

Estrutura, “petrofabric” e paragênese do índice tungsteno-aurífero de Ruivos - rede de cisalhamentos intra-graníticos de Ponte da Barca

Structure, fabric and paragenesis of the Ruivos tungsten-gold-bearing spot - inner-granite shear zone network of Ponte da Barca, Northern Portugal

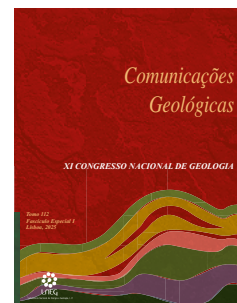
C. Leal Gomes^{1*}, A. Souto², L. Fernandes³, P. Araújo⁴

DOI: <https://doi.org/10.34637/74nk-2163>

Recebido em 12/08/2023 / Aceite em 18/01/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Resumo: Na região de Ponte da Barca, os cruzamentos de zonas de cisalhamento multifásicas, N0°-7°E / N70°E, são o foco principal, de mineralização intra-granítica e hidrotermal de W e Au + As, especialmente quando um terceiro conjunto de rupturas (~N30°E), reticula o volume de maciço adjacente àquelas intersecções. O estudo detalhado da junção de cisalhamentos em Boivão – Ruivos mostrou que quanto mais variados são os azimutes e inclinações das rupturas que afetam um compartimento granítico, maior é a diversidade de mineralizações, que podem incluir, scheelites precoces, associadas a microclina, albite e ouro ± prata ± bismuto, teluretos e selenietos, por sua vez, associados a adularia. A análise do petrofabric permitiu determinar estágios sucessivos de libertação / fixação de ouro a partir de arsenopirite relacionados com a deformação progressiva.

Palavras-chave: arsenopirite, cataclase polifásica, junção de zonas de cisalhamento, ouro, tungsténio.

Abstract: In Ponte da Barca region, the intersections of multistage shear zones, N0°-7°E and N70°E, are the main focus, of inner-granite, hydrothermal W and Au + As mineralization, especially when a third set of ruptures (~N30°E), reticulates the adjacent volume of massif. The detailed study of the Boivão – Ruivos shear junction showed that the more varied are the strikes and deeps of the ruptures that affect a granite compartment, the greater is the diversity of mineralizations, which may include, early scheelite associated with microcline and albite and later gold ± silver ± bismuth, tellurides and selenides, associated with adularia. The petrofabric analysis allowed to determine successive stages of gold liberation out from arsenopyrite, related to progressive deformation.

Keywords: arsenopyrite, polyphasic cataclasis, shear zone junction, gold, tungsten.

¹ Lab2PT - Universidade do Minho, Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal.

² Agência Espacial Portuguesa – Portugal.

³ Geonatur, Penela, Portugal.

⁴ Mestrado em Ordenamento e Valorização de Recursos Geológicos – Universidade do Minho. Braga, Portugal.

* Autor correspondente / Corresponding author: ensino2020.geo@gmail.com

1. Introdução

Na região de Vila Verde a Ponte da Barca, são conhecidos vários indícios arqueológicos de mineração de ouro, ativa, episodicamente, desde o período de ocupação romana da Península Ibérica até ao início

do século XX. Trata-se de pequenos depósitos venulares de quartzo com sulfuretos, associados a rupturas tardi a pós-variscas, definidas em granitos essencialmente biotíticos de grão médio, por vezes porfiróides (Cotelo Neiva e Pastora Chorot, 1945). As estruturas mineralizadas apresentam azimutes variáveis com as famílias mais frequentes segundo, ENE-WSW, NE-SW e N-S.

Foi colocada a hipótese de se verificar o acolhimento preferencial das mineralizações, especialmente de ouro ± arsenopirite em ganga quartzosa, em domínios de deformação frágil, localizados na junção de falhas com diferentes atitudes, tal como se verifica em outras situações nas proximidades (Araújo e Leal Gomes, 2014). Um reconhecimento sistemático dos indícios conhecidos e de outros que, entretanto, foram sendo revelados por diversos trabalhos de escavação associados ao melhoramento e novo traçado de infraestruturas rodoviárias, sugere que de facto parece haver um incremento da massa de sulfuretos em junções de fraturas e falhas. Estas junções e rupturas caracterizam-se por terem expressão geométrica e orientações similares desde o nível de organização regional (cartográfico) até à escala do afloramento e da amostra de mão (em colheitas orientadas). Tais junções podem ainda ser encaradas como nós da rede de cisalhamentos regionais, dúcteis-frágeis a frágeis, particularmente bem expressos em contexto intra-granítico.

