

**LEANDRO DA SILVA CORRÊA**

**DESENVOLVIMENTOS RECENTES NO BENEFICIAMENTO DE  
MINÉRIOS AURÍFEROS ASSOCIADOS A SULFETOS**

São Paulo

2018

**LEANDRO DA SILVA CORRÊA**

**DESENVOLVIMENTOS RECENTES NO BENEFICIAMENTO DE  
MINÉRIOS AURÍFEROS ASSOCIADOS A SULFETOS**

Trabalho de Formatura em Engenharia de  
Minas do curso de graduação do  
Departamento de Engenharia de Minas e  
de Petróleo da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Orientadora: Profa. Dra. Carina Ulsen

Co-Orientador: MsC. Guilherme Pinho Nery

São Paulo

2018

TF-2018

C651d

lypno 2930663

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

H2018v



Escola Politécnica - EPMI



31700000804

Catálogo-na-publicação

Correa, Leandro

DESENVOLVIMENTOS RECENTES NO BENEFICIAMENTO DE  
MINÉRIOS AURÍFEROS ASSOCIADOS A SULFETOS / L. Correa -- São  
Paulo, 2018.

26 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.BENEFICIAMENTO MINERAL I.Universidade de São Paulo. Escola  
Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

## DEDICATÓRIA

Primeiramente, dedico esse trabalho a Deus, pela vida, saúde e dons que me deu. Aos meus pais, Maria Emília e Clóvis Corrêa, que mesmo sem muitas instruções me incentivaram a estudar, aceitando minhas escolhas e me apoiando nas decisões. A minha irmã Walérya que passou comigo períodos difíceis no cursinho, ajudando a manter a mente sã e ao meu irmão Mateus.

Aos meus parentes e em especial a minha tia Morisalva Aparecida, pessoa que me fez desenvolver o gosto por estudar e a minha avó Tereza, pessoa extremamente bondosa.

Aos meus amigos, responsáveis em parte por quem me tornei, em especial Bruna Branquinho, quem me apresentou um curso preparatório para vestibular em Franca, Jady Auada, Pedro Oliveira e Marina Figueireido por me ajudarem a suporta o peso da POLI. Aos amigos que conheci por força do destino, em especial Alessandro Salem, Robson Damin, Mayara Yumi, Guilherme Diniz, Clayton Ribeiro, Ana Raquel, Luana Lua e Luan Lima.

Pela paciência e suporte neste trabalho, Guilherme Nery e Carina Ulsen e a amiga Andreza Caieiro.

## RESUMO

As ocorrências dos minérios auríferos podem direcionar as etapas do processo para a obtenção do ouro. O processo de beneficiamento desse minério envolve diversas etapas que podem ser influenciadas pela presença de determinadas substâncias. O presente trabalho tem por objetivo mostrar os últimos avanços no beneficiamento de minérios auríferos associados a sulfetos. Foram identificados e analisados os trabalhos recentes que abordam o tema de beneficiamento aurífero dos tipos de ocorrência no Brasil. As inovações apresentadas nos trabalhos analisados abordam o uso de diferentes reagentes de flotação de ouro associado a sulfetos, lixiviação, impacto dos tipos de corpos moedores na flotação, modelos de célula de flotação e um método preditivo do desempenho da flotação em escala industrial. Os avanços apresentados têm por objetivo tornar os processos de beneficiamento mais econômicos e eficientes, refletindo dessa forma, na vida útil da mina. Assim, é recomendável não apenas adotar as inovações como também intensificar as pesquisas nas respectivas áreas.

**Palavras chaves:** minério de ouro, flotação, sulfeto

## **ABSTRACT**

The occurrences of gold ores can lead the process steps to obtain the gold. The gold ore beneficiation process envelops many steps that can be influenced by the presence of certain substances. The aim of the current work is to represent the latest advances of golden sulfide ores beneficiation process. The latest articles that approach the subject of gold ore beneficiation were identified and analysed. The innovations found in the researchs approaches with the using of reagents that impacting the flotation golden sulfide ores, the impact of the types of grinding bodies on the flotation process, a new flotation cell model and a new method which predicts industrial flotation performance. The goal of these innovations it is to became the beneficiation process more economical and efficient, therefore, reflecting in the life of the mine. This it is recommended to adopt the innovations and also to improve the research in the respective areas.

**Keywords:** Gold ore, flotation, sulfide

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO .....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1	INOVAÇÕES EM MINÉRIOS AURÍFEROS ASSOCIADO A SULFETOS DE FERRO .....	3
2.2	INOVAÇÕES EM MINÉRIOS AURÍFEROS COM PROBLEMA DE <i>PREG ROBBING</i> .....	9
2.3	INOVAÇÕES EM MINÉRIOS AURÍFEROS COM OCORRÊNCIA EM SULFETO DE FERRO E ARSÊNIO .....	11
2.4	DEMAIS INOVAÇÕES EM MINÉRIOS AURÍFEROS ASSOCIADOS A SULFETOS .....	12
2.4.1	<i>Influencia da água reciclada na flotação</i> .....	12
2.4.2	<i>Recuperação de partículas finas e ultrafinas</i> .....	13
2.4.3	<i>Nova célula de flotação</i> .....	15
2.4.4	<i>Método para prever aplicabilidade da flotação em escala industrial</i> .....	18
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DOS ARTIGOS.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>22</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O ouro, do latim, *Aurum* (brilhante), é um material cobiçado e bastante procurado no mundo todo, com registro de artefato encontrado na Bulgária datado de cerca de 4500 a.C. (FERNÁNDEZ, 2016). É um elemento químico de símbolo Au, aspecto/cor amarela, maleável, dúctil, com alta densidade,  $19,3 \text{ g/cm}^3$ , e que possui alta estabilidade química. Além de ser um ativo financeiro, o ouro é usado para a fabricação de joias, devido à sua aparência brilhante e a sua raridade, também tem aplicações na indústria de produtos eletrônicos, devido à suas qualidades na condução da eletricidade.

Seu beneficiamento mineral envolve uma série de operações unitárias e processos que têm como objetivo a obtenção de minerais de ouro livre e concentrado. Em 1905, na Austrália, iniciou-se o processo de flotação com o tratamento do grafite. Entre 1920 e 1930 iniciou-se o uso de coletores, entre eles, o xantanto, o coletor mais usado até o presente momento. No período de 1940 a 1970 ocorreu a evolução dos equipamentos, com diferenciação do design e maquinários maiores e mais produtivos. De 1970 a 1990 os processos de tratamento de minérios foram otimizados através da automação e computação, assim como, ocorreu a racionalização da energia (LUZ, SAMPAIO, & FRANÇA, 2010). Atualmente, o beneficiamento continua evoluindo e sendo velozmente modificado através de mudanças de reagentes, equipamentos, processos etc.

