais tais como encraves biotíticos e de rochas mais básicas (mulas), *schlierens* biotíticos (gravatas), filões de aplitos, pegmatitos ou aplitopegmatitos (fitas) e concentrações de megacristais em granitos porfíroides (Fig. 3), são considerados defeitos da rocha e penalizam grandemente a sua aceitação no mercado e, por conseguinte, o seu valor comercial. Estas heterogeneidades estão sempre presentes em todas as rochas mas apenas são penalizantes quando são muito frequentes e obrigam a rejeitar blocos ou peças já transformadas.



Figura 3: Exemplos de heterogeneidades que diminuem o valor comercial do granito (em cima: concentrações biotíticas; em baixo à esquerda: filão aplitico; em baixo à esquerda: variação de cor).

Os condicionalismos atrás referidos não são os únicos que devemos considerar, havendo outros que estão mais ligados à qualidade do jazigo, como a acessibilidade e qualidade dos afloramentos em termos de morfologia e terrenos de cobertura. A viabilidade da exploração também deverá ser equacionada, devendo-se para isso atender a fatores tais como as reservas, as

infra-estruturas industriais e o impacte ambiental que a exploração causará (Moreira, 1995; Sousa, 2000; Selonen *et al.*, 2000). As questões relacionadas com o ordenamento do território assumem cada vez mais um papel preponderante, e como tal devem ser consideradas antes de qualquer estudo de prospeção, pois de nada vale identificar uma zona com excelentes qualidades (rocha, fraturação, acessos, etc.) se a instalação de unidades extrativas não for legalmente possível.

Assim, só uma parte dos recursos geológicos podem ser explorados, constituindo as designadas reservas. Por exemplo, quando se pretende extrair granito para a construção de uma habitação apenas se procuram as zonas do maciço que melhor sirvam o fim em vista. O maciço como um todo é considerado um recurso (tudo que é passível de ser utilizado), mas apenas os locais de exploração (extração com rendimento) constituem a reserva (Fig. 4).

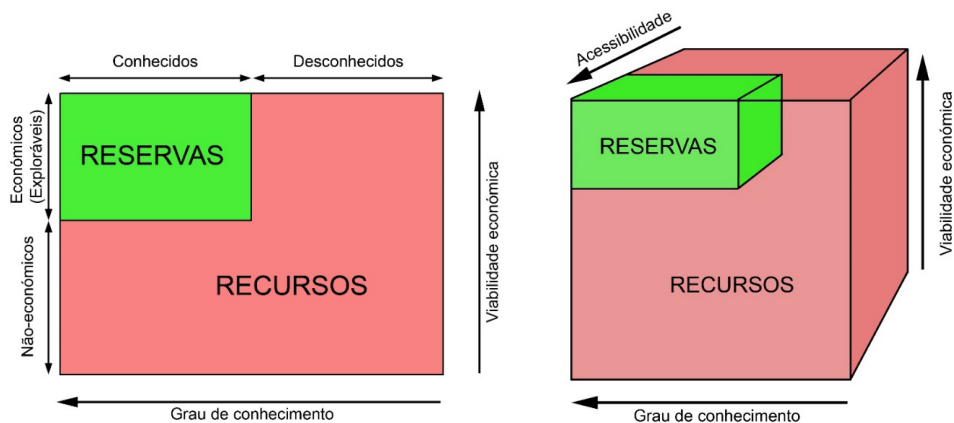


Figura 4: Relação entre recursos e reservas.

Uma das características dos recursos geológicos é a sua distribuição geográfica, que não é aleatória mas dependente da história geológica. Os recursos e sobretudo as reservas devem, portanto, ser objeto de estudos no sentido de, caso seja esse o interesse estratégico, serem considerados como parte integrante do território e, como tal, a sua extração ser legalmente possível. Uma estrada, uma casa, um parque florestal, podem ser implantados em muitos locais, mas os recursos geológicos apenas poderão ser extraídos onde existem. E por mais que a ciência e a técnica evoluam esta realidade não mudará. A limitação, por questões de ordenamento, do acesso aos recursos geológicos poderá diminuir a quantidade das reservas caso estas se situem em zonas onde a instalação de unidades extrativas é interdita por lei. Esta opção deve ser estratégica e nunca uma consequência do desconhecimento das várias valências do território.

2. Principais centros produtores

De entre as rochas que afloram na região NE de Portugal, os granitos são os mais explorados, com diversos núcleos dispersos. No entanto, verifica-se uma grande heterogeneidade quanto à sua dimensão e importância socioeconómica, pelo que apenas aqui se descrevem os principais núcleos produtores.

São dignas de nota as duas únicas áreas definidas em Portugal para a exploração de granito: a Área Cativa de Pedras Salgadas (Portaria n.º 766/94, de 23 de Agosto), para o granito de Pedras Salgadas, e a Área de Reserva na serra da Falperra (Decreto Regulamentar n.º 6/2009, de 2 de Abril), para o granito amarelo (Fig. 5).