Uma análise estrutural detalhada foi dedicada a um destes nós cartográficos, considerado representativo (Figura 1), o qual se expressa como um enxame de veios e juntas preenchidas ou com brechificação associada, situado entre Boivães e Ruivos. Amostras orientadas colhidas nesta área, convertidas em secções polidas, foram sujeitas ao estudo do “fabric” e da paragênese, onde predominam arsenopirite e quartzo. As observações efectuaram-se em microscópio óptico de luz reflectida (RLM – *reflected light microscope*) e em microscópio electrónico de varrimento (SEM – *scanning electron microscope*) em imagens de electrões retrodifundidos (BEI – “*backscattered electron imagery*”) com determinações composicionais semiquantitativas em espectroscopia de dispersão de energia (EDX – “*energy dispersive spectroscopy*”).

2. Análise estrutural

Cartograficamente, o compartimento de Boivães - Ruivos tem geometria triangular numa junção entre desligamentos N70°E e N7°E, localmente reticuladas com feixes de venulações, N33°E (pico de maior frequência a diferentes escalas e níveis de organização). O

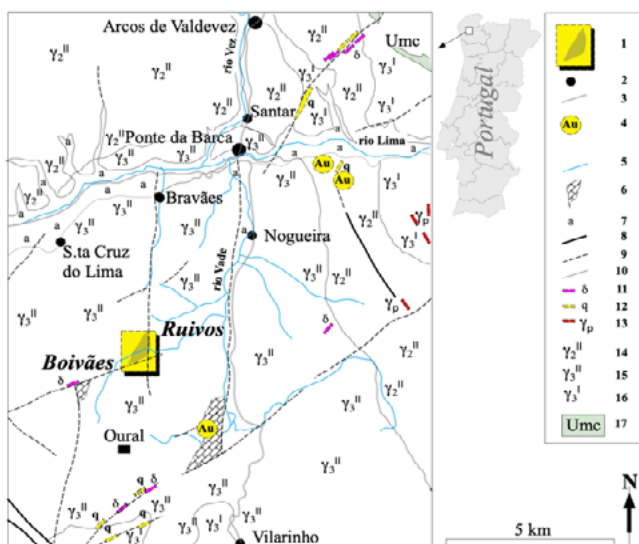


Figura 1. Localização da junção de falhas Boivães – Ruivos na rede de cisalhamentos intra-graníticos de Ponte da Barca (1). 2 – localidades para referência geográfica; 3 – estradas; 4 – ocorrências conhecidas de ouro (Cotelo Neiva e Pastora Chorot, 1945); 5 – rios principais; 6 – junções nodais triangulares com maior massa de mineralizações de arsenopirite e ouro em quartzo; 7 – depósitos siliciclásticos recentes de tipo aluvial; 8 – acidente tectónico de 1ª ordem; 9 – falhas com mineralizações difusas de arsenopirite aurífera; 10 – limites geológicos; 11 – filões doleríticos e de lamprófiros; 12 – filões de quartzo com possança superior a 1 m; 13 – aplito-pegmatitos e pegmatitos filonianos; 14 – granito de duas micas de grão médio; 15 – granito essencialmente biotítico de grão médio a grosseiro, frequentemente porfiróide; 16 – granito essencialmente biotítico de grão médio; 17 – retalhos em “roof pendent” da Unidade Minho Central, tal como é descrita em Pereira et al. (1992).

