

RINALDO PEDRO NARDI

**ANÁLISE CRÍTICA DO
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE
CIANETAÇÃO EM TANQUES AGITADOS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em
Engenharia

SÃO PAULO
2000

RINALDO PEDRO NARDI

**ANÁLISE CRÍTICA DO
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE
CIANETAÇÃO EM TANQUES AGITADOS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Professor Dr. Arthur Pinto Chaves

2000

Nardi, Rinaldo Pedro

Análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados. São Paulo, 2000.

221 p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minérios de ouro 2. Cianetação 3. Projetos Minerais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas II. t

A simples posse da informação não nos torna inteligentes se não soubermos como analisar, organizar, avaliar e aplicar essas informações para fins objetivos.

John Chaffee

À minha família, pelo incentivo, compreensão e paciência nos intermináveis finais de semana.

AGRADECIMENTOS

À Companhia Vale do Rio Doce pelo patrocínio desta tese.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela visão e pioneirismo da realização do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral integrado com a indústria. Esta coragem de inovar abriu uma oportunidade para profissionais da indústria, como eu, de se organizarem e ampliarem os seus conhecimentos. Com esta iniciativa, muito mais do que os profissionais da área, ganha o país como um todo.

Ao meu amigo Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves, pelo incentivo, orientação segura e objetividade em desenvolver conhecimentos dirigidos às necessidades da indústria mineral do país.

Aos amigos da CVRD pelo apoio e troca de experiências.

SUMÁRIO

Resumo

Abstract

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo	1
1.2	Justificativa	2
2	DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS MINERAIS.....	4
2.1	Processo de suprimento mineral.....	4
2.2	Desenvolvimento do depósito e projeto conceitual	9
2.2.1	Avaliação preliminar.....	13
2.2.2	Estudo conceitual.....	14
2.2.3	Estudo de pré-viabilidade ou segunda etapa do estudo conceitual	17
2.2.4	Estudo de viabilidade final.....	18
2.3	Avaliação “ex-post” de projetos minerais	20
2.4	Ensaio para desenvolvimento de processo	24
2.5	Fatores que afetam a seleção do processo.....	28
2.5.1	Fatores geológicos	29
2.5.2	Fatores metalúrgicos	29
2.5.3	Fatores ambientais	30
2.5.4	Fatores geográficos	30
2.5.5	Fatores de mercado	31
2.5.6	Fatores políticos	31
2.6	Estratégias para desenvolvimento de processo	31
3	A INDÚSTRIA DO OURO	35
3.1	Contexto mundial.....	35
3.2	Contexto do Brasil	43
3.3	Tendências tecnológicas	47

4. CIANETAÇÃO DE MINÉRIOS DE OURO EM TANQUES AGITADOS.....	50
4.1 Processos de tratamento de minérios de ouro	50
4.2 Química da cianetação	56
4.3 Fatores que influenciam a cianetação	59
4.3.1 Características do minério.....	59
4.3.2 Concentração de cianeto	64
4.3.3 Concentração de oxigênio.....	66
4.3.4 Alcalinidade	68
4.3.5 Granulometria de moagem.....	70
4.3.6 Concentração gravítica.....	70
4.3.7 Tempo de lixiviação.....	72
4.3.8 Densidade de polpa	73
4.3.9 Temperatura	74
4.3.10 Adição de carvão ativado.....	74
4.3.11 Efeito químico de outros constituintes da polpa.....	75
4.3.12 Pré-aeração.....	82
4.3.13 Agitação e eficiência de mistura	83
4.4 Otimização de circuitos de cianetação	85
4.4.1 MINTEK	85
4.4.2 Anglo American Research Laboratories - AARL.....	88
4.4.3 Kondos et. al. (CANMET).....	90
4.4.4 Discussão dos métodos	95
5 PROCEDIMENTOS PARA A ANÁLISE CRÍTICA.....	97
5.1 Revisão bibliográfica	99
5.1.1 Desenvolvimento de projetos minerais	99
5.1.2 Contexto da indústria do ouro.....	100
5.1.3 Processo de cianetação em tanques agitados	100
5.2 Determinação dos fatores e diretrizes para análise	101
5.3 Análise da sensibilidade da economia da cianetação em relação aos parâmetros de processo	101
5.4 Análise da influência dos objetivos, estratégias e critérios Empresariais.....	102
5.5 "Benchmarking": estabelecimento de dados de referência de projetos similares	103
5.6 Análise do "feed-back" de projetos	104
5.6.1 Dados e informações utilizados	105
5.6.2 Acréscimos mínimos de extração de ouro para compensar moagens mais finas ou aumentar o tempo de residência da cianetação.....	107

5.7	Estratégia para ensaios e desenvolvimento de processo.....	114
6	ANÁLISE CRÍTICA DO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE CIANETAÇÃO.....	116
6.1	Fatores e diretrizes para análise.....	116
6.1.1	Parâmetros de processo e ensaios	117
6.1.2	Fatores de sucesso para o desenvolvimento de processo	125
6.1.3	Fatores de lucratividade da indústria do ouro	130
6.1.4	Priorização dos fatores de sucesso	133
6.1.5	Diretrizes para o desenvolvimento de processo.....	135
6.2	Sensibilidade da economia de cianetação em função dos dos parâmetros de processo	137
6.3	Análise do impacto dos objetivos, estratégias e critérios empresariais sobre o desenvolvimento de processo.....	142
6.4	Estabelecimento de dados de referência para "benchmarking" no desenvolvimento de processo	145
6.4.1	Teor de ouro	146
6.4.2	Capacidade das instalações	146
6.4.3	Recuperação de ouro	147
6.4.4	Concentração de cianeto livre.....	147
6.4.5	Consumo de cianeto	147
6.4.6	pH.....	148
6.4.7	Consumo de cal.....	148
6.4.8	Tempo de residência	148
6.4.9	Concentração de sólidos	148
6.4.10	Número de tanques / volume de tanques	149
6.4.11	Potência de agitação.....	149
6.5	"Feed-back" de projetos: análise do impacto dos parâmetros e variáveis de processo sobre a extração de ouro / economia dos projetos.....	150
6.5.1	Granulometria de moagem.....	150
6.5.2	Tempo de residência	155
6.5.3	Tempo de pré-aeração	161
6.5.4	Adição de cianeto.....	164
6.5.5	Oxigênio dissolvido	166
6.5.6	pH.....	169
6.5.7	Adição de carvão ativado.....	171
6.5.8	Concentração de sólidos	176
6.5.9	Efeito da concentração gravítica.....	177
6.5.10	Impacto da cianetação sobre o meio ambiente.....	179
6.5.11	Impacto dos parâmetros de processo sobre a economia da cianetação.....	181

6.6	Análise das estratégias de ensaios e desenvolvimento de processo.....	183
6.6.1	Decisão do início do desenvolvimento dos depósitos de ouro	185
6.6.2	Estudo conceitual	191
6.6.3	Estudo de pré-viabilidade.....	202
6.6.4	Estudo de viabilidade final.....	205
7	CONCLUSÕES.....	207

	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	211
--	--	------------

Anexo A – Avaliação do impacto das variáveis de processo sobre a economia da cianetação

Anexo B – Estudo do acréscimo mínimo de recuperação de ouro para compensar moagem mais fina

Anexo C – Estudo do acréscimo mínimo de recuperação de ouro para compensar o aumento do tempo de residência

Anexo D – Impacto da granulometria de moagem, adição de cianeto e tempo de residência sobre a economia da cianetação

Lista de Tabelas

Lista de Figuras

RESUMO

Para enfrentar a crise desencadeada pelos baixos preços do ouro, as empresas de mineração têm procurado aumentar sua competência em encontrar jazidas de qualidade superior e desenvolver projetos de baixo custo de produção. Como a indústria do ouro utiliza uma tecnologia madura, não há espaço para divagações: é preciso aprimorar os métodos de desenvolvimento de projetos para obter uma vantagem competitiva. Para tanto, deve-se aliar a capacidade técnica à visão de negócios, dentro de uma abordagem sistêmica e multidisciplinar. O desenvolvimento de processos é parte deste esforço.

Neste sentido, nesta tese é feita uma análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação de minérios de ouro em tanques agitados, procurando-se identificar procedimentos para aprimorar os métodos de trabalho. São considerados os fatores de sucesso e de competitividade da indústria do ouro, assim como os objetivos e estratégias adotados em projetos da área.

Esta análise permitiu estabelecer diretrizes para maximizar o grau de sucesso no desenvolvimento de processos e priorizar os parâmetros de processo em relação à economia da cianetação. Os efeitos dos objetivos, estratégias e critérios empresariais sobre o desenvolvimento de processo foram investigados e estabeleceram-se informações de referência de processos para “*benchmarking*”. Os dados dos projetos em que o Autor trabalhou foram estruturados e analisados no sentido de buscar as melhores práticas de desenvolvimento. Os resultados permitiram adaptar as estratégias para desenvolvimento de processos às estratégias, fatores de competitividade e fatores de sucesso da indústria do ouro.

ABSTRACT

Mining gold companies are pursuing new practices to increase their skills in developing high quality deposits and low cost projects, in order to face the crisis due to low gold prices. As the gold industry uses a mature technology, there is no field for speculations: project development methods must be improved to achieve a competitive advantage. In this way, technical capabilities must be combined to business vision within a systemic and multi-disciplinary approach. Process development is part of this effort.

In this thesis, a critical analysis of process development for gold ores cyanidation in agitated tanks is proposed, seeking for practices to improve work methods. Success and competitiveness factors are considered together with typical objectives and strategies of the gold industry.

This analysis resulted on the establishment of guidelines to maximize success in process development and to prioritize the process parameters regarding the economics of cyanidation. The effect of objectives, strategies and entrepreneurial criteria over process development was investigated and benchmarking information was established. The information about the projects that the Author has worked was structured and analyzed seeking best practices for development. The results allowed to adapt process development strategies to the strategies, factors of success, and factors of competitiveness of gold industry.

1 INTRODUÇÃO

A indústria do ouro está enfrentando um grande desafio. Após uma fase de prosperidade desencadeada pelos altos preços do ouro que persistiram durante quase 20 anos, o desempenho da indústria foi severamente afetado pela queda de preço ocorrida a partir de 1997, que recuou de um patamar de US\$ 380,00 / oz para cerca de US\$ 270,00 /oz*, que se mantém na atualidade. A probabilidade de uma recuperação significativa de preço a médio prazo é baixa. Muitos projetos tornaram-se antieconômicos. O nível de investimento na exploração geológica de ouro vem caindo. As melhores oportunidades de aquisição de jazidas parecem já terem ocorrido. Para serem bem sucedidas neste cenário, as empresas de mineração terão que aprimorar as técnicas de exploração geológica e de desenvolvimento de projetos, concentrar-se na busca de jazidas de maior valor intrínseco e no desenvolvimento de processos de menor custo, aliando sua capacidade técnica à visão de negócios, à habilidade gerencial, e a modernos elementos organizacionais de suporte.

Esta tese insere-se dentro deste esforço. Será necessária uma grande agilidade na tomada de decisões envolvendo a exploração geológica, a avaliação e a implantação de projetos. Concorrerá para isto a capacidade de gerar, com rapidez, baixo custo e confiabilidade, as informações necessárias e suficientes para garantir a precisão requerida pelas empresas em cada etapa do desenvolvimento de projetos.

1.1 Objetivo

O objetivo desta tese de doutorado é fazer uma análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação de minérios de ouro em tanques agitados.

* oz = onça Troy = 31,103 g. Apesar de não ser unidade SIU, nem padrão monetário brasileiro, toda a avaliação econômica e o comércio são feitos nesta unidade (US\$/oz), razão pela qual decidiu-se mantê-la neste trabalho.

Compreende a análise das atividades de desenvolvimento de processo realizadas ao longo das etapas de um projeto. Inicia-se com os primeiros estudos, geralmente feitos após a descoberta de uma ocorrência de ouro, passa pelos estudos realizados nas etapas intermediárias, até culminar com a definição final do processo para o projeto básico da usina. A abrangência considerada para o processo inclui desde a definição da granulometria ótima de moagem até a solubilização do ouro na solução de cianeto. Exclui a definição do melhor processo de cominuição, bem como o estudo das etapas subsequentes à cianetação. Os principais fatores de sucesso e competitividade e as questões críticas mais comuns são considerados e analisados em consonância com os objetivos e estratégias usualmente adotados em projetos da área, com o cenário atual de preço do ouro e com as condições geológicas, geográficas e conjunturais brasileiras. Foram utilizados dados de estudos e projetos da Companhia Vale do Rio Doce em que o Autor trabalhou.

1.2 Justificativa

A escolha do assunto justifica-se por:

- A cianetação em tanques agitados e a lixiviação em pilhas constituem os processos de maior potencial para a recuperação de ouro na atual conjuntura.
- A lixiviação em tanques é responsável pela maior parte da produção de ouro da atualidade.
- Os esforços para o desenvolvimento de projetos devem se concentrar em áreas de maior incerteza de processo e/ou onde grandes ganhos podem ocorrer.
- A moagem e a cianetação constituem as etapas com maior potencial de ganho numa usina de processamento de minérios de ouro não refratário. A moagem é responsável pela maior parte dos custos operacionais. A cianetação governa a extração do ouro e a receita. Ambas, influem sobre as perdas insolúveis deste metal, muito maiores do que as perdas solúveis nas etapas subsequentes do processo. Em consequência, são as etapas determinantes da economia do processo.

- O custo da moagem é dependente da granulometria ótima de cominuição, que é definida pelas necessidades da cianetação. Então fica ressaltada a importância de se dominar o processo de cianetação e aperfeiçoar seus ensaios para definir com segurança e confiabilidade os parâmetros ótimos de projeto e de operação.
- A conjuntura atual do ouro obriga as empresas do setor a repensarem o seu modo de atuar. Deve-se minimizar o dispêndio de recursos em estudos com baixo potencial de ganho, pequena probabilidade de sucesso e baixa aderência à estratégia da empresa.

Muito se tem estudado e publicado ultimamente sobre as tecnologias de produção de ouro, seus fundamentos, mecanismos e modelos. Grandes avanços têm sido feitos. Mas, em geral, as abordagens são unidisciplinares, altamente especializadas e restritas a alguma pequena parte do processo. Existe uma lacuna de trabalhos sobre o desenvolvimento e a otimização de processos de cianetação utilizando uma abordagem multidisciplinar, sistêmica, em sintonia com as estratégias das empresas, dentro de cenários específicos e em constantes mudanças.

Para ser bem sucedida, a estratégia de desenvolvimento e otimização de processos (uma sequência planejada de ensaios, priorizados e quantificados em função de aspectos de custo-benefício, de fatores de sucesso e competitividade e das estratégias do negócio para se atingir os objetivos empresariais) tem de estar em sintonia com a estratégia do negócio como um todo. É necessário um entendimento claro de que uma tecnologia ou um processo desenvolvido só têm valor se resultarem numa operação rentável.

2 DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS MINERAIS

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica do desenvolvimento de projetos minerais, buscando-se: compreender o processo de suprimento mineral; as fases de desenvolvimento de projetos minerais; os principais fatores que contribuem para o sucesso ou insucesso destes projetos; os ensaios e fatores que afetam a seleção do processo de cianetação; e as estratégias utilizadas para o seu desenvolvimento.

2.1 Processo de suprimento mineral

O papel do setor mineral na economia é encontrar, delimitar e desenvolver depósitos minerais econômicos e, então, lavar o minério, beneficiá-lo e vender os produtos obtidos. Os recursos geológicos são convertidos em produtos vendáveis pelo processo de suprimento. Este é composto por uma série de atividades que podem ser agrupadas em três etapas principais: exploração geológica, desenvolvimento do projeto e produção. Desta maneira, os minérios provenientes de recursos geológicos inicialmente desconhecidos são transformados em “*commodities*”, conforme mostrado na figura 2.1 ¹.

O estímulo para o suprimento mineral vem basicamente da demanda de mercado de “*commodities*” minerais e da probabilidade de ocorrência física dos respectivos minerais na natureza. A combinação destes dois fatores guia a seleção das “*commodities*” a serem estudadas e dos ambientes geológicos favoráveis para a exploração.

Na fase inicial da exploração geológica, as áreas selecionadas são submetidas às etapas de reconhecimento (sensoreamento remoto, geofísica aérea, geoquímica de sedimentos de corrente) visando-se identificar anomalias para a definição de alvos para a prospecção (fotogeologia, geofísica terrestre, geoquímica de solos, trincheiras, sondagem exploratória). Estes estudos podem resultar na descoberta de mineralizações, ainda de tamanho e valor desconhecidos.

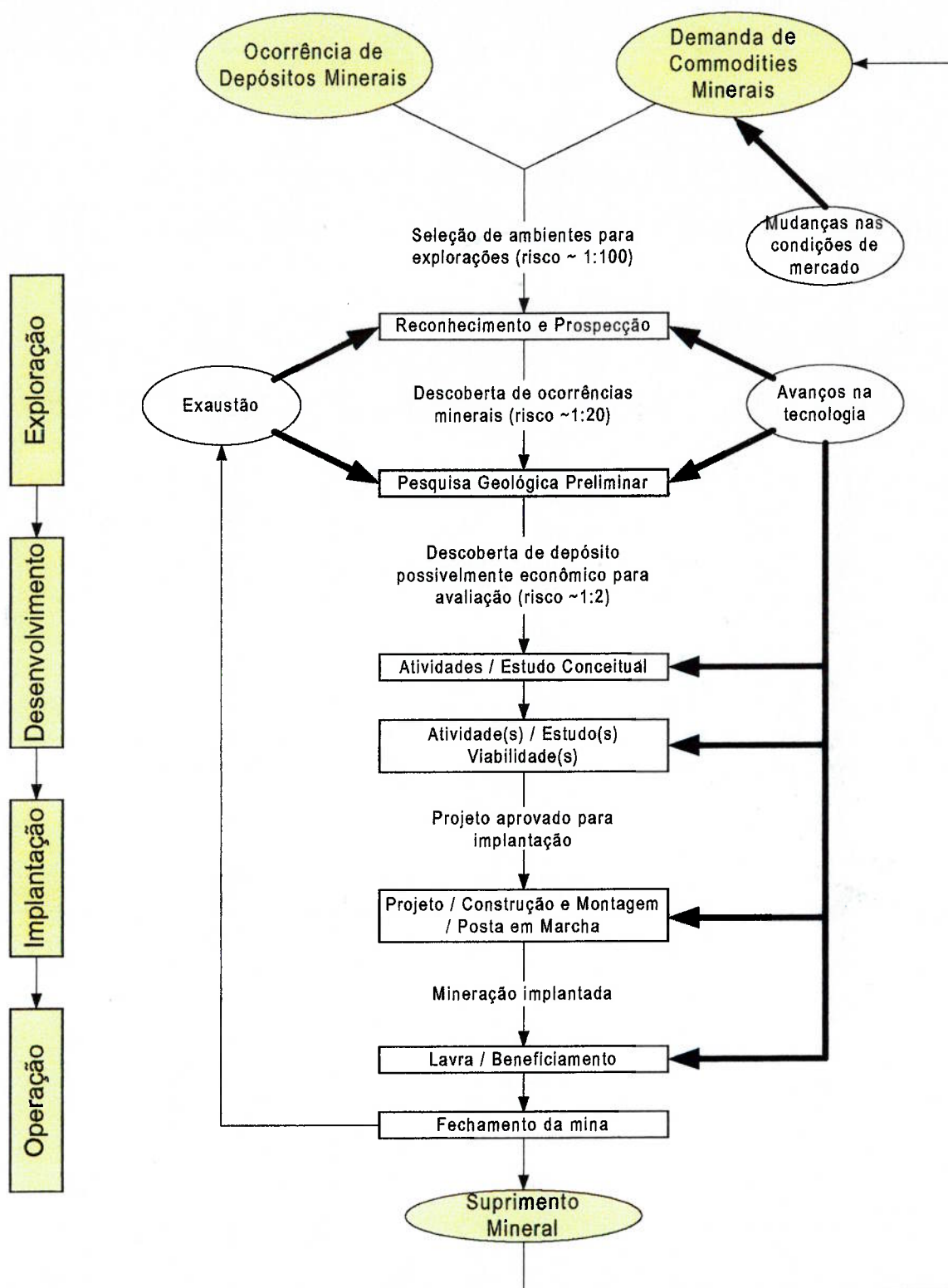


Figura 2.1 Processo de suprimento mineral ^{adaptada 1}

Passa-se então para a fase de pesquisa geológica, procurando-se fazer uma delimitação do depósito suficiente para se decidir pela continuidade ou não dos trabalhos visando-se à implantação do projeto industrial.

