

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

MARIA FERNANDA SIQUEIRA

AVALIAÇÃO DAS ROTAS EXTRATIVAS PARA MINÉRIO DE OURO

Belo Horizonte

2022

MARIA FERNANDA SIQUEIRA

Avaliação das Rotas Extrativas para Minério de Ouro

Monografia apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) como requisito para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientadora: Professora Dra. Sônia Denise
Ferreira Rocha

Belo Horizonte

2022



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DA ALUNA MARIA FERNANDA SIQUEIRA

Realizou-se, no dia 17 de fevereiro de 2022, às 08:00 horas, on line, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Avaliação das Rotas Extrativas para Minérios de Ouro*, apresentada por MARIA FERNANDA SIQUEIRA, número de registro 2020720617, graduada no curso de ENGENHARIA QUÍMICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Profa. Dra. Sonia Denise Ferreira Rocha - Orientador (UFMG), Prof(a). Andreia Bicalho Henriques (DEMIN/UFMG), Prof(a). Andre Luiz Alvarenga Santos (DEMIN/UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 17 de fevereiro de 2022.

Prof(a). Profa. Dra. Sonia Denise Ferreira Rocha (Doutora)

Prof(a). Andreia Bicalho Henriques (Doutora)

Prof . Andre Luiz Alvarenga Santos (Mestre)

Risia Magriotis Papini
Orientadora do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Mineirais

Aúrea Domingos
Secretaria do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Mineirais

*Aos meus pais, Lana e Edilson, por nunca terem medido esforços para que eu chegasse
até aqui.*

Ao meu esposo Douglas por estar ao meu lado durante essa jornada.

Aos Meus irmãos Ana Clara e Lúcio César, por existirem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial, a minha orientadora, Sônia Denise Ferreira Rocha, pelo apoio, dedicação e ensinamentos passados ao longo deste tempo, dando a possibilidade de desenvolvermos da melhor maneira possível nosso trabalho.

Agradeço também a empresa AngloGold Ashanti, por fornecer material para o desenvolvimento dos testes e por permitir a utilização do Laboratório de Processo da Planta de Queiroz para realização do trabalho, permitindo assim a realização e alcance dos objetivos propostos.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a definição rota de extração de ouro mais adequada para o minério tratado na Planta de Queiroz da AngloGold Ashanti em Nova Lima – MG, envolvendo lixiviação com cianeto de sódio e adsorção com carvão ativado, avaliando-se em questão os seguintes processos: CIP (*Carbon-in-pulp*), CIL (*Carbon-in-leach*) e CIL (*Carbon-in-leach*) Híbrido. Foi avaliada a influência das concentrações de de NaCN, da granulometria do minério e da concentração de sólidos na eficiência de extração do ouro. Foram realizados testes com as três distintas configurações de processo de lixiviação/adsorção, utilizando carvão ativado (CIL, CIP e CIL Híbrido). Baseado nos resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização do circuito CIP com 32 horas (extração de 95,58% de Ouro) e o CIL Híbrido com 32 horas de contato (extração de 95,53% de Ouro) seriam adequados para o tratamento hidrometalúrgico do calcinado da planta do Queiroz.

Palavras-chave: Ouro; Lixiviação; CIL; CIP; CIL híbrido; Rotas de Processo.

ABSTRACT

The objective of this work was to define the best gold extraction route for the ore treated at the AngloGold Ashanti Queiroz Plant in Nova Lima - MG, involving leaching with sodium cyanide and adsorption with activated carbon, evaluating in questions such as follows: CIP, CIL and CIL Hybrid. In this way, the influence of the NaCN and the solids concentrations and particle size in the leaching process were evaluated. Tests were carried out using three distinct configurations of leaching/adsorption routes with activated carbon in CIL (carbon in leaching), CIP (carbon in pulp) and CIL Hybrid. Based on the results of it was observed 95,58% of gold extraction by the CIP circuit within 32 hours while in the Hybrid CIL circuit in 32 hours, 95,53% of gold extraction was obtained, which indicate that both configurations are efficient for gold extraction at the hydrometallurgical unit of Queiroz.

Keywords: Gold; Leaching; CIL; CIP; CIL hybrid; Process routes.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros para os testes de Concentração inicial de NaCN.....	23
Quadro 2 – Condições dos ensaios para avaliação da concentração de sólidos.....	24
Quadro 3 – Condições experimentais nos ensaios para avaliação do efeito da granulometria.....	24
Quadro 4 – Parâmetros operacionais para os testes CIP.....	25
Quadro 5 – Condições experimentais para os testes CIL.....	25
Quadro 6 – Parâmetros para os Testes de CIL Híbrido.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeito da concentração de NaCN para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$, tempo de <i>Pre-lime</i> = 2h, teor de Au na alimentação de 41,64g/t, a 25°C.....	28
Tabela 2 – Efeito da concentração de sólidos na lixiviação para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$, tempo de <i>Pre-lime</i> = 2h, teor de Au na alimentação de 41,64g/t, a 25°C.....	31
Tabela 3 – Efeito da granulometria na % de extração de Au (<i>Pre-lime</i> de 2 horas e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)	33
Tabela 4 - Resultados do Teste CIP para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$ (<i>Pre-lime</i> de 2 horas e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C).....	34
Tabela 5 - Resultados dos Testes CIL para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$ (<i>Pre-lime</i> de 2 horas, 25 g/t de carvão na polpa e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C).....	37
Tabela 6 - Resultados do Teste de CIL Híbrido para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$ (<i>Pre-lime</i> de 2 horas, 25 g/t de carvão na polpa e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C).....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do circuito CIP.....	18
Figura 2 – Desenho esquemático do circuito CIL.....	19
Figura 3 – Desenho esquemático do circuito CIL Híbrido.....	20
Figura 4 – Efeito da concentração de NaCN na extração de ouro.....	29
Figura 5 – Relação entre a concentração de NaCN e o consumo de NaCN.....	29
Figura 6 – Efeito da concentração de sólidos na recuperação de Au.....	30
Figura 7 – Relação entre recuperação de ouro e consumo de NaCN.....	32
Figura 8 – Efeito da granulometria na % de extração (<i>pre-lime</i> de 2 horas e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)	34
Figura 9 – Efeito do tempo na extração de Au no Teste CIP.....	35
Figura 10 – Extrações de Au nos Testes de CIL 32 Horas.....	36
Figura 11 – Extração de Au nos Testes CIL	38
Figura 12 – Extração de Au no teste de CIL Híbrido para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$ (<i>Pre-lime</i> de 2 horas e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)	39
Figura 13 – Extrações finais para as diferentes configurações em suas condições definidas para os testes com carvão.....	40

SUMÁRIO

<i>1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO</i>	12
<i>2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA</i>	13
2.1 Objetivos Específicos.....	13
<i>3. DESENVOLVIMENTO</i>	14
3.1 Estado da arte da produção de ouro	14
3.2 Ouro	14
3.3 Adequação granulométrica dos minérios de ouro	14
3.4 Etapas de Concentração	15
3.5 Oxidação de Minérios Refratários	16
3.6 Lixiviação de Ouro	16
3.7 Purificação do licor por adsorção	17
3.8 Eluição, Eletrólise e Fundição	20
<i>4. Metodologia</i>	21
4.1 Amostras.....	23
4.2 Testes de Lixiviação	23
4.3 Influência da Concentração de NaCN.....	23
4.4 Influência da concentração de sólidos	23
4.5 Influência da granulometria	24
4.6 Testes de lixiviação com carvão.....	24
4.7 CIP (Carbon-in-Pulp).....	25
4.8 CIL (Carbon-in-Leach)	25
4.9 CIL (<i>Carbon-in-Leach</i>) Híbrido.....	26
<i>5. Resultados e Discussão</i>	26
5.1 Avaliação da concentração de NaCN	27
5.2 Efeito da concentração de sólidos	30
5.3 Efeito da granulometria das partículas	32
5.4 Testes CIP (Carbon-in-Pulp)	34

5.5 Testes CIL (Carbon-in-Leach)	35
5.6 Testes CIL Híbrido (<i>Carbon-In-Leach</i>)	38
5.7 Comparação entre as configurações CIP, CIL e CIL híbrido	39
6. <i>CONCLUSÕES</i>	41
7. <i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	42
8. <i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	43

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

O valor de mercado do ouro é formidavelmente superior ao da grande maioria dos metais. As rotas de beneficiamento dos minérios de ouro se resumem à adequação granulométrica do minério, às etapas hidrometalúrgicas posteriores ou incluir, além da preparação, estágios de concentração. A preparação do minério abrange etapas de britagem, peneiramento, moagem e classificação. A etapa subsequente de concentração pode ser influenciada pelas propriedades dos minérios explorados, como a diferença de densidade e de hidrofobicidade (natural ou induzida) entre o ouro e os minerais aos quais ele está associado diretamente, bem como os minerais de ganga. A concentração pode envolver etapas como flotação e concentração gravimétrica (CIMINELLI; GOMES, 2002).

Quando o ouro se encontra associado à sulfetos, após a etapa de concentração os minerais sulfetados necessitam ser oxidados para garantir a exposição das partículas de ouro para facilitar a sua extração. Os processos mais utilizados ultimamente para este fim são a ustulação e a oxidação sob pressão (POX). A forma mais comum de extração de ouro que não está liberado é a lixiviação, processo de transferência de compostos presentes em uma matriz sólida para uma fase líquida pela ação de um agente químico, denominado agente lixiviante, no caso do ouro o cianeto de sódio (MOURA, W., 2005).

