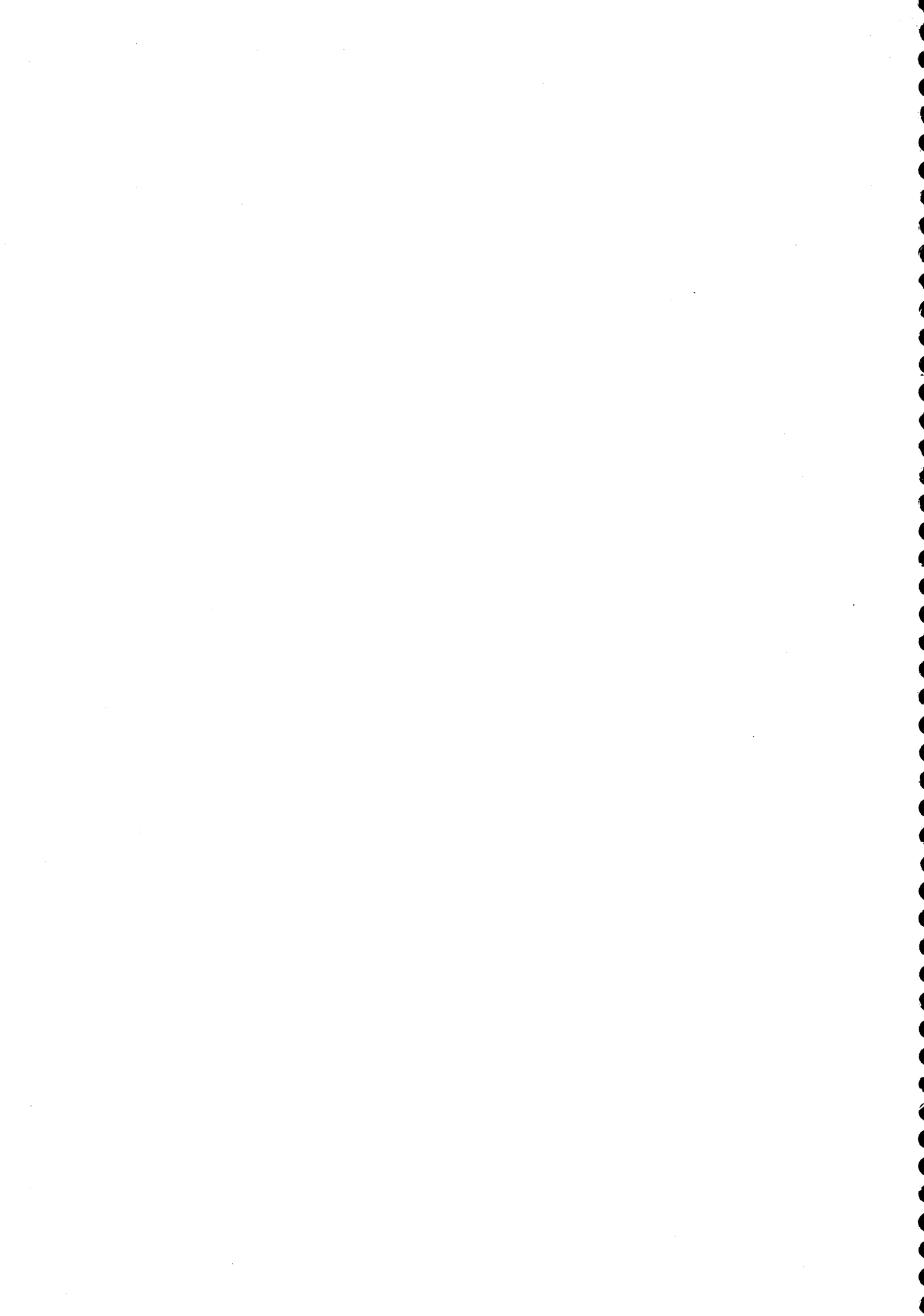


# Recuperação de ouro de minérios auríferos por processos químicos - o estado da arte

Patrícia Radino \*

1. INTRODUÇÃO
2. O PROCESSO ORIGINAL
3. A INTRODUÇÃO DO CARVÃO
4. LIXIVIAÇÃO EM PILHA
5. CARBON-IN-PULP (CIP)
6. CARBON-IN-LEACH (CIL)
7. PROCESSAMENTO DE MINÉRIOS REFATÁRIOS À  
CIANETAÇÃO
8. LIXIVIAÇÃO COM TIOURÉIA
9. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O  
PROCESSAMENTO DE MINÉRIOS AURÍFEROS



## Resumo

A recuperação de ouro de minérios auríferos de diversos tipos de ocorrência tem sido objeto de estudo e operações práticas há vários anos.

