

# CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE LIXIVIAÇÃO SULFÚRICA: POSSÍVEIS CAUSAS PARA PERDA DE COBRE NO PROCESSO

**D. J. F. Couto<sup>1</sup>, G. S. P. Pereira<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Vale S.A. – Departamento de Tecnologia Mineral  
Centro de Desenvolvimento Mineral - CDM  
BR381, km450, 30.040-900  
Santa Luzia, MG, Brasil.  
Email: [danielly.couto@vale.com](mailto:danielly.couto@vale.com)  
[geysa.pereira@vale.com](mailto:geysa.pereira@vale.com)

## Resumo

Este estudo teve por objetivo caracterizar amostras iniciais de minério de cobre e seus respectivos resíduos de lixiviação sulfúrica, a fim de avaliar se há variações composicionais significativas nos sulfetos que indiquem neoformação de minerais ou indícios de ataque parcial, ou seja, que o processo de lixiviação dos sulfetos se iniciou, mas por alguma razão não foi concluído. A neoformação é a cristalização de minerais durante o processo de lixiviação e pode originar minerais com cinética de dissolução de cobre mais lenta ou até mesmo refratários à lixiviação. Já o ataque parcial dos sulfetos pode ter diversas causas, dentre elas insuficiência de reagentes e/ou de tempo de reação.

Foram confeccionadas lâminas delgadas polidas que foram analisadas por microscopia ótica e eletrônica de varredura. Os resultados obtidos, suportados por análise química, permitiram determinar a composição modal e a partição de cobre para cada uma das amostras. Foram então selecionados grãos de sulfetos para análise em microsonda eletrônica, com o intuito de caracterizar com maior precisão as fases sulfetadas e identificar variações composicionais entre os sulfetos presentes nas amostras iniciais e nos resíduos.

Os principais portadores de cobre nas amostras iniciais são Crisocola, Malaquita e Calcocita, em proporções variadas. De forma subordinada, essas amostras também contêm Bornita, Covelita, Calcopirita, Antlerita, Cu nativo e Oxi-hidróxidos de cobre. Os ensaios de lixiviação extraíram de 82% a 92% do cobre total presente nas amostras iniciais. O teor de cobre nos resíduos não ultrapassa 0,34% e está essencialmente sob a forma de sulfetos.

Através deste estudo foi possível identificar nove grupos de sulfetos de cobre, possíveis *trends* de alteração e as prováveis causas para a perda de cobre no processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** cobre, caracterização mineralógica, microscopia, microanálises, lixiviação

## 1. INTRODUÇÃO

A composição mineralógica dos minérios de cobre tem grande impacto na seleção da rota de processo, em função das diferentes respostas dos minerais à flotação e à lixiviação. O teor do minério e a presença de contaminantes são também pontos críticos na definição da rota mais apropriada sob o ponto de vista econômico. Os minérios de cobre podem ser divididos em três grandes grupos, de acordo com os minerais-minério (portadores de cobre) predominantes: oxidados (carbonatos, fosfatos, óxidos e sulfatos), mistos (carbonatos, fosfatos, óxidos, sulfatos e sulfetos secundários) e sulfetados (sulfetos secundários e primários).

A lixiviação sulfúrica visa à extração do cobre através da dissolução do mineral portador desse elemento na presença de uma solução lixiviante (solução diluída de  $H_2SO_4$ ). O processo de lixiviação é utilizado nos diversos tipos de minério, variando para cada um deles as condições de lixiviação e a extração máxima obtida. Em temperatura e pressão ambientes e sem a presença de um agente oxidante, a extração de cobre é maior em minérios oxidados, onde os minerais-minério possuem cinética de reação mais rápida, e menor nos sulfetados, onde é comum a presença de Calcopirita (inerte nessas condições).