Figure 1. Location of the Boivães – Ruivos fault conjunction in the Ponte da Barca intra-granitic shear network (1). 2 – locations for geographic reference; 3 – roads; 4 – known occurrences of gold (Cotelo Neiva and Pastora Chorot, 1945); 5 – main rivers; 6 – triangular nodal junctions with greater masses of arsenopyrite and gold mineralizations in quartz; 7 – recent alluvial siliciclastic deposits; 8 – 1st order tectonic accident; 9 – faults with diffuse mineralization of auriferous arsenopyrite; 10 – geological limits; 11 – doleritic and lamprophyre veins; 12 – veins of quartz with a width greater than 1 m; 13 – aplite-pegmatites and pegmatites; 14 – medium-grain two-mica granite; 15 – essentially biotitic medium to coarse-grained granite, often porphyritic; 16 – essentially biotitic medium-grain granite; 17 – roof pendants of Minho Central Unit, as described in Pereira et al. (1992).

azimute NW-SE, típico do Varisco médio (foliações exo-graníticas e desligamentos), é transectado (Figura 2).

A cartografia do “spot” Ruivos mostrou que a área do nó que lhe corresponde na rede de cisalhamento, tem geometria triangular, com uma distribuição heterogénea das frequências de falhas e respetivas atitudes. De acordo com a figura 3 existem dois compartimentos de maciço, que se distinguem pela densidade e atitude das rupturas e, em cuja interface, se estabelece um incremento da proliferação dos veios N33°E, salientados na figura 2 anterior. A todas as escalas e especialmente no microfabric de secções polidas orientadas, nota-se que as junções de cisalhamentos esquerdos, N33°E e direitos, N0°-7°E, são as que estão preferencialmente mineralizadas, com arsenopirite I. Esta arsenopirite pode já conter Au de tipo orogénico, eventual e conceptualmente, remobilizado a partir da rocha encaixante erodida a tecto ou aflorante para W.

2.1. Boivães-Ruivos – Paragénese com ouro orogénico

Materializando constatações de Cerveira (1952), relativas à presença de scheelite nos mesmos depósitos do ouro, em Ruivos, observa-se cataclase polifásica e ocorrência de scheelite e arsenopirite com microinclusiones de “electrum” e “maldonite” ou ouro e sulfossais de Pb, Bi e Ag (Figura 4).

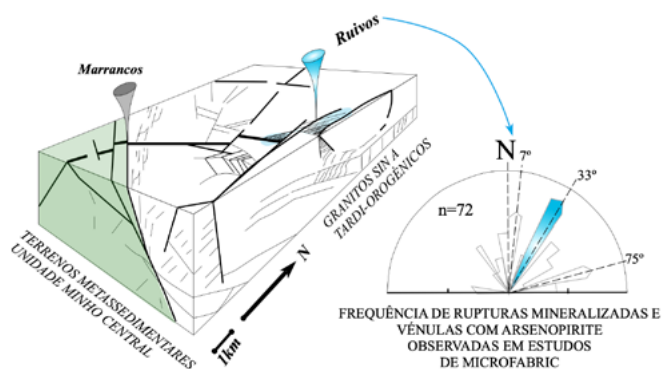


Figura 2. Compartimentação triangular de Ruivos com prevalência de juntas N33°E, mais densamente mineralizadas nas intersecções com veios de outros azimutes. 1 – granito regional indiferenciado, considerado tardi-tectónico relativamente à 3ª fase Varisca de deformação; 2 – fácies de grão médio a fino; 3 – fácies mais marcadamente porfiróide, essencialmente biotítica, de grão médio a grosseiro; 4 – domínio de prevalência de juntas com veios de quartzo e arsenopirite, com azimute N33°E; 5 – falhas comoclusão quartzo-arsenopirítica observada; 6 – falhas deduzidas; 7 – veios com pico de frequência a N33°E. Apresentam-se referências geográficas das amostras sujeitas a estudos de petrofabric e paragénese dos minérios.

Figure 2. Triangular arrangement of Ruivos structures with prevalence of N33°E joints, more densely mineralized at intersections with veins of other azimuths. 1 – undifferentiated regional granite, considered late-tectonic in relation to the 3rd Variscan phase of deformation; 2 – medium to fine-grained facies; 3 – more markedly porphyritic facies, essentially biotitic, medium to coarse-grained; 4 – domain of prevalence of joints with quartz and arsenopyrite veins, with azimuth N33°E; 5 – faults with observed quartz-arsenopyrite occlusion; 6 – deduced faults; 7 – veins with peak frequency at N33°E. Geographical references of samples subjected to petrofabric and mineral paragenesis studies are presented.

