

Texturas associadas com deformação e metamorfismo  
(Mobilização & Remobilização, Recristalização)

Lena Virgínia Soares Monteiro  
Rafael Rodrigues de Assis

GRAFITA

61 μ

# Comportamento e Reologia dos Sulfetos

## Tempo para atingir equilíbrio

Silicatos e óxidos se comportam de forma mais refratária que os sulfetos

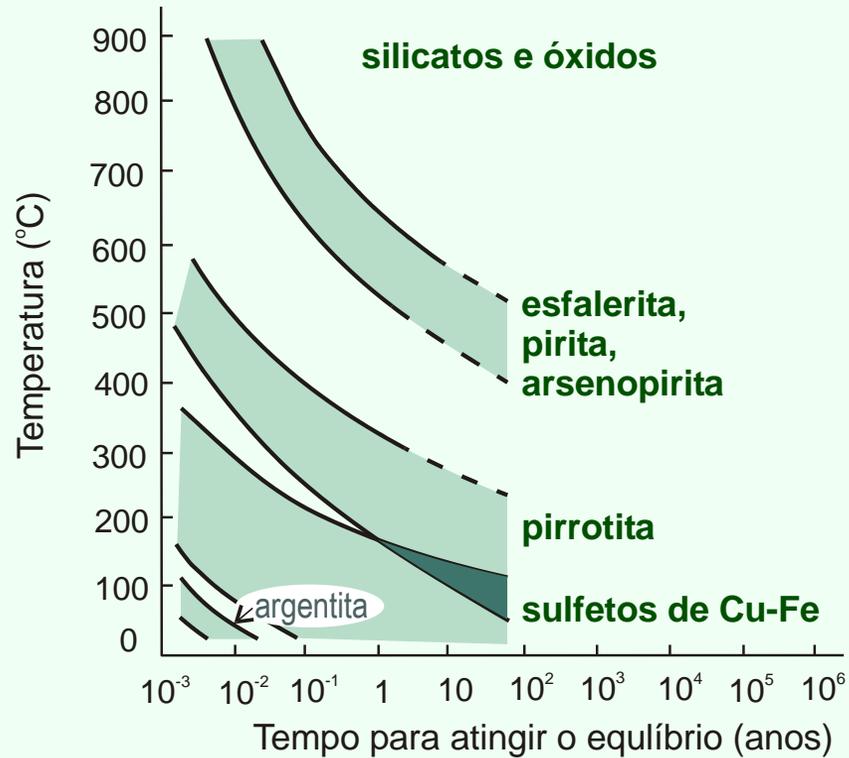
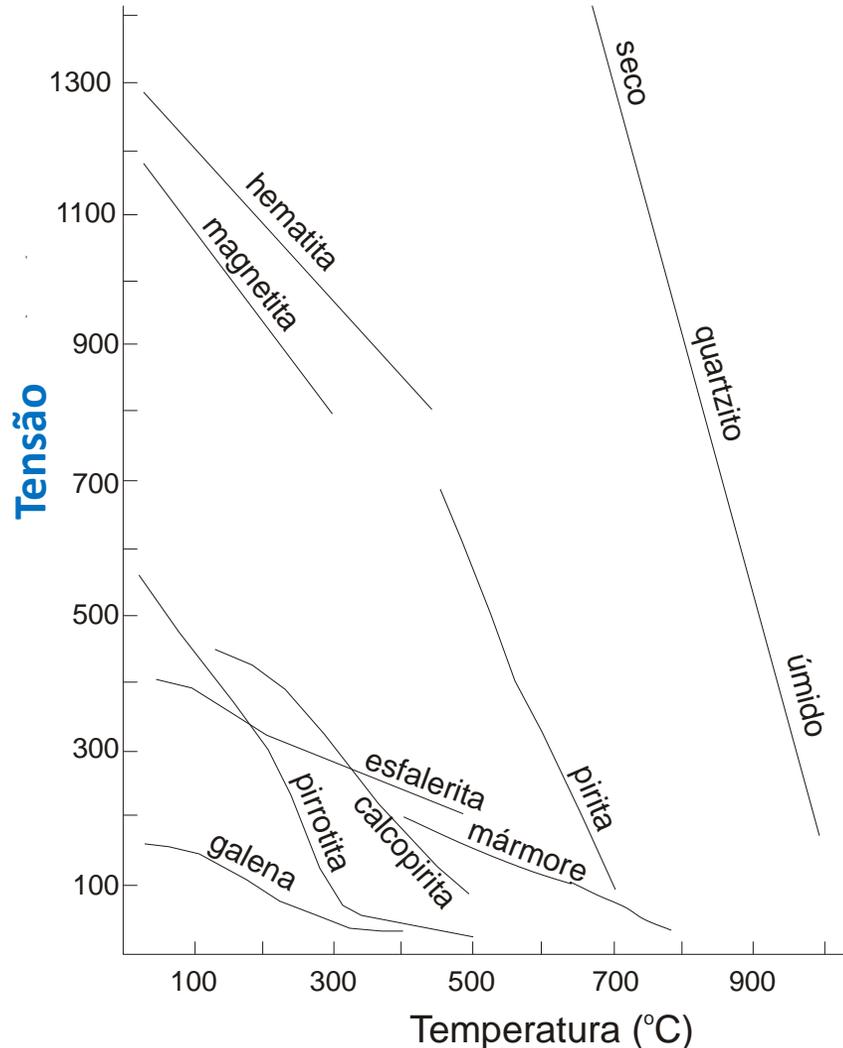


Figura 1.3

## Transição rúptil-dúctil em sulfetos, óxidos e silicatos



Entre os sulfetos, alguns são mais refratários que outros

**Efeitos de esforços diferenciais (deformação):**  
**Fluxo mecânico** é observado mais rapidamente em sulfetos que tendem a se comportar plasticamente (sequência do mais plástico ao menos: galena, calcosita, bornita, pirrotita, calcopirita) – Fácies xisto verde a anfibolito  
Nas mesmas condições: **esfalerita desenvolve maclas** e **pirita tende a se fraturar**

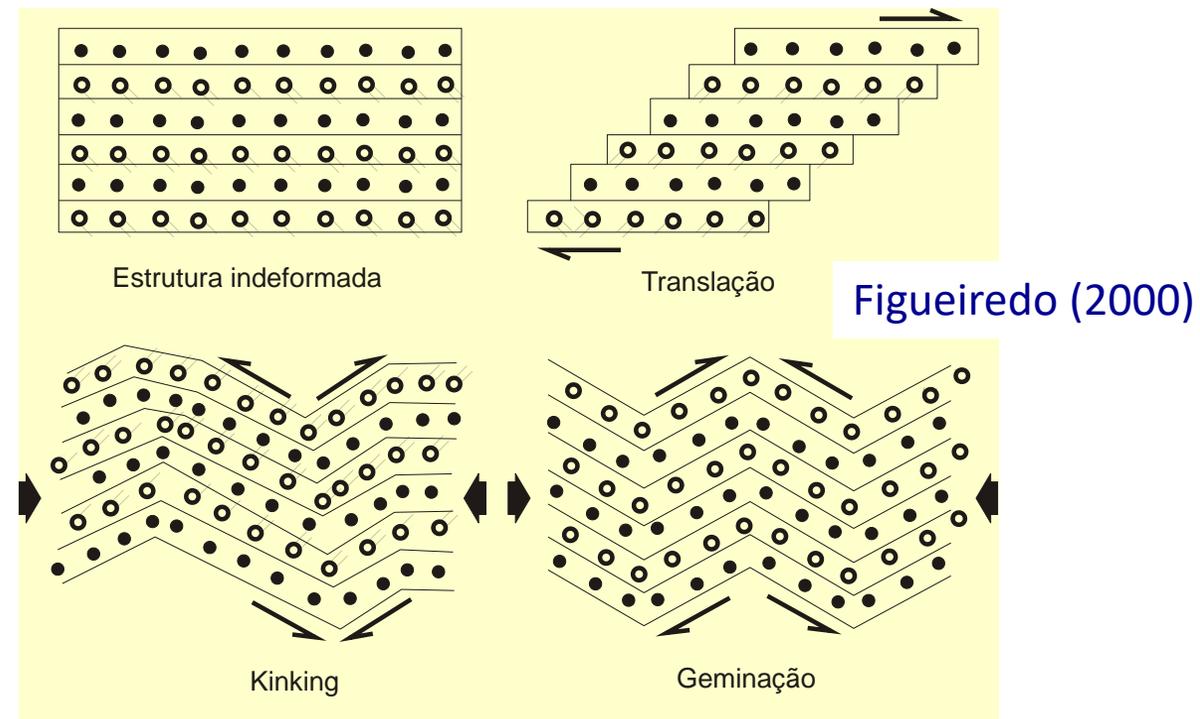
## Comportamento e Reologia dos Sulfetos: Fluxo mecânico

A galena, mais dúctil, é injetada em fraturas na pirita. Os dois minerais podem ter se formado ao mesmo tempo, porém na mesma temperatura, enquanto a galena apresenta comportamento mais dúctil, a pirita apresenta comportamento rúptil e tende a se fraturar.

Se a temperatura for elevada, os sulfetos tendem a se **recristalizar** e texturas de fluxo mecânico não são mais preservadas

# Mecanismos de Deformação

- **Fatores:** esforço diferencial, taxa de deformação, temperatura, granulação, pressão de fluidos, atividade dos componentes;
- **Mecanismos:** fluxo cataclástico, fluxo de deslocamento, *kinking*, geminação, fluxo mecânico, transferência de massa por difusão, dissolução sob pressão, deslizamento nos contatos de grãos;
- **Produtos:** fluxo cataclástico (brecha cataclástica), deslocamento e maclas, recristalização dinâmica e estática, difusão atômica, superplasticidade

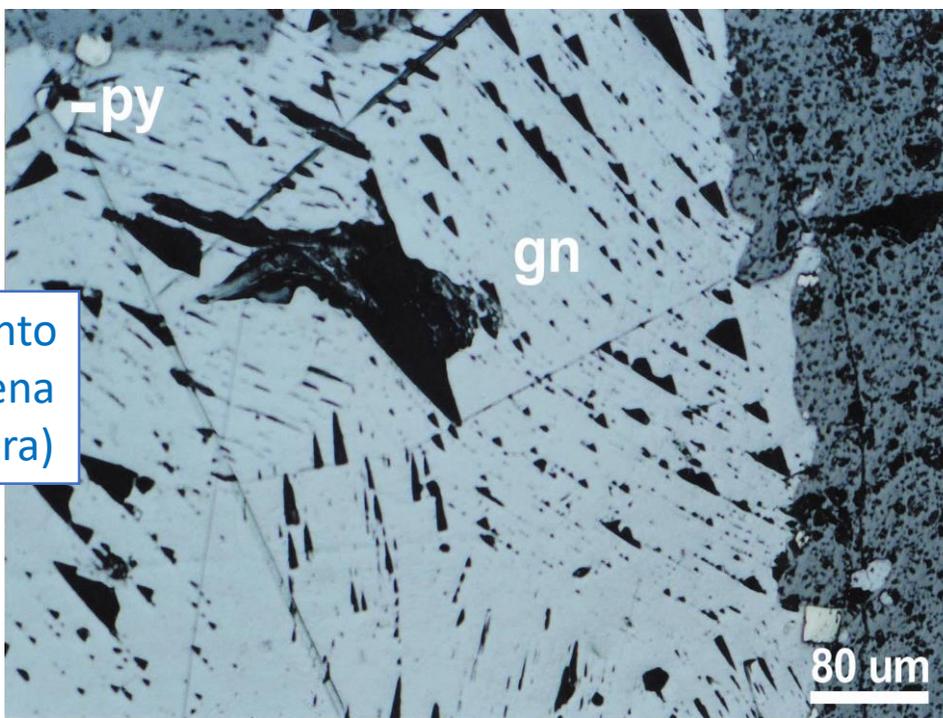


## Efeitos do metamorfismo:

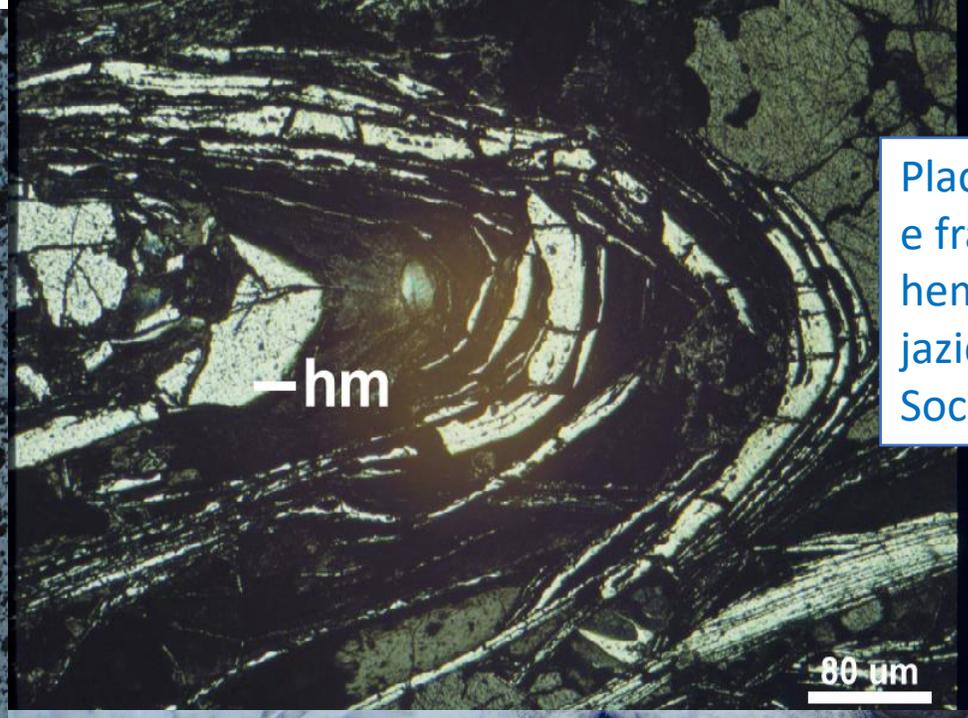
Crescimento dos grãos por *annealing*: depende da granulação inicial, espécie mineral e temperatura;

## Mobilização (ou remobilização) por Fluxo mecânico:

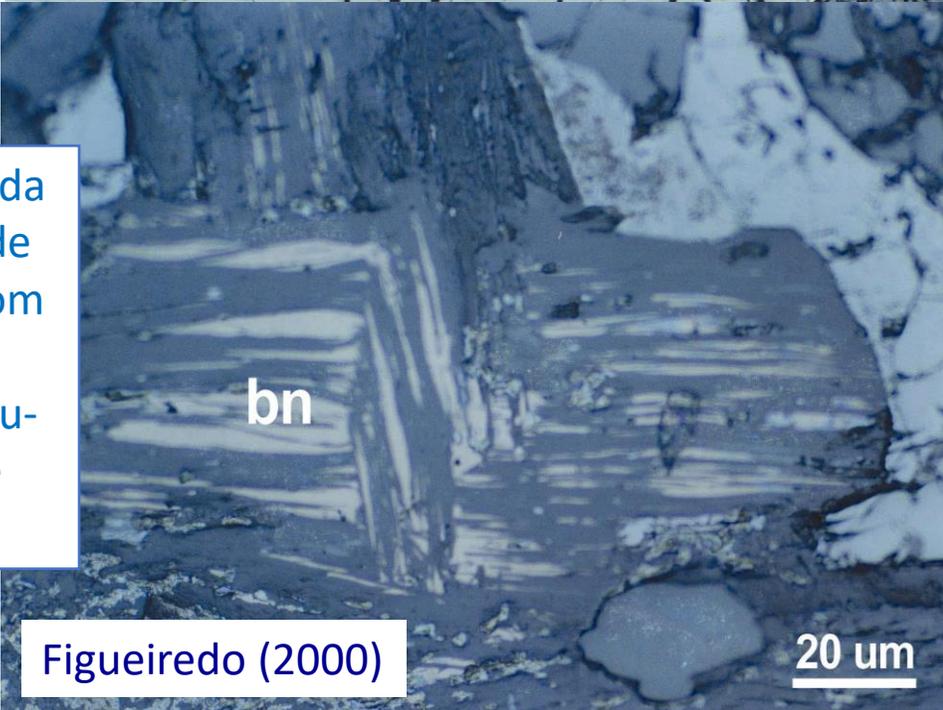
Minerais mais refratários (pirita, esfalerita) podem ser transportados em meio aos sulfetos em estado plástico (galena, pirrotita, calcopirita) – transporte mecânico do minério em direção a zonas de alívio de pressão (e.g. charneira de dobras);



Comportamento dúctil em galena (Vale do Ribeira)