Os grãos de ouro em uma jazida variam em tamanho: de pepitas (ordem de milímetros) até grãos de ordem nanométrica. Em alguns casos, verifica-se que os minérios de ouro são refratários devido às inclusões de ouro nos sulfetos e a concentração por flotação se faz necessária, seguida por ustulação e lixiviação para liberar o ouro antes da cianetação. (DUNNE, 2005).

A extração de ouro dos minérios envolve a separação por gravidade para recuperar o ouro grosso e a flotação para recuperar o ouro liberado fino e o ouro associado a outros minerais de sulfeto. Os concentrados ou rejeitos contendo ouro podem ser lixiviados em meio de cianeto alcalino, seguido pelo processo Merrill-Crowe ou



adsorção/eletroescoria de carbono para remover o ouro das soluções de cianeto. Os precipitados de ouro são calcinados e fundidos para produzir ouro (CHAVES, 2004). Zhou et al. (2004) apresenta as principais ocorrências dos minérios auríferos, divididos em 11 tipos (Tabela 1). Tal classificação possibilita direcionar a melhor rota de beneficiamento, considerando-se o manuseio de cada tipo de minério.

Tabela 1 – Principais associações dos minérios auríferos.

<b>1 Placers</b>	Ocorre livre ou é facilmente liberado antes do processamento, tamanho varia de 50-100 $\mu\text{m}$ .
<b>2 Veios de quartzo</b>	Ocorre em veios de quartzo, com porções de alguns teluretos e aurostibite e maldonite. Comumente ocorre como partículas de ouro liberadas.
<b>3 Oxidados</b>	Ocorre liberado ou no produtos de alteração de minerais de sulfeto.
<b>4 Ricos em prata</b>	Ocorre como electrum, embora pode estar presente em kustelita
<b>5 Sulfeto de cobre</b>	Ocorre como partículas grossas liberadas e partículas finas encapsula em pirita e sulfuretos de cobre.
<b>6 Sulfeto de ferro</b>	Ocorre como partículas liberadas, mistas e inclusas em sulfeto (pirita, marcassita e pirrotita), e como ouro microscópico em minerais de sulfeto.
<b>7 Alto teor de arsênio</b>	Ocorre como partículas liberadas e inclusas, e arsenopirita e produtos oxidados.
<b>8 Sulfeto de antimônio</b>	Ocorre principalmente como ouro nativo, com menor quantidade aurostibite, liberada ou encapsulada em sulfetos.
<b>9 Sulfeto de bismuto</b>	Ocorre principalmente como ouro nativo, com baixas quantidades de maldonite.
<b>10 Telureto</b>	Ocorre como ouro nativo em teluretos, podendo estar associado à sulfetos.
<b>11 Carbonosos</b>	Ocorre principalmente como partículas finas e submicroscópica em sulfetos e ouro superfície absorvida de matéria carbonosa e FeOx.

Fonte: ZHOU *et al.* (2004), adaptada.

## 1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo mostrar os últimos avanços no beneficiamento de minérios auríferos associados a sulfetos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 INOVAÇÕES EM MINERIOS AURÍFEROS ASSOCIADO A SULFETOS DE FERRO

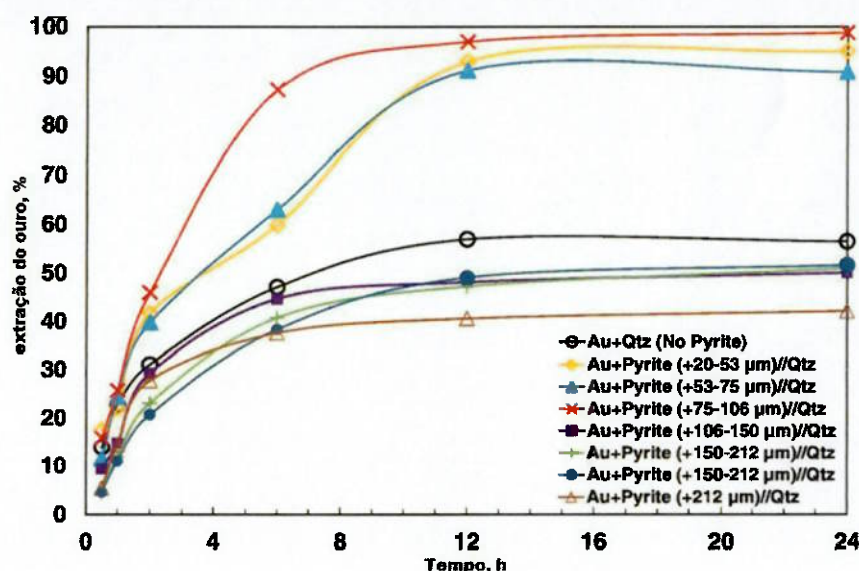
Os minérios auríferos associados com ferro ocorrem como partículas liberadas, mistas ou inclusas em sulfetos (pirita, marcassita e pirrotita) e como ouro microscópico em minerais de sulfetos (ZHOU *et al.*, 2004). Sendo que o comportamento do ouro nas etapas de beneficiamento está intimamente ligado as características do sulfeto (LIU e YEN, 1995).

No processo de lixiviação, minerais sulfetados são até certo ponto solúveis em soluções de cianetos, com algumas espécies consumindo mais cianetos que outras (BAS *et al.*, 2018), dessa forma, identificar o tipo de mineral sulfetado associado ao ouro é essencial para a sua ótima recuperação.

Um estudo foi conduzido por Bas *et al.* (2018) para analisar o efeito do tamanho da partícula e da quantidade de pirita (FeS) na dissolução do ouro no estágio da lixiviação, no qual foi realizado em um reator de lixiviação de leito empacotado, PBLR (que possui capacidade de "artificialmente" emular grandes conjuntos de contatos microscópicos), com o processo de flotação convencional. Os experimentos para examinar essa influência foram conduzidos com amostras que variavam a faixa granulométrica da pirita de 20 a 212  $\mu\text{m}$ , com P80 do ouro de 39  $\mu\text{m}$  e quartzo. Realizou também outra amostra sem a adição da pirita. A massa da pirita foi de 4 g e do ouro, 50 mg.

Concluiu-se, que as faixas granulométricas maiores que 106  $\mu\text{m}$  possuem decréscimo na extração do ouro e que a melhor faixa granulométrica da pirita, para ser usada na cianetação, é de 75 a 106  $\mu\text{m}$ . Verificou-se também que após 12 horas de cianetação, a extração do ouro varia em margens muito pequenas (BAS *et al.* 2018) (Figura 1).