O processo original de lixiviação/cementação evoluiu muito desde sua concepção inicial existindo alternativas hoje em dia para recuperar ouro de quase que qualquer tipo de material.

Até o presente a etapa de dissolução do ouro em operações industriais é feita por cianetação e restringe-se a ouro fino face à cinética da reação entre o ouro e o cianeto ser extremamente lenta. Atualmente tem sido feito grande esforço comercial visando a utilização de solução de tiouréia em substituição à solução de cianeto o que pode resultar em processamentos químicos aplicáveis à ocorrência de ouro em faixas granulométricas mais grosseiras. Embora a cinética da reação entre o ouro e a tiouréia seja superior à reação com cianeto, a

economicidade do processo é ainda duvidosa.

O trabalho abrangerá operações industriais que processam minérios auríferos onde o ouro ocorre em veios de quartzo, rochas intemperizadas (coluvionares e eluvionares) e associado à sulfetos em rochas meta-sedimentares e meta-vulcânicas. É evidente que face as diferenças de associações e aos diversos tipos de sulfetos que ocorrem associados, as soluções de engenharia e rotas-de-processo apresentam diferenças importantes que serão discutidas no trabalho.

Serão abordados também novos desenvolvimentos na área de recuperação de ouro e serão discutidas alternativas de processo como carbon in pulp e carbon in leach versus cementação; cloração versus ustulação e outros.

A recuperação de ouro grosseiro por processos gravimétricos não fará parte do escopo deste trabalho, que será especificamente voltado a processamentos químicos de minérios e concentrados.

## 1. Introdução

O processo de cianetação para recuperação de ouro, quando introduzido em 1890, revolucionou o processamento de minérios contendo ouro e prata. Desde esta época o emprego de lixiviação com cianeto passou a ser a rota hidrometalúrgica convencional para extração destes elementos de minérios onde ocorrem finamente disseminados.

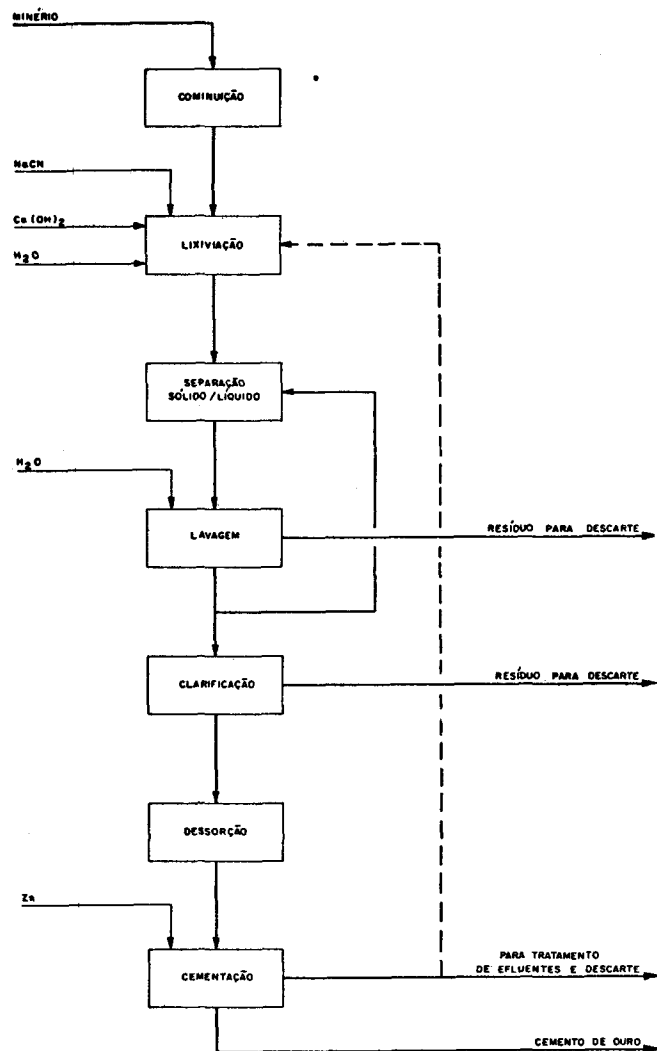
O processo de cianetação, como empregado naquela época e ainda utilizada hoje em dia em diversas operações, consiste na lixiviação em tanques agitados do minério moído, em geral a granulometrias bem finas; separação sólido/líquido da polpa e lavagem do resíduo; cementação do ouro com zinco em pó do licor clarificado e desaerado. Esta rota de processo apresenta uma série de inconvenientes, que de forma alguma impedem sua aplicação mas que fizeram com que vários esforços resultassem ao longo dos anos em desenvolvimentos tecnológicos mais atraentes.