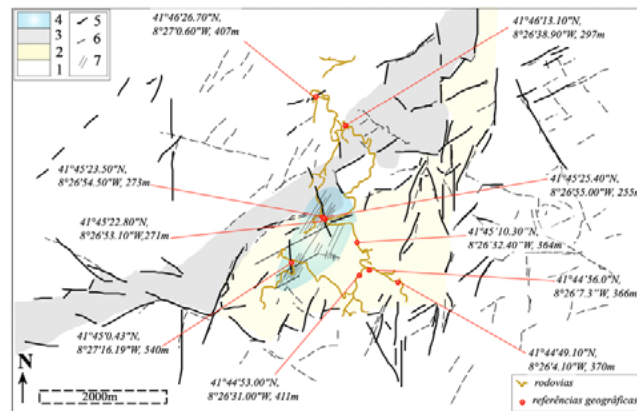


Figura 3. Bloco esquemático conceptual 3D da junção de fracturas Boivães-Ruivos, referida como “spot” Ruivos, em posição intra-granítica e expressão sistemática de juntas com uma frequência a N33°E – para referência estrutural localiza-se o índice de Marrancos no contacto com terrenos metassedimentares do Silúrico (Leal Gomes, 1992).

Figure 3. Conceptual 3D sketch block of the interaction of Boivães-Ruivos fractures, referred to as “spot” Ruivos, in intra-granitic position and systematic expression of joints with a peak frequency at N33°E – for local structural reference, position of Marrancos prospect in the contact with Silurian metasedimentary terrains (Leal Gomes, 1992).

A diversificação paragenética tardia progride no sentido da exsudação (exsolução por *annealing/recovery* e deformação intracristalina) de Au na forma nativa, alojada em aberturas transtensivas, seguida da selagem de rupturas de arrastamento (“drag textures” de Mukherjee, 2014) e depois em associação com adularia ou em massas de escorodite supergénica (Figura 5).

Assim, o “spot” cartográfico triangular, Boivães – Ruivos,

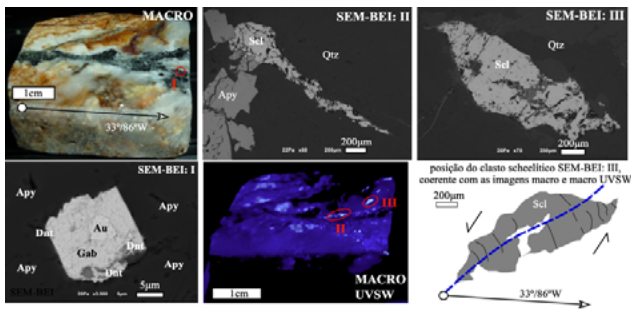


Figura 4. Amostra orientada com mineralização metálica em junções de rupturas e sua expressão no modo de observação SEM-BEI. Apy – arsenopirite; Qz – quartzo; Scl – scheelite; Au - (Au80 Ag20); Dnt – dantopaitite; Gab – galenobismutite; UVSW – imagem obtida com a incidência de luz ultravioleta de ondas curtas.

Figure 4. Oriented chip sample with metallic mineralization in rupture junctions and its expression in SEM-BEI mode. Apy – arsenopyrite; Qz – quartz; Scl – scheelite; Au - (Au80 Ag20); Dnt – dantopaitite; Gab – galenobismutite; UVSW – image obtained with the incidence of short-wave ultraviolet light.

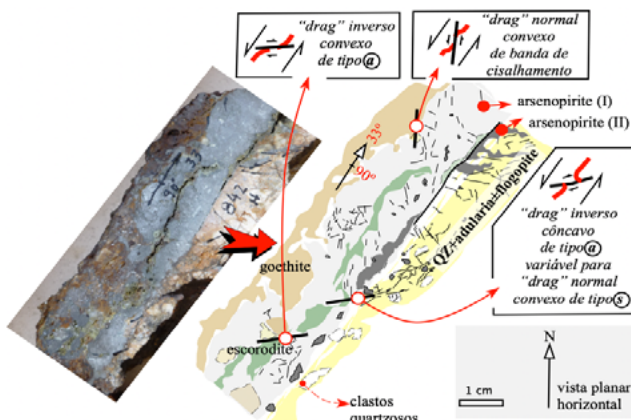


Figura 5. Reconhecimento de texturas de arrastamento (“drag textures”) e sobre-precipitação de arsenopirite (II) e adularia na selagem das diferentes direções de ruptura tardias.