Figura 1- Extração de ouro para diferentes faixas granulométricas.



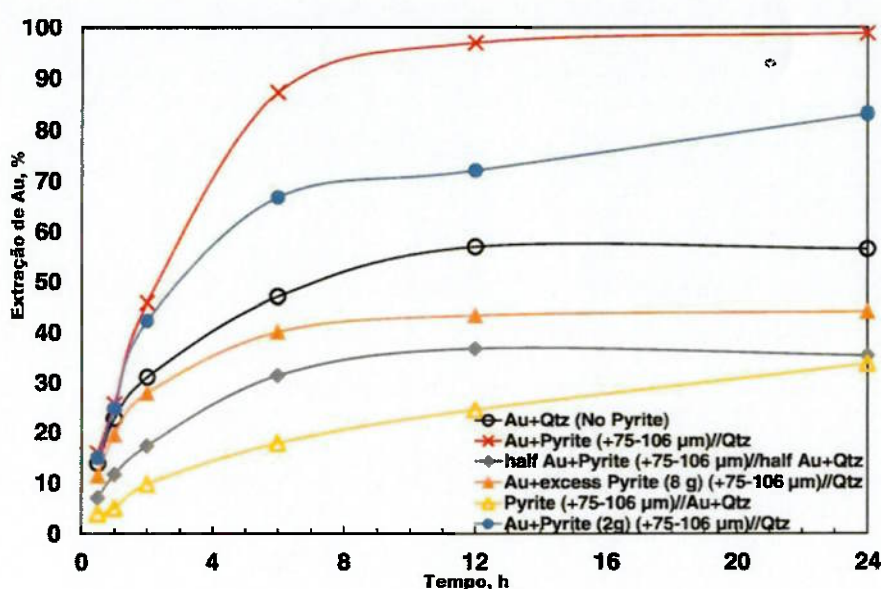
Fonte: BAS, et al. 2018

Para verificar a eficiência da diluição do ouro em relação à quantidade de pirita, foram feitos experimentos variando a proporção de pirita em relação ao ouro. Usou-se como base, a amostra com o melhor resultado de faixa granulométrica, 4g de pirita e intervalo de 75 a 106 µm. Foram preparadas mais 3 amostras: com excesso de pirita (8 g), com metade da quantidade de pirita (2 g) e, por último, uma amostra com metade de ouro + pirita e a outra metade com ouro + quartzo.

Os resultados demonstram que ao reduzir a quantidade de pirita pela metade, a extração de ouro aumenta em 30% em relação a amostra sem pirita (apenas quartzo e ouro) (Figura 2). Porém em relação a amostra base (4 g de pirita), a extração do ouro foi 20% menor, o que permite concluir que a presença da pirita é importante nas

diluições do ouro (Figura 2). No entanto, esta deve estar presente em proporções adequadas, como as utilizadas no estudo, com 4g de pirita e 50 mg de ouro (BAS, et al. 2018). Para a amostra com o dobro da massa (8g), observou-se 44% de extração de ouro (Figura 2), o que permite concluir que o excesso de pirita tem um efeito negativo na dissolução do ouro, causando a passivação parcial.

Figura 2 – Extração do ouro em relação às massas de Au e pirita.



Fonte: BAS, et al. 2018

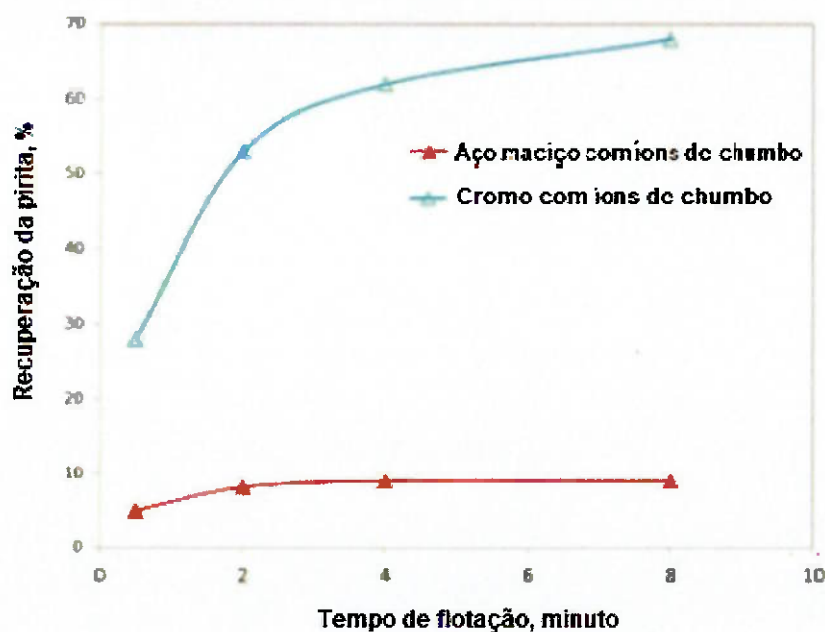
Referente aos efeitos de minérios sulfetados associados ao ouro no beneficiamento, os recentes estudos buscam compreender as interações galvânicas entre os corpos moedores e os minérios de sulfetos e qual o impacto essas interações causam nas etapas seguintes. As interações dependem de várias variáveis, como o minério presente, a água do processo, os reagentes e os corpos moedores utilizados. Os estudos de interações galvânicas abordados nos artigos são entre aço fundido, cerâmica e aço com cromo. Os aços com cromo possuem quantidades entre 12% e

35% de cromo, e são conhecidos como meios moedores de alto cromo (GREET E VAN DEN BOSCH, 2014).

Em estudo realizado por Peng e Grano (2010) comparou-se a eficiência do aço com cromo e do aço forjado, ambos com a adição de  $Pb^{2+}$  durante a moagem. Descobriu-se que a eficiência da flotação da pirita é mais eficiente quando a moagem é realizada com corpos moedores com cromo produzindo menores quantidades de hidróxido de ferro, sendo o resultado sete vezes maior do que os resultados encontrados nos processos com o meio moedor de aço forjado (Figura 3).

O efeito negativo dos corpos moedores de aço forjado ocorre devido a atração eletrostática entre o hidróxido de ferro ( $FeOH$ ) e a pirita. A atração faz precipitar o  $FeOH$  na superfície da pirita, impedindo a partícula de ser flotada, já no aço com cromo, a oxidação é mais resistente, resultando em menores quantidades de  $FeOH$ . (PENG e GRANO, 2010).

Figura 3 – Recuperação da pirita (em porcentagem) em função do tempo de flotação (em minutos) com diferentes corpos moedores (aço maciço com íons de  $Pb^{2+}$  e cromo com íons de  $Pb^{2+}$ ).