A caracterização mineralógica é uma importante ferramenta na otimização do processamento mineral, tendo como principal objetivo prever o comportamento do minério nos processos de concentração, extração e de utilização na indústria. Na etapa de lixiviação, a caracterização mineralógica tem como objetivos indicar o potencial de extração do metal e do consumo de ácido, bem como identificar possíveis causas para perdas durante o processo. Através da identificação dos minerais-minério e da partição do cobre entre eles nas amostras iniciais, é possível prever a ordem de grandeza da extração que será obtida durante a lixiviação. Após a lixiviação, a caracterização dos resíduos visa à identificação de minerais-minério parcialmente atacados e/ou inertes ao ataque ácido e texturas de encapsulamento, que justifiquem as perdas de cobre. Vale ressaltar a importância da caracterização das amostras iniciais, onde a identificação de minerais de ganga consumidores de ácido, como carbonatos e filossilicatos magnesianos, auxilia na estimativa do consumo de ácido durante a lixiviação e fornece subsídios para o levantamento de possíveis alternativas de processos para a remoção desses minerais.

O estudo teve por objetivo caracterizar amostras iniciais e seus respectivos resíduos de lixiviação sulfúrica, provenientes da investigação da rota de Lixiviação em Pilhas de um minério misto de cobre (oxidado + misto + sulfetado), a fim de avaliar se há variações composicionais significativas nos sulfetos que indiquem neoformação de minerais ou indícios de ataque parcial, ou seja, que o processo de lixiviação dos sulfetos se iniciou, mas por alguma razão não foi concluído. A neoformação é a cristalização de minerais durante o processo de lixiviação e pode originar minerais com cinética de dissolução de cobre mais lenta ou até mesmo refratários à lixiviação. Já o ataque parcial dos sulfetos pode ter diversas causas, dentre elas insuficiência de reagentes e/ou de tempo de reação. Como o foco deste trabalho é mostrar a utilização da caracterização mineralógica no auxílio do entendimento do minério e dos produtos obtidos durante o processamento, não serão abordados os resultados obtidos nos ensaios de lixiviação, como extração e consumo de ácido.

## 2. MÉTODOS

Foram utilizadas amostras iniciais e seus respectivos resíduos de lixiviação sulfúrica em colunas, a temperatura e pressão ambientes. A classificação da natureza do minério fornecida (minérios oxidados, mistos e sulfetados) foi proveniente da descrição macroscópica de furos de sonda.

A granulometria do processo foi controlada, a fim de obter um *top size* das amostras de ½". Para caracterização mineralógica, todas as amostras foram britadas a 100% < 1,68 mm e para cada uma delas foi confeccionada uma lâmina delgada polida centrifugada. Uma alíquota equivalente à utilizada para a confecção das lâminas, foi enviada para análise química. Todas as lâminas foram analisadas por microscopia ótica e eletrônica de varredura (MEV).

Os percentuais dos minerais estimados em área por microscopia ótica foram transformados para peso e conciliados com as análises químicas. Para o fechamento da composição mineralógica foram utilizadas médias de microanálises EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) das principais fases minerais obtidas por MEV. Os resultados permitiram determinar a composição modal e a partição de cobre para cada uma das amostras. Para essa etapa do trabalho foi utilizado o MEV Philips XL30, operando com feixe a 20kV, equipado com EDS Oxford INCA x-act, com resolução de 129eV@5.9keV.

Foram então selecionados grãos de sulfetos para análise em microsonda eletrônica, com o intuito de caracterizar os sulfetos com maior precisão por microanálises WDS (*Wavelength Dispersive Spectroscopy*) e identificar possíveis alterações na composição química destes minerais. Essas amostras foram analisadas em microsonda eletrônica no Laboratório de Micro-Análises (LMA-UFGM) do Departamento de Física do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais. Foram realizadas cerca de 200 microanálises quantitativas por WDS, sob as condições de 15kV, 20nA, feixe de 1 ou 5  $\mu\text{m}$ . Para todas as análises utilizaram-se elementos nativos como padrões, todos retirados da coleção Ian Steele.