As áreas aprovadas na fase de exploração geológica entram para a fase de desenvolvimento. São então realizadas as atividades necessárias ao projeto conceitual e estudo de viabilidade. Em seguida, vem a fase de implantação, incluindo o projeto executivo e a construção e montagem das instalações industriais. A fase seguinte, conduzida pelas áreas operacionais das empresas, consta da produção propriamente dita, com a venda dos produtos ao mercado consumidor.

O processo de suprimento mineral é bastante dinâmico. As condições de mercado (demanda, oferta e preços) geralmente apresentam variações acentuadas em relação ao tempo. Estas variações estão fora do controle das empresas de mineração e, portanto, constituem a maior fonte de riscos para os projetos. A exaustão age no sentido de aumentar os custos de suprimento, uma vez que as jazidas maiores, mais ricas e próximas do mercado consumidor geralmente são as primeiras a serem descobertas. Já os avanços da tecnologia atuam no sentido de reduzir os custos de suprimento, por meio de técnicas de exploração cada vez mais eficientes e melhorias nos métodos de lavra e processamento mineral ^{1, 2}.

O processo de suprimento mineral caracteriza-se pelo alto risco envolvido. A probabilidade de uma área em início de exploração geológica resultar em uma mina economicamente viável costuma ser tão baixa quanto 1:100. Já nas etapas iniciais da delimitação geológica, a probabilidade aumenta para valores da ordem de 1:20, chegando a cerca de 1:2 na etapa de desenvolvimento do projeto. Ou seja, à medida que a exploração geológica avança, os riscos diminuem. Mas, em contrapartida, ocorre um acentuado aumento dos custos, juntamente com a diminuição do número de alternativas (grau de liberdade). Com isto diminui também o controle sobre o processo. Um grande número de áreas sem potencial ou mesmo, com baixo potencial para se tornarem jazidas, vão sendo descartadas progressivamente e os trabalhos vão se intensificando num número de áreas cada vez menor ¹.

É necessário grande conhecimento, habilidade e uma estrutura orientada para evitar descartes de áreas positivas e perda de tempo e gastos desnecessários com áreas negativas. Em decorrência, é conveniente subdividir o ciclo de exploração em uma sequência ordenada de etapas, cujas transições representam pontos importantes de decisão que, a grosso modo, estão associados a saltos de pelo menos uma ordem de magnitude com respeito à redução da área investigada, à densidade de informações, ao montante do investimento aplicado e à probabilidade de sucesso ^{1,3}.

A figura 2.2 mostra uma subdivisão do ciclo de exploração geológica em etapas para otimizar a conversão do potencial geológico em recursos (depósito) e eventualmente em reservas (jazidas). Esta figura mostra também que a exploração geológica pode ser feita desde a seleção inicial de áreas para avaliação de oportunidades específicas (“*grass-roots*”), ou então se iniciar em fase mais avançada por meio de aquisição de áreas ou associações com empresas que já realizaram alguma pesquisa geológica na área (mais comumente na fase de avaliação) ^{4,5}.

A tabela 2.1 mostra as atividades, produtos e as tendências de riscos e custos associados a cada uma das fases do ciclo de exploração mineral.

Tabela 2.1 Atividades e produtos do ciclo de exploração mineral ³

Etapa	Reconhecimento	Prospecção	Pesquisa	Desenvolvimento
Produto	Anomalia	Mineralização	Depósito	Jazida
Atividades	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Geologia regional ➤ Sensoamento remoto ➤ Geofísica aérea ➤ Geoquímica de sedimentos de corrente 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Geologia de semi-detalhe ➤ Fotogeologia ➤ Geofísica terrestre ➤ Geoquímica de solo ➤ Trincheiras ➤ Sondagem exploratória 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Geologia de detalhe ➤ Geoquímica de rocha ➤ Trincheiras ➤ Sondagem ➤ Galerias ➤ Ensaios exploratórios de processo 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Geologia de detalhe ➤ Geoquímica de rocha ➤ Sondagem ➤ Galerias ➤ Ensaios tecnológicos ➤ Geoestatística ➤ Projeto conceitual ➤ Estudo de viabilidade
Riscos	Decrescentes →			
Custos	Crescentes →			

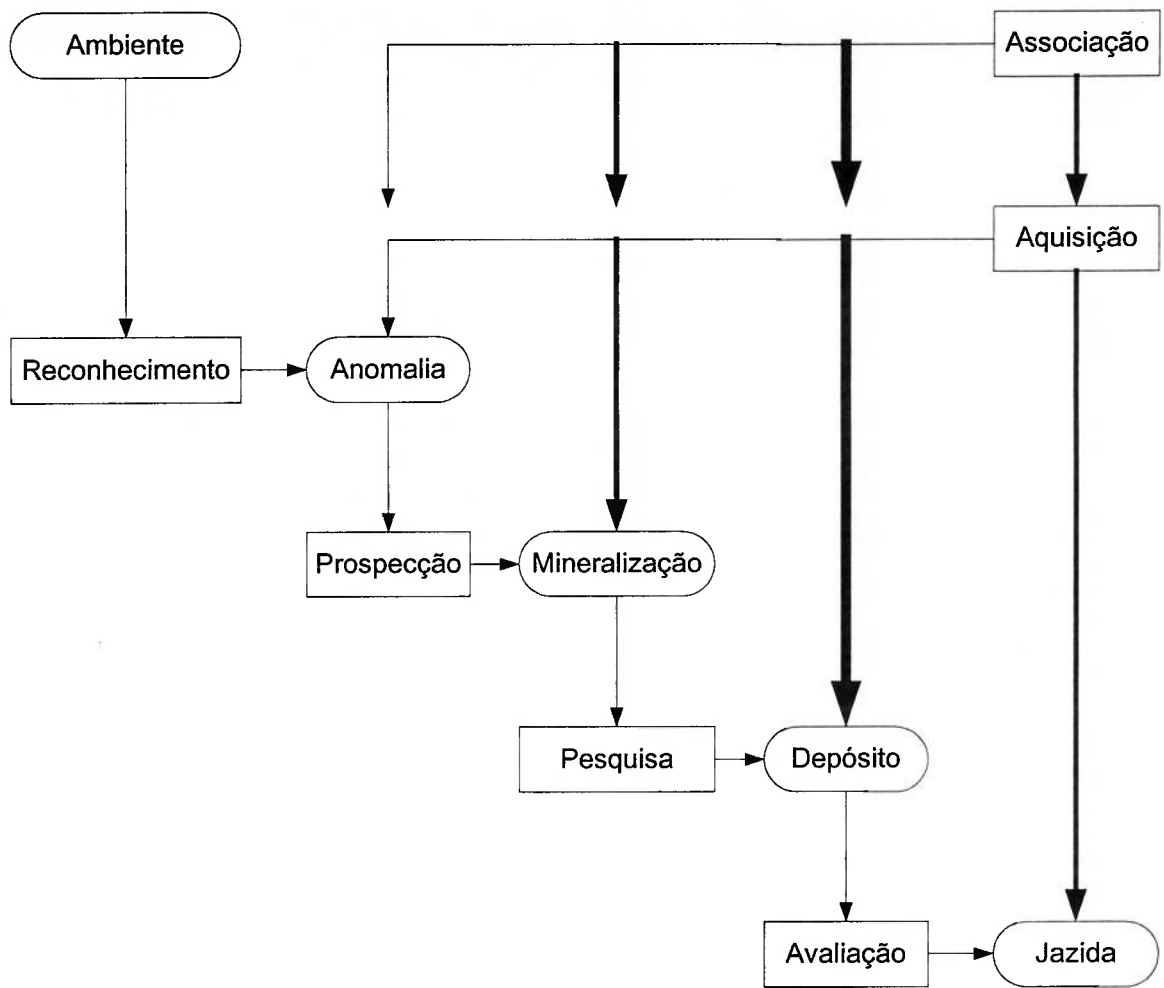


Figura 2.2 Ciclo de exploração mineral ⁴

A passagem do reconhecimento para a prospecção, incluindo-se a seleção dos alvos a serem prospectados, é decidida em função das anomalias encontradas. A passagem da prospecção para a pesquisa pressupõe que foram descobertas mineralizações de interesse.

Os estudos de caracterização tecnológica do minério, ou mesmo ensaios exploratórios de processo, são iniciados na fase de pesquisa, logo após os furos de sondagem interceptarem mineralizações com potencial econômico. Diversos autores chamam a atenção para a importância de se fazerem ensaios tecnológicos desde as fases iniciais da pesquisa geológica, em complementação às análises químicas e mineralógicas normalmente realizadas ^{6, 7, 8, 9}.

Existe um grande número de problemas potenciais de processo que podem transformar um prospecto aparentemente viável num buraco negro para o capital investido na exploração. Os minérios altamente refratários e de teor insuficiente para viabilizar o seu aproveitamento constituem um exemplo familiar na indústria do ouro. É injustificável sondar um depósito em malha reduzida se existe algum problema de processo que pode impedir que ele venha a se tornar uma mina. Neste caso, é mais sensato investir alguns recursos da exploração procurando-se solucionar o problema de processo antes de continuar com a pesquisa geológica⁹.

A passagem da fase de pesquisa para a de desenvolvimento / avaliação dependerá da delimitação de recursos geológicos suficientes para se perceber o potencial econômico do depósito. Esta decisão geralmente é suportada por uma avaliação econômica preliminar baseada em estimativas por ordem de grandeza ou com modelo de custos^{10, 11, 12, 13}. É imprescindível que o grupo que for avaliar se compensa iniciar o desenvolvimento / avaliação do depósito tenha um profundo conhecimento de geologia, lavra e beneficiamento, além de visão holística de projetos e um bom suporte de avaliação econômica. O uso de sistemas especialistas facilita bastante esta tomada de decisão^{3, 14, 15}.

2.2 Desenvolvimento do depósito e projeto conceitual

Uma vez percebido o potencial econômico dum depósito já parcialmente delimitado, passa-se para a fase de desenvolvimento / avaliação. Em muitas empresas, a coordenação dos trabalhos é transferida do grupo de exploração geológica para o grupo de desenvolvimento / avaliação, uma vez que a natureza desta atividade já demanda habilidades diferenciadas e o emprego de uma equipe multi-disciplinar. Nesta etapa são realizadas as atividades necessárias para caracterizar o empreendimento, de modo a gerar as informações para se definir o projeto e demonstrar a sua viabilidade^{1, 3}.

O desenvolvimento / avaliação do depósito usualmente é subdividido em etapas com aproximações sucessivas. Vai-se aumentando gradativamente o número de

informações e o grau de definição do projeto em cada etapa à medida que se caminha da descoberta para produção. Em decorrência, a precisão e o custo também aumentam nesta sequência ^{1, 16, 17, 18}.

Existe uma razão econômica para subdividir a fase de desenvolvimento / avaliação. Como ela caracteriza-se pelo alto risco e consome recursos humanos e financeiros por área bem maiores do que nas fases anteriores, a sua subdivisão permite descartar áreas antieconômicas o mais cedo possível, evitando-se, assim, substanciais dispêndios de tempo e dinheiro. A cada passo, procura-se gastar o mínimo, mas de um modo objetivo e orientado a conhecer melhor as componentes do problema. O impacto dos gastos efetuados muito antes do início de geração de receitas é acentuado pelo efeito das taxas de descontos no cálculo dos fluxos de caixa descontados para obter os indicadores econômicos do projeto ^{1, 17}.

Em geral, as etapas de desenvolvimento / avaliação são estabelecidas de acordo com o processo decisório do projeto. Como estas decisões são suportadas por estudos de engenharia, são eles que definem as etapas. Os estudos de engenharia apresentam requisitos e nomenclatura variáveis de empresa a empresa, e mesmo de caso para caso. No entanto, existe uma tendência de se usar até quatro níveis de estudos até a definição final do projeto ^{9, 16, 17, 19, 20}:

- avaliação preliminar;
- estudo conceitual (“*scoping study*”);
- estudo de pré-viabilidade ou segunda etapa do estudo conceitual;
- estudo de viabilidade final.

Esta divisão está relacionada aos objetivos das decisões a serem tomadas em cada etapa. A avaliação preliminar pode ser utilizada para se decidir pelo desenvolvimento do depósito, conforme mencionado no item anterior, ou mesmo para a comparação preliminar de alternativas. Já o estudo conceitual tem por objetivos caracterizar o empreendimento, verificar se compensa continuar com a pesquisa geológica e desenvolvimento do processo e, em caso positivo, programar o que é importante estudar nas etapas futuras. O estudo de pré-viabilidade, ou segunda etapa do

estudo conceitual, já faz uso mais intensivo de engenharia para fazer uma avaliação mais realista e precisa da viabilidade do projeto. Já no estudo de viabilidade final chega-se à concepção definitiva do projeto, que vai servir de base para o projeto executivo, decisão final de implantação e contratar financiamentos.

Algumas etapas destes estudos podem ser suprimidas face às características específicas dos projetos. Por exemplo, em passado recente, a implantação de muitos projetos de ouro de elevada rentabilidade foi aprovada com apenas uma etapa de viabilidade ³. Contudo, o Autor considera que, para minimizar riscos de projetos inseridos em programas sistemáticos de exploração geológica na atual conjuntura de preço do ouro, é recomendável utilizar pelo menos duas ou três etapas decisórias. A cada etapa cumprida, a decisão de continuar ou desistir é tomada com segurança sempre crescente, permitindo priorizar as áreas mais promissoras para estabelecer empreendimentos mineiros. Um maior número de alternativas criadas no início, resultará na seleção de projetos de maior probabilidade de sucesso.

As três primeiras etapas destinam-se a demonstrar que a exploração de um dado depósito mineral é economicamente viável, sem chegar, contudo, à definição do projeto para implantação. Ou seja, o produto destas etapas é claramente uma jazida. Já no estudo de viabilidade final chega-se à concepção definitiva do projeto. Os estudos de engenharia vão servir de base para o detalhamento, construção e montagem das instalações industriais. Assim, as atividades do estudo de viabilidade final são mais pertinentes à implantação do projeto, cujo foco é gerar minas. Por razões práticas e foco nos resultados, a coordenação do estudo de viabilidade final é frequentemente transferida do grupo de desenvolvimento para o grupo de implantação de projetos. Contudo, esta transição não se dá bruscamente. A participação do grupo de implantação de projetos inicia-se na fase de desenvolvimento / avaliação, como apoio aos estudos conceituais e de pré-viabilidade. Após a transferência de gerenciamento, o grupo de desenvolvimento continua a participar do projeto, agora em apoio às atividades coordenadas pelo grupo de implantação.

As decisões após cada etapa dos estudos de engenharia são tomadas em condições de incerteza, que têm duas origens principais: as características do depósito e os fatores externos (figura 2.3). Apesar das características do depósito já serem parcialmente conhecidas na época da tomada de decisão, elas não podem ser completamente examinadas. Por sua vez, os fatores externos somente vão ser completamente conhecidos com o passar do tempo. Em condições de incerteza, as alternativas de investimento podem ser avaliadas baseadas em critérios de valor esperado e critérios de risco. Os critérios de valor esperado medem a atratividade econômica para empreendimento para as condições esperadas para o projeto (ponto único). Para tanto, são utilizados indicadores econômicos como valor presente líquido (VPL), eficiência do capital (relação valor presente líquido / valor presente do investimento: VPL / VPI) e taxa interna de retorno (TIR). Alguns empreendedores também consideram o período de retorno do capital investido (*“pay-back time”*), principalmente nas situações de maior risco. Os critérios de risco traduzem as incertezas percebidas para o depósito e para os fatores externos em uma distribuição de probabilidades em torno do valor esperado. Em complementação a estes critérios, o processo de decisão deve considerar fatores intangíveis¹.

As incertezas vão sendo resolvidas gradativamente à medida que a lavra da mina prossegue, possibilitando melhorar o grau de informações e a qualidade das decisões futuras. As informações de retorno dos projetos anteriores (*“feed-back”*) são extremamente importantes para guiar as decisões futuras por ocasião do desenvolvimento de novos projetos.



Figura 2.3 – Processo de decisão para o desenvolvimento de minas¹.

O valor percebido pelo mercado para uma propriedade mineral evolui de acordo com os avanços dos estudos, conforme mostrado na figura 2.4. A maior parte da agregação de valor num novo projeto ocorre até o estudo de viabilidade final ²¹.

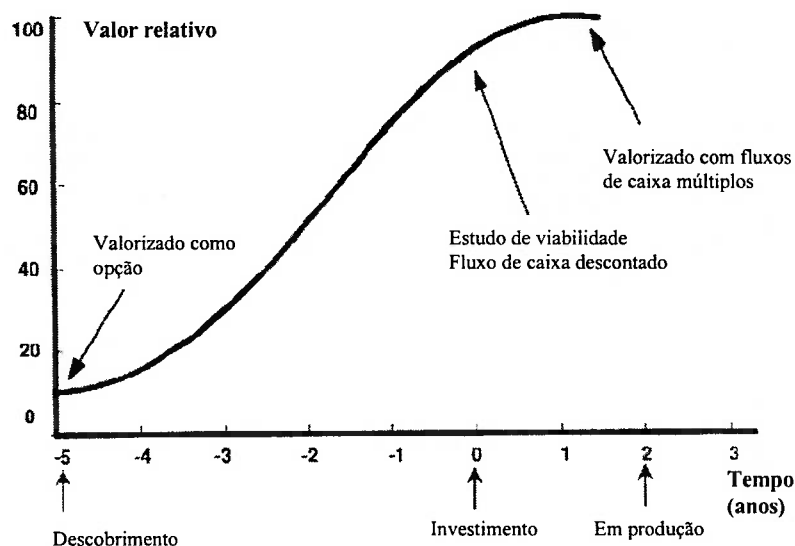


Figura 2.4 – Valor relativo de uma propriedade mineral ²¹

2.2.1 Avaliação preliminar

Trata-se de um estudo inicial, sucinto e de baixo custo, que se presta para avaliar oportunidades com rapidez e decidir se compensa ou não arcar com os gastos em geologia e desenvolvimento, ou então, desistir do negócio. Nesta etapa, as informações disponíveis são escassas, o conhecimento da jazida é precário e a caracterização do minério altamente preliminar e pouco representativa. Torna-se necessário estabelecer hipóteses de trabalho pouco sólidas para fazer esta avaliação. Utilizam-se amplamente informações de empreendimentos e minas similares e agrega-se o impacto das condições próprias do local da jazida sobre investimentos e custos operacionais. O grau de subjetividade envolvido nesta avaliação é muito grande e, portanto, sempre haverá campo para controvérsia e discussão. Este estudo descreve uma instalação hipotética e raramente se torna base até mesmo para o projeto conceitual. Serve para rejeitar um

projeto, mas raramente é utilizado para a sua aceitação. A precisão é muito baixa, da ordem de +50 a - 30%. ¹⁷.