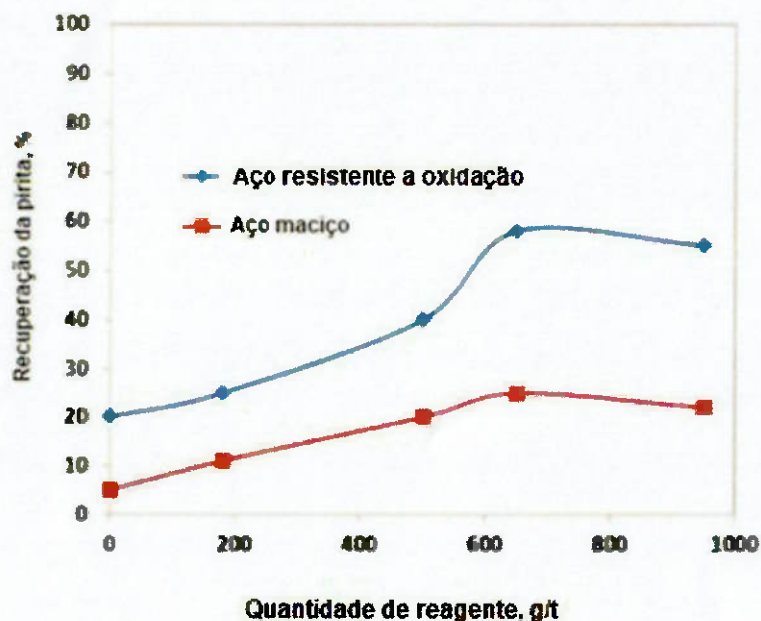
Fonte: (PENG e GRANO, 2010)

No trabalho realizado por Rabieh et al. (2016), o ativador  $Pb^{2+}$  foi comparado com o ativador  $Cu^{2+}$ . Os autores demonstraram que a moagem na presença do ativador  $Pb^{2+}$ , resultou em uma recuperação de ouro duas vezes maior que na presença do ativador de  $Cu^{2+}$ . Isso se deve à formação de diferentes tipos de hidróxidos em pH ácido, como  $Pb(OH)_2$ , formado na presença de ativador de  $Pb^{2+}$ , e  $Cu(OH)_2$  formado na presença do ativador  $Cu^{2+}$ . Como a solubilidade de  $Cu(OH)_2$  é cem vezes menor que a solubilidade de  $Pb(OH)_2$ , ocorre maior precipitação de  $Cu(OH)_2$  nas superfícies da pirita, o que torna o mineral menos flotável (RABIEH et al., 2016).

Greet e Van den Bosch (2014) compararão o uso de corpos moedores de aço com cromo e aço forjado e demonstraram que o uso dos corpos moedores com cromo é mais eficiente, pois além de ser menos corrosivo, reduz a contaminação da polpa por hidróxido de ferro, o que aumenta a recuperação da pirita. O experimento realizado com a ausência de  $Cu^{2+}$  nos dois corpos moedores (aço forjado e com ferro com cromo), mostrou que o desempenho da flotação foi quatro vezes maior com os corpos moedores com cromo (Figura 4). O consumo de reagente é menor com o uso de corpos moedores de cromo pois a partícula de sulfeto não é recoberta pelo hidróxido de ferro, facilitando a reação entre o sulfeto e o reagente.

Figura 4 – Curvas da recuperação da pirita (em porcentagem) em função da quantidade de reagente (g/t) para o aço mais resistente a oxidação (com cromo) e para o aço maciço.



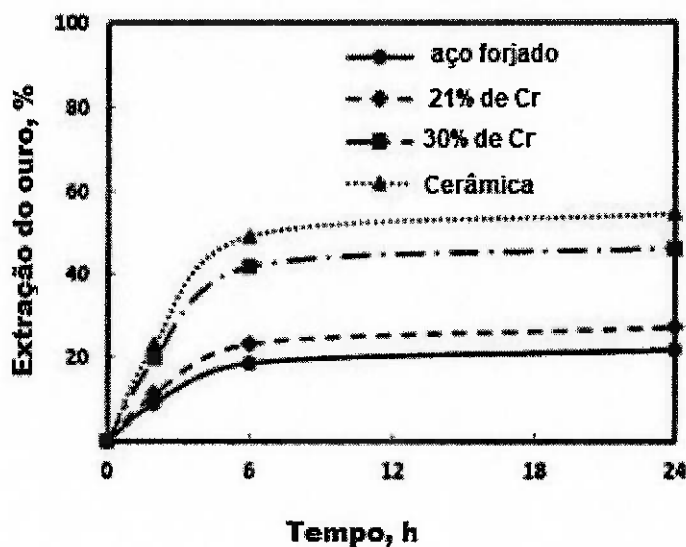


Fonte: RABIEH et al. (2017)

Além dos estudos voltados para os efeitos da cianetação do ouro na presença da pirita ( $\text{FeS}$ ), novos estudos foram realizados com a pirrotita ( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ). Sabe-se que a pirrotita precisa ser pré-oxidada antes da etapa de cianetação, porém no trabalho publicado por Rabieh et al. (2017) são analisados os efeitos da moagem na cianetação com a pirrotita sem a pré-oxidação do mineral, para entender o efeito puro da interação galvânica na cianetação.

Para o experimento, os autores compararam 4 tipos de corpos moedores: aço forjado, aço com 21% de cromo, aço com 30% de cromo e cerâmico. Os resultados demonstraram que usando corpos moedores de cerâmica e com 30% de cromo, a extração de ouro na cianetação foi 3 vezes maior que no uso de corpos moedores com aço forjado. Observou-se também que o desempenho da lixiviação de ouro nos ensaios de aço com cromo 30% e cerâmica, apenas 1% do cianeto foi decomposto em ferrocianeto e 2,5% em tiosulfato. O resultado com corpos moedores de cerâmica e de ferro com 30% de Cromo foi de 50% (RABIEH et al. 2017). Os autores interpretam este resultado como resposta da interação galvânica entre o minério e a parede do moinho, e julgam necessários mais estudos sobre o assunto. Já para o aço forjado e cromo 21%, os resultados mostraram que 75% a 44% do cianeto foram convertidos em ferrocianeto. Após 6 horas de extração, o desempenho de cada material não se altera muito, atingindo um platô (Figura 5).

Figura 5 – Extração de ouro (em porcentagem) para 4 tipos de corpos moedores (aço forjado, aço com 21% de cromo, aço com 30% de cromo e aço cerâmico) no período de 24 horas.