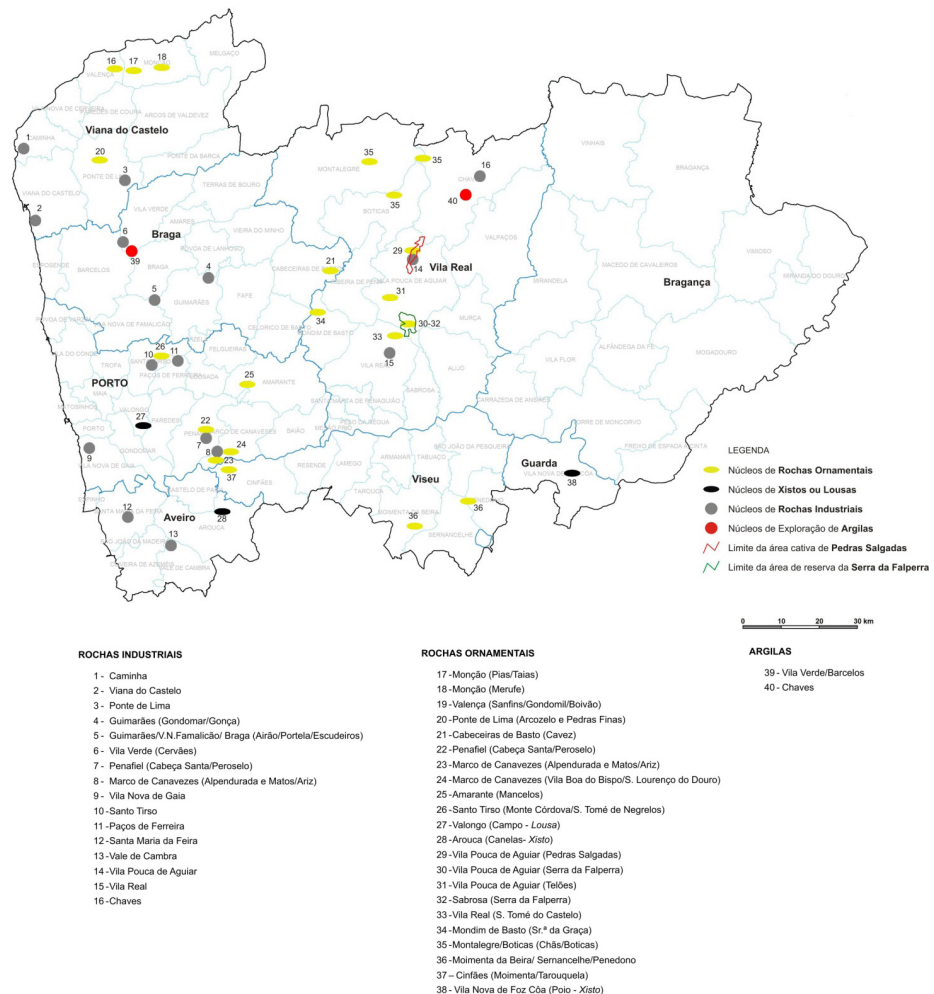


Figura 5: Principais núcleos de pedreiras da Região Norte (Pita et al., 2012).

2.1. Granito de Pedras Salgadas

As explorações do granito de Pedras Salgadas situam-se no maciço granítico de Vila Pouca de Aguiar. Este maciço é constituído por granitos pós-tectónicos e, por isso, apresenta boas características de fraturação e meteorização. Trata-se de um granito de tonalidade clara, biotítico, com alguns megacristais de feldspato potássico. Estas características, aliadas ao grão médio a fino, conferem-lhe propriedades ornamentais únicas, tornando-o num dos granitos portugueses com melhores qualidades ornamentais (Fig. 6). As suas designações comerciais são *Cinzento Claro de Pedras Salgadas*, *Cinzento de Pedras Salgadas* e *Pedras Salgadas*.

As heterogeneidades observadas, sobretudo encraves e lineações biotíticas, existem em pouca quantidade e com tamanho reduzido, e não afetam o seu aspeto ornamental. Contudo, eventualmente, estas heterogeneidades podem inviabilizar a utilização de algumas zonas pontuais do maciço.

São raros os afloramentos pouco alterados deste granito e, com exceção das zonas topograficamente mais baixas, onde é possível observar algumas lajes, nas restantes apresenta uma cobertura de solo. Na vertente este da elevação onde se situam as pedreiras, mais próximo da falha Verin-Régua-Penacova, afloram pequenos blocos devido à maior erosão nessa encosta.

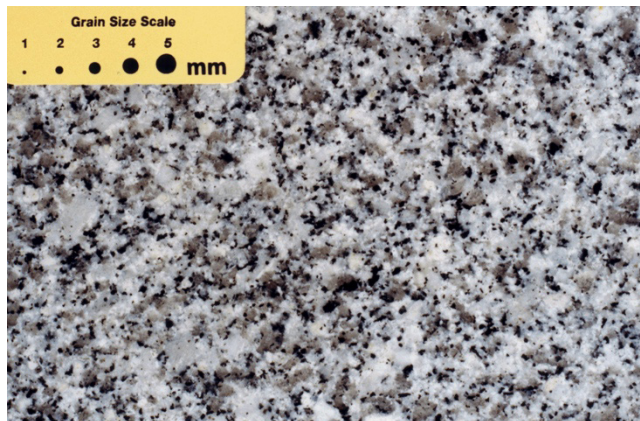


Figura 6: Aspeto do granito de Pedras Salgadas.

A cartografia da fracturação regional à escala 1:10000 mostra a existência de três famílias de falhas: $N10^{\circ}-30^{\circ}E$, $N40^{\circ}-50^{\circ}W$ e $N60^{\circ}-80^{\circ}E$ (Sousa, 1995). A família de falhas $N10^{\circ}-30^{\circ}E$ é a mais importante e aquela que mais afeta o maciço e as falhas que a englobam são paralelas ao importante acidente tectónico situado 1000 m a Este da área, a falha Verin-Régua-Penacova. Estas falhas originaram faixas de alteração subparalelas e de largura variável, podendo atingir os 50 metros.

Outra importante família de fraturas possui direção $N40^{\circ}-50^{\circ}W$. Em termos de alteração é menos importante que a família anterior; as falhas possuem menor extensão e intensidade de alteração decamétrica. A terceira família mais importante possui direção $N60^{\circ}-80^{\circ}E$, é menos frequentemente observada e produz alteração em bandas com largura de alguns metros. Foram também identificadas algumas fraturas $N40^{\circ}-60^{\circ}E$, que constituem uma família de fraturas com menor importância.

As principais famílias identificadas em cada uma das pedreiras englobam-se nas três famílias de falhas atrás referidas, sendo o reflexo da fraturação que afeta o maciço granítico (Sousa, 1995; 2000) (Fig. 7).

