

Métodos de concentração e extração de ouro

Arthur Pinto Chaves (*)

Ouro é um metal muito denso, brilhante e de aparência muito agradável, de elevada condutividade térmica e elétrica e de elevada resistência à corrosão. Pode ser laminado e trefilado (suas ligas) com intensidade maior que qualquer outro metal: lâminas de $0,1\mu\text{m}$ ($1/280.000''$) são normalmente encontradas no comércio e utilizadas em decoração de móveis e objetos de arte. Nessa espessura a lâmina é translúcida.

Sua resistência ao ataque químico e à corrosão talvez seja a sua propriedade mais importante: com exceção de água régia a quente, cianetos alcalinos e cloro nascente, o ouro não combinará com nenhuma outra substância. É facilmente molhado pelo mercúrio e forma ligas e compostos intermetálicos com ele.

Em consequência de sua aparência agradável, de sua estabilidade química e do fato de ocorrer em estado nativo, o ouro atraiu sempre a atenção do ser humano, desde as civilizações mais rudimentares. Os índios brasileiros já o conheciam. Monumentos egípcios de quase 3000 anos A.C. mostram cenas de beneficiamento de ouro, e sarcófagos e móveis encontrados nos túmulos dos antigos faraós exibem ornamentos de ouro finamente laminado. A tradição grega também registra o apreço por

este metal. A lenda dos argonautas e do toso de ouro é hoje interpretada como uma expedição militar grega contra as minas de ouro da Armênia.

Desde essa época o ouro tem estado associado à riqueza. A Bíblia, descrevendo a fortuna de Abraão, registra a quantidade de ouro que ele possuía. Dada a sua estabilidade química, acredita-se que a maior parte do ouro extraído nos últimos 10.000 anos esteja guardada em bancos, nos cofres dos governos ou preservada em objetos de arte e outros artefatos. Em todos os tempos jamais qualquer outro bem foi tão apreciado e zelosamente guardado.

A História do mundo e de sua economia registra três épocas de grande corrida ao ouro:

— em seguida à descoberta da América, o saque dos templos, palácios e túmulos da América Central e do Sul levou para a Europa uma quantidade de ouro tão grande que desbalanceou a sua estrutura econômica e política. Em seguida começou a exploração das minas pelo trabalho escravo. Estima-se que no século XVI saíram da América do Sul 240 t (8 milhões oz), 35% da produção mundial. Nos séculos XVII e XVIII estas minas, especialmente as colombianas, responderam com respectivamente 61 e 80% da produção mundial, que no século XVIII já subira para 1.440 t (48 milhões oz).

— nos vinte e cinco anos que se seguiram a 1850, quando foi descoberto o ouro da Cali-

fórnia e da Austrália. Neste período produziu-se mais ouro que desde a descoberta do continente americano.

— de 1890 a 1915, quando entraram em operação os campos auríferos do Alaska, Yukon e Transvaal.

Após 1920 o desenvolvimento do processo de cianetação tornou possível a produção de ouro a partir de minérios finos ou de baixo teor, especialmente no Canadá, e a mineração de rocha dura ("lode mining") passou a predominar.

Hoje quatro países, África do Sul, URSS, Canadá e EUA respondem com 85% da produção mundial. Estima-se que 60% desta produção seja adquirida pelos governos e bancos centrais para reserva monetária, que se supõe deva montar a quarenta bilhões de dólares, um quarto do total estando estocado nos EUA.

A produção brasileira gira em torno de 40 t/a, o que é irrisório perto da produção sul-africana, que é de 700 t/a, cerca de 70% da produção mundial, mas é da mesma ordem que a canadense (≈ 50 t/a) e americana (≈ 30 t/a).

A produção brasileira é sustentada por um exército de 250 mil garimpeiros que lavram dois terços do total. O terço restante se reparte entre multinacionais, estatais e mineradores privados brasileiros. Estes últimos têm se dedicado principalmente à lavra de aluviões e destacamos os grupos Parapananema, Brumadinho e Monteiro Aranha. As estatais estão entrando agora

(*) Trabalho apresentado na I Semana de Estudos Minero-Metalúrgicos do Centro Moraes Rêgo.

através da Metago, CRM e CVRD. As multinacionais estão investindo maciçamente em pesquisa e em minas de subsolo, merecendo destaque os esforços dos grupos Anglo American, General Mines e British Petroleum.

O ouro é o padrão monetário internacional: as moedas dos diferentes países têm suas paridades definidas em termos de ouro, tendo este como medida de valor e ponto de referência. A conversão das moedas entretanto não é feita em ouro mas sim em dólares — a pujança industrial e comercial dos EUA lhe dá uma enorme liquidez internacional (capacidade de efetuar pagamentos por obrigações vencidas e capacidade de contrair novas obrigações), de modo que sua moeda passa a atuar como uma verdadeira moeda internacional.

Existe então uma dupla paridade das moedas: em relação ao ouro e em relação ao dólar, mas elas são conversíveis em dólar. Os países precisam ter portanto reservas tanto em ouro como em dólares.

Na prática isto se traduz por uma extraordinária liquidez para o ouro e uma capacidade de trocá-lo pela moeda local em qualquer país, como se fosse dólar ou outra moeda forte.

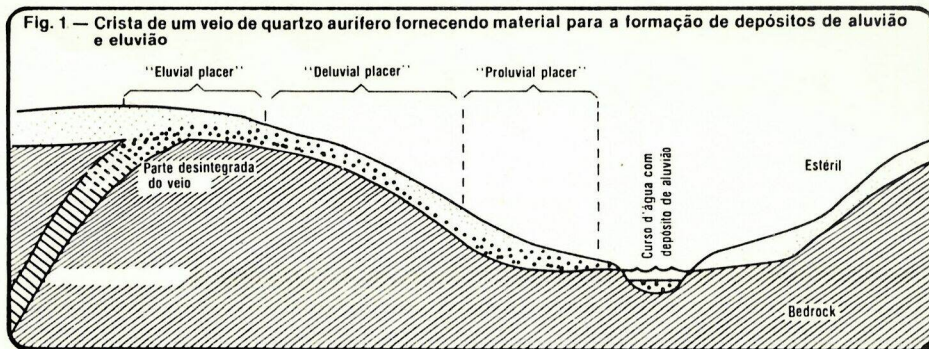
O preço internacional do ouro é estabelecido pela Bolsa de Londres ("London Metals Exchange — LME"), pelos representantes das corretoras de ouro mais importantes e transmitido para todo o mundo. Este preço, em US\$/onça troy (31,1g) já chegou a 800,00 US\$/tr oz e agora (dezembro de 1984) está em torno de 325,00 US\$/tr oz.

No Brasil o comprador oficial de ouro é a Caixa Econômica Federal. A compra é feita em cruzeiros com base na cotação do câmbio negro do dia. A CEF, pagando a cotação do mercado paralelo, paga mais que a cotação do mercado internacional. Isto acarreta um fluxo de contrabando de ouro dos países limítrofes para dentro do Brasil. Pode-se tratar de um dispêndio considerável, mas para o Banco Central, que abastece seus estoques de ouro com as compras da CEF, trata-se de uma maneira direta e instantânea de transformar cruzeiros em moeda forte. Diante do déficit desesperado de dólares que o Banco Central enfrenta cronicamente, o Governo tem procurado comprar todo o ouro disponível no país.

Investidores privados têm procurado o ouro, que tem apresentado valorizações médias ligeiramente superiores à dos papéis de mercado, embora valorizações instantâneas significativas já tenham ocorrido. O investidor compra ouro em barras de 5 a 1000 g. A mais procurada é a de 250 g. Não se deve guardar o ouro em casa, dado o risco de furtos, mas sim em bancos, que cobram 0,1% a.m. para guardar a barra. Esta precaução elimina o custo do teste de pureza na ocasião da venda. Apenas fundições cadastradas na Bolsa de Mercadorias de São Paulo podem operar no mercado oficial e todas as transações devem ser certificadas. É possível também comprar através de corretoras ou bancos cadastrados na Bolsa.

