

BIANCA FOGGIATTO

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA LIXIVIAÇÃO DO
OURO CONTIDO NOS FINOS DA USINA DE SÃO FRANCISCO, MT**

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.

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Junior

**São Paulo
2005**

À minha família e amigos, pelo incentivo e
compreensão nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Homero Delboni, pela dedicação na orientação deste trabalho.

A *Yamana Gold*, na pessoa do engenheiro Armando Moura, que possibilitou a realização deste projeto.

Ao professor Marcelo Mourão, que permitiu a realização dos ensaios de aglomeração e de resistência à compressão das pelotas no Laboratório de Processos Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). E ao técnico Danilo Filho pelo auxílio na realização destes ensaios.

Ao Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), através do professor Henrique Kahn e toda sua equipe, que permitiram a realização da caracterização mineralógica.

Aos técnicos do Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM), em especial a Alfredo dos Santos Freitas e Antonio Angelini Filho.

RESUMO

A jazida de São Francisco está localizada no estado de Mato Grosso, na região da Faixa Móvel Aguapei, onde ocorrem importantes concentrações auríferas. Na futura usina de São Francisco, como rejeito da separação gravimétrica obtém-se uma polpa muito diluída (1% de sólidos), que é enviada para a barragem de rejeito. Levando-se em conta o teor de ouro (0,7 g/t) contido neste rejeito, é possível obter um incremento na rentabilidade do processo com um aumento na recuperação global de ouro. A lixiviação em pilha é hoje a principal forma de recuperar ouro em rejeitos finos com teores menores que 2 g/t. Assim, o desenvolvimento de um processo confiável de lixiviação em pilhas foi realizado através de ensaios tecnológicos preliminares de concentração de ouro, para verificar a adequação do minério ao processo. Os trabalhos consistiram nas etapas de preparação de amostras, caracterização tecnológica do minério, planejamento e execução de ensaios em garrafa rolante e de lixiviação em coluna, obtendo-se parâmetros como recuperações metalúrgicas e consumo de reagentes, que são base para a concepção do processo e avaliação econômica. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que a lixiviação em pilhas deste rejeito é possível, sendo, no entanto, necessários ensaios complementares para otimização da etapa de aglomeração.

Palavras chave: minério de ouro, lixiviação em pilha, ensaios de cianetação

SUMÁRIO

	página
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	01
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	02
3.1. Processos de tratamento e tipos de minérios de ouro	02
3.2. Lixiviação	02
3.2.1. Solubilização do ouro por solução cianetada	03
3.2.2. Parâmetros da cianetação	04
3.3. Métodos de lixiviação	05
3.4. Lixiviação em pilhas	06
3.4.1. Preparação do minério	07
3.4.2. Construção do pátio e da pilha	08
3.4.3. Lixiviação e drenagem da solução	09
3.4.4. Recuperação do ouro contido em solução	09
3.4.5. Neutralização da pilha	09
3.5. Testes com minério de ouro para lixiviação em pilha	09
3.5.1. Lixiviação em garrafa rolante	10
3.5.2. Lixiviação em coluna	10
3.5.3. Pilhas piloto	11
3.5.4. Análise dos resultados	11
4. METODOLOGIA	12
4.1. Preparação da amostra	12
4.2. Caracterização da amostra	13
4.3. Ensaio metalúrgicos	14
4.4. Ensaio de aglomeração	15
4.4.1. Ensaio preliminares	16
4.4.2. Confecção do lote para lixiviação em coluna	17
4.5. Ensaio de lixiviação em coluna	17
5. RESULTADOS	19
5.1. Geologia	18
5.2. Caracterização da amostra	20
5.2.1. Mineralogia	20
5.2.2. Caracterização granulométrica	21
5.3. Ensaio metalúrgicos	21
5.4. Ensaio de aglomeração	24
5.5. Ensaio de lixiviação em coluna	25
6. CONCLUSÕES	26
7. REFERÊNCIAS	27
ANEXO A – Difrátogramas de raios X e fases identificadas	29
ANEXO B – Resultados da fluorescência de raios X	33
ANEXO C – Curvas de distribuição granulométrica	34
ANEXO D – Parâmetros controlados nos ensaios de garrafão	36
ANEXO E – Parâmetros controlados no ensaio de lixiviação em coluna	37

1. INTRODUÇÃO

Com o preço do ouro em alta, atrativo para os produtores, expansões e novos empreendimentos estão sendo estimulados. O preço da *commodity* internacional vem mantendo-se ao redor de US\$ 450/onça troy, o que está estimulando o segmento produtor de ouro que estava em decadência desde a década passada. Esta reação fez com que mudasse o panorama da produção nacional constituído por minas inviabilizadas, novos projetos desativados e produções reduzidas em minas em operação.

Reservas de pequeno porte voltaram a ser economicamente viáveis, dentre elas a de São Francisco, propriedade da *Yamana Gold*. Localizada no município de Vila Bela, no extremo oeste do estado do Mato Grosso, perto da fronteira boliviana, a mineralização aurífera ali presente está associada a rochas da formação Fortuna, contida na Faixa Móvel Aguapeí. A mina se encontra em fase de implantação, e apresenta espaço suficiente para a eventual implantação de pilhas de lixiviação, em região plana e próxima à mina céu aberto.

A conjuntura atual do ouro permite que empresas do setor reavaliem suas estratégias, voltando disponibilizar recursos para projetos que apresentem qualquer potencial de ganho. Os esforços para o desenvolvimento destes projetos também se concentram em áreas, onde ganhos possam ocorrer sem grandes custos adicionais. Como exemplo pode-se citar o aproveitamento de rejeitos, tendo em vista que o minério já foi processado, e a moagem é responsável por maior parte dos custos operacionais.

Na futura usina de São Francisco, como produto da gravimetria obtém-se uma polpa muito diluída (1% de sólidos), que é enviada para a barragem de rejeito. Em função da granulção fina do material existe uma preocupação relacionada a problemas de assoreamento da barragem. Além disso, devido à escassez de água na região do empreendimento, pretende-se recuperar a água do processo, minimizando também impactos ambientais. Para tal será necessário um espessamento desta polpa. Assim, levando-se em conta o teor de ouro (0,7 g/t) contido neste rejeito, é possível obter um incremento na rentabilidade do processo com um aumento na recuperação global de ouro.

Tendo em vista que a lixiviação em pilha é hoje a principal forma de recuperar ouro em rejeitos finos com teores menores que 2 g/t, é importante o desenvolvimento de um estudo para definição de um processo de lixiviação em pilhas confiável e adequado ao minério.

2. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho consistiu em estudar métodos (metodologia) e selecionar aquele considerado mais adequado ao tratamento do ouro contido nos finos da futura usina de São Francisco, por meio de lixiviação com cianeto. A seleção do método teve por base a análise de resultados de ensaios tecnológicos preliminares, subsidiados pela caracterização do minério aurífero, objeto dos ensaios.

Os trabalhos consistiram nas etapas de preparação de amostras, caracterização tecnológica do minério, planejamento e execução de ensaios em garrafa rolante e de lixiviação em coluna, bem como análises dos resultados.

A recuperação metalúrgica e consumo de reagentes foram considerados os parâmetros de processo essenciais para seleção do processo, bem como subsídio a sua posterior avaliação econômica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processos de tratamento e tipos de minérios de ouro

As operações de beneficiamento de minérios de ouro utilizam como base as diferenças marcantes entre as propriedades do ouro em relação às das gangas, como por exemplo, alto peso específico, solubilidade em soluções alcalinas diluídas de cianeto, capacidade de formar amálgamas e boa resposta à flotação. Portanto, as características de uma jazida e suas associações minerais determinam não só o processo de tratamento do minério, como também o desempenho na recuperação do ouro.

Os fatores de natureza mineralógicas que afetam a escolha do processo de tratamento do ouro são:

- Minerais portadores de ouro e minerais hospedeiros;
- Formas de associação entre minerais de ouro e minerais hospedeiros;
- Grau de liberação do ouro;
- Tamanho das partículas de ouro e sua distribuição granulométrica.

Além dos fatores acima, outros fatores exercem influência na seleção do processo, tais como: disponibilidade de água na região, localização da planta de beneficiamento, custos de investimentos e operacionais, recuperação desejada e a situação do mercado do ouro.

Para facilitar a escolha dos processos de beneficiamento dos minérios de ouro, Brooy (BROOY apud MADEIRA, 1997) propôs uma classificação sucinta das etapas de desenvolvimento e seleção de processos. A classificação abrange três grupos:

- **Não refratários:** são minérios que, após moagem <200# Tyler (0,074 mm), submetidos à cianetação em consumos normais (200 a 800 g/t), apresenta recuperação metalúrgica maior que 80%. Fazem parte deste grupo os minérios de aluvião, “free-milling” (minério que contém ouro livre ou facilmente liberável) e alguns sulfetados. Podem ser tratados por métodos densitários, flotação, lixiviação e amalgamação;
- **Refratários:** minérios tratados por lixiviação que, após moagem <200# Tyler, apresentam recuperação metalúrgica menor que 80% e alto consumo de reagentes. Geralmente são submetidos a algumas das seguintes etapas anteriores a concentração: ustulação, calcinação, oxidação química, bio-oxidação, oxidação sob pressão ou cloração;
- **Oxidados:** podem ser divididos em primários e secundários. Os primários são resultado da alteração hidrotermal das rochas hospedeiras. Já os secundários são derivados da oxidação supergênica dos sulfetos associados às partículas de ouro. São minérios tratados por lixiviação, seja em pilha ou em tanques.

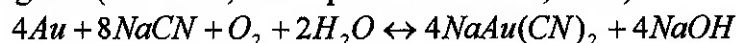
3.2. Lixiviação

A lixiviação com cianeto (cianetação) é o principal processo para recuperar ouro de minérios. Esse processo é baseado na solubilização do ouro em soluções alcalinas e vem sendo empregado a mais de um século.

Lixiviação é o termo que designa a extração de um constituinte solúvel de um sólido mediante solventes. Segundo Taggart (TAGGART *apud* NARDI, 2000), durante esta operação ocorre um contato efetivo entre o minério a ser lixiviado e o solvente. Para minério de ouro o solvente mais utilizado é a solução alcalina de cianeto de sódio.

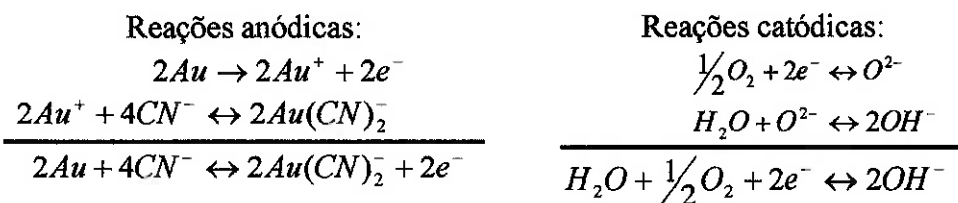
3.2.1. Solubilização do ouro por solução cianetada

Os primeiros estudos sobre a cianetação de ouro datam meados do século XIX. Elsner propôs uma reação de dissolução do ouro em solução alcalina cianetada, que inclui a participação do oxigênio (ELSNER, 1846 *apud* GRANATO, 1986):

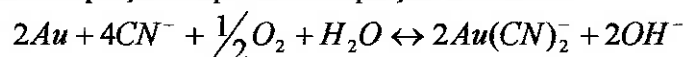


Esta equação é essencialmente um processo eletroquímico, na qual o cianeto forma um complexo com o ouro muito estável que se mantém em solução mesmo quando as concentrações de cianeto livre são muito baixas.

A presença do oxigênio é essencial para que a reação ocorra, através da transferência de elétrons do ouro sólido para o oxigênio dissolvido. Assim, o ouro dissolve-se anodicamente com liberação de elétrons e o oxigênio é reduzido catodicamente a íon hidroxila (OH⁻), conforme as equações a seguir.



A soma das duas equações reproduz a equação de Elsner:



O processo de dissolução do ouro envolve reações na interface sólido/líquido, através da camada limite de Nernst, conforme mostra o diagrama da Figura 1. As etapas envolvidas são as seguintes:

- Absorção de oxigênio na solução;
- Transporte do cianeto e do oxigênio dissolvidos até a interface sólido/líquido;
- Adsorção dos reagentes na superfície do ouro;
- Reação eletroquímica;
- Dessorção do complexo aurocianeto da superfície do ouro e dos outros produtos da reação;
- Transporte dos produtos desorvidos para a solução.

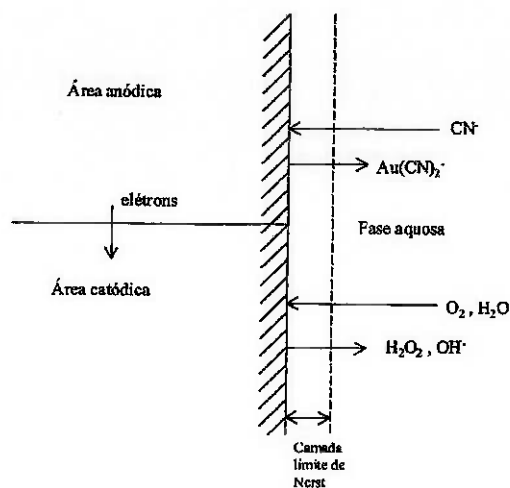


Figura 1 – Esquema da reação sólido/líquido de dissolução do ouro (NARDI, 2000)

A solução entra nos poros dos minerais por ação da capilaridade. Como as partículas de ouro são finas e esparsas, o ouro é rapidamente dissolvido. A velocidade de dissolução do ouro é controlada pelo transporte de massas, dependendo da velocidade de difusão do cianeto e do oxigênio até a superfície do metal. Assim, o reagente que tiver a menor velocidade de difusão irá limitar a dissolução do ouro. Geralmente, a concentração de oxigênio é que limita a dissolução do ouro, devido ao fato de a solubilidade do oxigênio em água ser muito baixa.