A concentração de ouro na solução de extração (licor) pode variar dentro de uma faixa extensa, fato que influencia muito no seu processo de recuperação. Para a purificação e obtenção do metal, utiliza-se na indústria primeiramente a adsorção do ouro em carvão ativado e a precipitação do ouro com pó de zinco (soluções de polpas lixiviadas e espessadas) (cementação) (FREITAS; COSTA, 2002).

O processo de precipitação ou cementação do ouro com zinco, conhecido como processo Merrill-Crowe compreende etapas de clarificação da polpa proveniente da cianetação, desaeração do licor, precipitação e filtração. O processo de cementação com zinco apresenta duas grandes desvantagens: o licor rico deve ser clarificado e o processo não é eficiente para o tratamento de soluções muito diluídas em ouro. Ambas essas dificuldades são contornadas por meio do processo de adsorção em carvão ativado (FREITAS; COSTA, 2002).

A adsorção em carvão ativado é empregada industrialmente para recuperação de ouro a partir de soluções ou polpas cianetadas, podendo ser em diferentes configurações: (i) Carvão em polpa (CIP); (ii) Carvão em lixiviação (CIL) e (iii) Carvão em coluna (CIC) (MOURA, W., 2005). A escolha da melhor rota de processamento depende das características mineralógicas do minério.

Cada alternativa de rota deve ser avaliada experimentalmente através de ensaios para se obter parâmetros para avaliação da viabilidade de cada rota de processo. As variáveis operacionais devem ser estudadas e buscadas as melhores condições de trabalho, visando-se a maior recuperação de ouro possível. A influência de parâmetros como a concentração de cianeto, a concentração de sólidos, a granulometria do material e também a configuração da etapa adsorção são de suma importância para a escolha da melhor rota de processo, definição do projeto conceitual que será utilizado projeto de engenharia da Planta Hidrometalúrgica de Ouro.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O presente trabalho tem como objetivo a proposição da melhor rota de extração de ouro envolvendo etapas de lixiviação com cianeto de sódio e adsorção com carvão ativado, avaliando-se em questão as seguintes configurações: CIP, CIL e CIL Híbrido.

2.1 Objetivos Específicos

- ✓ Estudar a influência da concentração de NaCN na etapa de lixiviação;
- ✓ Avaliar a influência da concentração de sólidos;
- ✓ Propor a granulometria do minério ideal de trabalho;
- ✓ Realizar testes com as três rotas de lixiviação/adsorção propostas, utilizando carvão ativado (CIL, CIP e CIL Híbrido);

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Estado da arte da produção de ouro

O referencial teórico do presente trabalho aborda as etapas fundamentais para a produção de ouro.

3.2 Ouro

O ouro é um metal de transição brilhante, de cor amarela, denso, maleável, dúctil que não reage com a grande parte dos produtos químicos. À temperatura ambiente se encontra no estado sólido. O ouro geralmente apresenta-se em estado puro na forma de pepitas, em depósitos aluvionais e em rochas subterrâneas, desta forma associado a minerais sulfetados e silicatados, entre outros. O ouro puro é bastante maleável, por essa razão, geralmente são feitas ligas metálicas com prata e cobre. Suas diversas ligas metálicas são muito empregadas na joalheria, na fabricação de moedas, sendo assim o padrão monetário da maioria dos países. Em razão da sua boa condutividade elétrica, boa combinação de propriedades físicas e químicas e resistência à corrosão, ele dispõe de diversas aplicações industriais (QUIMLAB, 2017).

3.3 Adequação granulométrica dos minérios de ouro

Nas instalações da indústria mineral, a primeira etapa de fragmentação é, usualmente, realizada na mina, onde o desmonte do material, seja com o uso de explosivos ou de qualquer outro sistema de desagregação, promove a primeira redução de tamanho das partículas do minério. Nessa etapa são produzidos blocos volumosos com tamanho máximo compatível com a capacidade de alimentação dos britadores (BENEDETTO, 2011).

Entretanto, para que haja liberação satisfatória do mineral minério é necessário que o minério seja reduzido a uma granulometria fina, o que é realizado em várias etapas de fragmentação em várias em britadores e em moinhos (BENEDETTO, 2011).

A britagem constituiu a fragmentação dos blocos de minério provenientes da mina da faixa de m até cm (PERES *et al.*, 2002).

Já a moagem, o último estágio de um processo de cominuição, deve propiciar a redução de tamanho até a ordem de micrometros e possibilitar a liberação do mineral útil para viabilizar uma separação econômica e, conseqüentemente a recuperação do bem mineral desejada. A sobremoagem deve ser evitada pois acarreta um aumento do consumo de energia e, muitas vezes, perdas no processo, que não é não adequado para faixas granulométricas finas (PERES, *et. all*, 2002).

3.4 Etapas de Concentração

Após as etapas de adequação granulométrica do minério, segue-se a etapa de concentração. A concentração de sólidos na polpa é uma das variáveis que pode ser alterada, visando-se obter maior teor e/ou recuperação do mineral de interesse no concentrado. A concentração dos minérios complexos de ouro pode incluir a concentração gravimétrica no circuito de para separar os minerais e partículas de ouro liberados e etapa de concentração por flotação (PERES, *et. al*, 2002).

A concentração gravimétrica se baseia na separação entre os minerais presentes através da diferença de densidade entre eles, tamanho e forma das partículas presentes. O efeito da gravidade, forças centrífugas ou conjuntas, através de um meio fluido (água ou ar) são utilizados visando-se garantir a concentração/separação dos minerais existentes. Utilizam-se no processo equipamentos como jigues, mesas vibratórias, espirais e cones (BENEDETTO, 2011).

A flotação é um processo de concentração que se baseia na separação seletiva dos constituintes através da diferença entre as propriedades de superfície das substâncias minerais contidas no minério e previamente liberadas. Os minérios de ouro podem ser encontrados na forma de ouro livre e ouro e ouro associado a diversos minerais.

O ouro nativo ocorre incluso na matriz ou finamente disseminado em minerais tais como os sulfetos. Há também a possibilidade de o ouro se apresentar em solução sólida com os minerais sulfetados. A flotação desses minérios geralmente visa recuperar os minerais portadores do ouro, conjuntamente com o ouro livre. Posteriormente, esses concentrados são cianetados ou se necessário, submetidos a um pré-tratamento para torná-los adequados a lixiviação por cianetação (PERES, *et. al*. 2002).

3.5 Oxidação de Minérios Refratários

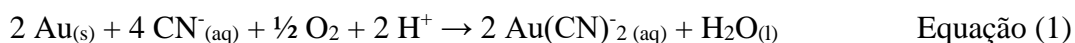
Minérios contendo ouro que não respondem satisfatoriamente a cianetação direta são denominados como minérios refratários. A principal causa é a ocorrência de ouro finamente disseminado na matriz dos sulfetos, arsênio e, algumas vezes, em alguns minerais contendo antimônio. Diversos processos têm sido propostos para o tratamento pré-oxidativo para minérios sulfetados refratários, como etapa prévia à cianetação. O pré-tratamento pode envolver as seguintes técnicas (MOURA, W., 2005):

- ✓ Oxidação de sulfetos, em condições drásticas, com adição direta de agentes oxidantes;
- ✓ Geração indireta de reagentes oxidantes;
- ✓ Ação de bactérias específicas, próprias para o minério em questão;
- ✓ Ustulação dos sulfetos, transformando a matriz de sulfetos em óxidos, com geração de SO₂;
- ✓ Oxidação sob pressão, em autoclave, transformando o sulfeto em hematita – POX.

3.6 Lixiviação de Ouro

A eficiência da lixiviação depende das características físicas das partículas minerais, do tipo de mineralização, facilidade de liberação e da natureza dos outros constituintes minerais presentes (MOURA, W., 2005).

De acordo com Ciminelli e Gomes (2002), a solubilização do ouro requer a combinação de um agente oxidante, como o oxigênio, com agentes complexantes específicos, como cloro, toureia, cianeto, capazes de estabilizar os íons aurosos ou áuricos em solução. A cianetação baseia-se exatamente na capacidade do cianeto em formar complexos com o ouro, ilustrado através da Equação (1).



Antes da lixiviação é essencial uma etapa de pré-lime, a qual se baseia no condicionamento da polpa para ajuste da concentração de sólidos e do pH utilizando-se cal hidratada. São vários os parâmetros envolvidos na operação de cianetação do ouro. É fundamental que se tenha um conhecimento mais aprofundado destas variáveis e as relações entre elas para realizar um controle operacional mais efetivo, visando a máxima extração de ouro. Além das concentrações de cianeto e oxigênio, a reação depende do pH,

da área do grão acessível aos reagentes, da concentração de sólidos na polpa, da agitação, do tempo de residência e temperatura. A eficiência da lixiviação é o resultado da interação destas variáveis (MOURA, W., 2005).

A lixiviação por cianeto em meio alcalino pode ser realizada em pilhas de estéril ou de rejeitos ("dump leaching"), em pilhas de minério ("heap leaching"), em tanques estacionários ("vat leaching") ou em tanques com agitação.