## 2. O processo original

Em sendo a lixiviação com cianeto uma reação de cinética lenta para se trabalhar com tempos de residência razoáveis de modo a tornar o processo economicamente viável, é necessário que as partículas de ouro apresentem granulometria bastante fina, sendo esta uma das razões para que o processo seja em geral aplicado a rejeitos de beneficiamento físico e a minérios onde o ouro se encontra finamente disseminado. Esta reação é feita em tanques agitados com aeração forçada, pela necessidade de se manter condições oxidantes no meio.

Visando reduzir o tempo de residência na etapa de lixiviação o minério é alimentado ao processo cominuído em geral a -200 mesh, de modo a expor o maior número de partículas de ouro ao cianeto e ao oxigênio o que muitas vezes gera finos de minério que dificultam a operação de separação sólido/líquido em especial a clarificação do licor. Ressalta-se que a separação sólido/líquido,

Figura 1 - Lixiviação com cianeto e cementação com zinco em pó



neste caso filtração com lavagem ou lavagem em circuito de decantação em contra-corrente é por si uma operação onerosa e difícil pois deverá remover o máximo de solução residual que contém ouro dissolvido. Por outro lado, cementação não é um processo eficiente para soluções diluídas como são os licores de lixiviação dos processos de cianetação.

As propriedades de adsorção do carvão já são conhecidas há muitos anos mas seu emprego na recuperação de ouro de soluções se limitava as de difícil clarificação pois o único processo conhecido para recuperação do ouro do carvão carregado era por queima.

### 3. A introdução do carvão

No final da década de 40 foram realizados alguns trabalhos visando se chegar a um processo que permitisse a desorção do ouro do carvão e conseqüentemente seu reciclo à etapa de adsorção.

O processo de desorção evolui muito desde a descoberta da primeira rota que só permitia eluir o ouro perdendo-se

conseqüentemente, ao longo do tempo, a capacidade de carregamento do carvão e os demais preciosos, em especial a prata, que eram adsorvidos com o ouro e permaneciam no carvão.

O primeiro processo eficiente na desorção do carvão, utilizado ainda hoje em algumas operações foi o processo desenvolvido pelo United States Bureau of Mines, que emprega uma solução de cianeto e soda a quente. A cinética deste processo é lenta e evoluções desta rota incluem a adição do álcool à solução de desorção e a condução do processo à quente em torres sob pressão. O emprego de álcool a princípio pareceu muito atraente mas os custos associados fizeram com que o processo não encontrasse muita aceitação na prática; dentre os três processos a desorção sob pressão é a tendência e é a alternativa mais empregada atualmente.

A recuperação do ouro da solução de desorção é feita em todos os casos por redução eletrolítica em catodos de lã de aço que são posteriormente fundidos à metal doré.

A regeneração do carvão não envolve apenas a desorção dos preciosos sendo quase que rotina a lavagem ácida sistemática do carvão para remover outros íons que permanecem adsorvidos e tratamentos térmicos periódicos que restabelecem as propriedades físico-químicas do carvão.