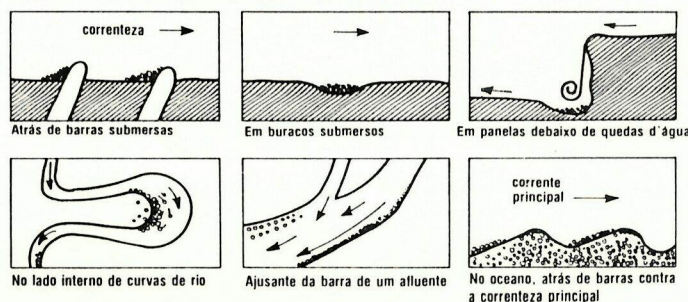
Ocorrência de ouro

O elemento ouro é amplamente distribuído na crosta terrestre e na água do mar (0,1 mg/t). O teor médio da crosta é de 5



Fonte: Boyle, 1979

Figura 2 — Locais típicos para formação de placers



Fonte: Skinner, 1969



Figura 3
Ocorrência de ouro no Brasil

- 1 - São Sepé, Lavras do Sul, Caçapava do Sul, Encruzilhada do Sul, São Gabriel
- 2 - Baía do Rio Itajai
- 3 - Vale do Ribeira
- 4 - Mato Grosso do Sul
- 5 - Alto Paraguai e Rio Cuiabá
- 6 - Rios Madeira e Ji-Paraná
- 7 - Rios Abacaxi e Aripuanã
- 8 - campos auríferos de Roraima
- 9 - Serra Pelada e Gurupi
- 10 - Maracaçumé
- 11 - Rios Maracá, Vila Nova, Amajari, Anotall, Cricou e Muturá
- 12 - Xambicá
- 13 - Goiás Velho, Crixás, Serra Dourada, Bom Jardim, Piranhas, Ipameri, Itapaci, Cristalina, Cavalcanti
- 14 - Ipu-Reritaba - Cariri e Viçosa do Ceará
- 15 - Nordeste
- 16 - Serra da Jacobina
- 17 - Chapada da Diamantina
- 18 - Minas Gerais

ppb e alguns tipos de rochas mais ricos chegam a 10-12 ppb. Para gerar uma jazida estas rochas-mãe de baixo teor têm que ser trabalhadas geologicamente até concentrar este ouro a teores 3500 vezes maiores.

O ouro ocorre na forma nativa ou em teluretos. Estes são encontrados na Austrália Oriental e no Colorado. Frequentemente ele está associado aos sulfetos dos metais básicos—pirita, galena, esfalerita, arsenopirita, calcopirita, pirrotita e outros.

Em consequência, é muito significativa na economia mundial a contribuição dada pelo ouro recuperado como subproduto da metalurgia de minérios de cobre, chumbo e níquel.

O ouro natural tem teores variáveis de Ag, Cu, Pd, Pt e outros elementos. A pureza do ouro é reportada como grau ("finesness") — partes de ouro por 1000 — ou por porcentagem em peso e por densidade (fração de peso de ouro em 24 partes): ouro puro tem 24 quilates: 50% de ouro cor-

QUADRO 1

UTILIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE CONCENTRAÇÃO/EXTRAÇÃO

MÉTODOS GRAVÍTICOS	AMALGAMAÇÃO	CIANETAÇÃO	FLOTAÇÃO
FAIXA GRANULOMÉTRICA/REL. CONCENTRAÇÃO		tanques: — 1mm ou menos pilhas: de — 1/2" a — 6"	— 65
Calhas Jigue Denver Mesa Espiral Cone Reichert			
EXIGÊNCIAS	Superfície limpa Concentração secundária Variável	ausência de cianetação teor muito baixo quartzo aurífero 95%	Superfície limpa Concentração Sulfetos metálicos variável
USO PRINCIPAL			
MINÉRIO TÍPICO	Atuvião		
TEOR FINAL	20 a 50% no amálgama As, Sb, Bi sais solúveis de cobre filmes de óxidos ou sulfetos talco graxa, óleo	subst. orgânicas pirrotita calcopirita min. oxidados de cobre e ferro	pirita oxidada
IMPUREZAS NOCIVAS	—		
RECUPERAÇÃO	60 a 75%	70 a 90%	90 a 95%

responde a 12 quilates; as ligas usuais têm 12, 14, 16, 18 e 22 quilates. Nunca se usa ouro puro por ser excessivamente dútil e mole.

Os depósitos mais importantes são os de placer e os hidrotermais. No Brasil é identificado ainda um terceiro tipo, de laterização. Os depósitos hidrotermais são formados em condições geoquímicas bastante complexas e que estão sendo estudadas ainda. Os mecanismos envolvem a geração de soluções, fontes de preciosos mecanismos de transporte capazes de mobilizar o ouro, fatores estruturais capazes de recebê-lo, mecanismos de deposição, etc. No Brasil a mina de Morro Velho é típica deste modelo.

Os depósitos de placer são depósitos de aluvião e às vezes de eluvião onde o ouro remobilizado de uma rocha-mãe depositou-se em decorrência de sua densidade elevada e pequena reatividade. Para formar um placer são necessários (Fig. 1):
— uma fonte de ouro primário, que pode ser veios de quartzo aurífero, depósitos de sulfetos, conglomerados auríferos ou mesmo placers anteriores;
— um longo período de intemperismo durante o qual as rochas encaixantes são desmanchadas, os sulfetos oxidados e dissolvidos, etc.
— locais adequados para a concentração das partículas de ouro: estas depositam quando o escoamento perde energia. O ouro grosso e mais rico está sempre associado ao cascalho grosso e o ouro fino à areia. A figura 2 mostra uma série de locais típicos de deposição. Muitas vezes o placer é coberto por processos deposicionais subsequentes.

Os paleoplacers constituem conglomerados de seixos de quartzo e formam os maiores depósitos auríferos conhecidos. 60% da produção mundial nos últimos 50 anos vem de jazidas desta natureza. A mi-

neralização é em lentes, rosários ou lajes e embora estreita pode-se estender por centenas de quilômetros. Witwatersrand (África do Sul), Elliot Lake (Canadá) e Jacobina (Brasil) são exemplos típicos.

Os depósitos de laterização ocorrem no Planalto Central brasileiro, caracteristicamente no solo, acima do nível hidrostático mínimo. Os depósitos resultam da remobilização e concentração do ouro através de processos de laterização ainda não bem esclarecidos. Boa parte do ouro está contido dentro de blocos de canga.

Concentração de ouro e minérios auríferos

A sequência de operações que um minério aurífero sofre depende de suas características de teor, distribuição granulométrica, associações minerais, abundância ou escassez de água etc. É pois muito importante conhecer a caracterização tecnológica do minério, pois é o conjunto de suas características que irá definir a melhor rota para o seu aproveitamento.

O passo inicial é sempre uma operação de concentração, que será feita por métodos gravimétricos ou por flotação. As relações de concentração são forçosamente muito altas devido ao teor muito baixo da alimentação. Ainda assim o concentrado de ouro, principalmente dos processos gravimétricos, é pobre: partindo-se de um minério com 20 g/t (muito rico) e fazendo uma concentração de 250 vezes, o concentrado terá 5000 g/t, ou 0,5% de ouro.

É portanto necessário apurar este concentrado, o que é feito por fusão ou por amalgamação. Esta última pode ser usada para a primeira etapa de concentração também. O metal bruto de fusão ("bullion") precisa ainda ser refinado antes de poder ser vendido.

Quando o minério é pobre demais para ser flotado ou concentrado economicamente, e não havendo condições adversas, a lixiviação com cianetos pode ser uma opção conveniente.

O quadro 1 resume as principais características dos diferentes métodos. Taggart, discutindo a escolha de métodos de beneficiamento aplicáveis ao ouro, estabelece inicialmente o princípio geral de que o ouro grosso deve ser tirado tão cedo e tão rápido quanto possível. Em outras palavras, os métodos gravíticos são os mais baratos e eficazes e a sua pronta utilização é a melhor garantia do sucesso da operação. Taggart estabelece oito rotas possíveis para o tratamento de minérios de ouro:

1) *só amalgamação*: aplicável a minérios primários ou de aluvião limpos e a minérios cuja superfície esteja totalmente oxidada e cujas partículas são suficientemente grossas para sedimentar na corrente de água.

2) *separação gravítica + amalgamação*: separação típica de minérios de pequeno teor, como os de placer e a ouro relativamente grosseiro, revestido por ou associado a sulfetos.

3) *amalgamação + concentração gravítica + cianetação*: aplicável a minérios limpos contendo ouro numa faixa granulométrica muito extensa (uma parte fina demais para a amalgamação e outra parte grossa demais para a cianetação rápida).

4) *só cianetação*: aplicável a minérios limpos com ouro finamente disseminado, com teor de sulfetos relativamente baixo e com a maior parte do ouro no estado nativo.