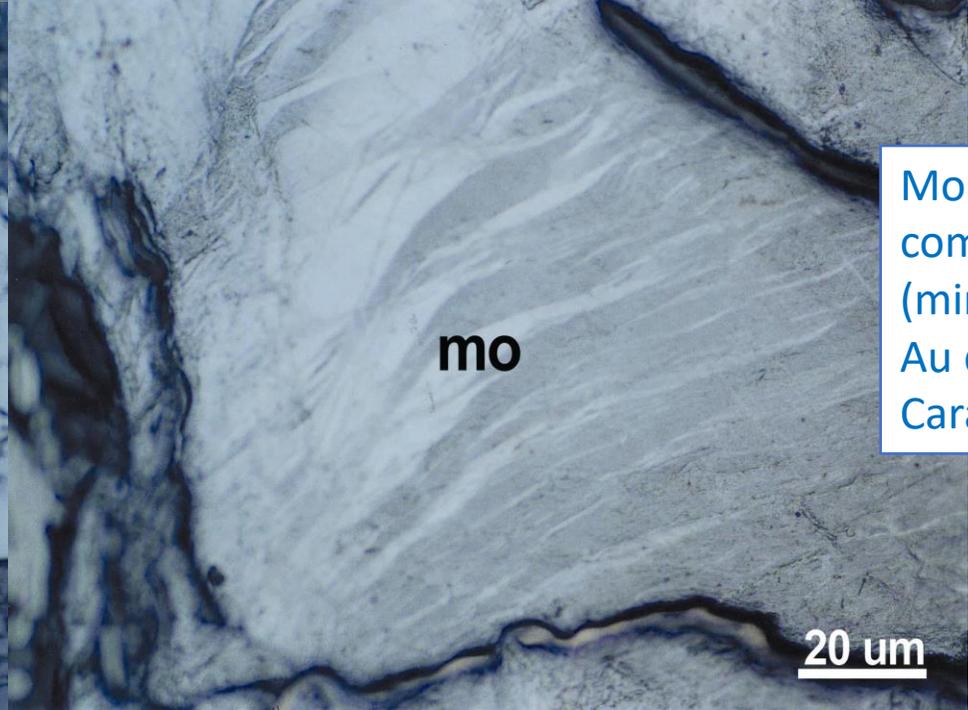


Placas dobradas e fraturadas de hematita da jazida de Gongo Soco, MG



Bornita injetada entre placas de filossilicato com *kink band* (minério de Cu-Au de Serrote da Lage, AL)

Figueiredo (2000)



Molibdenita com *kink band* (minério de Cu-Au de Salobo, Carajás)

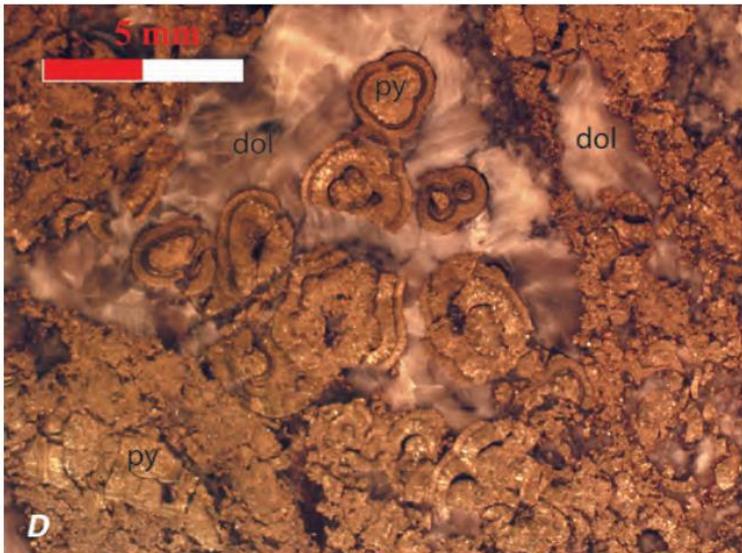
# Depósito de sulfetos maciços de Zn-Pb-Ag-Au-Cu Greens Creek, Alaska

## Depósito polimetálico de sulfetos maciços singenético (VMS)

Zoneamento primário: Cu-Au-As, Zn-Pb-Ag, Pb, Ag, Au-Zn-Pb-Ag  
(*Zone refining*)

### *Metamorfismo regional em fácies xisto verde e deformação com dobramentos polifásicos e cisalhamento*

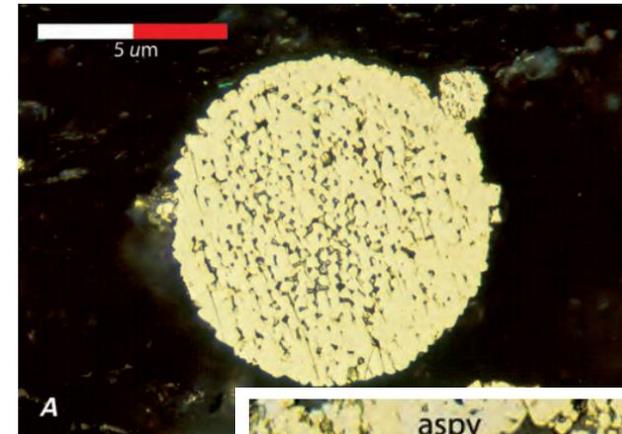
- ✓ 30% do minério preserva mineralogia e texturas primárias;
- ✓ 70% do minério apresenta texturas de remobilização metamórfica e recristalização;
- ✓ Metamorfismo resultou em aumento dos teores;
- ✓ Cataclase, recristalização (*annealing*), dissolução sob pressão



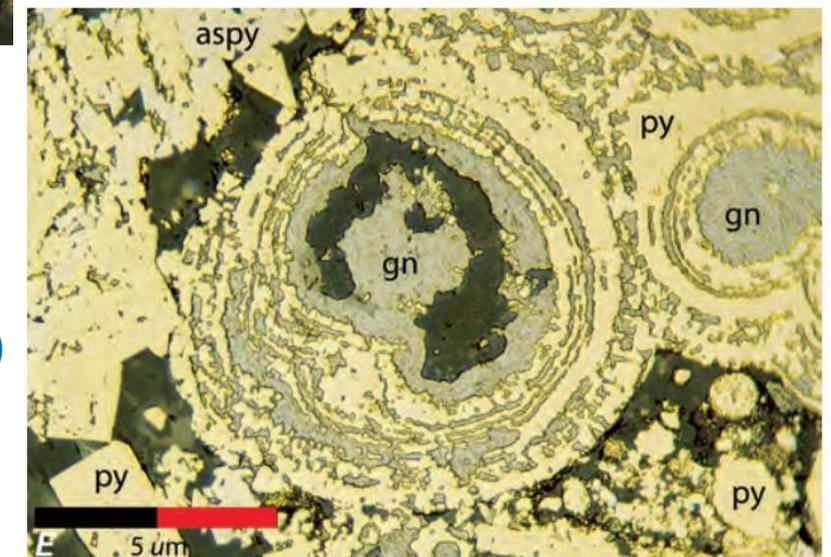
*Textura nodular e coloforme, primária*

## TEXTURAS PRIMÁRIAS

### *Textura framboidal, coloidal, dendrítica e nodular*



*Pirita framboidal*



*Sulfetos coloformes (py, aspy, gn)*

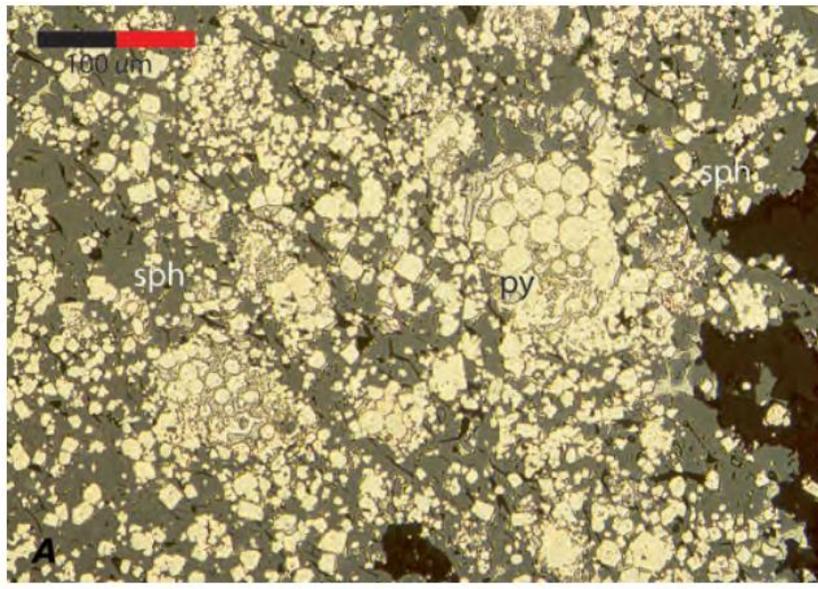
# Depósito de sulfetos maciços de Zn-Pb-Ag-Au-Cu Greens Creek, Alaska

## Texturas de recristalização incipiente

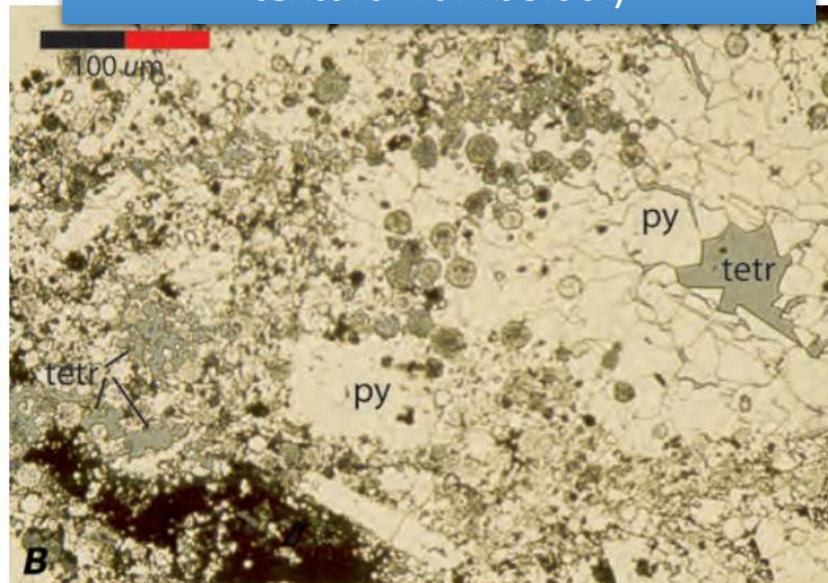
### Agregados poliframboidais, textura em atol e esponjosa

- Relíquias de textura coliforme ou framboidal são comuns;
- Pirita com textura em atol se forma a partir da pirita framboidal ou coliforme durante a deformação;
- Coalescência de agregados poliframboidais e pirita esponjosa origina maiores cristais sem inclusões;

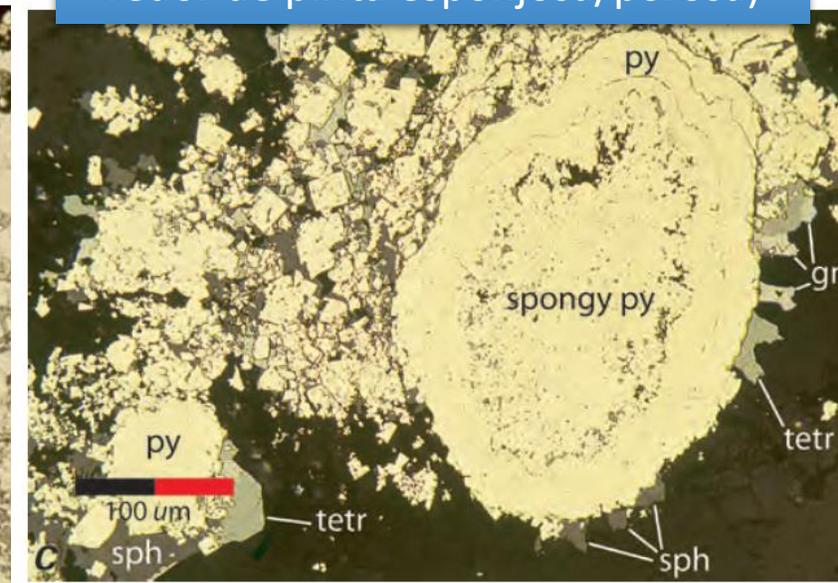
Agregados poliframboidais



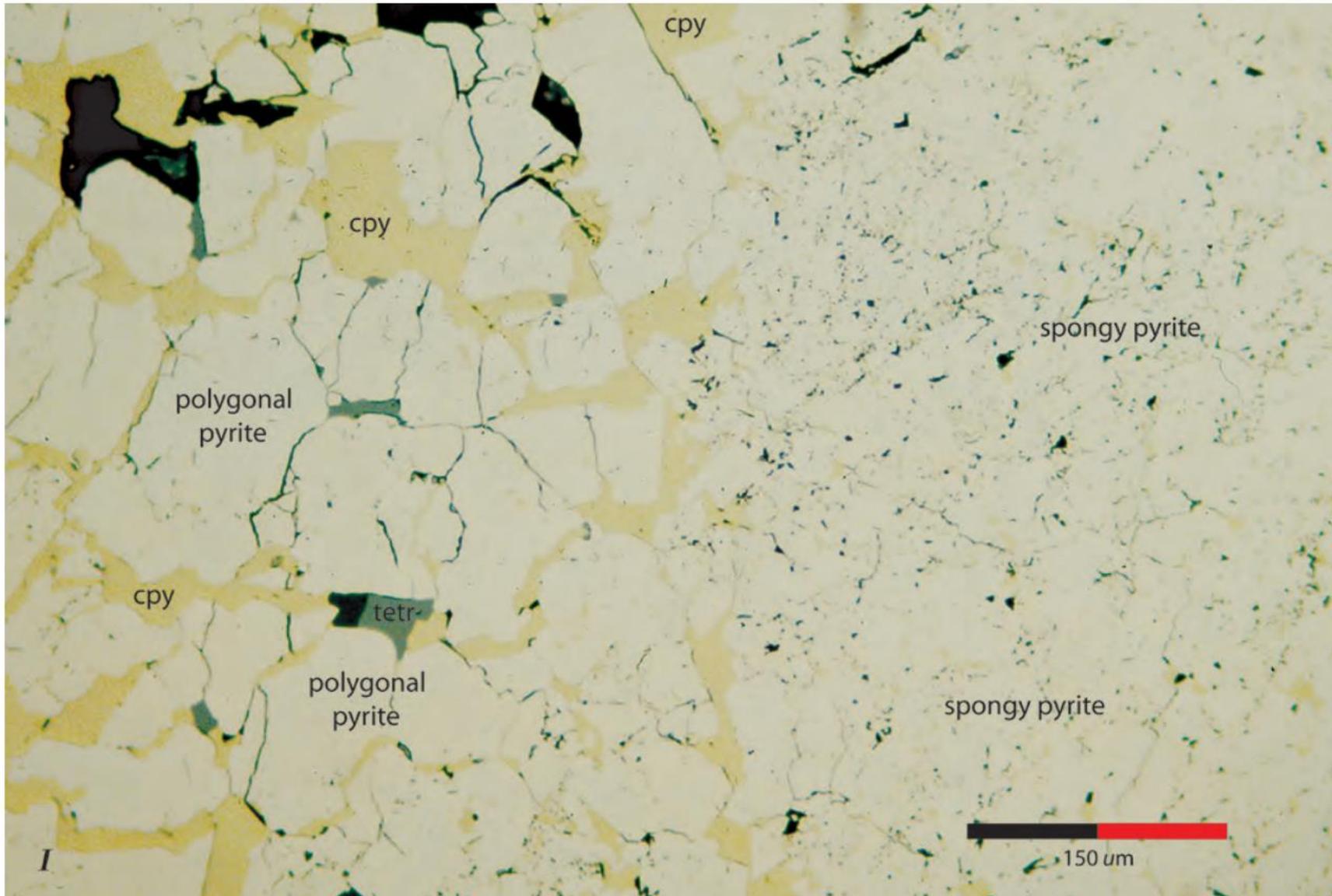
Textura esponjosa (com relíquia de textura framboidal)



Textura em atol (borda límpida ao redor de pirita esponjosa/porosa)