2.2.2 Estudo conceitual

O estudo conceitual (“*scoping study*”) geralmente é a primeira etapa do desenvolvimento do projeto. Destina-se a caracterizar o empreendimento, dando toda a atenção aos aspectos fundamentais do projeto, sem se distrair com problemas menores do ponto de vista de definição do negócio. As informações geradas servirão para suportar uma decisão de parar ou continuar e, neste caso, para definir e priorizar os estudos futuros. A boa condução do projeto vai depender da qualidade do estudo conceitual. Desta maneira, a equipe utilizada deve ser forçosamente sênior e altamente qualificada ¹⁷.

O estudo conceitual deve ^{1,22} :

- estabelecer objetivos e estratégias claras;
- estabelecer modelos geológicos e estimativa de recursos preliminares;
- definir características geológicas e metalúrgicas dos minérios;
- levantar dados geotécnicos / hidrogeológicos preliminares;
- avaliar, mesmo de maneira preliminar, os aspectos ambientais relacionados à implantação, operação e encerramento do empreendimento;
- encontrar questões críticas e verificar se existem problemas fatais;
- levantar aspectos legais;
- definir recursos de infra-estrutura necessários;
- estabelecer critérios de projeto preliminares;
- fazer uma concepção preliminar para o empreendimento;
- estimar o investimento, custo operacional e receitas;
- estabelecer programas de atividades, cronograma e orçamentos para as próximas etapas;
- fazer uma avaliação econômica preliminar;
- decidir continuar / parar.

Uma vez tomada a decisão de iniciar a fase de desenvolvimento do depósito, o grupo de trabalho reúne-se para analisar todas as informações existentes e programar os trabalhos necessários para se fazer o projeto conceitual, entre elas as atividades de geologia, desenvolvimento de processo, geotecnia, hidrogeologia, estudos ambientais. Ou seja, antes mesmo de se fazer o estudo conceitual propriamente dito, a equipe que vai conduzi-lo deve definir quais complementações serão necessárias em relação aos trabalhos já existentes. A integração das equipes é importante para ir desenvolvendo o estudo conceitual de maneira gradativa e interativa. Por exemplo, uma idéia dos limites da mina, método de lavra e locais por onde a operação será iniciada é importante para definir o plano de amostragem para caracterização do minério e ensaios de beneficiamento ¹⁷.

Geralmente, são necessários os seguintes dados para se fazer o projeto conceitual ^{14, 16, 22}:

- sondagens preliminares e resultados de análise químicas e mineralógicas suficientes para delimitar e caracterizar os corpos minerais e estimar suas reservas e recursos;
- estudos de caracterização tecnológica do minério e de desenvolvimento de processo;
- detalhes da infra-estrutura existente;
- detalhes do local e limitações para o plano diretor do projeto;
- aspectos externos ao projeto, como preços do metal e de insumos (posto no local), política governamental, legislação ambiental.

O relatório final do estudo conceitual deve incluir ^{16, 17, 22}:

- definição preliminar do projeto (capacidade, produtos, recuperações, regime de operação, eficiência operacional, etc.);
- plano diretor preliminar do complexo, com localização das unidades produtivas, auxiliares e vias de acesso;
- seleção do(s) método(s) de lavra e estimativa de reservas;

- seleção do processo de tratamento, com fluxograma e balanço de massa preliminares (se cabível, a seleção de processo deve ser fundamentada em um estudo de alternativas);
- lista dos equipamentos principais (opcional se a empresa possuir projetos similares que sirvam de modelo para o estudo);
- avaliação preliminar do impacto ambiental e identificação dos aspectos ambientais a serem investigados;
- definição da infra-estrutura necessária, incluindo edifícios auxiliares, administrativos, utilidades;
- estimativa preliminar dos investimentos e custos operacionais.
- análise de sensibilidade das principais variáveis;
- levantamento de questões críticas e de ações para o seu estudo;
- planejamento simplificado para a implantação do projeto;
- orçamento para as próximas etapas.

A tendência entre as grandes empresas de mineração é desenvolver esta atividade por meio de uma equipe própria, pequena, altamente experiente e que incorpore o conhecimento da empresa nas tecnologias chave para o negócio. Normalmente, estas tecnologias chave incluem áreas específicas da geologia, lavra e processamento mineral. As áreas de conhecimento não cobertas pela empresa são complementadas pela contratação da melhor consultoria possível. Empresas menores geralmente contratam este serviço, uma vez que neste caso não compensa manter um grupo permanente altamente qualificado.

A seleção da rota de processo, em muitos casos, é feita no estudo conceitual com o uso de fluxo de caixa descontado. As estimativas de investimento são frequentemente realizadas utilizando-se o conhecimento e estimativas de custos atualizadas de projetos anteriores ²². Em alguns casos usam-se modelos de custos, ou mesmo estima-se o investimento a partir do custo dos principais equipamentos. O emprego de sistemas especialistas facilita bastante esta tarefa ^{14, 15}.

A precisão das estimativas é baixa, $\pm 30\%$ (alguns autores preferem indicar -30% a $+35\%$). Portanto, este estudo não deve ser utilizado para assegurar a viabilidade do empreendimento e sim para rejeitá-lo ou, caso contrário, organizar e planejar as atividades futuras para verificar a sua viabilidade. O nível de engenharia utilizado é desprezível em relação ao total do projeto ²⁰.

2.2.3 Estudo de pré-viabilidade ou segunda etapa do estudo conceitual

Após um avanço suficiente das investigações em geologia, geotecnia, hidrogeologia, processamento mineral e levantamento de informações, elabora-se o estudo de pré-viabilidade. Seu objetivo é verificar a viabilidade preliminar do projeto, estabelecendo para tanto um orçamento preliminar para o empreendimento, o custo operacional e a receita. Este estudo descreve a instalação que provavelmente será construída, sem contudo servir de base para o projeto executivo ^{1, 17}.

Trata-se de um estudo mais detalhado do que o anterior, com uso mais intensivo de engenharia, geralmente contratada de empresas projetistas. Este estudo, de âmbito preliminar inclui ^{16, 17, 22}:

- plano de lavra e estimativa de reservas;
- fluxograma de processo e balanço de massas;
- lista dos principais equipamentos com potência;
- plano diretor;
- plantas e seções da mina e instalações de processo;
- diagramas elétricos unifilares e de instrumentação;
- identificação e discussão dos fatores ambientais, com destaque para os já finalizados;
- necessidade de infra-estrutura;
- cotação simples para os principais equipamentos e estimativa de investimento por fatoramento;
- análise econômica com fluxo de caixa descontado;
- análise de sensibilidade para as principais variáveis;

- cronograma do projeto com indicação do caminho crítico.

A precisão aceita para o estudo de pré-viabilidade é de $\pm 20\%$, sendo que alguns autores indicam $-20\% +25\%$ ^{19, 20}. O nível de engenharia necessário para atingir este grau de precisão é de até 30% do total requerido para a implantação do projeto ²⁰. Entretanto, na maioria dos casos, o nível de engenharia deve ficar na faixa de 5 a 10%.

2.2.4 Estudo de viabilidade final

Este estudo necessita atender todos os requisitos para obter a aprovação dos diretores da própria empresa para a implantação do projeto, como também para contratar financiamentos (“*project finance*”). Um estudo neste nível normalmente é considerado como um documento bancável.

Para tanto, toda a sondagem, análises mineralógicas, estudos hidrogeológicos, estudos geotécnicos e ensaios metalúrgicos devem estar concluídos. Parte-se, então, para a revisão / complementação das atividades de engenharia realizadas na etapa anterior, para se chegar ao nível de detalhe e precisão requeridos pelo estudo de viabilidade final ^{16, 17, 22}:

- projetos de lavra e de processo otimizados e definitivos;
- projeto de infra-estrutura definitivo;
- lista de equipamentos definitiva, com especificação detalhada para os principais equipamentos;
- plano diretor e desenhos de arranjo geral da instalação definitivos e detalhados;
- levantamento de quantitativos para construção e montagem;
- orçamentação baseada em cotação múltipla para os equipamentos, quantitativos com preços unitários correntes, tomada de preços para os serviços de construção civil;
- estimativa do custo operacional baseada em consumos unitários definitivos, custos unitários e peças de manutenção correntes ou cotados por carta.

- análise econômica e financeira definitiva para subsidiar a decisão final de se implantar o projeto ou não.

Um estudo bancável deve ser suficientemente detalhado e demonstrado. Ele deve responder a todas as perguntas que os banqueiros e seus auditores fazem para avaliar se os riscos do projeto são aceitáveis e se ele é viável a ponto de ser financiado²³. Os banqueiros são cépticos e praticamente não acreditam em opiniões subjetivas. Desejam ver todas as considerações suficientemente comprovadas. Um levantamento sobre a opinião de cinco banqueiros, manifestadas durante a Seção de Financiamento de Projetos do 47º Encontro Anual da SME, realizado em Denver em 1997, permite identificar as principais preocupações que eles têm ao analisar um estudo de viabilidade final²⁴.

- As reservas e geologia constituem a principal preocupação, por constituírem a causa principal de insucessos de projetos minerais. Por isto, existe uma tendência em se aumentar o rigor nas auditorias sobre a geologia e estimativa de reservas, com foco na verificação da metodologia utilizada, nível de confiança da estimativa e divisão das reservas em classes.
- Os custos operacionais e a rota de processo também merecem grande atenção. Em geral, a economia do projeto é muito sensível aos custos operacionais. Os ensaios metalúrgicos e a seleção da rota de processo são cuidadosamente analisados, uma vez que determinam a recuperação metalúrgica e a qualidade dos produtos e rejeitos finais. A recuperação é uma das variáveis que mais impactam a rentabilidade, e os banqueiros estão muito atentos à variabilidade de recuperação da jazida e aos protocolos de amostragem e análises que suportam a estimativa destas recuperações. De preferência, deve-se ter o apoio de estudos inter-laboratoriais.
- Em seguida, os banqueiros estão atentos às estimativas de investimento, receitas, fluxos de caixa e análises econômicas e financeiras. Preocupam-se com o investimento total e a precisão da estimativa, contingências para fazer frente a um estouro de orçamento e provisões de capital para custos como capital de giro, contratação de financiamentos, royalties, impostos. O estouro

de orçamento é uma das grandes preocupações dada a grande incidência deste problema nos projetos minerais.

- A proteção ambiental é tema de grande importância e preocupação não só para as empresas de mineração, mas também para a comunidade financeira. Os banqueiros desejam ver um cronograma claro para o processo de licenciamento ambiental, com uma estimativa de prazos realista (conservadora), que identifica os principais marcos e dificuldades. Requerem adesão aos padrões ambientais do Banco Mundial e a consideração de questões ligadas às comunidades locais.

2.3 Avaliação “*ex-post*” de projetos minerais

A avaliação “*ex-post*” de projetos é importante para verificar o grau de sucesso obtido em atingir os seus objetivos e determinar os fatores que contribuíram para tal. Esta avaliação é feita pela comparação dos planos do projeto com os resultados práticos obtidos após alcançar a operação de rotina, procurando-se explicar as diferenças relevantes entre eles. Tal prática permite um aprimoramento constante dos procedimentos para os trabalhos futuros^{25, 26}.

O fraco desempenho apresentado pela indústria mineral tem preocupado os gerentes da área. Hickson²⁷ revela um panorama preocupante. Afirma que pouco mudou após o clássico estudo do United States Bureau of Mines realizado nos anos 70, que mostrou que entre 50 e 60% das minas desenvolvidas nos Estados Unidos, desde o início do século, não deram retorno algum para os acionistas e, ainda, apenas uma entre 10 minas apresentaram níveis superiores de retorno. Demonstra esta afirmação com uma pesquisa sobre o retorno para os acionistas de 45 tipos de indústrias: no final da década de 90, a indústria mineral ficou num lamentável 41º lugar.

O baixo retorno da indústria mineral para os acionistas também tem sido constatado por diversos outros autores, como Benson²¹ e Champigny^{28, 29}. Entretanto, ambos reconhecem que os projetos com jazidas de classe mundial (“*world class deposits*”) tendem a dar bons retornos para os acionistas. A probabilidade de se

encontrarem tais jazidas é maior em países pouco conhecidos geologicamente como o Brasil, o que coloca o País em boa posição competitiva para novos investimentos em exploração geológica ³⁰.

O sucesso de um projeto pode ser definido segundo vários critérios, como por exemplo, a conclusão dentro do prazo e do orçamento e a obtenção das metas de produção e rentabilidade previstos. Visando-se aumentar o nível de sucesso na implantação de novos projetos, algumas empresas, como a Cyprus Amax (adquirida no final de 1999 pela Phelps Dodge) têm desenvolvido procedimentos formais, institucionalizados, visando garantir um trabalho objetivo, independente, isento de euforias ou de conflitos de interesses. Tais procedimentos integram todas as disciplinas envolvidas no projeto e estabelecem as melhores práticas para a sua conceituação e execução. Um grande enfoque é dado às práticas para evitar erros, incluindo-se análises críticas pelo pessoal da operação, auditorias externas, além de submeter os principais componentes do projeto a um "*benchmarking*" rigoroso. A Cyprus considera que um projeto para ser bem sucedido necessita ^{27,31} :

- ser concluído dentro do cronograma;
- ser concluído dentro do orçamento;
- atingir as metas de produção;
- obter o custo de produção dentro do período de aprendizado previsto;
- não ter acidentes com perda de tempo;
- estar de acordo com os requisitos ambientais.

Champigny ²⁸ considera fatores de sucesso semelhantes. Ele observou, ainda, que o grau de conhecimento geológico influencia claramente o sucesso de um projeto mineral. Como é muito mais difícil atingir um bom nível de conhecimento geológico numa jazida de ouro do que, por exemplo, em jazidas de cobre do Chile, maiores e mais homogêneas, não foi surpresa que o nível de sucesso encontrado por ele numa amostragem de 8 projetos de ouro na América Latina tenha sido de apenas 40%.

Para aprimorar os procedimentos para desenvolver e implantar projetos minerais com rentabilidades aceitáveis, é necessário conhecer as causas para os níveis de sucesso

relativamente baixos. Sem dúvida, a ciclicidade dos preços dos produtos minerais constitui uma das principais causas de risco. Mas, infelizmente, os preços estão fora do controle das empresas de mineração. Entretanto, um estudo de mercado metuculoso para estimar os preços a serem utilizados no estudo de viabilidade atenua um pouco este risco. Outra ação frequentemente adotada pelas empresas de mineração para minimizar o impacto de uma possível baixa de preços é buscar desenvolver projetos de baixo custo caixa de produção, uma vez que os preços possuem a tendência de cair em linha com a redução destes custos, que são influenciados pelos produtores de menor custo ²¹. O custo caixa de produção, conforme referido pelas empresas do setor do ouro, considera todos os custos operacionais no local da mina, “royalties” baseados na receita e custos de venda, deduzidos de todos os créditos referentes a subprodutos. Não estão incluídos os custos de exploração, depreciação, amortização, exaustão e outras despesas que, acrescidos ao custo caixa, compõem o custo total de produção, como referido em publicações internacionais como as do Gold Council, que servem de balizamento para as empresas produtoras de ouro ³².

As outras causas usualmente apontadas para o insucesso de projetos estão, de alguma forma, sobre o controle das empresas de mineração e podem ser evitados ou minimizados por meio de procedimentos adequados ^{27, 28, 29, 33, 34}:

- reservas e teores superestimados;
- recuperações subestimadas;
- diluição do teor subestimado;
- variações na moabilidade do minério não quantificadas;
- custo caixa operacional sub-avaliado;
- estouro do investimento estimado;
- estouro no cronograma do projeto;
- metas ambientais não atingidas;
- índices de segurança do trabalho inaceitáveis;
- avaliação inadequada das tecnologias de processo;
- falta de uma boa caracterização e planejamento no início do projeto;
- urgência e otimismo exagerado desde os estudos de viabilidade até a entrada em operação do projeto;

- práticas gerenciais inadequadas, como falta de procedimentos formais para execução e controle das atividades, trabalho em equipe deficiente, pouco uso de “*feed-back*”, falta de auditorias de rotina;
- relacionamento deficiente com as comunidades locais.

Os projetos minerais envolvem riscos que podem ser classificados em cinco categorias ³⁵:

- riscos geológicos (forma, tamanho e reservas do corpo mineral);
- riscos de desenvolvimento do projeto e construção (capacidade das empresas concluírem o projeto dentro do custo e conforme desempenho previsto);
- riscos de operação (composição mineralógica, teores, processo para recuperação metalúrgica e qualidade e desempenho da equipe de operação);
- risco de “*commodity*” (volatilidade dos preços e demanda do mercado);
- riscos específicos do local (responsabilidades sociais e ambientais, riscos políticos).

Os riscos geológicos podem ser mitigados por uma avaliação independente dos trabalhos de geologia. Os riscos de desenvolvimento do projeto e construção podem ser minimizados contratando-se construtores experientes, fazendo-se seguro, celebrando-se contratos “*turn-key*” ou com garantia de desempenho. Os riscos operacionais podem ser reduzidos por um exaustivo programa de ensaios para desenvolvimento do processo e uso de pessoal de operação de alta qualificação e experiência. Os riscos de “*commodity*” dependem das condições do mercado, mas podem ser minimizados por meio de contratos de longo prazo. Finalmente, os riscos ambientais, levantados pela avaliação das condições locais antes do projeto, podem ser mitigados utilizando-se práticas ambientais e de remediação de aceitação internacional.

Já os riscos políticos são mais complexos. Eles são característicos de cada local e podem incluir desde mudanças de legislação, notadamente tributária, mudanças de política econômica, até problemas de corrupção, ditadura, agitação social, lutas armadas, que podem trazer grandes incertezas para as empresas de mineração. Apesar do equacionamento destes riscos estar fora do controle das empresas de mineração, eles

devem ser cuidadosamente considerados para a decisão de investir ou não em um novo projeto.

2.4 Ensaios para desenvolvimento de processo

Os ensaios tecnológicos e o desenvolvimento de fluxogramas de processo possuem, em última instância, o objetivo de garantir o projeto duma usina confiável, flexível e simples de operar e manter. Os ensaios devem demonstrar a adequação do minério ao processo e prover as bases para a concepção do processo e avaliação econômica. As decisões relativas ao desenvolvimento de um fluxograma de processo são baseadas em duas considerações:

- retorno financeiro;
- riscos e incertezas do processo.

