

## Análise geométrica e cinemática das partículas de Au acolhidas em arsenopirite no corredor de cisalhamento de Argas-Cerquido-Serra de Arga (Minho)

### Geometric and kinematic analysis of Au particles hosted in arsenopyrite into the shear corridor of Argas-Cerquido-Serra de Arga (Minho)

P. Araújo<sup>1</sup>, C. Leal Gomes<sup>1\*</sup>

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

**Resumo:** Na vertente oriental da Serra de Arga, no Minho, ocorrem diversas zonas de cisalhamento polifásico que focaram fluidos hidrotermais responsáveis por mineralizações auríferas. Algumas das zonas de cisalhamento confluem numa estrutura mestra configurando um duplex em flor positiva.

As mineralizações ocorrem em ganga quartzosa e compreendem tungstato e, posteriormente, sulfuretos de As, Fe, Zn, Cu, Pb, Bi, sulfossais de Pb, Bi, Ag, Bi nativo, *electrum* e ouro nativo. A diversidade paragenética manifesta heterogeneidade ao longo das estruturas cisalhantes apresentando menor diversidade em níveis topográficos inferiores da zona de cisalhamento mestra tornando-se parageneticamente mais complexa a cotas superiores da estrutura em flor.

A análise geométrica, sistemática e detalhada das partículas auríferas permitiu definir uma tipologia para os estádios auríferos sucessivos relacionando-os com a receptividade reológica e deformacional do hospedeiro arsenopirítico em diferentes fases da sua evolução e reorganização paragenética.

**Palavras-chave:** Cisalhamento, Reologia de arsenopirite, Partículas de ouro.

**Abstract:** On the eastern slope of the Serra de Arga, Minho, several polyphase shear zones occurs composing a positive duplex flower structure promoting gold hydrothermal mineralizations.

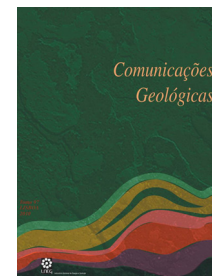
The mineralization occurs in quartz gangue and is essentially composed of tungstates and sulphides of As, Fe, Zn, Cu, Pb, Bi, sulfosalts of Pb, Bi, Ag, native Bi, *electrum* and native gold. The paragenetic diversity manifests heterogeneity along the shear structures presenting less diversity in lower levels of the main shear and becoming more complex at the higher levels of the flower structure.

The analysis of the shape, size and geometry of gold particles structure allowed the establishment of a typology of auriferous successive stages related to the rheological behaviour and deformation of arsenopyrites.

**Keywords:** Shear, Arsenopyrite reology, Gold particles.

<sup>1</sup>CIG-R; Escola de Ciências, Universidade do Minho, Gualtar, 4710-057 Braga.

\*Autor correspondente / Corresponding author: [lgomes@dct.uminho.pt](mailto:lgomes@dct.uminho.pt)



Artigo Curto  
Short Article

### 1. Introdução

No bordo oriental da Serra de Arga, no Minho, ocorrem diversas zonas de cisalhamento polifásico que reactivam proto-lineamentos, activos, possivelmente, desde a 2ª fase Varisca de deformação (D<sub>2</sub>). As estruturas confluem a Sul e em profundidade na zona de cisalhamento mestra de Argas-Cerquido - estrutura em flor positiva - duplex oriental da Serra de Arga descrito em Leal Gomes (1994).

As zonas de cisalhamento que apresentam brechas de falha, de esmagamento e produtos de milonitização também funcionam como zonas de acolhimento de mineralizações, por veicularem a focagem e a convergência de fluidos hidrotermais, por sua vez responsáveis pela precipitação de paragéneses geoquimicamente fraccionadas e escalonadas pelos sucessivos episódios de reactivação cisalhante.

O plutónio da Serra de Arga (Fig. 1) tem uma configuração tridimensional, lateralmente expandida, comportando uma fácies granítica de duas micas de grão médio a grosseiro, com quimismo sílico-sódico, sintectónica relativamente à 3ª fase Varisca de deformação (Leal Gomes & Gaspar, 1993).

Nos terrenos metassedimentares envolventes predominam formações do Silúrico metamorfizadas, essencialmente, xistos andaluzíticos, nos quais se encontram intercalados níveis de quartzitos, quartzofilitos, liditos, xistos negros, turmalinitos, níveis lenticulares de rochas calcossilicatadas, anfíbolitos, metaexalitos e intercalações de metavulcanitos máficos e ácidos (Dias, 2012).