Fonte: Rabieh et al. 2017

## 2.2 INOVAÇÕES EM MINÉRIOS AURÍFEROS COM PROBLEMA DE *PREG ROBBING*

Os minérios auríferos associados a material carbonoso apresentam problemas na etapa de extração metalúrgica por cianeto devido à adsorção do ouro pelo material carbonoso. Tal efeito deletério é conhecido por *preg robbing*. O presente trabalho aborda assuntos recentes na mineração, como a micohidrometalurgia e o efeito da ganga não sulfetada em depósitos do tipo Carlin.

Os depósitos de ouro do tipo Carlin são formados em rochas sedimentares, contituído por pirita rica em arsenopirita e siltitos e dissolução de carbonatos, e são caracterizados como ouro duplo-refratário (ZHOU e CABRI, 2004). Esse tipo de depósito corresponde a 9% de todo o ouro produzido mundialmente e os Estados Unidos são os maiores produtores de ouro a partir destes depósitos (CLINE et al., 2005).



Vários estudos realizados com esse tipo de minério (Carlin) indicaram baixa recuperação e fraca separação, mesmo quando o minério de interesse é liberado adequadamente. Além disso, pesquisas mineralógicas e de flotação descartam que as explicações de que estes prejuízos são causados pelo grau de liberação, reagentes e condições experimentais (TABATABAEI et al., 2014).

O estudo conduzido por Tabatabaei et al. (2014) investiga os efeitos dos minerais de ganga não-sulfetados na flotação de minerais sulfetados de ouro do tipo Carlin, hipoteticamente, considerados prejudiciais. Após isolar os componentes dos minerais do tipo Carlin, os autores organizaram diversos arranjos para verificar o comportamento dos minerais em diferentes condições, variando a quantidade de matéria carbonosa. Verificou-se que mesmo em pequenas quantidades de minerais de ganga não-sulfetados, ocorreram efeitos indesejados na flotação de sulfetos e na seletividade. Apesar do experimento não demonstrar as causas diretas do resultado negativo da recuperação de sulfetos, o efeito indesejado dos minerais de ganga foi mais forte no grau de concentrado do que na recuperação. A diluição do grau de concentração foi atribuída ao aumento da estabilidade da espuma e ao aumento do arrasto dos minerais de ganga.

Ofori-sarpong et al. (2013) aborda em seu estudo um termo recente na bio-lixiviação usada mineração, a micohidrometalurgia, que é a aplicação de fungos na hidrometalurgia. Após pesquisas e usos de bactérias para oxidação de sulfetos, estudos recentes são realizados com o uso de fungos. O tratamento com fungos é um processo de pré-tratamento alternativo para os minerais de ouro refratário duplo, e o uso da espécie de fungo *Phanerochaete chrysosporium* mostrou melhoras nos resultados de concentração por flotação (OFORI-SARPONG et al., 2013).

O experimento realizado por Ofori-sarpong et al. (2013) avaliou o uso do fungo com capacidade de decompor sulfetos e desativar a matéria carbonosa em dois tipos de concentrado, sendo um concentrado padrão de flotação e outro concentrado por flotação oxidada por bactérias. Os autores demonstraram que a decomposição de sulfeto foi de 57% na concentração por flotação e de 98% na concentração por flotação oxidada por bactéria em um período de 21 dias. No mesmo período, a extração de ouro aumentou de 41% para 78% nas amostras de concentração por

flotação, e de 81% para 94% nas amostras de concentração de flotação oxidada por bactéria. Esses resultados sugerem que a eficiência do pré-tratamento alternativo para minérios auríferos carbonosos é um método promissor.

Para o pré-tratamento de minerais de ouro com matéria carbonosa, Yang (2015), realiza um estudo no qual compara os métodos atuais de pré-tratamento de minerais de ouro com matéria carbonosa. Ele demonstrou que o uso da oxidação de minérios auríferos sulfetados para a etapa da cianetação é necessária, pois o teor deste tipo de minério é baixo e a recuperação do ouro sem o pré-tratamento é baixa, de apenas 11,75%. O trabalho teve como objetivo comparar o efeito do pré-tratamento de minérios auríferos sulfurosos e carbonosos usando 3 métodos: a torrefação, aquecimento por micro-ondas e oxidação por pressão alcalina. Dos 3 métodos, a torrefação obteve a maior recuperação sendo de 82,37%, contra 81,26% do aquecimento por micro-ondas e 71,09% da oxidação por pressão alcalina. Assim, o autor conclui que a técnica da torrefação é mais eficiente para oxidar os minérios sulfurosos e carbonosos.

## **2.3 INOVAÇÕES EM MINÉRIOS AURÍFEROS COM OCORRÊNCIA EM SULFETO DE FERRO E ARSÊNIO**

Os minérios auríferos associados ao sulfeto de arsênio ocorrem como partículas de ouro em arsenopirita ( $\text{AsFeS}$ ) e em produtos oxidados (ZHOU *et al.*, 2004). As inovações encontradas para este tipo de minério referem-se à oxidação na etapa da moagem.

Aleksandrova *et al.* (2015), realizaram um estudo sobre métodos promissores de enriquecimento de minérios de ouro associados a sulfetos com arsênio. No estudo os autores abordam métodos de oxidação da arsenopirita na etapa da moagem com o fim de aumentar a recuperação do sulfeto contendo ouro encapsulado.

As reações químicas da matéria-prima no estágio da moagem têm uma importância significativa durante o enriquecimento e no resultado da extração do ouro encapsulado nos sulfetos, isso ocorre devido ao aumento da energia potencial e das atividades

químicas das substâncias. Quando adsorvidos na superfície do mineral fragmentado, os reagentes reduzem a energia potencial na superfície, afetando as propriedades mecânicas do material, facilitando a moagem e a flotação (ALEKSANDROVA *et al.*, 2015).

Segundo Aleksandrova *et al.* (2015), o uso do reagente permanganato de potássio como oxidante da arsenopirita (minério com 1,07% de arsenopirita), torna a oxidação do minério mais rápida, melhora a eficiência da extração de ouro e reduz a quantidade de arsênio no produto. Os resultados de análise química demonstraram que a máxima recuperação de ouro nos minérios com arsenopirita e pirita foi de 72,2% para a quantidade de 100g/t de permanganato de potássio, enquanto que para quantidades maiores que 100 g/t de permanganato de potássio, há redução da recuperação do ouro.

## **2.4 DEMAIS INOVAÇÕES EM MINÉRIOS AURÍFEROS ASSOCIADOS A SULFETOS**

Inovações tecnológicas do beneficiamento de minérios auríferos ocorrem em todas as etapas do processo, alguns estudos abordam os sulfetos em geral nos seus estudos. Diante disso, foram analisados os trabalhos que abordaram as inovações de ouro com sulfetos em novas células de flotação, método laboratorial que prevê a eficiência em escala industrial, e os efeitos da recirculação da água na flotação.