Os ensaios devem se concentrar nas áreas de maior incerteza e/ou onde grandes ganhos econômicos podem ocorrer. A análise da sensibilidade das diversas variáveis do processo sobre a rentabilidade do empreendimento é de grande utilidade nas etapas iniciais do projeto, no sentido de focalizar as áreas de maior importância econômica e assim, estabelecer as prioridades para os ensaios ⁷.

Os autores geralmente dividem os ensaios de processo em duas ou três etapas. Marsden ³⁶ considera o desenvolvimento de processo para ouro em duas etapas: ensaios preliminares e ensaios de otimização, talvez sugerindo uma vaga idéia que a primeira etapa estaria relacionada ao estudo de pré-viabilidade e a segunda etapa ao estudo de viabilidade final.

Os ensaios metalúrgicos preliminares são feitos em amostras de pequeno volume (ordem de quilogramas ou fração) e representatividade geralmente limitada a pequena parte do depósito. Mesmo assim, minimizam o risco do empreendimento paralelamente à ampliação do conhecimento do depósito, bem como podem levar a um eventual redirecionamento dos trabalhos de pesquisa geológica ⁶. Nesta fase inicial, os ensaios tecnológicos devem se limitar a processos convencionais para evitar altos custos sem

necessidade. Se o minério não responder adequadamente a estes processos, só então deve-se considerar o desenvolvimento de um novo processo, geralmente uma atividade de alto custo e risco⁸.

A fase seguinte consta de ensaios em laboratório para estabelecer um fluxograma básico e seus parâmetros de processo, as recuperações metalúrgicas, os consumos de reagentes e os principais equipamentos. É de grande importância individualizar um ou mais tipos de minério, que devem ser devidamente amostrados para se obter amostras representativas, da ordem de centenas de quilogramas, para os ensaios em laboratório.

Para a retirada de uma amostra representativa é necessário um trabalho integrado, com grande cooperação entre os geólogos, engenheiros de lavra e engenheiros de tratamento. A amostra deve representar o material que será enviado para o beneficiamento em todos os aspectos, incluindo-se a diluição prevista na lavra. Caso sejam esperadas variações nas características dos minérios ao longo da vida do empreendimento, devem-se providenciar amostras que representem estas variações. O manuseio, embalagem e estocagem da amostra devem merecer também cuidados especiais para evitar problemas, como por exemplo, a oxidação de sulfetos, que geralmente ocorre quando as amostras ficam expostas prolongadamente ao tempo³⁷.

Quando necessário, numa etapa seguinte, são realizados ensaios contínuos em usina piloto para verificar se os parâmetros obtidos em escala de bancada são aplicáveis a um processo contínuo, ou para obter os fatores de “*scale-up*”. São avaliados os efeitos da recirculação de materiais e determinados certos parâmetros possíveis apenas por meio de ensaios contínuos. Os ensaios piloto são conduzidos em amostras de grande volume, da ordem de toneladas⁶. Quando os minérios de ouro respondem bem aos ensaios de laboratório envolvendo cianetação, adsorção em carvão ativado ou cementação, normalmente não são feitos ensaios piloto. O domínio de tais processos permite escalonar com segurança os parâmetros de projeto obtidos na escala de laboratório. Os ensaios piloto com minérios de ouro restringem-se usualmente aos casos onde a pré-concentração por flotação seja necessária, ou quando a polpa contém

substâncias dissolvidas capazes de interferir nas etapas de recuperação do ouro solubilizado (por exemplo alto teor de cobre), ou ainda em caso de processos inovadores (por exemplo, resina em polpa).

O desenvolvimento do processo de lixiviação de um minério pode ser explicado a partir da figura 2.5. Amostras de pequeno volume e representatividade limitada são submetidas à caracterização química, mineralógica e ensaios metalúrgicos preliminares. Os resultados obtidos são usados em conjunto com as informações de jazidas similares

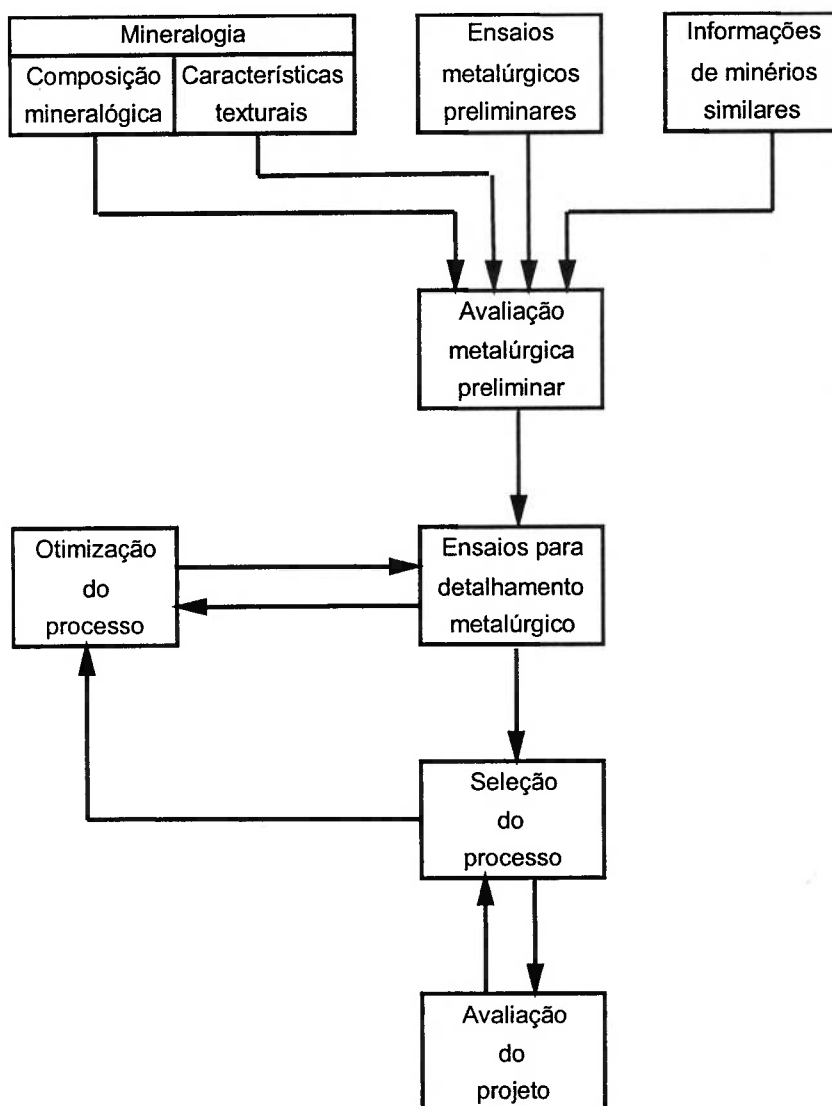


Figura 2.5 - Desenvolvimento de processo para o beneficiamento de minérios de ouro ³⁶

(se disponíveis) para definir o(s) processo(s) a ser(em) detalhados na etapa seguinte. Nesta etapa, os ensaios metalúrgicos são feitos com mais detalhes, no sentido de possibilitar a otimização / seleção do processo ³⁶.

A composição química do minério é determinada por métodos de análises tradicionais como absorção atômica (AAS), plasma (ICP), fluorescência de raios-X (XRF). No caso do ouro e outros metais preciosos, a análise mais comum é por fusão-copelação, mas também podem ser empregados métodos de AAS, ICP, lixiviação com cianeto e separação física (bateamento e amalgamação). Para cada teor existe um ensaio de melhor precisão analítica ^{36, 38, 39, 40}.

As características texturais, as associações do ouro e dos minerais, são determinadas por meio de técnicas de microscopia óptica e de varredura eletrônica, difratometria de raios-X, bem como por ensaios de diagnóstico de lixiviação. As técnicas de microscopia estão restritas a avaliações qualitativas ou semi-quantitativas, principalmente devido aos baixos teores envolvidos. Já os ensaios de diagnóstico de lixiviação foram desenvolvidos para quantificar as associações do ouro. Constam de uma série de lixiviações, cada uma mais agressiva do que a anterior, combinadas com cianetações intermediárias. Assim, pode-se determinar o ouro livre (cianetável); ouro incluso em óxidos, carbonatos e pirrotita; ouro incluso nos demais sulfetos; ouro associado a material carbonoso; ouro incluso em silicatos. A metodologia deve ser adaptada a cada tipo de minério ^{36, 41, 42, 43}.

Os ensaios de lixiviação são realizados em garrafão sobre mesa de rolos ou então em béqueres com agitação. Podem ser estudados uma série de fatores, como efeito de pré-concentração, pré-aeração, granulometria de moagem, densidade de polpa, concentração de reagentes. São determinadas as extrações de ouro, o tempo de residência e o consumo de reagentes ³⁶.

O desenvolvimento de processos envolvendo circuitos de lixiviação em tanques agitados pode ser feito de modo relativamente rápido, geralmente entre 3 e 6 meses, caso as amostras necessárias estejam disponíveis. O escalonamento dos resultados dos

ensaios para a usina industrial é relativamente fácil e dificilmente apresenta as surpresas desagradáveis da lixiviação em pilhas ⁹.

2.5 Fatores que afetam a seleção do processo

A seleção do processo é um procedimento interativo que inicia-se tão logo seja detetado um depósito com tonelagens e teores suficientes para se antecipar um potencial econômico. Os riscos associados podem ser minimizados por meio de um programa de ensaios bem estabelecido e de uma cuidadosa atenção a todos os requisitos do projeto, incluindo-se o capital disponível, meta de rentabilidade, nível aceitável de riscos e fatores de proteção ambiental. A seleção do processo é feita com o objetivo de garantir o maior benefício econômico, contanto que sejam satisfeitos os outros requisitos do projeto, como o atendimento da legislação ambiental, de fatores políticos e a manutenção de um nível de risco aceitável ^{36, 44}.

A seleção do processo depende de um grande número de fatores, sendo a mineralogia um dos mais importantes. Contudo, o conhecimento da mineralogia, por mais detalhado que seja, é apenas um ponto de partida. São necessário ensaios para determinar como alguma amostra específica irá responder a uma rota de processo. Pode ser necessária mais de uma rota de processo para tratar diferentes tipos de minérios de um mesmo depósito. A quantidade e o tempo requerido para os ensaios dependem das necessidades dos estudos de engenharia ⁹.

Os seguintes fatores afetam a seleção de processo ^{1, 36, 44, 45} :

- geológicos;
- metalúrgicos;
- ambientais;
- mercado;
- políticos.

2.5.1 Fatores geológicos

Para minérios de fácil processamento, teores de ouro baixos e reservas pequenas favorecem o uso de lixiviação em pilhas ou em “dumps”. Os processos com moagem e cianetação, com ou sem pré-concentração, são viabilizados por teores mais elevados e reservas maiores. O teor de corte entre estes dois processos depende da recuperação metalúrgica do ouro, dos custos de produção, do preço do metal e das reservas. Minérios complexos e refratários necessitam de teores relativamente elevados para compensar os custos adicionais de tratamento oxidativo. As reservas e teores de outros minerais de interesse também podem influenciar a seleção do processo ³⁶.

A geometria dos corpos minerais afeta a diluição e a sequência de lavra de diferentes tipos de minério, o que pode acarretar consequências ao processo. Uma série de outras características influencia significativamente a seleção do processo, como composição mineralógica do minério e das encaixantes, resistência à moagem (“*work index*” de Bond, “*dropt weight test*” – DWT e “*SAG power index*” – SPI), composição mineralógica, grau de alteração, fraturamento e competência do minério e das rochas encaixantes, presença de argilas, presença de material carbonoso, variabilidade do minério (mineralogia, recuperação de ouro, resistência à moagem, consumo de cianeto) ³⁶.

2.5.2 Fatores metalúrgicos

A resposta metalúrgica de um minério aos processos guia a seleção da melhor rota utilizando-se os seguintes fatores para se fazer esta avaliação:

- recuperação de ouro e de outros minerais de valor;
- qualidade dos produtos e necessidade de tratamento complementar;
- capacidade das instalações;
- investimento;
- custo operacional;
- impacto ambiental;
- risco técnico.

No caso de minérios de fácil processamento, normalmente o risco da lixiviação com cianeto é pouco relevante perto dos outros riscos associados ao projeto. Os riscos aumentam quando utiliza-se alguma tecnologia ainda não suficientemente comprovada na indústria do ouro, como prensas de rolos de alta pressão para auxiliar na cominuição do minério ³⁶.

2.5.3 Fatores ambientais

No desenvolvimento de processo deve-se avaliar cuidadosamente o seu impacto sobre o meio ambiente e as medidas mitigadoras necessárias para o atendimento da legislação ambiental. Devem ser considerados os tipos e as quantidades de efluentes produzidos, a estabilidade de curto e longo prazo dos rejeitos, as alterações dos minerais durante o processo, o balanço e a vazão de descarga de água para o meio ambiente, o encerramento das operações ("*descommissioning*"), assim como os processos de tratamento dos efluentes ³⁶.

2.5.4 Fatores geográficos

Fatores relacionados à localização do depósito mineral podem ter um efeito importante sobre a seleção do processo. Topografia muito acidentada pode inviabilizar o emprego de processo de lixiviação em pilhas e favorecer a lixiviação em tanques agitados, embora o desenvolvimento de pilhas em vales tenha minimizado um pouco este problema. Alta pluviosidade e áreas com melhores recursos de infra-estrutura, disponibilidade de mão-de-obra especializada, suprimento de equipamentos e peças de reposição também favorecem ao processo de lixiviação em tanques. Um clima com extremos de temperatura afeta os processos sensíveis à temperatura, como os que envolvem a bio-oxidação. A disponibilidade e a qualidade da água podem afetar a seleção do processo. Climas áridos favorecem processos com menor consumo de água, ou então torna-se necessário adequar o processo para se obter a maior recuperação de água possível ³⁶.

2.5.5 Fatores de mercado

O preço do ouro é o principal fator de risco de um projeto para produzir o metal. Os preços de mercado são de difícil previsão (se não impossível) e a experiência tem demonstrado que os especialistas erram frequentemente. Entretanto, estes erros podem ser minimizados por um cuidadoso estudo de mercado para determinar o(s) preço(s) do ouro a serem adotados no projeto, o que pode ser determinante para a seleção da melhor rota de processo ^{18, 36, 46}.

2.5.6 Fatores políticos

Em geral, os fatores políticos e governamentais afetam mais a avaliação do projeto como um todo do que propriamente a seleção do processo. Principalmente o sistema fiscal, que tem um impacto relevante sobre o fluxo de caixa e a rentabilidade. Entretanto, a política ambiental pode influenciar decisivamente a seleção do processo ^{36, 46}.

2.6 Estratégias para desenvolvimento de processo

Diversas estratégias de desenvolvimento de processo para minérios de ouro podem ser encontradas na literatura ^{36, 47, 48, 49}.

Chamberlin ⁴⁹ recomenda decidir entre duas estratégias para a caracterização inicial do minério, logo após conhecer o teor de ouro e a capacidade provável do projeto:

- fazer uma caracterização mineralógica detalhada, envolvendo a quantificação dos minerais presentes, seus estados de alteração, tamanho dos grãos, formas de associação, verificação de películas de recobrimento;
- fazer ensaios diagnósticos de concentração em mesa, de flotação e de lixiviação.

Tão logo uma destas abordagens esteja completa, o engenheiro de processo pode julgar as operações unitárias mais promissoras e definir um fluxograma de processo preliminar. Chamberlin ⁴⁹ recomenda o diagrama mostrado na figura 2.6 para se decidir pela rota de processo em função do teor de ouro.

Chamberlin ⁴⁹ alerta que a lixiviação em pilhas não é limitada a minérios oxidados. Se o ouro encontra-se livre nas fraturas ou na superfície dos grãos minerais, ele será lixiviado desde que exposto à solução de cianeto por meio da cominuição.

Johns ^{47, 48} já utiliza uma caracterização mineralógica detalhada juntamente com ensaios diagnósticos de lixiviação para decidir pela melhor sequência de ensaios para estudar o processo para recuperação de ouro. Na opinião do Autor, esta estratégia é plenamente justificada em função do custo desta duplicidade ser desprezível em relação aos investimentos na exploração geológica. A automação das análises mineralógicas reduziu bastante o seu custo, além dela ser imprescindível para os estudos de geologia.

Marsden ³⁶ mostra uma estratégia que considera a realização de análises mineralógicas para classificar os tipos de minérios antes de se iniciar os ensaios tecnológicos (figura 2.7).