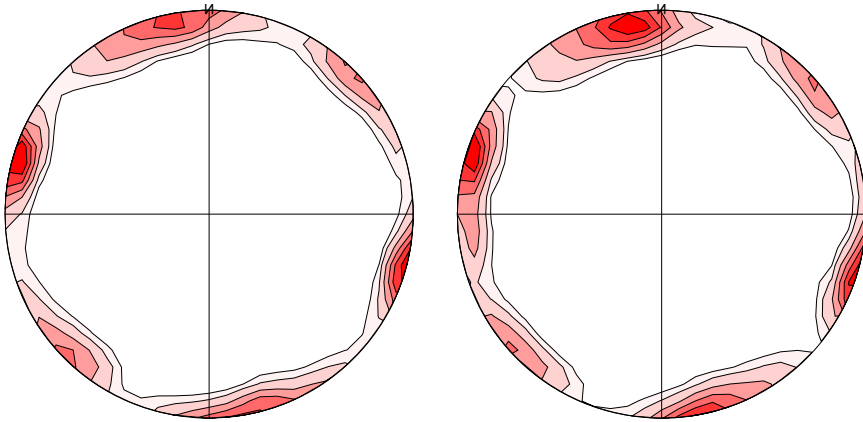


Figura 7: Diagramas da fraturação observada nas pedreiras do Granito de Pedras Salgadas em 1995 e 2000 (esquerda: Sousa, 1995; direita: Sousa, 2000).

As pedreiras estão localizadas nos compartimentos entre as bandas alteradas, ou “corredores de fraturação”, definidas pelas várias falhas. Uma das consequências da presença destes corredores de fraturação é a localização das pedreiras em zonas estreitas e a sua evolução preferencialmente em comprimento e ao longo da zona menos fraturada ou em profundidade (Fig. 8). Contudo, a presença de zonas muito fraturadas e/ou meteorizadas não significa que a alguns metros não seja possível obter grandes massas de granito intactas. São observadas situações onde é possível extrair blocos comerciais ao lado de zonas de falha. Aqui, as zonas de falhas poderão ter funcionado como “almofada” ao protegerem a rocha das ações tectónicas.



Figura 8: Nas pedreiras do granito de Pedras Salgadas é possível observar grandes zonas do maciço pouco fraturadas, tornando possível obter blocos de grandes dimensões.

Este granito poderá ser utilizado em qualquer aplicação e em qualquer situação ambiental, pois as suas características físico-mecânicas são excelentes. A sua homogeneidade textural e coloração mantêm-no no topo das preferências do mercado nacional e internacional.

2.2. Granito Amarelo Real

O granito de Águas Santas, assim designado por Matos (1991), aflora numa extensa área, perfazendo os seus afloramentos uma área de cerca de 70 km² (Sousa et al., 1998). É um granito de grão médio ou médio a grosseiro, de duas micas, com predominância da moscovite, com leve tendência porfiroide e com elevada meteorização que lhe confere uma cor amarelo-acastanhada (Fig. 9). A ótima aceitação comercial deste granito fica a dever-se às suas características cromáticas, podendo ser integrado nos chamados “granitos amarelos”. A sua designação comercial é *Amarelo Real* ou *Amarelo de Vila Real*.

A zona de exploração do designado granito *Amarelo Real* localiza-se 5 km a NE de Vila Real e abrange os concelhos de Vila Real, Vila Pouca de Aguiar e Sabrosa. A principal zona de exploração localiza-se numa zona de cotas elevadas entre os rios Corgo e Pinhão, designada por serra da Falperra.

É difícil obter grandes volumes de rocha com tonalidade homogénea. Com frequência é possível observar heterogeneidades texturais e cromáticas, como pequenos nódulos de biotite (mulas) e *schlierens* (gravatas), mas com dimensões centimétricas que pouco afetam o seu aspeto. Menos vulgar é a presença de filões de aplitos (fitas) e de quartzo.

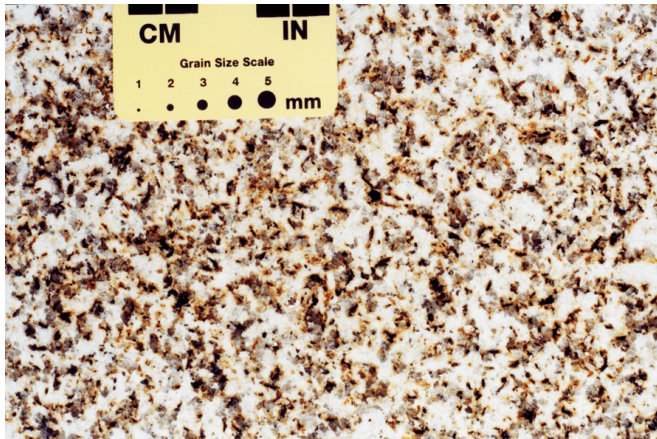


Figura 9: Aspeto do granito *Amarelo Real*.

Os lineamentos observados em fotografias aéreas da área têm a orientação preferencial segundo a direção $N30^{\circ}-60^{\circ}W$, ocorrendo ainda lineamentos de menor expressão com a orientação $N20^{\circ}-40^{\circ}E$ e $N70^{\circ}-90^{\circ}E$ (Sousa, 2007). As principais famílias de diaclases, observadas nos locais de exploração, variam ao longo do maciço e, no seu conjunto, agrupam-se segundo duas grandes famílias com direções $N20^{\circ}-60^{\circ}E$ e $N30^{\circ}-50^{\circ}W$ (Sousa, 2000, 2007; Morais, 2003) (Fig. 10).