A lixiviação em pilhas, devido aos baixos investimentos e custos operacionais, pode ser utilizada para o aproveitamento de minérios marginais ou rejeitos. A lixiviação em tanques estacionários ("vat leaching") apresenta resultados intermediários entre a lixiviação em pilhas e a lixiviação em tanques agitados em termos de recuperação metalúrgica alcançada, investimentos e custos operacionais envolvidos, sendo preterida em relação à lixiviação em pilhas. A lixiviação em tanques agitados é muito utilizada para tratar minérios que requerem moagem, com teores geralmente superiores a 2 g Au/t, que justifiquem o investimento e os custos operacionais mais altos. Recuperações superiores a 90% são, em geral, alcançadas (CIMINELLI, 1995; GOMES, 1997).

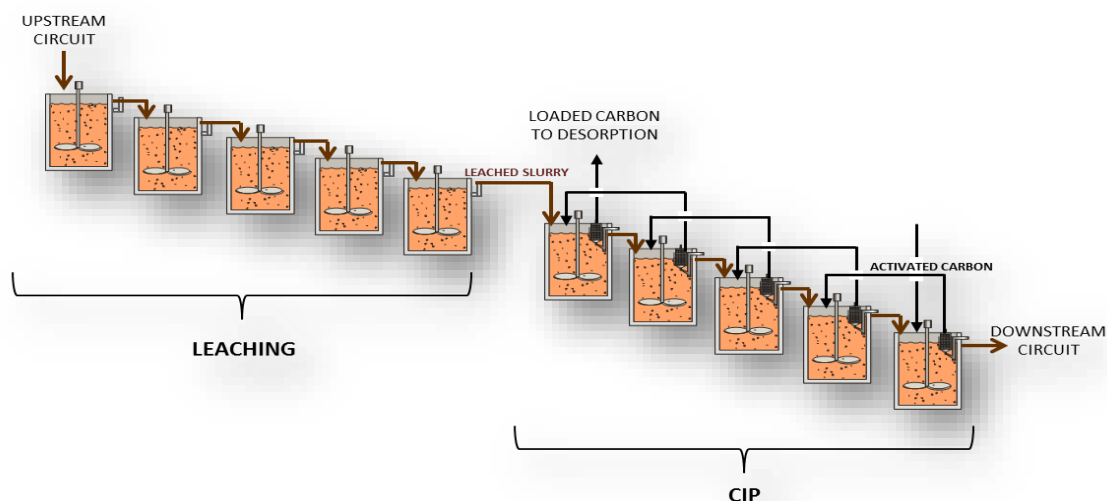
É de suma importância que sejam definidos e monitorados os limites ótimos das variáveis de processo. A lixiviação de minérios de ouro apresenta um conjunto de variáveis envolvidas no processo que necessitam ser assistidas durante a operação de cianetação, de modo a permitir a análise de dados de processo e a tomada de ações rápidas, com o intuito de alcançar a máxima extração possível. O entendimento perfeito das variáveis de processo do circuito de lixiviação de certo minério e de seu inter-relacionamento com as demais são requisitos básicos para uma operação correta da lixiviação (CIMINELLI; GOMES, 2002).

3.7 Purificação do licor por adsorção

A adsorção é um processo de transferência seletiva de íons ou espécies presentes em uma solução para uma matriz sólida (resinas, carvão ativado, etc). Os processos de adsorção em carvão ativado são empregados industrialmente para recuperação de ouro a partir de soluções ou polpas cianetadas, em configurações distintas: Carvão em polpa (CIP); Carvão em lixiviação (CIL) e Carvão em Coluna (CIC) (MOURA, W., 2005)..

No Processo CIP, a polpa proveniente do circuito de lixiviação flui por gravidade para um conjunto de tanques com agitação mecânica, no qual é contatada, em contra-corrente, com carvão ativado. No 1º estágio de adsorção o carvão com o maior carregamento entra em contato com a polpa mais rica em ouro, enquanto no último estágio o carvão menos carregado é misturado com a polpa de menor concentração de ouro. Assim, a concentração de ouro na polpa diminui gradualmente do primeiro ao último estágio de adsorção, enquanto o carregamento em ouro do carvão aumenta do sentido inverso. A polpa flui por gravidade de forma contínua, sendo que o transbordo de cada tanque possui uma peneira, de forma a reter as partículas de carvão que posteriormente são transferidos para colunas de eluição, a fim de se promover a dessorção do ouro contido no carvão. O ouro novamente em solução, após a dessorção, pode passar por um processo eletrolítico, ou cementação com zinco a fim de se obtê-lo sólido, para que possa assim ser refinado, fundido e obtidas as barras de ouro (MOURA, W., 2005).

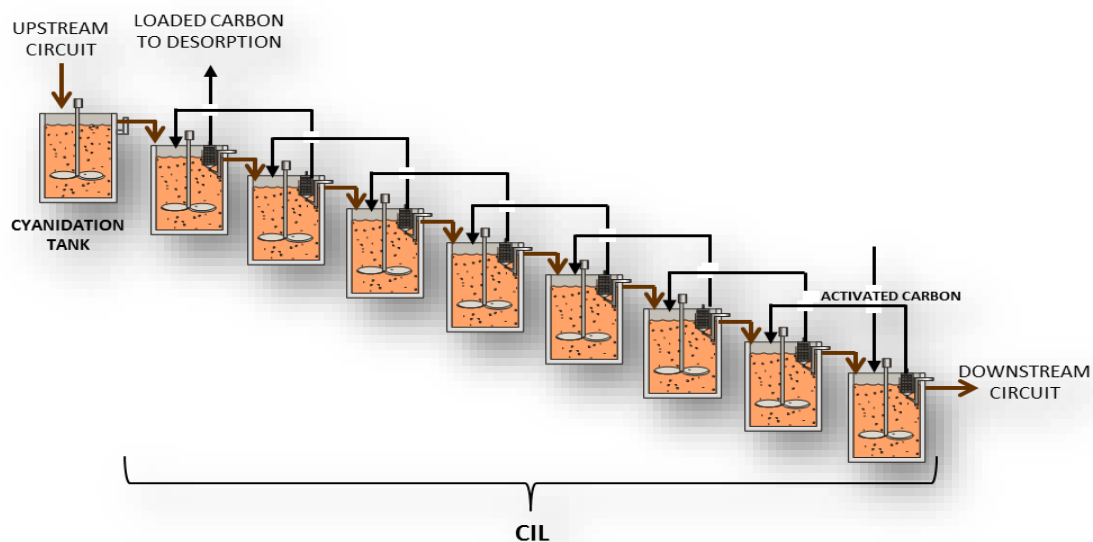
Figura 1 – Desenho esquemático do circuito CIP



O processo CIL trata-se de uma modificação no processo CIP, no qual as operações de lixiviação e adsorção ocorrem simultaneamente no mesmo tanque. Como consequência, os cianocomplexos de ouro e outros metais preciosos migram para a superfície do carvão ativado, onde são adsorvidos. Como resultado desta migração, a transferência de massa

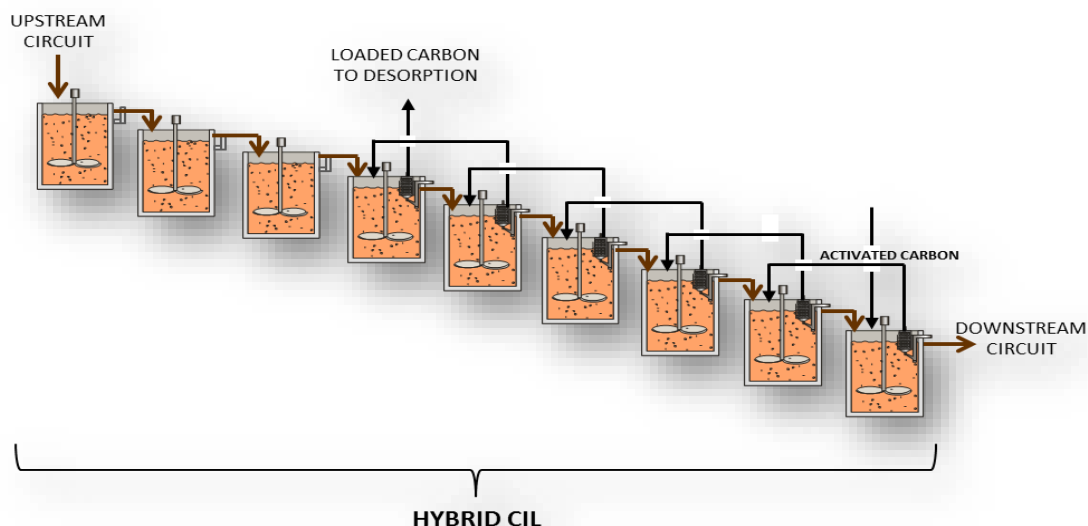
nesse tipo de sistema é elevada, fazendo com que o equilíbrio da reação de cianetação seja continuamente deslocado na direção dos produtos, acelerando a cinética da lixiviação.

Figura 2 – Desenho esquemático do circuito CIL



O Processo CIL possui uma outra modalidade chamada CIL Híbrido, no qual a lixiviação tem início separadamente, porém em poucas horas o carvão ativado é adicionado no processo e então se prossegue os processos de lixiviação e adsorção simultaneamente. As etapas de dessorção e produção de ouro são semelhantes ao processo CIP (FREITAS; COSTA, 2002).