Figure 5. Recognition of drag textures and over-precipitation of arsenopyrite (II) and adularia sealing the different late failure directions.

é interpretado como sendo uma das junções ou nós da rede de zonas de cisalhamento de Ponte da Barca, onde está alojada, preferencialmente, a expressão tardia de mineralizações do tipo ouro orogénico.

Nos cisalhamentos dúcteis a frágeis estudados, seguindo o procedimento analítico de Passchier e Platt (2017), a cinemática da vorticidade indica uma forte componente de cisalhamento puro.

Apesar do caráter transpressional, a dispersão das estimativas de encurtamento e de espessamento, para as zonas de cisalhamento frágil-dúctil principais e falhas de 1ª ordem, que as expressam, implica variações das taxas de deslocamento para os ramos em interação podendo conduzir a transtensões localizadas. Estes domínios transtensionais, seriam os mais favoráveis para a deposição do ouro primitivo. Os resultados de análise do fabric venular e do fabric mineralógico, em arsenopirites de 1ª e 2ª geração, são consentâneos com esta constatação (Figura 6). No sentido da microescala a cinemática em rede dos pares de fracturas conjugadas envolve a formação de microestruturas com abertura maior junto da confluência de juntas. Em espaços de cinemática anti-tética, interações de sentido contrário, podem levar a fechos em “zip” (Passchier e Platt, 2017) que mantém a relação angular e a conjunção.

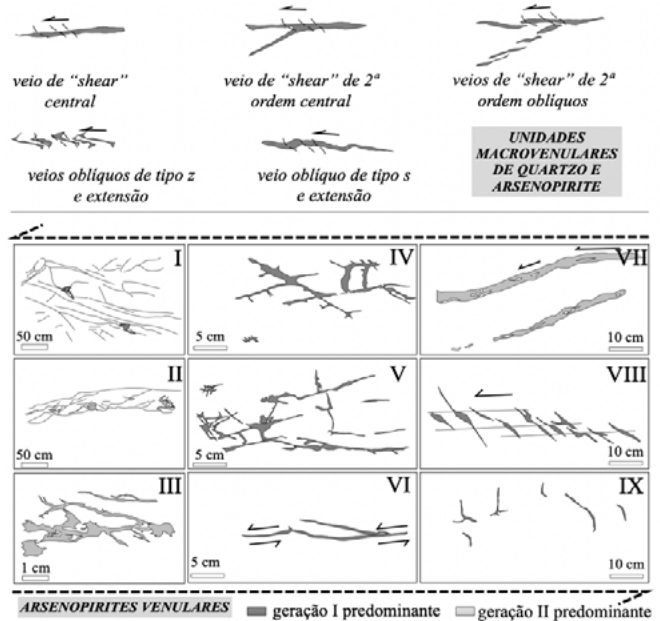


Figura 6. Matriz de alojamento de arsenopirites em veios macroescalares e em agregados monomineralicos: hemisféricas (I e II) e venulares (III a IX). Comparar tipologia dos veios com Powell (2020), Passchier e Platt (2017) e Belousov *et al.* (2016).

Figure 6. Array of arsenopyrites in macro-scale veins and in single mineral aggregates: hemispherical (I and II) and venular (III to IX). Compare typology of veins with Powell (2020), Passchier and Platt (2017) and Belousov *et al.* (2016).

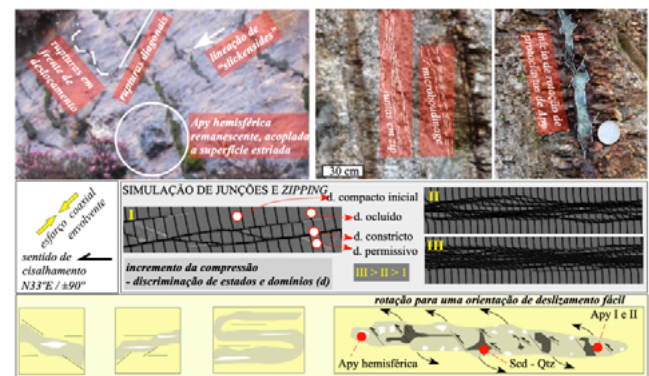


Figura 7. Estados de oclusão das junções de rupturas e ajustamento ao caso de Ruivos de um modelo bidimensional do amortecimento e dissipação de esforço, devido à cinemática verificada no contorno de microclastos, envolvendo também a fragmentação e rotação de microboudins, de acordo com Etchecopar (1977). Simulação de junções de acordo com Passchier e Platt (2017).