## Progressão da recristalização



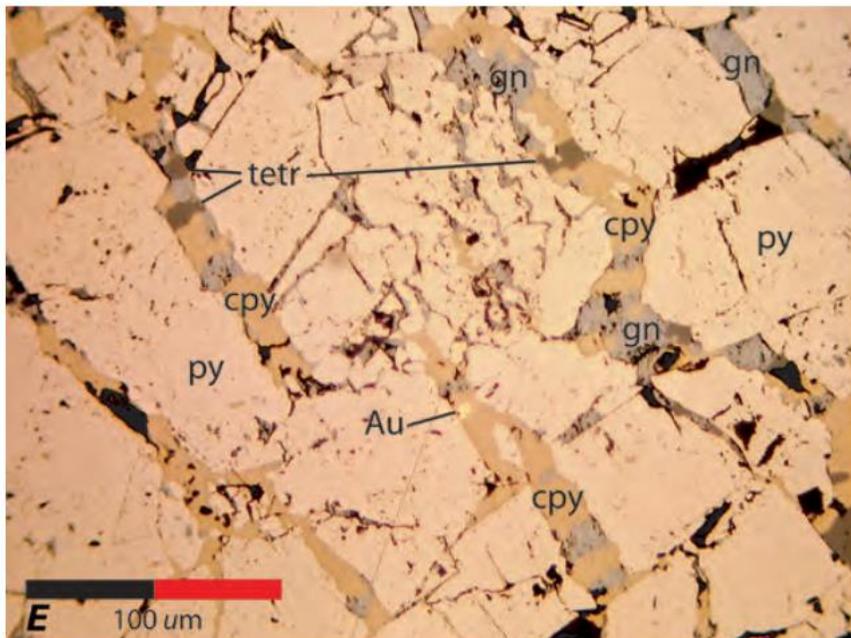
*Progressão de massas de pirita com textura esponjosa e numerosas pequenas inclusões de calcopirita à direita para limpar massas monominerálicas de pirita com contornos poligonais e espaços intercristais preenchidos com calcopirita e tetraedrita anédrica à esquerda*

# Depósito de sulfetos maciços de Zn-Pb-Ag-Au-Cu Greens Creek, Alaska

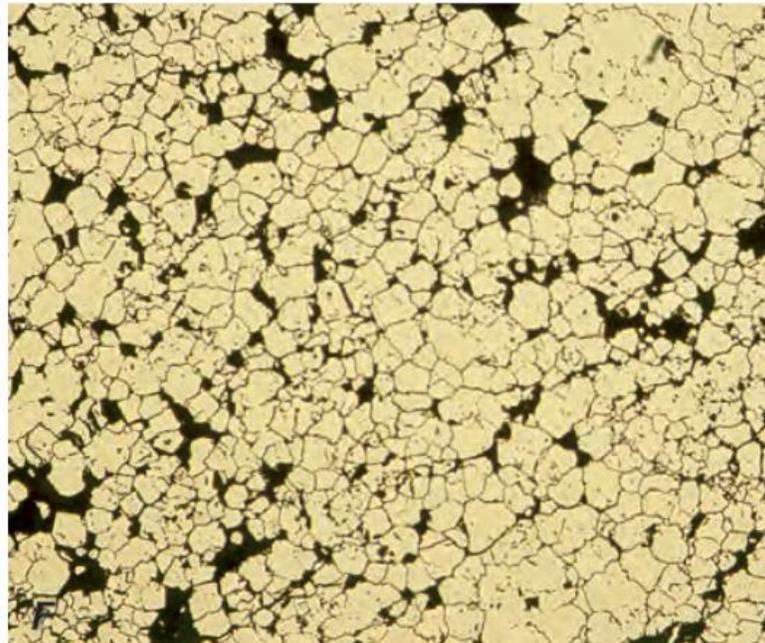
## Texturas de recristalização avançada

- Aumento da granulação, textura poligonal, hábito euhédrico na pirita;
  - Formação ou remobilização de minerais de metais preciosos

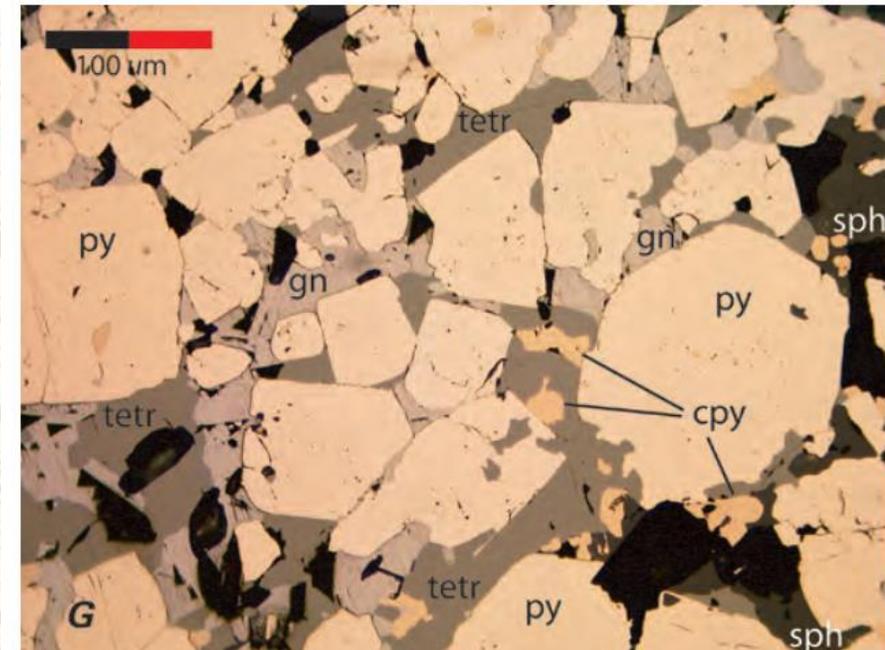
Vênulas de calcopirita (cpy), tetraedrita (tetr), galena (gn) e ouro amarelo (Au) cortando pirita recristalizada



Pirita limpa, completamente recristalizada, de textura poligonal



Pirita euédrica recristalizada em uma matriz de calcopirita, galena, tetraedrita e esfalerita

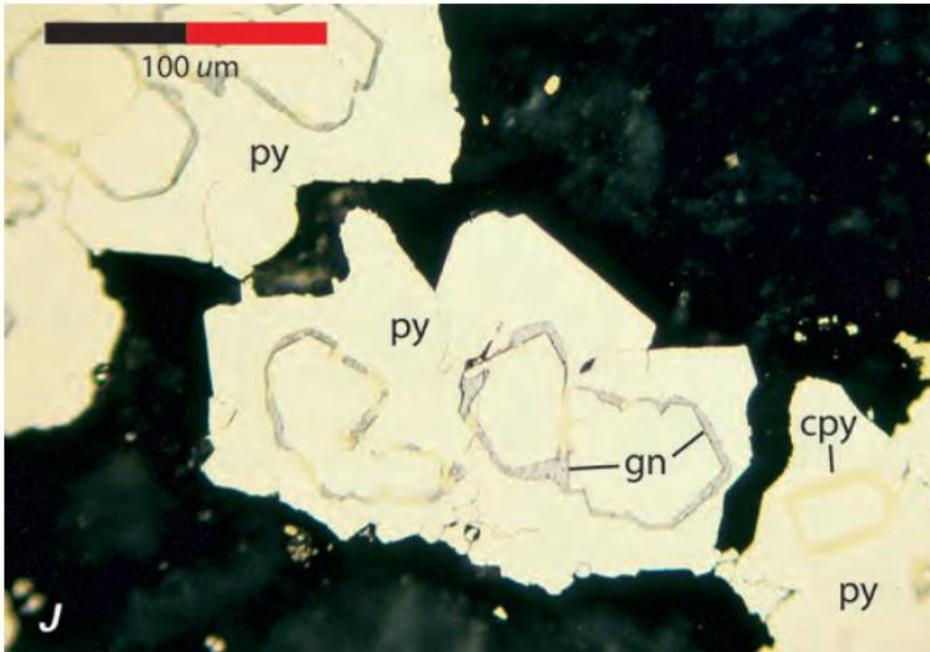


# Depósito de sulfetos maciços de Zn-Pb-Ag-Au-Cu Greens Creek, Alaska

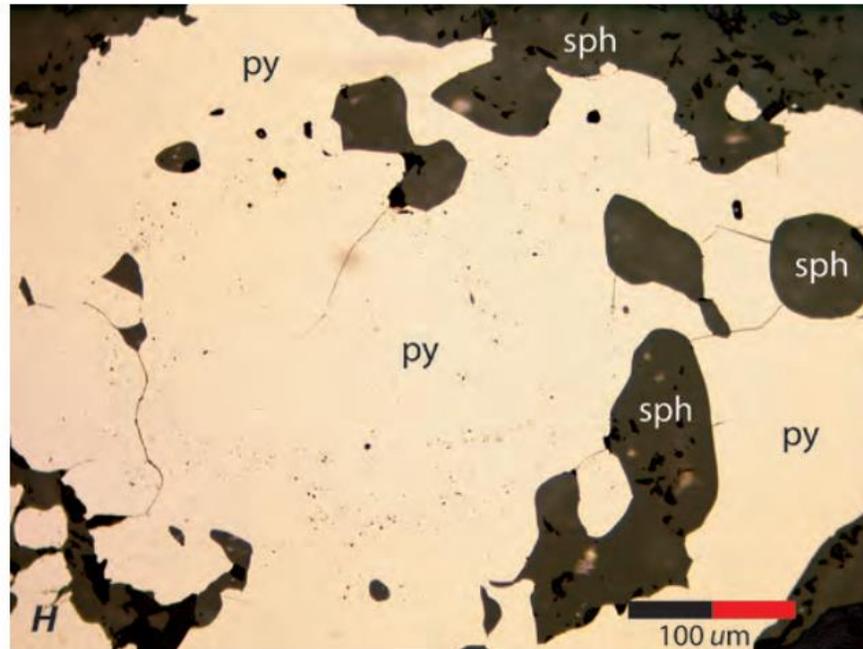
## Texturas de recristalização avançada

[https://pubs.usgs.gov/pp/1763/downloads/PP1763\\_Chapter9.pdf](https://pubs.usgs.gov/pp/1763/downloads/PP1763_Chapter9.pdf)

Pirita limpa e recristalizada com zonas de crescimento discretas de calcopirita e galena em forma de atol



Pirita anédrica limpa e recristalizada com inclusões arredondadas de esfalerita



## Feições relacionados à deformação:

- ✓ Brechas com fragmentos de pirita em matriz constituída por sulfetos mais dúcteis e pirita mais fina;
- ✓ Sombra de pressão ao redor de fragmentos preenchidas por sulfetos mais dúcteis;
- ✓ Microfraturas intergranulares preenchidas por sulfetos;
- ✓ **Annealing recrystallization:**
- ✓ Formação de cristais subeuédricos de pirita (ou sp) límpida sem finas inclusões a partir da pirita esponjosa (com muitas inclusões);
- ✓ Inclusões maiores com formas arredondadas na py
- ✓ Cristais com contatos poligonizados.

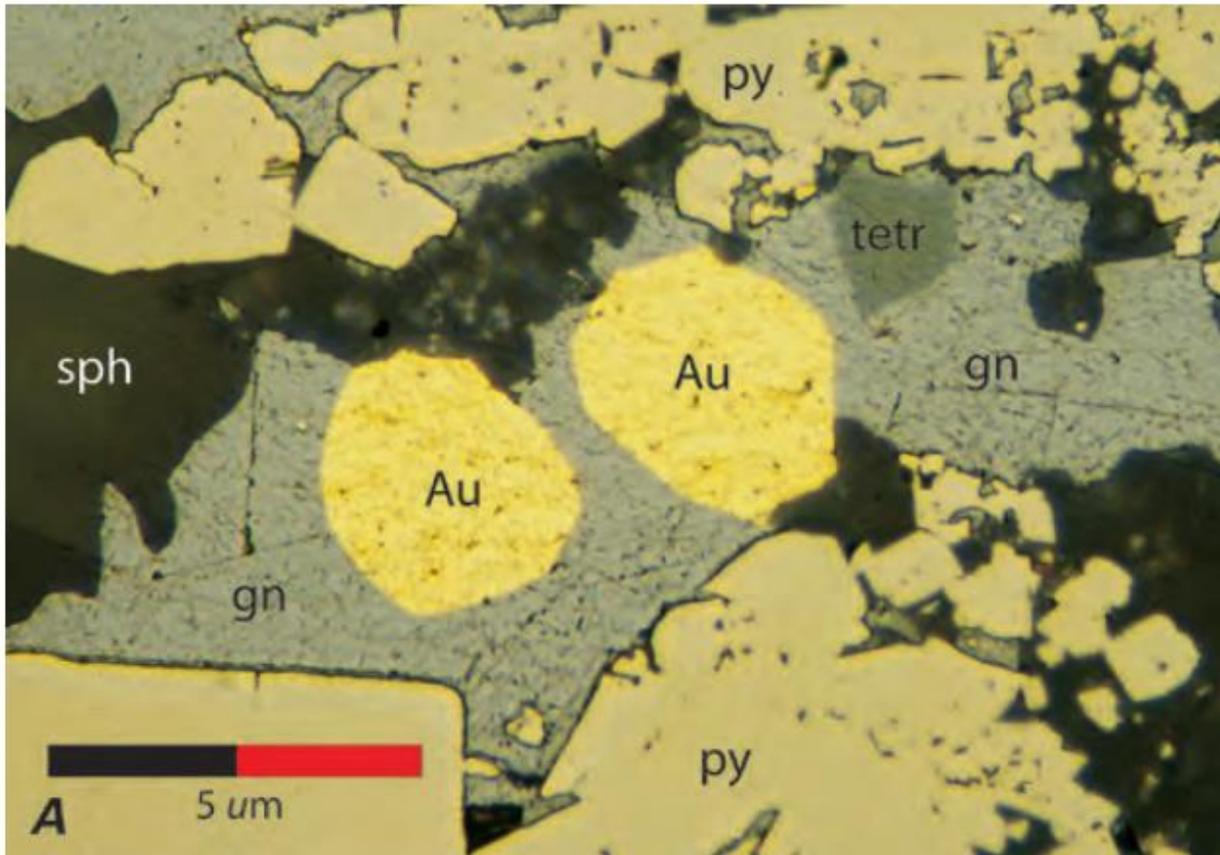
## Remobilização física (em estado sólido) vs. remobilização química (intermediada por fluidos)

Remobilização física: segregação de sulfetos por fluxo dúctil; injeção de sulfetos dúcteis em fraturas;

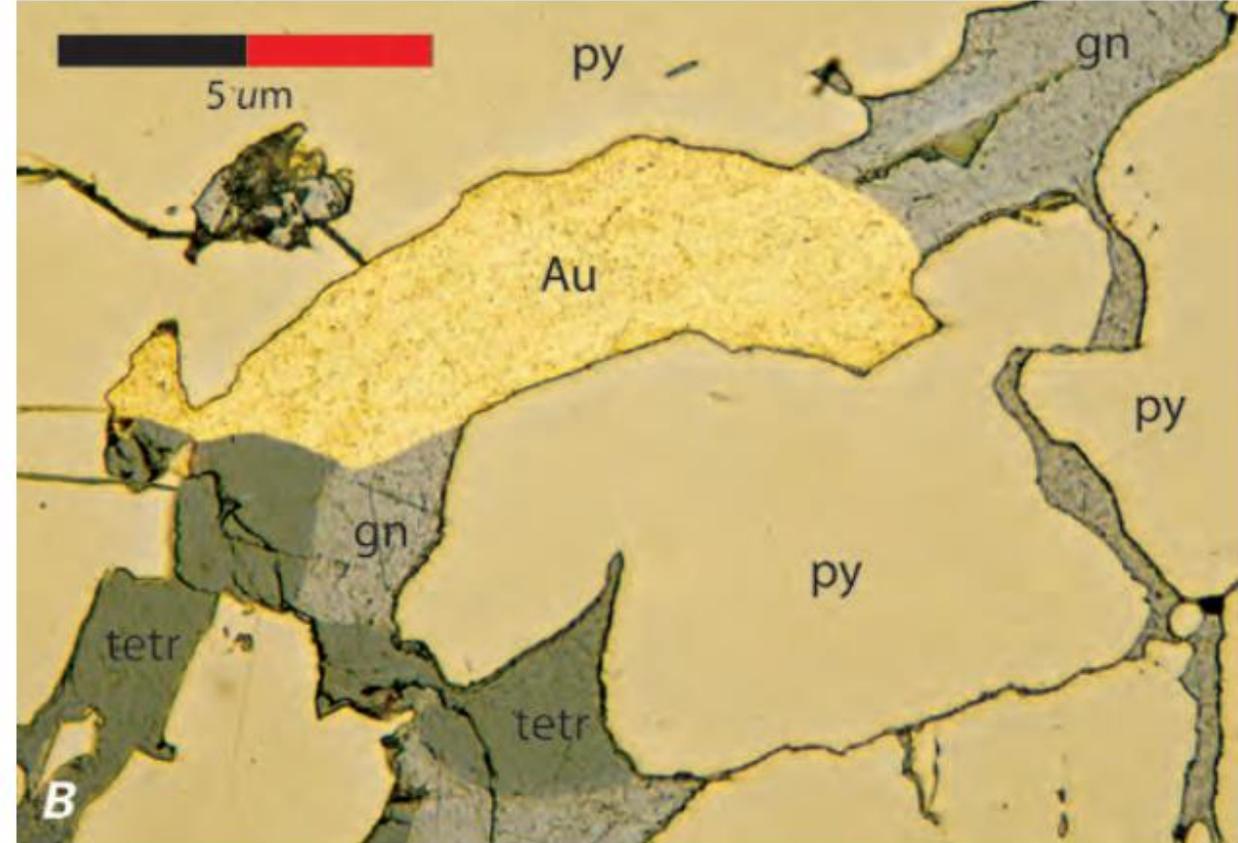
Remobilização química: vênulas/veios preenchidas por sulfetos