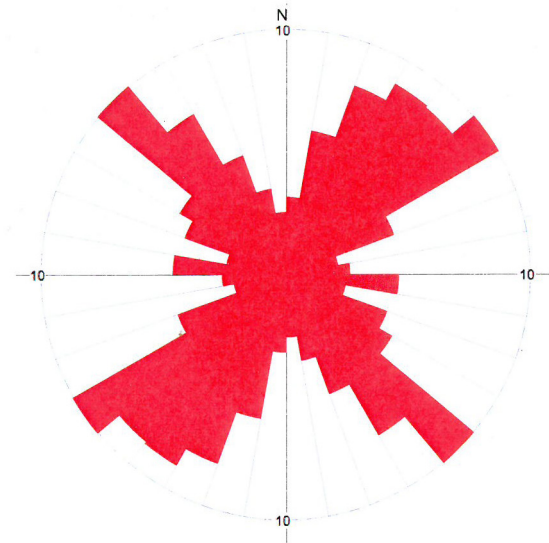


Figura 10: Diagrama de roseta do diaclasamento observado nas pedreiras do granito *Amarelo Real*.

Em todas as explorações há zonas intensamente diaclasadas que inviabilizam a extração de blocos comerciais. 2/3 das famílias apresentam um espaçamento médio inferior a 1 m, que se reflete na distribuição dos espaçamentos medidos, e pode ser observado na maioria das explorações (Morais, 2003). Este facto impossibilita a obtenção de blocos de elevado volume e origina grandes quantidades de resíduos (Fig. 11).



Figura 11: As explorações do granito *Amarelo Real* lidam com o problema dos resíduos gerados.

Dadas as características específicas deste granito, em especial a sua elevada meteorização que condiciona as suas propriedades físico-mecânicas, é aconselhável alguma precaução na sua utilização em zonas húmidas e/ou em pavimentos (quando o acabamento superficial for o polido).

As explorações deste granito possuem grande extensão, pois a ocorrência de granito são, menos valorizado pelo mercado, a poucos metros de profundidade, obriga à evolução lateral da lavra. Este facto potencia um maior impacte ambiental e leva à diminuição das áreas disponíveis para instalação de novas unidades extrativas.

2.3. Granito de Mondim

O granito de Mondim de Basto é um granito de duas micas com coloração amarelada-acastanhada, de granularidade média, por vezes com megacristais de feldspato (Fig. 12), com foliação aproximada NW-SE. Como minerais principais, apresenta quartzo, microclina-pertite, microclina sódica, moscovite e biotite (Pereira, 1987). Dada a sua tonalidade enquadra-se nos “granitos amarelos”, e a suas designações são *Amarelo Mondim* ou *Granito de Mondim*. As pedreiras, de pequena dimensão, têm como condição necessária à sua viabilidade o aproveitamento dos fragmentos de pequena dimensão para obtenção de peças fendidas e serradas, pois são raras as grandes massas que possibilitem a extração de blocos de primeira qualidade para posterior transformação.



Figura 12: Aspeto do granito de Mondim de Basto.

No granito de Mondim de Basto é possível identificar as famílias N-S, com maior representatividade no setor este da área, as famílias N20°-30°E e N50°-60°E, que consistem num conjunto de fraturas extensas, e a família N70°-80°W, mais frequente a noroeste do Monte Farinha (Sousa *et al.*, 2016). Nas pedreiras o diaclasamento mostra a presença de duas famílias predominantes (N-S e E-W), mas em todas as direções há um número significativo de diaclases (Fig. 13).

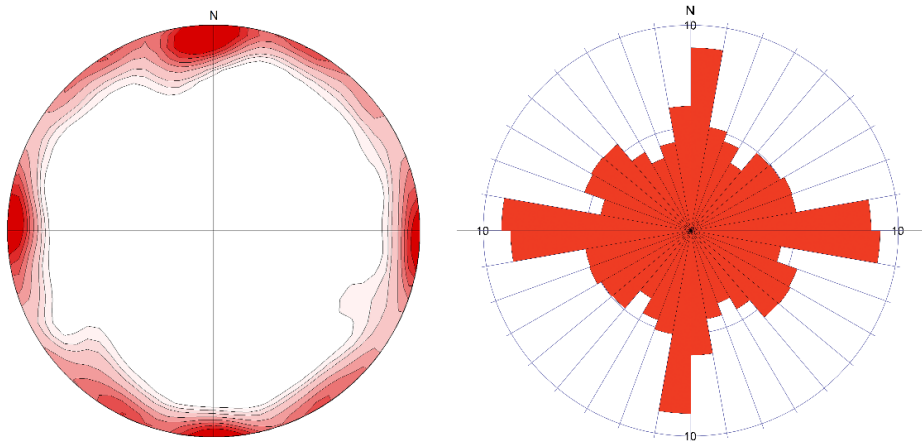


Figura 13: Diagramas do diaclasamento nos locais de exploração do granito de Mondim de Basto (Sousa *et al.*, 2016).

À semelhança do granito Amarelo Real, a intensa fraturação limita o rendimento das pedreiras. Para o granito Amarelo Real foram obtidos, em três estudos diferentes, valores do espaçamento médio de 1,0 m, 1,3 m e 1,5 m (Sousa, 2007). Nos locais de exploração do granito de Mondim de Basto foi

obtido um valor de 0,8 m (Alves, 2010), ligeiramente inferior ao valor obtido em circunstâncias idênticas no granito Amarelo Real (1,0 m). Estes valores são muito baixos e indicam-nos que a quantidade de material sem aproveitamento comercial é elevada (Fig. 14). A gestão desta quantidade de escombros, que acarreta uma elevada despesa, é inerente às explorações deste tipo de granitos. Este facto, aliado à evolução em extensão das pedreiras, é causa de importantes impactes visuais em muitas das situações.



Figura 14: A intensa fracturação e a variabilidade cromática diminuem o rendimento das pedreiras no granito de Mondim de Basto.

2.4. Xisto de Vila Nova Foz-Côa

Macroscopicamente, o designado xisto das Pedreiras do Poio é caracterizado pelo seu carácter xistento, granulometria fina e tonalidade escura. É formado por uma alternância de leitos gresosos de cor acinzentada e leitos pelíticos de cor escura (Fig. 15). A rocha apresenta alguma deformação e clivagem xistenta irregular. A rocha sã apresenta-se de cor cinzenta escura a negra e, quando muito alterada, apresenta-se com cor acastanhada devido à precipitação de óxidos.