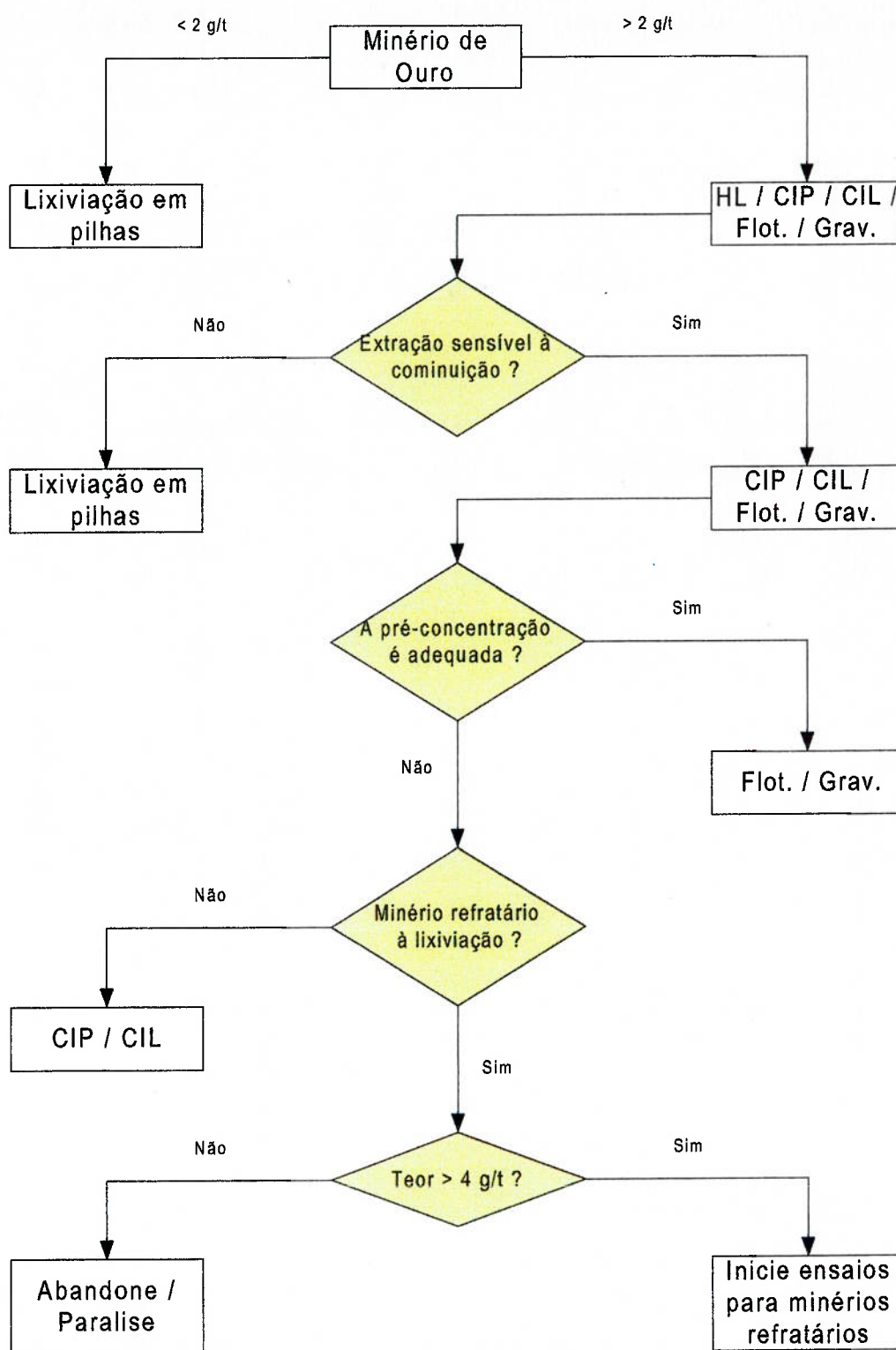


Figura 2.6 – Efeito do teor de ouro na seleção do processo⁴⁹

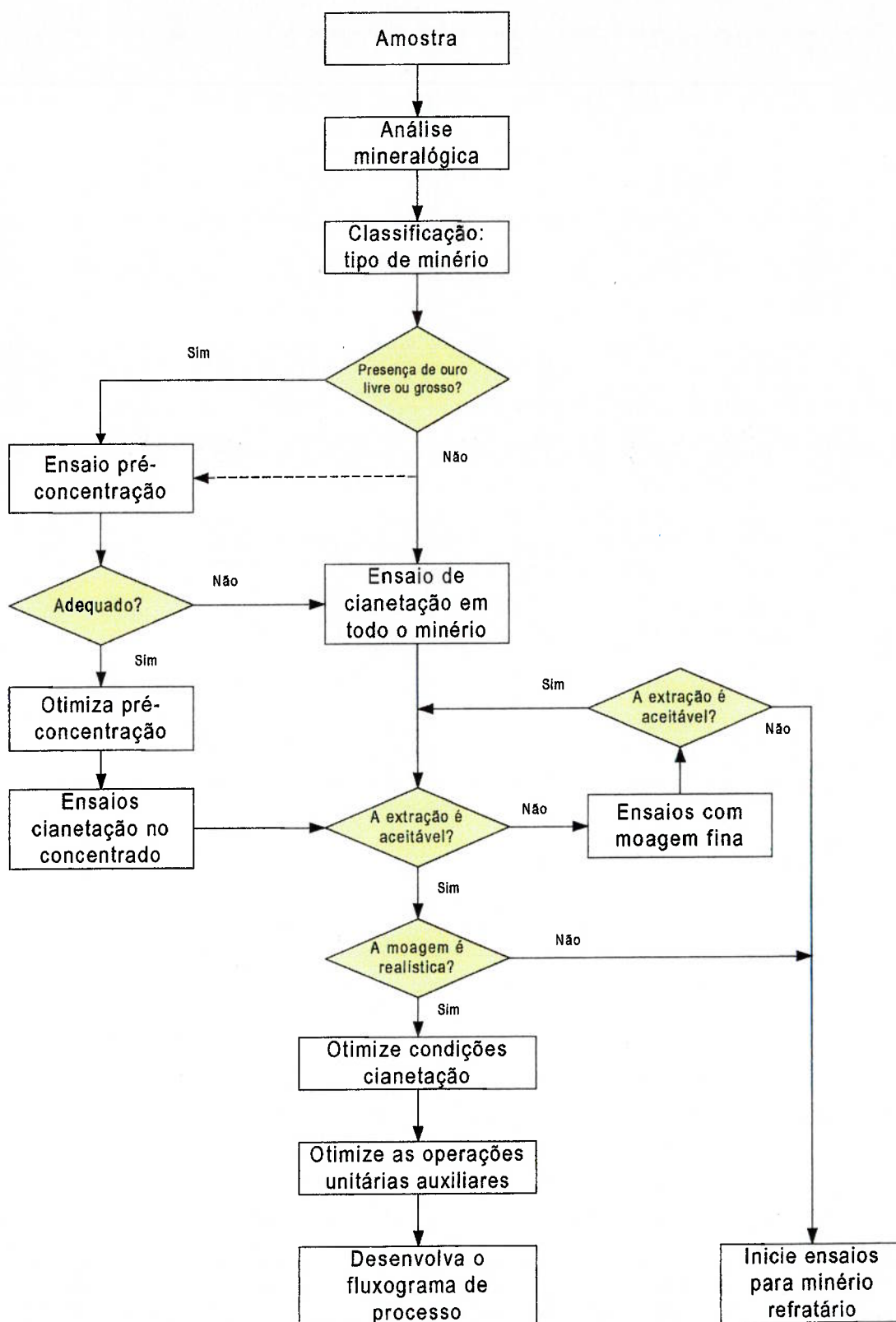


Figura 2.7 – Ensaio metalúrgicos com minérios de ouro ³⁶

3 A INDÚSTRIA DO OURO

Neste capítulo, é feita uma análise de situação da indústria do ouro com o objetivo de identificar os seus fatores de competitividade, oportunidades, ameaças e estimar a evolução dos preços do metal para embasar a análise crítica do desenvolvimento de projetos de cianetação em tanques agitados.

3.1 Contexto mundial

Na última década, a oferta anual de ouro apresentou bom crescimento, passando de 3.095 t em 1990 para 4.092 t em 1999, principalmente devido à implantação de inúmeros projetos de mineração, estimulados pelos altos preços do ouro que prevaleceram até 1996. A figura 3.1 mostra o comportamento da oferta e do preço do ouro na última década ⁵⁰.

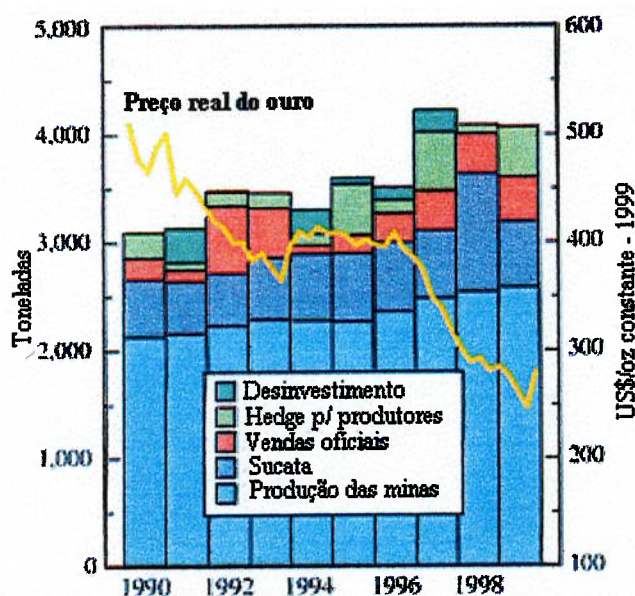


Figura 3.1 – Evolução da oferta mundial de ouro ⁵⁰

A produção das minas passou de 2.133 t/ano em 1.990 para 2.576 t/ano em 1999. O restante do crescimento da oferta foi devido ao balanço positivo das fontes secundárias de suprimento (a partir dos estoques de ouro sobre o solo), como a reciclagem de sucata, vendas de bancos centrais, desinvestimentos e vendas a futuro.

A produção de ouro é bastante pulverizada entre as empresas de mineração e regiões do mundo, embora quatro países, os considerados “Quatro Grandes”, África do Sul, Estados Unidos, Austrália e Canadá sejam responsáveis por quase a metade da produção mundial. Entretanto, existe uma tendência de aumento na participação relativa dos outros países. A China, Indonésia, Rússia e Peru possuem uma produção bastante próxima à do Canadá, o menor entre os “Quatro Grandes”.

A demanda de ouro é distribuída em três áreas principais: setor joalheiro, setor industrial e setor financeiro. De longe, a joalheria é a principal fonte de consumo de ouro, atualmente responsável por 76% da demanda, mas já atingiu um pico de 81%, em 1996. A figura 3.2 mostra a evolução mundial da demanda de ouro na última década⁵⁰.

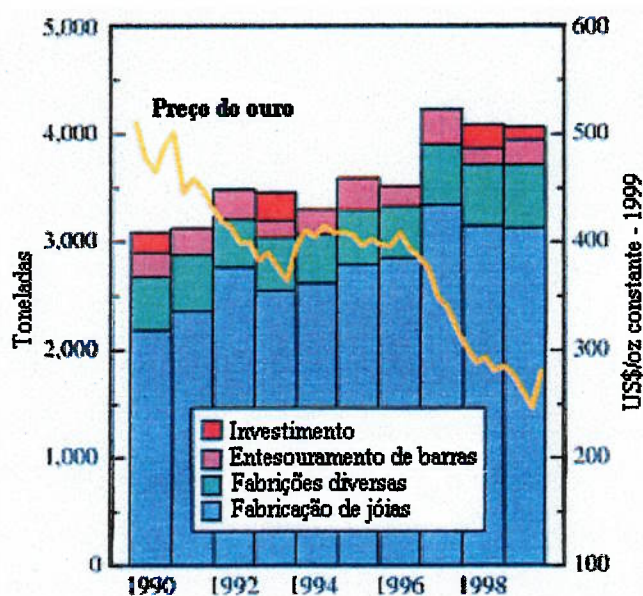


Figura 3.2 – Evolução da demanda mundial de ouro⁵⁰

O preço do ouro tem estado em declínio durante vários anos conforme mostrado na figura 3.3.

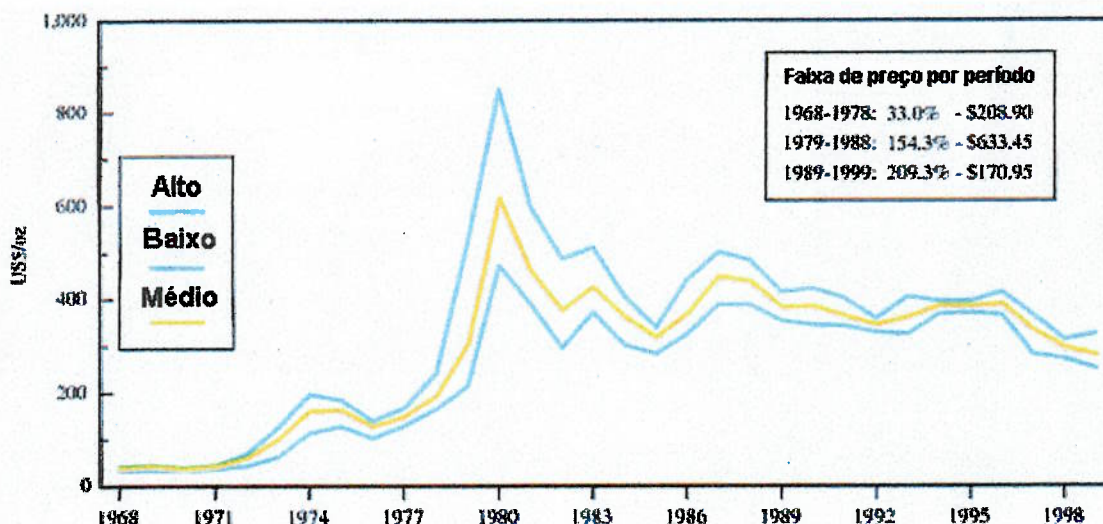


Figura 3.3 – Evolução do preço do ouro nas últimas décadas ⁵⁰

O comportamento do mercado do ouro é influenciado principalmente por dois fatores. Por se tratar de uma reserva de valor de aceitação universal, todo o ouro produzido é facilmente vendido ao preço das bolsas. Assim, os produtores não competem pelo mercado. Por outro lado, o fato da joalheria e a indústria serem responsáveis pela maior parte da demanda atual, juntamente com a diminuição do interesse pelo ouro como reserva de valor, tem feito com que ele se comporte cada vez mais como uma “*commodity*”, sujeita às leis do mercado. O balanço oferta-demanda do ouro é mostrado na figura 3.4.

Esta figura mostra que existe um estoque de 140 mil t de ouro constituído por praticamente toda a produção até a atualidade. A maior parte deste estoque encontra-se na forma de jóias (67 mil t), mas uma parcela considerável está como reserva de valor, em poder dos bancos centrais (30 mil t) e de investidores privados (16 mil t). A cada ano, uma nova quantidade de ouro produzida pela mineração entra para o estoque através do mercado (cerca de 2,5 mil t / ano). O restante da demanda é suprido a partir do estoque. Em 1999, foram 613 t de sucata (a maioria proveniente do setor joalheiro) e

904 t referente às vendas dos bancos centrais mais empréstimos em ouro para lastrear vendas a futuro. Desta maneira, o balanço oferta-demanda, e conseqüentemente o preço do ouro, está severamente impactado pelo metal proveniente do estoque, notadamente pelas vendas dos bancos centrais, impulsionadas pelo declínio da importância do ouro como reserva de valor ^{3, 50}.

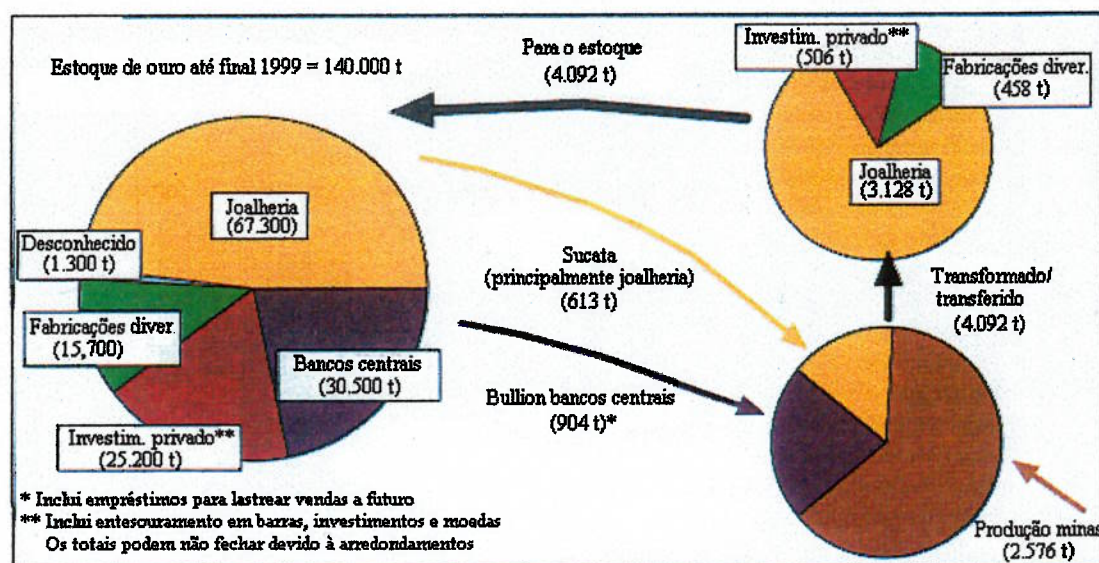


Figura 3.4 – Balanço oferta-demanda e transferências de e para o estoque do ouro em 1999 ⁵⁰

A quantidade de ouro em poder de bancos centrais e de investidores privados é preocupante, uma vez que poderia atender à demanda por mais de 10 anos, ou mesmo substituir integralmente a produção das minas por mais de 20 anos. Em passado recente, os estoques dos bancos centrais foram ainda maiores. Mesmo durante os períodos com elevados preços do ouro, os especialistas alertavam sobre esta ameaça. Entretanto, considerava-se pouco provável uma venda maciça pelos bancos centrais pois acarretaria uma queda significativa dos preços, causando grandes prejuízos aos próprios vendedores. Contudo, com a diminuição do interesse pelo ouro como reserva de valor, os bancos centrais intensificaram as vendas ou passaram a manifestar a intenção de venda, o que desencadeou uma grande queda no preço do metal, a partir de 1997.

Desta maneira, os bancos centrais, face aos seus elevados estoques do metal, passaram a funcionar como reguladores de oferta e de preços. As vendas a futuro, vendas pelos investidores privados e a reciclagem de sucata também têm influenciado a oferta e os preços.

Em 1999, o preço do ouro teve o pior desempenho dos últimos 20 anos. Foi comercializado entre US\$ 252.80 / oz e US\$ 325.50 / oz, com média de US\$ 278.57 / oz, 5% menor do que em 1998. A maior volatilidade ocorreu no quarto trimestre, quando o preço do ouro subiu espetacularmente 20% em apenas 7 dias, logo após a declaração dos produtores quanto à intenção de reduzir suas vendas a futuro, além do anúncio de que 15 bancos centrais europeus reduziriam as vendas e empréstimos em ouro. Contudo, imediatamente após atingir o seu pico, o preço do ouro recuou rapidamente, caindo para o patamar inferior a US\$ 300.00 / oz em cerca de um mês.

A experiência do mercado no final de 1999 aponta para a tendência futura. Preços superiores a US\$ 300.00 / oz mostram-se insustentáveis. Se o preço sobe, aumentam-se as vendas e o preço recua novamente. Por outro lado, preços abaixo de US\$ 250.00 / oz são improváveis, pelo menos a médio prazo. O ouro produzido e vendido pelas minerações deverá impactar bem menos o preço do metal que as vendas a partir dos estoques antigos, uma vez que não se esperam significativas alterações na produção das minas, pelo menos a médio prazo. Existe, inclusive, uma ligeira tendência de queda da produção nova, conforme sinalizado a partir do final de 1999⁵⁰.

A expectativa é de que o preço médio do ouro deverá ficar nos próximos anos entre US\$ 270.00 e 280.00 / oz. Este preço deverá continuar baixo, a menos que ocorra uma substancial mudança na atitude dos investidores em relação ao ouro, ou ocorra um improvável aumento da inflação e enfraquecimento do dólar.

Para enfrentar este cenário pouco promissor, as empresas de mineração têm priorizado a redução dos custos de produção por meio de uma série de ações⁵:

- acelerar o desenvolvimento de projetos com custo de produção mais baixo – prioridade para projetos com minérios de fácil processamento;

- adiar, ou mesmo abandonar os projetos menos atrativos;
- fechar minas de alto custo;
- priorizar a lavra de áreas mais ricas;
- modernizar e otimizar as operações de produção;
- racionalizar as empresas – “*down-sizing*”, reestruturação corporativa, aquisições e fusões;
- expandir o horizonte de atuação para regiões mais promissoras.

Como resultado, a média ponderada mundial do custo caixa total de produção do ouro caiu de US\$ 268.00 /oz em 1996 para US\$ 207.00 / oz em 1999 ⁵⁰. A estrutura dos custos dos produtores de ouro varia bastante conforme as características intrínsecas das jazidas, tais como, teor, tipo e método de lavra, relação estéril-minério e rota de beneficiamento ³. A figura 3.5 mostra a evolução do custo caixa de produção de ouro nos países de maior produção mundial, em comparação com a evolução do preço do ouro.