## Depósito de sulfetos maciços de Zn-Pb-Ag-Au-Cu Greens Creek, Alaska

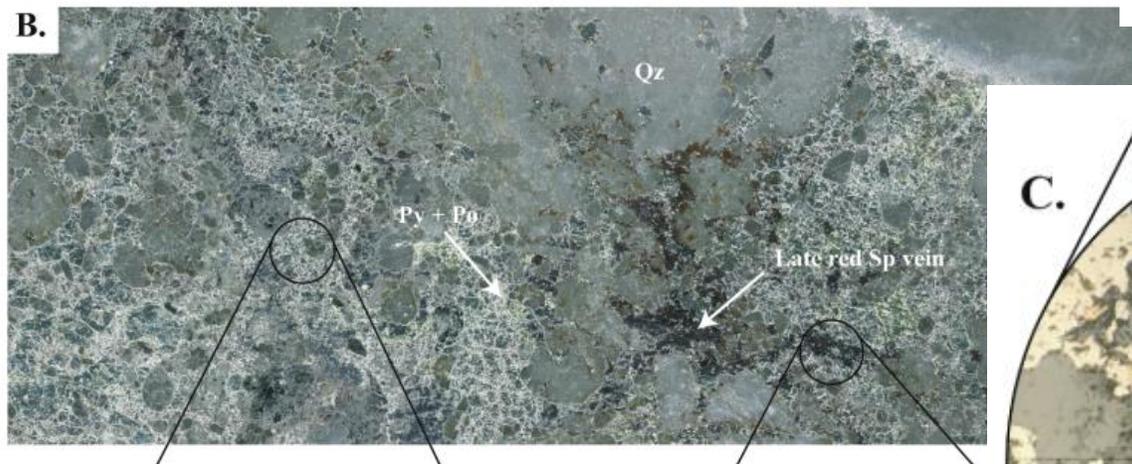
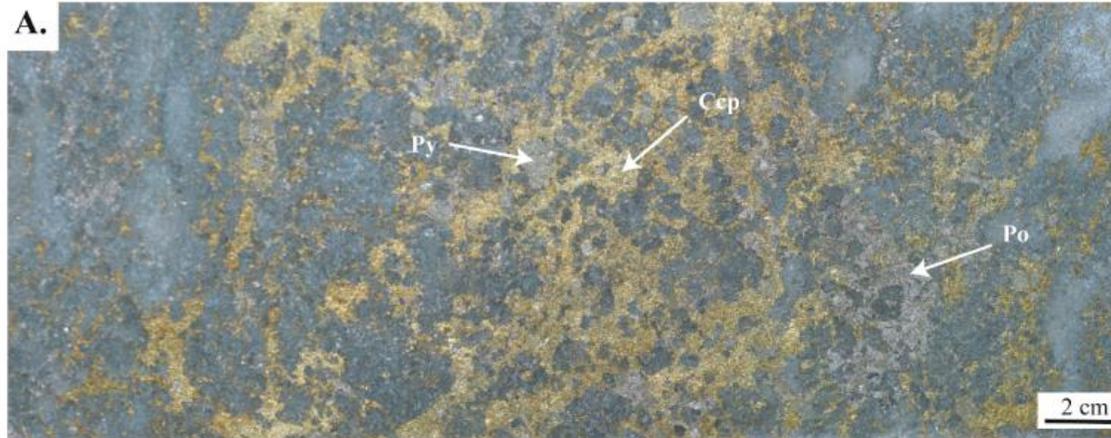
Texturas de recristalização avançada: refino e aumento do teor de ouro



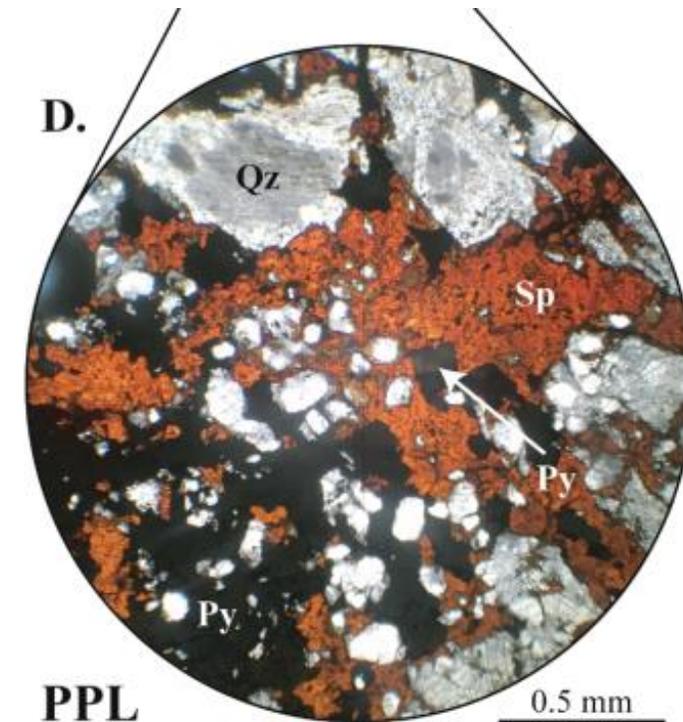
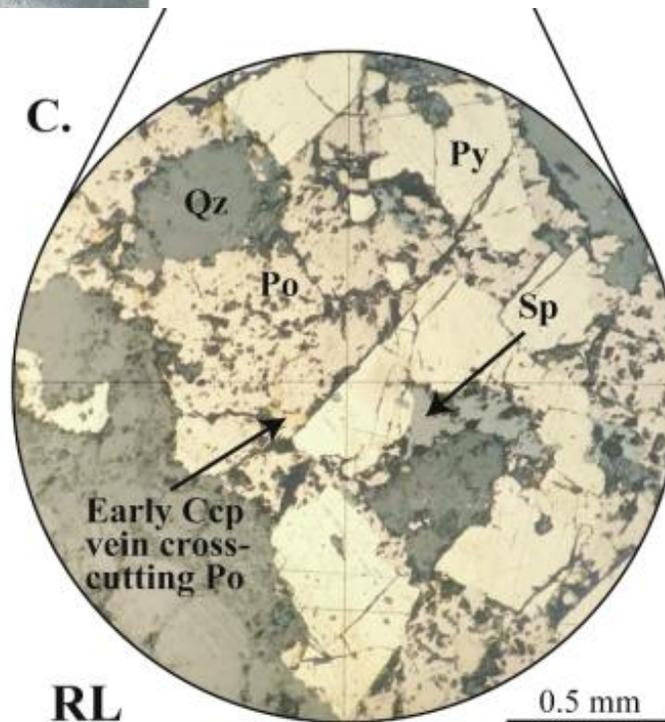
Grãos arredondados de ouro na matriz de esfalerita (sph), galena (gn) e tetrahedrita (tetr)



Grande grão de ouro, galena e tetrahedrita preenchendo fissura pirita recristalizada



**Texturas de remobilização:** pirrotita é mobilizada na transição rúptil-dúctil, seguida por calcopirita e esfalerita. Pirita não é mobilizada e se comporta rúptilmente durante a deformação.



Ccp = chalcopyrite, Py = pyrite, Po = pyrrhotite.

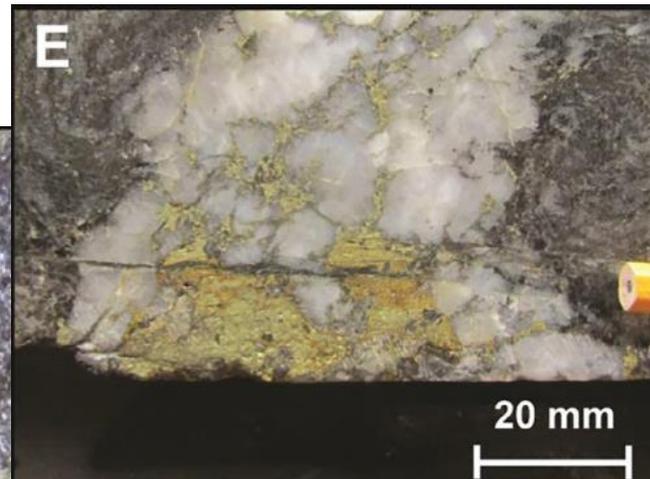
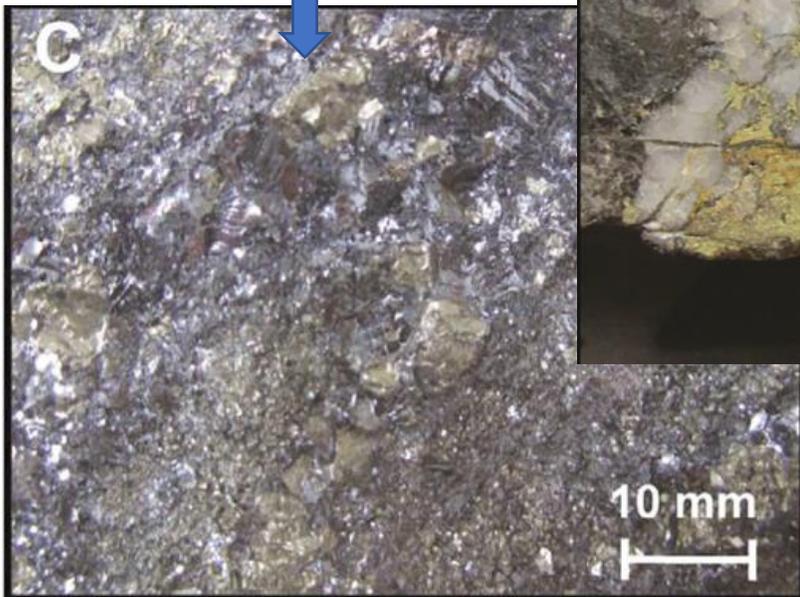
Petrogenesis and geochemical halos of the amphibolite facies, Lower Proterozoic, Kerry Road volcanogenic massive sulfide deposit, Loch Maree Group, Gairloch, NW Scotland

D.A. Drummond<sup>a,b,\*</sup>, J. Cloutier<sup>a,c</sup>, A.J. Boyce<sup>b</sup>, A.R. Prave<sup>a</sup>

## Depósito de Zn-Pb-Cu-(Au-Ag) de Falun, Suécia

- ✓ Deformação polifásica e metamorfismo na fácies anfibolito inferior;
- ✓ Encaixantes: rochas metamórficas com biotita-**cordierita-antofilita** e clorita-talco xistos;
- ✓ Remobilização mecânica e química do minério;
- ✓ Veios auríferos hidrotermais formados após o pico metamórfico;
- ✓ Ouro pode ter sido liberado da estrutura da pirita primária durante o metamorfismo/recristalização;

Galena, esfalerita e pirita grossas no minério maciço



Veio de quartzo aurífero, tardio



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

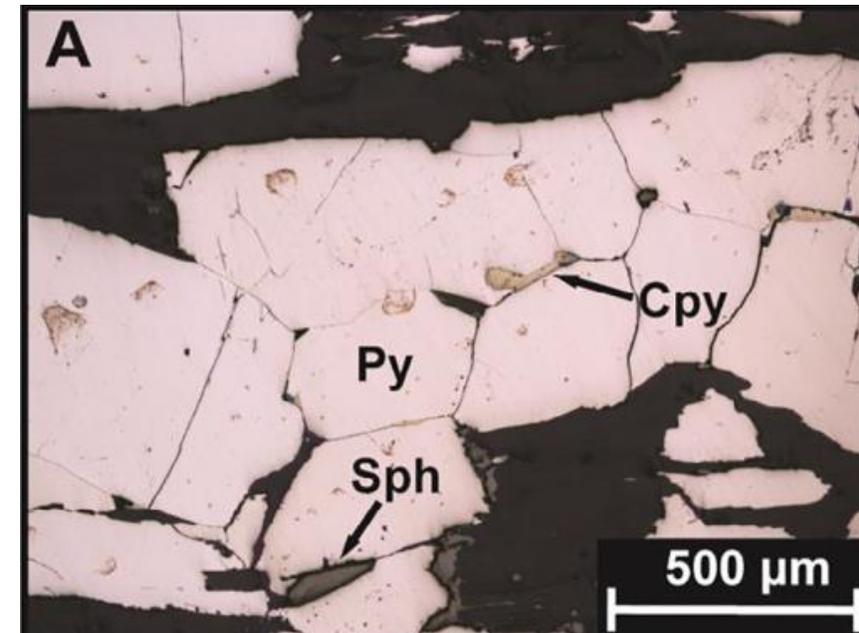
Ore Geology Reviews

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/oregeorev](http://www.elsevier.com/locate/oregeorev)



Syn-tectonic sulphide remobilization and trace element redistribution at the Falun pyritic Zn-Pb-Cu-(Au-Ag) sulphide deposit, Bergslagen, Sweden

Tobias C. Kampmann<sup>a,\*</sup>, Nils F. Jansson<sup>a</sup>, Michael B. Stephens<sup>a</sup>, Paul H. Olin<sup>b</sup>, Sarah Gilbert<sup>b</sup>, Christina Wanhainen<sup>a</sup>



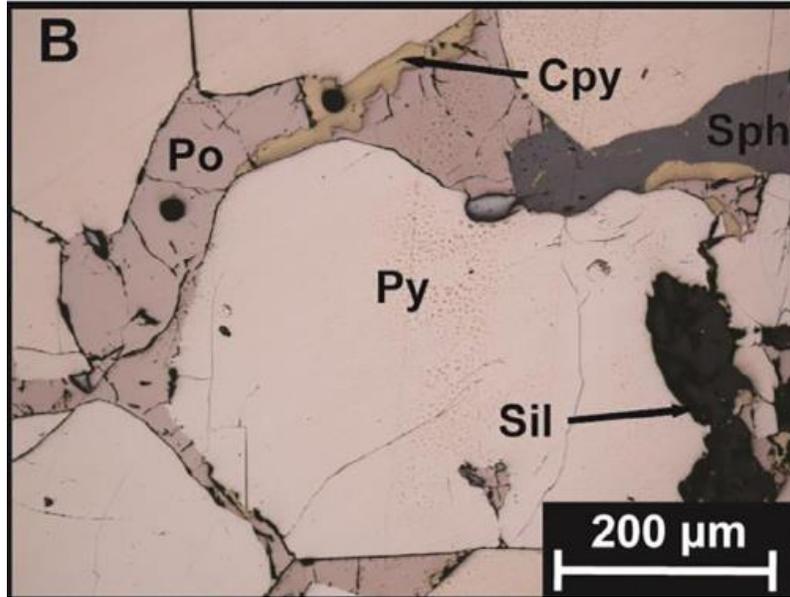
**Recristalização devido à redução da área de limite de grão  
(*grain boundary area reduction*)**

Grãos subédricos, grossos, de pirita, com contatos entre grão de 120°, com esfalerita e calcopirita intersticiais (mineralização maciça de sulfeto). Os grãos de pirita mostram rachaduras de impacto (*impingement cracks*) no contato com outros grãos de pirita.

# Depósito de Zn-Pb-Cu-(Au-Ag) de Falun, Suécia

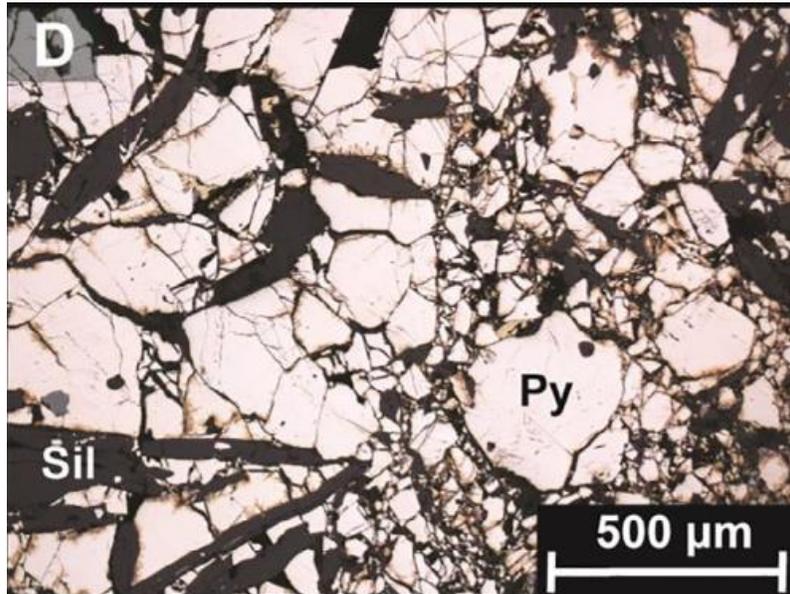
Kampmann *et al.* (2018) *Ore Geology Reviews*, 96:48-71.