5) *cianetação + concentração gravítica + cianetação do concentrado*: aplicável a minérios limpos e contendo pouca pirita com ouro extremamente fino. Usualmente o minério é moído em solução de cianeto,

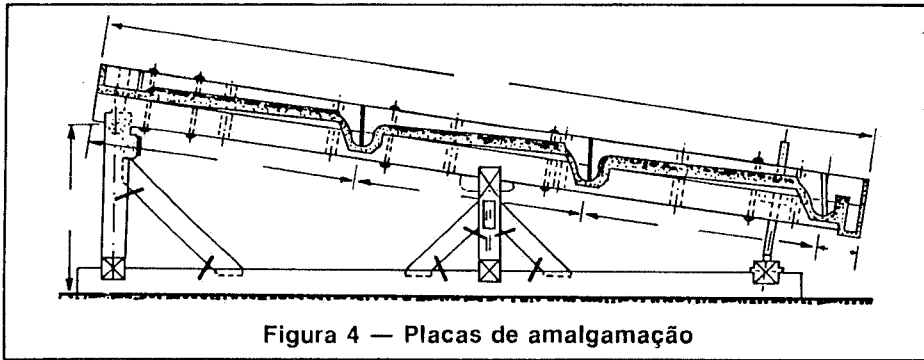


Figura 4 — Placas de amalgamação

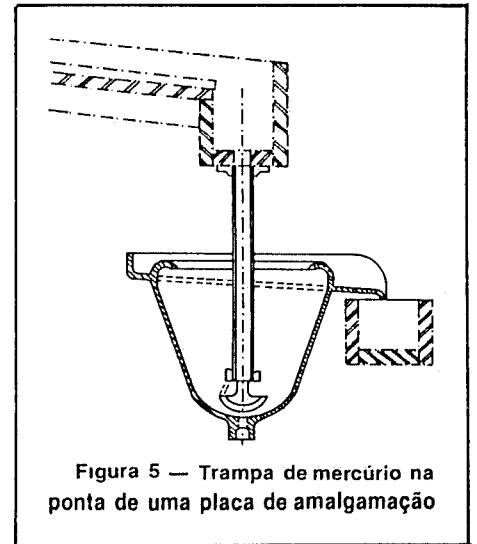


Figura 5 — Trampa de mercúrio na ponta de uma placa de amalgamação

separada a areia da lama, flotada a pirita da areia. O concentrado é remoido para expor o ouro e o produto da moagem é cianetado em separado ou junto com a lama.

6) *flotação (+ concentração gravítica e/ou amalgamação) + cianetação do concentrado* aplicável a minérios limpos com teor de pirita elevado, poucos sulfetos de outros metais e ouro associado principalmente aos sulfetos.

7) *flotação + cianetação do rejeito*: usado para minérios em que importantes quantidades de ouro estão associadas aos minerais não sulfetados e/ou os sulfetos são economicamente importantes ou contêm substâncias prejudiciais à cianetação. Eventualmente pode-se preferir ustular os sulfetos (por exemplo quando contêm arsenietos) para torná-los adequados à cianetação.

8) *flotação + concentração gravítica e/ou amalgamação*: quando o ouro está tão intimamente associado aos sulfetos que não

pode ser separado senão na metalurgia, ou então quando razões econômicas recomendem este caminho.

Métodos Gravíticos

O uso do elevado peso específico do ouro para separá-lo dos minerais de ganga é conhecido desde longa data. O equipamento mais rudimentar conhecido é o jigge manual em que um cesto cheio de minério a beneficiar era suspenso na ponta de uma vara apoiada numa forquilha e agitado dentro d'água até se obter a estratificação das espécies minerais.

A lenda grega do tosão de ouro é hoje interpretada como a separação do ouro em peles de carneiro colocadas no fundo de correntes d'água onde era colocado o minério a concentrar.

Os equipamentos mais importantes são sem dúvida as calhas, das quais existe uma grande quantidade de tipos e que infe-

lizmente são muito mal operadas. Da mesma família as espirais (de Humphreys ou de nova geração) vêm encontrando novo interesse de aplicação com a substituição do ferro fundido por materiais mais leves como a fibra de vidro ou resinas sintéticas.

As mesas vibratórias são equipamentos insubstituíveis na sua faixa de aplicação, bem como os jigues.

O conhecimento dos equipamentos e processos de concentração de ouro pouco evoluiu desde o começo do século. Antes, trata-se de uma arte praticamente esquecida e que só agora é retomada. O único desenvolvimento de importância real feito

Na disputa pelo ouro, a JRW tem o candidato da maioria

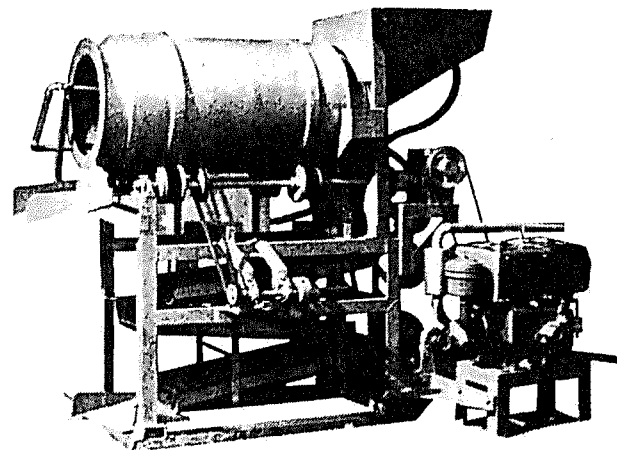
OUIROMATIC

Perfil do candidato

Pesando apenas 400 kg, o OUIROMATIC é hoje o equipamento mais utilizado para classificação de ouro e minerais pesados. Possui vasta experiência em pesquisa mineral, principalmente durante a fase de avaliação das jazidas. Na produção, o OUIROMATIC também mostra sua grande performance: beneficia 20 metros cúbicos por dia e recupera 30% a mais do que os sistemas convencionais de garimpo. Além disso, é construído de forma modular, o que facilita seu transporte. Seu funcionamento é simples e o consumo de combustível muito baixo.

Base eleitoral

Não há bom candidato sem boa base eleitoral. E isso o OUIROMATIC tem de sobra. Já foi eleito por empresas como CPRM, Montita/Colorado, Brasinor, Mineração Porto Estrela, Toniolo Busnello, Jaruana... enfim, pela maioria das empresas que estão no Programa de Lavra Experimental de Ouro. E nos garimpos ou pequenas minas, nem se fala. Ali, muita gente já trocou a bateia pelo OUIROMATIC. Fique com a maioria. Escolha OUIROMATIC e chegue à frente na corrida do ouro.



Ficha técnica

Peso	400 kg (completo)
Altura	1,60 m
Comprimento	1,60 m
Largura	0,75 m
Capacidade média	20 m ³ /dia
Consumo	5 litros de óleo diesel/8 horas
Consumo de água	2.000 litros/hora
Alimentação	manual (2,5 a 3,0 m ³ /hora)
Motor	4,5 HP - diesel ou gasolina

JRW Comércio e Indústria Ltda.

Rua Barão de Paranapanema, 146 bloco B - 6.º andar - sala 62
CEP 13.100 - Campinas - SP Telefone (0192) 52-7999
Telex 191074 ou 192009

nos últimos tempos foi o cone Reichert, pois os demais equipamentos que apareceram (ciclones de fundo chato ou ciclones autógenos, separador Mozley, e outros) não têm ainda utilização industrial consagrada.

Como o assunto é extenso e razoavelmente bem desenvolvido na literatura, não nos deteremos nele e passaremos a outros processos, menos divulgados mas não menos importantes.

Amalgamação

Amalgama é toda solução sólida ou composto intermetálico de metais e mercúrio. Quando o ouro limpo entra em contato com o mercúrio ele é molhado, o mercúrio líquido liga-se à superfície do ouro e forma-se uma partícula revestida de amalgama e que tem propriedades superficiais iguais à do mercúrio. As partículas amalgamadas juntam-se e coalescem formando uma massa cinzenta homogênea. Se esta for retortada, o mercúrio destila, deixando o ouro metálico na retorta.

O sistema Au-Hg tem três compostos químicos, $AuHg_2$, Au_2Hg e Au_3Hg e uma solução sólida com 16,7% de mercúrio. Todos fundem à baixa temperatura. No processo de amalgamação inicialmente é formada a solução sólida e a seguir os três compostos. O amalgama resultante é portanto uma mistura mecânica de compostos intermetálicos, partículas de ouro revestidas de amalgama e mercúrio líquido intersticial.

Sais solúveis de cobre prejudicam a amalgamação e precisam ser precipitados

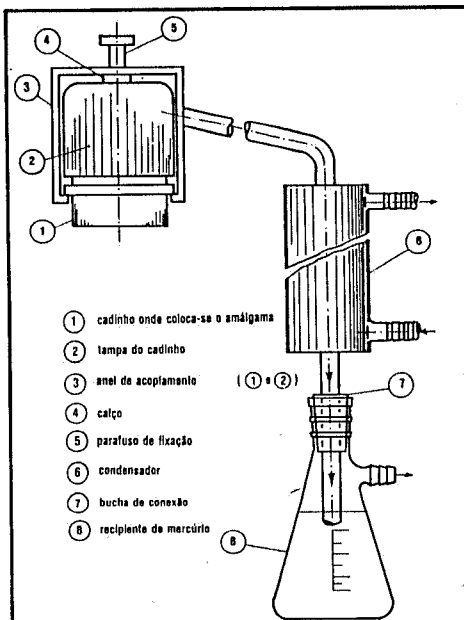


Figura 6 — Retorta "Amalgamacet" desenvolvida pelo Cetem

com cal (formando hidróxido de cobre). Sais húmicos de ferro e filmes de óxidos ou sulfetos na superfície do ouro impedem o seu contato com o mercúrio e precisam ser removidos por abrasão ou uma nova superfície precisa ser criada por moagem.