### **2.4.1 Influência da água reciclada na flotação**

A água usada na moagem e na flotação muitas vezes são águas recicladas, e apesar da destruição do cianeto elas possuem quantidades baixas de cianeto de cobre e zinco, originários da lixiviação de minerais contendo cobre e sulfetos de zinco. Este cianeto presente na água reciclada possui efeito deletério e sabe-se que o cianeto livre, na forma de NaCN, é usado como depressor para os minerais sulfetados. (GUO *et al.*, 2016).

Estudos recentes demonstram que o cianeto cuproso,  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$  com esfarelita e pirita de minérios de ouro é um depressor da pirita na flotação de um modo semelhante ao cianeto na forma  $\text{NaCN}$ , inibindo as reações eletroquímicas de superfície e removendo a camada superficial da adsorção de xantato. No entanto, para o ouro livre, espécies de cianeto cuproso têm pouco efeito de depressor na flotação (GUO et al., 2015).

O cianeto de zinco foi analisado para verificar como afeta a flotação do ouro (GUO et al., 2015). A adsorção competitiva foi verificada entre espécies de cianeto de zinco e coletores de tiol (xantato e aerofleno (3418A)) na superfície do ouro, e observou-se que o cianeto de zinco só deprime o ouro livre na flotação se a relação  $\text{CN/Zn}$  é de 2, no entanto, quando há outras relações, isso não ocorre. Guo et al. (2016) também conclui que os coletores 3418A ou xantato não adsorvem na superfície do ouro modificadas por cianeto de zinco.

#### **2.4.2 Recuperação de partículas finas e ultrafinas**

O número de pesquisas para aumentar a recuperação de partículas finas e ultrafinas na flotação e possibilitar a recuperação econômica do ouro com baixo teor de minério é crescente nos últimos anos. Segundo Liu et al. (2016), há um aumento da recuperação do ouro de granulometria fina e ultrafina com o uso de óleo de enxofre. Os resultados foram obtidos comparando 3 processos: processo de flotação convencional, processo de flotação convencional com uso de óleo de enxofre com  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , como regulador do pH da polpa e o método CGA (*coloidal gas aphyrons*), em escala laboratorial e industrial.

A flotação em escala industrial foi realizada em circuito fechado, sendo o primeiro estágio *rougher*, duas etapas de estágio *cleaner* e três etapas do estágio com *scavenger*. Em seguida as amostras foram secas e analisadas (LIU et al., 2016).

O método CGA usa as características de hidrofobicidade e oleocificidade do carvão e do ouro para separá-los da ganga. O processo é feito através de microbolhas com propriedades coloidais criadas por agitação intensa de soluções de surfactante (SEN,

2005). A agitação intensa da solução de surfactante provoca o arraste de ar e a formação de microbolhas.

Segundo Shi *et al.* (2000), o método apresenta maior eficiência na recuperação de partículas na faixa granulométrica de 5 a 300 µm. Neste método, deve-se atentar às outras variáveis, como quantidade e tamanho do material carbônico, quantidade e espécie de óleo, relação óleo e carvão, tempo de agitação, tempo de contato e o número de aglomerados, pois estes irão interferir no desempenho do método CGA. A granulometria no experimento laboratorial foi inferior a 0,037 mm e no industrial foi de 0,074 mm (LIU *et al.*, 2016), sendo que foram usados diversos reagentes em quantidades distintas (Tabela 2).

Tabela 2 - Reagentes usados no teste experimental e laboratorial no trabalho de Liu *et al.* (2016).

Dosagem total (g/t)	Experimento Laboratorial			Experimento Industrial		
	Flotação Convencional	Método CGA	Aglomerado com óleo de enxofre	Flotação Convencional	Método CGA	Aglomerado com óleo de enxofre
Butil Xantato (g/t)	280	320	300	300	340	250
Butilamina ditiofosfato (g/t)	85	80	0	85	80	0
MIBC (g/t)	60	60	50	150	100	50
Carbão (g/t)	-	360	-	-	360	-
Emulsão de querosene (g/t)	-	1640	360	-	1640	380
Enxofre (g/t)	-	-	120	-	-	150
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/t)	-	-	500	-	-	500
CuSO <sub>4</sub> (g/t)	700	500	-	-	-	-
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/t)	2000	2500	2000	-	-	-

Fonte: (LIU, *et al.*, 2016) adaptado

Os resultados dos experimentos demonstram que o método CGA apresenta uma maior recuperação quando comparado à flotação convencional, mas menor que a aglomeração com óleo de enxofre na escala industrial (Tabela 3).

Tabela 3 - Resultados das três flotações, mostrando a vazão mássica e a recuperação da Alimentação, do Concentrado e do Rejeito.

Circuito	Produto	Escala Laboratorial		Escala Industrial	
		Grau (g/t)	Recuperação (%)	Grau (g/t)	Recuperação (%)
Flotação Convencional	Alimentação	2,02	100	1,68	100
	Concentrado	11,2	55,13	20,2	82,51
	Rejeito	1,01	44,87	0,32	17,49
Método CGA	Alimentação	2,01	100	1,66	100
	Concentrado	15,6	67,16	22,33	85,92
	Rejeito	0,72	32,84	0,24	14,08
Aglomeração com óleo de enxofre	Alimentação	2,02	100	1,68	100
	Concentrado	16,83	80,16	25,38	90,73
	Rejeito	0,44	19,84	0,17	9,27

Fonte: (LIU *et al.*, 2016) adaptado

Após o estudo, os autores concluíram que o óleo de enxofre é um reagente promissor, simples e barato e que pode aumentar a eficiência da recuperação do ouro. Comparado ao método de aglomeração CGA, o método de aglomeração de óleo de enxofre é mais eficaz e com menor uso da quantidade de reagentes, além disso, o enxofre é mais barato que o carvão betuminoso de alta qualidade, deixando o processo mais econômico (LIU, *et al.*, 2016). Nesse experimento, a adição de reagentes foi diferente para cada método. O tiosulfato de amônio, o enxofre e o querosene emulsionado foram adicionados na etapa da moagem, enquanto no método CGA, os reagentes foram adicionados na célula de flotação. Como citado anteriormente, a interação galvânica cria um diferencial de potencial elétrico no sistema que pode favorecer o processo.

#### 2.4.3 Nova célula de flotação

Quando se trata de avanços tecnológicos na área de células de flotação, podemos citar a célula de flotação HydroFloat™, patente destinada a Eriez Manu em 2002. A nova tecnologia usada em células de flotação HydroFloat™ tem a capacidade de



trabalhar com partículas grossas com diâmetros de até 3000 µm, diferente das células convencionais de flotação, que trabalham com faixas granulométricas com tamanho máximo de 150 a 200 µm.