Pirita subédrica, pobre em inclusão, envolvida por pirrotita, esfalerita e calcopirita. Os grãos de pirita apresentam rachaduras de impacto.



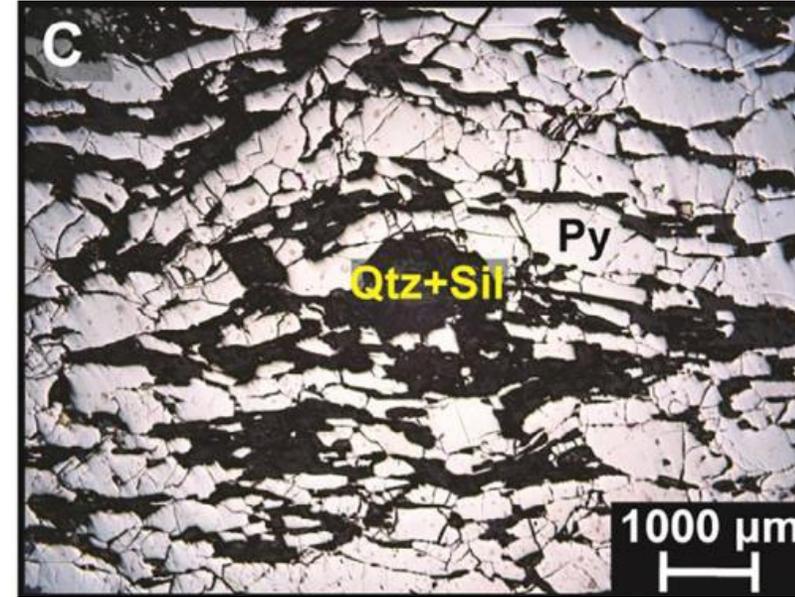
Pirita fragmentada em domínio com textura cataclástica

**Deformação rúptil da pirita ocorreu durante o estágio retrometamórfico**



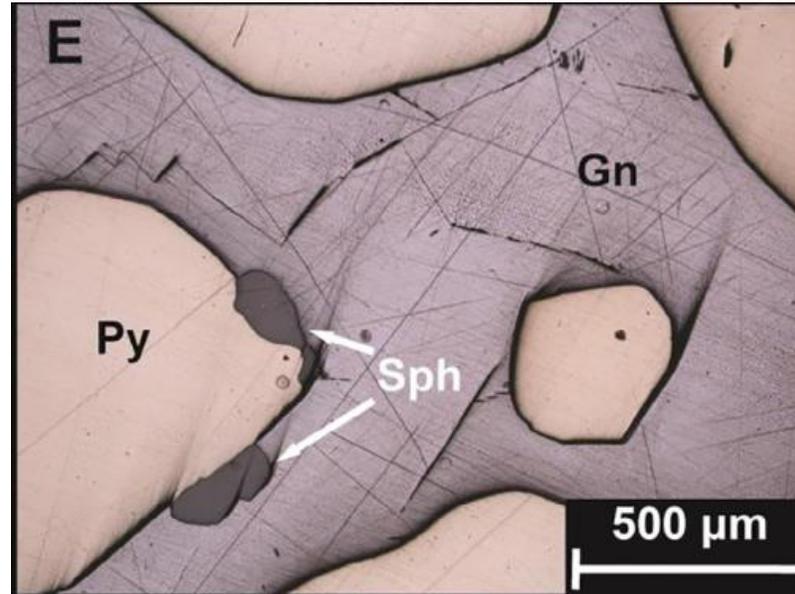
Grãos de pirita alongados, orientados juntamente com quartzo-sillimanita

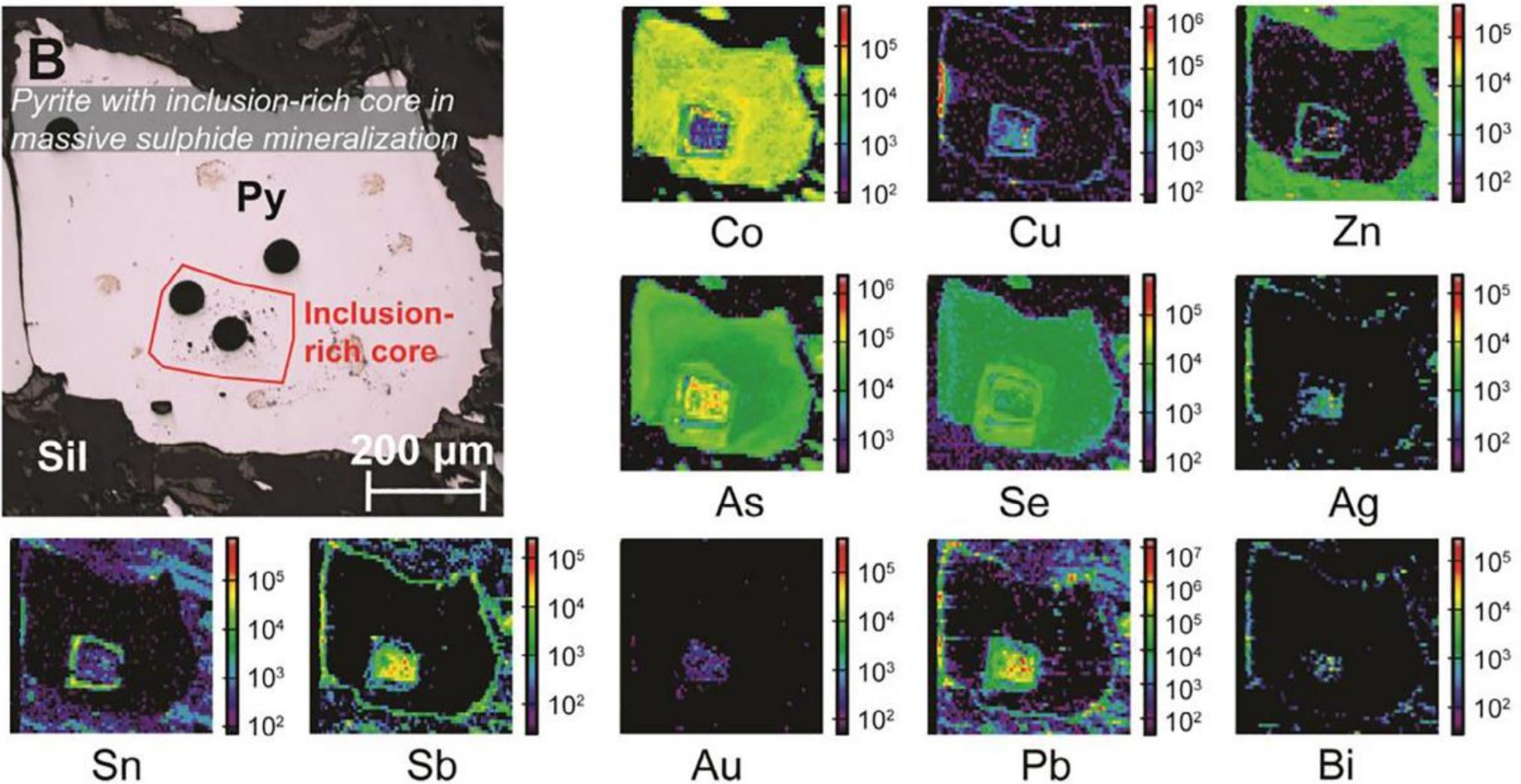
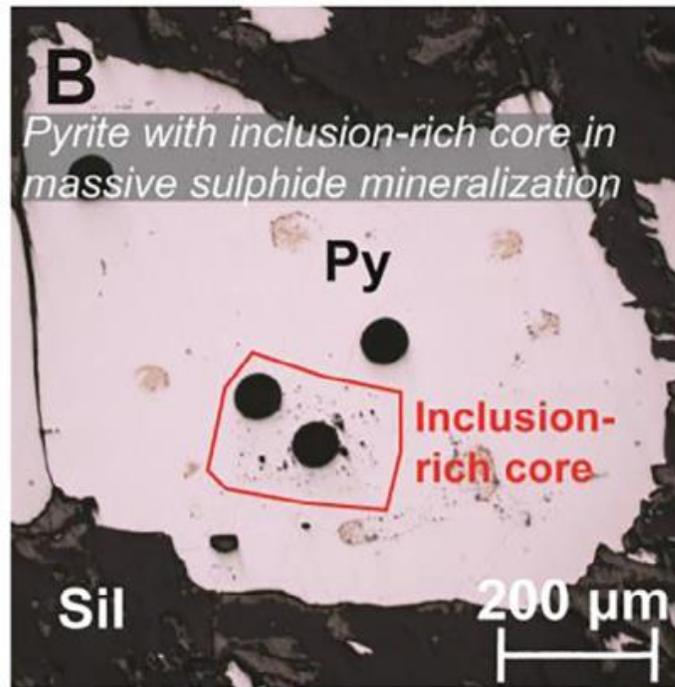
**Deformação dúctil da pirita ocorre a partir de 300 °C**



Pirita arredondada envolvida por galena (textura *Durchbewegung*)

Rotação tectonoclástica e arredondamento do sulfeto mais competente  
**Remobilização mecânica**





Distribuição de elementos traço obtida por análises multi-elementares de LA-ICP-MS em pirita da mineralização de sulfetos maciços. Pirita subédrica com um núcleo rico em inclusão (reliquia da textura primária) e uma borda pobre em inclusão (recristalizada);

# Iberian Pyrite Belt, Portugal-Espanha

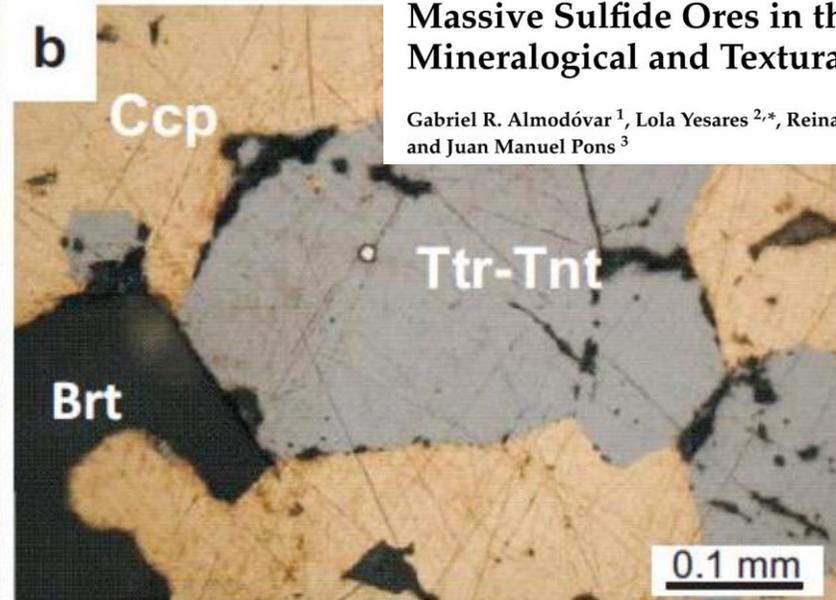
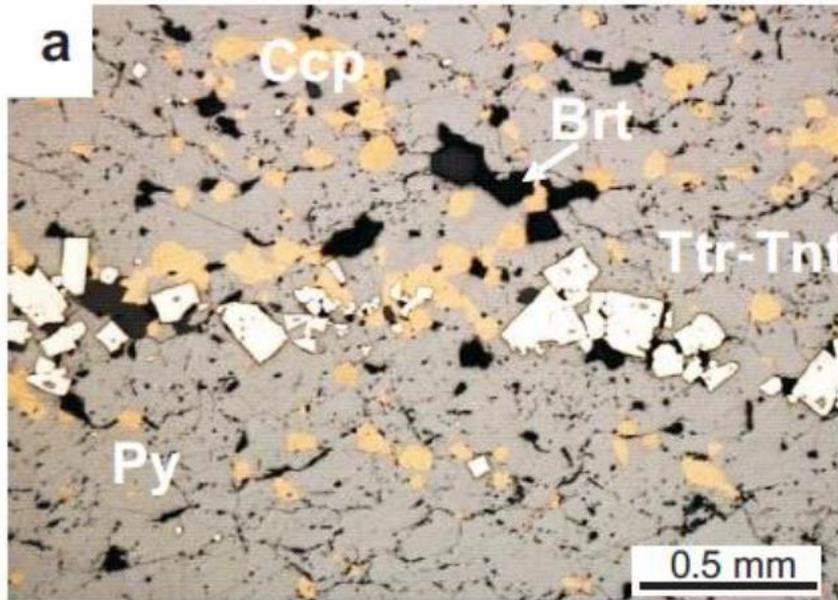
Article

## Massive Sulfide Ores in the Iberian Pyrite Belt: Mineralogical and Textural Evolution

Gabriel R. Almodóvar<sup>1</sup>, Lola Yesares<sup>2,\*</sup>, Reinaldo Sáez<sup>1</sup>, Manuel Toscano<sup>1</sup>, Felipe González<sup>1</sup> and Juan Manuel Pons<sup>3</sup>

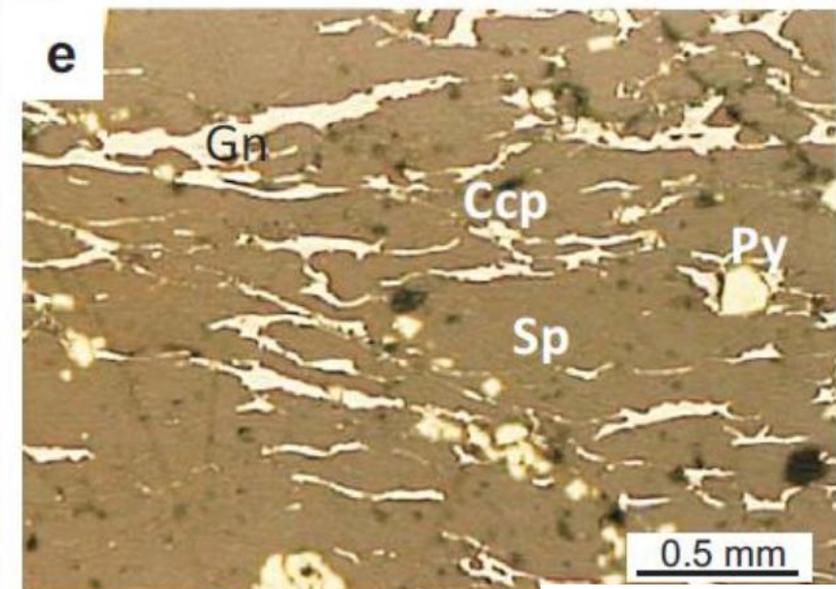
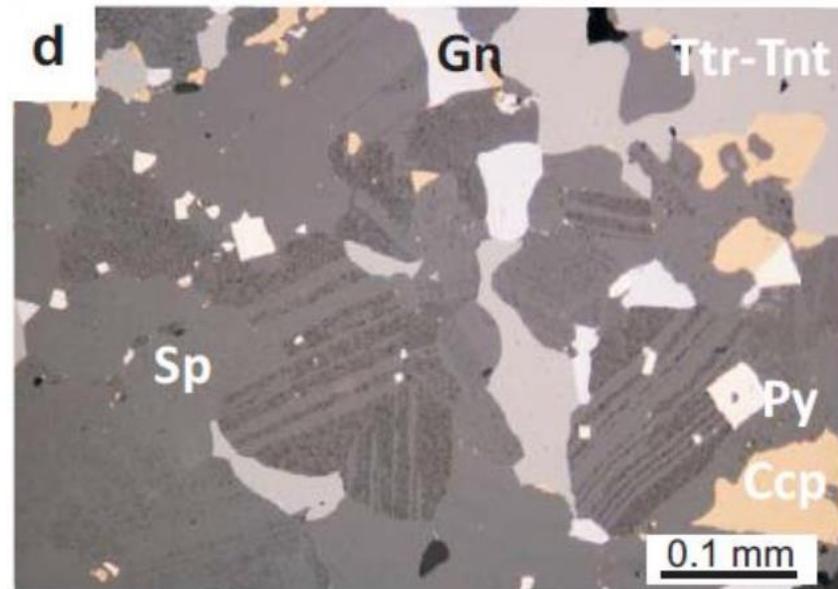
### Texturas de annealing

Agregados de calcopirita (Ccp) e tetraedrita (Trt) com junções triplas 120° nos limites de grão;