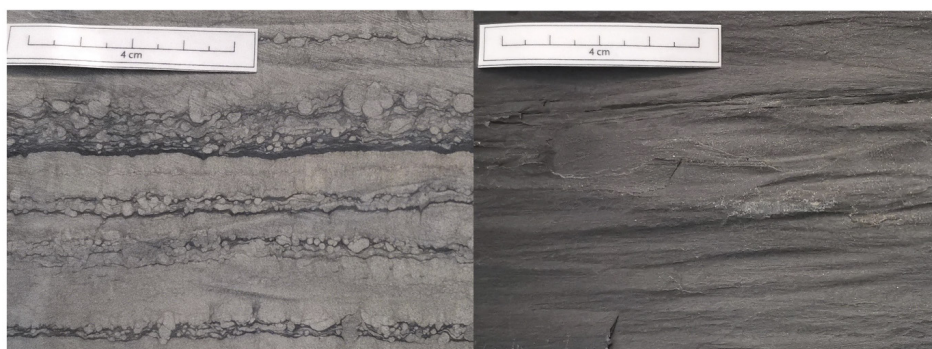


Figura 15: Aspeto do xisto de Foz-Côa: superfície cortada perpendicularmente à estratificação (esquerda); superfície rachada ao longo da estratificação (Bogdanowitsch *et al*, 2022).

Em relação à constituição mineralógica verifica-se o predomínio das micas (biotite+sericite e/ou moscovite, 58%), sendo o quartzo (19%) e os feldspatos (16%) os outros dois principais constituintes. A clorite (5%) e as plagioclases (2%) são acessórios, sendo vestigiais os seguintes minerais: turmalina, apatite, zircão, carbonatos, pirite e outros minerais opacos.

Os níveis explorados integram-se na unidade geológica designada Formação de Desejosa, integrada no Grupo do Douro do SuperGrupo Dúrico Beirão. A zona das pedreiras situa-se num sinclinal mergulhante para E-SE, com a estratificação a variar de subhorizontal, a sul, até N54°E, 60°SE, na zona mais setentrional. A xistosidade S1, paralela à estratificação (S0), e a xistosidade S2 com direção genérica segundo N43°W, subvertical, complementadas por um diaclasamento paralelo a S2, facilitam o arranque e a transformação da rocha.

A fraturação é, por vezes, intensa, e a sua presença manifesta-se de modo mais notório nas bancadas mais gresosas, sendo de referir as famílias N20°-30°E e N40°-60°E (Fig. 16). O diaclasamento é muito similar nas pedreiras em atividade, confirmado nos estudos realizados (Búrcio 2004; Lourenço *et al.* 2009, 2012; Bogdanowitsch *et al.*, 2022). As falhas regionais NNE-SSW a NE-SW e NW-SE influenciam o padrão de faturação observado nas pedreiras. Note-se que a fraturação é perpendicular a S0/S1 e a S2, possibilitando a obtenção de blocos paralelepípedicos. A presença de filões de quartzo também é uma constante nas bancadas mais gresosas, em especial com direção NNE-SSW. Algumas das diaclases delimitam as zonas de extração das pedreiras e facilitam a subdivisão das bancadas em blocos de dimensão que permite o seu transporte e transformação.

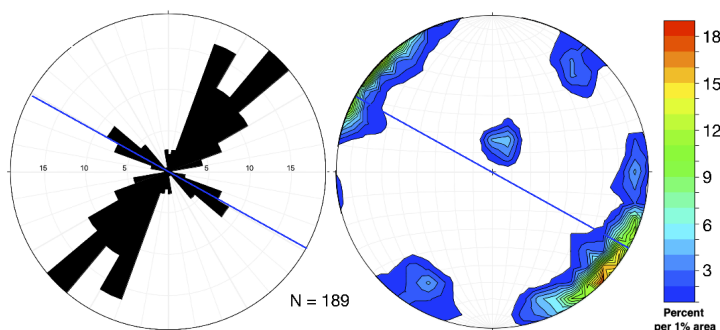


Figura 16: Faturação observada numa das pedreiras do Poio (Bogdanowitsch *et al.*, 2022).

Esta rocha foi explorada no passado para obtenção de esteios utilizados no cultivo da vinha na Região do Douro, a mais antiga região demarcada do mundo, classificada como Património da Humanidade em 2001. As técnicas

ancestrais eram baseadas na força humana, pois o maciço era explorado e a rocha desmontada com recurso a ferramentas manuais. Ainda hoje são visíveis os resíduos dessas explorações, e nas escomboreiras verifica-se que os fragmentos de então apresentam pequenas dimensões.

Hoje, com o recurso a equipamentos e técnicas modernas, mais potentes, como a roçadora de braço e o fio diamantado, é possível obter blocos de grande dimensão que são posteriormente subdivididos para obtenção de vários produtos. Contudo, ainda se utilizam as técnicas ancestrais de transformação, tirando partido da estrutura do maciço.

Se no passado uma das mais nobres aplicações se destinava ao maneiço da vinha, atualmente esse mercado é marginal, pois são utilizados materiais mais baratos. Por outro lado, como a área de cultivo da vinha não aumentou significativamente, e como este material não se degrada à escala temporal humana, o mercado deste tipo de produto é diminuto. Pode afirmar-se que, para esta utilização, este material é vítima do seu próprio sucesso, pois ao ser indestrutível não precisa de ser renovado.

Atualmente os xistos de Foz-Côa são utilizados como elemento construtivo em edifícios públicos e particulares, como revestimento de paredes e pavimentos, e para cada uma destas utilizações as dimensões podem ser ajustadas em função das necessidades dos clientes. De entre os produtos obtidos, salientam-se os prumos clivados, as alvenarias, os pisos rústicos, as guias de passeio e, mais raramente, as placagens rústicas, serradas, afagadas ou polidas. A sua utilização como elemento decorativo, em jardins e parques, também está a aumentar.