Antes de se pensar na amalgamação é necessário conhecer a mineralogia do minério pois:

— teluretos não amalgamam diretamente;

— estibinita, arsenopirita, realgar, ouro-pigmento e outros minerais de arsênio e antimônio além dos minerais de bismuto (estes em menor proporção) revestem a superfície do ouro com uma camada que impede a amalgamação.

O mercúrio, depois de utilizado na amalgamação e recuperado por destilação, retém sempre uma pequena quantidade de ouro dissolvida. Este mercúrio "carregado" é mais eficiente na amalgamação que o mercúrio quimicamente puro.

Prata e platina não amalgamam com mercúrio puro mas são facilmente recuperadas com amalgama de sódio, que é líquida.

O equipamento mais extensamente utilizado são as placas de amalgamação (ver figuras 4 e 5), extraídas de Sevryukov. Tratam-se de placas de cobre, que são molhadas com mercúrio. Forma-se um amalgama de cobre, que, como já foi mencionado, tem propriedades superficiais análogas às do mercúrio e é portanto capaz de retê-lo em sua superfície. A polpa de minério é escoada sobre a placa; as partículas de ouro vão ao fundo e amalgamam com o mercúrio. Quando a placa está coberta de amalgama de ouro ela é raspada, novamente molhada com mercúrio e recomeça-se tudo de novo. A raspa é embrulhada numa lona ou camurça, torcida de modo a remover o mercúrio em excesso e o amalgama vai para uma retorta, para destilar o mercúrio que é novamente utilizado. A Figura 6 mostra uma retorta desenvolvida pelo CETEM.

Para produções maiores pode-se usar o barril de amalgamação, onde o minério e o mercúrio são tamboreados durante o tempo necessário para a formação do amalgama. A Figura 7, extraída de Sevryukov, mostra este equipamento. O material é descarregado e separado numa trampa e numa calha. Da mesma forma, para remover o excesso de mercúrio de volumes maiores de amalgama existem prensas.

Quando se faz necessário moer o minério para gerar uma superfície fresca ou liberar as partículas de ouro é possível fazer concomitantemente a amalgamação ("inside amalgamation"). Usa-se o moinho de galga ("muller pan") para isso. Moinhos de barras ou de bolas não são recomendáveis pois tendem a pulverizar o mercúrio num grande número de pequenas gotas que não mais coalescem ("flour") acarretando perdas consideráveis. Graxa, óleo e substâncias orgânicas podem causar este mesmo efeito.

Flotação

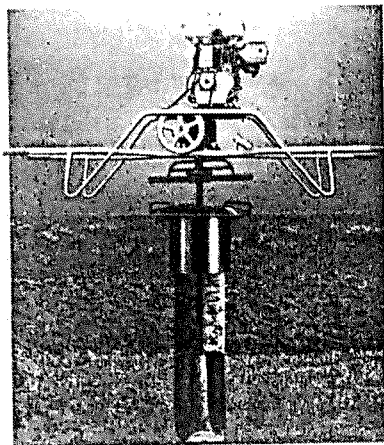
Tanto o ouro nativo como os sulfetos dos metais básicos aos quais ele está muito frequentemente associado flutam muito facilmente após a coleta com xantatos. O processo é extensamente utilizado para ouro metálico fino demais para a aplicação de processos gravíticos ou como processo auxiliar da cianetação, quando existem sulfetos de cobre e ferro, prejudiciais a esta operação.

Taggart afirma que ouro acima de 40 malhas não é flotável, ao passo que a Cyanamid considera difícil de flotar material acima de 65 malhas. Do ponto de vista da flotação é interessante distinguir três tipos de minérios:

a) contendo ouro livre e ausência ou quantidade muito baixa de sulfetos,

TRADO
EQUIPAMENTOS
E SERVIÇOS LTDA.

**EQUIPAMENTOS PARA
SONDAGENS, FUNDAÇÕES
E MINERAÇÃO**



O Pequeno Notável

Sempre de maneira econômica e eficiente, sem requerer mão-de-obra especializada, o MB-1/MB-1-A executa sondagens geológicas, amostra argilas, solos, rochas alteradas com profundidade média de 30m e diâmetros de 2" a 10". Pode ser usado em trabalho de geoquímica, geofísica, perfuração de brocas p/pequenas edificações, drenos, perfuração de poço para captação de água subterrânea, trabalhos auxiliares como colocação de postes para rede elétrica, aterramento, mourão de cerca, covas para plantio de árvores, etc. O Trado

Mecânico MB-1/MB-1-A, vem sendo cada vez mais adotado pelas grandes empresas de mineração e Engenharia.

Trado Mecânico Motorizado, Tecnologia Nacional de Perfuração.
Para maiores informações, consulte-nos.



TRADO EQUIPAMENTOS E SERVIÇOS LTDA.
Fábrica e Vendas: Rua Gama, 930 - Vila Amaral
Tel.: (031) 462-5511 Telex: (031) 1487 SEBH
30000 - Belo Horizonte - MG.

b) contendo parte do ouro livre e parte associado a sulfetos,
 c) todo o ouro está incluso em sulfetos metálicos. Cumpre aqui distinguir ainda minérios de veios maciços e minérios de cobre do tipo pórfiro, pois com o segundo podem ocorrer problemas sérios de liberação do mineral do minério.

Os coletores consagrados são os xantatos. A atividade coletora destes reagentes aumenta com o comprimento da cadeia alcoila mas a sua seletividade diminui. É portanto importante conhecer bem qual a associação do ouro aos sulfetos para decidir se se deseja uma coleta forte e pouco seletiva, que separe todos os sulfetos presentes ou se se deseja uma coleta seletiva, que separe apenas uma espécie mineral.

Para a flotação de ouro nativo e sulfetos piríticos a Hoechst recomenda xantato de butanol secundário e a Dow o isopropilxantato de sódio (Z-11). A Cyanamid apresenta uma formulação mais extensa e aplicável conforme cada caso específico:

a) ouro livre é coletado pelo Aerofloat 208 Promoter ou pelo Aero 3477 Promoter;

b) sulfetos metálicos são flotados de maneira não seletiva por Aero 301 Xantato, e, quando se deseja uma flotação escalonada por algum ou todos dos Aero 404, 407 ou 412 Promoter;

c) sulfetos metálicos com alteração superficial ("tarnished") exigem reagentes mais enérgicos, como os Aero 317 Xantato ou os reativos da série 400 em pH ácido ou básico.

O espumante recomendado por este fabricante é sempre o Aerofloat 25 ou óleo de pinho. A flotação é conduzida a cerca de 35% de sólidos e sempre em pH natural, exceto quando a superfície dos sulfetos está "tarnished". Cal é um depressor enérgico do ouro metálico, bem como o sulfeto de sódio.

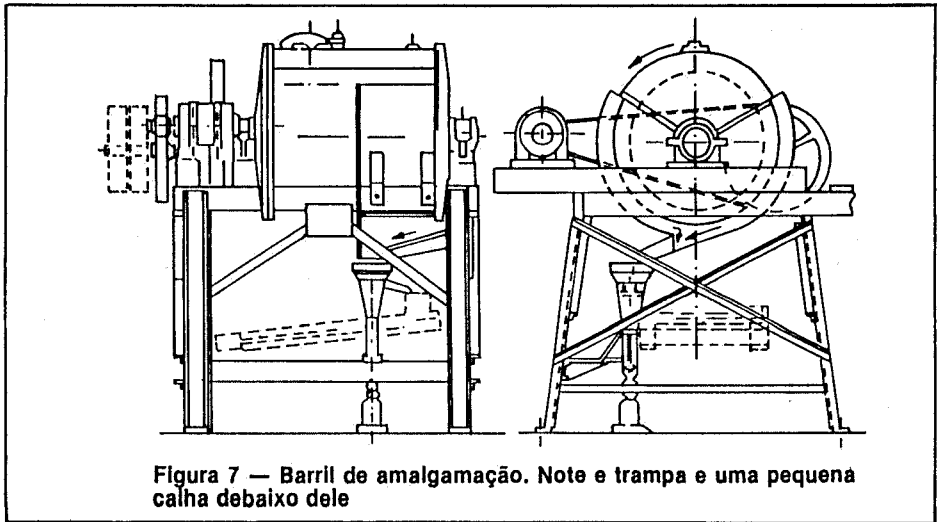
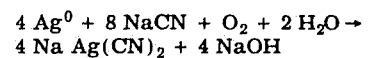
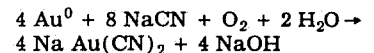


Figura 7 — Barril de amalgamação. Note e trampa e uma pequena calha debaixo dele

É importante conhecer se o ouro está associado à pirita ou não, pois num caso esta terá que ser recuperada na flotação e no outro terá que ser deprimida. A sua ativação é feita pelo sulfato de cobre e a sua depressão por cal ou cianeto — nenhum destes dois reagentes pode ser utilizado quando existe ouro nativo no minério. A pirita oxidada (como também a arsenopirita) precisa ser sulfetada com sulfeto de sódio, que também não pode ser utilizado quando existe ouro nativo.