Agregados de calcopirita (Ccp) e tetraedrita (Trt) com junções triplas 120° nos limites de grão;

Esfalerita (Sp) mostrando maclas lamelares e junções triplas



Segregação de esfalerita favorecida pelo desenvolvimento de bandas de cisalhamento

# Textura *Durchbewegung*

= “by movement or motion”

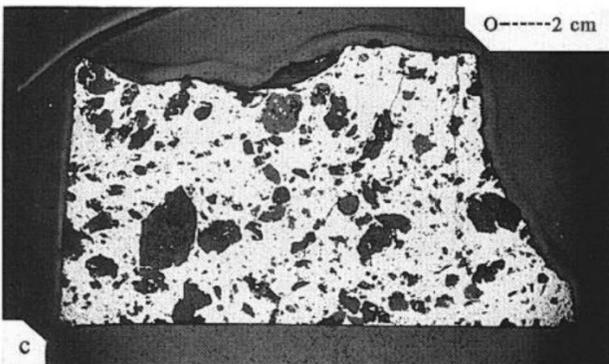
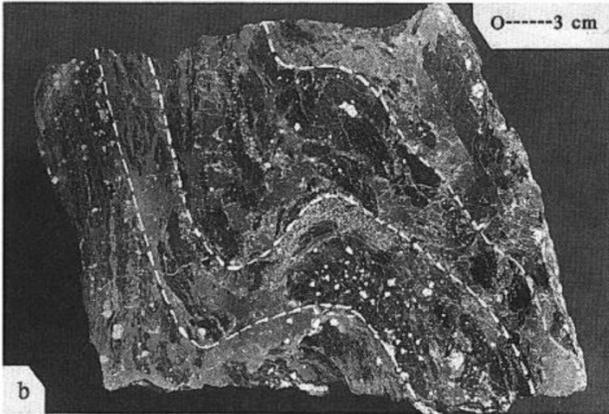
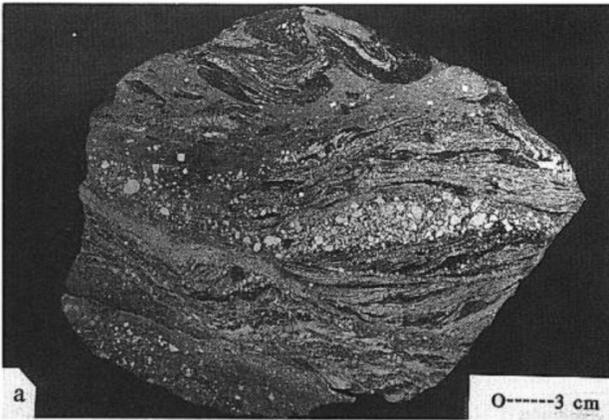
Textura de origem tectônica, caracterizada por clastos angulares ou arredondados por rotação de minerais mais competentes (e.g., silicatos), em geral desorientados e contorcidos, em uma matriz constituída por minerais menos competentes (e.g., sulfetos)

Interpretada como gerada a partir da partição da deformação durante a progressão de dobras e cisalhamento ou de fraturamento em corpos de sulfetos maciços



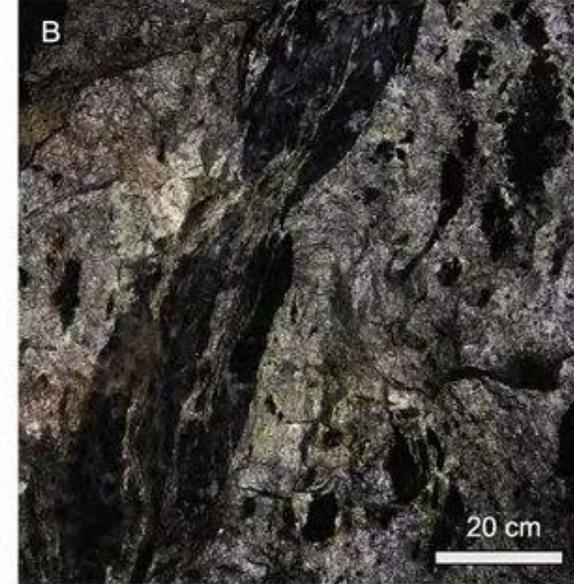
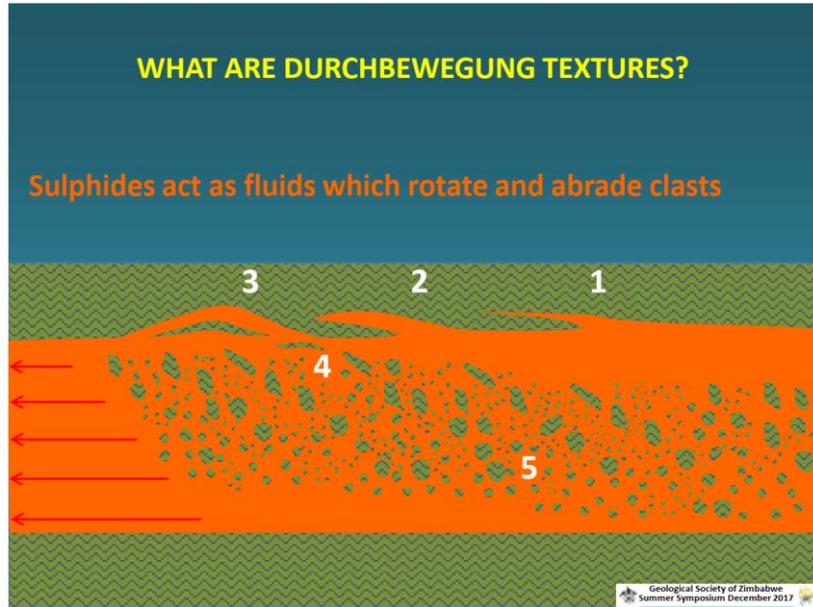
**Reologia dos sulfetos:** depende de vários fatores, tais como taxa de deformação, tamanho dos grãos, pressão de fluidos, atividade química e percentagem e distribuição das fases sulfetadas e silicatadas.

Marshall & Gilligan (1989)



# Textura *Durchbewegung*

= “by movement or motion”



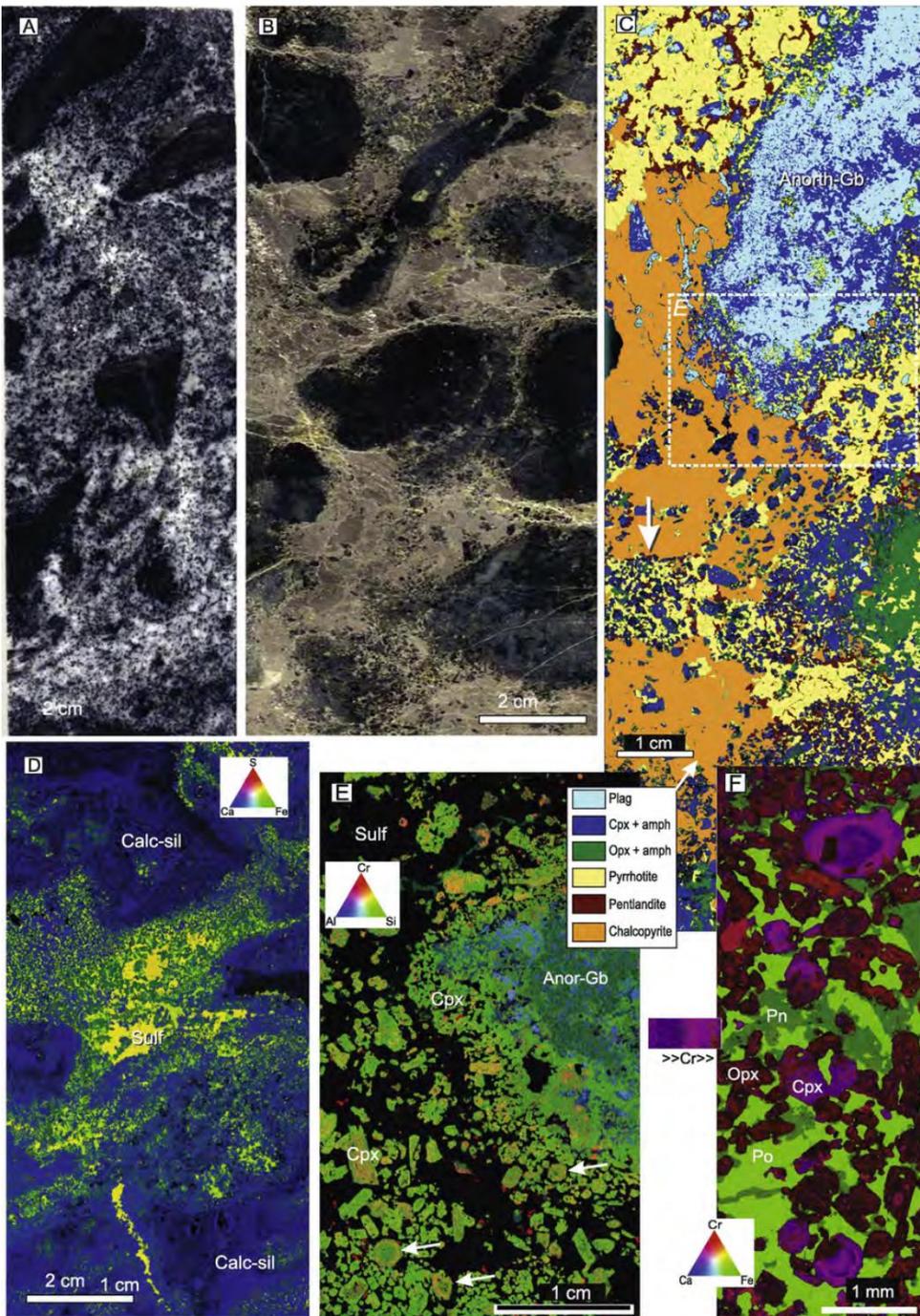
Durchbewegung style sulfides in shear zone from Garson Mine footwall

Barnes *et al.* (2018)

# Textura *Durchbewegung*

## Minério de Níquel Magmático Remobilizado

Brechas de minério com sulfetos na matriz e fragmentos de piroxenito e anortosito; observe a desagregação dos cristais de piroxênio dentro de sulfeto. Fotos A, B da Lundin Mining



Brechas com sulfetos na matriz e fragmentos de cpx e opx; observe a desagregação dos cristais de piroxênio dentro de sulfeto.

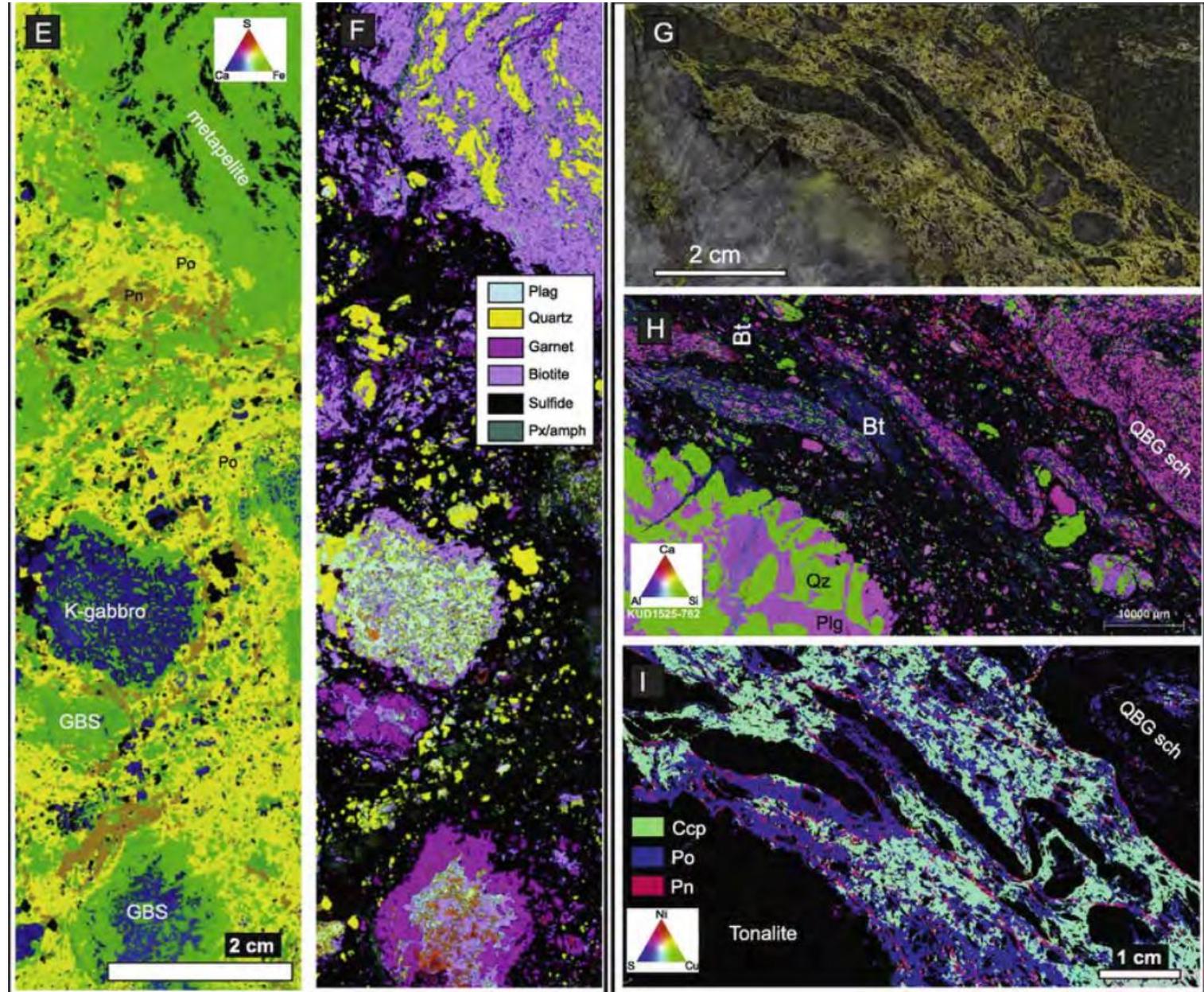
# Textura *Durchbewegung*

## Minério de Níquel Magmático Remobilizado

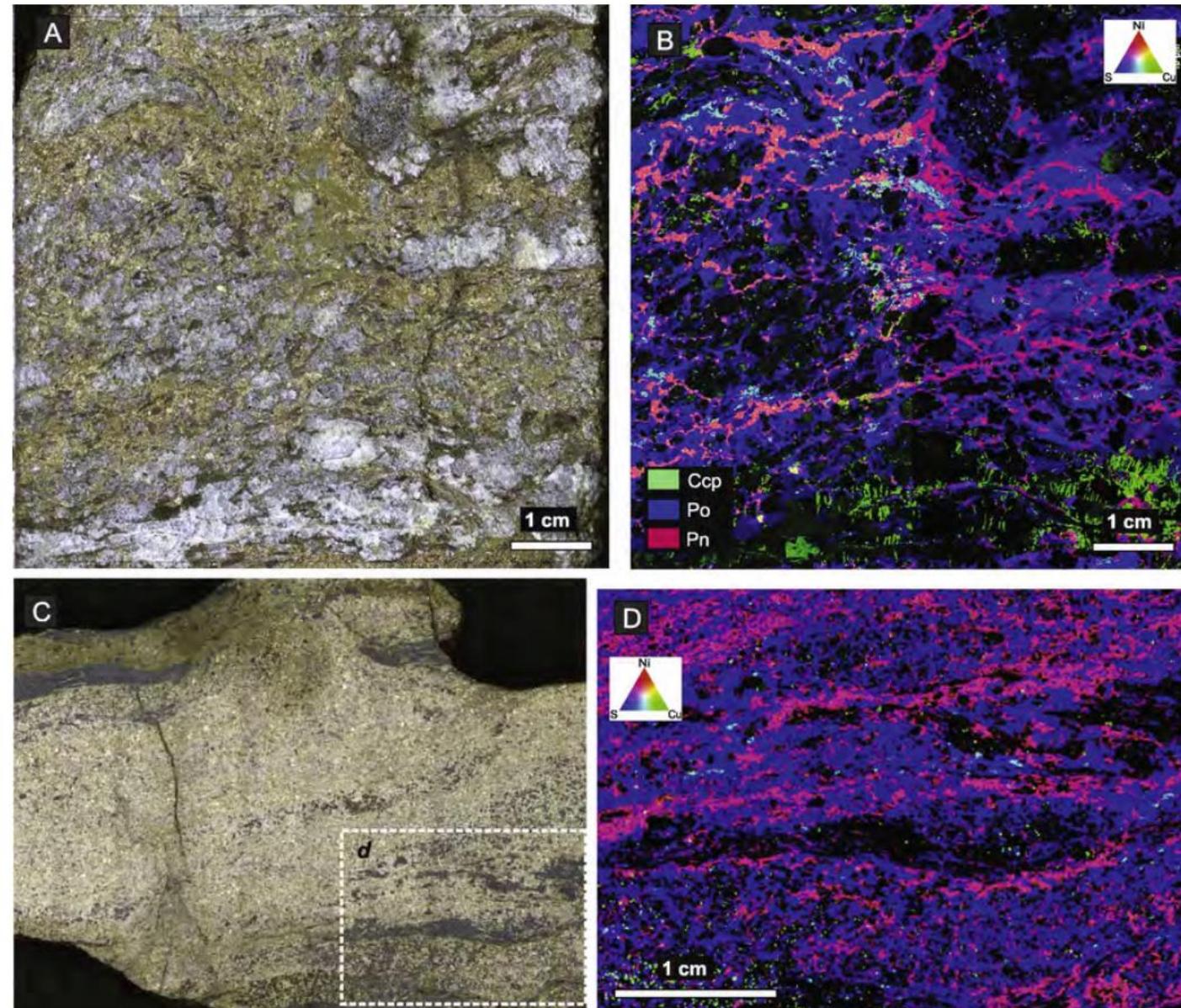
**E-F.** Brecha contendo fragmentos de granada-biotita gnaiss com bordas ricas em granada, microgabro ou diorito rico em K e um quartzo-biotita xisto dobrado mostrando desagregação marginal; observe o desenvolvimento incipiente da foliação definido por cristais de quartzo, biotita e pentlandita exsolvida.