Entre as mineralizações hidrotermais predominam as que incluem sulfuretos polimetálicos com volframite e scheelite (nas paragéneses mais precoces) e ouro - nas fases de mineralização mais tardias (Leal Gomes & Gaspar, 1992).

Em estádios intermédios da evolução deformacional dos cisalhamentos surgiram fases metalíferas com

deposição de blenda, calcopirite e galena com larga predominância da blenda. Nos estádios mais tardios da sequência paragenética identificam-se sulfossais de Pb, Bi e Ag acompanhados de electrum e eventualmente clorite, fluorite e stolzite (Leal Gomes, 1995).

Do estudo, dedicado às estruturas de cisalhamento ilustradas na figura 1, apresentam-se resultados de análise estrutural detalhada de partículas isoladas e conjuntos de partículas de Au, que se encontram aprisionadas em hospedeiro arsenopirítico.

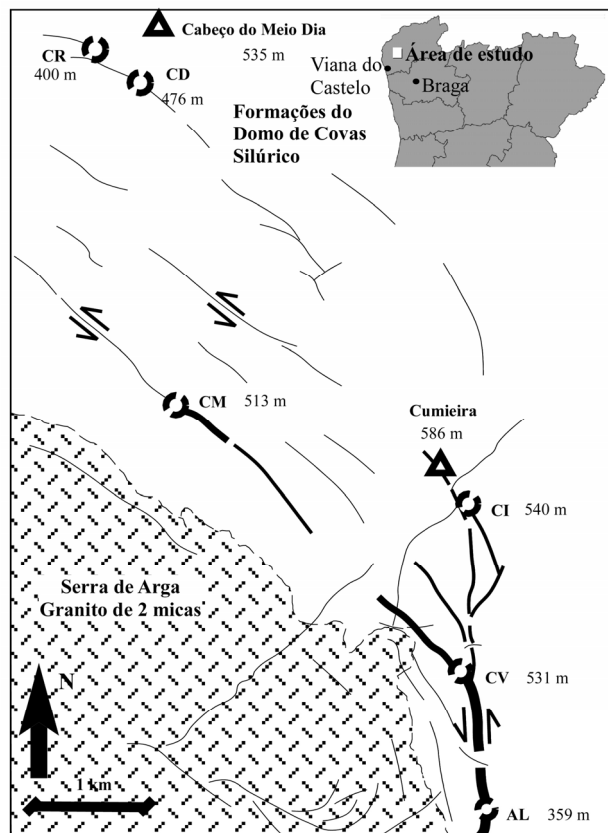


Fig. 1. Configuração cartográfica das zonas de cisalhamento principais do duplex oriental da Serra de Arga (corredor de cisalhamento de Argas - Cerquido) e localização das colheitas de amostras de sulfuretos polimetálicos em ganga quartzosa que foram sujeitas a análise paragenética: CR - Cerdeirinha e Telheira; CD - Cabeço do Meio Dia; CM - Cova dos Mouros e Fichua; CI - Cumieira; CV - Cavalinho; AL - Água Levada.

Fig. 1. Cartographic configuration of main shear zones of the eastern duplex Serra de Arga (Argas - Cerquido shear zone) and sampling location which have undergone paragenetic analysis: CR - Cerdeirinha and Telheira; CD - Cabeço do Meio Dia; CM - Cova dos Mouros and Fichua; CI - Cumieira; CV - Cavalinho; AL - Água Levada.

Procura-se sugerir uma tipologia de estádios auríferos sucessivos, estabelecida em relação com a receptividade reológica e deformacional por parte das arsenopirites, enquanto hospedeiras da expressão mineralógica do ouro e electrum livres ou acompanhados de galena.

Os métodos de determinação das partículas auríferas e a análise do seu petrofabric e das relações geométricas com a arsenopirite portadora incluem, sistematicamente, microscopia de luz reflectida (MOLR) e microsonda

electrónica (imagens de electrões retrodifundidos - MEV-ER - e ainda análises químicas quantitativas sobre partículas de Au e arsenopirite). Ocasionalmente, foram obtidos dados de litogeoquímica por activação neutrónica, sobre amostras extraídas em canais transversos em alguns segmentos dos lineamentos auríferos conhecidos.