### 3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

#### 3.1. Amostras Iniciais

As amostras são compostas predominantemente por Plagioclásio albitico, Quartzo, Clorita, Moscovita/Sericita, Epidoto e Óxidos/hidróxidos de Fe. Crisocola, Malaquita e Calcocita concentram a maior parte do cobre. Em algumas amostras, observam-se fragmentos de vênulas de Malaquita e Crisocola. Calcocita ocorre como grãos finos parcialmente alterados para Covelita, Malaquita e/ou Crisocola, intergranulares à ganga silicática. Bornita e Calcopirita são raras. Grãos de Pirita contendo bordas substituídas por Calcocita estão dispersos em algumas das amostras. As Figuras 1 e 2 mostram algumas texturas comumente observadas nas amostras iniciais.

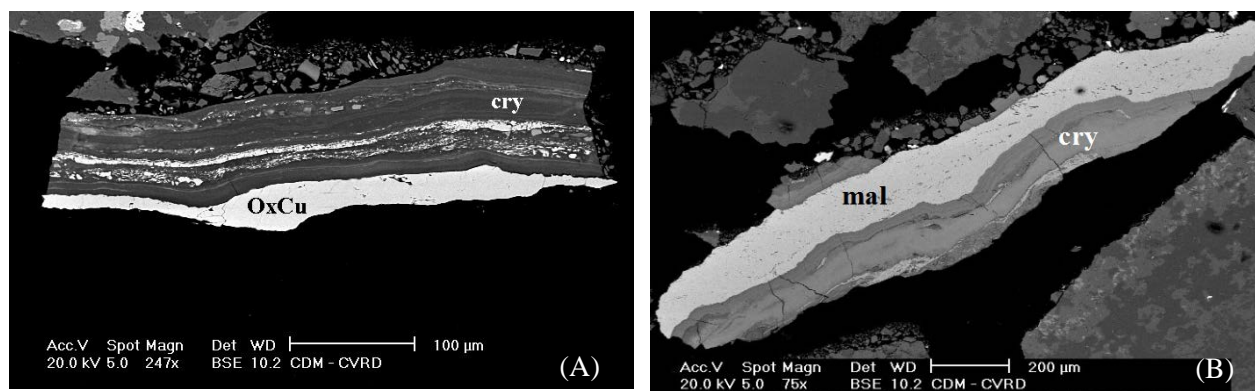


Figura 1 – Imagens de elétrons retroespalhados mostrando (A) Crisocola (cry) associada a Óxido de Cu (OxCu) e (B) fragmento de vênula de Crisocola (cry) e Malaquita (mal).