**G, H, I:** Brecha *Durchbewegung* (modificada tectonicamente) fortemente foliada e dobrada com fragmentos dobrados em biotita, fragmento indeformado de tonalito (inferior esquerdo); observe a foliação pronunciada desenvolvida pelos de sulfeto, bem como as inclusões de silicato

Barnes *et al.* (2018)



# Brechas Tectônicas



Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: Massive, semi-massive and sulfide-matrix breccia ores

Stephen J. Barnes<sup>a, \*</sup>, Sebastian Staude<sup>b</sup>, Margaux Le Vaillant<sup>a</sup>, Rubén Piña<sup>c</sup>, Peter C. Lightfoot<sup>d, e</sup>

## Minério de Níquel Magmático Remobilizado

**A, B,** Brecha *Durchbewegung* (Thompson, Manitoba, Canadá) - fragmentos de metassedimento rico em quartzo em matriz de sulfeto. Fábrica planar pronunciada a por pentlandita ao longo da orientação preferencial da pirrotita (foliação).

**C, D,** Textura milonítica (Spotted Quoll, Forrestania Greenstone Belt, Austrália) Forte orientação da pirrotita e da pentlandita exsolvida ao longo da foliação.

Em luz transmitida

## Depósitos de Ouro Orogênico

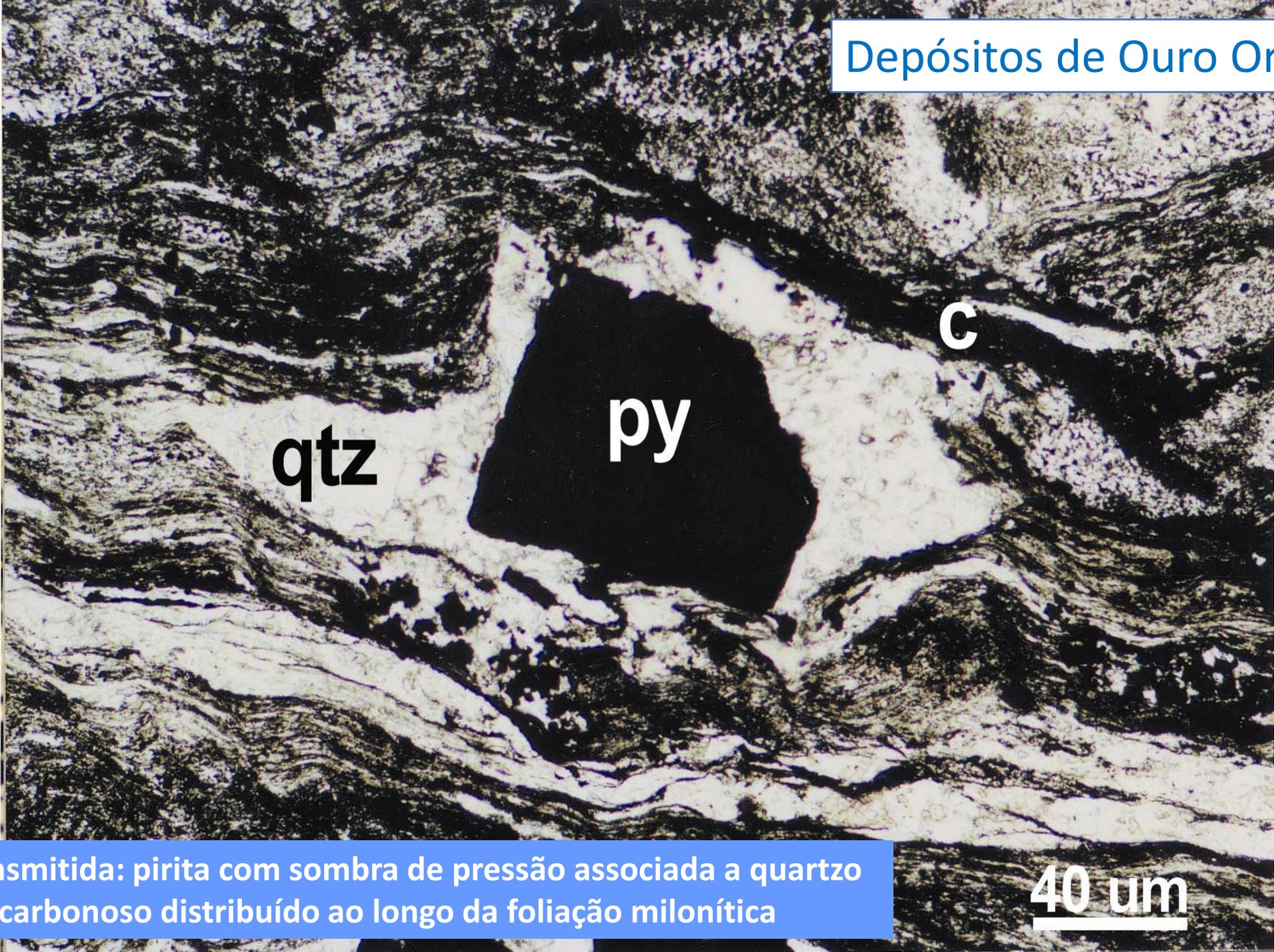
qtz – py

C

Pirita com sombra de pressão associada a quartzo e material carbonoso distribuído ao longo da foliação milonítica



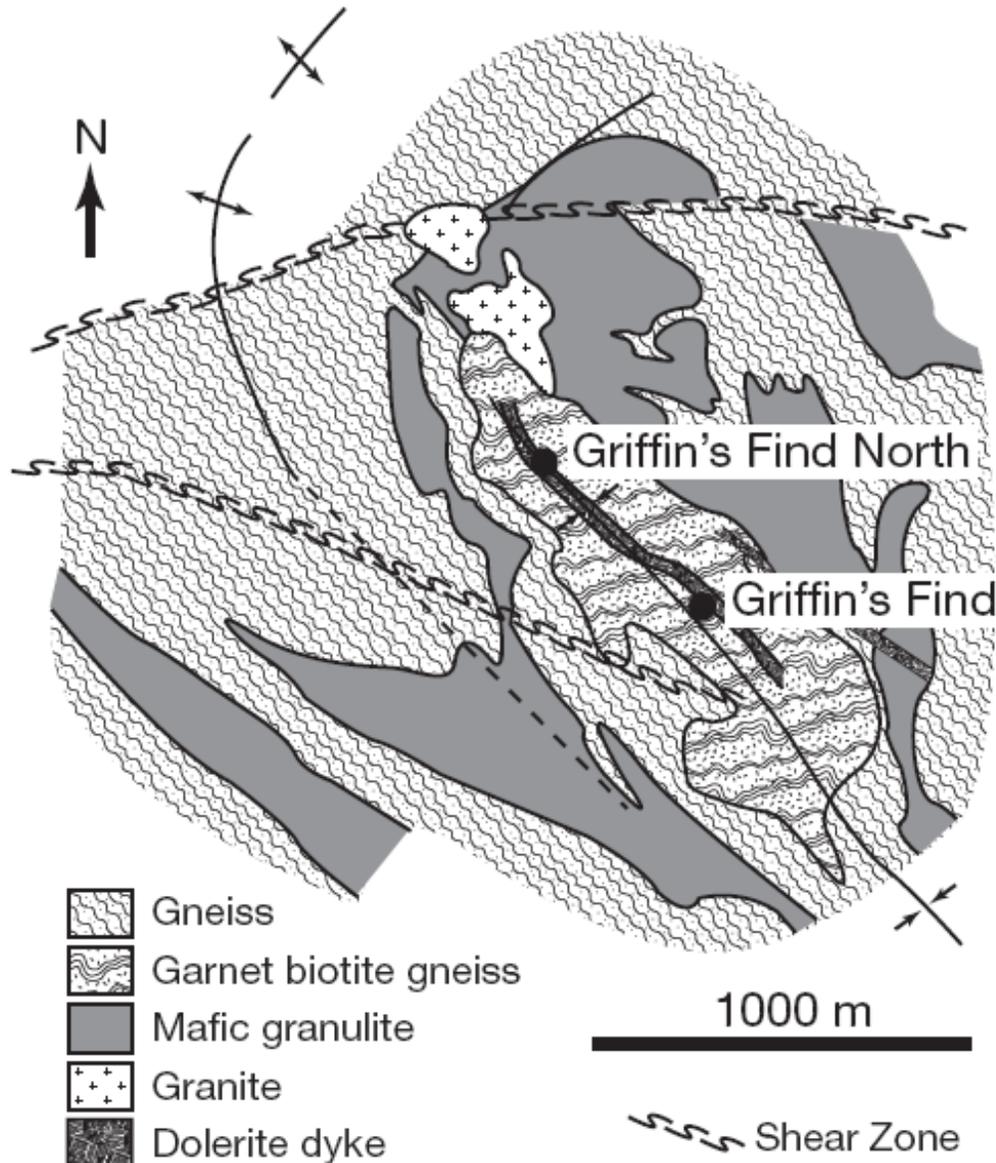
## Depósitos de Ouro Orogênico



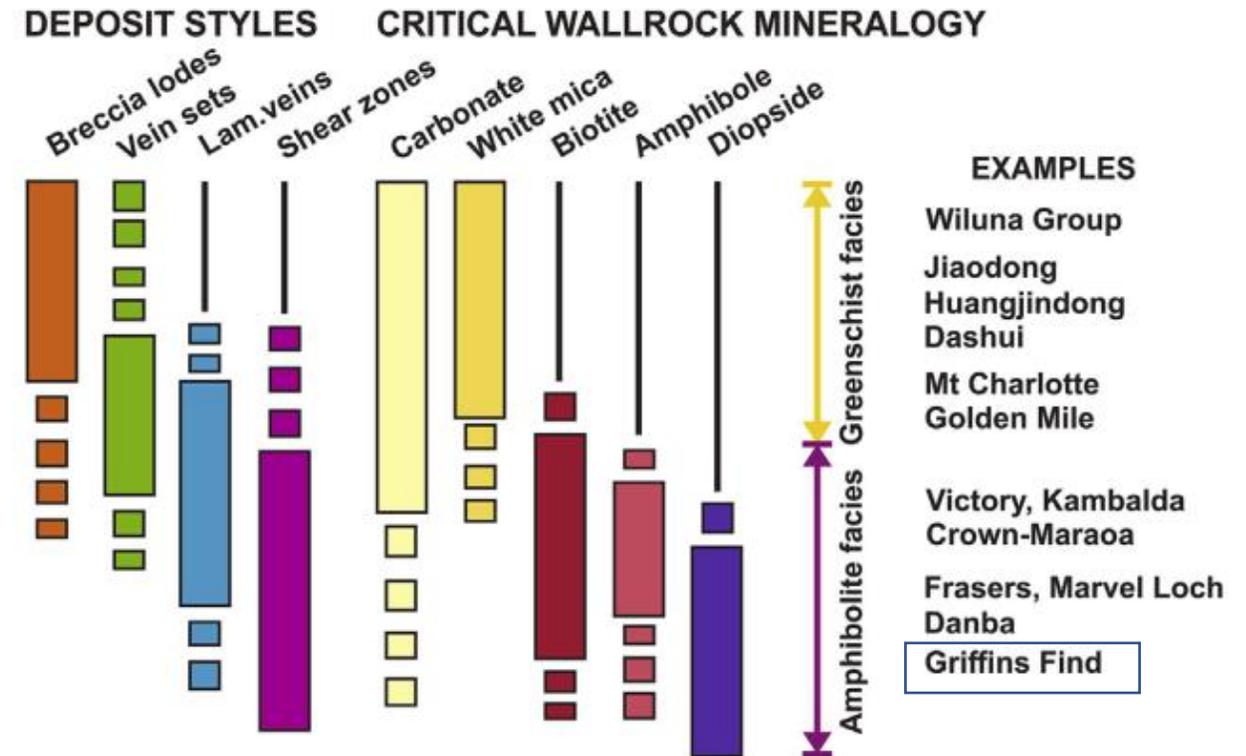
Em luz transmitida: pirita com sombra de pressão associada a quartzo e material carbonoso distribuído ao longo da foliação milonítica

40 um

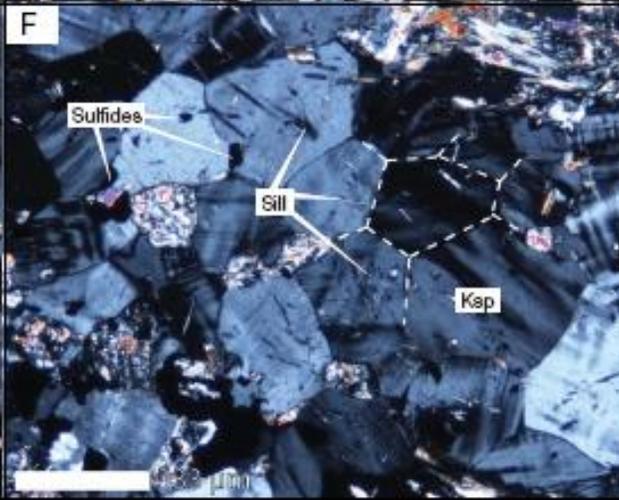
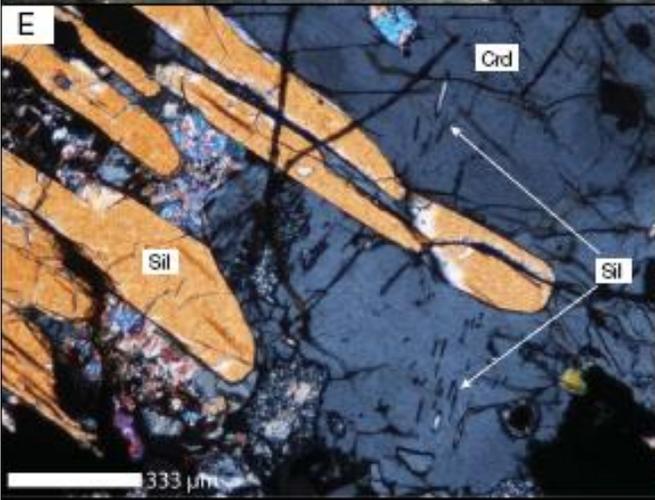
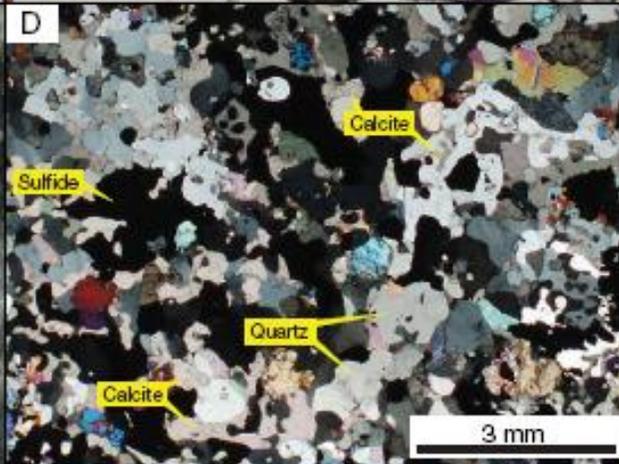
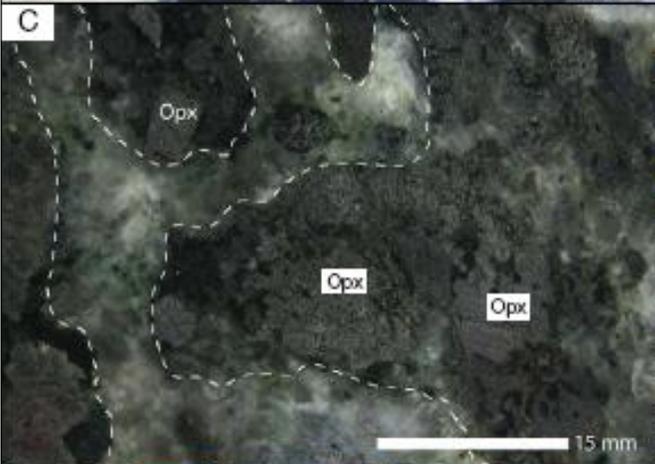
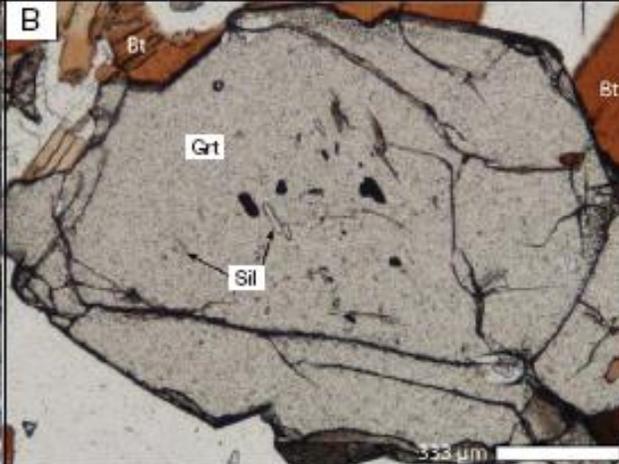
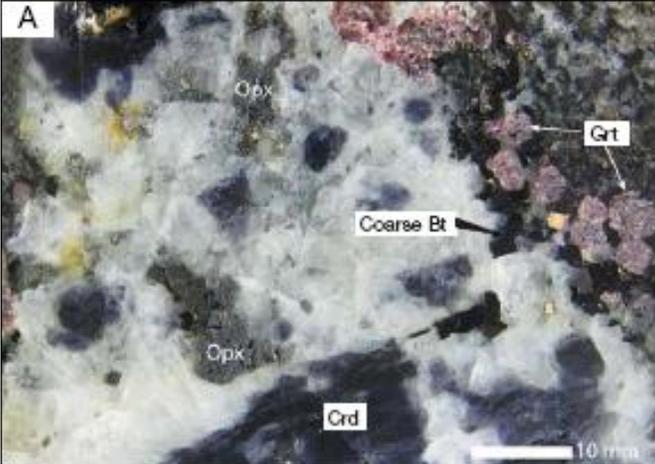
# Depósito de Au Orogênico de Griffins Find, Yilgarn Block, Austrália