A concentração de saturação do oxigênio em solução alcalina é de 8,2 mg/l e a concentração mínima de cianeto para obter maior velocidade de dissolução é de 100 mg/l (BARTLETT, 1992). Somente utilizam-se concentrações de cianeto maiores quando existe a competição entre espécies minerais.

A presença de minerais sulfetados e orgânicos pode promover uma competição pelo oxigênio. Quando isto ocorre, a diminuição da concentração de oxigênio na solução diminui a extração do ouro.

A cianetação ainda apresenta o inconveniente da seletividade da dissolução de ouro ser baixa em relação à outros metais, ou seja, vários outros metais que compõem o minério além do ouro serão também dissolvidos, desde que exista cianeto disponível. A solubilidade relativa dos metais em cianeto ocorre de acordo com a seguinte série (do mais positivo para o mais negativo): Mg, Al, Zn, Cu, Au, Ag, Hg, Pb, Fe, Pt. Esta característica pode ser inconveniente não só por enriquecer o licor de lixiviação com componentes que podem ser indesejáveis nas etapas posteriores, como por provocar um maior consumo de cianeto com reações desnecessárias.

3.2.2. Parâmetros da cianetação

A cianetação apresenta parâmetros de processo que, estipulados de forma adequada, determinam as condições mais eficientes de operação. Para a cianetação, os principais parâmetros a serem definidos e controlados são:

- **Características do minério:** o conhecimento adequado da mineralogia do minério é uma condição fundamental para otimização da extração de ouro;
- **Concentração de cianeto:** a concentração ótima de cianeto depende da mineralogia do minério e deve assim ser determinada para cada material individualmente,

considerando-se os custos operacionais envolvidos. Ou seja, se a concentração de cianeto for muito baixa a lixiviação será limitada, e se for muito alta, os custos serão altos;

- Concentração de oxigênio: a presença de oxigênio dissolvido na solução lixivante é necessária para oxidar o ouro antes de sua complexação com o cianeto, para aumentar a cinética da lixiviação. A solubilidade do oxigênio em água é função da pressão e temperatura;
- Alcalinidade: o valor do pH deve ser mantido acima de 10,5 para evitar a formação de gás cianídrico (HCN) e menor que 12, para garantir menor dissolução de impurezas. O controle do pH deve ser rotina para circuitos de lixiviação, neutralizando compostos ácidos da água e do minério;
- Granulometria de moagem: tamanhos acima de 150# *Tyler* (0,105 mm) requerem tempos de lixiviação maiores para a dissolução do ouro e tamanhos menores que 325# *Tyler* (0,044 mm), tempos menores. A área da partícula de ouro exposta para a reação influencia a velocidade de cianetação do ouro;
- Temperatura: a velocidade de cianetação aumenta com o aumento da temperatura até 85°C. Acima desta temperatura, a taxa de cianetação diminui devido ao decréscimo da solubilização do oxigênio, aumento da reatividade dos minerais de ganga e decomposição do cianeto;
- Presença de íons interferentes na solução: a solubilidade dos minerais de ganga em solução de cianeto podem ser maior que a do ouro e por isso, sua presença deve ser conhecida para garantir que a quantidade de cianeto em solução seja suficiente para lixiviar o ouro.

3.3. Métodos de lixiviação

A lixiviação aplicada a minérios de ouro pode ser realizada por diferentes métodos, divididos basicamente em dois grupos principais:

- Lixiviação por percolação: são utilizados em pequenos depósitos de minério, para minérios de baixo teor e para rejeitos. Dentre os processos pode-se citar: lixiviação “*in situ*”, em montes (“*dump leach*”), em pilhas (“*heap leach*”) e em tanques sem agitação (“*vat leach*”);
- Lixiviação por agitação: são processos realizados em tanques agitados, que diferenciam-se pela forma de recuperação do ouro.

A lixiviação “*in situ*” consiste no tratamento do minério no local onde se encontra, sem retirá-lo da mina. É aplicada a depósitos já minerados, depósitos de minério de baixo teor e até mesmo em zonas periféricas de jazidas. Esta técnica é pouco utilizada para minérios de ouro, contudo apresenta grande importância no tratamento de minérios de urânio e de cobre.

A lixiviação em montes consiste na lixiviação do minério sem que este seja previamente preparado. É aplicada a minérios que apresentam ouro parcialmente liberado sem haver cominuição e que apresente permeabilidade adequada. Geralmente é utilizada com minério oxidado “*run of mine*” e/ou com rejeitos e outros minérios marginais. Os ciclos são longos (na escala de meses), a recuperação é baixa (15 a 40%) e o consumo de reagentes é elevado (MADEIRA, 1997). Apresentam baixos investimentos e custos operacionais.

A lixiviação em pilhas de minério é usada no beneficiamento de minérios oxidados e sulfetados, resultando em recuperações de ouro entre 50 e 85% (MADEIRA, 2000). O minério é previamente britado ou aglomerado (no tratamento de minerais argilosos). O

processo baseia-se na aplicação de solução lixiviante na superfície da pilha por irrigação e coleta da solução rica por gravidade através de tubulações. O ciclo total de lixiviação pode levar meses.

O método de lixiviação em tanques estacionários é pouco utilizado atualmente, sendo precursor da lixiviação em pilha. Apresenta vantagens em condições climáticas extremas, pois fornece um melhor controle do balanço de água. Neste processo, o minério britado é carregado em tanques onde a solução lixiviante é alimentada em fluxo ascendente. Geralmente tem-se um circuito com vários tanques operando em contra-corrente. Os tanques são grandes, podendo acomodar milhares de toneladas. Utiliza soluções suficientemente concentradas para utilização direta na eletrorecuperação, podendo resultar em recuperações de ouro de até 90%. Os investimentos e custos operacionais são intermediários aos obtidos em lixiviação em pilhas e em tanques agitados.

A lixiviação em tanques agitados é muito utilizada para tratar minérios que já passaram por processo de britagem e moagem, e que apresentam teores de ouro superiores a 2 g/t. A polpa com 30 a 60% de sólidos é aerada pela injeção de ar. A adição do cianeto pode ser feita durante a moagem ou no tanque de lixiviação, podendo ser feita em mais de um estágio em função de seu consumo. A concentração de cianeto livre não deve ultrapassar o limite inferior de 100 ppm. Comparando-se aos outros processos, possui menores tempos de lixiviação devido ao menor tamanho de partículas (<200# Tyler) e à agitação no tanque que proporciona maior difusão entre reagentes e minério. Os investimentos e os custos operacionais são mais altos que nos processos de lixiviação por percolação e as recuperações, geralmente, superiores a 90%. É o processo mais utilizado sendo responsável pela produção de ouro nas maiores minas do mundo (GRANATO, 1986 e NARDI, 2000).

3.4. Lixiviação em pilhas

A lixiviação em pilhas é uma opção tecnológica aplicada a minérios auríferos que possuam baixo teor, de tal modo que não seja economicamente viável sua concentração por outros métodos, mas que em contrapartida apresentam valor econômico suficiente para não serem descartados como rejeito. Existem alguns requisitos básicos que precisam ser considerados para tratar o minério por este método:

- Partículas de ouro finas, pois o ouro grosso apresenta uma cinética de extração mais lenta;
- Minério suficientemente poroso, permitindo sua lixiviação mesmo que apresente granulometria acima da necessária à exposição das partículas de ouro na superfície dos grãos;
- Mínimo de agentes cianicidas, material sulfetado e carbonoso presentes no minério;
- A quantidade de finos e material argiloso não deve impedir a boa permeabilidade da solução lixiviante.

As vantagens da lixiviação em pilha, quando comparada com a lixiviação em tanques agitados, são baixos custos de investimento e operacional. Muitas minas utilizam a lixiviação em pilhas para minérios de baixo teor (< 2 g/t) e em tanques agitados para minérios de alto teor (> 2 g/t). Assim, o que define a aplicação da lixiviação em pilha em lugar da lixiviação agitada é o teor. Algumas vezes a lixiviação em pilha é instalada após o início da operação da mina, para tratar minérios considerados sub-econômicos.

Uma das desvantagens do método de lixiviação em pilhas é a de apresentar maior incerteza na previsão de recuperação e, em geral, menor recuperação. Em alguns casos é possível obter recuperações maiores na lixiviação em pilhas, por causa dos períodos longos de lixiviação.

O processo de lixiviação em pilha é composto das seguintes etapas: preparação do minério, construção do pátio e da pilha, lixiviação da pilha, drenagem da solução, recuperação do ouro contido em solução, neutralização da solução já recuperada e remoção do minério lixiviado, esta última opcional.

3.4.1. Preparação do minério

A preparação do minério inclui, normalmente, as etapas de homogeneização, britagem e aglomeração.

A homogeneização é feita pelo empilhamento de minério e posterior recuperação por carregadeiras ou rodas de caçamba. O minério assim homogeneizado segue para as etapas subsequentes de britagem e aglomeração.

Na britagem o minério é fragmentado até que atinja tamanhos de partículas adequados para extração do ouro durante o ciclo de lixiviação (granulometria aproximada ao máximo de extração que pode ser obtido com tempo infinito de lixiviação). Britagens até granulometria mais finas diminuem o tempo necessário de lixiviação, porém apresentam duas desvantagens:

- Aumenta os custos de operação;
- Aumenta a produção de finos, os quais diminuem a permeabilidade da pilha de minério, podendo ainda impedir a percolação uniforme da solução na pilha.

O produto da britagem apresenta granulometria geralmente inferior a 20 ou 25 mm. Tal granulometria é usualmente obtida em dois estágios de britagem. Ocasionalmente utiliza-se britagem terciária para obter produtos menores que 10 mm. Cal hidratada geralmente é adicionada em correias transportadoras durante o processo de britagem, para garantir alcalinidade.

Se o minério apresentar conteúdo elevado de finos, é fundamental a aglomeração, de forma a garantir a permeabilidade e homogeneidade da percolação da solução lixiviante na pilha.

Um empilhamento não adequado pode resultar em segregação do minério, cujos efeitos são deletérios à lixiviação, pois pode causar variações na permeabilidade de acordo com a altura da pilha. Neste caso, o acúmulo de partículas finas na parte superior e fragmentos mais grossos nas extremidades das pilhas resultam em percolação não uniforme da solução lixiviante. A aglomeração de minérios, que contém quantidades significativas de partículas finas (<150# Tyler) ou muita lama, proporciona melhorias na permeabilidade da pilha, cujo resultado é uma percolação uniforme da solução lixiviante. Na Figura 2 pode ser visto o efeito da aglomeração de partículas finas utilizando cimento como aglomerante.

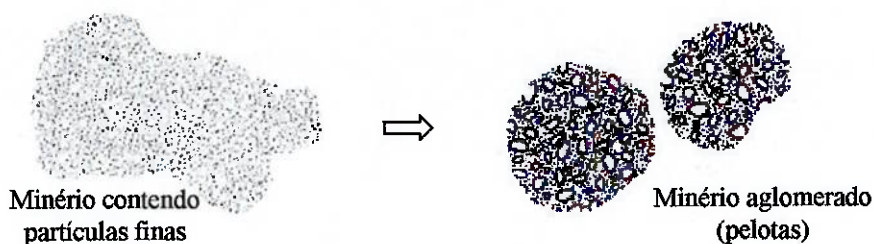


Figura 2 – Resultado de aglomeração de partículas finas com o uso de cimento (McCLELLAND, 1988)

O *United States Bureau of Mines*, em meados de 1970, foi pioneiro na aglomeração em conjunto com lixiviação em pilhas de minérios de ouro, utilizando os aglomerantes mais comuns atualmente: cal hidratada e cimento. Tanto a cal como o cimento são adicionados em quantidades suficientes para garantir alcalinidade protetora. O cimento, apesar de apresentar preços elevados, fornece resultados industriais satisfatórios.

Solução de cianeto também pode ser adicionada durante a aglomeração, de forma que a dissolução do ouro começa durante a cura das pelotas e virtualmente completa enquanto a pilha é formada.

As primeiras aplicações industriais de aglomeração para fins de lixiviação foram nos anos 80. Foram determinados três parâmetros críticos que influenciam no fluxo de solução para a produção de pelotas estáveis, permeáveis e com resistência ao manuseio, quais sejam:

- Quantidade de aglomerante;
- Mineralogia da mistura;
- Período de cura para aumento da resistência.

As pelotas adequadas para lixiviação em pilhas são bem diferentes daquelas obtidas na siderurgia, já que as primeiras podem ser facilmente quebradas pela força dos dedos.

3.4.2. Construção do pátio e da pilha

A pilha é, geralmente, construída sobre um piso impermeabilizado por uma manta de PVC de 0,8 mm de espessura, assentada sobre três camadas de argila, de 30 a 40 cm, compactadas individualmente. Sobre a manta é depositada uma camada de areia permeável (GRANATO, 1986).

A pilha é localizada em local que apresenta inclinação de 2 a 6 graus, para facilitar a drenagem da solução (BARTLET, 1992). A solução a ser alimentada é bombeada a partir de tanques, cuja capacidade é grande o suficiente para suportar imprevistos como chuvas e paradas na planta. Ao contrário de plantas de processamento convencionais, as pilhas não podem ser desligadas, pois a drenagem continua por alguns dias depois que a solução pára de ser alimentada.

A altura da pilha é um parâmetro muito importante, pois pode comprometer a manutenção da permeabilidade da pilha. Alturas utilizadas na mineração variam de 3 a 6 m.