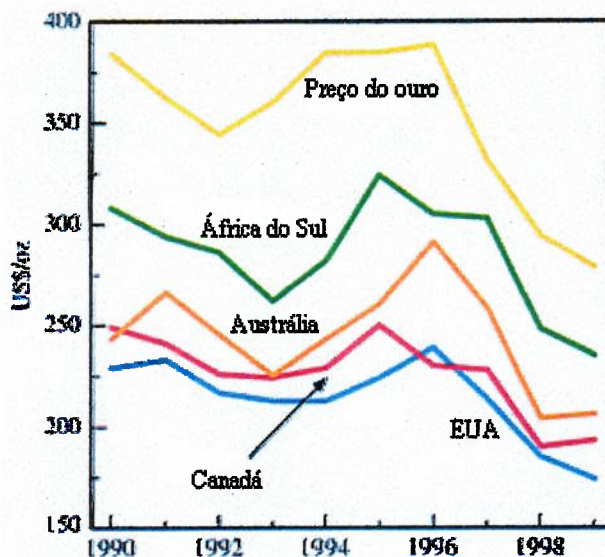


Figura 3.5 – Evolução do custo caixa de produção de ouro em diversas regiões do mundo ⁵⁰

Nesta figura, notam-se claramente os resultados dos esforços feitos pelos produtores para sobreviverem no cenário de baixo preço do ouro. Todos eles conseguiram reduzir substancialmente os seus custos de produção. Mas, na realidade, uma boa parte desta economia ocorreu devido ao fechamento de minas de custo elevado e pela entrada em operação de novos projetos de baixo custo e grande capacidade, que provocaram uma acentuada redução na média ponderada do custo de produção. Na figura 3.6 podem ser vistas as curvas de parametrização dos custos caixa e custos totais de produção de ouro (em relação à produção acumulada a partir dos produtores de custo mais baixo).

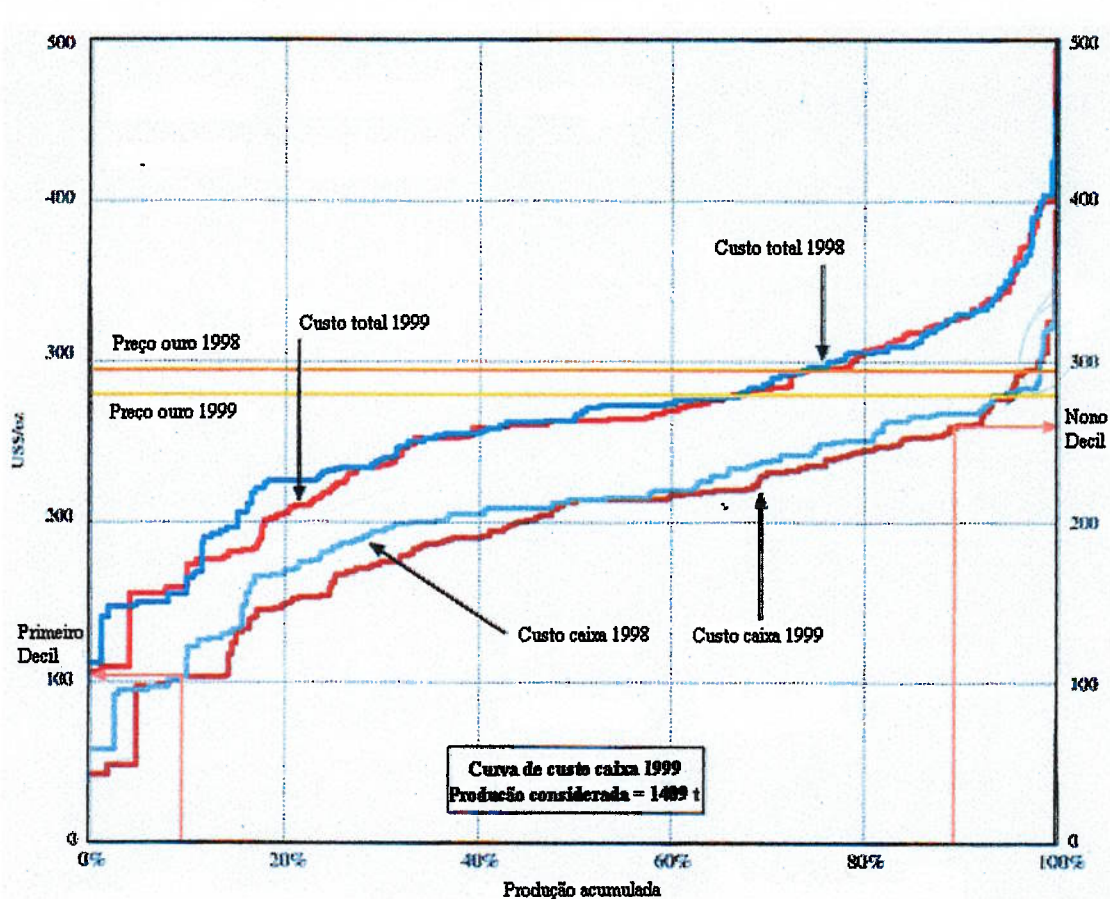


Figura 3.6 – Curvas de custo caixa e custo total de produção de ouro ⁵⁰

Dois aspectos merecem destaque neste gráfico. O primeiro refere-se aos produtores de custo baixo e o segundo aos produtores de custo elevado ⁵⁰.

No lado dos produtores de custo baixo, a maioria das minas refere-se à nova geração de projetos que incorporam os mais recentes desenvolvimentos tecnológicos. O início da curva de 1.999 é representado pela mina de Pierina, no Peru, integrante da mais nova geração de projetos. Sua produção anual é de 26 t de ouro, com custo caixa de US\$ 42.00 / oz, em parte beneficiado pelo crédito em prata. Entretanto, o custo total de Pierina é fortemente impactado pela amortização do investimento para aquisição da área, atingindo US\$ 252.00 / oz.

No lado dos produtores de custo elevado, nota-se que a maioria esmagadora possui um custo caixa inferior ao preço atual do ouro. No entanto, cerca de 30% do ouro é produzido com custo total superior ao seu preço⁵⁰.

Uma parcela significativa dos custos totais de produção relaciona-se ao investimento em pesquisa geológica. A razão disto é a vida relativamente curta das minas (5 a 10 anos), que demanda investimentos constantes em exploração geológica de forma a manter o nível de produção. A disponibilidade de áreas para pesquisa geológica é a principal barreira de entrada para a produção de ouro. Apesar de ser um investimento de risco, o capital exigido é relativamente baixo, as técnicas de mineração e beneficiamento são bastante difundidas e não há dificuldades em comercializar o produto. As barreiras à saída de produtores do negócio são pequenas, com exceção das minas profundas da África do Sul que possuem grandes investimentos a depreciar³.

Pelo exposto, existe uma tendência das empresas buscarem novos projetos com menores custos de produção para se manterem no mercado. Esta busca se inicia pela procura de novas jazidas, o tem sido feito segundo duas estratégias: exploração e aquisição^{5, 51}.

A exploração apresentou um notável crescimento nos anos 90. Mas este quadro reverteu-se com a queda do preço do ouro. Tornou-se mais difícil levantar fundos para pesquisas “*grass roots*”. Pelo lado das empresas juniores, que estavam na vanguarda da exploração, existem grandes dificuldades para obter financiamento em bolsas, o que foi agravado pelo escândalo da Bre-X Minerals em 1997 (uma “*junior company*” que

conseguiu uma supervalorização de suas ações garantindo que havia descoberto uma megajazida na Indonésia, o que depois mostrou-se uma fraude). Pelo lado das empresas seniores, ocorreram, em geral, reduções significativas nos orçamentos para exploração mineral ⁵.

A aquisição, apesar de ser considerada uma alternativa de custo mais elevado do que a exploração, é a preferida de muitas empresas. Ela possibilita desenvolver um projeto mais rapidamente e permite avaliar várias áreas de bom potencial antes de se arriscar os recursos financeiros escassos. Devido ao cenário atual dos preços do ouro, a tendência de curto prazo é o predomínio de aquisições. Contribuem para isto as dificuldades financeiras que as empresas juniores estão passando, o que pode precipitar a venda de suas jazidas. Por outro lado, encontrar áreas ou jazidas promissoras para compra está ficando cada vez mais difícil e dependente de uma retomada das atividades de exploração geológica, que deverá prevalecer a médio e longo prazo, por ser o meio natural de se encontrarem novos recursos minerais.

As empresas de mineração estão sendo pressionadas pelos acionistas na busca de rentabilidades mais elevadas para os novos projetos. A mineração é considerada como uma atividade de alto risco e de baixo retorno ^{5, 21, 27, 28, 29}. Contudo, nas duas últimas décadas, as empresas produtoras de ouro apresentaram uma atratividade maior do que as demais empresas de mineração ^{4, 52}. Também, os projetos realizados na América Latina têm apresentado uma rentabilidade superior à do restante do mundo, como mostra a porcentagem do lucro líquido sobre a receita: 14% na América Latina contra 3% no restante do mundo, em 1998 ²⁹.

3.2 Contexto no Brasil

A produção de ouro no Brasil tem apresentado uma queda constante desde o pico de 102 t/ano obtido em 1988. Em 1999, a produção foi de apenas 54 t (figura 3.7).

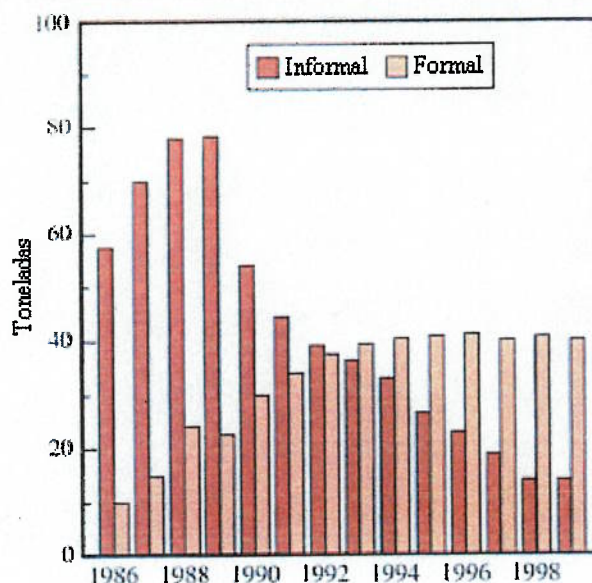


Figura 3.7 – Produção de ouro no Brasil ⁵⁰

A maior parte desta queda foi causada pela diminuição da atividade garimpeira. O setor formal apresentou um grande crescimento até 1994, mas a partir daí sua produção se estabilizou num patamar da ordem de 40 t/ano. O crescimento da produção do setor formal foi insuficiente para compensar a redução da produção dos garimpos. Atualmente não existem projetos em desenvolvimento no Brasil capazes de aumentar significativamente a produção do setor formal. Pelo contrário, a tendência da produção a médio prazo é de queda.

Após a abertura da atividade mineral brasileira ao capital estrangeiro em 1995, um grande número de empresas internacionais vieram para o país. Em 1997, estimava-se que cerca de 80 empresas estrangeiras, a maioria juniores, estavam no Brasil pesquisando áreas para ouro, principalmente em locais onde já haviam atividades garimpeiras ⁵³. A conjuntura da época era plenamente favorável ao ouro, que canalizou a maior parte dos recursos investidos em exploração geológica. Nesta ocasião, pode-se dizer que o interesse pelos investidores estrangeiros pela mineração de ouro no Brasil atingiu o seu ponto máximo, como atesta o comparecimento recorde de representantes estrangeiros ao X Simpósio Internacional do Ouro, realizado no Rio de Janeiro no final de 1997 ⁵⁴.

Entretanto, o sucesso em encontrar novas jazidas de ouro não foi satisfatório. Este fato, juntamente com os baixos preços do metal, problemas políticos, burocracia excessiva, riscos de invasões por garimpeiros, entre outros, começou a reduzir o interesse pela pesquisa do metal. Este esfriamento foi sinalizado pela diminuição do número de participantes do XI Simpósio Internacional do Ouro, realizado no Rio de Janeiro no final de 1998 ⁵⁵. Um comentário frequente nos corredores deste simpósio era de que o Brasil carecia de geologia básica e emprego de métodos mais científicos para selecionar ambientes e alvos promissores para pesquisar ouro.

Apesar do cenário conjuntural de crise, tanto no contexto mundial, quanto no contexto brasileiro, o Brasil possui uma posição competitiva favorável para a mineração de ouro, conforme demonstrado pelo estudo bastante detalhado de Arantes e Mackenzie ³⁰. Embora este estudo tenha sido elaborado com dados econômicos de 1990, abrangendo informações do período 1969 – 1988, ele permite comparar a posição competitiva do Brasil em relação aos outros países. Suas conclusões mais importantes para fundamentar as análises que se pretendem fazer nesta tese são:

- A exploração e a mineração de ouro no Brasil constituem atividades econômicas com potencial para aumentar significativamente a riqueza disponível para a sociedade.
- A qualidade e a eficiência das equipes de exploração é vital do ponto de vista econômico, uma vez que o tempo e o dinheiro investidos por elas afetam direta e significativamente a expectativa de valor das descobertas econômicas.
- Foram identificados 44 depósitos possivelmente econômicos, com a seguinte distribuição de tamanho: 10 depósitos gigantes (> 60 t); 9 depósitos grandes (6 a 60 t); 21 depósitos de tamanho médio (1 a 6 t) e 4 depósitos pequenos (<1 t).
- Os “*greenstones belt*” de idade arqueana constituem o tipo de ambiente mais favorável para a descoberta de depósitos de ouro no Brasil. As sequências meta-sedimentares de idade proterozóica podem ser igualmente bem dotadas.

- O investimento necessário para se ter alto grau de confiança em descobrir pelo menos um depósito econômico varia de US\$ 21 milhões a US\$ 36 milhões.
- Os fatos sugerem que um maior nível de investimento, aliado a uma forte persistência e um bom gerenciamento, resultam em empreendimentos de maior rentabilidade.
- A posição competitiva do Brasil em relação a dois de seus principais competidores, Austrália e Canadá, é bastante favorável quanto à economicidade da exploração, lavra e custos de produção.

Um mapa elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) mostra a localização, produção e reservas de 258 jazidas auríferas no território brasileiro. As reservas e recursos totais de ouro foram estimados em 2.283 t, incluindo-se as minas e jazidas onde o ouro é subproduto ⁵⁶. Existe uma predominância de depósitos e jazidas de tamanho inferior a 60 t, sendo a maioria delas inferior a 20 t. A localização geográfica é muito diversificada. As regiões de maior potencial para novas minas parecem ser o Pará, Goiás, Amapá, Mato Grosso e Tocantins. Os estados de Minas Gerais, Bahia e Paraná possuem muitas ocorrências. Entretanto, nestes estados, principalmente Minas Gerais e Bahia, as maiores reservas são referentes às minas em operação, e a maioria absoluta das novas jazidas potenciais são de tamanho pequeno a médio.

A CPRM também dispõe de 220 mapas de detalhe cobrindo 102 áreas brasileiras, que englobam 13% do território nacional (1,2 milhões Km²). Eles informam sobre a geologia econômica, prospecção, reservas e produção de ouro em regiões com produção ou potencial aurífero. Foram elaborados principalmente para atender a investidores interessados em adquirir novas concessões de lavra e pesquisa no Brasil ⁵⁵.

O potencial geológico favorável para ouro no Brasil é uma opinião compartilhada pela maioria dos especialistas, como o geólogo Mário Farina, chefe Departamento de Recursos Minerais da CPRM. Ele afirma que o Brasil possui cerca de 3,9 milhões Km² de seu território (cerca de 46% do total) dominado por rochas pré-

cambrianas favoráveis à formações de ouro. Áreas ainda não exploradas no Amapá e em Roraima possuem um grande potencial ⁵⁵.

Na opinião do Autor, existem boas indicações que o Brasil possui um potencial favorável para ouro, com muitas áreas pouco exploradas que podem conter reservas auríferas de grande porte. São estas ocorrências que podem resultar em minas com os menores custos de produção e, assim, conferir uma grande competitividade às empresas de mineração. Contudo, entre o discurso e a realidade é necessário um intenso trabalho, de modo racional e sistemático, caracterizado por elevados investimentos e uma grande persistência. O desenvolvimento de processos para ouro deve ser parte deste esforço, dentro de um modelo de atuação multi-disciplinar, integrado e sistematizado, utilizando-se uma estratégia de ensaios em consonância com um planejamento geral derivado das diretrizes estratégicas da empresa e objetivos do projeto.

3.3 Tendências tecnológicas

No início dos anos 90, existia uma forte tendência tecnológica para o desenvolvimento e a viabilização de processos para minérios refratários de teor cada vez mais baixos ^{36,57}. Esta tendência fundamentava-se nos altos preços então vigentes para o ouro e as oportunidades de aproveitamento de grandes reservas de minérios “*preg-robbing*” e sulfetados refratários, principalmente em Nevada, Estados Unidos. Neste sentido, grandes esforços foram feitos para o desenvolvimentos de processos com queima / ustulação, bio-oxidação e oxidação sob pressão ^{3, 14, 58, 59}.

Nesta época, também estavam em evidência esforços para o desenvolvimento do processo RIP (“*resin-in-pulp*”) em substituição ao CIP, eletrorrecuperação seletiva de soluções diluídas, recuperação de reagentes e metais de efluentes, reagentes alternativos para lixiviação de ouro e aperfeiçoamento de sistemas de análise e controle de processo ³⁶.

A queda drástica no preço do ouro ocorrida no final dos anos 90 levou a uma mudança nas prioridades de pesquisa e desenvolvimento. Os esforços passaram a ser

dirigidos para desenvolver novas tecnologias de menor custo operacional e investimento, e aprimorar as tecnologias existentes para aumentar a recuperação de ouro e/ou reduzir o custo operacional. Os estudos de processos para tratar minérios refratários de ouro vêm perdendo foco em favor dos desenvolvimentos de processos hidrometalúrgicos para cobre e níquel, principalmente os que envolvem oxidação sob pressão ⁶⁰.

Neste cenário, os desenvolvimentos de processos de lixiviação em pilhas e em dumps vem merecendo uma grande atenção, favorecidos pelos investimentos, custos operacionais e preços do ouro mais baixos ^{61, 62}. No tocante à lixiviação em tanques agitados, surgem oportunidades para o uso de processos RIP ^{63, 64}, recuperação de cianeto e cobre de efluentes ^{65, 66, 67, 68} e utilização de usinas modulares e compactas para viabilizar o aproveitamento de reservas pequenas. Para tanto, as usinas modulares devem utilizar tecnologias que levem aos menores volumes de tanques, como por exemplo, lixiviação assistida com oxigênio e contactadores CIP tipo “*pump-cell*” ⁶⁹.

Outra inovação que pode impactar a indústria do ouro é a utilização de prensas de rolos de alta pressão para aumentar a extração de ouro (pela criação de micro-fissuras que aumentam a exposição dos grãos de ouro à solução de cianeto) e reduzir o consumo de energia na cominuição ^{70, 71, 72, 73}.

As tendências apontam também para o aumento da escala de produção e uso dos maiores equipamentos possíveis e de elevada disponibilidade física. Nota-se também uma intensificação no uso de instrumentações modernas (controle de cianeto, oxigênio dissolvido, etc.) e sistemas especialistas e adaptativos para automação e controle ^{74, 75}. Também merecem destaque os avanços nos modelos e procedimentos para o dimensionamento dos moinhos autógenos e semi-autógenos ^{76, 77}, que impactam indiretamente a seleção do processo de cianetação por meio da redução dos custos de cominuição.