Figura 3 – Desenho esquemático do circuito CIL Híbrido



No processo CIC a solução de ouro-cianeto, previamente clarificada flui por gravidade através de vários leitos de carvão ativado dispostos lado a lado em níveis decrescentes e em contracorrente, de modo que a solução rica passe pelo carvão menos carregado e vice-versa (FREITAS; COSTA, 2002).

3.8 Eluição, Eletrólise e Fundição

Após a adsorção do ouro nos poros do carvão ativado ele necessita ser desorvido, através da eluição para posterior eletrólise ou cementação com pó de zinco, a fim de se obter o ouro na forma sólida, para seguir a fundição e Refino.

A eluição é o processo pelo qual ocorre a transferência do ouro adsorvido no carvão para a solução. O carvão proveniente da etapa de adsorção é lavado e alimenta a coluna de desorção (eluição). A capacidade de carregamento do ouro pelo carvão decresce com o aumento da temperatura e, em maiores concentrações de cianeto e pH, a capacidade de adsorção do ouro pelo carvão decresce. A eluição é realizada através de um fluxo ascendente de uma solução de NaCN e de NaOH, aquecida a cerca de 85 a 100°C, sobre o leito de carvão carregado com ouro, em uma coluna de aço carbono. O processo dura de 24 a 72 horas, dependendo do carregamento do carvão.

Periodicamente, o carvão eluído passa por uma etapa de regeneração térmica antes de retornar ao circuito de adsorção. A regeneração ou reativação térmica é feita para

restaurar as propriedades adsorptivas do carvão ativado. Essa reativação torna-se necessária devido ao fato de tais impurezas como: matéria orgânica, silicatos ou carbonatos que acumulam nos poros do carvão ativado e não são removidos durante a eluição, diminuindo a sua capacidade de adsorção. No caso de minérios com altos teores de carbonatos, a regeneração térmica deve ser precedida por uma etapa de lavagem ácida do carvão (em geral com HCl diluído), pois tais carbonatos tendem a fixar-se nos poros do carvão, prejudicando a adsorção posterior de ouro. A lavagem ácida é complementada com lavagem com soda cáustica para neutralizar a superfície das partículas de carvão. A solução resultante da dessorção é encaminhada para a etapa de produção do metal através de eletrólise ou cementação com zinco (FREITAS; COSTA, 2002).

A eletrólise é um processo eletroquímico, caracterizado pela ocorrência de reações de oxi-redução em uma solução condutora quando se estabelece uma diferença de potencial elétrico em uma solução condutora e dois (ou mais) eletrodos mergulhados nessa solução. Com a passagem de uma corrente contínua através da solução contendo íons de ouro, são obtidos os produtos que se formam no catodo e no anodo. A cementação com pó de zinco é a redução de íons aquosos de ouro através da oxidação do Zn, com conseqüente precipitação do ouro. O produto da eletrólise ou da cementação com zinco é fundido e refinado para obtenção de barras de ouro com o maior teor de ouro possível, geralmente 99,99% de ouro (FREITAS; COSTA, 2002).

4. Metodologia

As atividades experimentais do presente trabalho foram desenvolvidas no Laboratório de Processo da Planta de Queiroz da AngloGold Ashanti, localizada na Fazenda Rapaunha, s/ nº, Bairro Galo, Nova Lima, Minas Gerais. Todos os procedimentos adotados seguiram a metodologia proposta para os testes hidrometalúrgicos em minérios de Ouro desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa e Tecnologia da AngloGold Ashanti desde 1983 até o atual momento.

Os ensaios de lixiviação foram realizados em garrafas de lixiviação (*rolling-bottles*). A amostragem é realizada segundo a técnica de quartamento, após a secagem do minério a temperatura de 100°C por 48 horas.

A amostra com massa aferida é adicionada a garrafa de lixiviação, e em seguida o volume adequado de água é adicionado para fornecer a concentração de sólidos especificada para o ensaio. O pH é ajustado com suspensão de cal. Então a garrafa é colocada no sistema de rolos, e mantida em movimento durante 2 horas (*Pre-Lime*).

Após o *pre-lime* é pesada e adicionada ao frasco a quantidade especificada de NaCN para e o frasco é colocado no sistema de rolos.

No decorrer do teste é medido o pH da polpa e caso necessário, cal é adicionada a fim de se manter o pH ideal. Para controle dos testes em certos tempos amostras da polpa são retiradas, filtradas, a solução coletada é reservada e o sólido é lavado com água e seco em estufa a temperatura de 100°C por 24 horas. O mesmo procedimento é feito para a polpa ao final do teste. A quantidade de amostra retirada do teste não é repostada. O cianeto é medido em casa amostragem e é repostado caso necessário para garantir uma boa lixiviação. Essas amostras de sólido e solução, juntamente com a amostra cabeça do teste são enviadas ao Laboratório Químico para análise de ouro nas mesmas. A partir do teor de ouro analisado nas amostras de sólido e de soluções é feito o balanço de massa do ouro para cálculo da recuperação de ouro.

Quando são realizados testes de adsorção simultâneos à lixiviação, o carvão ativado é adicionado à polpa em quantidade especificada. Quando se trata de um teste CIL o carvão é adicionado à polpa ao mesmo tempo em que se adiciona o NaCN. Quando se trata de um teste CIL híbrido a polpa é lixiviada com cianeto por algumas horas pré-determinadas e então o carvão é adicionado à polpa.

Já quando se trata de um teste CIP, após o tempo necessário para lixiviação da polpa o carvão é adicionado. Assim como nos testes padrão de lixiviação de tempos em tempos são recolhidas amostras de polpa contendo carvão para análise química.

O carvão é separado da polpa em peneira, a polpa é filtrada, a solução é colhida e o sólido é seco em estufa. Em todas essas amostras são analisados os teores de ouro para cálculo de recuperações no processo.

4.1 Amostras

Para os ensaios, foram utilizadas amostras de ALC (Alimentação da Lixiviação do Calcinado – na Planta de Queiroz da AngloGold Ashanti). As amostras de ALC foram recolhidas durante uma semana, com coleta da polpa três vezes ao dia, filtradas em filtro prensa e secas em estufa a 100°C. Para realização dos testes utilizou-se água de processo recolhida na empresa com o intuito de simular as condições operacionais da planta.

4.2 Testes de Lixiviação

Para se determinar os melhores parâmetros e otimizar o processo de lixiviação foram realizados testes avaliando a concentração inicial de NaCN, concentração de sólidos e granulometria. Por causa dos problemas históricos de balanço de massa com os testes de laboratório utilizando este minério todos os testes foram executados retirando-se amostras de solução e de rejeito e os cálculos das extrações de ouro foram feitos tanto usando-se os teores de alimentação recalculadas quanto analisadas.

4.3 Influência da Concentração de NaCN

As condições experimentais descritas no Quadro 1 foram investigadas.

Quadro 1 – Parâmetros para os testes de Concentração inicial de NaCN

Carvão	Sem carvão ativado na polpa
pH	10-11 (com cal)
Tempo de pré-lime (h)	2
Concentração de sólidos (%)	45
Granulometria (p ₈₀)	53 µm (como coletado)
Tempo (h)	24
Concentração inicial de NaCN (mg/L)	400; 600 e 800

4.4 Influência da concentração de sólidos

Os ensaios de lixiviação da alimentação para verificar a influência do percentual de sólidos foram realizados utilizando os parâmetros descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Condições dos ensaios para avaliação da concentração de sólidos

Carvão	Sem carvão ativado na polpa
pH	10-11 (com cal)
Tempo de pré-Lime (h)	2
Concentração de sólidos (%)	40; 45; 50 e 55
Granulometria (p ₈₀)	53 µm (como coletado)
Tempo (h)	24
Concentração inicial de NaCN (mg/L)	2000

4.5 Influência da granulometria

Após os ensaios variando a concentração de cianeto inicial de NaCN e variando a concentração de sólidos da polpa, testou-se a lixiviação do minério com granulometria mais fina, moendo o minério a um P₈₀ = 30 µm. Os testes foram realizados com os parâmetros descritos no Quadro 3.

Quadro 3– Condições experimentais nos ensaios para avaliação do efeito da granulometria

Carvão	Sem carvão ativado na polpa
pH	10-11 (com cal)
Tempo de pré-lime (h)	2
Concentração de sólidos (%)	45
Granulometria (p ₈₀)	53 µm (como coletado) e 30 µm (moído)
Tempo de lixiviação (h)	24
Concentração inicial de NaCN (mg/L)	800

4.6 Testes de lixiviação com carvão

Para verificar qual processo apresentaria melhor lixiviação simultânea à adsorção do ouro foram testadas três condições:

- ✓ CIP (*Carbon-in-Pulp*): Adição do Carvão após 24 horas de lixiviação com NaCN.

- ✓ CIL (*Carbon-in-Leach*): Adição de NaCN e de carvão simultaneamente a partir do início do teste.
- ✓ CIL (*Carbon-in-Leach*) Híbrido: Adição de NaCN (4 horas de lixiviação com NaCN) e posteriormente o carvão é adicionado.

4.7 CIP (Carbon-in-Pulp)

Os ensaios de CIP foram realizados nas condições descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Parâmetros operacionais para os testes CIP

Carvão – concentração na polpa	20 g/L
pH	10-11 (com cal)
Tempo de pré-lime (h)	2
Concentração de sólidos (%)	45
(Granulometria) p ₈₀	53 µm (como coletado)
Tempo de lixiviação com NaCN (h)	24
Tempo de adsorção com carvão (h)	8
Concentração inicial de NaCN (mg/L)	2000

4.8 CIL (Carbon-in-Leach)

Os ensaios de CIL foram realizados nas condições descritas no Quadro 5.