### 4. Lixiviação em pilha

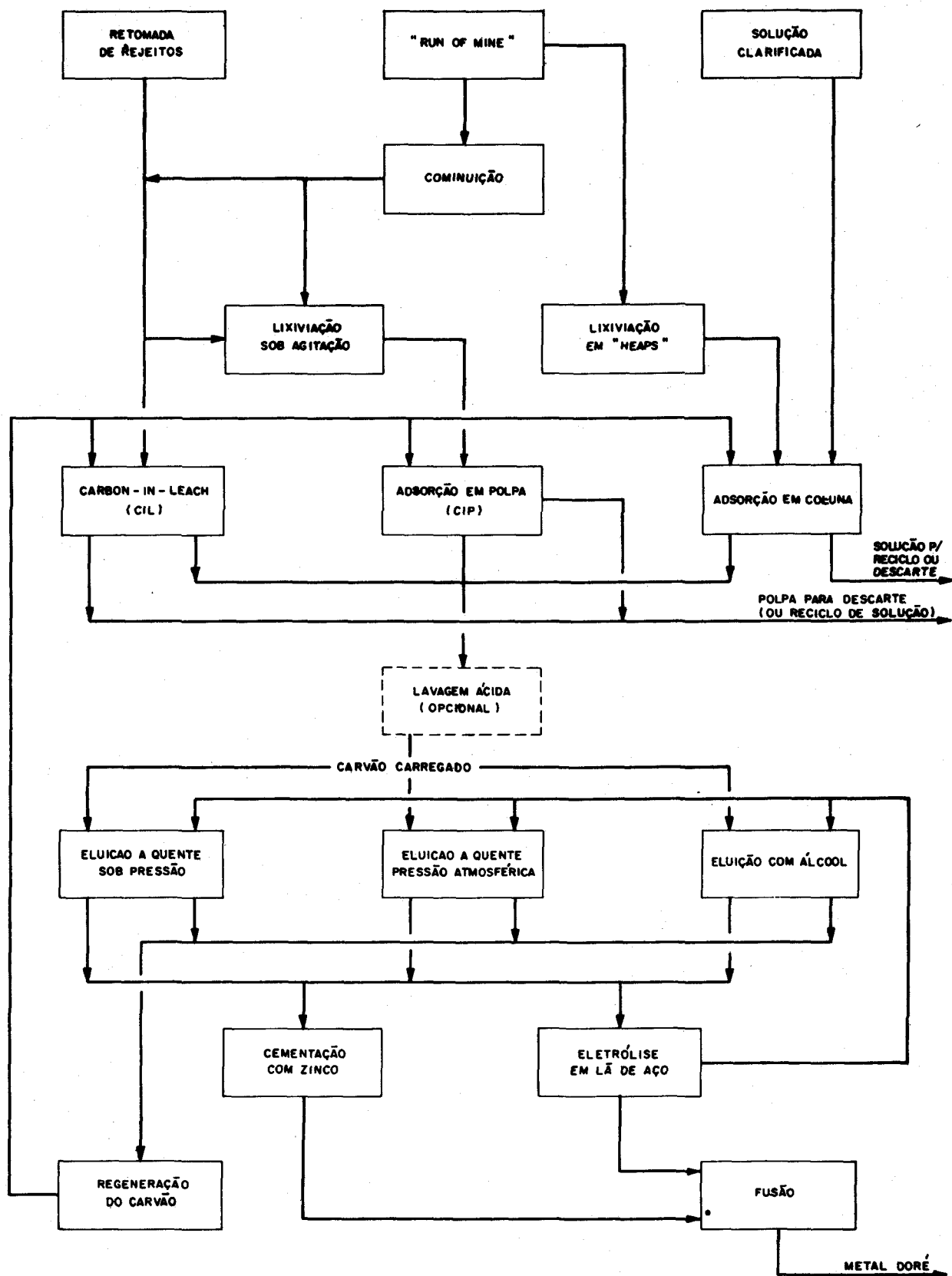
A lixiviação em pilha de minério contendo ouro é hoje em dia empregada em diversas operações no mundo com sucesso e se caracteriza por apresentar baixo investimento e baixo custo operacional, tornando viável o processamento de minérios considerado até então marginais, tanto pelo teor de ouro contido como pelo porte da jazida.

A lixiviação em pilha consiste na formação, em solo impermeável, de uma pilha de minério de granulometria relativamente grosseira, através da qual é feita percolar uma solução de cianeto que dissolve o ouro gradativamente. Esta solução, após percolar através da pilha, é coletada e processada para recuperação do ouro por cementação com Zn ou Al em pó ou, por adsorção em colunas de carvão.

A flexibilidade do processo deve ser enfatizada, pois existem usinas extremamente simples onde o "run of mine" é empilhado, sem sofrer britagem, em área cuja preparação exige apenas a deposição de uma camada de argila e o produto, cimento de ouro ou carvão carregado, é transportado e processado em uma unidade central.