A produção destina-se, quase na sua totalidade, à exportação, principalmente para países europeus com climas rigorosos, onde esta rocha mantém intactas as suas propriedades mecânicas. Cerca de 90% da produção é exportada e a atual capacidade produtiva não permite satisfazer todas as encomendas.

2.5. Outras rochas

Além dos quatro principais núcleos de extração acima referidos, três de granito e um de xisto, há bastantes unidades extrativas dispersas pelo território, predominantemente de granitos, que aqui não se detalham. São exemplos as explorações de granito em Mogadouro, Carrazeda de Ansiães, Boticas, Montalegre e Chaves. No entanto, todas estas pedreiras são importantes por dinamizarem a economia local e contribuírem para a fixação das populações locais, sobretudo quando há pequenas unidades de transformação a elas associadas.

3. Alguns tópicos de desenvolvimento

A investigação científica no setor das rochas ornamentais materializa-se no aumento da produtividade das unidades extrativas e na maior diversidade dos produtos transformados. A melhor caracterização dos materiais pétreos permite ainda maximizar a sua utilização, adequando-os às condições de obra e ambientais. Sendo impossível detalhar todos os tópicos, apenas se referem alguns aspetos relativos à importância do ordenamento do território e às vantagens da modelação da fraturação natural.

O estudo detalhado dos núcleos extrativos permite avaliar a disponibilidade de reservas, pois há outras valências do território que legalmente limitam a abertura de novas pedreiras (Sousa et al., 2020). Por exemplo, numa avaliação realizada na Zona de Reserva de Granito Amarelo, na serra da Padrela, verificou-se que em apenas 41% da área poderão ser instaladas novas pedreiras (Santos et al., 2018) (Fig. 17). Como nem todos os locais legalmente

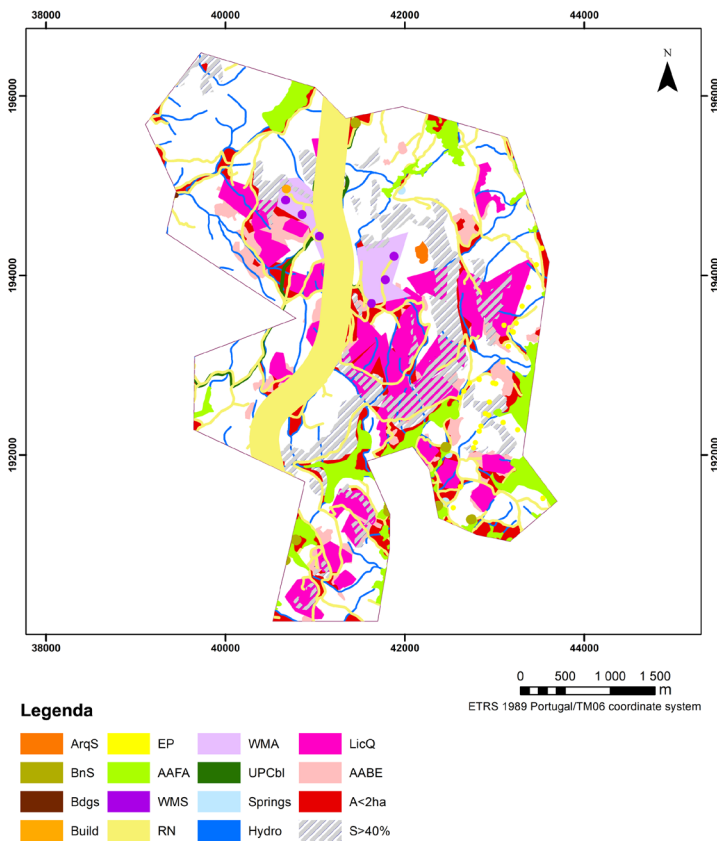


Figura 17: Avaliação das áreas disponíveis na Zona de Reserva de Granito Amarelo, Vila Pouca de Aguiar (Santos et al., 2018).

disponíveis apresentam as condições necessárias (vd. Tabela 1), a área efetivamente disponível será muito menor.

Os instrumentos de ordenamento e gestão do território devem sempre incorporar a máxima informação sobre os recursos geológicos existentes, para, se for caso disso, maximizar o seu aproveitamento. Nem sempre o planeamento atempado antecipa a ocupação do território, tornando menos eficazes os instrumentos de gestão.

As áreas com núcleos de pedreiras, devido à sua vocação marcadamente industrial, devem ser consideradas como uma unidade autónoma para efeitos de ordenamento do território. Após a caracterização geral que incidirá sobre os vários descritores ambientais (solo, fauna, flora,...), e considerando as características geológicas do recurso em apreço, assim como a presença de unidades extrativas em laboração, serão definidos os valores ambientais a preservar, os impactes ambientais decorrentes da atividade e as zonas do território que podem ser exploradas (Fig. 18). A carta de ordenamento final deverá incorporar três cartas distintas (Falé e Bonito, 2004): a carta de aptidão geológica, que indicará os melhores locais para a extração, a carta de exclusão, com indicação das zonas onde há valores ambientais e onde a exploração é desaconselhada, e a carta de impactes ambientais, com indicação dos tipos e magnitudes dos impactes resultantes da atividade.

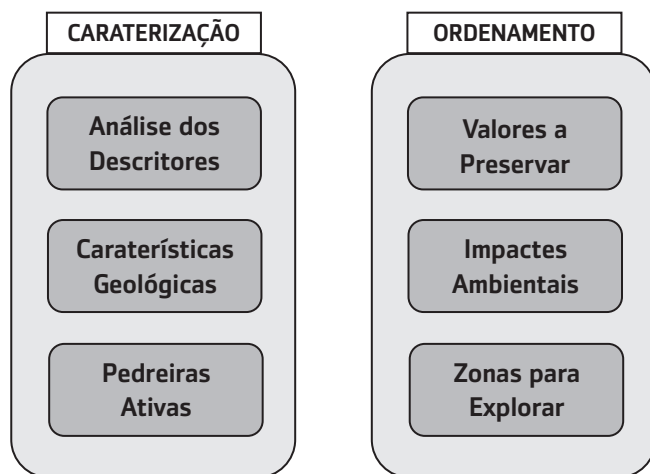


Figura 18: Aspectos a serem estudados na fase de caracterização da área e parâmetros a considerar na Carta de Ordenamento das zonas extrativas.