## 2. Resultados

Estudos anteriores sugerem que os teores de Au na zona de cisalhamento mestra do duplex aumentam em profundidade e a Sul do ponto de confluência das estruturas de ordem secundária (Leal Gomes, 1994). Do conjunto das análises de Au por activação neutrónica, que incidiram sobre amostras em canal, nos locais mais ricos, também se obtiveram as amostras que foram sujeitas ao estudo do *petrofabric* (Fig. 1):

- Cerdeirinha (400 m de altitude) - canal com 30 cm - Au = 8 ppm - o ouro não ocorre particulado mas sim na rede cristalina da arsenopirite, distribuído de forma heterogénea;
- Cabeço do Meio Dia (476 m de altitude) - canal com 52 cm - Au = 17 ppm - as partículas de Au nativo ocorrem em inclusões ou exsudações na arsenopirite, em resposta a processos de *annealing-recovery*;
- Água Levada (359 m de altitude) - canal com 135 cm - Au = 18 ppm - as partículas de Au denotam incremento progressivo da exsudação; por vezes estão alojadas em junções triplas da subgranulação da arsenopirite hospedeira;
- Segmento entre o Cavalinho (CV) e a Cova dos Mouros (CM) (531 m de altitude) - canal com 41 cm - Au = 16 ppm - as microlocalizações do Au e electrum são típicas de acolhimento transpressivo;
- Cavalinho (CV) (531 m de altitude) - canal com 41 cm - Au = 14 ppm - as partículas de electrum são predominantes, ocorrem nas geometrias dilatacionais mais típicas das arsenopirites.

Na figura 2 ilustram-se as ocorrências mais precoces de Au. Em quartzofilitos turmalínicos observam-se por vezes teores anómalos, de 802 ppb, e em unidades metatufáceas bandadas das proximidades os teores podem chegar a 886 ppb. Outras fácies deste tipo, também portadoras de grafite e intensamente afectadas por alteração argílica, quando sujeitas à extracção dos minerais densos da fracção fina friável, mostraram partículas de ouro pepitóide por vezes com dimensão milimétrica. Estas partículas podem corresponder à remobilização de um stock metalífero singénico, alojado nas fácies de afinidade vulcanogénica. Já nas zonas de cisalhamento, as partículas de Au que devem ser mais precoces ocorrem em inclusões automórficas nas arsenopirites mais finas e também mais precoces nas sequências paragenéticas.

Os estágios mais definidos da deformação de arsenopirites auríferas estão apresentados na figura 3. Nesta figura são discrimináveis as armadilhas estruturais que aprisionaram partículas de Au. Os *petrofabrics* arsenopiríticos correspondentes decorrem da decomposição da deformação não coaxial em regime dúctil-frágil - texturas em *crack-seal*, e em dominó e imbricações helicíticas entre arsenopirite e pirite. Detectaram-se também micro-enchimentos dilatacionais transpressivos a transtensivos com calcopirite e galena, respectivamente.

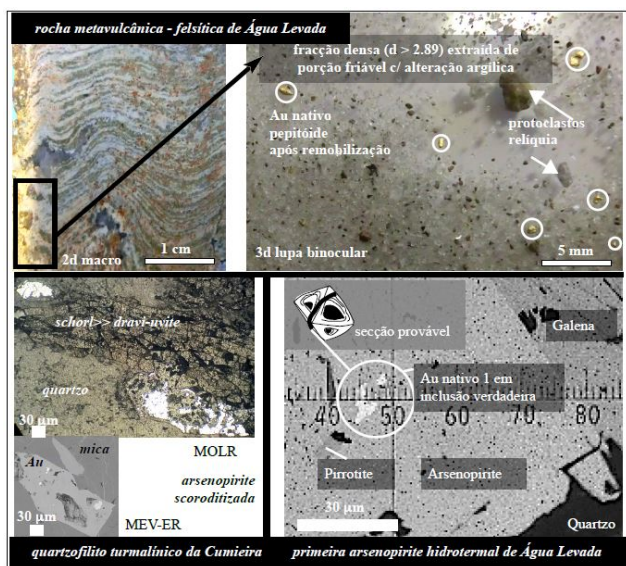


Fig. 2. Ilustração de litologias portadoras de pré-concentrações de Au singenéticas ou relacionadas com uma remobilização metassomático-hidrotermal primitiva (Dias, 2012).