Em estudo para minérios de ouro associados a sulfetos, realizado por Miller et al. (2016), foram obtidas recuperações quase completas com partículas com granulometria na faixa de 850 a 500 µm, contendo até 1,5% de área superficial do grão exposta, mostrando-se melhores que o uso de células mecânicas convencionais. Mais da metade das partículas encontradas no concentrado do equipamento HydroFloat™ apresentaram exposições da superfície de grão inferiores a 19%, enquanto que no processo de concentração com célula mecânica, metade das partículas no concentrado apresentaram menos de 72% da área superficial do grão exposta. A análise feita com o HRXMT (high resolution X-ray microtomography) com o produto do rejeito mostrou que nenhuma partícula com exposição maior que 1,5% foi encontrada no rejeito do HydroFloat™, enquanto no equipamento convencional (célula mecânica) haviam partículas com até 6% de exposição da superfície (MILLER *et al.*, 2016).

O autor desse estudo sugere que o separador HydroFloat™ pode ser uma opção viável para aumentar o rendimento do concentrador, elevando a capacidade do moinho. Consequentemente, a produtividade aumenta como resultado do tamanho da moagem mais grossa e de uma menor necessidade da extensão de liberação do sulfeto (que pode ser efetivamente tratada por essa tecnologia única de flotação).

De acordo com Kohmuench et al. (2013), o separador HydroFloat™ oferece várias vantagens para o tratamento de fluxos de alimentação mais grossas, incluindo turbulência reduzida, colisão e fixação aprimoradas de partículas de bolhas, eliminação de restrições de flutuabilidade, aumento do tempo de residência das partículas e condições de separação do fluxo do plugue.

O separador HydroFloat™ consiste em um tanque circular subdividido em uma câmara superior, uma câmara de separação intermediária e um cone de desaguamento inferior (Figura 6). Os sólidos da alimentação são introduzidos pela parte central e superior da célula, no qual é contra ao fluxo ascendente de água ou outro meio de fluidização. O fluxo ascendente cria um "fluido oscilante", deixando as

partículas suspensas com alta velocidade e que resistem à penetração de partículas de sedimentação lenta. O gás é então introduzido e disperso junto com o bocal na rede de fluidização através de um sistema de dispersão de alto cisalhamento localizado externamente. À medida que as bolhas de ar sobem através da polpa oscilante, elas se ligam às partículas hidrofóbicas, reduzindo assim a sua densidade efetiva.

As partículas podem ser naturalmente hidrofóbicas ou tornadas hidrofóbicas através da adição de coletores de flotação. Os agregados de partículas de bolhas mais leves sobem ao topo da camada mais densa, onde se acumulam devido à sua menor densidade. Partículas com exposições mínimas de superfícies hidrofóbicas são impedidas de serem perdidas e irem para o rejeito devido a ação oscilante. As bolhas são introduzidas nos sólidos agregados e levadas para cima, onde são transportadas rapidamente pelo fluxo ascendente da água do compartimento superior, no qual serão coletadas.

Devido à constante produção de *overflow*, é formada uma fina camada de espuma no topo da polpa de flotação. As partículas hidrofílicas que não se ligam às bolhas de ar continuam a mover-se para baixo através da polpa oscilante e decantam no cone de desidratação (*underflow*), onde são retiradas através do bocal. O fluxo através do bocal é controlado automaticamente com base nas leituras de um transmissor de pressão eletrônico.



Figura 6 - Esquematização do equipamento HydroFloat™.



Fonte: site eriezflotation.com

#### 2.4.4 Método para prever aplicabilidade da flotação em escala industrial

Outro estudo sobre células de flotação foi abordado por Newcombe (2014), no qual é possível prever o desempenho da flotação de minérios auríferos de ferro em escala industrial através de uma metodologia laboratorial. Este método pode ser usado

juntamente com a análise mineralógica para determinar se o minério possuirá ou não, recuperação eficiente na flotação. O método desenvolvido analisando os elementos alvos (Au, S e Fe), encontrou correlações diretas entre as propriedades do concentrado da flotação em escala industrial e do concentrado laboratorial. Ambos possuíam distribuições por tamanho quase idênticas e a mesma liberação do mineral alvo (pirita). Um segundo teste foi realizado com outro minério aurífero de ferro e confirmando a aplicabilidade deste método (NEWCOMBE, 2014).

Os estudos para o desenvolvimento do método começaram em 2012 com a busca de partículas de alimentação dos elementos alvos (Au, Fe e S) e das melhores condições operacionais de trabalho. Dessa forma, com as informações de condições operacionais ótimas, variou-se o P80 de alimentação (usado nos trabalhos anteriores) e analisou o tamanho das partículas do produto da flotação e as características de liberação da pirita dos elementos alvos, obtendo resultados quase idênticos para o laboratório e para a planta da indústria, portanto, validando o método.

Desse modo, é possível determinar se um minério poderia ser tratado numa atual planta de flotação e se uma planta sem um sistema de flotação poderia ser beneficiada (ou não) com a implementação desse sistema. A tecnologia é aplicada para as células de flotação convencionais, e este estudo não possui correlação com o estudo de células HydroFloat™. Portanto, são importantes estudos futuros para validar a aplicabilidade do método neste tipo de célula.

### **3 AVALIAÇÃO DOS ARTIGOS**

O presente trabalho demonstrou os avanços em pesquisas relacionadas com as interações galvânicas para os minérios associados a ferro, no qual a adição de aditivos como Pb e Cu podem melhorar o processo de flotação, sendo que o ativador Pb permite um rendimento 4 vezes maior que o ativador Cu. Além disso, o uso dos corpos moedores com 30% de cromo e cerâmica são mais eficientes, pois o efeito da deposição de hidróxido de ferro na superfície do sulfeto não ocorre como nos corpos moedores de aço convencional.

O trabalho mostra também que para uma lixiviação de alta qualidade do ouro com presença de pirita, a faixa granulométrica desta deve ser entre 75 e 106  $\mu\text{m}$ . Assim como, quando há presença de material carbonoso, o efeito da ganga é prejudicial, e que entre os métodos convencionais (torrefação, pressão e aquecimento de micro-ondas), o mais eficiente é a torrefação. Uma alternativa para esse tratamento é o uso de fungos, que se comparado com o método da oxidação bacteriana, possui melhores resultados na extração e concentração final do ouro. Para minérios com arsênio, há uma melhora no processo com o uso de permanganato de potássio, atingindo uma recuperação máxima de 72,2% com dosagens de 100g/t. Enquanto que a água reciclada da lixiviação, usada na flotação, possui presença de íons de cianeto cuproso, que agem com efeito depressor da pirita, enquanto a água com presença de cianeto de zinco deprime o ouro livre com relação CN/Zn igual a 2, sendo portanto, importante atentar à essa relação.