Quadro 5 – Condições experimentais para os testes CIL

Carvão – concentração na polpa (g/L)	20
pH	10-11 (com cal)
Tempo de pré-Lime (h)	2
Concentração de sólidos	45 % de sólidos
Granulometria (P ₈₀)	53 µm (como coletado)
Tempo de contato (h) (Carvão e NaCN adicionados simultaneamente)	24
Concentração inicial de NaCN (mg/L)	2000

4.9 CIL (*Carbon-in-Leach*) Híbrido

Os ensaios de CIL Híbrido foram realizados nas condições descritas no Quadro 6.

Quadro 6 – Parâmetros para os Testes de CIL Híbrido

Carvão– concentração na polpa (g/L)	20
pH	10-11 (com cal)
Tempo de pré-Lime (h)	2
Concentração de sólidos (%)	45
Granulometria (p ₈₀)	53 µm (como coletado)
Tempo de Lixiviação (h)	4
Tempo de Lixiviação + Adsorção (h) (simultâneas)	28
Concentração inicial de NaCN (mg/L)	2000

5. Resultados e Discussão

O processo de cianetação baseia-se exatamente na capacidade do cianeto em formar complexos com o ouro e é ilustrado através da reação global da Equação 1.



Antes da lixiviação, é essencial uma etapa de *Pre-lime*, que consiste no condicionamento da polpa, ajuste da concentração de sólidos e pH utilizando-se cal hidratada. São vários os parâmetros envolvidos no processo de cianetação do ouro. É fundamental que se tenha um conhecimento mais aprofundado destas variáveis e as relações entre elas para um controle operacional mais efetivo, visando a máxima recuperação de ouro. Além das concentrações de cianeto e oxigênio, a reação depende do pH, da área do grão acessível aos reagentes, da concentração de sólidos na polpa, da agitação, do tempo de residência e temperatura. A eficiência da lixiviação é o resultado da interação destas variáveis (MOURA, W., 2005).

5.1 Avaliação da concentração de NaCN

Usualmente a taxa de dissolução do ouro aumenta linearmente com a concentração de cianeto até um máximo a partir do qual este tem um efeito ligeiramente adverso, o qual se atribui ao aumento de pH da solução. O excesso de cianeto irá ser consumido em reações indesejáveis com outros metais presentes na dissolução, o que reduz a seletividade da lixiviação.

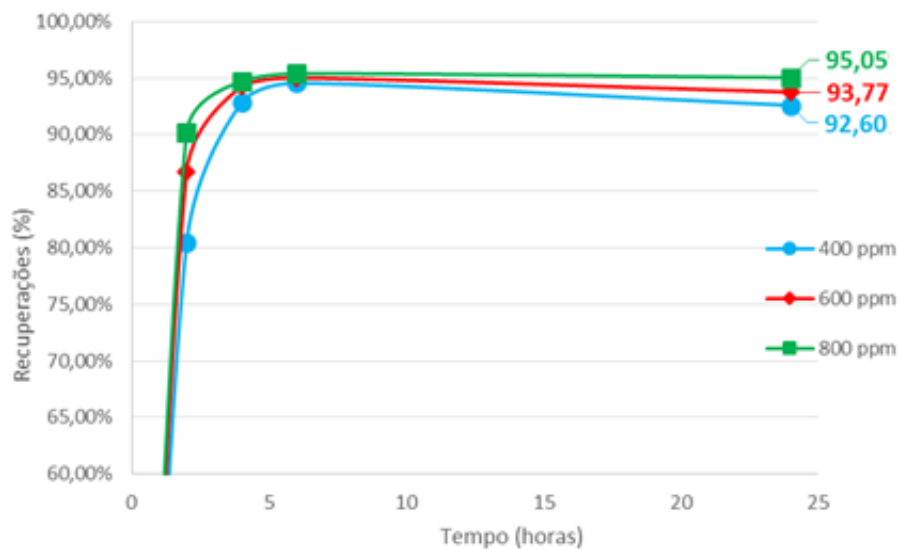
A concentração de cianeto deve também ser adequada ao tipo de minério que se irá lixiviar. Portanto, é de extrema importância determinar a concentração ideal de NaCN para o processo, a fim de se evitar o consumo de cianeto por metais que não sejam de interesse e garantir uma boa cinética para lixiviação do ouro (MOURA, W., 2005).

Os resultados dos testes de lixiviação da alimentação variando a concentração de cianeto estão apresentadas na Tabela 1. A Figura 4 apresenta as médias das duplicatas de recuperação de cada *target* de concentração inicial de cianeto.

Tabela 1 – Efeito da concentração de NaCN para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$, tempo de *Pre-lime* = 2h, teor de Au na alimentação de 41,64g/t, a 25°C

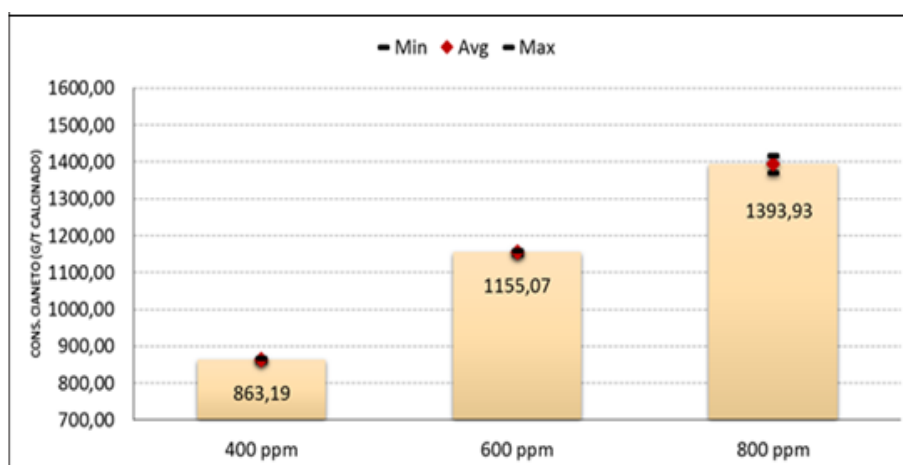
Teste		Testes de Lixiviação Variando Concentração de NaCN - Calcinado											
Alimentação Calculada (g/t)		32,05		30,95		31,10		29,69		28,97		29,11	
NaCN Inicial (mg/L)		400		400		600		600		800		800	
NaCN Total Adicionado (g/t)		1400		1435		1875		1850		2405		2360	
NaCN Consumido (g/t)		859		868		1150		1160		1418		1370	
Lixiviação	Time	Rejeito (g/t)	Extração (%)	Rejeito (g/t)	Extração (%)	Rejeito (g/t)	Extração (%)	Rejeito (g/t)	Extração (%)	Rejeito (g/t)	Extração (%)	Rejeito (g/t)	Extração (%)
	0	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
	2	8,67	79,18	7,62	81,70	5,23	87,44	5,82	86,02	4,05	90,27	4,12	90,10
	4	3,00	92,79	2,96	92,89	2,30	94,48	2,49	94,02	2,08	95,00	2,33	94,40
	6	2,20	94,72	2,33	94,40	2,09	94,98	2,05	95,08	1,85	95,56	1,98	95,24
	24	3,84	90,8	2,32	94,4	2,46	94,1	2,73	93,4	1,96	95,3	2,16	94,8

Figura 4 – Efeito da concentração de NaCN na extração de ouro



Como pode ser observado, para a concentração de 800 ppm de NaCN obteve-se a melhor recuperação, em torno de 95%, de forma consistente, indicando que o aumento da concentração favoreceu a lixiviação do ouro. Adicionalmente, a concentração de 800 ppm apresentou o maior consumo de NaCN como pode ser observado na Figura 5, mais uma vez indicando a necessidade de maior quantidade de íons CN^- na solução para que o ouro seja lixiviado satisfatoriamente.

Figura 5 – Relação entre a concentração de NaCN e o consumo de NaCN



5.2 Efeito da concentração de sólidos

A concentração de sólidos na polpa afeta a lixiviação pois altera a viscosidade e a densidade da polpa, parâmetros que alteram a difusão dos reagentes e a reação química. Verificou-se uma maior taxa de dissolução de ouro para menores quantidades de minério em solução, isto é, maiores diluições, dado que há um maior contato entre as partículas de ouro e o cianeto. A concentração de sólidos na cianetação, geralmente, varia entre 40 e 55%, uma vez que polpas muito diluídas implicam em elevados custos de operação, necessitando de tanques de agitação, bombas, filtros e clarificadores de maiores dimensões (MOURA, W., 2005).

O efeito do aumento da concentração de sólidos está apresentado na Tabela 2 e na Figura 6, valores obtidos a partir das médias das duplicatas de cada resultado.