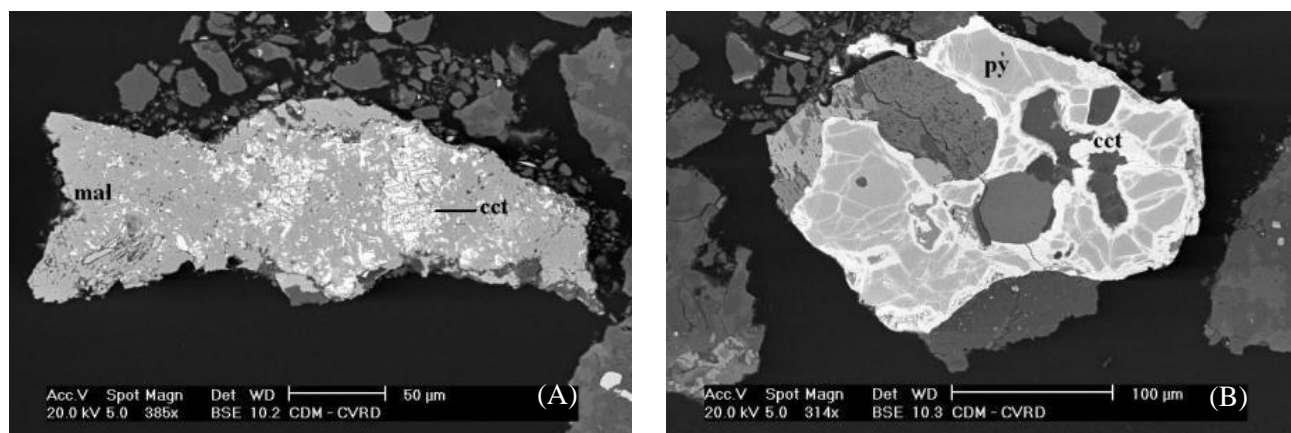


Figura 2 – Imagens de elétrons retroespalhados mostrando (A) Calcocita (cct) alterando para Malaquita (mal) e (B) Pirita (py) com bordas substituídas por Calcocita (cct).

As Tabelas I e II mostram a composição modal e a distribuição do cobre dentre os minerais das amostras iniciais, respectivamente. Como mostram as Tabelas III e IV, Covelita é a principal fonte de cobre nos resíduos. Praticamente toda a Crisocola, Malaquita, Antlerita e Óxidos de Cu foram dissolvidos, sendo que a extração final variou de 82% a 92% de Cu. O cobre contido em Clorita também foi extraído por completo. A presença de carbonatos nos resíduos se deve a grãos encapsulados pela ganga silicática que por isso não foram atacados durante a lixiviação.

Tabela I – Composição modal das amostras iniciais (% peso dos minerais).

Tipo de minério	OXIDADO			MISTO			SULFETADO	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Amostra inicial								
Quartzo/calcedônia	3,7	5,8	18,8	3,8	5,7	6,8	1,9	18,3
Feldspatos	49,4	50,6	51,5	57,5	51,6	78,1	56,4	52,2
Actinolita	8,0	1,1	0,1	2,2	1,6	0,1	7,6	0,0
<b>Clorita</b>	<b>11,1</b>	<b>20,9</b>	<b>1,0</b>	<b>13,8</b>	<b>20,7</b>	<b>2,5</b>	<b>14,8</b>	<b>1,2</b>
Moscovita/sericita	0,5	2,0	22,5	0,0	2,0	4,2	3,5	13,4
<b>Argilominerais com Cu</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>
Caulinita	7,3	5,7	0,0	3,7	3,7	0,5	1,4	4,7
Epidoto	11,5	3,1	0,0	10,5	3,7	0,0	1,2	0,0
<b>Crisocola</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>	<b>0,2</b>	<b>1,8</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,5</b>
Titanita	0,7	0,0	0,3	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Malaquita</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,8</b>	<b>1,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,0</b>	<b>0,6</b>
Outros carbonatos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	1,3
Apatita	0,8	0,8	0,5	0,8	0,8	0,5	0,7	0,3
<b>Calcopirita</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>
<b>Bornita</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>1,0</b>	<b>0,2</b>
<b>Calcocita</b>	<b>0,9</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>1,2</b>	<b>2,6</b>
<b>Covelita</b>	<b>0,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>
Pirita	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4
<b>Óxi-hidróxidos de Cu</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
<b>Antlerita</b>	<b>0,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
Magnetita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,1	0,0
Hematita	2,4	0,6	0,8	0,6	0,0	1,2	0,0	1,9
Óxido de Ti	0,7	1,1	0,7	0,3	1,1	0,8	1,1	0,6
Hidróxidos de Fe	0,5	5,5	2,1	0,1	5,5	2,8	4,8	1,0
Outros minerais	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0

OBS.: os minerais portadores de cobre estão em negrito.

## XXIV ENTMME - 2011 - Salvador/Bahia

Tabela II – Partição do cobre nas amostras iniciais (Teor de Cu %).