Fig. 2. Illustration of lithological facies that carries the pre-syngenetic Au concentrations or are related to an early metasomatic-hydrothermal remobilization (Dias, 2012).

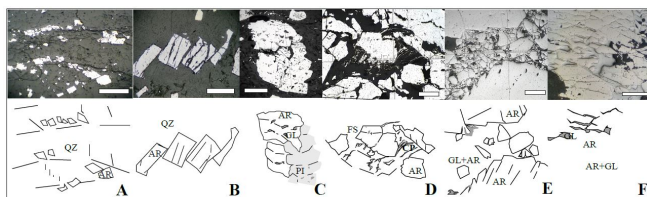


Fig. 3. Petrofabric of early arsenopyrites affected by ductile-brittle shear deformation related to the remobilization and gold arrest (scale bar = 5 mm; observation MOLR N//): A - "crack-seal" texture of arsenopyrite (AR) + quartz (QZ), B - domino texture of arsenopyrite (AR) in quartz (QZ); C - helicitic sigmoid shape of arsenopyrite (AR) and pyrite (PI); D - "en échellon" opening of phyllosilicate (FS) and micro-venular chalcocopyrite in filling between clasts of arsenopyrite (WB) E - intra-arsenopyritic band with cataclastic to mylonitic texture with clasts of arsenopyrite (AR) cemented by galena (GL) showing a transpressive boundary; F - proliferation of transpressive dilatational microsites with galena (GL) within of arsenopyrite (RA).

Fig. 3. Petrofabric of early arsenopyrites affected by ductile-brittle shear deformation related to the remobilization and gold arrest (scale bar = 5 mm; observation MOLR N//): A - "crack-seal" texture of arsenopyrite (AR) + quartz (QZ), B - domino texture of arsenopyrite (AR) in quartz (QZ); C - helicitic sigmoid shape of arsenopyrite (AR) and pyrite (PI); D - "en échellon" opening of phyllosilicate (FS) and micro-venular chalcocopyrite in filling between clasts of arsenopyrite (WB) E - intra-arsenopyritic band with cataclastic to mylonitic texture with clasts of arsenopyrite (AR) cemented by galena (GL) showing a transpressive boundary; F - proliferation of transpressive dilatational microsites with galena (GL) within of arsenopyrite (RA).

### 3. Discussão e conclusões

Em MOLR (Fig. 4) a relação entre a sucessão de gerações de arsenopirite e sua deformação e a presença e forma das partículas de ouro, podem ser sintetizadas em 5 estádios principais.

O primeiro (Au 0) corresponde a Au reticular não

particulado (Fig. 4 A). Em imagem MEV-ER (Fig. 5) distingue-se uma zonalidade concêntrica da arsenopirite, devida a crescimento cristalino e outra, sectorial, relacionada com deformação e *annealing* onde os domínios composicionais de menor brilho podem apresentar valores de Au próximos de 400 ppm – concentração incipiente a nível reticular, sem libertação do ouro.

Os estádios seguintes (Fig. 4 B, C, D, E) expressam o ouro libertado. Por vezes observam-se partículas representativas de diferentes estádios nos mesmos cristais hospedeiros (Fig. 6). Às últimas remobilizações de Au correspondem partículas de electrum heterogêneas inclusas em veios tardios de galena.

Nos estágios tardios de deformação está referenciada uma diluição de sentido argentífero, incidente sobre os teores de Au das partículas iniciais de tipo nativo, que conduz ao aparecimento do electrum associado à mineralização galenítica, alojada em arsenopirites mais grosseiras e mais tardias (Fig. 7).