Não são observados processos em desenvolvimento que possam ameaçar a hegemonia da cianetação para a produção de ouro. Nos anos 70 e 80, estudou-se

bastante o emprego de lixiviantes alternativos, como tiuréia, tiosulfato, cloro e bromo^{78, 79}. No entanto, nenhum estudo resultou em processo viável que pudesse ameaçar a cianetação, a não ser em nichos isolados. Recentemente, o INTEC está desenvolvendo um processo de lixiviação simultânea de cobre e ouro por meio do complexo halex $[\text{BrCl}_2]^-$, que poderá ter uma importante participação futura para a produção de cobre e ouro a partir de concentrados de cobre^{80, 81}.

4 CIANETAÇÃO DE MINÉRIOS DE OURO EM TANQUES AGITADOS

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica do desenvolvimento de processos de cianetação de minérios de ouro em tanques agitados. Para a sua elaboração procurou-se considerar os aspectos mais relevantes para embasar os estudos desenvolvidos nesta tese. Inicia-se com uma abordagem geral sobre os tipos de minérios de ouro e os processos de tratamento utilizados. Ao final, são revistos os aspectos importantes da química da cianetação, os fatores que influenciam este processo, a sua economia e otimização.

4.1 Processos de tratamento de minérios de ouro

O tratamento de minérios auríferos baseia-se nas diferenças marcantes das propriedades do ouro em relação às das gangas hospedeiras. O alto peso específico e a solubilidade deste metal em soluções alcalinas diluídas de cianeto constituem as bases dos fluxogramas de processo mais simples e usuais^{82, 83}. Também contribuem a capacidade do ouro formar amálgamas com mercúrio e a sua boa resposta ao processo de flotação⁸⁴. Os processos de cianetação e amalgamação envolvem conceitos de recuperações metalúrgicas algo diferentes daqueles aplicados a outros bens minerais. Assim, os conceitos de “ouro amalgamável” e “ouro cianetável” são mais apropriados ao tratamento de minérios de ouro do que a clássica liberação⁶.

O ouro ocorre na natureza em diversas formas de associações que direcionam as rotas de processo para a sua recuperação. Uma classificação genérica dos minérios auríferos pode ser feita tendo por premissas aspectos genéticos, características de interesse para o seu beneficiamento e resposta aos processos de concentração e extração⁶. Tais classificações variam de autor para autor^{6, 36, 84, 85, 86, 87, 88}. Marsden e House³⁶ apresentaram a seguinte classificação adaptada de McQuiston e Shoemaker⁸⁴:

- pláceres;
- minérios com ouro nativo "free milling";
- minérios oxidados;
- minérios com sulfetos de ferro;
- minérios com sulfetos de arsênio;
- minérios com sulfetos de cobre;
- minérios com sulfetos de antimônio;
- minérios carbonosos;
- minérios ricos em prata.

Pláceres³⁶: Nestes depósitos, as partículas de ouro liberadas pela ação do intemperismo são transportadas hidraulicamente e concentradas em local diferente do original. A concentração do ouro quase sempre é feita por processos gravíticos.

Minérios com ouro nativo "free-milling": Nesta classe, quando a moagem é feita nos tamanhos usuais da prática industrial (tipicamente $80\% < 75 \mu\text{m}$), a cianetação direta pode extrair cerca de 95% do ouro sem incorrer em alto consumo de reagentes⁸⁵. O teor de sulfetos é baixo, usualmente inferior a 2%, e geralmente limitado à pirita. A cianetação é comumente usada em conjunção com a concentração gravítica, ou, se o ouro do minério é suficientemente fino, é o único processo usado para extrair o ouro⁸⁶.

Minérios oxidados: Resultam da oxidação, pelo intemperismo, de um minério primário, geralmente sulfetado. A estrutura da rocha original é quebrada, o que aumenta a permeabilidade e possibilita a lixiviação do minério em tamanhos grosseiros. Se a formação de argilo-minerais for excessiva, podem ocorrer problemas na cianetação. Algumas vezes podem se formar minerais ou fases cianicidas³⁶. Os processos mais usuais no beneficiamento desta classe de minérios são concentração gravítica para o ouro predominantemente acima de 0,05 mm e cianetação para minérios com ouro fino. A cianetação pode ser em pilhas, em tanques estáticos ("vat") ou em tanques agitados, dependendo do teor do minério, das dimensões das partículas e da acessibilidade da solução de cianeto⁶. O Autor acrescenta também o tamanho da reserva, que tem um papel relevante na escolha da melhor rota de processo.

Minérios com sulfetos de ferro: Nesta classe são considerados os minérios em que o ouro ocorre predominantemente incluso em sulfetos de ferro, ou quando a ação destes sulfetos afeta a seleção do processo ou as condições de operação ³⁶. Alguns sulfetos, particularmente a pirrotita, tendem a se decompor em solução, consumindo cianeto e inibindo a extração dos metais preciosos. A recuperação do ouro pode ser feita por processos gravíticos (ouro grosseiro acima de 0,05 mm), cianetação em tanques agitados antecedida por pré-aeração alcalina, ou flotação. Esta última rota é praticada quando o minério requer um tratamento mais enérgico para recuperar o ouro, como moagem ultra-fina, ou oxidação (ustulação, oxidação sob pressão ou bioxidação) seguida de cianetação ⁸⁶.

Minérios com sulfetos de arsênio: Nesta classe devem ser considerados os minérios associados a sulfetos de arsênio, quando estes sulfetos afetam a seleção do processo ou condições de operação ³⁶. O beneficiamento é feito principalmente via obtenção de um concentrado de flotação que passa por algum processo de oxidação antes da extração final do ouro por cianetação em tanques agitados ⁸⁶.

Minérios com sulfetos de cobre: São considerados nesta classe os minérios em que o ouro ocorre associado aos sulfetos de cobre, de modo a afetar a seleção do processo ou condições operacionais. A concentração é feita principalmente por flotação e o ouro segue o cobre na sua metalurgia, até ser separado nas lamas do eletrorefino, de onde finalmente é recuperado ³⁶.

Minérios com sulfetos de antimônio: Incluem os minérios em que o ouro ocorre associado a sulfetos de antimônio, ou então a presença destes sulfetos afeta a seleção do processo ou condições de operação ³⁶. Da mesma forma que no caso anterior, o beneficiamento é feito principalmente por flotação, oxidação do concentrado e cianetação ⁸⁶.

Teluretos: Constituem os únicos minerais de ouro com importância econômica, além do ouro nativo e suas ligas, e normalmente ocorrem associados ao ouro nativo e

sulfetos. A flotação, seguida da oxidação do concentrado e cianetação, é o principal processo de tratamento ³⁶.

Minérios carbonosos: Esta classe inclui os minérios que contêm componentes carbonosos que adsorvem o ouro dissolvido na lixiviação e reduzem a extração de ouro na cianetação. Estes minérios algumas vezes requerem uma oxidação antes da lixiviação com cianeto ³⁶.

Minérios ricos em prata: Quando o teor de prata é alto e/ou o ouro ocorre como electrum rico em prata, o processamento do minério necessita ser adaptado para evitar perdas dos valores metálicos. As recuperações da prata são inferiores às do ouro devido à mineralogia mais complexa da prata e menor velocidade de solubilização. Por sua vez, os minérios ricos em prata admitem também uma classificação em função da resposta ao tratamento e dos metais associados ⁸⁶. Este trabalho não contemplará detalhes desta classificação por não serem importantes para o seu objetivo.

Para efeito da elaboração desta tese, o Autor reconhece a importância das classificações genéricas dos minérios de ouro, tanto para direcionar os estudos para o desenvolvimento do processo, quanto para auxiliar na análise dos resultados. Entretanto, considera que qualquer classificação rígida é inadequada para atender a todos os casos práticos. As diversas classificações disponíveis na literatura são apenas um meio para ordenar e orientar os estudos de desenvolvimento de processo. O importante é conhecer como a mineralogia e as formas de associação do ouro afetam o processo.

Recentemente, Brooy et al. ⁸⁹ propuseram uma classificação dos minérios mais voltada à seleção das rotas de processo (figura 4.1). Tal classificação abrangeu três grandes grupos: "Minérios de Fácil Processamento (*free-milling*)", "Minérios Complexos" e "Minérios Refratários". Foram considerados como de fácil processamento os minérios que possibilitam recuperações de ouro superiores a 90%, quando submetidos ao processo convencional de cianetação (moagem a 80% < 75 µm e tempo de lixiviação entre 20 e 30 h), sem incorrer em altos consumos de cianeto e/ou oxigênio. No grupo dos complexos foram incluídos os minérios que, apesar de

apresentarem recuperações de ouro aceitáveis, possuem um consumo significativamente mais alto de cianeto e oxigênio. Já os minérios que não possibilitam recuperações econômicas de ouro pelo processo de cianetação convencional foram denominados de refratários.

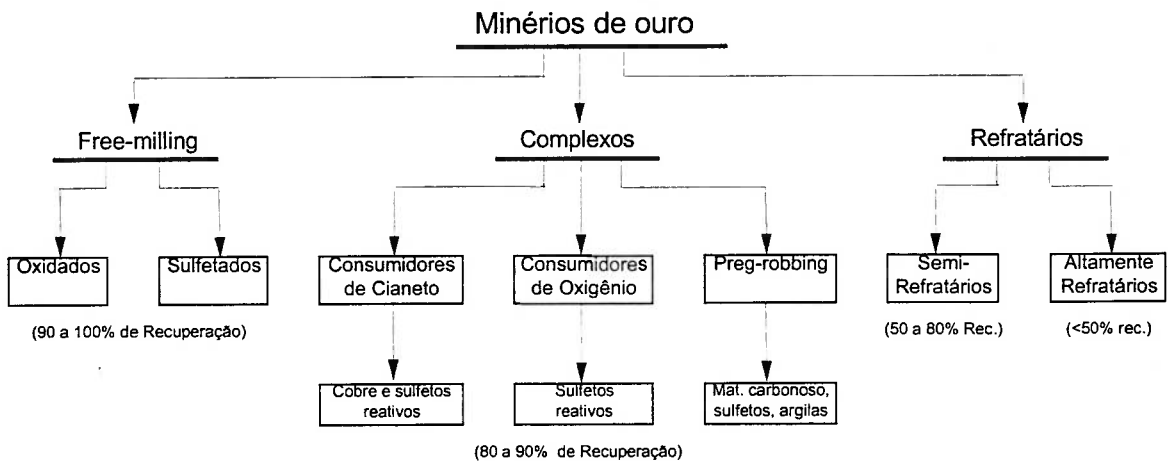


Figura 4.1 - Minérios de ouro - Classificação de Brooy para seleção de rotas de processo⁸⁹

O Autor considera a classificação de Brooy et al. de grande utilidade nas etapas mais avançadas do desenvolvimento do processo. Entretanto, a classificação de Marsden³⁶ é mais útil no primeiro contato com o minério, quando a maioria das informações disponíveis são sobre a gênese e a mineralogia.

A árvore de alternativas dos principais processos para produção de ouro é apresentada na figura 4.2, adaptada de Marsden e House³⁶. De uma maneira simplificada, tais processos são compostos por quatro etapas principais: cominuição, pré-concentração/pré-tratamento, lixiviação com cianeto, e recuperação do ouro solubilizado.

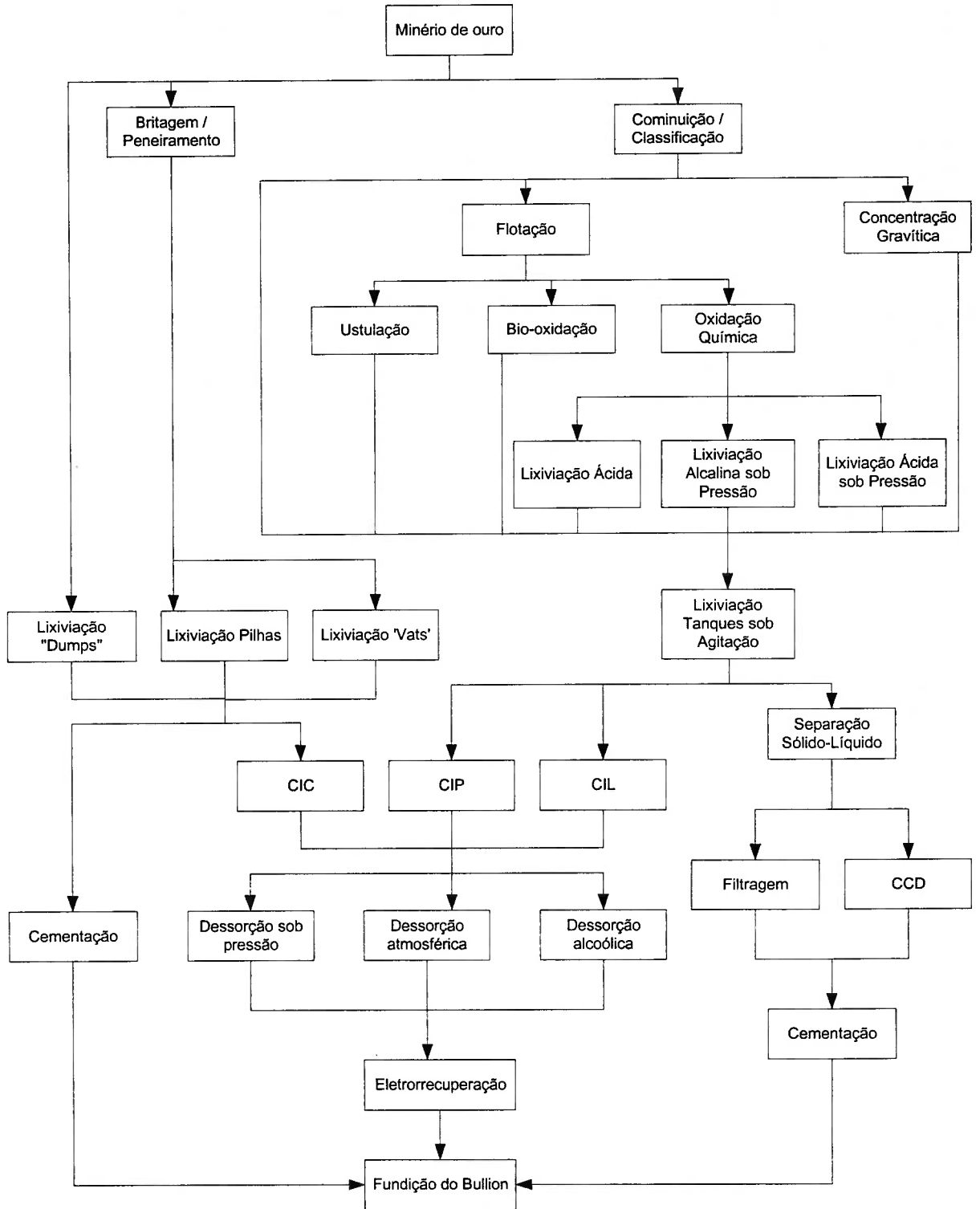


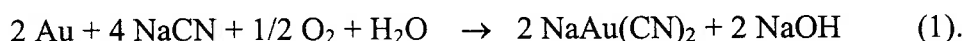
Figura 4.2 - Principais processos para a produção de ouro Adaptada 36

4.2 Química da cianetação

A lixiviação com cianeto ou cianetação é o principal processo para recuperar o ouro de minérios e baseia-se na solubilidade do metal em soluções alcalinas aeradas de cianeto. Na prática da cianetação, o minério de ouro finamente moído é agitado com solução de cianeto durante um período normalmente de 6 a 72 horas. A concentração de cianeto fica comumente na faixa de 0,02 a 0,08 %. Adiciona-se cal para manter um meio alcalino, necessário para evitar a perda de cianeto por hidrólise e para neutralizar os constituintes ácidos do minério ⁹⁰.

Apesar de a cianetação já ser usada há cerca de 100 anos, apresentar alta eficiência (recuperações de ouro tipicamente acima de 90%) e ter merecido muitos esforços para o seu aperfeiçoamento, ainda existe um significativo espaço para melhorias, principalmente no tocante ao aumento da recuperação de ouro e redução do custo de equipamentos. A diminuição das perdas de ouro insolúvel e consumo de reagentes têm um potencial tão grande, ou mesmo superior ao de todas as operações anteriores e subsequentes à cianetação ⁸⁵.

Numerosos tratados já foram escritos sobre a química da cianetação do ouro e da prata. A maioria dos autores concorda que a equação completa de dissolução do ouro em soluções alcalinas de cianeto é a seguinte ^{85, 91, 92} :

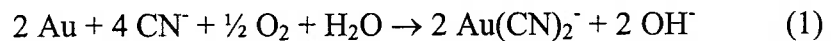
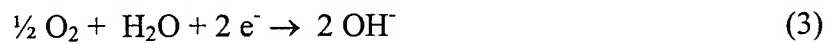
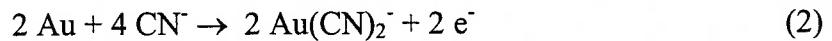


O cianeto forma um complexo altamente estável com o ouro, possível de ser mantido em solução mesmo em concentrações praticamente nulas de cianeto livre. A lixiviação com cianeto deve ser conduzida em $\text{pH} > 9,2$. Abaixo deste pH forma-se ácido cianídrico, que é um composto volátil extremamente tóxico.

A solubilidade relativa dos metais usais em cianeto ocorre de acordo com a série eletroquímica, apresentada a seguir, na ordem do mais positivo para o mais negativo ⁸⁵ :

Mg; Al; Zn; Cu; Au; Ag; Hg; Pb; Fe; Pt. Nesta série, um metal possui a tendência de se dissolver em cianeto mais prontamente do que outro posicionado a seguir, além de poder deslocá-lo da solução. Por exemplo, zinco precipita cobre, ouro ou prata. Magnésio ou alumínio precipitam o ouro e a prata mais rapidamente do que o zinco.

A dissolução do ouro em cianeto é essencialmente um processo eletroquímico. A reação global mostrada na equação 1 envolve uma reação anódica e uma reação catódica ⁹³:



A figura 4.3 mostra os principais componentes do sistema eletroquímico.