Modernamente têm sido feitas tentativas para flotar a pirita com aminas em pH alcalino.



O processo que se baseia nestas reações é aplicado a minérios em que os preciosos se apresentam em granulometria muito fina (inferior a 50 µm) ou em que o teor seja muito baixo para uma extração econômica pelos processos descritos anteriormente. O minério não pode ter cianídicas presentes.

Ele consta das seguintes etapas:

- 1) preparação dos minérios: britagem, peneiramento, eventualmente aglomeração dos finos;
- 2) lixiviação, que pode ser feita em tanques ou em pilhas;

O ouro é colocado em solução e a solução é separada do resíduo sólido;

Cianetação

O ouro e a prata são dissolvidos por soluções de cianetos em meio alcalino (pH de 10 a 11) e condições oxidantes segundo as reações:

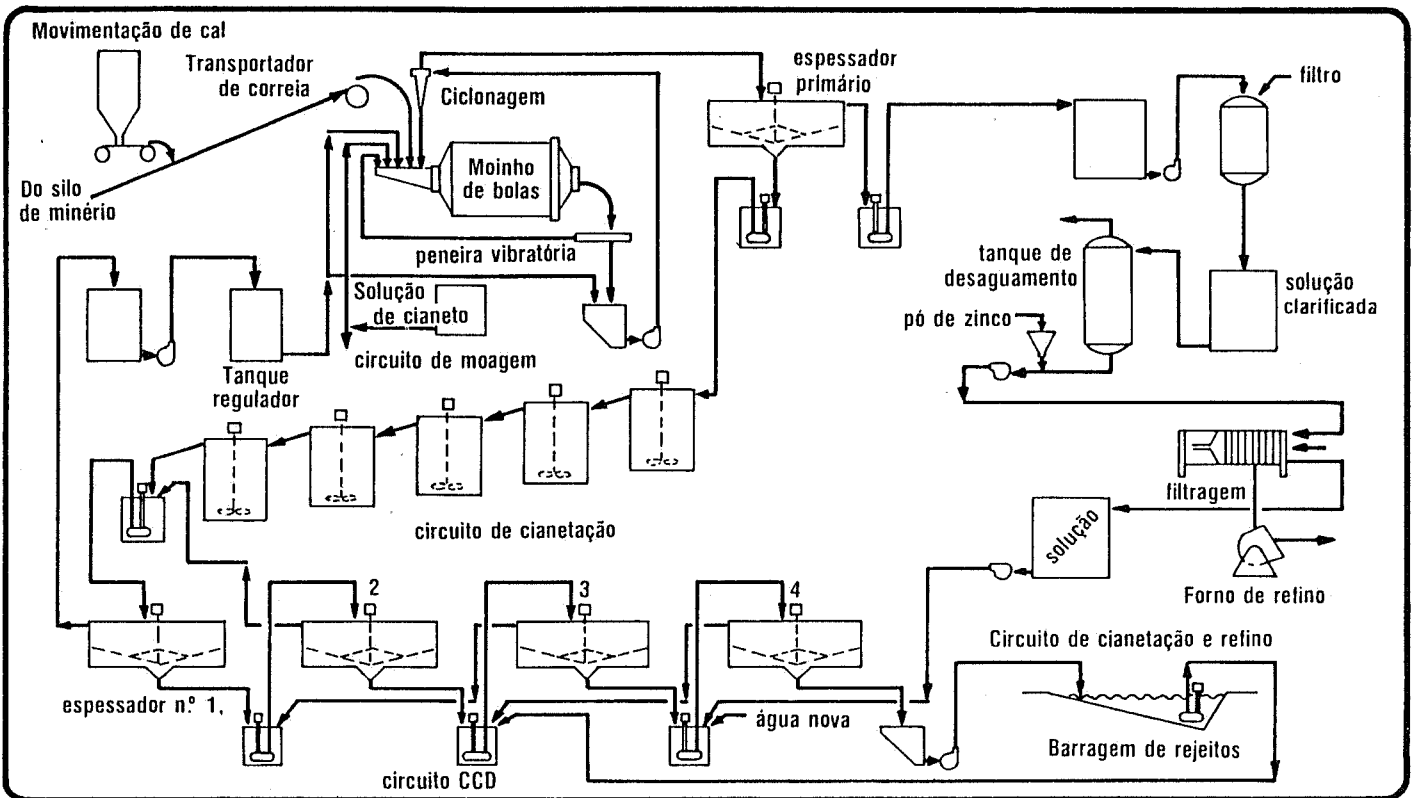


Figura 8 — Circuito CCD

Fonte: Mining Journal

3) separação do ouro: o ouro é precipitado pela substituição por um metal menos nobre (cementação) ou por sulfeto, é absorvido em carvão ativado e é separado por eletrólise direta da solução.

Quando a lixiviação é feita em tanques são necessários vários para dar o tempo de residência necessário e é aplicado o "princípio da contra-corrente": os reagentes — minério de ouro e solução de cianeto — devem fluir em sentidos opostos. Ou seja, a solução lixivante forte entra em contato com o minério que já foi quase totalmente lixiviado e o minério fresco entra em contato com a solução já quase totalmente exaurida. Esta é a melhor maneira de manter o potencial químico do sistema em um nível uniforme durante toda a reação.

A explicação é simples. As reações acima são deslocadas para a direita por:

- a) teor de ouro presente no sistema e concentração de cianeto.
- b) quantidade de superfície de ouro exposta ao cianeto.

A reação inversa é forçada pelo aumento da quantidade de cianeto de ouro presente no sistema. A figura 8 ilustra esta situação.

Completada a dissolução é necessário separar a solução do sólido lixiviado. A operação clássica consiste no espessamento e filtração da polpa. Quando o minério contém lamas ou frações muito finas isto pode se tornar operacionalmente difícil e exigir outras soluções. Assim, modernamente tem sido adotada a prática de adsorver o cianeto de ouro em carvão ativado dentro do fluxo de polpa, eliminando portanto a separação sólido-líquido.

Nesta separação sólido-líquido é impossível recuperar a totalidade do metal contido pois há perdas devido à dissolução incompleta do metal e perdas por arraste mecânico. A quantidade de perda aceitável é um critério econômico: trabalha-se para recuperar o máximo, até que o valor do metal remanescente seja menor que o custo da operação de recuperação.

A configuração clássica do circuito de lixiviação é mostrada na figura 8: todo o minério é moído, a lixiviação é feita em tanques e espessadores. A separação do ouro dissolvido é feita por cementação com pó de zinco após desarejamento da solução e o cimento de ouro é separado por filtração. A lixiviação é feita em tanques Pachuca (figura 9), que são tanques de madeira (ou outro material) e a agitação é feita por um "air lift", que fornece também o oxigênio necessário. Existem variantes de processamento segundo as quais as frações lama e areia são lixiviadas em conjunto ou separadamente. O espessamento e a completação das reações sendo feita em espessadores em contra-corrente é a configuração CCD — "counter-current decantation".

É importante manter a alcalinidade do sistema para prevenir a formação de HCN, que além de acarretar perdas é extremamente tóxico. A pirita, sendo um gerador potencial de ácido sulfúrico e sais húmicos, que geram ácido carbônico, deve estar ausente. No mesmo sentido, o minério não pode conter cianídicas, que são sulfetos de arsênio, antimônio, zinco, ferro e cobre, que consomem cianeto. Materiais carbonosos adsorvem cianetos de preciosos e causam a precipitação prematura do ouro e da prata. Substâncias orgânicas como óleo, graxa e ácidos húmicos consomem o oxigênio necessário à reação.

A adsorção em carvão é feita em carvão ativado de casca de coco. Este carvão tem a resistência mecânica necessária para resistir à abrasão da polpa dentro da coluna de adsorção e uma superfície específica muito grande. As colunas de carvão são colocadas em série. A alimentação é feita por baixo e a descarga por cima, ajustando-se a vazão de modo a manter o carvão suspenso no fluxo ascendente. Periodicamente tomam-se amostras de carvão da primeira coluna e faz-se análise. Quando esta está carregada (saturada de ouro — cerca de 30.000 ppm) ela é tirada para que seja feita a dessorção do ouro e a segunda coluna passa a ser a primeira, a terceira a segunda, etc. A última coluna é cheia com carvão regenerado e o processo é continuado. O carvão carregado é lavado em peneiras.