Figura 6 – Efeito da concentração de sólidos na recuperação de Au

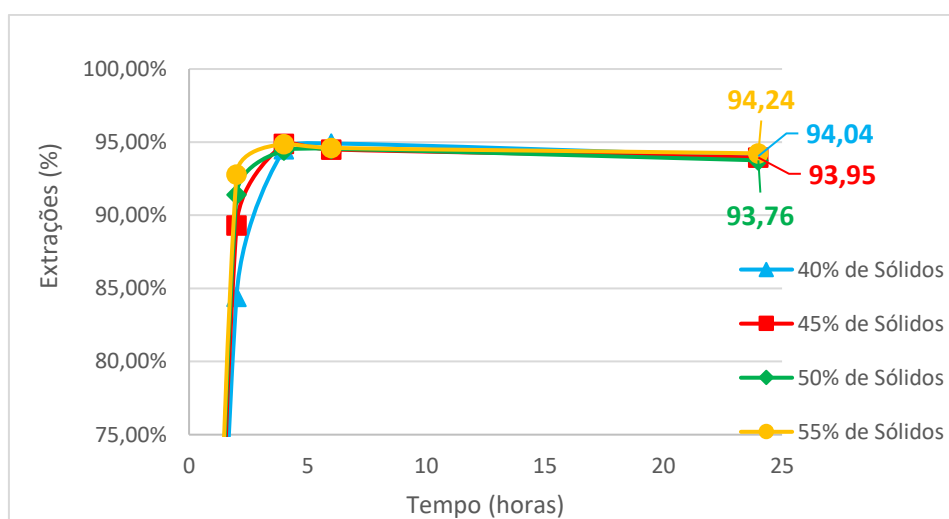
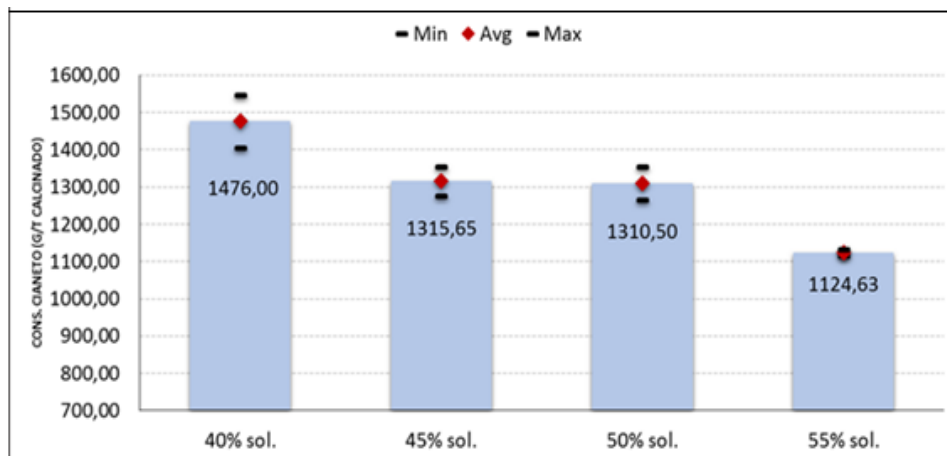


Tabela 2 – Efeito da concentração de sólidos na lixiviação para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$, tempo de *Pre-lime* = 2h, teor de Au na alimentação de 41,64g/t, a 25°C

Teste		Testes de Lixiviação Variando o % de sólidos - Calcinado															
Alimentação Calculada (g/t)		26,10		27,88		25,06		25,76		23,35		22,71		20,16		20,32	
% de sólidos		40%		40%		45%		45%		50%		50%		55%		55%	
NaCN Inicial (g/t)		3000		3000		2450		2450		2000		2000		1640		1640	
NaCN consumido (g/t)		1547		1406		1355		1276		1355		1266		1116		1133	
Lixiviação	Time	Rej. (g/t)	Extração (%)	Rej. (g/t)	Extração (%)	Rej. (g/t)	Extração (%)	Rej. (g/t)	Extração (%)	Rej. (g/t)	Extração (%)	Rej. (g/t)	Extração (%)	Rej. (g/t)	Extração (%)	Rej. (g/t)	Extração (%)
	0	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
	2	6,41	76,84	6,56	77,74	5,15	80,62	3,75	86,25	3,64	85,42	3,52	85,39	3,25	85,01	2,75	87,44
	4	2,31	92,12	2,26	92,75	2,21	92,17	2,05	92,91	2,36	91,23	2,28	91,19	2,40	89,96	1,88	92,11
	6	2,19	92,98	2,05	93,80	2,27	92,44	2,31	92,64	2,35	91,96	2,19	92,18	2,29	91,36	2,20	91,66
	24	2,64	93,7	2,32	94,4	2,65	93,6	2,39	94,3	2,81	93,3	2,39	94,3	2,46	94,1	2,34	94,4

Com base Figura 3 a maior recuperação metalúrgica foi obtida para 55% sólidos, associada ao menor consumo. Para 40% sólidos o consumo foi o mais elevado. Os demais alvos apresentaram consumo mediano, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Relação entre recuperação de ouro e consumo de NaCN



Considerando os resultados de recuperação e consumo, a concentração de sólidos mais viável a ser utilizada é 45% de sólidos, por duas razões principais: Apesar de 40% de sólidos propiciar uma recuperação metalúrgica similar a 45%, o consumo de cianeto foi maior o que, em termos de projeto, requer equipamentos maiores para operar com o tempo de residência necessário.

Outra razão é que altas concentrações de sólidos podem elevar a viscosidade da polpa, dificultando a transferência de massa na camada limite das partículas dificultando a reação. Portanto, apesar de apresentar resultados melhores de recuperação de Au e consumo de NaCN, o valor de 55% não é recomendado devido à maior dificuldade de controle operacional (CIMINELLI, 1995; GOMES, 1997).

5.3 Efeito da granulometria das partículas

A taxa de dissolução do ouro é diretamente proporcional à área superficial das partículas, sendo inversamente proporcional ao tamanho das partículas. Existe assim uma relação entre o tamanho das partículas de ouro e o tempo necessário para a sua dissolução na cianetação, de modo que uma moagem excessiva, pode aumentar a extração do ouro, mas

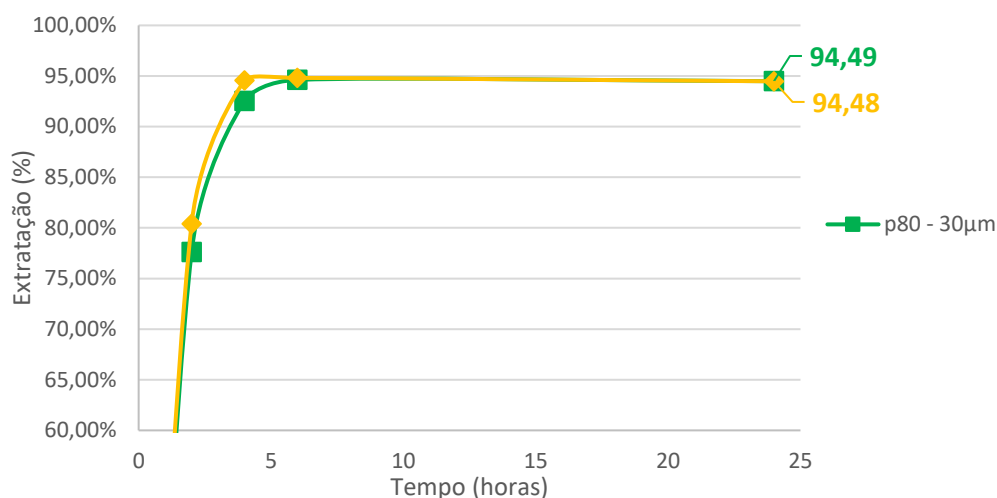
também dos minerais que reagem com o cianeto conduzindo conseqüentemente, a um consumo excessivo do agente lixiviante (CIMINELLI, 1995; GOMES, 1997).

Após os ensaios variando a concentração de cianeto inicial e a concentração de sólidos da alimentação, definiu-se uma melhor condição para os testes. A análise do efeito da granulometria foi realizada utilizando-se o minério como amostrado ($53 \mu m$) e moído a um $p_{80} = 30 \mu m$. Os resultados dos testes estão mostrados na Tabela 3 e Figura 8.

Tabela 3 – Efeito da granulometria na % de extração de Au (*Pre-lime* de 2 horas e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)

Teste		Testes de Lixiviação Granulometria + Fina					
p_{80}		30 μm		30 μm		53 μm	
Alimentação Calculada (g/t)		27,86		27,00		22,68	
NaCN Inicial (g/t)		2575		2650		2560	
NaCN Consumido (g/t)		1253		1310		1223	
Lixiviação	Tempo	Rej. (g/t)	Extração.	Rej. (g/t)	Extração.	Rej. (g/t)	Extração
	0	-	0,00%	-	0,00%	-	0,00%
	2	9,19	77,93%	9,46	77,28%	8,16	80,40%
	4	3,05	92,67%	3,16	92,41%	2,27	94,55%
	6	2,16	94,81%	2,32	94,43%	2,16	94,81%
	24	2,32	94,4%	2,27	94,5%	2,30	94,5%

Figura 8 – Efeito da granulometria na % de extração (*pre-lime* de 2 horas e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)



Como pode ser observado nas figuras anteriores, as extrações de Au em ambas as granulometrias foram bem próximas, comprovando que uma moagem mais fina não favoreceu a extração final do ouro. Contudo, conforme esperado, o consumo de cianeto foi um pouco maior para o minério moído ao $p_{80} = 30 \mu\text{m}$, provavelmente devido à reação com outros minerais. Assim sendo, não necessária essa moagem adicional do minério.