O estudo abordou pesquisas com células de flotação, no qual é possível prever o desempenho da flotação em escala industrial através de métodos laboratoriais. Além disso, discutiu uma nova célula de flotação descrita na literatura, que permite flotar partículas mais grossas, como por exemplo, para o ouro de até 850  $\mu\text{m}$ . o trabalho ainda abordou um estudo sobre recuperação de partículas finas e ultrafinas com o uso de óleo de enxofre, que aglomera essas partículas aumentando a recuperação do ouro.

As pesquisas demonstram que o beneficiamento do ouro se desenvolve em várias linhas, e dessa forma, os processos tornam-se cada vez mais eficientes e rentáveis. Sugere-se que os próximos estudos correlacionem as informações abordadas neste trabalho com as tecnologias existentes e com as que surgirão, buscando entender de qual forma as melhoras individuais se comportam em conjunto com as demais.

## 4 CONCLUSÃO

O beneficiamento de minérios auríferos é bastante desafiador visto que inúmeros fatores podem acarretar perdas durante o processo. O conhecimento geológico da ocorrência do ouro, bem como dos demais minerais presentes no minério impactam significativamente na rota deste processo. Além disso, as operações unitárias que são selecionadas também influenciam na recuperação do ouro.

O presente trabalho, analisou as pesquisas mais recentes na área, indicando os impactos que essas tecnologias trazem para a industrial mineradora de ouro, como processos mais eficientes, economia de reagentes e aumento da vida útil dos equipamentos.

As inovações não são apenas mudanças com impactos na rota do processo, mas impactam na vida útil da mina, em processos eficientes com menor custo e com menor impacto ambiental.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEKSANDROVA, T. N.; ROMASHEV, A. O.; SEMENIKHIN, D. N. **Mineral and technological aspects and promising methods for intensifying enrichment of sulfide gold-bearing ore.** *Metallurgist*, v. 59, n. 3-4, p. 330-338, 2015.
- BAS, A. D.; LARACHI, F.; LAFLAMME, P. **The effect of pyrite particle size on the electrochemical dissolution of gold during cyanidation.** *Hydrometallurgy*, v. 175, p. 367-375, 2018.
- CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Vol. II, Desaguamento, Espessamento e Filtragem.** Brasil-São Paulo, 2004.
- CLINE, Jean S. et al. **Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models.** *Economic Geology*, 100th anniversary volume, v. 451, p. 484, 2005.
- FERNÁNDEZ, L. **5 históricos artefactos de oro que continúan siendo todo un misterio.**, disponível em: <<https://www.vix.com/es/mundo/175471/5-historicos-artefactos-de-oro-que-continuan-siendo-todo-un-misterio> Article 24/01/16 > Acesso em: Outubro de 2018
- GREET, C. J.; VAN DEN BOSCH, A. **The use of high chromium content grinding media in the mining industry.** In: Proceeding 27th International Mineral Processing Congress. 2014.
- GUO, B.; PENG, Y.; MAI, Y. **The effect of zinc cyanide on the flotation of gold from pyritic ore.** *Minerals Engineering*, v. 85, p. 106-111, 2016.
- GUO, B.; PENG, Y.; ESPINOSA-GOMEZ, R. **Effects of free cyanide and cuprous cyanide on the flotation of gold and silver bearing pyrite.** *Minerals Engineering*, v. 71, p. 194-204, 2015.
- KOHMUENCH, J.; THANASEKARAN, H.; SEAMAN, B. **Advances in Coarse Particle Flotation—Copper and Gold.** Plant Design and Operating Strategies-World's Best Practice (MetPlant 2013), p. 15-17, 2013.
- LIU, R. et al. **Enhanced flotation of refractory gold ore by using sulfur-oil agglomeration with (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as regulator in weak acidic pulp.** *Minerals Engineering*, v. 93, p. 24-31, 2016.



- LIU, G. Q.; YEN, W. T. **Effects of sulphide minerals and dissolved oxygen on the gold and silver dissolution in cyanide solution.** *Minerals engineering*, v. 8, n. 1-2, p. 111-123, 1995.
- LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., & FRANÇA, S. C. **Tratamento de minério** (5 ed.). Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- MILLER, J. D. et al. **Significance of Exposed Grain Surface Area in Coarse Particle Flotation of Low-Grade Gold Ore with the HydroFloat™ Technology.** In: International Mineral Processing Congress, Quebec City, Quebec. 2016.
- NEWCOMBE, B. **Predicting plant scale flash flotation performance–Validation of laboratory methodology and applications for use.** *Minerals Engineering*, v. 57, p. 57-67, 2014.
- OFORI-SARPONG, G.; OSSEO-ASARE, K.; TIEN, M. **Mycohydrometallurgy: Biotransformation of double refractory gold ores by the fungus, *Phanerochaete chrysosporium*.** *Hydrometallurgy*, v. 137, p. 38-44, 2013.
- PENG, Y.; GRANO, S. **Effect of grinding media on the activation of pyrite flotation.** *Minerals Engineering*, v. 23, n. 8, p. 600-605, 2010.
- RABIEH, A.; ALBIJANIC, B.; EKSTEEN, J. J. **A review of the effects of grinding media and chemical conditions on the flotation of pyrite in refractory gold operations.** *Minerals Engineering*, v. 94, p. 21-28, 2016.
- RABIEH, A.; EKSTEEN, J. J.; ALBIJANIC, B. **The effect of grinding chemistry on cyanide leaching of gold in the presence of pyrrhotite.** *Hydrometallurgy*, v. 173, p. 115-124, 2017.
- SHI, C. et al. **The recovery of fine gold particles from a slurry of minerals using liquid carbon dioxide.** *Supercrit. Fluids* 17 (1), 2000, p. 81 – 90.
- TABATABAEI, R. H. et al. **The effect of non-sulphide gangue minerals on the flotation of sulphide minerals from Carlin-type gold ores.** *Minerals Engineering*, v. 60, p. 26-32, 2014.
- YANG, Yongbin et al. **Extraction of gold from a low-grade double refractory gold ore using flotation-preoxidation-leaching process.** In: Rare Metal Technology 2015. Springer, Cham, 2015. p. 55-62.
- ZHOU, J.; JAGO, B.; MARTIN, C. **Establishing the process mineralogy of gold ores.** SGS Mineral – Technical Bulletin, 2004.