Durante o empilhamento deve-se evitar a segregação nas pilhas e também a excessiva compactação devido à movimentação de equipamentos sobre as pilhas. A formação de canais preferenciais de percolação de solução pode levar ao desmoronamento das encostas da pilha.

Assim, em função das características do minério, a forma de construção da pilha envolve investimentos e custos diferentes. O empilhamento pode ser feito:

- Diretamente por basculamento de caminhões em ponta de aterro;
- Despejada por trator em ponta de aterro;
- Com transportadores de correia ou *stackers*.

3.4.3. Lixiviação e drenagem da solução

Os reagentes químicos que são adicionados à solução que alimenta a pilha incluem água para suprir a evaporação em climas secos, cianeto de sódio e cal. Se a pilha for construída em região de muita chuva, ela deve ser coberta com manta plástica, para evitar a diluição da solução.

A irrigação da pilha com solução de cianeto é feita através de aspersores ou gotejadores, com vazões de 4 a 12 l/h/m² (BERALDO, 1990). A solução rica é coletada por gravidade através de tubulações ou canaletas. A concentração da solução lixiviada varia em função da fase do ciclo de lixiviação. Assim que ela atinge sua concentração máxima, é dirigida a um reservatório central para início da extração do ouro.

3.4.4. Recuperação do ouro contido em solução

Após a solubilização do ouro contido no minério realiza-se sua recuperação para obtenção do metal fundido (*bullion*). O ouro dissolvido na solução pode ser recuperado por:

- Adsorção em carvão ativado ou resinas de troca iônica;
- Precipitação com zinco (processo chamado *Merryl-Crowe*);
- Flotação seletiva;
- Extração por solvente.

A solução rica ou precipitado é enviado para as etapas de eletro-recuperação, seguida de fundição. A solução extinta é enviada a outro tanque, de onde pode ser retomada para reciclar na lixiviação da pilha.

3.4.5. Neutralização da pilha

O rejeito sólido apresenta problemas com respeito ao controle ambiental e deve ser monitorado, controlando-se a quantidade de cianeto contido nos efluentes líquidos. O cianeto residual requer um tempo de residência da solução de lavagem para ser removido. A lavagem da pilha deve ser feita pela oxidação do cianeto por cloro, ozônio ou peróxido de hidrogênio.

Segundo as leis ambientais é preciso ter um conhecimento detalhado do impacto do cianeto no solo, nos aquíferos e barragens presentes na região do empreendimento.

3.5. Testes com minério de ouro para lixiviação em pilha

A susceptibilidade à lixiviação de ouro contido em minérios é avaliada conforme o processo industrial selecionado. A avaliação de cada uma das rotas tem por base ensaios de laboratório que reproduzam as condições de operação industrial do processo escolhido.

Esta avaliação poder ser feita através de ensaios de lixiviação em garrafa rolante, em coluna e em pilhas piloto.

3.5.1. Lixiviação em garrafa rolante

A suscetibilidade do minério à lixiviação em solução de cianeto é determinada por meio de ensaio de lixiviação agitada em garrafa rolante, sobre minério de granulometria abaixo de 150# Tyler. Tal ensaio é de execução relativamente simples e promove uma boa aeração da polpa.

O ensaio de lixiviação em garrafa rolante, também chamado de garrafão, pode ser feito sobre minério, estéril ou rejeito, fornecendo informações iniciais como:

- Recuperação de ouro (extensão da extração de ouro);
- Dosagem de reagentes (quantidade requerida durante o ensaio);
- Cinética do processo de recuperação.

Os resultados de recuperação obtidos em ensaios de garrafa rolante são considerados máximos, pois o atrito que ocorre enquanto a garrafa rola gera finos, liberando partículas que não seriam liberadas em pilhas estáticas. Quanto mais grossa for a alimentação, maior o atrito gerado pelo rolamento do garrafão.

Em geral, água deionizada e minério são adicionados na garrafa em polpa com 40 a 50 % de sólidos em peso (McCLELLAND, 1988). Inicialmente adiciona-se a cal para ajustar o pH da polpa antes da dosagem de cianeto, garantindo a alcalinidade. O cianeto de sódio, em concentração em solução equivalente a 1000 ppm, é então adicionado à polpa. Em determinados tipos de ensaio pode-se adicionar carvão ativado, com o intuito que este adsorva o ouro em solução durante o ensaio.

A polpa é rolada em garrafas abertas apoiadas em acionadores de rolos laboratoriais, usualmente por alguns dias. O rolamento é suspenso rapidamente para permitir amostragem aos tempos de 2, 4, 8, 24, 48, 72 horas permitindo estabelecer a taxa de recuperação. O volume da solução retirada é medido e uma amostra é enviada para análise da concentração de ouro. O pH e as concentrações de oxigênio e de cianeto dissolvidos são medidos para cada amostragem. Pode ser adicionada à polpa água de reposição, equivalente ao volume amostrado. O pH e concentração de cianeto, quando necessário, são restabelecidos ao valor inicial. O rolamento é então retomado.

Após o término da lixiviação a polpa é filtrada para separar líquido e sólido. O volume final de solução é medido e amostrado. O pH e as concentrações de cianeto e oxigênio dissolvidos na solução são determinados. O resíduo lixiviado é lavado intensamente com água deionizada e quarteadado para determinação do teor residual. Existe ainda a opção de peneirar o resíduo e assim determinar o teor residual por fração, obtendo a curva de distribuição de ouro final, obtendo-se indicações sobre grau liberação e necessidade de moagem fina.

Resultados metalúrgicos deste ensaio fornecem, rapidamente, informações sobre a susceptibilidade à lixiviação do minério. O minério é julgado susceptível, se apresentar recuperação adequada ao processo que se quer submetê-lo.

3.5.2. Lixiviação em coluna

Para simular a lixiviação em pilhas, emprega-se o ensaio laboratorial de lixiviação em coluna. Vários ensaios em coluna de diferentes amostras de minério do mesmo depósito podem ser conduzidos simultaneamente.

A solução cianetada é alimentada, por tubulações plásticas de irrigação, em colunas verticais, conforme os seguintes parâmetros (BARTLETT, 1992):

- Amostras de 25 a 50 kg de minério;
- Diâmetro da coluna de 150 a 200 mm;
- Altura da coluna de 1 a 3 m;
- Granulometria abaixo de 20 mm ou minério aglomerado.

Durante o ensaio, a solução é drenada da coluna constantemente para um recipiente, de onde é recirculada sob vazões tipicamente utilizadas industrialmente, mediante o uso de bombas peristálticas. Periodicamente o pH e concentração de cianeto são medidos, os reagentes são dosados, e amostras da solução da saída da coluna são retiradas para análise do teor de ouro dissolvido. Amostras representativas de minério devem ser analisadas antes e após os testes de lixiviação.

Os balanços materiais em ouro são feitos diariamente a partir dos resultados das análises e consolidados, no final do ensaio, com a análise do resíduo do minério. Se os ensaios em coluna de laboratório apresentarem resultados considerados adequados, seguem-se ensaios em maior escala.

3.5.3. Pilhas piloto

As pilhas piloto simulam a seção vertical da pilha real, do topo ao fundo, envolvendo até 500 kg de minério. Estas pilhas são muito caras e usualmente desnecessárias, mas são ocasionalmente operadas quando a viabilidade do projeto é marginal ou incertezas são altas. Elas podem ser:

- Colunas grandes, na ordem de 2 metros de diâmetro;
- Caixas quadradas de madeira ou concreto contendo minério;
- Pequenas pilhas não confinadas.

Por causa do ângulo de repouso de pilhas não confinadas, alguns minérios não podem ser expostos a soluções lixiviantes. Isto pode representar dificuldades no balanço do ouro, a não ser que a pilha seja muito grande, com algumas centenas de toneladas de minério.

Para prevenir distorções dos resultados causadas pelas paredes da coluna, o diâmetro desta deve ser pelo menos 10 vezes maior que o *top size* do minério. Para minérios britados, esta regra resulta em diâmetros de 200 a 250 mm.

3.5.4. Análise dos resultados

Os balanços materiais gerados a partir da análise química das soluções amostradas durante os diferentes ensaios são utilizados para gerar curvas de extração de ouro acumulada. Estas curvas podem ser traçadas como:

- Porcentagem de ouro extraído acumulado pelo tempo de ensaio (Figura 3);
- Porcentagem de ouro extraído acumulado pelo volume de solução acumulada.

Tanto o tempo de ensaio como o volume acumulado de solução são parâmetros controlados, portanto disponíveis, sendo posteriormente utilizados na operação industrial de lixiviação em pilha.

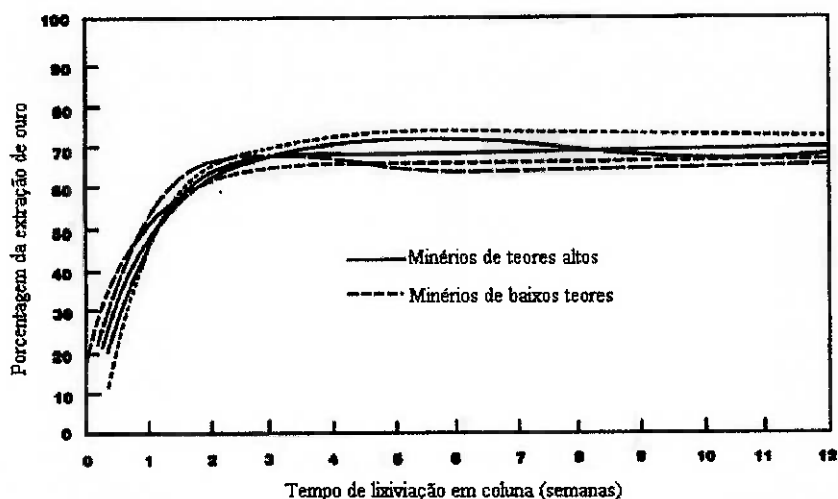


Figura 3 – Curvas de extração de ouro em testes de lixiviação em coluna (BARTLETT, 1992)

A porcentagem do ouro extraído é calculada com base no teor *back*, segundo a fórmula seguir:

$$T_{back} = \frac{(M_{A_{liq.}} + M_{A_{res.}})}{M_{sól.}}$$

onde: T_{back} é o teor *back* (ppm)
 $M_{A_{liq.}}$ é a massa de ouro no líquido (mg)
 $M_{A_{res.}}$ é a massa de ouro no resíduo sólido (mg)
 $M_{sól.}$ é a massa de minério utilizada no ensaio (kg)

A recuperação metalúrgica somente pode ser calculada após o termino do ensaio e análise do teor de ouro contido no resíduo sólido.

4. METODOLOGIA

O programa de ensaios para avaliação da lixiviação em pilhas de minério de ouro abordou as seguintes etapas:

- Preparação da amostra;
- Caracterização da amostra;
- Ensaios metalúrgicos;
- Ensaios de aglomeração;
- Ensaios em colunas.

4.1. Preparação da amostra

A etapa de preparação da amostra consistiu inicialmente na homogeneização de amostra de minério de ouro com massa total de 975 kg. A amostra foi assim submetida à homogeneização por pilha alongada e posteriormente quarteada.

Toda a amostra foi peneirada na malha 100# *Tyler* para garantir que não houvesse partículas mais grossas que esta malha no minério a ser ensaiado.

4.2. Caracterização da amostra

Nesta etapa do trabalho foram realizados:

- Descrição sumária da geologia do local do empreendimento;
- Estudo mineralógico;
- Caracterização granulométrica da amostra.

O estudo mineralógico incluiu ensaios de deslamagem em ciclone de corte 10 μm e posterior separação em meio denso da fração grossa, utilizando como líquido denso o bromofórmio. As alíquotas analisadas foram obtidas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 4.

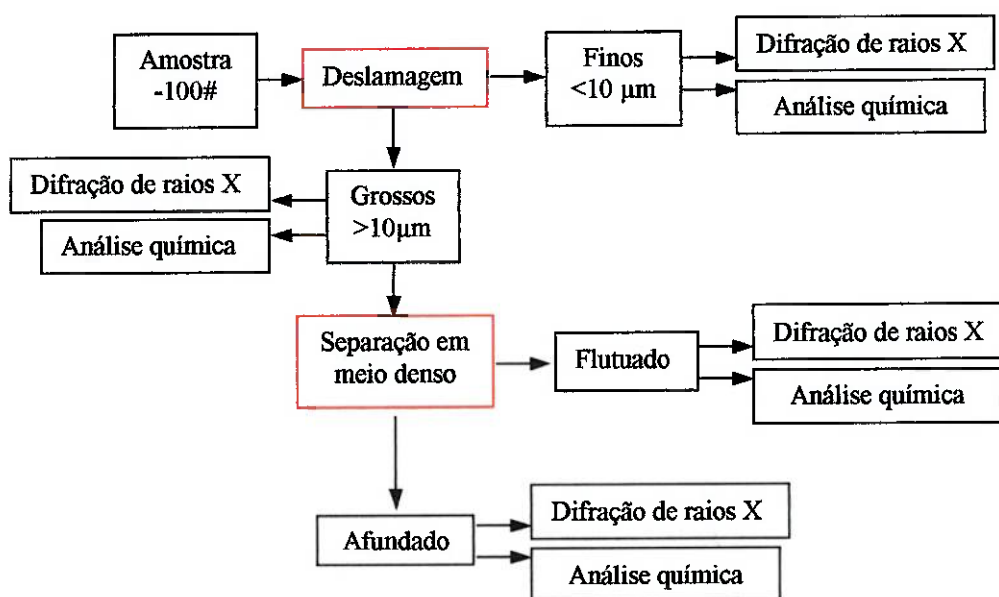


Figura 4 – Fluxograma dos ensaios realizados para caracterização mineralógica

As diferentes amostras (Finos, Grossos, Afundado e Flutuado) foram submetidas a difratometria de raios X e análise química por fluorescência de raios X, realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Minas e de Petróleo da USP.