Tomkins & Grundy (2009)



**Fig. 3.** Schematic diagram showing concomitant changes in structural style and alteration assemblages for orogenic gold deposits. Pyrite dominates in low metamorphic grade domains whereas pyrrhotite and loellingite dominate in higher metamorphic grade domains. Simplified from Groves (1993).



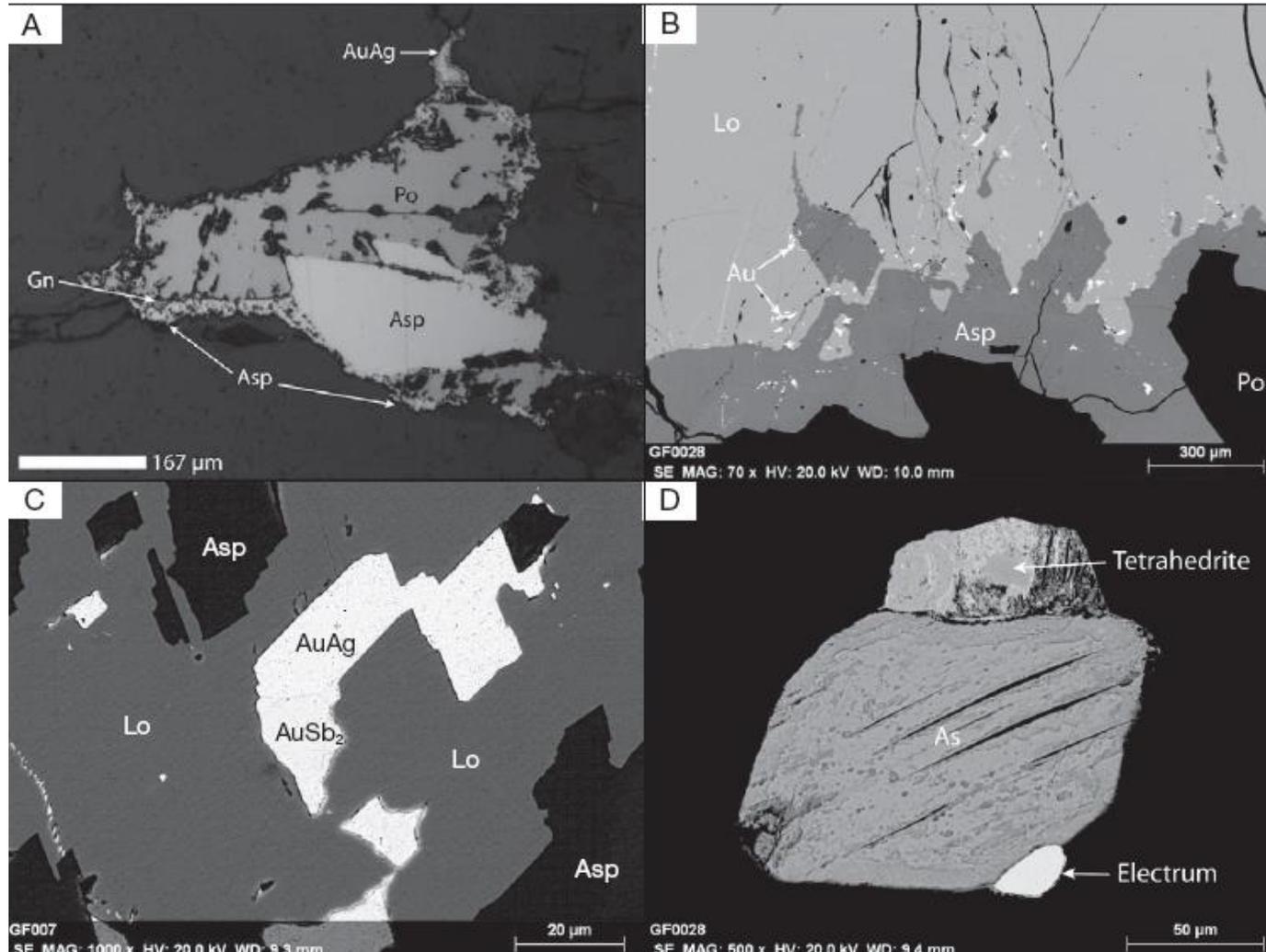
*Rochas hospedeiras: rochas metamorfasadas em fácies granulito*

*Leucossoma com granada, cordierita e ortopiroxênio, gnaisses com sillimanita, cordierita e feldspato potássico, granulitos máficos mineralizados*

**Tomkins & Grundy (2009)**



# Texturas dos sulfetos

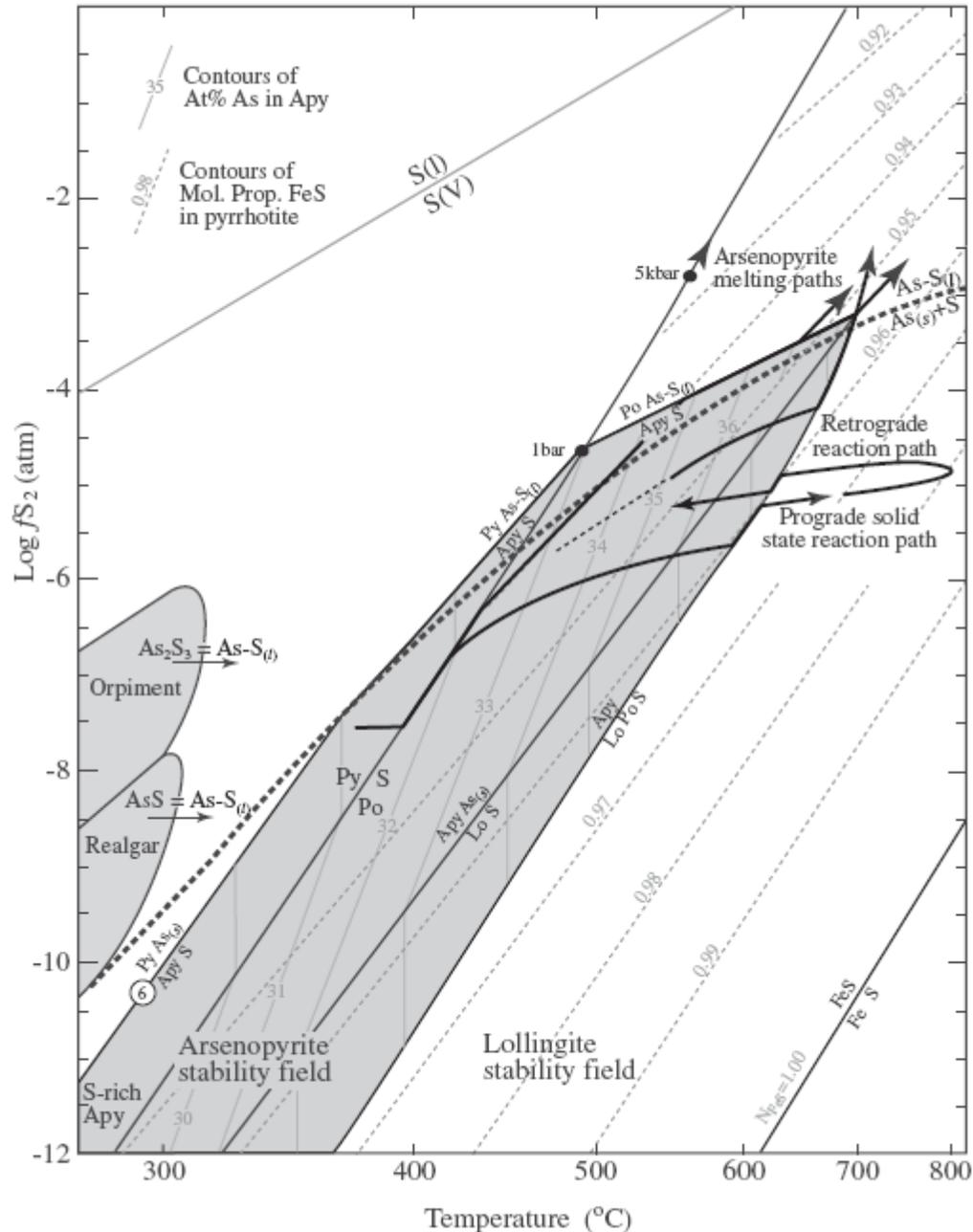


*Arsenopirita*  
*Retrometamorfismo*

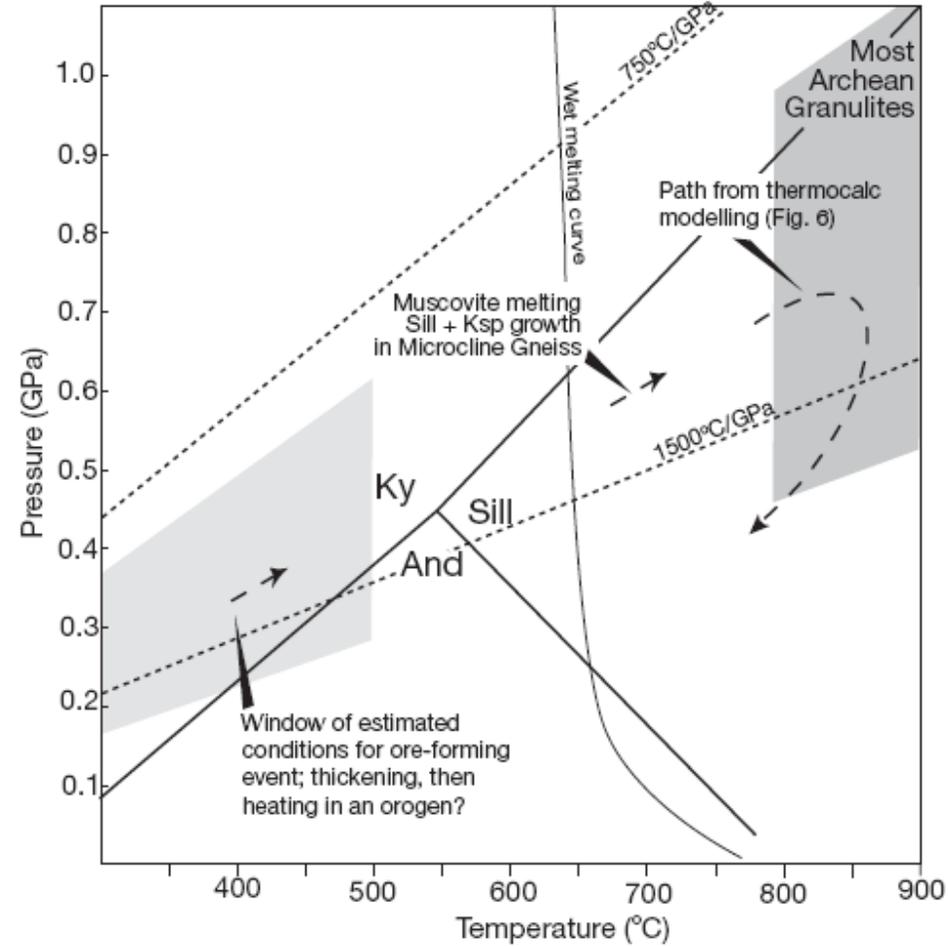


*Pirrotita + Lollingita*  
*Metamorfismo progressivo*

## Condições de $fS_2$ e temperatura a 5 kbar



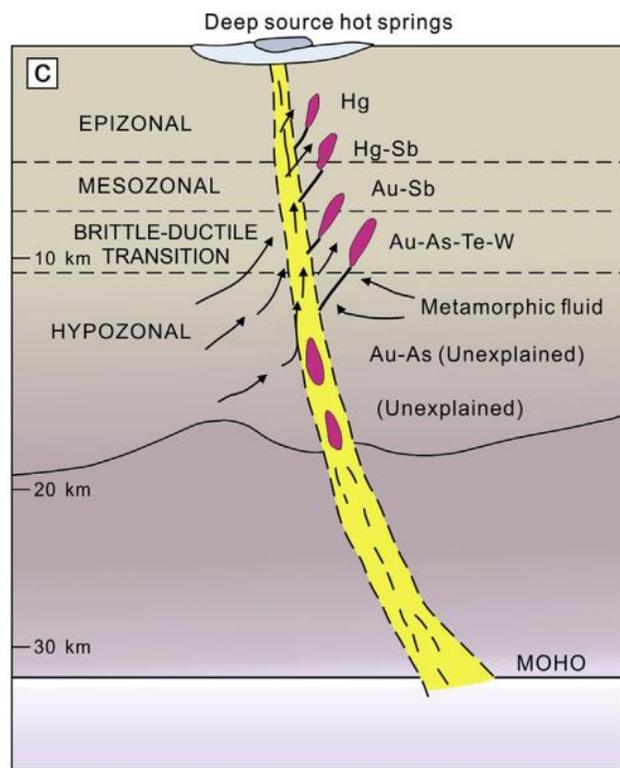
Tomkins *et al.* (2006)  
adaptado de Barton (1969)



**Condições P-T para o evento mineralizante anterior ao metamorfismo de fácies granulito**

Tomkins & Grundy (2009)

## Depósito de Au orogênico de Griffin's Find: limite superior de formação de depósitos orogênicos?



Modelo para depósitos  
orogênicos  
(Groves e Santosh, 2016)

- Metamorfismo de **fácies granulito** ( $T = 820 - 870 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $P > 550 \text{ MPa}$ )
- **Granada, ortopiroxênio e cordierita** presentes em leucossoma de migmatitos evidencia  **fusão em fácies granulito sem infiltrações de fluidos hidrotermais**;
- Se um fluido hidrotermal entrasse no sistema nessas condições seria imediatamente consumido por **reações metamórficas produzindo fundido (melt)**;
- Paragênese com calcita e quartzo estável requer fluido com  $> 85 \%$   $\text{CO}_2$ , distinto daqueles responsáveis por depósitos de Au orogênico (4 a 30%  $\text{CO}_2$ ).
- Influxo de  $\text{CO}_2$  mantélico = alteração charnockítica não verificada
- **Mineralização hidrotermal foi submetida ao metamorfismo em fácies granulito após a sua formação em condições de grau mais baixo**