Figure 7. Occlusion conditions of rupture junctions and adjustment to the case of Ruivos of a two-dimensional model of damping or stress dissipation due to the kinematics verified in the contour of microclasts, also involving the fragmentation and rotation of microboudins, according to Etchecopar (1977). Junction simulation according to Passchier and Platt (2017).

Em alguns compartimentos de maciço rochoso, quanto maiores são as diferenças de desenvolvimento das famílias de juntas, tanto maiores são as modificações das orientações de esforço induzidas por fracturas pré-existentes o que pode vir a resultar numa má correlação entre as juntas mais tardias, e as direcções do campo de tensões regionais abrangentes.

O favorecimento de junções de estruturas na focagem e multiplicação de deposições pode ser potenciado pela diferenciação de condições de oclusão tal como é sugerido na figura 7. Numa simulação dos domínios de conjunção, em que se identificam vários daqueles

que se observam na região de Boivães – Ruivos, distinguem-se spots com oclusão da rede de fracturas e domínios considerados permissivos para a recepção das mineralizações. Segundo Etchecopar (1977), a dissipação de esforço devido a processos verificados no contorno de microclastos e microboudins favorece igualmente o alojamento de mineralizações tardias (Figura 7).

2.1. Ruivos - Paragénesis de adsorção eletroquímica

Admitindo que a arsenopirite se pode comportar como um semicondutor de tipo P ou N, desde que esteja dopada com constituintes estranhos à sua rede ou, simplesmente, por possuir uma composição não estequiométrica, Moller e Kersten (1994) sugeriram que a adsorção de ouro, como ouro nativo, poderia ocorrer em arsenopirites do tipo P, ou em situações P e N em pirite e arsenopirite vizinhas.

A redução do Au em resultado da sulfidização e ruptura dos ligandos HS, ocorre em domínios de tipo cátodo (ou tipo P) ou na junção P-N, com o excesso de electrões a deslocar-se para o cátodo. Moller e Kersten (1994) propõem que os domínios cristalinos de tipo P e N (em contacto ou na vizinhança), podem eficientemente mobilizar o ouro. Isto é tanto mais plausível quanto é certo que a não estequiometria das arsenopirites favorece mudanças na química mineral em resposta à interação com múltiplos fluidos hidrotermais.

3. Considerações finais e conclusões

Como em outros cenários orogénicos (Belousov *et al.*, 2016), a mineralização de ouro em Ruivos inicia-se pela fixação reticular ou microinclusão em arsenopirites de primeira geração, preferencialmente, ao longo de zonas de cisalhamento inverso de alto ângulo, capazes de canalizarem fluidos em resposta à repetição de episódios “fault-valve” e flutuações cíclicas da pressão do fluido (Sibson, 2020). A adjução de spots enriquecidos em metalizações, na proximidade das falhas principais é um aspecto fundamental, estruturante no modelo de Sibson (2020) e explicaria em parte as

junções triangulares que se observam na cartografia de Ruivos. Scheelite seguida de arsenopirite I já aurífera estariam alojadas nestas junções. O carácter fértil das junções pode ser acentuado com o desenvolvimento de zonas de Riedel e uma rede anastomosada de estruturas frágeis e veios. Na análise do fabric, correspondem-lhe as arsenopirites de 2ª geração (II), que são texturalmente as mais diversificadas e hospedeiras da mineralização polimetálica mais variada. Inicialmente materializam um estado de ramificação macrovenular. As partículas de Au correspondentes são do tipo patente na figura 8A – partículas maiores de Au>Ag em microgeometrias transtensivas da arsenopirite (Apy).