O plano de ordenamento das zonas extrativas deverá conter informações e diretrizes para uma gestão global da área intervencionada. Neste documento, além da delimitação das áreas de exploração e das áreas de proteção,

devem ser definidas as medidas globais de minimização dos impactes ambientais, as regras gerais para a recuperação ambiental e paisagística e os eventuais serviços comuns. Tal plano deverá ser elaborado e executado com o necessário bom senso de modo a que seja exequível e contribua efetivamente para o desenvolvimento sustentado.

A modelação da fraturação numa frente de pedreira com recurso a programas informáticos facilita a gestão das operações de lavra. Torna-se possível determinar o padrão de fraturação, calcular a forma e volume dos blocos *in-situ* e, assim, o rendimento da pedreira. Além da caracterização da fraturação e previsão da produção, o efeito da alteração da direção dos cortes pode ser avaliado. Uma pequena mudança do ângulo de corte pode aumentar o número e volume dos blocos extraídos. Outra importante ferramenta destes programas informáticos é a previsão do número de blocos comerciais obtidos a partir de uma massa inicial (Yarahmadi et al., 2018). A distância entre cortes sucessivos numa pedreira é estabelecida em função das dimensões finais dos blocos comerciais, sem qualquer avaliação posterior. Ora, estas ferramentas informáticas definem as distâncias entre cortes de modo a maximizar o rendimento da pedreira. A utilização de tais ferramentas requer a monitorização continua da frente da pedreira, a recolha de informação e o estudo da melhor opção. Estes procedimentos requerem pessoal técnico habilitado e consomem tempo, mas o esforço pode compensar.

O recurso a veículos aéreos não tripulados (drones) pode ser útil na caracterização das frentes de pedreira, nomeadamente na identificação das diaclases em paredes inacessíveis, permitindo ter uma visão geral da pedreira. É possível a identificação dos principais conjuntos de fraturas e áreas falhadas/dobradas não visíveis quando apenas se avalia uma pequena porção das pedreiras. Além disso, o pós-processamento das nuvens de pontos da fotografia aérea permite obter os modelos digitais de superfície, ortofotos e modelos 3D, que podem ser usados para gerir a evolução da pedreira (área ocupada, volume extraído, volume de resíduos e rendimento da pedreira). Um novo e crescente campo de aplicação está a surgir porque estas técnicas podem ser ajustáveis às necessidades de cada pedreira.

Na figura 19 mostra-se um exemplo da aplicação destas técnicas numa pedreira do granito Amarelo Real, com a modelação da fraturação de dois blocos em exploração e o cálculo do número de blocos que poderão extraídos.

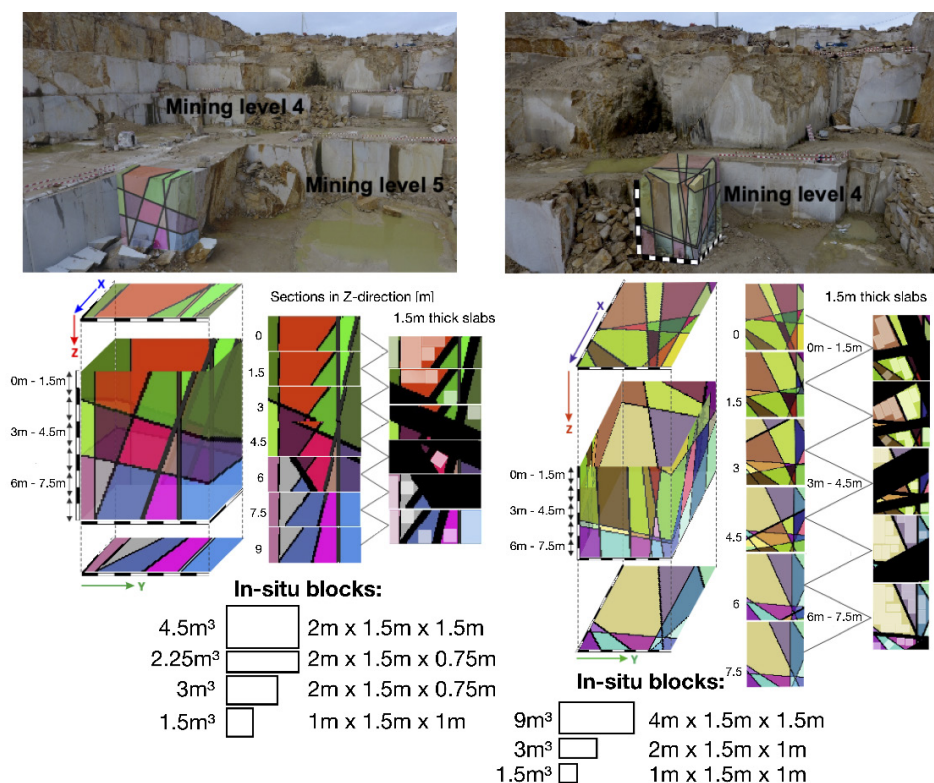


Figura 19: A modelação da fraturação nas pedreiras permite antever o rendimento e a volumetria máxima dos blocos extraídos. Exemplos de uma pedreira do granito Amarelo Real (Bogdanowitsch *et al.*, 2022).