A dessorção do ouro é feita num circuito próprio e usa várias técnicas diferentes: lavagem com solventes orgânicos, lavagem com etanol ou propanol e lavagem com solventes inorgânicos. A solução de ouro dessorvida pode ser precipitada com pó de zinco ou encaminhada diretamente para a eletrólise.

Para a reativação do carvão, este é lavado com ácido nítrico diluído, com soda cáustica a 1%, aquecido a 630° C durante trinta minutos e peneirado para eliminação dos finos.

O circuito como descrito (Figura 10) tem a configuração CIP — "carbon in pulp". As recuperações de CCP e CIP são comparáveis para minérios que sedimentam rá-

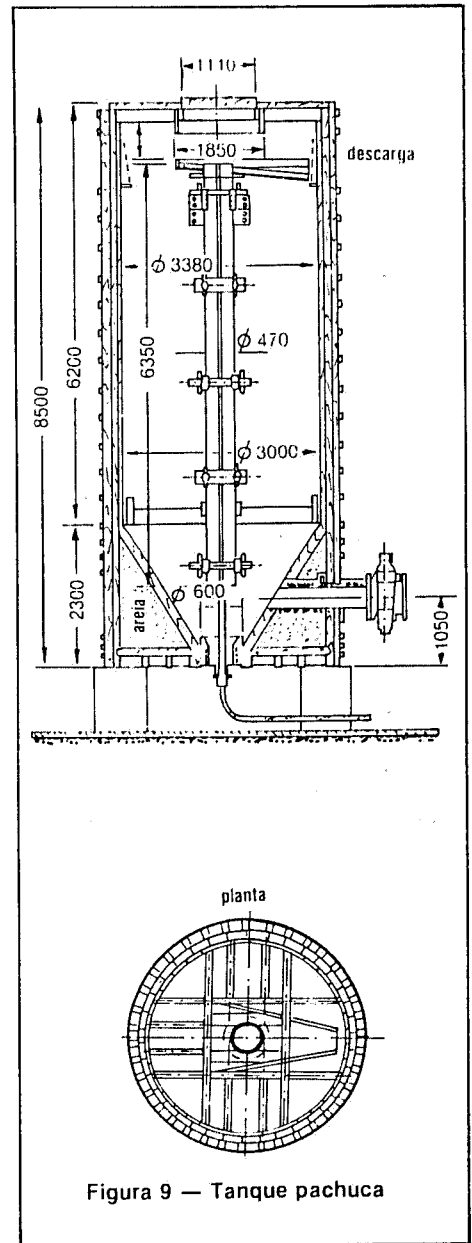
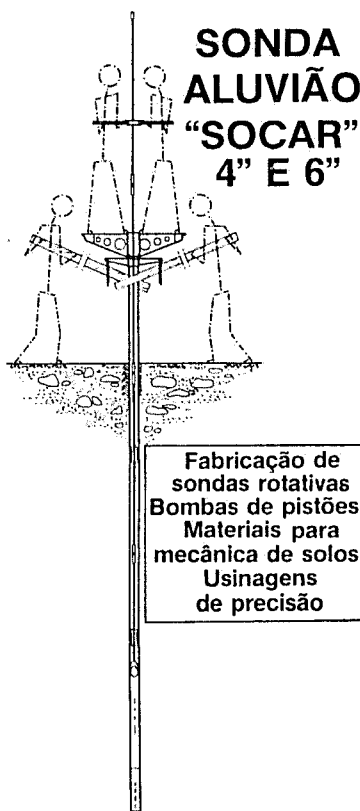


Figura 9 — Tanque pachuca

pidos — entre 95 e 99%. CIP requer menos equipamento e menores áreas implicando portanto em menor investimento. Para soluções diluídas ou lamosas CIP oferece recuperações consideravelmente melhores.

Comparando CIP e a precipitação por pó de zinco (processo Merrill-Crowe), verifica-se que este é mais vantajoso, para polpas facilmente filtráveis, para soluções muito ricas, para pequenos volumes de solução e para soluções contendo volumes de prata elevados. Ela é entretanto muito afetada pela presença de sulfetos solúveis e requer controle de processo e mão-de-obra em maior extensão que CIP. Os produtos são fundidos, e encaminhados para o refino.

O desenvolvimento de processo mais importante consistiu na constatação de que a adsorção do ouro lixiviado pelo carvão é muito rápida, ao contrário da lixiviação, que é lenta. A idéia de efetuar simultaneamente as duas operações se revelou muito boa, pois a remoção dos produtos de reação força o equilíbrio do sistema para a direita. Do ponto de vista de instalação fica eliminada a necessidade de parte dos equi-



Fabricação de sondas rotativas
Bombas de pistões
Materiais para mecânica de solos
Usinagens de precisão



Souza & Carvalho Ltda.
Rua Itapagipe, 69 — Tels: (031) 442-2720 —
CEP 30.000 — Belo Horizonte — MG

Quadro 2

PROCESSOS DE REFINO DE OURO

	MILLER (Cloroação)	WOHLWILL	QUIMICOS	
Natureza	Pirómetalúrgico	Eletrolítico	H ₂ SO ₄ ou NaHSO ₄	água-régia
Exigências	Ag < 7%	Au > 95% (anodo)		
Uso principal	Título 995 produção larga escala	Título 999,9	elevação de teor para refino posterior	Rh, Ru, Ir presentes
Teor mínimo inicial	Au > 70%	Au > 95%	baixo ou de composição variável	
Teor final	Au > 99,9	Au > 99,95		
Impurezas nocivas ou problemas	platinoídeos, Ag, Te			Cu
Outras características	rápido, investimento baixo, recuperação elevada	elevado empate de capital		

pamentos, resultando economia de área, equipamento e supervisão. Este processo assim modificado é designado como CIL — "carbon in leach".

Finalmente, muita atenção vem sendo dada ultimamente às operações de lixiviação em pilhas ("leap leaching"). Minérios muito pobres até para uma cianetação convencional estão sendo processados desta maneira, bem como rejeitos de antigas operações e minérios com teor inferior ao teor de corte, mas que precisam ser removidos como consequência do plano de lavra.

A operação consiste basicamente de:

- o minério é britado a 10 mm. Para minérios finos ou argilosos o Bureau of Mines demonstrou a viabilidade técnica e econômica de aglomerá-lo com cimento Portland de modo a assegurar a permeabilidade necessária à pilha;
- o minério é misturado com 1,5 a 2,5 kg de soda cáustica por tonelada;
- é feito o empilhamento sobre uma base impermeável (geotêxteis ou argila) e um leito permeável adequado para recolher e dirigir a solução.
- a pilha é irrigada com 1,5 a 3,0 l/dm². dia (4 a 75 gal/ft². dia) de solução diluída de cianeto de sódio. Esta solução dissolve o ouro e a prata, percola a pilha, escorre pelos canais de drenagem e vai para uma bacia de acumulação;
- o ouro contido na solução é precipitado ou adsorvido;
- as condições da solução são acertadas e esta retorna ao circuito.

A opção de "in situ leaching" ou lixiviação "in situ", que é praticada com outros minérios não tem encontrado campo de aplicação com o ouro em consequência da toxidez dos cianetos e perigo de contaminação do freático.

Recuperação do ouro na metalurgia dos metais básicos

Como já foi mencionado, o ouro aparece com muita frequência associado aos minérios de chumbo, cobre e níquel. Mesmo quando ocorre na forma nativa, ele é moído e liberado no processamento normal desses minerais e recolhido no concentrado, de forma que a sua recuperação pode

ser feita por via metalúrgica. Parcela significativa da produção mundial de ouro aparece portanto como subproduto da metalurgia extrativa dos metais não-ferrosos básicos.

Quase todo o chumbo primário é produzido por redução em fornos de cuba, em que os óxidos naturais ou produtos da ustulação de sulfetos são reduzidos até o estado metálico. Formam-se duas fases fundidas: o metal bruto e uma escória sobrenadante. Os outros metais presentes são co-reduzidos com o metal principal e ficam na fase metálica. Os preciosos são solubilizados no chumbo de obra e são extraídos

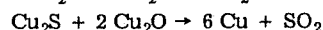
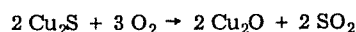
junto com este para posterior recuperação no refino.