O minério de ouro adequado à lixiviação em pilha deve preencher os mesmos requisitos necessários à cianetação convencional que são: ausência de substâncias cianídicas (substâncias que consomem cianeto, competindo com o ouro durante a reação); ausência de substâncias orgânicas que retardam a dissolução do ouro pelo consumo de oxigênio livre; e ausência de materiais carbonáceos,

Figura 2 - Recuperação de ouro utilizando carvão ativo



como grafite, que pelas propriedades superficiais adsorvem o ouro que já foi colocado em solução, impedindo que este seja recuperado no decorrer do processo, além de ter que ser permeável à solução, de modo que esta possa atingir os grãos de ouro sem exigir cominuição excessiva do

minério. O minério muito fino, além dos inconvenientes do custo de moagem, produz uma pilha que não permite a percolação homogênea da solução, dando origem à formação de caminhos preferenciais, reduzindo, conseqüentemente, a recuperação do processo.

Os minérios que exigem cominuição a granulometrias finas, ou que geram muitos finos durante a britagem, ou apresentam alto teor de finos naturais, devem ser aglomerados antes de serem empilhados, pois a permeabilidade e porosidade da pilha são altamente afetados pela segregação das partículas grossas e finas durante a formação da pilha com minério seco e a segregação adicional durante o processo de percolação, principalmente quando existe material abaixo de 100 mesh. A técnica de aglomeração é simples e merece um destaque especial quando se pensa no processamento de minérios brasileiros que muitas vezes apresentam alto teor de argilas que tendem a formar caminhos preferenciais. A aglomeração de partículas produz um material que apresenta características de permeabilidade e porosidade superiores, sendo muitas vezes indicado como pré-tratamento para minérios difíceis de serem tratados de forma convencional.

A aglomeração do minério é feita em um tambor rotativo e é promovida pela adição de água e cal. Existem outros produtos que podem ser utilizados como aglutinante ao invés de cal, mas em geral os resultados obtidos com cal são algo superiores e apresenta a vantagem adicional de já atuar na neutralização do minério. Muitas vezes a aglomeração consiste simplesmente em adicionar água e cal no produto britado, na correia transportadora, elevá-lo a cerca de 8 a 10m e deixar o produto cair em uma pilha crônica. O simples efeito de rolar sobre a pilha é suficiente para promover a aglomeração necessária.

A aglomeração dispensa ou reduz significativamente a necessidade de encharcar o minério empilhado antes da adição da solução de cianeto pois é conduzida a cerca de 15% sólidos.

## 5. Carbon-in-pulp (CIP)

O processo de adsorção de ouro da polpa proveniente da lixiviação é muito empregado hoje em dia em substituição ao processo convencional, pois elimina a operação de filtração e lavagem do resíduo antes da solução alimentar do circuito de adsorção de ouro em colunas de carvão, além, de no caso da cementação com zinco em pó, a operação adicional de clarificação. O processo CIP foi introduzido inicialmente para materiais que geram muitos finos na cominuição.

O minério para este processo é moído a granulometrias inferiores a 65 mesh e o carvão utilizado para adsorção apresenta granulometria da ordem de 20 mesh ou superior. A separação do carvão da polpa é feita em peneiras; o carvão carregado em ouro é lavado para remoção de lama e o ouro é em seguida desorvido por um dos processos mencionados. As peneiras utilizadas para esta operação podem ser estacionárias ou vibratórias.

Os vasos onde é feita a contactação do carvão com a polpa podem ser de vários tipos como pachucas, misto de agitação mecânica e agitação por borbulhamento de

ar, entre outros, recaindo a seleção do tanque no tipo de minério.

Os tipos de vaso e de peneira são escolhidos também visando minimizar a abrasão do carvão pois as partículas finas de carvão geradas pelo manuseio além de apresentarem consumo de carvão podem representar perda de ouro que está associado às partículas finas.

## 6. Carbon-in-leach (CIL)

O processo CIL é empregado em algumas operações que apresentam algum material carbonáceo e também para minérios que seriam processados por CIP.

Quando o minério apresenta material carbonáceo, este adsorve o ouro representando uma perda na recuperação global. Entretanto é citado na literatura que o ouro já em solução adsorve preferencialmente no carvão ativado o que reduz a perda de ouro para o material carbonáceo do minério.

A vantagem do CIL em relação ao CIP é que as operações de lixiviação e adsorção são conduzidas ao mesmo tempo no mesmo equipamento reduzindo sensivelmente o tempo global do processo e conseqüentemente o número de equipamentos empregados. Sendo a cinética de lixiviação bem mais lenta do que a da adsorção os equipamentos são dimensionados para a lixiviação.