Num estado subsequente de dissipação de esforço nos contornos de clastos, observam-se reajustes do Au (Au>>Ag) (Figura 8A) e o aparecimento de fases concomitantes com Cu, Bi e Te, tais como calcopirite (Cp), calcosite (Cc), maldonite (Mld), emplectite (Emp) e hedleyite (Hdl) (Figura 8B). A partir daqui as paragéneses também comportam adularia, celadonite e calcedónia - baixa temperatura e baixa sulfidização. A reação eletroquímica em domínios internos enriquecidos em As (D1 e D2 na Figura 8C) funcionam como atractores de electrões adsorvendo micropartículas de ouro e outros metais (Figura 8D).

Referências

- Araújo, P., Leal Gomes, C., 2014. Análise geométrica e cinemática das partículas de Au acolhidas em arsenopirite no corredor de cisalhamento de Argas-Cerquido-Serra de Arga (Minho). *Comunicações Geológicas*, **101** (Especial I): 243-246.
- Belousov, I., Large, R. R., Meffre, S., Danyushevsky, L. V., Steadman, J., Beardmore, T., 2016. Pyrite compositions from VHMS and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for gold and copper exploration. *Ore Geology Reviews*, **79**: 474-499.
- Cerveira, A. M., 1952. Relações entre os jazigos hipogénicos portugueses de ouro e de tungsténio. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, **X**: 133-144.
- Cotelo Neiva, J. M., Pastora Chorot, J. L., 1945. Alguns jazigos de ouro do Alto-Minho. *Estudos, Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro*, **1**: 190-265.
- Etchecopar, A., 1977. A plane kinematic model of progressive deformation in a polycrystalline aggregate. *Tectonophysics*, **39** (1-3): 121-139.
- Leal Gomes, C., 1992. Recursos minerais do distrito de Viana do Castelo e dos concelhos de Vila Verde, Amares e Terras de Bouro. Apreciação qualitativa do estado actual e perspectivas de aproveitamento. Programa INTERREG I (Minho – Galiza) – relatório sectorial inédito, Univ. Minho.
- Möller, P., Kersten, G., 1994. Electrochemical accumulation of visible gold on pyrite and arsenopyrite surfaces. *Mineralium Deposita*, **29**(5): 404–413.
- Mukherjee, S., 2014. Review of flanking structures in meso- and micro-scales. *Geol. Mag.*, **151** (6): 957–974.
- Passchier C., Platt J., 2017. Shear zone junctions: Of zippers and freeways. *Journal of Structural Geology*, **95**: 188-202.
- Pereira, E. (Coord.), 1992. Notícia explicativa da Folha 1 da Carta Geológica de Portugal à escala 1:200 000. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Powell, C., 2020. The relationship between visible gold and arsenopyrite at the Orenada Zone 4 deposit, Val d’Or, Quebec. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 7160. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/7160>
- Sibson, R., 2020. Preparation zones for large crustal earthquakes consequent on fault-valve action. *Earth, Planets and Space*, **72** (31): 1-20.

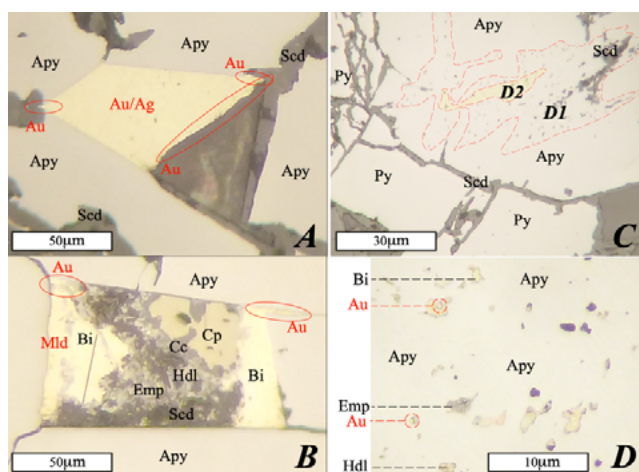


Figura 8. Imagens RLM do alojamento do Au. A e B – deposição de Apy II em conjunção de estruturas e reajustes em baixa sulfidização; C e D – fixação electroquímica final em células P, em presença de pirite (Py). Outros símbolos mineralógicos no texto.

Figure 8. RLM images of gold trapping. A and B – Apy II deposition in structure conjunctions followed by low sulfidation readjustments; C and D – final electrochemical adsorption in P cells, especially in the presence of pyrite (Py). Other mineralogical symbols in the text.