Os sulfetos de cobre e de níquel são tratados classicamente pela metalurgia de *matte*, que resumidamente consiste no seguinte:

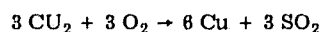
— carregam-se os sulfetos de cobre ou níquel com piritas e fundentes em um forno de fusão. Conforme a carga funde, os sulfetos se separam numa fase individualizada - o *matte* - e os óxidos se separam numa outra fase, que é a escória. Todo o cobre e o níquel ficam na forma dos respectivos sulfetos, Cu₂S e Ni₃S₂ e o restante do enxofre na carga combina-se com o ferro para dar FeS.

O *matte* é portanto uma mistura artificial de Cu₂S (ou Ni₃S₂) e FeS. Ouro, prata e platina são solúveis no *matte* e vão para ele.

— o *matte* é carregado num conversor, que é um forno com injeção de ar. O oxigênio oxida os sulfetos do *matte* e o óxido de ferro produzido passa para a escória (primeiro estágio da conversão). A seguir inicia-se a oxidação do sulfeto de cobre, que se dá segundo:

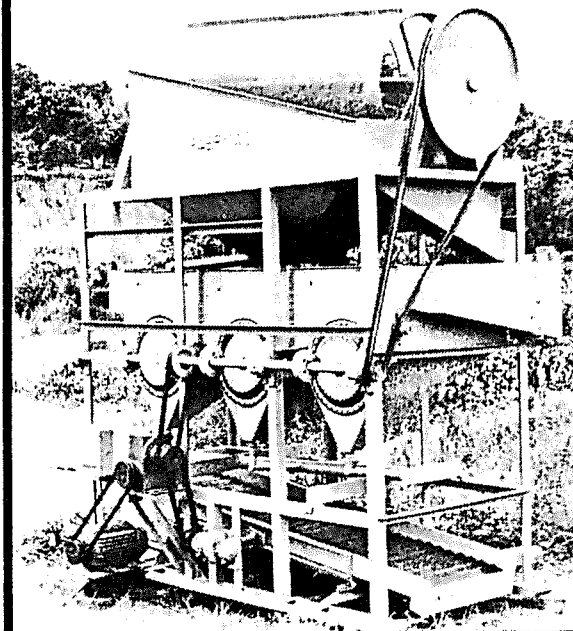


Somando as duas equações:



A metalurgia do níquel é um pouco mais complicada e não nos deteremos nela. Interessamos apenas mencionar que todos os preciosos presentes na carga são recolhidos no *matte*, passam para o metal bruto e são separados na etapa final de refino.

OUROTEC M-10



A solução na Pesquisa e Micro-mineração

A última palavra em concentração de minérios pesados
Eficiência: 80 a 85% para Ouro e 100% para Diamantes, com capacidade de tratamento de 6 a 10m³/hora.

- Manutenção mínima
- Operação simplificada
- Baixo consumo
- Garantia e Assistência técnica

FABRIMAQ
Economia, Versatilidade, Alta-tecnologia: Eficiência!

FABRIMAQ
• Equipamentos, consultoria e projetos de mineração

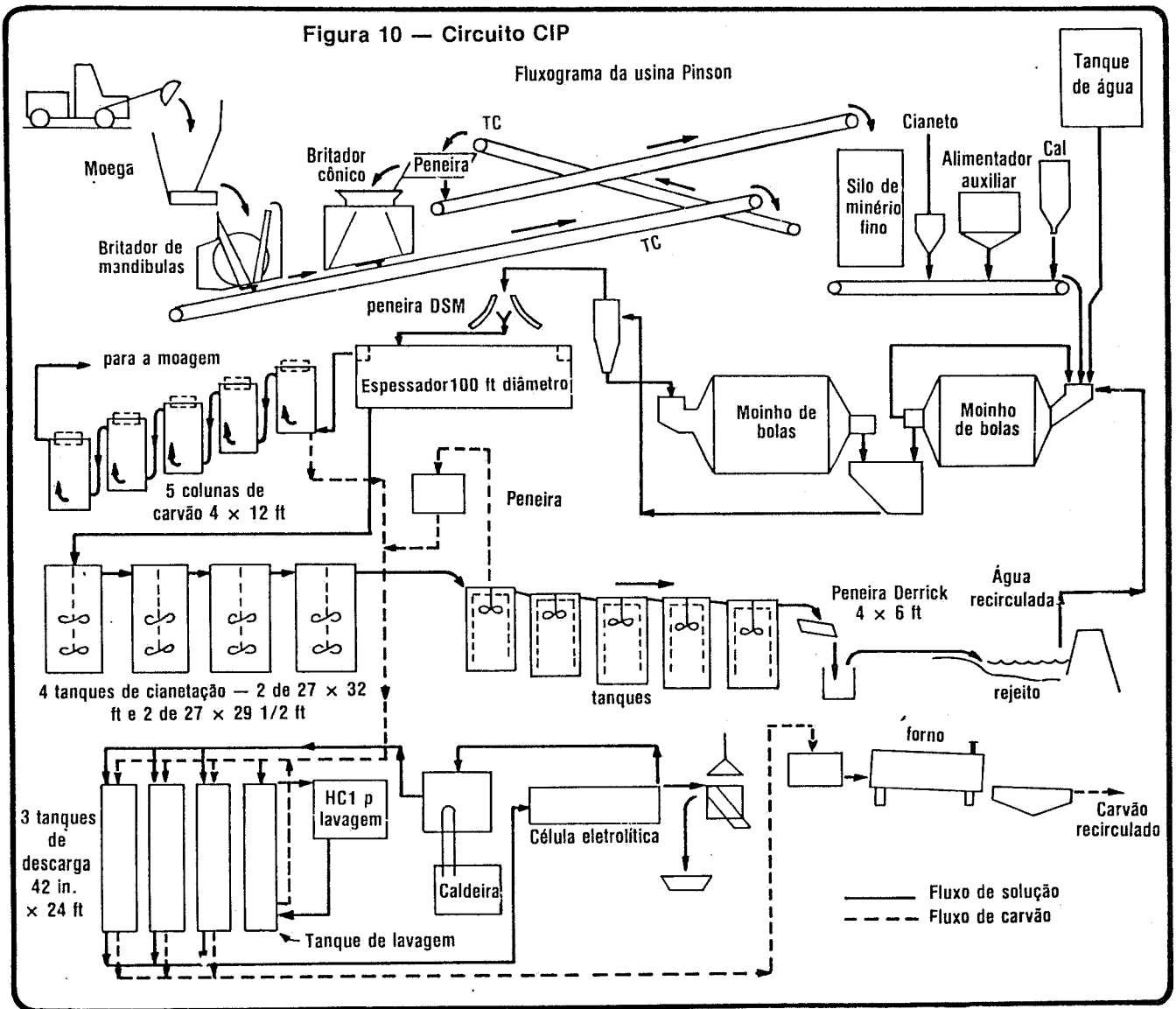
- Instalações industriais para tratamento de jazidas aluvionares de 10 a 100m³/hora
Av. Brasília, 4.514 - Caixa Postal 03 CEP 33000 TELEX (031) 3878 Santa Luzia - Minas Gerais

OPCIONAIS:

- 1 - OUROTEC M-10 com amalgamador contínuo em substituição à mesa vibratória
- 2 - OUROTEC M-10 com scrubber acoplado à peneira giratória para desargillar o material

Maiores informações e catálogos pelo telefone (031) 641-1466

Figura 10 — Circuito CIP



Fonte: Mining Journal

Refino de ouro

O ouro bruto obtido pela fusão do concentrado do garimpo ou produzido nas usinas de redução de minérios dos metais básicos ("bullion" se tem mais que 60% de Au e "doré" se tem mais que 90%) tem teor muito baixo e precisa ser purificado a 95 ou a 99,95%. Esta operação chama-se refino e pode ser feita por três vias — pirometalúrgica, eletrolítica ou química (com ácido sulfúrico ou com água régia) — dependendo dos teores inicial e final e da natureza e teor das impurezas. O quadro 2 resume as características principais dos processos.

O produto dos garimpos via de regra pode ser encaminhado diretamente para o refino químico ou por cloretação (pirometalúrgico) pois seu teor é razoavelmente elevado e as impurezas nocivas são poucas.

Processo Pirometalúrgico — Cloretação Miller

Consiste no borbulhamento de cloro através da massa fundida de ouro (1100 — 1200°C): as impurezas metálicas (Ag, Cu, Fe, Zn e Pb) são transformadas nos cloretos respectivos, que à temperatura de pro-

cesso são voláteis ou líquidos sobrenadantes.

É empregado usualmente no refino de material com teor superior a 70% de Au, em que a prata é a principal impureza, desde que não existam quantidades apreciáveis de platinóides. É um processo muito conveniente para a produção em larga escala e também de uso generalizado no refino de ligas de joalheria (sucata).