Tipo de minério Amostra inicial	OXIDADO			MISTO			SULFETADO	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Clorita	0,11	0,20	0,01	0,13	0,20	0,02	0,00	0,01
Crisocola	0,46	0,48	0,06	0,68	0,39	0,12	0,00	0,21
Argilominerais com Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,06
Malaquita	0,38	0,32	0,32	0,47	0,63	0,32	0,00	0,32
Calcopirita	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,05	0,00
Bornita	0,02	0,01	0,01	0,00	0,06	0,06	0,62	0,11
Calcocita	0,70	0,32	0,53	1,11	0,52	0,65	0,90	2,01
Covelita	0,22	0,01	0,01	0,22	0,06	0,11	0,01	0,11
Óxi-hidróxidos de Cu	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Antlerita	0,00	0,15	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
Teor calculado de Cu (%)	1,94	1,50	0,94	2,77	1,87	1,32	1,64	2,85
Teor analisado de Cu (%)	1,91	1,50	0,95	2,78	1,86	1,33	1,65	2,86

Tabela III – Composição modal dos resíduos (% peso dos minerais).

Tipo de minério Resíduo	OXIDADO			MISTO			SULFETADO	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Quartzo/Calcedônia	2,8	2,9	12,2	2,9	2,9	4,9	1,5	1,9
Feldspatos	52,5	60,5	67,2	63,6	59,4	84,3	80,9	70,1
Actinolita	7,4	3,3	0,1	1,6	1,6	0,1	2,0	0,2
Clorita	9,6	15,9	0,5	9,9	15,9	0,7	2,0	3,5
Moscovita / Sericita	0,5	2,0	15,6	0,0	2,0	4,2	2,1	15,3
Argilominerais	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,4
Caulinita	7,3	5,6	0,0	3,8	3,8	0,5	0,2	0,0
Epidoto	14,5	3,7	0,0	13,7	6,2	0,1	0,3	0,2
Titanita	0,7	0,0	0,1	2,5	0,0	0,0	0,0	0,1
<b>Malaquita</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
Outros carbonatos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	1,0
Apatita	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2
<b>Calcopirita</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
<b>Bornita</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
<b>Calcocita</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
<b>Covelita</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>
Pirita	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,6	0,0	1,2
Magnetita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,9	3,2
Hematita	2,8	1,5	0,8	1,0	0,0	2,0	0,0	0,0
Óxido de Ti	0,8	1,2	0,9	0,2	1,2	0,9	1,1	0,9
Hidróxidos de Fe	0,5	2,7	2,1	0,1	5,5	1,1	4,2	0,8
Outros minerais	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,4

OBS.: os minerais portadores de cobre estão em negrito.

Tabela IV – Partição do cobre nos resíduos (Teor de Cu %).

Tipo de minério Resíduo	OXIDADO			MISTO			SULFETADO	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Malaquita	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
Calcopirita	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,04	0,06	0,05
Bornita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Calcocita	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02
Covelita/calcocita	0,13	0,12	0,06	0,17	0,29	0,09	0,14	0,26
Teor calculado de Cu (%)	0,13	0,17	0,08	0,20	0,32	0,16	0,23	0,34
Teor analisado de Cu (%)	0,13	0,17	0,08	0,21	0,33	0,15	0,23	0,34

#### 4. CARACTERIZAÇÃO DOS SULFETOS

Os sulfetos estão fortemente intercrescidos e isso, associado às suas características óticas muito semelhantes, dificulta a individualização dessas fases por microscopia ótica convencional. Por apresentarem também semelhanças composicionais, as imagens de elétrons secundários em microsonda eletrônica não foram úteis para mostrar a associação entre eles.

Através das microanálises WDS foi possível identificar nove grupos de sulfetos de cobre (Tabela V), presentes tanto nas amostras iniciais quanto nos resíduos e sem variações composicionais significativas que possam ser atribuídas aos ensaios de lixiviação. Somente a Covelita e a Bornita parcialmente alterada para Calcocita apresentam uma diminuição de cerca de 2% e 3% de Cu, respectivamente, das amostras iniciais para os resíduos. Isso sugere a presença de grãos de Covelita e Bornita parcialmente atacados nos resíduos.

Tabela V – Comparação das composições médias das análises.