A análise por difratometria de raios X foi efetuada através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X, marca *Philips*, modelo MPD 1880. Através destas análises obteve-se o difratograma das diversas amostras analisadas, que foram comparados com o banco de dados do *International Centre of Diffraction Data (ICDD)* de 2003.

Para análise química as amostras foram fundidas com tetraborato de lítio e submetidas à fluorescência de raios X, em equipamento marca *PANalytical*, modelo *Axios Advanced*. Os resultados foram então comparados a padrões internacionais, que forneceu análise dos óxidos presentes nas amostras. Paralelamente foi realizada a perda ao fogo a 1050°C.

A interpretação dos resultados obtidos permitiu a identificação das principais espécies minerais presentes, indicando a forma que os elementos se encontram associados no minério. Também foi possível verificar a presença de espécies consumidoras de cianeto.

A caracterização granulométrica incluiu ensaios de peneiramento e de espalhamento de luz *laser* de baixo ângulo.

O peneiramento de uma alíquota de aproximadamente 10 kg foi feito a úmido devido à alta porcentagem de partículas muito finas. Foram usadas peneiras da série *Tyler* desde a 20 # até a 635 #. O material passante na malha 635 # foi deslamado em ciclone, com corte aproximadamente de 3 μm . Os produtos do peneiramento foram submetidos à análise química, fornecendo o teor de ouro por faixa granulométrica (distribuição de ouro).

Duas amostras, uma peneirada na malha 100# *Tyler* e outra na malha 20# *Tyler*, foram submetidas ao ensaio de espalhamento de luz laser de baixo ângulo, realizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Minas e de Petróleo da USP.

4.3. Ensaios metalúrgicos

Antes dos ensaios em colunas foram conduzidos ensaios para se obter o valor de extração máxima de ouro do minério. Este valor foi obtido por meio de ensaios de garrafa rolante, do qual se calcula a curva de extração de ouro para uma distribuição granulométrica definida. As condições iniciais adotadas foram:

- Relação sólido/líquido 1:1 (em massa)
- Concentração de cianeto livre mínimo de 560 ppm
- pH na faixa de 10,5 a 11
- Tempo de lixiviação 72 horas
- Temperatura ambiente
- Velocidade de rotação da garrafa 40 rpm

Em todos os ensaios, para a formação da polpa utilizou-se o minério e água deionizada. Inicialmente adicionou-se ao garrafão a cal e em seguida, após a estabilização da alcalinidade, o cianeto de sódio, de forma a obter uma concentração inicial deste sal de 1000 ppm, que equivale a 560 ppm de cianeto livre. O garrafão foi então colocado a girar sobre os rolos, mantendo assim sua agitação.

Durante os ensaios foram retiradas regularmente alíquotas de solução para acompanhamento da extração de ouro em função do tempo de lixiviação. A partir destas alíquotas foram determinados regularmente o teor de ouro em solução, o pH da solução e a concentração cianeto livre. Caso o pH estivesse fora da faixa estabelecida e a concentração de cianeto livre abaixo do valor determinado, adicionava-se cal ou cianeto de sódio, respectivamente.

Após o ensaio, o material sólido foi lavado em água deionizada e enviado para a análise química.

Nesta fase do trabalho foram realizados dois ensaios de garrafão. No primeiro utilizou-se a amostra "tal qual" e no seguinte a amostra peneirada na malha 100 # *Tyler*. A Tabela 1 abaixo descreve a composição da polpa nos diferentes ensaios.

Tabela 1 – Composição da polpa nos ensaios de garrafão

Ensaio	Composição da polpa
1	Minério "tal qual" + cianeto de sódio + cal
2	Minério -100# + cianeto de sódio + cal

A figura 5 mostra uma foto dos garrafões durante os ensaios.



Figura 5 – Ensaios de garrafão

4.4. Ensaios de aglomeração

Nos ensaios de aglomeração foram definidas as condições sob as quais as partículas finas se aderem umas às outras, formando então agregados. O principal objetivo da aglomeração é obter pelotas adequadas ao processo de lixiviação em pilha e com o menor custo. O aglomerante representa o item de maior custo e suas dosagens são avaliadas através de testes laboratoriais. A maior presença de finos requer maior quantidade de aglomerantes.

Os ensaios de aglomeração foram realizados no Laboratório de Processos Metalúrgicos do Departamento de Metalurgia e de Materiais da Escola Politécnica da USP. O minério e os aglomerantes foram, inicialmente, homogeneizados em misturador laboratorial (modelo *Eirich*), apresentado na Figura 6. Assim, a cal hidratada (marca Morro Branco, tipo CH-II) e o cimento (marca Votoran, tipo CII-E32) foram adicionados ao minério em diferentes composições.



Figura 6 – Misturador laboratorial utilizado na homogeneização da mistura a pelotizar

A pelotização foi realizada em disco pelotizador de 50 cm de diâmetro, rotação de aproximadamente 20 rpm e inclinação do disco em relação ao plano horizontal variável (de 45 a 90°). Este disco é adaptado sobre uma betoneira tipo industrial, conforme pode ser observado na Figura 7.



Figura 7 – Disco de pelotização

Imediatamente após os ensaios de pelotização, as pelotas obtidas, chamadas de pelotas “verdes”, tiveram sua umidade e resistência ao manuseio determinadas.

Pelotas “verdes” foram amostradas aleatoriamente para a determinação de sua umidade por secagem em estufa a 100°C pelo período de 1 dia. O valor da umidade é calculado pela relação entre a massa de água perdida e a massa seca de pelotas. O resultado é dado em porcentagem.

A resistência ao manuseio foi definida como resistência a quedas repetidas da pelota “verde”. Assim, 10 pelotas eram retiradas aleatoriamente do lote e deixadas cair livremente de uma altura de 45 cm sobre uma placa de aço, até o aparecimento de fissuras. A média do número de quedas suportado por pelota é o resultado do ensaio em nº de quedas/pelota. As pelotas que apresentam resistência maior ou igual a 2 quedas/pelota foram consideradas adequadas ao manuseio.

As pelotas remanescentes foram curadas pelo período de 72 horas, e novamente caracterizadas segundo sua resistência à compressão e à submersão.

Para a determinação da resistência à compressão, 5 pelotas foram retiradas aleatoriamente do lote e submetidas ao ensaio de compressão até a ruptura. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Processos Metalúrgicos do Departamento de Metalurgia e de Materiais da Escola Politécnica da USP através da utilização da prensa EMIC, modelo DL-300000, com célula de carga de 10 kg. O resultado foi expresso pela média dos resultados obtidos, em kgf/pelota.

A resistência à submersão em água pelo período de 24 horas foi determinada através da verificação da integridade física das pelotas após o ensaio. Assim, 10 pelotas foram retiradas aleatoriamente do lote e submetidas ao ensaio.

4.4.1. Ensaio preliminares

Para a definição da quantidade adequada de aglomerante a ser adicionado às pelotas, foram testadas várias misturas em disco pelotizador laboratorial. A composição de cada mistura foi dada em massa percentual por componente, na base seca. As misturas ensaiadas estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições experimentais dos ensaios de pelotização

Ensaio	Composição
1	Minério de ouro (99,2%) + Cal hidratada (0,3%)
2	Minério de ouro (99,1%) + Cal hidratada (0,3%) + Cimento (0,1%)
3	Minério de ouro (98,7%) + Cal hidratada (0,3%) + Cimento (0,5%)
4	Minério de ouro (98,2%) + Cal hidratada (0,3%) + Cimento (1,0%)
5	Minério de ouro (96,3%) + Cal hidratada (0,3%) + Cimento (3,0%)
6	Minério de ouro (90,3%) + Cal hidratada (0,3%) + Cimento (10,0%)
7	Minério de ouro (92,5%) + Cal hidratada (0,3%) + Cimento (7,5%)
8	Minério de ouro (94,7%) + Cal hidratada (0,3%) + Cimento (5,0%)

Os ensaios foram realizados com alíquotas de 2 kg de minério. Após a pelotização, as pelotas foram retiradas do disco e submetidas a peneiramento manual nas malhas 1/2" (12,7 mm) e 5/16" (7,8 mm). As pelotas retidas na primeira e as passantes na segunda foram descartadas. As pelotas na faixa granulométrica desejada foram submetidas a ensaios de caracterização.

Através da resistência a compressão das diferentes pelotas, foi possível traçar a curva do comportamento das pelotas segundo a porcentagem de aglomerante adiciono à mistura.

4.4.2. Confeção do lote para lixiviação em coluna

O lote para lixiviação em coluna foi feito com base nos ensaios preliminares utilizando-se 40 kg de minério de ouro. A composição escolhida foi aquela que apresentou características adequadas ao processo de lixiviação em coluna, com a menor quantidade de cimento possível.

Durante os ensaios as pelotas foram classificadas por tamanho com o uso de peneiras. Da mesma forma que nos ensaios preliminares, as pelotas obtidas foram classificadas nas malhas 1/2" e 5/16". As pelotas retidas na malha mais grossa eram desagregadas e retornadas ao disco, e as que passavam na malha mais fina retornavam ao disco. As pelotas que se adequavam à faixa granulométrica desejada foram devidamente curadas e caracterizadas.

4.5. Ensaio de lixiviação em coluna

O ensaio de lixiviação em coluna foi realizado em circuito fechado, com recirculação da solução lixiviante, sendo esta alimentada na parte superior da coluna e descarregada na parte inferior, conforme a Figura 8 abaixo.

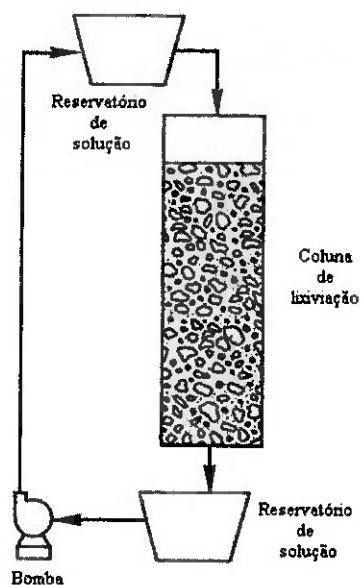


Figura 8 – Circuito fechado de lixiviação em coluna

A seqüência dos trabalhos incluiu a construção da coluna, a execução de ensaios preliminares para verificação de vazamentos e controle das vazões, bem como a operação da coluna em funcionamento.

A coluna de lixiviação montada tem as seguintes características: tubo de PVC com secção circular, diâmetro de 19 cm e altura de 130 cm.

Os parâmetros adotados no ensaio em coluna foram baseados naqueles definidos nos ensaios em garrafão. A coluna foi carregada com um lote de pelotas de 24,7 kg, preenchendo 100 cm da altura disponível. A solução alcalina de alimentação da coluna, com vazão de irrigação constante de 10 l/h/m², apresentava pH entre 10,5 e 11, com concentração de cianeto livre de no mínimo 560 ppm.

A amostragem para análise de ouro em solução e controle da concentração de cianeto livre e pH foi realizada periodicamente, para manter os parâmetros de cianetação. Caso houvesse alguma variação nos valores citados, cianeto de sódio e cal hidratada eram adicionados à solução.

Durante a realização do ensaio em coluna foram avaliadas características do próprio minério e diversos parâmetros operacionais. Os principais parâmetros avaliados foram:

- Permeabilidade da pelota à solução de cianeto;
- Consumo de cal e cianeto de sódio;
- Recuperação e curva de extração;
- Influência do material argiloso na turbidez da solução e percolação da coluna;
- Tempo do ciclo de lixiviação;

Após o término do ensaio, o qual ainda se encontra em andamento, todo o material residual será lavado com água deionizada para a neutralização do cianeto, e o sólido analisado para obtenção do teor residual de ouro.

5. RESULTADOS

5.1. Geologia

A jazida de São Francisco está localizada na região sudoeste do estado de Mato Grosso, onde ocorrem importantes concentrações auríferas associadas a movimentos tectônicos e alteração hidrotermal na Faixa Móvel Aguapeí. A Faixa Móvel Aguapeí forma um cinturão NW de aproximadamente 200 km, onde o ouro ocorre em rochas metassedimentares do Grupo Aguapeí que adentram a Bolívia.

Falhamentos reversos sobrepõem, localmente, as rochas do embasamento sobre as rochas Grupo Aguapeí, delimitando faixa de elevada deformação, onde concentram os depósitos auríferos. Estas faixas ocorrem dentro de uma zona de cisalhamento regional (FERNANDES, 2005).

O depósito de São Francisco, o qual ocorre na formação Fortuna, apresenta mineralizações auríferas que, em grande parte, são controladas por estruturas tracionais associadas às dobras principais. Os veios mineralizados ocorrem em metaconglomerados e metarenitos quartzosos com presença de metapelitos vermelhos localizados e ocasionalmente metaconglomerados oligomíticos. Estruturas primárias sedimentares são comumente observadas.

A zona de alteração hidrotermal que contém a mineralização é relativamente regular, apresentando um corpo tabular. O ouro fino é concentrado em camadas sericíticas paralelas aos estratos dobrados e o ouro grosso ocorre em sistemas de veios de quartzo tabulares subverticais e em veios extensionais, subhorizontais, descontínuos, os quais seccionam as camadas e os veios anteriores.

São reconhecidas duas tipologias de minério no corpo mineralizado (Figura 9):

- Zona superior – região supergênica onde o intemperismo atuou plenamente, e o minério encontra-se oxidado;
- Zona inferior – ocorre em maior profundidade, onde o intemperismo não atuou plenamente, apresentando minério sulfetado.