Este processo é usado para a produção de metal com título 995, que é o padrão usual das reservas monetárias, embora seja capaz de produzir purezas maiores ou iguais a 99,9%. Acontece que a atividade dos traços residuais das impurezas (principalmente Cu e Ag) cai no final da operação e acarreta uma reação crescente do cloro com o ouro. O $AuCl_2$ formado é volátil nessas condições e é perdido, a menos que se disponha de aparelhagem sofisticada, o que encarece o processo.

A operação consta das seguintes etapas:

- 1) fusão do ouro bruto com fundentes (borax ou borax + sílica + cloreto de sódio), 1100 a 1200°C;
- 2) injeção de cloro através de lança de refratário, durante 90 a 120 minutos. O rendimento do cloro é de cerca de 80%;

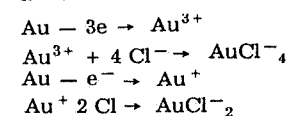
3) remoção dos cloretos de prata e de ouro.

À medida que se formam estes cloretos, o volume de líquido no cadinho aumenta, até o ponto de ser preciso transbordar para outro cadinho pré-aquecido. Eventualmente é preciso complementar a adição de fundentes. A maior preocupação operacional é de se evitar o borbulhamento excessivo; 4) verificação final do refino. Conforme o teor do ouro se aproxima de 99% começam a se desprender vapores amarelados de cloreto de ouro.

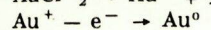
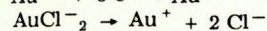
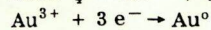
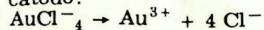
Processo Eletrolítico — Wohlwill

Consiste na eletrólise de solução de ácido tetracloáurico ($HAuCl_4$) usando como catodos lâminas de ouro puro (99,99%) ou de titânio. Os anodos são lingotes de forma adequada de ouro a refinar (teor acima de 95%). Resultam catodos de pureza superior a 99,95 e lama anódica, constituída de cloreto de prata, ouro, ósmio e irídio.

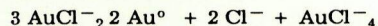
As reações são as seguintes:



catodo:



Outra reação que ocorre é a redução do dicloroaurato, chamada de dismutação ou de desproporcionamento:



O ouro precipitado vai para a lama anódica, que tem que ser recirculada, mediante nova fusão e refino. A temperatura e a agitação do banho parecem ser as variáveis que mais afetam a desproporcionamento.

Outro problema operacional é a passivação anódica pelo cloreto de prata, que favorece a oxidação do cloreto (Cl^-) sobre a camada passivada. Esta reação limita o teor de prata no ouro a ser refinado a 6 – 8%. Quando o teor é superior é forçoso abandonar a eletrólise em corrente contínua e usar correntes pulsantes, que permitem refinar anodos contendo até 20% de prata.

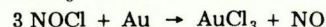
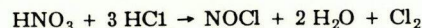
A corrente pulsante é a superposição de uma corrente alternada assimétrica a uma corrente contínua. No pequeno ciclo negativo a polaridade dos eletrodos é invertida e o H^+ é reduzido no anodo a H^0 , que é gasoso e se acumula sob a camada apassivada de cloreto de prata, até desprendê-la.

Processos Químicos

O primeiro consiste no ataque de ouro (tipicamente o precipitado por zinco) com ácido sulfúrico a quente ou com sulfato ácido de sódio. É uma fase intermediária,

cujo produto terá que ser reprocessado, mediante refino pirometalúrgico ou por ataque com água régia.

O segundo consiste no ataque com água régia e é usado quando estão presentes Rutênio, Rutênio e Iridio. Estes elementos e mais a prata precipitam, enquanto que os demais metais são dissolvidos. A água régia consiste na mistura de um volume de ácido nítrico p.a. (70%) com quatro volumes de ácido clorídrico p.a. (37%). Ocorrem as seguintes reações:



O ouro, solubilizado na forma de cloreto áurico, pode ser separado da solução mediante precipitação seletiva ou mediante extração por solventes orgânicos. A precipitação seletiva é obtida com bissulfato de sódio, SO_2 , sulfato ferroso, ácido fórmico, ácido oxálico, ácido ascórbico ou hidroquinona.

Os solventes orgânicos usados são o dietil eter e o dibutilcarbinol. A fase orgânica carregada de ouro é colocada em contato com uma solução 1,5 M de ácido clorídrico e nessa concentração só o ouro é extraído, ainda como cloreto. Em seguida o cloreto é reduzido com uma solução de ácido oxálico levemente aquecida.

Bibliografia

— Lewis, A. — Gold Geology Basics — E & M Journal, Feb 82, p 66 a 72.

— Verbete Ouro — Enciclopédia Mirador Internacional (1979)

— Encyclopaedia Britannica — verbetes Gold, Goldbeating, Gold Reserves, Gold Standard.

— Sobral, LGS, Santos, RLC e Laureano, DC. — Estudo dos efeitos de corrente de pulso sobre o eletrorefino da prata — Brasil, DNPM — Série Tecnologia Mineral, 11 Seção Metl. Extrativa, 3 Brasília 1980.

— Granato, M, Villas Bôas, RC — Efeito de alguns parâmetros operacionais no eletrorefino de ouro — Brasil, DNPM — Série Tecnologia Mineral, 14 — Seção Met. Extr., 5, Brasília, 1980.

— Lewis, A. — Leaching & Precipitation Technology for Gold & Silver Ores, E & MJ, junho 1983, p 48-55.

— Clem, B.M. — Heap Leaching Gold and Silver Ores — E & MJ, abril 82 p 68.

— Dow Chemical Co — Flotation Fundamentals & Mining Chemical — Dow, Michigan 1968.

— Hoechst — Hoechst Flotation Reagents, Frankfurt s/data.

— Am. Cyanamid Co — Mining Chemicals Handbook, Cyanamid, 1976.

— Granato, M, Sobral, L.G.S., Santos, RLC e Laureano, D.C. — Preparo Eletrolítico de Soluções de Ouro — Brasil Mineral n° 3, Fev 1984 pg 26 a 28.

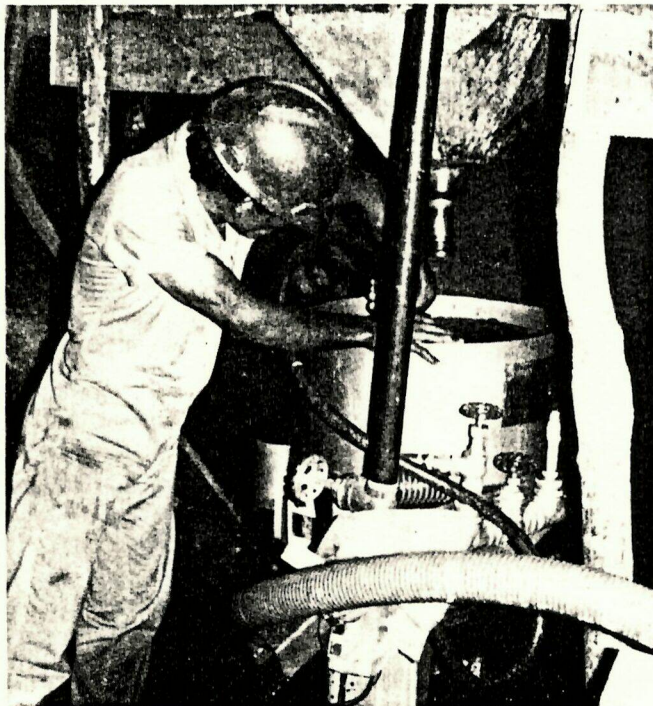
— Newton, J — Extractive Metallurgy, J. Wiley, NY, 1959.

— Sevriukov, M, Kuzmin, B, Cheleshchev, Y. — General Metallurgy Peace Publs. Moscou, s/d.

— New rich, G.M, Woodhouse, G e Dods, DNG — Carbon-in-pulp versus carbon-in-leach, June 1983 World Mining p. 48 a 51.

— Taggart, A.F. Handbook of Mineral Dressing, J. Willen, N. York, 1954.

Você extrai ouro fino?



Concentrador KC-12 para 4 ton/hora em operação.

Os Concentradores Knelson revolucionaram a extração de ouro fino e metais pesados, com resultados registrados no Brasil, Estados Unidos, Canadá, Austrália, África do Sul e Nova Zelândia.

A Maknelson fabrica no Brasil os Concentradores Knelson com as seguintes características e vantagens:

- Eficiência de até 98,3%
- Opera com minério de 1/4" ou menor
- Unidades portáteis até 4 ton/hora
- Capacidade de alimentação: 1 ton/hora
4 ton/hora
32 ton/hora
- Suprimento de força: elétrico
- Não requer instalações especiais para operar.

A Maknelson coloca uma planta piloto a sua disposição.

MAKNELSON — Máquinas Knelson Ind. e Com. Ltda.

Escritório:
Rua Pintassilgo, 290 - CEP 04514 - São Paulo - Capital
Tels.: 531-1626 e 533-6237