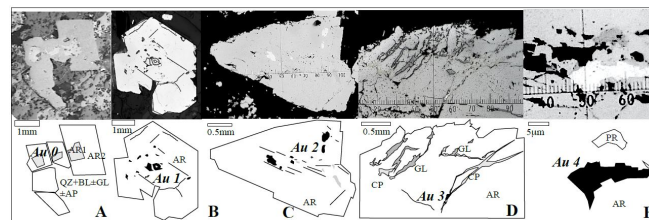


Fig. 4. Tipologia das partículas de ouro em diferentes formas de ocorrência em arsenopirite (observação em MOLR N//, excluindo A): A - Au reticular em arsenopirite (AR) e no seio de quartzo (QZ) + blenda (BL) ± galena (GL) ± apatite (AP) (Au 0 em conteúdos diferenciados induzidos por deformação e *annealing* influencia o contraste de fase óptica da arsenopirite – Ar1 distinto de Ar2 – em MOLR, com ligeiro cruzamento dos nicóis); B - Exsolução zonal de Au nativo, primitivo, automórfico (Au 1), em porções centrais da arsenopirite (AR); C - Au 2, nativo, exsudado após *annealing*; D - Au 3 (electrum) em fracção de galena (GL) => calcopirite (CP) em oclusão de rupturas *en échellon* no seio da arsenopirite cisalhada (AR); E - Au 4 heterogêneo (electrum e/ou prata dourada) em ocorrências de cinemática polifásica, dilatacional, no seio de arsenopirite com inclusões de pirrotite (PR).

Fig. 4. Types of gold particles in different forms of arsenopyrite arrest (observation MOLR N//, excluding A): A - reticular Au in arsenopyrite (AR) from quartz (QZ) + blend (BL) ± galena (GL) ± apatite (AP) paragenesis (Au 0 in differentiated contents induced by deformation and "annealing" influences the optical contrast of arsenopyrite in MOLR with slight crossing of the nicols - Ar1 distinct from Ar2); B - primitive zonal exsolution of native Au automorphic (Au1) in central portions of arsenopyrite (AR); C - Au2, native, exuded after "annealing"; D - Au3 (electrum) in galena fractionation (GL) => chalcocopyrite (CP) in occlusion of "en échellon" veins within the sheared arsenopyrite (AR); E - heterogeneous Au4 (electrum) in multistage dilatational nesting, inside arsenopyrite with inclusions of pyrrhotite (PR).

Como é sugerido em Leal Gomes (1995), parece razoável admitir que as maiores concentrações de Au se encontram em estruturas de cisalhamento menos complexas e onde estão preservadas e são abundantes, as arsenopirites dos estádios ilustrados nas figuras 4B a 4D – arsenopirites finas, parageneticamente independentes da maioria dos outros sulfuretos.



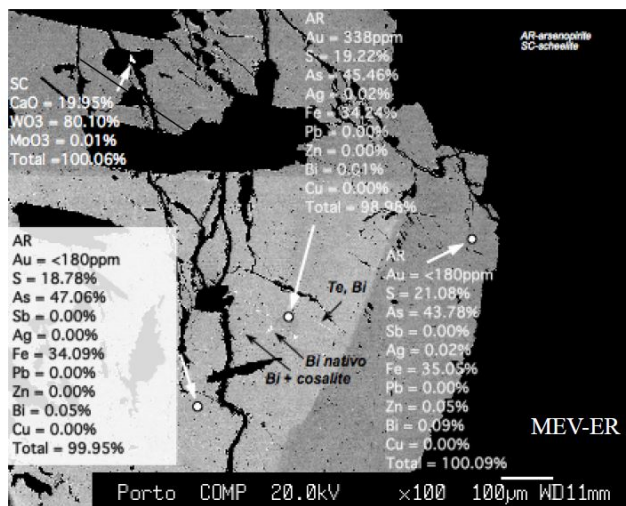


Fig. 5. Arsenopyrite inicial com zonamento epitáxico induzido por crescimento cristalino, fraccionado, e zonamento sectorial decorrente de deformação, com *annealing* associado. Notam-se variações do conteúdo de Au reticular relacionadas com *annealing-recovery* e expressões polimetálicas de Bi e Te, possivelmente com a mesma origem.

Fig. 5. Initial arsenopyrite with epitaxial zoning induced by crystal growth, fractionated, and sector zoned due to deformation associated with annealing. It's possible to see variations of the content of Au reticular related to "annealing-recovery" and polymetallic expressions of Bi and Te, possibly from the same source.