Sulfetos de Cu <sup>2</sup>		Composição média (%)		
		Cu	S	Fe
Covelita	Amostras iniciais	65,99	33,58	0,08
	Resíduos	64,52	34,39	0,48
Yarrowita	Amostras iniciais	69,04	30,21	0,24
	Resíduos	68,40	30,68	0,29
Spionkopita	Amostras iniciais	72,91	26,64	0,38
	Resíduos	73,31	26,58	0,25
Geerita	Amostras iniciais	75,87	22,83	0,55
	Resíduos	75,61	24,00	0,27
Anilita-Digenita-Roxbyita	Amostras iniciais	77,50	21,71	0,30
	Resíduos	77,52	22,36	0,14
Calcocita-djurleita	Amostras iniciais	79,51	21,13	0,12
	Resíduos	79,10	21,14	0,06
Sulfetos de Cu e Fe		Composição média (%)		
		Cu	S	Fe
Calcopirita	Amostras iniciais	34,37	34,92	30,60
	Resíduos			
Wihelmsramsayita	Amostras iniciais	-	-	-
	Resíduos	51,00	29,99	17,95
Bornita	Amostras iniciais	62,68	25,87	11,06
	Resíduos	62,74	25,59	11,02
Bornita parcialmente alterada para calcocita	Amostras iniciais	70,23	23,17	4,56
	Resíduos	67,57	24,44	7,90

1 - classificação baseada em fórmulas teóricas (Fonte: Webmineral, 2011);

2 - estes sulfetos podem conter pequenas quantidades de Fe.

A Figura 3 apresenta dois *trends* composicionais bem definidos a partir das microanálises WDS: *trend 1* (Cu-Fe-S) – Calcopirita, Wihelmsramsayita, Bornita, Calcocita/Djurleita; *trend 2* (Cu-S) – Calcocita/Djurleita,

Anilita-Digenita-Roxbyita, Geerita, Spionkopita, Yarrowita e Covelita. Esses *trends* foram anteriormente descritos para zonas de alteração supergênica de outros depósitos de cobre (Large *et al.* 1995, Sikka *et al.* 1991). O *trend 1* mostra o enriquecimento em Cu pela ação de fluidos hidrotermais, devido à substituição de Fe por Cu. O *trend 2* pode ser bidirecional, ou seja, pode ocorrer no sentido Covelita → Calcocita, caracterizando enriquecimento em Cu por alteração hidrotermal ou no sentido Calcocita → Covelita, gerando um empobrecimento em Cu durante processos de alteração supergênica. O sentido do *trend 2* é definido por fatores como pH e Eh do fluido,  $fO_2$ ,  $fS_2$ , dentre outros.