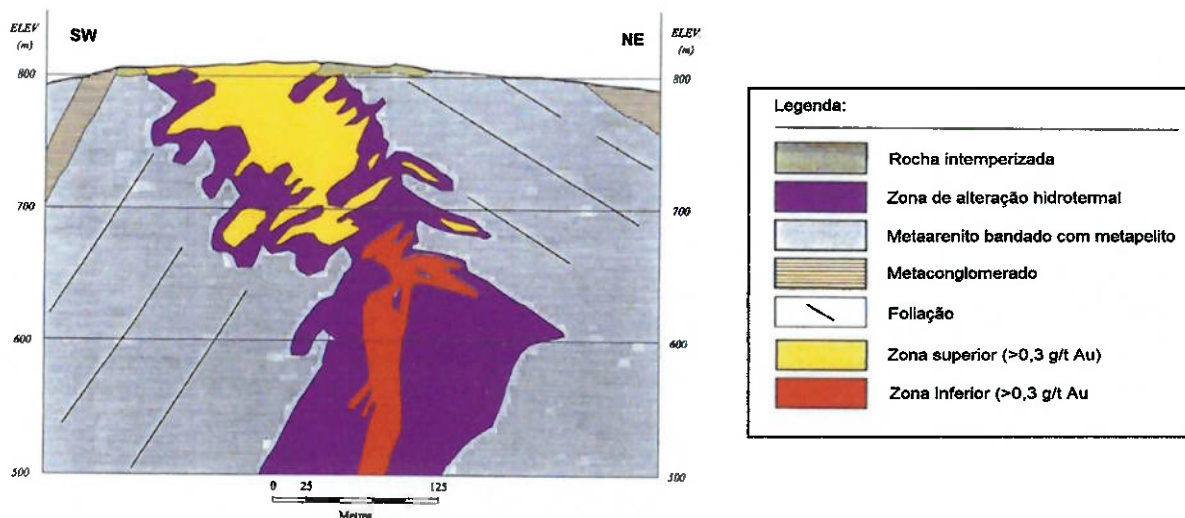


Figura 9 – Corpo mineralizado de São Francisco
(adaptado de SPRING, 2003)

O minério de ouro avaliado neste projeto é proveniente da zona superior do corpo mineralizado.

5.2. Caracterização da amostra

5.2.1. Mineralogia

Inicialmente foram realizados os ensaios de deslamagem e separação em meio denso. Os resultados obtidos seguem na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado da deslamagem e da separação em meio denso

Deslamagem			Meio denso		
Alíquota de 791,39 g			Alíquota de 56,57 g		
	Massa (g)	%		Massa (g)	%
Grossos >10 µm	472,32	59,7	Flutuado	52,95	93,3
Finos <10 µm	319,07	40,3	Afundado	3,81	6,7

No Anexo A estão apresentados os difratogramas, contendo as linhas correspondentes às fases identificadas, sob cores distintas. Os resultados das análises químicas também seguem anexados (Anexo B).

Os minerais identificados em cada amostra seguem listados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 – Minerais identificados

Amostra	ICDD	Nome do composto	Fórmula química	Obs
Finos	01-072-1503	Muscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	
	00-006-0221	Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
	01-083-0539	Quartzo	SiO_2	
	01-075-1752	Rutilo	TiO_2	pp
	01-072-0469	Hematita	Fe_2O_3	pp
Grossos	01-072-1503	Muscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	
	00-006-0221	Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
	01-083-0539	Quartzo	SiO_2	
	01-075-1752	Rutilo	TiO_2	pp
	01-072-0469	Hematita	Fe_2O_3	pp
Flutuado	01-072-1503	Muscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	
	00-006-0221	Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
	01-083-0539	Quartzo	SiO_2	
Afundado	01-072-1503	Muscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	
	00-006-0221	Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
	01-083-0539	Quartzo	SiO_2	pp
	01-075-1752	Rutilo	TiO_2	
	01-072-0469	Hematita	Fe_2O_3	
	01-074-1741	Gorceixita	$Ba_{0,95}Al_3(PO_4)_2(OH)_5(H_2O)$	

pp = possível presença

O ouro e minerais portadores de ouro não aparecem nos resultados por ocorrerem em níveis menores que os limites de detecção dos equipamentos utilizados nas análises.

A partir dos resultados, foi possível verificar a presença metais como alumínio e ferro, ambos solúveis em cianeto e, portanto, podendo elevar o consumo de cianeto quando o minério é submetido à lixiviação. O alumínio apresenta solubilidade relativa em cianeto mais alta que a do próprio ouro competindo assim pelo cianeto presente na solução.

A presença de materiais orgânicos, consumidores de oxigênio dissolvido na solução lixivante, foi determinada pela perda ao fogo, resultando em valores de 2 a 5% (em massa).

5.2.2. Caracterização granulométrica

O resultado obtido no peneiramento a úmido e da análise química por faixa granulométrica seguem na Tabela 5. No Anexo C seguem apresentadas as diferentes curvas de distribuição granulométrica obtidas nos ensaios de peneiramento e de espalhamento de luz *laser*.

Tabela 5 – Resultado do peneiramento a úmido e distribuição do ouro

Abertura	Abertura (mm)	Massa (g)	% retida	% retida acumulada	% passante acumulada	Teor (ppm)	Distribuição (%)
+20#	0,833	896,4	8,87	8,87	91,13	0,11	1,9
-20 + 30#	0,589	663,3	6,57	15,44	84,56	0,11	1,4
-30 + 35#	0,417	461,5	4,57	20,01	79,99	0,14	1,2
-35 + 48#	0,295	516,0	5,11	25,12	74,88	0,15	1,5
-48 + 70#	0,208	506,3	5,01	30,13	69,87	0,31	3,0
-70 + 100#	0,150	567,1	5,61	35,74	64,26	0,25	2,7
-100 + 200#	0,074	1419,4	14,05	49,79	50,21	0,29	7,8
-200 + 270#	0,053	585,3	5,79	55,59	44,41	0,52	5,8
-270 + 400#	0,038	726,5	7,19	62,78	37,22	0,81	11,1
-400 + 635#	0,010	501,8	4,97	67,75	32,25	0,60	5,7
-635#	0,003	1240,6	12,28	80,03	19,97	1,16	27,2
Lama		2017,2	19,97	100,00	0,00	0,81	30,9
Total		10101,2	100,00			0,52	100,0

A partir da tabela 5 verifica-se que grande parte do ouro (58% em massa) se apresenta muito fino, abaixo da malha 400# *Tyler*. O teor da amostra total e da amostra -100# foram calculados, resultando em 0,52 e 0,72 ppm, respectivamente.

5.3. Ensaios metalúrgicos

Os dois ensaios de garrafão realizados apresentaram os resultados descritos na Tabela 6 e os parâmetros controlados durante os ensaios seguem no anexo D. O consumo de reagentes durante os dois ensaios foi o mesmo (2 g de cianeto de sódio e 5 g de cal).

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de garrafão

Dados	Ensaio	
	1	2
V_{polpa} (l)	1,9	2,0
Massa de sólidos (kg)	1,0	1,0
Teor de Au na solução (mg/l)	0,3	0,4
Massa de Au na solução (mg)	0,58	0,80
Teor de Au no rejeito (ppm)	0,05	0,05
Massa de Au no rejeito (mg)	0,05	0,05
Teor back (ppm)	0,65	0,85
Recuperação (%)	92,3	94,1

A Tabela 6 acima mostra que a recuperação de ouro no Ensaio 2 foi a maior, confirmando que as partículas de ouro mais finas são mais facilmente dissolvidas em solução cianetada. Observa-se ainda que os teores calculados resultaram em valores consistentes com os determinados nos ensaios de peneiramento e análise química. A seguir nas Figuras 10 e 11 estão dispostas as curvas de extração de ouro geradas nos ensaios.

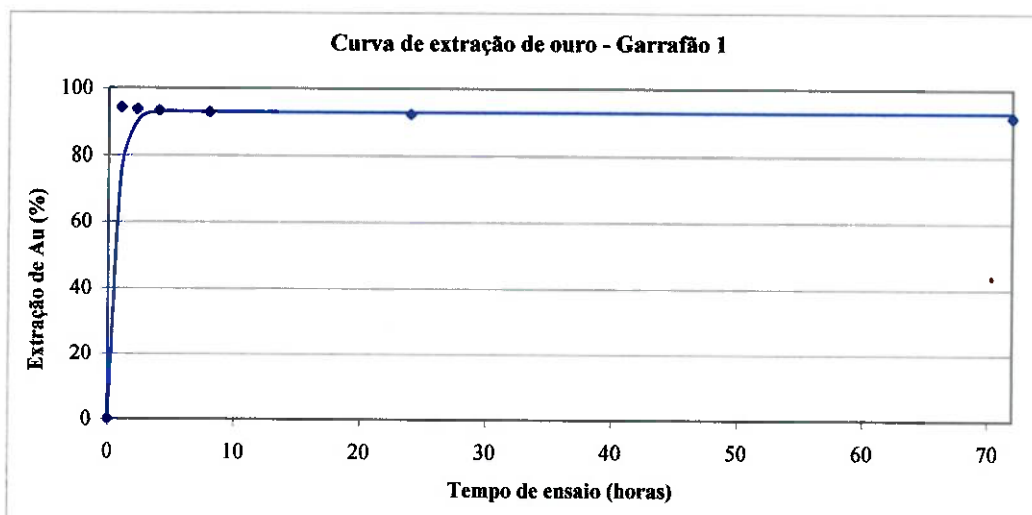


Figura 10 – Curva de extração do ouro no ensaio de garrafão 1

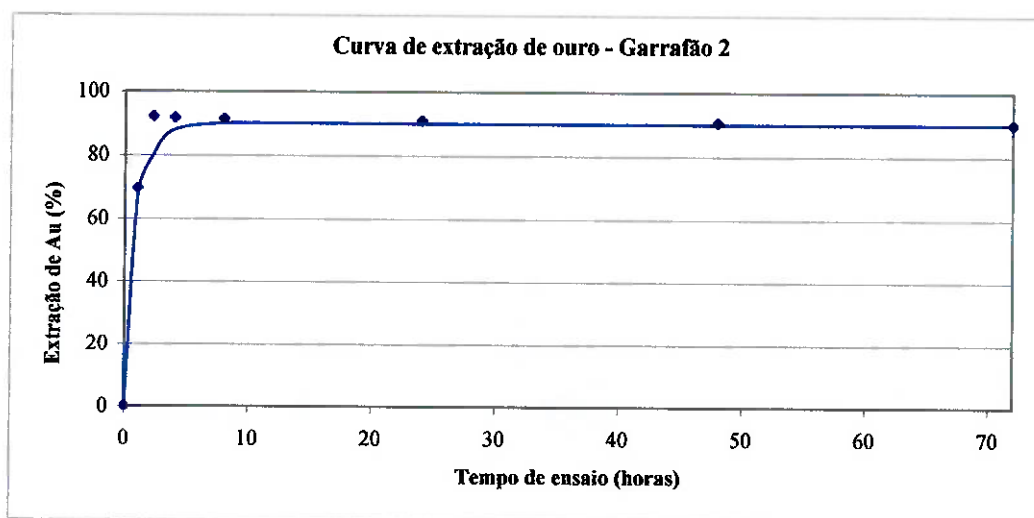


Figura 11 – Curva de extração do ouro no ensaio de garrafão 2

5.4. Ensaios de aglomeração

Foram realizados ensaios de pelletização com composições variadas de cimento, conforme descrito no item 4.4.1.. Os resultados dos ensaios de caracterização realizados sobre as pelotas estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização das pelotas

Ensaio	Quantidade de cimento (%)	Umidade (%)	Resistência		
			ao manuseio (n° quedas/pelota)	à compressão (kgf/pelota)	à submersão
1	-	14,3	1,2	0,208	Não
2	0,1	12,5	1,4	0,237	Não
3	0,5	14,7	1,6	0,253	Não
4	1,0	15,6	1,8	0,374	Sim
5	3,0	12,6	2,0	1,578	Sim
6	10,0	14,4	2,5	7,728	Sim
7	7,5	13,3	2,4	5,826	Sim
8	5,0	18,7	2,3	3,538	Sim

Na Figura 12 observa-se o gráfico da variação da resistência à compressão das pelotas em função da porcentagem de cimento utilizada.

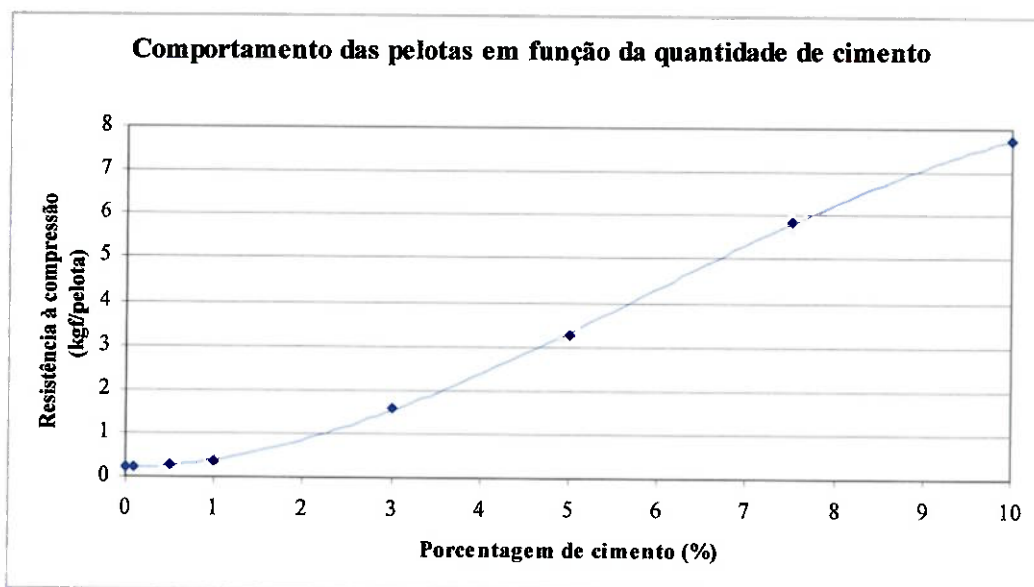


Figura 12 – Gráfico da resistência à compressão x porcentagem de cimento

A partir dos parâmetros obtidos, definiu-se que a quantidade de cimento a ser utilizada para a manufatura do lote de pelotas a ser lixiviado foi de 5%, conforme o Ensaio 8. As pelotas obtidas apresentaram as seguintes características:

- Umidade: 11,3 %;
- Resistência ao manuseio: 2,2 quedas/pelota;
- Resistência à compressão: 2,957 kgf/pelota;
- Resistência à submersão: sim.