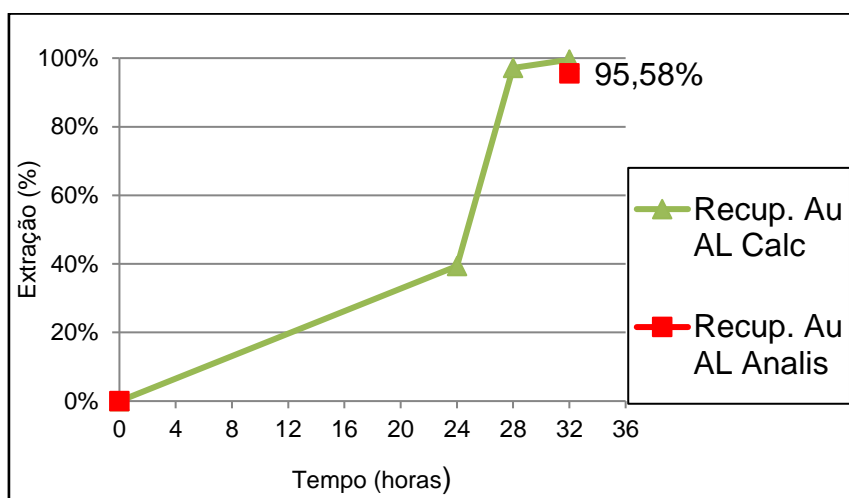
5.4 Testes CIP (Carbon-in-Pulp)

Os resultados dessa configuração de lixiviação estão sumarizados na Tabela 4 e na Figura 9.

Tabela 4 - Resultados do Teste CIP para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$ (*Pre-lime* de 2 horas e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)

Teste		Lixiviação com Carvão CIP	
Carvão		25 g/t	
Alimentação calculada (g/t)		25,02	
NaCN Inicial (g/t)		2137	
NaCN Consumido (g/t)		1298	
Lixiviação	Tempo	Rejeito (g/t)	Extração (%)
	0	-	0,00
	24 + 8 = 32	1,84	95,58

Figura 9 – Efeito do tempo na extração de Au no Teste CIP



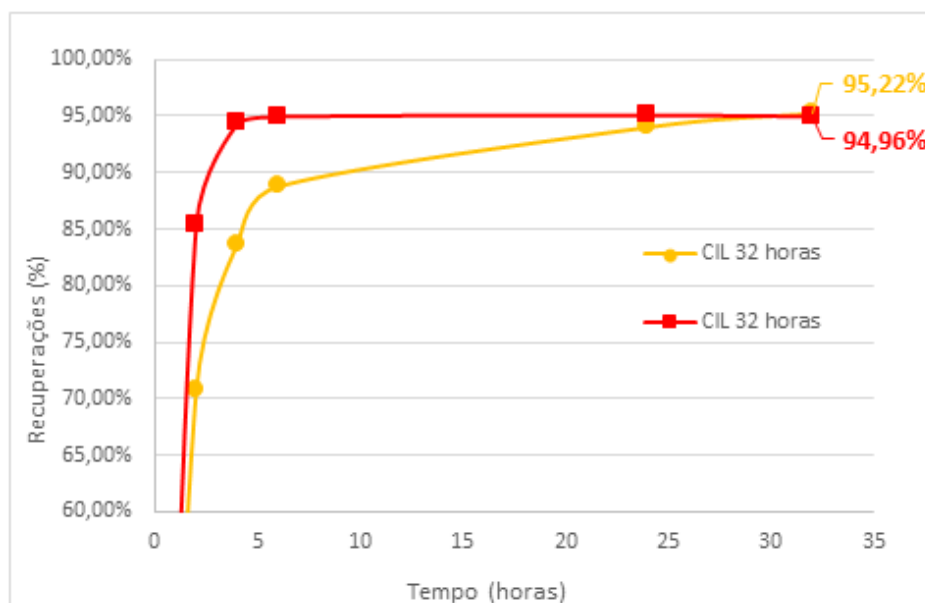
Como pode ser observado na Figura 9, com 24 horas de lixiviação, apenas cerca de 40% do ouro presente no minério foi extraído, o que pode indicar algum erro no teste ou uma possível precipitação do ouro já lixiviado, uma vez que este minério apresenta naturalmente uma cinética de lixiviação rápida e extrações da ordem de 90 a 95% neste tempo de contato.

Com a adição do carvão ativado pôde-se observar que a cinética de lixiviação e por consequente a extração de ouro aumentaram muito, atingindo em 32 horas uma recuperação analisada de 95,58%. O circuito CIP apresenta uma extração satisfatória, dentro das condições utilizadas no teste e o teor de ouro no rejeito foi razoavelmente baixo (1,84 g/t) com base na amostra cabeça analisada (41,64 g/t), sendo uma boa opção de rota de processo para esse minério.

5.5 Testes CIL (Carbon-in-Leach)

Os resultados dos testes realizados estão apresentados na Tabela 5. Em 32 horas de contato extrações de ouro similares foram alcançadas. No entanto, para o primeiro teste observou-se uma cinética de lixiviação/adsorção mais lenta em relação ao segundo teste na Figura 10.

Figura 10 – Extrações de Au nos Testes de CIL 32 Horas



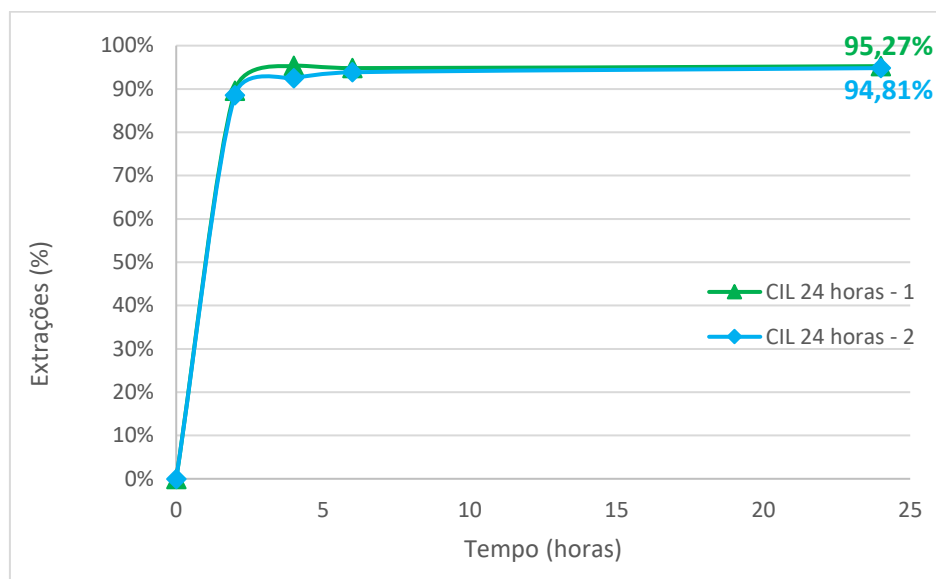
Os testes CIL com 24 horas de contato (Figura 11) mostram que as extrações de ouro foram similares às obtidas nos testes de CIL com 32 horas de contato, indicando que 24 horas de contato seria o tempo ideal para opção de circuito CIL.

Portanto, o circuito CIL também é uma boa opção de rota de processo para o tratamento do minério, sendo que os testes apresentaram extração satisfatória e que o parâmetro da empresa é o valor de 93%.

Tabela 5 - Resultados dos Testes CIL para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$ *(Pre-lime de 2 horas, 25 g/t de carvão na polpa e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)*

Teste		Lixiviação com Carvão CIL							
Alimentação Calculada (g/t)		46,01		40,61		43,25		40,49	
NaCN Inicial (g/t)		2440		2440		2440		2440	
NaCN Consumido (g/t)		1158		1160		1358		1436	
Lixiviação	Tempo	Rejeito (g/t)	Extração (%)	Rejeito (g/t)	Extração (%)	Rejeito (g/t)	Extração (%)	Rejeito (g/t)	Extração (%)
	0	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00
	2	10,08	70,7	5,07	85,35	3,68	89,60	3,99	88,57
	4	6,41	83,69	2,38	94,28	1,94	95,34	3,13	92,48
	6	4,42	88,75	2,11	94,93	2,16	94,81	2,56	93,85
	7	3,88	90,13	2,14	94,86	2,16	94,81	2,45	94,12
	24	2,36	93,99	2,06	95,05	1,97	95,27	2,16	94,81
	32	1,88	95,22	2,10	94,96	-	-	-	-

Figura 11 – Extração de Au nos Testes CIL



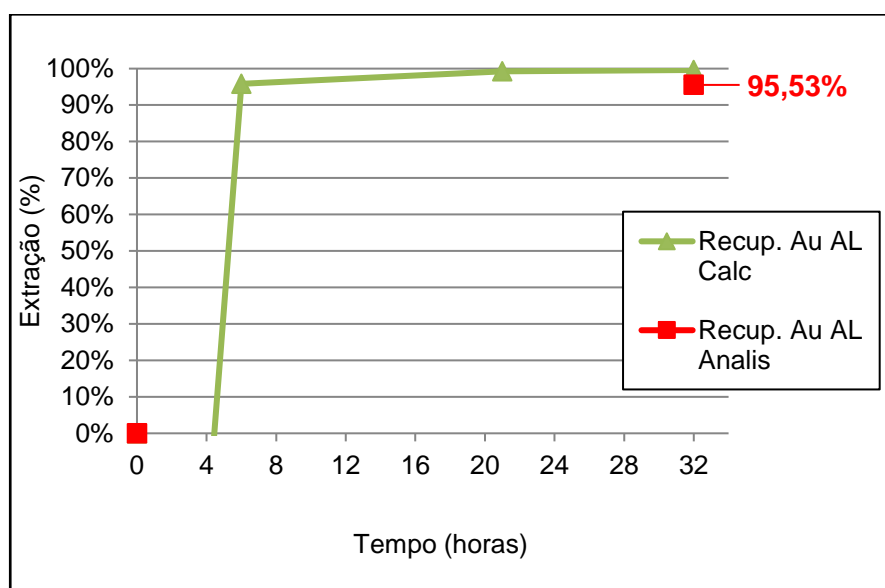
5.6 Testes CIL Híbrido (*Carbon-In-Leach*)

Os resultados do teste realizado estão contidos na Tabela 6 e na Figura 12.