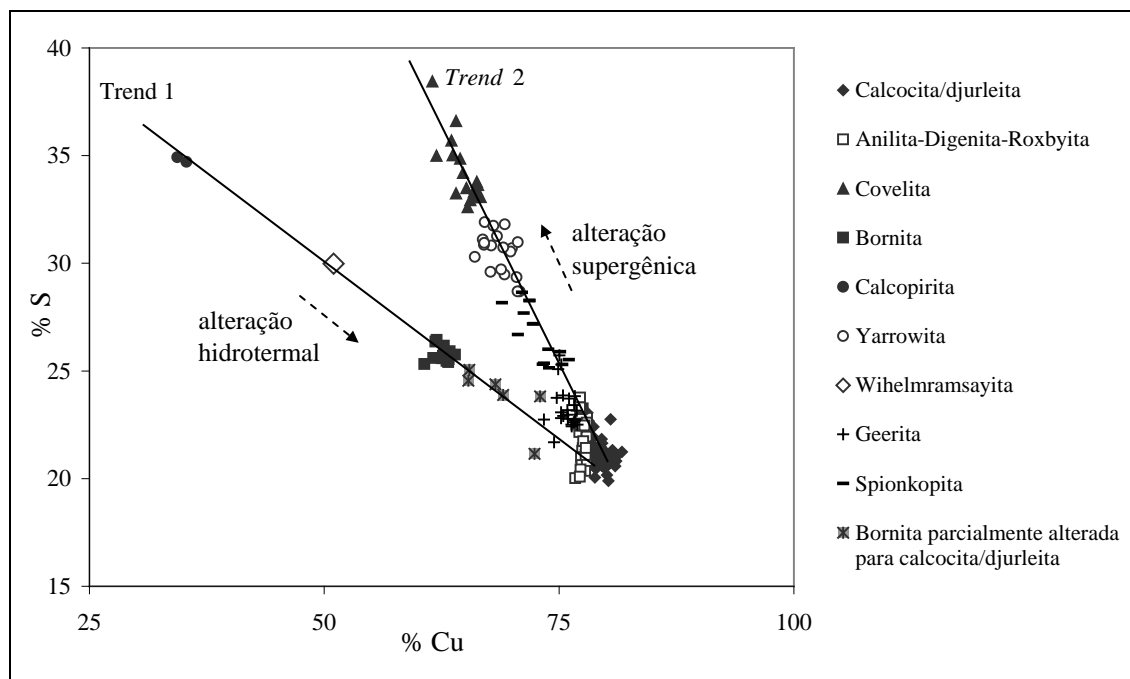


Figura 3 – *Trends* composicionais gerados por variações na razão Cu/S.

Nas amostras de minério sulfetado ocorrem predominantemente Calcocita e Bornita, além de sulfetos do grupo Anilita-Digenita-Roxbyita, em menores proporções. Em geral, os grãos de Bornita apresentam-se parcialmente alterados para Calcocita (Figura 4A), mostrando que houve um enriquecimento de Cu, seguindo o *trend 1*.

Nos minérios misto e oxidado, ocorrem Yarrowita, Geerita, Spionkopita e Covelita, além de Calcocita/Djurleita, Bornita e Anilita-Digenita-Roxbyita. Essas associações apontam para níveis mais avançados de alteração supergênica, onde os sulfetos estão sendo progressivamente empobrecidos em Cu, seguindo o *trend 2* no Calcocita → Covelita (Figura 4B). Portanto, foram gerados por processos de lixiviação natural *in situ*, devido à percolação de fluidos descendentes com pH ácido. Parte do cobre, removido das porções superiores do depósito (zona oxidante), foi transportada pelo fluido e reprecipitada em condições redutoras na forma de sulfetos secundários e/ou substituindo parcialmente sulfetos primários pré-existentes (como Pirita e Calcopirita).