5.5. Ensaio de lixiviação em coluna

Os parâmetros controlados durante o ensaio em coluna apresentam-se no anexo D. Na Figura 13 observa-se uma foto da coluna durante o ensaio.

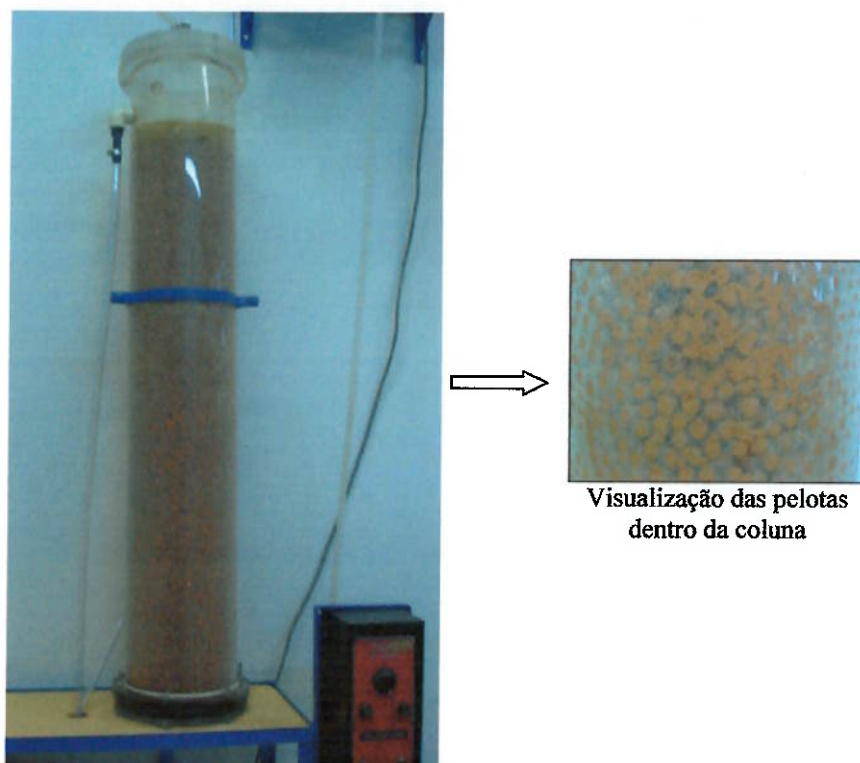


Figura 13 – Ensaio de lixiviação em coluna em andamento

Devido ao fato deste ensaio requerer um longo período de execução, este ainda se encontra em andamento. Os dados preliminares do ensaio de lixiviação em coluna seguem na tabela 8 abaixo.

Tabela 8 – Dados preliminares do ensaio de lixiviação em coluna

Tempo de ensaio	812	horas
Volume de solução	40	litros
Volume amostrado acumulado	0,75	litros
Cal adicionada	5	g
Cianeto adicionado	54	g
Massa de pelotas	24,7	kg
Massa de minério	23,4	kg
Consumo de cal	0,2	g /kg de minério
Consumo de cianeto	2,3	g /kg de minério

Sobre os parâmetros operacionais que foram avaliados até o momento pode-se afirmar:

- As pelotas apresentaram permeabilidade à solução cianetada, fornecendo uma percolação uniforme e permitindo o contato entre as partículas de ouro e os reagentes em solução. Novos ensaios em coluna devem ser realizados com pelotas com composições variadas, verificando-se a influência dos aglomerantes na permeabilidade das pelotas;

- O consumo total de cal e de cianeto de sódio, a recuperação máxima de ouro e o tempo de ciclo serão determinados ao final do ensaio;
- O material fino presente nas pelotas não influenciou na turbidez da solução, já que esta se manteve translúcida até o momento.

Como o teor do resíduo sólido não foi analisado, o teor *back* não foi calculado. Assim, uma curva preliminar de extração do ouro contido nas pelotas foi traçada com base no teor da amostra -100# (0,72 ppm). Esta curva segue na Figura 14.

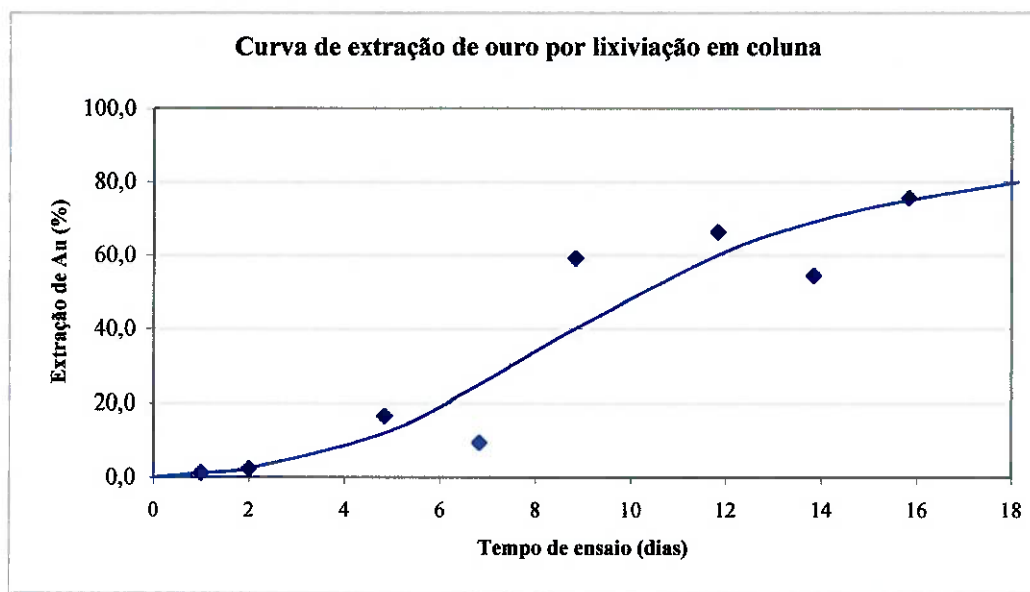


Figura 14 – Curva de extração do ouro no ensaio de lixiviação em coluna

Com base nos resultados preliminares, listados no anexo E, verifica-se quantidade significativa de ouro em solução, o que indica a viabilidade técnica de extração do ouro do minério selecionado. A curva de extração de ouro apresenta uma tendência crescente e a extensão total da extração será determinada ao final do ensaio, quando a extração de ouro estabilizar.

6. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios selecionados indicaram a viabilidade técnica de extração do ouro contido no minério selecionado, mediante a rota de lixiviação com cianeto. Em particular, os resultados preliminares do ensaio de lixiviação em garrafa rolante e em coluna indicam índices crescentes de extração de ouro, que justificam ensaio de otimização visando estabelecer um conjunto de condições adequadas à lixiviação em pilha em escala industrial.

A etapa de aglomeração deverá assim ser consolidada sob aspectos de consumo de aglomerante que tem efeitos importantes na resistência das pelotas, bem como em aspectos econômicos do processo.

7. REFERÊNCIAS

- BARTLETT, R. W. **Solution mining: leaching and fluid recovery of materials**. Philadelphia: Gordon and Breach Science Publishers, c1992. 276 p.
- BERALDO, J. L. **Beneficiamento de minério de ouro: tecnologia na mineração do Brasil**. São Paulo: Paulo Abib Engenharia, 1990.
- CHAMBERLIN, P. D. Process selection for gold/copper ores. In: RANDOL GOLD FORUM '96, Squaw Creek, 1996. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 303-306.
- CHAMBERLIN, P. D. Status of heap, dump and in situ leaching of gold and silver. In: GOLD FORUM ON TECHNOLOGY AND PRACTICES, 1., Reno, Nev., 1989. **WORLD GOLD'89: proceedings**. Littleton: Society for mining, metallurgy and exploration, 1989. p. 225-232.
- DOREY, R. VAN ZYL, D.; KIEL, J. Overview of heap leaching technology. In: **Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects**. Littleton: Society of Mining Engineers, 1988. p. 3-22.
- DORR, J. N. **Cyanidation and concentration of gold and silver ores**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1936. 485 p.
- ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 15. , São Lourenço: 1992. **Extração de ouro: fundamentos, prática e meio ambiente**. Belo Horizonte: ABTM, 1992. 428 p.
- FERNANDES, J. F.; RUIZ, A. S.; PINHO, F. E. C.; KUYUMJIAN, R. M. Compartimentação tectônica da deformação na faixa móvel Aguapei, sudoeste do cráton amazônico, e as mineralizações auríferas associadas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, p. 1-12, março de 2005. Disponível em: <www.sbgeo.org.br>. Acesso em: 21 nov. 2005.
- GOMES, A. M. D. **Avaliação técnica dos processos de cianetação e adsorção da mina de Fazenda Brasileira – CVRD**, 1997. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.
- GRANATO, M. **Metalurgia extrativa do ouro**. Brasília: CETEM, 1986. 79 p. Série tecnologia mineral, v. 37.
- LIMA, L. C. G. **Apostila sobre tratamento de minérios de ouro**. Carajás: Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) – Gerência de Tratamento de Minérios, 2000.
- MADEIRA, R. G. **O estado da arte da cianetação de minérios auríferos**, 1997. 108 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.
- MARSDEN, J. O.; HOUSE, I. **The chemistry of gold extraction**. London: Ellis Hordwood, 1993.

McCLELLAND, G. E. Testing of ore. In: **Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects**. Littleton: Society of Mining Engineers, 1988. p. 61-67.

McCLELLAND, G. E.; VAN ZYL, D. Ore preparation: crushing and agglomeration. In: **Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects**. Littleton: Society of Mining Engineers, 1988. p. 68-91.

NARDI, R. P. **Análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados**, 2000. 221 p. Dissertação (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

PEREIRA, G. S. P. **Lixiviação em pilhas de minério oxidado de cobre**, 2000. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

REIS, R. L. G. Preços estimulam novas expansões. **Brasil Mineral**, São Paulo, nº 237, p. 14-26, abril de 2005.

SOUZA, V. P. **Recuperação do ouro por amalgamação e cianetação: problemas ambientais e possíveis alternativas**. Rio de Janeiro: CETEM, 1989. 27 p. Série Tecnologia Mineral, v. 44.

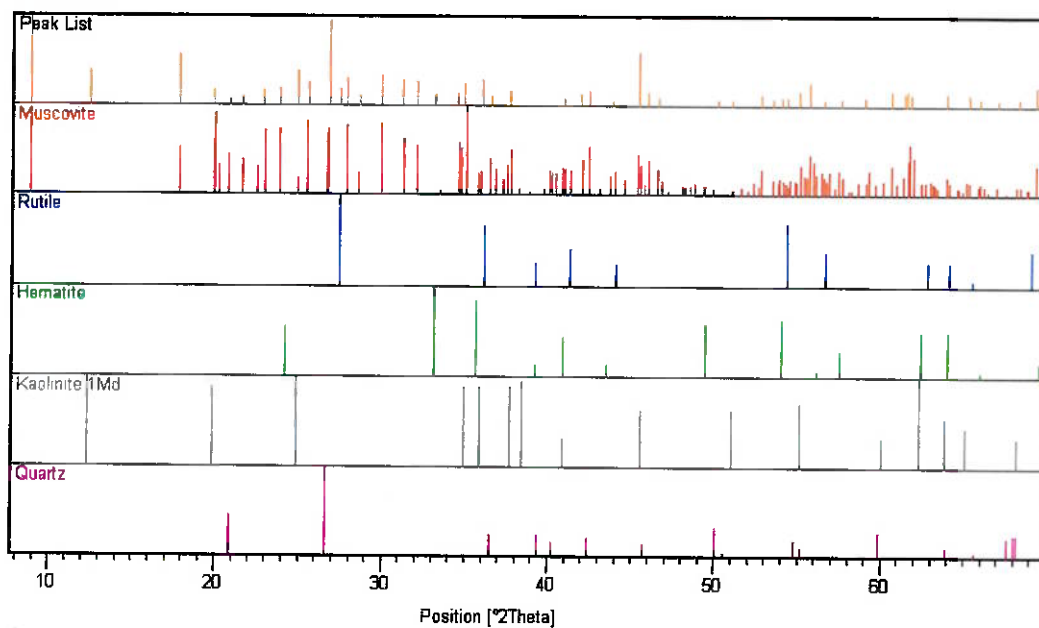
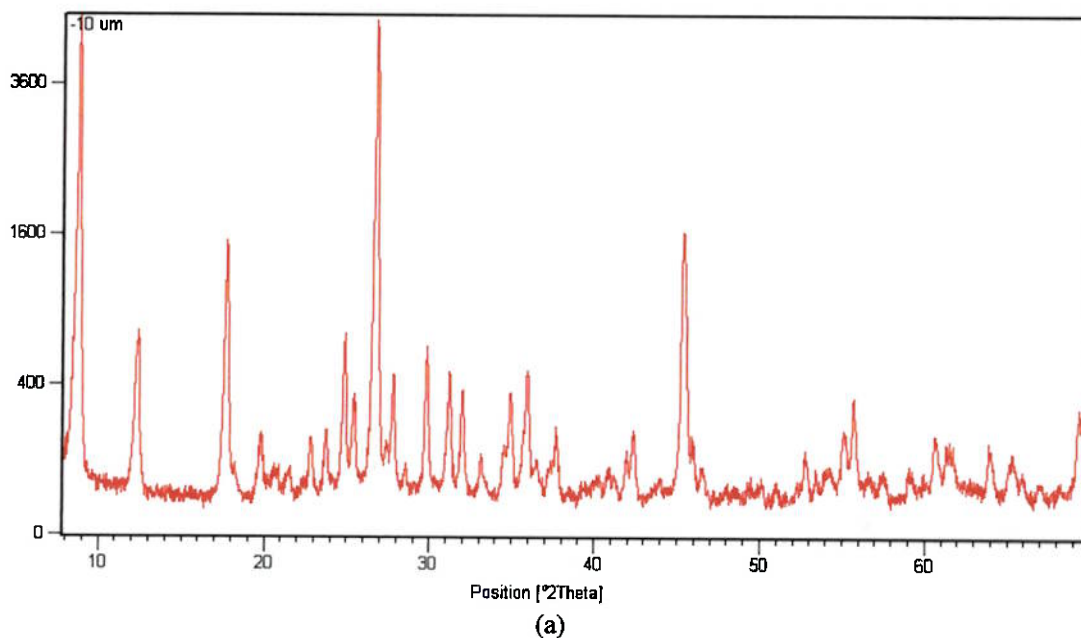
SPRING, V.; MacFARLENE, G. R.; SULLIVAN, J. R.; KOCIUMBAS, M. W. **A preliminary feasibility study of the Santa Elina Gold Project composed of the São Francisco, São Vicente and Fazenda Nova/Lavrinha properties in Brazil for Santa Elina Mines Corporation**. Toronto: Watts, Griffis and McOuat Consulting Geologists and Engineers, 2003.