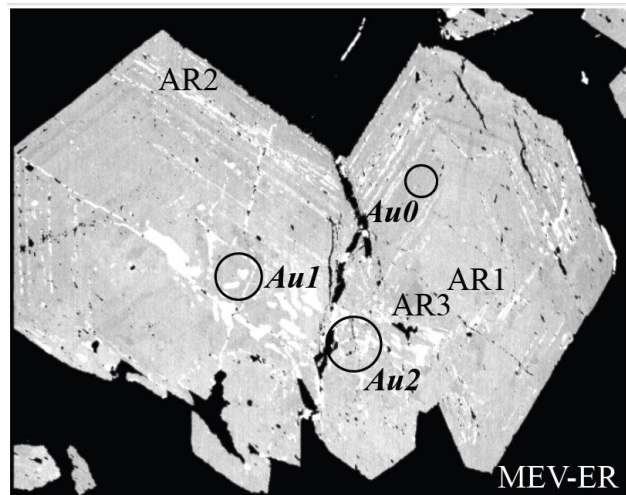


Fig. 6. Zonamento sectorial da arsenopirite com expressão interna do ouro em 3 situações cinemáticas distintas: Au 0 – ouro acolhido na rede cristalina, em *spots* de mais baixo brilho em MEV-ER (comparar com fig. 5); Au 1 – ouro fino de exsudação por *annealing-recovery* similar a 4B; Au 2 – ouro exsudado em acolhimentos curvilíneos dilatacionais similares a 4C. Lado maior da foto = 2mm.

Fig. 6. Sectorial zoning of arsenopyrite with gold inner expression in 3 different kinematic situations: Au 0 - gold located in the arsenopyrite lattice, in "spots" of lowest brightness in SEM-ER (compare with Figure 5.), Au 1- fine gold exudation by "annealing - recovery" similar to 4B; Au2- exudate gold in curvilinear dilatational nesting similar to 4C. Larger border of the photo = 2mm.

Relativamente aos níveis topográficos de exumação dos cisalhamentos (Fig. 1), às cotas mais elevadas actuais afloram níveis da estrutura em duplex mais complexos do ponto de vista paragenético e afectados por diluição aurífera, portanto, possivelmente, com teores de Au relativamente mais baixos.

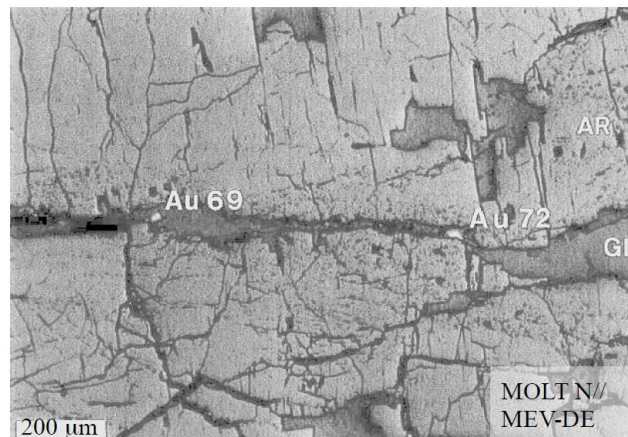


Fig. 7. Microlocalizações de geometria transtensiva do electrum em veios de galena acolhidos em fracturas da arsenopirite com indicação de conteúdos de referência de Au nas partículas de electrum.

Fig. 7. Transtensive geometry microsites of electrum in galena veins hosted in fractures of arsenopyrite with indication of the reference content of Au in electrum particles.

## Referências

- Dias, P., 2012. *Análise estrutural e paragenética de produtos litológicos e mineralizações de segregação metamórfica. Estudo de veios hiperaluminosos e protólitos poligénicos Silúricos da região da Serra de Arga (Minho)*. Tese de doutoramento, Universidade do Minho (não publicada), 615 p.
- Leal Gomes, C., 1994. *Estudo estrutural e paragenético de um sistema pegmatóide granítico - O campo filoniano de Arga - Minho (Portugal)*. Tese de doutoramento, Universidade do Minho (não publicada), 695 p.
- Leal Gomes, C., 1995. Actividade tardi-hercínica e mineralizações no duplex peri-diapírico oriental da serra de Arga - Minho - Portugal. *XIII RGOP/PICG 319-320 Setembro 1995 Comunicações*, Salamanca, 81-85.
- Leal Gomes, C., Gaspar, O.C., 1992. Mineralizações filonianas associadas a cisalhamentos pós-pegmatóides do campo aplito-pegmatítico de Arga - Minho. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, **781**, 31-47.
- Leal Gomes, C., Gaspar, O.C., 1993. Tipos de expressão aurífera no lineamento Argas-Cerquido - Sector proximal E do campo filoniano de Arga - Minho - Norte de Portugal. *IX Semana de Geoquímica e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Porto*, 243-246.