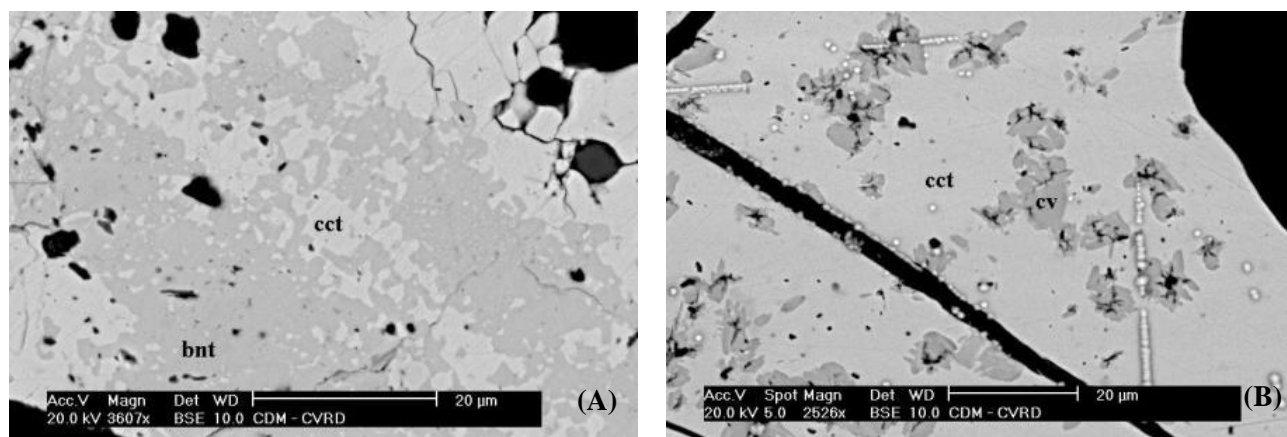


Figura 4 – Imagens de elétrons retroespalhados mostrando (A) Bornita (bnt) alterando para Calcocita e (B) Calcocita (cct) parcialmente substituída por Covelita.

Em estágios extremos da alteração, onde a fugacidade de oxigênio se torna ainda mais elevada, esses sulfetos são substituídos por Crisocola e Malaquita, que passam a predominar no minério oxidado.

## 5. CONCLUSÕES

A caracterização mineralógica permitiu a reclassificação dos tipos de minério, através do detalhamento da composição das amostras. As amostras estudadas são compostas predominantemente por Plagioclásio, Quartzo, Clorita, Moscovita/Sericita, Epidoto e Óxidos/hidróxidos de Fe. Crisocola, Malaquita e Calcocita são os principais portadores de cobre. Nos resíduos, Covelita é o principal portador de cobre, uma vez que o cobre inicialmente contido em Crisocola, Malaquita, Antlerita, Clorita e Óxidos de Cu foi extraído quase por completo durante a lixiviação.

Através da caracterização dos sulfetos, foi possível identificar a gênese do minério sulfetado. As análises WDS nos grãos de sulfetos mostraram indícios de enriquecimento de Cu no minério sulfetado (*trend 1*) durante alteração hidrotermal do depósito. Já nos minérios misto e oxidado, observa-se o progressivo empobrecimento de Cu dos sulfetos. Isso ocorreu devido à lixiviação natural *in situ* causada pela percolação de fluidos descendentes com pH ácido, durante avançada alteração supergênica, seguindo a sequência de alteração (*trend 2*): Calcocita/Djurleita → Anilita-Digenita-Roxybita → Geerita → Spionkopita → Yarrowita → Covelita.

Quando se compara as médias composicionais dos sulfetos obtidas por análises WDS nas amostras iniciais com as médias dos mesmos sulfetos presentes nos resíduos de lixiviação, observa-se que, em geral, não há variações composicionais significativas que possam ser atribuídas aos ensaios. Somente a Covelita e a Bornita indicam a presença de raros grãos parcialmente atacados nos resíduos, sugerindo que o tempo de reação pode ter sido insuficiente. Não foi possível concluir se houve neoformação de sulfetos, devido à semelhança composicional entre os sulfetos nas amostras iniciais e nos resíduos. Sendo assim, a causa mais provável para a permanência de sulfetos nos resíduos é a não liberação dessas fases, devido ao encapsulamento por minerais inertes, o que não possibilitou o acesso da solução lixivante.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mineral Species containing Copper (Cu). Webmineral - Disponível em:

<http://www.webmineral.com/chem/Chem-Cu.shtml>. Acesso em ago/2011.

LARGE D. J., MACQUAKER J., VAUGHAN D. J., SAWLOWICZ Z., GIZE A. P. 1995. Evidence for low-temperature alteration of sulfides in the Kupferschiefer copper deposits of southwestern Poland. In: *Economic Geology*; 90(8):2143-2155.

SIKKA D. B., PETRUK W., NEHRU C. E., ZHANG Z. 1991. Geochemistry of secondary copper minerals from Proterozoic porphyry copper deposit, Malanjkhand, India. In: *Ore Geology Reviews*, 6: 257-290.

VALE, 2008. Caracterização mineralógica do minério de cobre - amostras iniciais e resíduos de ensaios de lixiviação. Centro de Desenvolvimento Mineral, Santa Luzia, 37p. (Documento interno).