TORRES, V. M. **Diagnóstico de lixiviação para minérios de ouro**, 1996. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

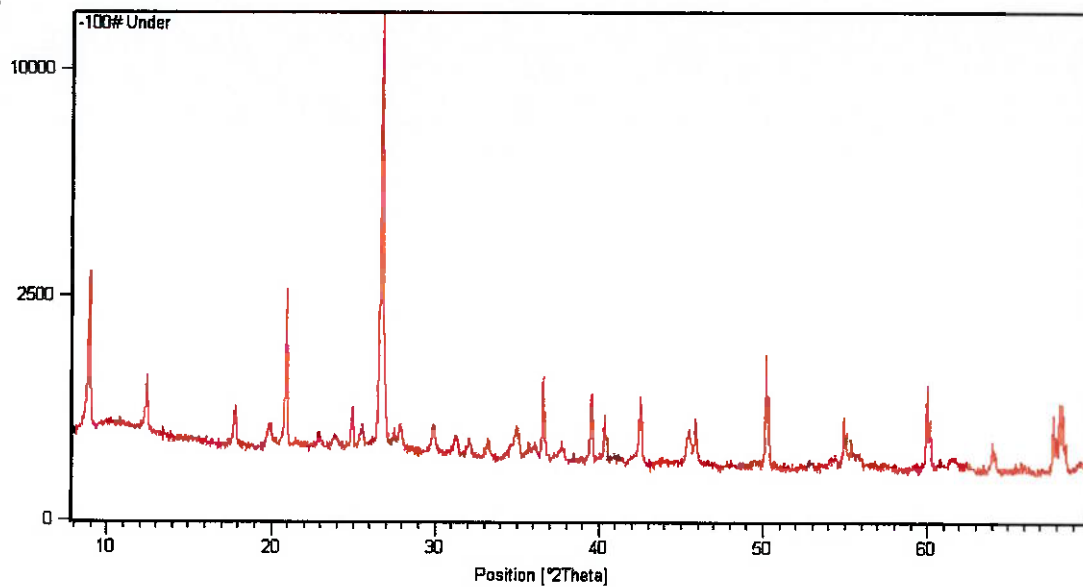
TRINDADE, R. B. E; BARBOSA FILHO, O. **Extração de ouro - princípios, tecnologia e meio Ambiente**. CETEM. Disponível em: <www.cetem.gov.br/livros.html>. Acesso em: 25 out. 2005.

ANEXO A – Difratomogramas de raios X e fases identificadas

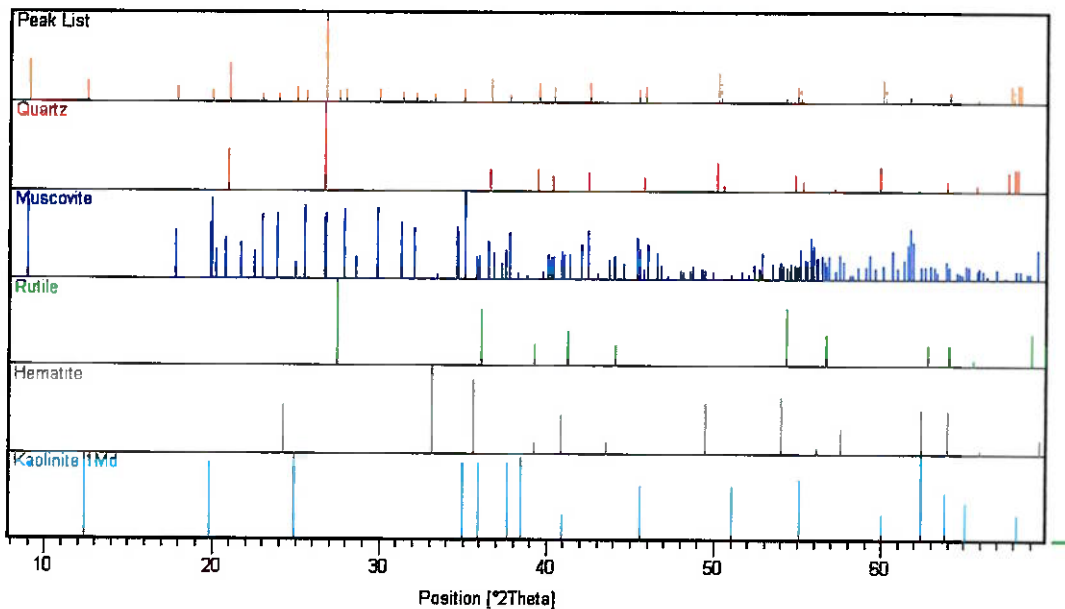
A seguir, nas Figuras 15, 16, 17 e 18, estão apresentadas os difratogramas e fases minerais identificadas nas análises das diferentes amostras.



(b)
Figura 15 – Difrátograma (a) e fases minerais identificadas (b) dos Finos (<math>< 10 \mu\text{m}</math>)

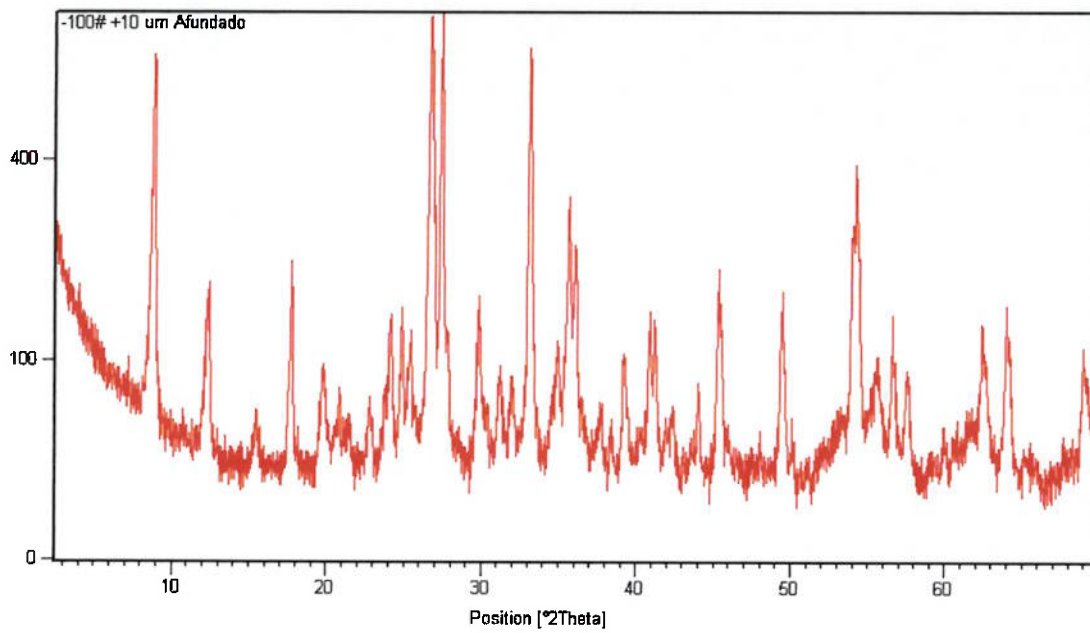


(a)

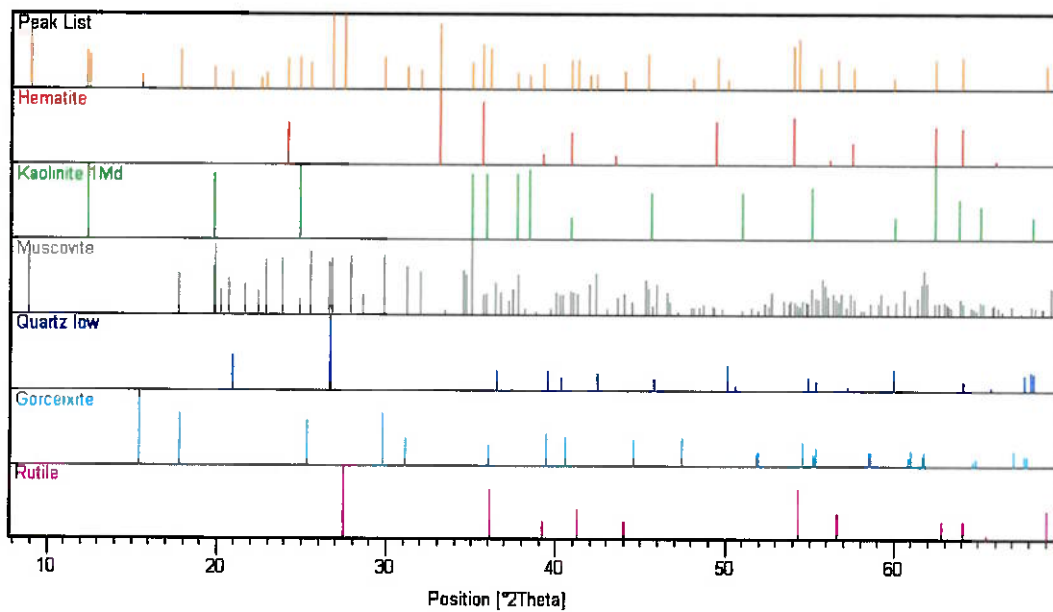


(b)

Figura 16 – Difratoograma (a) e fases minerais identificadas (b) dos Grossos (>10 μm)

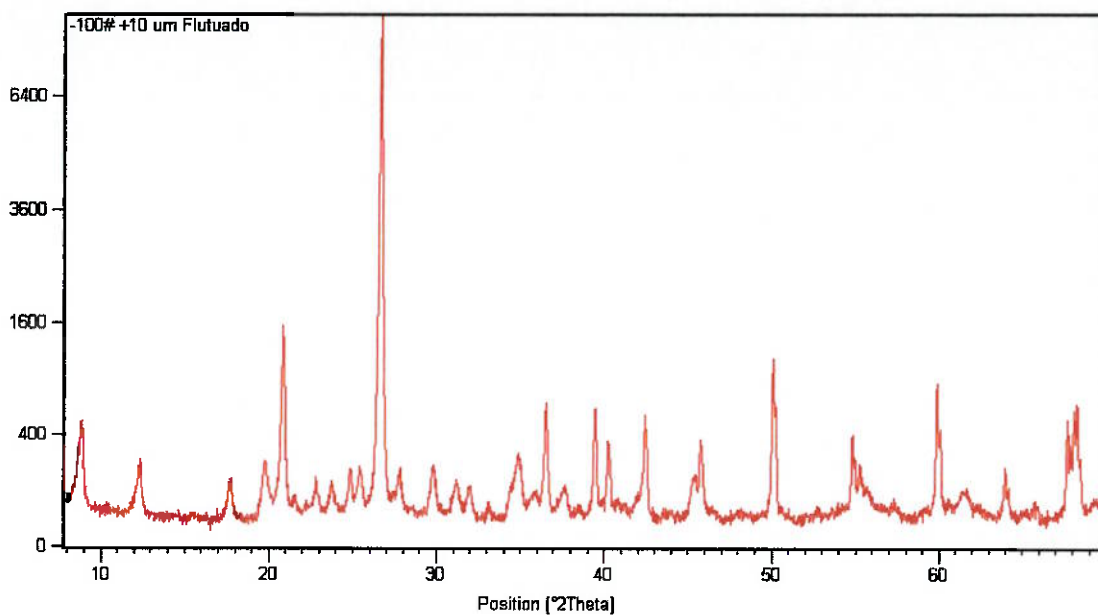


(a)