Tabela 6 - Resultados do Teste de CIL Híbrido para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$ (*Pre-lime* de 2 horas, 25 g/t de carvão na polpa e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)

Teste		Lixiviação com Carvão CIL Híbrido	
Alimentação Calculada (g/t)		23,08	
NaCN Inicial (g/t)		2000	
NaCN Consumido (g/t)		1185	
Lixiviação	Tempo	Rejeito (g/t)	Extração (%)
	0	-	0,00
	4h lixiviação + 28 h Adsorção = 32 h	1,86	95,53

Figura 12 – Extração de Au no teste de CIL Híbrido para a granulometria $p_{80} = 53 \mu\text{m}$ (Pre-lime de 2 horas e teor de Au na alimentação de 41,64 g/t, a 25°C)



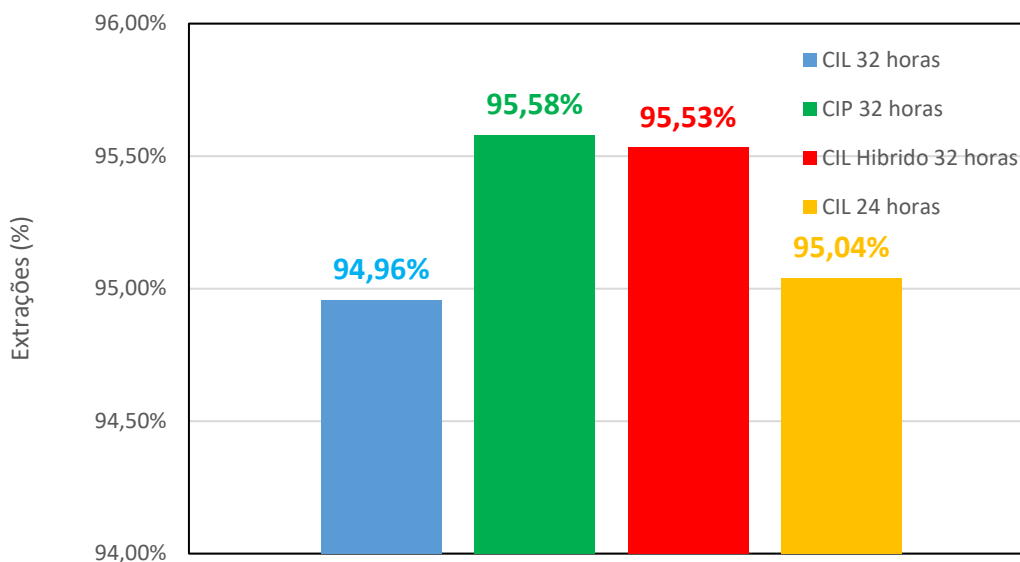
O teste de CIL Híbrido apresentou extração rápida tanto na etapa de lixiviação quanto de adsorção indicando uma ótima cinética da reação. A lixiviação para ocorrer precisa da disponibilidade do agente lixiviante. Fazendo ela nessa parte inicial, garante-se uma boa concentração de Au lixiviado para acelerar o processo de adsorção.

Visto que a cinética de adsorção também é influenciada pela concentração do adsorvato em solução. O principal foco desta rota de processo é que apenas parte da lixiviação ocorre sem adsorção simultânea com carvão o que garante a continuidade de uma boa cinética de lixiviação com a adição de carvão e aumenta a probabilidade de que não ocorra a precipitação do ouro já lixiviado.

5.7 Comparação entre as configurações CIP, CIL e CIL híbrido

A Figura 13 apresenta as extrações finais médias dos testes para as três configurações de rotas de processo em estudo; CIP, CIL e CIL Híbrido.

Figura 13 – Extrações finais para as diferentes configurações em suas condições definidas para os testes com carvão



De acordo com os testes realizados as extrações finais atingidas nas três rotas de processo foram bem próximas. No entanto, o teste CIP com 32 horas apresentou maior extração, seguidos respectivamente dos testes de CIL Híbrido com 32 horas, CIL com 24 horas e CIL com 32 horas. O teste CIL com 24 horas apresentou extração superior ao teste CIL com 32 horas indicando que 24 horas seria o tempo ideal para esta rota de processo.

Por outro lado, os testes CIP e CIL Híbrido tem basicamente o mesmo funcionamento, diferenciando-se apenas no tempo efetivo de lixiviação sem carvão, o qual no CIL Híbrido é bem menor que no CIP. Mas esta diferença não influenciou a extração final, uma vez que a diferença entre eles foi de centésimos.

Com base apenas nos testes realizados com as três rotas de processo, a rota mais viável a ser escolhida, devido a extração de ouro alcançada seria o CIP com 32 horas de contato.

6. CONCLUSÕES

Com base nos testes realizados determinou-se que a lixiviação de ouro do minério sulfetado de ouro da AngloGold Ashanti utilizando a concentração de cianeto de 800 ppm, apresentou melhor extração, igual a 95,58%, quando comparado com concentrações de cianeto iguais a 600 e 400 ppm. Entretanto, essa maior concentração refletiu em um maior consumo de cianeto.

A etapa de *Pre-lime* durante 2 horas foi importante para o processo. É necessário manter o pH em torno de 10 a 11 para garantir uma boa cinética de lixiviação do ouro. A concentração de sólidos de 45% foi escolhida, considerando duas razões principais: para 40%, apesar de propiciar uma maior extração, similar a 45%, o consumo de cianeto foi maior e, em termos de projeto, requeria equipamentos maiores para atingir uma mesma extração. Outra razão é que altas concentrações de sólidos podem elevar a viscosidade da polpa. Portanto, apesar de apresentar resultados melhores de extração de Au e consumo de NaCN, o valor de 55% não é recomendado devido à maior dificuldade de controle operacional.

A redução da granulometria não favoreceu a extração de ouro, além de ter elevado o consumo de cianeto, concluindo-se, portanto, que não é necessária a moagem ultrafina do material.

Nos testes de lixiviação sem carvão ativado os rejeitos da lixiviação apresentaram um aumento do teor de ouro nas últimas horas da lixiviação, indicando a possibilidade de ter ocorrido algum efeito do tipo *preg-robbing* ou precipitação do ouro já solubilizado. Com utilização de carvão ativado os rejeitos obtidos apresentaram os menores teores de ouro em todos os testes (CIL e CIL híbrido), devido ao fato de o carvão evitar a possível precipitação do ouro já lixiviado, adsorvendo-o. Baseado nos resultados dos testes realizados pode-se concluir que a utilização do circuito CIP com 32 horas e o CIL Híbrido com 32 horas de contato para o tratamento hidrometalúrgico do calcinado da planta do Queiroz seriam adequados.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi avaliado a melhor rota extrativa para o minério tratado na planta da AngloGold Ashanti em Queiroz. Um trabalho subsequente a esse será o estudo de engenharia analisando-se a viabilidade de se implantar uma nova planta de tratamento para o minério considerando os resultados obtidos no presente trabalho, uma vez que a atual já está em operação desde 1985.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENEDETTO, J. S. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia de Ouro. Módulo 2. MCE Consultoria e Engenharia LTDA. Belo Horizonte, Jan. 2011.

BENEDETTO, J. S. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia de Ouro. Módulo 3. MCE Consultoria e Engenharia LTDA. Belo Horizonte, Jan. 2011.

BENEDETTO, J. S. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia de Ouro. Módulo 4. MCE Consultoria e Engenharia LTDA. Belo Horizonte, Jan. 2011.

CIMINELLI, V.S. Tecnologia de Extração de Ouro - Desenvolvimentos e Desafios, Brasil Mineral, n. 135, p. 32-42. (1995).

CIMINELLI, V. S. T., GOMES, A. D. Princípios da Cianetação, Extração de Ouro e Meio Ambiente, capítulo 5, p. 135-155, CETEM/MCT, 2002.

FREITAS, L. R.; COSTA, R. S. Recuperação do Ouro Dissolvido, Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente, capítulo 4, p. 95-133. CETEM/MCT, 2002.

GOMES, A. D. Avaliação Técnica dos Processos de Cianetação e Adsorção da Mina de Fazenda Brasileiro. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 160p. (1997).

MOURA, W. Especificação de cianeto para redução do consumo no circuito de lixiviação de calcinado da Usina do Queiroz. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

QUIMLAB. Ouro, Apresentação e Características Principais. Disponível em: <<http://www.quimlab.com.br/guiadoselementos/ouro.htm>>. Acessado em: 15 abr. 2017.

PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P.; LINS, F. A. F.; TOEM, M. L. Beneficiamento de Minérios de Ouro. Capítulo 2, p. 15-50, CETEM/MCT, 2002.