Referências bibliográficas

- Alves IMC (2010). Exploração de granito em Mondim de Basto: caracterização e potencialidades didácticas. Tese de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- ANIET (2017). Diagnóstico Competitivo sobre o Setor da Extração e Transformação da Pedra Natural. Projeto GAP - Ganhar a aposta na Pedra Natural. COMPETE2020. http://www.aniet.pt/fotos/editor2/internacionalizacao/diagnostico_competitivo_sector.pdf
- Bogdanowitsch M, Sousa L, Siegesmund S (2022). Building stone quarries: resource evaluation by block modelling and unmanned aerial photogrammetric surveys. *Environ Earth Sci* 81, 16. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10031-y>
- Búrcio MDM (2004) Controle Estrutural da Localização de Pedreiras de Esteios de Xisto para Vinha em Vila Nova de Foz Côa. MSc. Thesis, Universidade de Évora, Évora.
- Carvalho JF, Henriques P, Falé P, Luís G (2008). Decision criteria for the exploration of ornamental-stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese

- Estremoz Anticline. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45: 1306-1319.
- Decreto Regulamentar n.º 6/2009. *Diário da República*, 1.ª série, N.º 65, 2 de abril de 2009, pp. 2050-2052.
- DGEG (2018). *Informação Estatística*, n.º 20. Direção de Serviços de Estratégia e Fomento dos Recursos Geológicos.
- Falé P, Bonito N (2004). SIG: Instrumento para o reordenamento da actividade extractiva. O caso do Anticlinal de Estremoz. Comunicação apresentada no IV Congresso Pedra Natural, Borba.
- Lourenço JMM, Sousa LMO, Gomes LMF, Oliveira AS (2009) Os xistos de Foz-Côa (Norte de Portugal): novas oportunidades de desenvolvimento. *Proyecto RUMYS, III Reunión – Taller Internacional de Rutas Minerales en Iberoamerica*, México
- Lourenço JMM, Sousa LMO, Oliveira AS (2012) O xisto de Vila Nova de Foz-Côa. In Lourenço JMM, Sousa LMO, Oliveira AS (Eds.), *Rota da Pedra*, Cap. 5, pp. 29-35. Vila Real, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. ISBN: 978-972-704-374-3
- Matos (1991). A geologia da região de Vila Real: evolução do Complexo Xisto-Grauváquico, do Ordovícico, dos granitóides hercínicos e dos depósitos minerais associados. Tese de doutoramento. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Montani C (2017). *XXVIII report marble and stones in the world - 2016*. Ed. Aldus, Carrara, Italy.
- Montani C (2021). *XXII report marble and stones in the world - 2020*. Ed. Aldus, Carrara, Italy.
- Morais, A.I.F. (2003). *Inventariação, Caracterização e Valorização das Pedreiras do Granito Amarelo Real*. Tese de Mestrado. Departamento de Geologia, UTAD.
- Moreira A (1995). Reconhecimento geológico com vista à instalação de uma pedreira para extracção de blocos para pedra ornamental. *Boletim de Minas*, 32(2): 75-81.
- Muñoz de la Nava PM, Escudero JAR, Suarez IR, Romero EG, Rosa AC, Moles FC, Martinez MPG (1989). Metodología de investigación de rocas ornamentales: granitos. *Boletín Geológico y Minero*, 100(3): 129-149.
- Pereira E (1987). *Estudo geológico-estrutural da região de Celorico de Basto e a sua interpretação geodinâmica*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.
- Pita PJBS, Lourenço JMM, Sousa LMO (2012). Recursos geológicos e ordenamento do território. In Sousa LMO (Ed.), *Os granitos de Vila Pouca de Aguiar como factor de desenvolvimento regional - uma abordagem multidisciplinar*, Cap. 5, pp. 53-70. Vila Real, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. ISBN: 978-972-704-375-0.
- Portaria n.º 766/94. *Diário da República*, I Série-B, n.º 194, 23 de agosto, pp. 4894-4895.
- Santos I, Sousa L, Lourenço J (2018). Granite resources evaluation - example of an extraction area in North of Portugal. *Environmental Earth Sciences* 77: 608. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7780-0>.

- Selenon O, Luodes H, Ehlers C (2000). Exploration for dimensional stone-implications and examples from the Precambrian of southern Finland. *Engineering Geology*, 56: 275-291.
- Sousa L, Pita P, Carvalho J, Lourenço J (2020). Granitos ornamentais do norte de Portugal - características, potencialidades e constrangimentos. *Boletim de Minas* 54 - Edição Especial - Rochas Ornamentais - 2019-2020, pp. 7-25.
- Sousa LMO (1995). O granito de Pedras Salgadas como recurso: contribuição para a sua valorização e gestão integrada. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra.
- Sousa LMO (2000). Estudo da fracturação e das características físico-mecânicas de granitos da região de Trás-os-Montes com vista à sua utilização como rocha ornamental. Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 358 pp.
- Sousa LMO (2007). Granito Amarelo Real: características gerais e contribuição para o ordenamento da exploração na serra da Falperra. *Boletim de Minas*, 41(2): 161-174.
- Sousa LMO (2012). Prospecção de granito ornamental. In Sousa LMO (Ed.), *Os granitos de Vila Pouca de Aguiar como factor de desenvolvimento regional-uma abordagem multidisciplinar*, Cap. 6, pp. 71-84. Vila Real, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. ISBN: 978-972-704-375-0.
- Sousa LMO, Oliveira AS, Alves IMC (2016). Influence of fracture system on the exploitation of building stones: the case of the Mondim de Basto granite (north Portugal). *Environmental Earth Sciences* 75:39. DOI 10.1007/s12665-015-4824-6.
- Sousa, L.M.O.; Pires C.A.C.; Suárez del Río, L.M. (1998). Características geológico-estruturais do granito amarelo de Pinhão Cel (Vila Real) que afectam a sua exploração como rocha ornamental. *Comunicações do V Congresso Nacional de Geologia*, Lisboa, pp. F98-F101.
- Yarahmadi R, Bagherpour R, Taherian S-G, Sousa LMO (2018). Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production in dimension stone quarries. *Engineering Geology* 232: 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.006>.

SAVANNAH

ENABLING EUROPE'S ENERGY TRANSITION

**SUPER
BOCK
GROUP**



FortescueTM



ipb

**INSTITUTO POLITÉCNICO
DE BRAGANÇA**