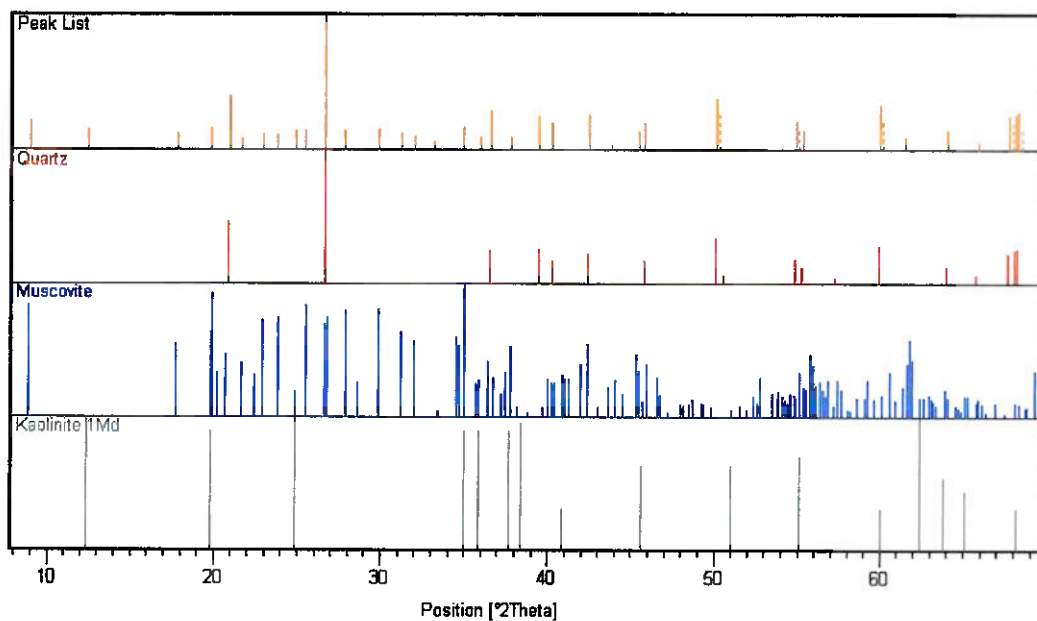


(b)

Figura 17 – Difratoograma (a) e fases minerais identificadas (b) do Afundado



(a)



(b)

Figura 18 – Difratoograma (a) e fases minerais identificadas (b) do Flutuado

ANEXO B – Resultados da fluorescência de raios X

Nas Tabelas 9 e 10 seguem os resultados obtidos nas análises por fluorescência de raios X.

Tabela 9 – Resultado da análise semiquantitativa em % de óxidos, normalizados a 100%

Óxido	Porcentagem por amostra	
	Finos	Grossos
Na ₂ O	0,12	0,06
MgO	0,55	0,28
Al ₂ O ₃	30,6	15,0
SiO ₂	45,8	68,9
P ₂ O ₅	0,08	0,19
SO ₃	0,05	0,09
K ₂ O	8,51	3,67
CaO	0,09	0,06
TiO ₂	1,23	1,86
MnO	0,05	0,03
Fe ₂ O ₃	7,02	5,16
NiO	0,01	0,01
ZnO	0,03	0,01
Ga ₂ O ₃	0,01	
As ₂ O ₃	0,04	0,05
Rb ₂ O	0,04	0,01
SrO	0,02	0,03
Y ₂ O ₃	0,01	0,01
ZrO ₂	0,03	0,16
SnO ₂		0,07
BaO	0,22	0,09
PbO		0,01
PF*	5,61	4,25

*Perda ao Fogo

Observação: campos em branco são elementos não detectados

Tabela 10 – Resultado da análise quantitativa em % de óxidos, normalizados a 100%

Óxido	Porcentagem por amostra*			
	Finos	Grossos	Flutuado	Afundado
SiO ₂	45,00	73,6	22,6	80,7
Al ₂ O ₃	32,2	12,2	14,8	12,3
Fe ₂ O ₃	6,18	4,14	27,6	2,05
MnO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
MgO	0,77	0,33	0,44	0,34
CaO	0,10	0,10	0,34	<0,10
Na ₂ O	0,16	<0,10	0,12	<0,10
K ₂ O	9,29	3,29	3,63	3,3
TiO ₂	1,22	1,81	21,8	0,44
P ₂ O ₅	0,10	0,14	0,95	<0,10
PF*	5,61	4,25	5,34	2,96

*Perda ao Fogo

Observação: análise dos 10 principais óxidos presentes nas amostras

ANEXO C – Curvas de distribuição granulométrica

As curvas granulométricas obtidas nos ensaios de peneiramento e espalhamento de luz *laser* estão apresentadas nas Figura 19, 20 e 21.

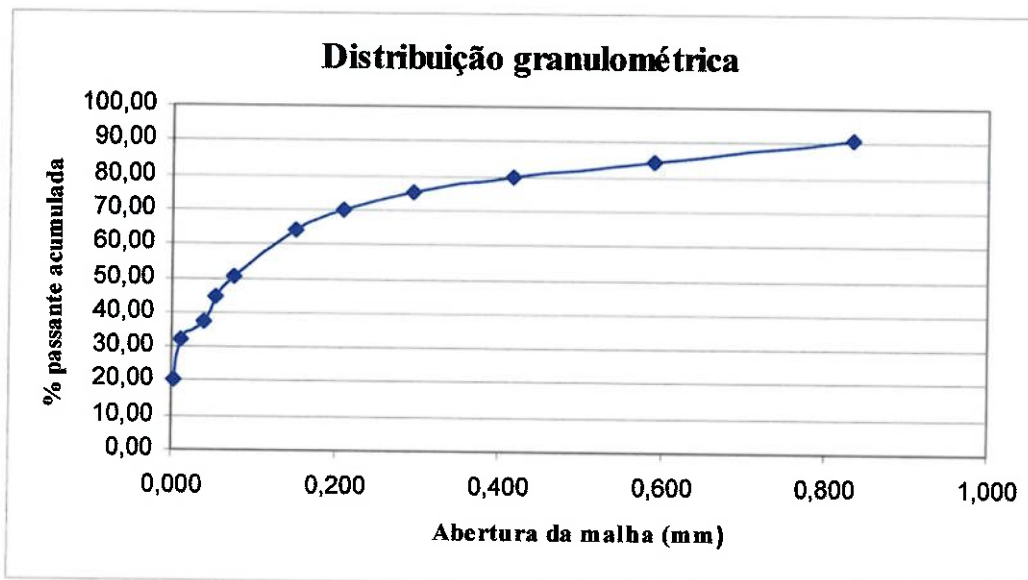


Figura 19 – Curva de distribuição granulométrica por peneiramento

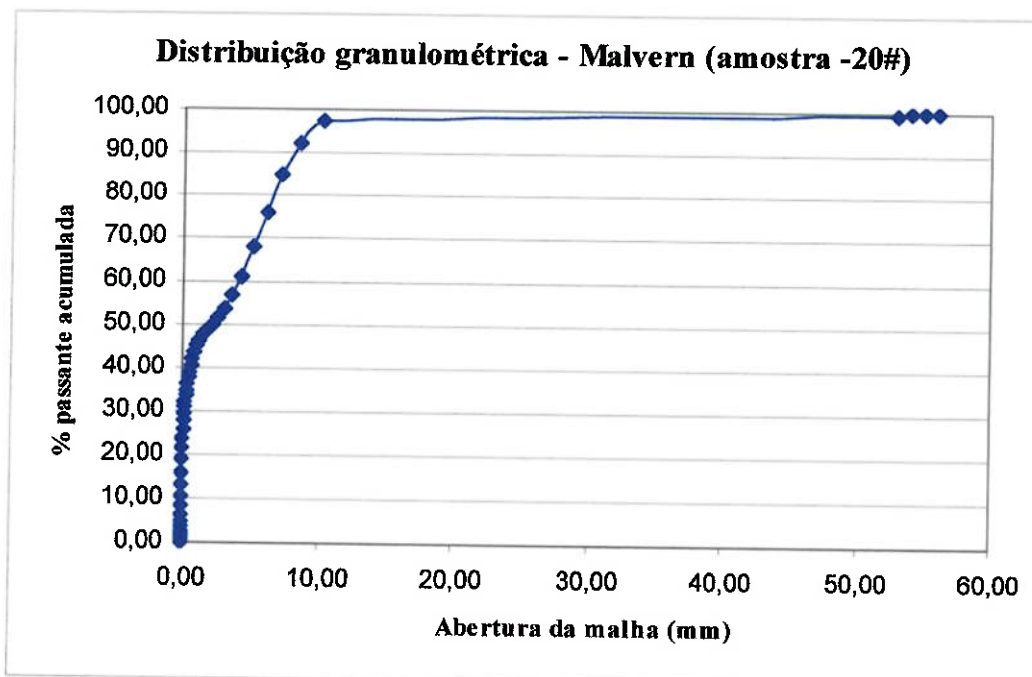


Figura 20 – Curva de distribuição granulométrica por luz *laser* da amostra -20# Tyler

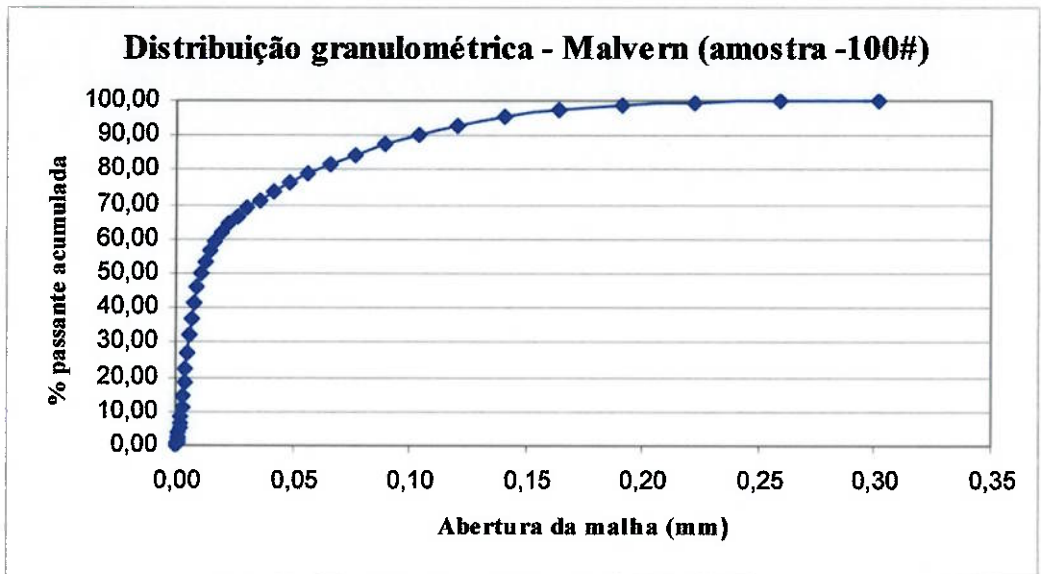


Figura 21 – Curva de distribuição granulométrica por luz *laser* da amostra -100# Tyler

ANEXO D – Parâmetros controlados nos ensaios de garrafão

Os parâmetros controlados ao longo dos ensaios de garrafão estão dispostos nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Parâmetros controlados no Ensaio 1

Tempo (h)	ppm CN ⁻	pH	Teor (mg/l)	m _{Au} (mg)	Ext. de Au (%)
1	147	11	0,3	0,59	94,2
2,25	703	11	0,3	0,59	93,8
4	624	11	0,3	0,59	93,4
8	581	11	0,3	0,58	92,9
24	572	11	0,3	0,58	92,5
48	564	11	0,4	0,77	-
72	494	10	0,3	0,57	91,7

Tabela 11 – Parâmetros controlados no Ensaio 2

Tempo (h)	ppm CN ⁻	pH	Teor (mg/l)	m _{Au} (mg)	Ext. de Au (%)
1	182	11	0,3	0,59	69,5
2,25	616	11	0,4	0,78	92,3
4	590	11	0,4	0,78	91,8
8	598	11	0,4	0,78	91,4
24	598	11	0,4	0,77	91,0
48	516	11	0,4	0,77	90,6
72	507	10	0,4	0,77	90,2

ANEXO E – Parâmetros controlados no ensaio de lixiviação em coluna

Os parâmetros controlados no ensaio de garrafão estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros controlados no ensaio de lixiviação em coluna

Amostragem	Tempo (horas)	pH	CN- (ppm)	Teor (mg/l)	Volume (ml)	Extração de Au (mg)	Extração de Au (%)
20/10/2005 16:00	24	12,0	598	<0,01	39950	0,200	1,19
21/10/2005 16:00	48	11,5	463	<0,01	39900	0,399	2,37
24/10/2005 12:00	116	11,5	390	0,07	39850	2,790	16,59
26/10/2005 12:00	164	11,5	372	0,04	39800	1,592	9,49
28/10/2005 12:00	212	11,5	364	0,25	39750	9,938	59,12
31/10/2005 12:00	284	11,5	356	0,28	39700	11,116	66,20
2/11/2005 12:00	332	11,5	461	0,23	39650	9,120	54,41
4/11/2005 12:00	380	11,5	437	0,32	39600	12,672	75,60
7/11/2005 12:00	452	11,0	442		39550	-	-
9/11/2005 12:00	500	11,0	419		39500	-	-
11/11/2005 12:00	548	11,0	481		39450	-	-
16/11/2005 12:00	668	11,0	458		39400	-	-
18/11/2005 12:00	716	10,5	455		39350	-	-
21/11/2005 12:00	788	10,5	442		39300	-	-

Observação: campos em branco aguardam resultado da análise do teor de ouro em solução.