Este processo foi selecionado para a mina de Mercur em Nevada, que contém material carbonáceo, por ter apresentado o melhor compromisso entre investimento e recuperação de ouro.

## 7. Processamento de minérios refratários à cianetação

Os minérios considerados refratários ao processo de cianetação são aqueles que apresentam material carbonáceo e/ou alguns sulfetos como pirita ou arseno pirita.

Quando os sulfetos e carvão podem ser separados por flotação uma das alternativas é a ustulação do concentrado, que embora efetiva em termos da recuperação de ouro por lixiviação posterior do calcinado, apresenta custos operacionais e investimento altos além de apresentar problemas ambientais. As usinas que usam ustulação oxidante e lixiviação do calcinado para o concentrado de flotação, processam também por lixiviação com cianeto o rejeito da flotação para recuperação do ouro não associado aos minerais coletados.

Alguns minérios não permitem a separação física dos sulfetos e do carvão e o processo de ustulação passa a ser impraticável quando se pensa em toda a massa de minério.

Em alguns casos uma pré-oxidação com cloro é suficiente para eliminar os efeitos

deletérios da presença de material carbonáceo sendo este procedimento adotado para o minério de Carlin - Nevada, que é posteriormente processado por lixiviação convencional com solução de cianeto.

A oxidação sob pressão para minérios refratários segundo a tecnologia desenvolvida pela Sherrit é uma alternativa nova com resultados efetivos bastante atraentes. O conceito desta técnica para liberar o ouro não é nova tendo iniciado na década de 50 com os desenvolvimentos da Chemico que foram mais tarde adsorvidos pela Sherrit que realizou diversos desenvolvimentos adicionais. Em vários minérios e concentrados testados a recuperação de ouro foi sempre superior, da ordem de 96 a 99%, em comparação a valores sem pré-oxidação situados na faixa de 5 a 74%. A possibilidade que o processo oferece de tratar a massa global de minério sem um pré-tratamento por flotação significa um potencial para recuperações globais de ouro ainda superiores.

## 8. Lixiviação com tiouréia

O emprego da tiouréia como complexante para ouro e prata foi discutido pela primeira vez em 1941 embora os esforços visando aplicações comerciais dos reagentes só tenham efetivamente iniciado em 1977. Até o presente não se tem conhecimento de qualquer operação industrial que tenha optado por este processo.

As vantagens citadas na literatura, deste reagente em relação ao cianeto são a cinética mais rápida, menor toxidez e menor influência por substâncias nocivas ao processo de cianetação. O custo de reagente por tonelada de minério é superior para a tiouréia sendo esta uma de suas principais desvantagens; o potencial de oxidação é também superior ao necessário à lixiviação com cianeto exigindo o emprego de oxidantes mais energéticos do que o oxigênio. A reação é conduzida em pH ácido o que pode ser considerado vantagem ou desvantagem dependendo do tipo de minério.

## 9. Algumas considerações sobre o processamento de minérios auríferos

Atualmente tem se notado um interesse muito grande no processamento de minérios que contêm substâncias deletérias à lixiviação com solução de cianeto e materiais carbonáceos, que até então eram deixados de lado por questões tecnológicas, custo e controle ambiental.

Existe um grande número de estudos voltados para diferentes tipos de fornos para ustulação, controle das emanações de  $SO_2$ , e, equipamentos para coleta de pó, em especial pela presença nos gases de exaustão de partículas finas de  $As_2O_3$ . No campo da pré-oxidação em solução aquosa sob pressão este mesmo tipo de minério tem sido também objeto de muitos estudos.

Outra área focalizada atualmente é a adsorção/dessorção dos preciosos em resina de troca iônica especialmente voltada para a dessorção seletiva do ouro e da prata eliminando assim a etapa final de eletro-refino do metal doré. Estes estudos ainda se encontram em fase exploratória não se tendo idéia de custos envolvidos. Futuramente a tendência é estender estes estudos ao emprego da resina em polpa e na própria lixiviação.

Com os processos que existem disponíveis hoje em dia e o conhecimento dos problemas causados pelos principais componentes interferentes com os processos convencionais já é possível se pensar em rotas de processo adequadas a quase que qualquer tipo de minério aurífero, sendo necessário evidentemente pequenas adaptações em função das características específicas de um minério que podem levar a uma concepção de processo diferente das atualmente existentes na prática.