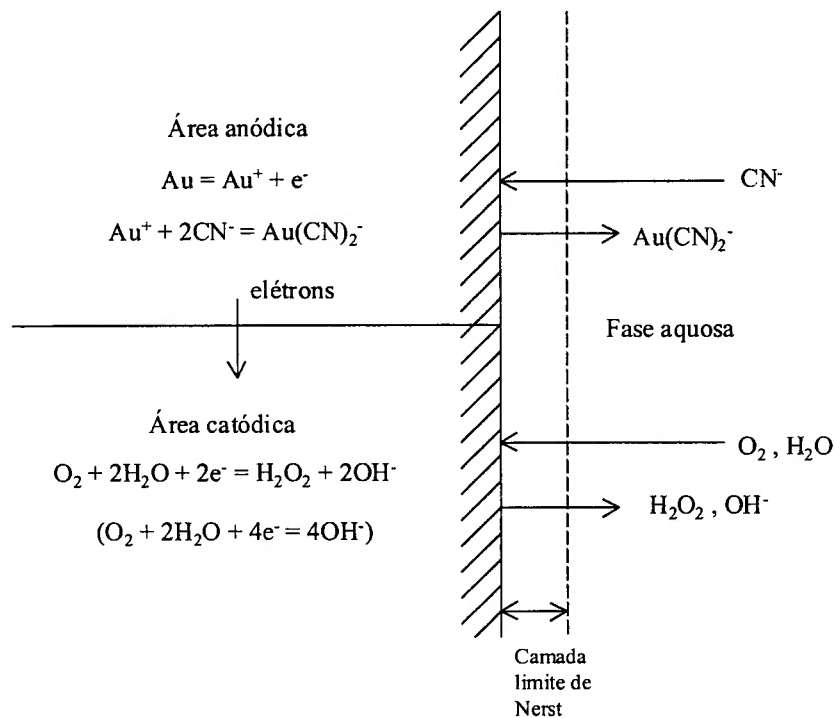


Figura 4.3 - Mecanismo de cianetação - Esquema de reação sólido-líquido de dissolução de ouro em cianeto ⁹¹

Assim, o processo de dissolução do ouro em cianeto envolve uma reação heterogênea na interface sólido/líquido com as seguintes etapas ⁹⁴ :

- 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, assim como dos outros produtos da reação;
- transporte dos produtos dessorvidos para a solução.

A velocidade de dissolução do ouro raramente é controlada pela etapa de reação eletroquímica. Isto ocorre apenas em casos como cianetação intensiva, onde as taxas de suprimento de oxigênio são elevadas e a agitação é vigorosa. Na maioria dos casos, a velocidade de dissolução do ouro é controlada pelo transporte de massas e depende da velocidade de difusão do cianeto, do oxigênio, ou de ambos até a superfície do metal ³⁶. A espécie que tiver a menor velocidade de difusão irá limitar a velocidade de dissolução do ouro. A condição limite, que permite a maior velocidade de dissolução, ocorre quando as velocidades de difusão do oxigênio e cianeto são iguais. Teoricamente, pode-se demonstrar que a relação entre as concentrações molares de cianeto e oxigênio que dão as mesmas velocidades de difusão é igual a 6 ⁹¹.

Nas condições usuais de lixiviação (com aeração sob pressão atmosférica), a velocidade de dissolução do ouro será limitada pela concentração de oxigênio. Isto porque, embora seja relativamente fácil aumentar a concentração de cianeto da solução, não adianta fazê-lo acima de determinado valor. A solubilidade do oxigênio é baixa e limitará a velocidade de reação. Ao nível do mar e temperatura de 25 °C, a concentração de saturação do oxigênio em água é de 8,2 mg/l. Nesta condição, pode-se calcular que a concentração de cianeto para se obter a máxima velocidade de dissolução do ouro é de apenas 100 mg/l (cianetação em solução pura). Concentrações de cianeto acima deste valor só seriam efetivas se o teor de oxigênio dissolvido fosse aumentado, por exemplo, pelo borbulhamento de oxigênio puro ou adição de um peróxido. Na prática industrial

podem ser necessárias concentrações mais elevadas de cianeto devido à competição de outras espécies por ele ³⁶.

4.3 Fatores que influenciam a cianetação

O processo de cianetação é influenciado por uma série de fatores ⁸⁵:

- características do minério;
- concentração de cianeto;
- concentração de oxigênio;
- alcalinidade;
- granulometria do minério;
- forma e tamanho das partículas de ouro;
- tempo de lixiviação;
- densidade de polpa;
- temperatura;
- agitação e eficiência da mistura;
- adição de carvão ativado;
- outros constituintes da polpa.

4.3.1 Características do minério

As características de uma jazida e as suas associações minerais determinam o método de lavra, o processo de tratamento e em particular, o desempenho de todos os processos químicos envolvidos na recuperação do ouro. Conseqüentemente, o conhecimento adequado da mineralogia de um minério é uma condição fundamental para projetar e operar um processo no sentido de otimizar a extração do ouro ³⁶. Pode-se prever o efeito potencial da mineralogia sobre a eficiência da recuperação do ouro e da prata, o consumo de cianeto, o tempo de residência e que considerações especiais devem ser tomadas para aumentar a economia da cianetação ⁸⁵.

Os seguintes fatores de natureza mineralógica afetam a recuperação do ouro ⁹⁵,
⁹⁶:

- minerais portadores de ouro;
- tamanhos das partículas de ouro;
- minerais hospedeiros;
- formas de associação dos minerais de ouro com os minerais hospedeiros.

Minerais portadores de ouro ⁹⁵

O ouro e a prata ocorrem em uma grande variedade de formas, com diferentes graus de encapsulamento ou disseminação em minérios. O ouro apresenta-se geralmente na forma nativa, em partículas com grandes variações de tamanho e pureza. Frequentemente ocorre em liga com a prata (electrum). As outras ligas e os teluretos são pouco frequentes e os demais minerais são raros.

A cianetação é bem sucedida no tratamento de ouro nativo e electrum, quando estes minerais ocorrem em tamanhos suficientes para serem liberados ou expostos à solução de cianeto por meio de uma moagem fina, mas não tão grossos que necessitem de um tempo de lixiviação elevado. A faixa ideal de tamanho varia de 5 a 50 μm .

A cianetação não é bem sucedida no tratamento de electrum rico em prata, teluretos e ouro muito fino. No caso de electrum rico em prata, pode ocorrer o recobrimento de suas partículas por um sulfeto secundário de prata, ao qual aderem finos do minério, que encapsulam e isolam o electrum da solução de cianeto. Os teluretos dissolvem-se muito vagorosamente, ou mesmo não se dissolvem em soluções de cianeto, tornando necessária a oxidação destes minerais antes da lixiviação. Partículas muito finas de ouro nativo e electrum podem ocorrer inclusas nos minerais hospedeiros e não serem expostas à solução de cianeto, mesmo após moagem fina.

Tamanho dos grãos de ouro

O ouro ocorre em uma faixa de tamanhos bastante diversificada, variando desde partículas visíveis a olho nu, na faixa de vários milímetros, até partículas da ordem da

fração de micrometros. O tamanho dos grãos é geralmente proporcional ao teor do minério. Os baixos teores usualmente se relacionam à faixa de tamanho desde poucas dezenas de micrometros até frações desta medida. Para a concentração gravítica, a faixa ideal de tamanho é acima de 50 μm e para cianetação, varia de 5 a 50 μm ⁹⁵.

O tempo de dissolução do ouro nativo depende do tamanho das partículas, grau de liberação / exposição, teor de prata e presença ou não de camadas de recobrimento na superfície do metal. A velocidade máxima de dissolução do ouro metálico em condições ideais (metal e solução puros) é de 3,25 mg/cm²/h, ou seja, equivalente a uma velocidade de penetração de 1,68 $\mu\text{m}/\text{h}$ de cada lado duma partícula exposta à solução de cianeto. Por conseguinte, uma partícula de 45 μm de espessura leva 13 horas para se dissolver completamente, ao passo que uma de 150 μm leva 44 horas. A velocidade de dissolução da prata pura é cerca da metade da encontrada para o ouro puro. No caso de ligas ouro-prata, as velocidades de dissolução apresentam valores proporcionais às suas composições ^{83, 90}.

Entretanto, na prática, o acesso da solução de cianeto ao ouro pode ser impedido ou dificultado por películas ou filmes de recobrimento na superfície do metal, razão pela qual as velocidades de dissolução observadas podem ser inferiores às obtidas com metal e solução puros ⁸³.

Minerais de ganga ⁹⁵

O ouro ocorre em associação com a maioria dos minerais formadores de rochas. Quando os sulfetos estão presentes, o ouro normalmente associa-se a eles. Neste caso, pode ocorrer totalmente encapsulado (incluso), em fraturas dos grãos de sulfetos, ou mesmo na ganga silicatada, mas muito próximo dos grão de sulfetos, geralmente na superfície destes grãos.

A pirita é o mineral hospedeiro mais comum, onde o ouro pode ocorrer na forma nativa, em ligas com a prata ou como telureto. Quando o ouro ocorre com pirita e arsenopirita, ele pode estar associado a ambos, e não apenas à arsenopirita, como

afirmam alguns mineralogistas. Na maioria dos casos o ouro encontra-se na forma de partículas discretas. A ocorrência de ouro em solução sólida na rede cristalina da pirita, arsenopirita e outros sulfetos hospedeiros é extremamente rara .

Associações de ouro com calcopirita, calcosita, covelita, pirrotita, galena, esfalerita e sulfetos de níquel são similares ao descrito para a pirita e arsenopirita e dependem largamente das características texturais gerais do minério.

A magnetita e outros óxidos secundários de ferro são hospedeiros relativamente frequentes para o ouro em ambientes oxidados. A forma de ocorrência do ouro é variada e inclui grãos de ouro nativo recobertos por uma camada de óxido de ferro secundário. Quando os sulfetos estão ausentes ou são raros, o ouro também pode ocorrer incluso em silicatos e carbonatos, ou então distribuído nos limites dos seus grãos. Neste caso, o ouro é muito fino, na faixa de poucos micrometros. Mesmo assim, quando o ouro ocorre nos limites dos grãos ou em fraturas, obtêm-se altas recuperações na cianetação. Contudo, em muitos depósitos epitermais, o ouro foi depositado em regiões sujeitas à precipitação de sílica, que pode impedir a cianetação devido ao seu encapsulamento.

Associações do ouro com material carbonoso ou grafite são relativamente comuns. Em alguns casos, tais associações podem tornar o minério refratário, uma vez que a matéria carbonosa pode adsorver o ouro solubilizado pelo cianeto e reincorporá-lo ao minério.

No caso de “placers”, o ouro ocorre como grãos detríticos livres, de tamanho grosseiro (geralmente variando de 0,1 até poucos mm), em sedimentos de composição mineralógica variada.

A mineralogia da ganga é importante para o processo de cianetação. Isto porque vários minerais ou compostos produzidos pelas suas decomposições podem reagir com o cianeto, causando um consumo excessivo deste reagente (cianicidas). Podem também reagir com o oxigênio presente na solução de cianeto, causando a diminuição da

velocidade de dissolução do ouro, que é dependente da concentração de oxigênio dissolvido ⁸³.

Praticamente todos os minérios tratados na cianetação contêm minerais de ferro. Minerais oxidados tais como hematita, magnetita, goethita, siderita e silicatos de ferro praticamente não são afetados pela solução de cianeto. Já os sulfetos de ferro, pirita, marcassita e pirrotita, decompõem-se apreciavelmente em solução de cianeto. A pirita é a mais e a pirrotita, a menos estável ⁹⁰.

Os silicatos, óxidos e carbonatos de metais básicos decompõem-se apreciavelmente em solução de cianeto, em contraste com os outros óxidos, carbonatos e silicatos, que geralmente não são reativos. Entre os sulfetos comuns, a pirita, arsenopirita, esfalerita e calcopirita são relativamente inertes em solução de cianeto, ao passo que muitos minerais secundários de zinco e cobre são muito solúveis. Outros sulfetos de arsênio e antimônio, além da grande solubilidade e consumo de cianeto, reduzem a extração de ouro, provavelmente pela ação de seus produtos de decomposição que inibem a reação do ouro com o cianeto e com o oxigênio, que ocorre na superfície deste metal.

O ouro associado à arsenopirita é geralmente refratário, mas algumas vezes pode ser lixiviado diretamente sem pré-tratamento de modo a obter altas recuperações. Arsenopirita finamente moída, quando agitada em pH elevado é uma grande consumidora de oxigênio ⁸⁵.

Formas de associação ⁹⁵

A forma de associação do ouro com os minerais hospedeiros é muito variada, mas pode ser resumida nas seguintes classes, para fins de beneficiamento:

- ouro distribuído em fraturas ou nas bordas entre grãos de um mesmo mineral;
- ouro distribuído nas bordas entre grãos de dois minerais diferentes;
- ouro totalmente incluso no mineral hospedeiro.

A cianetação é bem sucedida para recuperar as partículas de ouro associadas ao mineral hospedeiro quando o acesso da solução aerada de cianeto a elas é favorecido pela moagem. As partículas de ouro distribuídas em fraturas e nas bordas dos minerais podem ser dissolvidas na cianetação, mesmo que ainda aderidas ao mineral hospedeiro (não liberadas segundo o conceito clássico). Basta que elas tenham sido expostas pela moagem. A liberação não é, portanto, essencial para o processo de cianetação. Já as partículas de ouro inclusas em um mineral hospedeiro não são dissolvidas na cianetação.

4.3.2 Concentração de cianeto

O uso adequado do cianeto é de grande importância para a economicidade da lixiviação do ouro. Se a concentração de cianeto for muito baixa, a lixiviação será inadequada. Entretanto, se a adição de cianeto for demasiada, o custo de reagente será desnecessariamente alto, bem como o do tratamento do efluente. A adição de cianeto deve ser um compromisso entre estes dois fatores. O controle da adição de cianeto é de grande importância para otimizar a rentabilidade do projeto ⁸⁵.

Conforme mostrado no item 4.2, a velocidade máxima de dissolução de ouro em solução pura de cianeto saturada com 8 mg/l de oxigênio é obtida para uma concentração de NaCN de apenas 100 mg/l. Esta estimativa teórica é suportada pelas observações práticas, conforme gráfico mostrado na figura 4.4, onde a máxima velocidade de dissolução do ouro (3,2 mg/cm²/h) em solução pura é obtida para uma concentração de cianeto na faixa de 100 a 200 mg/l. Concentrações de cianeto acima deste valor não aumentam a cinética da lixiviação, que é limitada pelo teor de saturação de oxigênio em solução aerada sob pressão atmosférica ³⁶.

Nas condições práticas podem ser necessárias concentrações de cianeto superiores a este valor, devido à competição de outras espécies pelo cianeto. Este fato pode ser ilustrado pela lixiviação de ustulados de sulfetos mostrada na figura 4.5. A maior velocidade de dissolução do ouro foi obtida para uma concentração de KCN de 0,25% (2.500 mg/l).

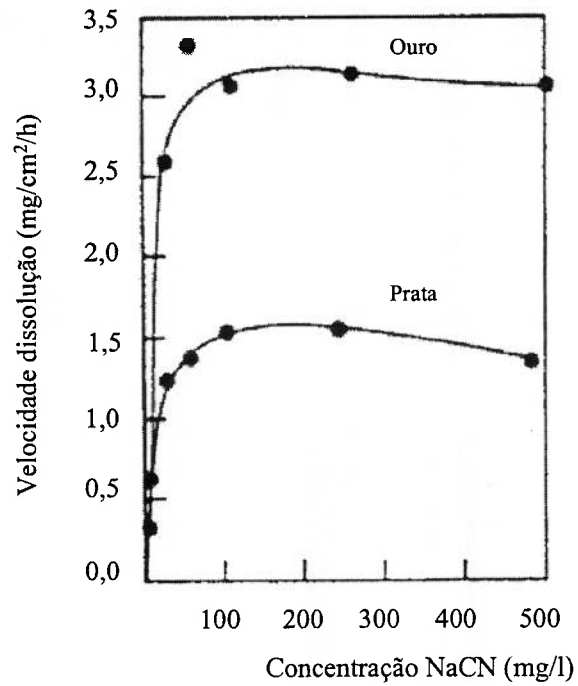


Figura 4.4 - Efeito da concentração de cianeto na velocidade de dissolução do ouro e da prata³⁶

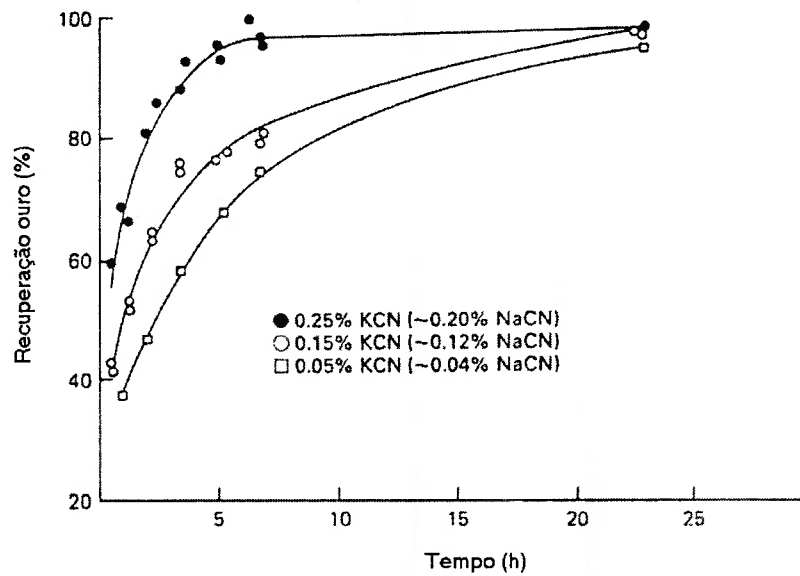


Figura 4.5 - Efeito da concentração de cianeto na recuperação de ouro na lixiviação de produto de ustulação³⁶

Não se devem utilizar concentrações elevadas de cianeto para lixiviar minérios que contêm substâncias cianílicas, no sentido de evitar um consumo muito acentuado deste sal ⁹⁷. A concentração de cianeto na solução também pode ser governada por outros fatores além da cinética. Por exemplo, em Kambalda, Austrália, o cianeto é adicionado em excesso para manter uma concentração mínima de 200 mg/l na alimentação do circuito CIP, de modo a evitar altos carregamentos de cobre e níquel no carvão ativado ⁸⁵.

4.3.3 Concentração de oxigênio

O oxigênio é muito importante para a dissolução do ouro e a aeração é a sua fonte majoritária na indústria deste metal. O problema prático do uso do oxigênio reside na sua baixa solubilidade em água. Pode-se demonstrar teoricamente que, na maioria das condições, a velocidade de dissolução do ouro é controlada pela difusão do oxigênio até a superfície do metal, que dependerá dos seguintes parâmetros ⁹⁴:

- altitude (pressão atmosférica);
- temperatura da solução;
- tipo e intensidade da agitação;
- reologia da polpa;
- química da polpa.

A concentração de oxigênio em água é função da pressão atmosférica e da temperatura. Soluções saturadas com ar possuem concentrações na faixa de 5 a 10 mg/l. Maior pressão e temperaturas mais baixas contribuem para maiores concentrações de oxigênio dissolvido e, conseqüentemente, maiores velocidades de dissolução de ouro (contanto que haja cianeto suficiente). Apesar de um acréscimo de temperatura aumentar a difusibilidade de oxigênio na polpa, o efeito da diminuição da concentração deste oxidante pode prevalecer e acarretar uma diminuição da velocidade de lixiviação do ouro ⁹³.

A dispersão de ar na polpa dependerá de sua viscosidade e do modo de injeção do ar. A transferência de massa do oxigênio dependerá das condições hidrodinâmicas do tanque agitado e variará com a reologia da polpa, tipo do agitador e intensidade de energia utilizada. O aumento da viscosidade da polpa e a diminuição da granulometria contribuem para a diminuição da transferência de massa de oxigênio. Por outro lado, o aumento do uso de energia na agitação ou o uso de agitadores mais eficientes contribuem para aumentar a transferência de massa de oxigênio e, conseqüentemente, para aumentar a velocidade de dissolução do ouro ^{93, 94}. A química da polpa influencia a difusão do oxigênio. A presença de compostos consumidores de oxigênio pode retardar a velocidade de dissolução do ouro. Este efeito pode ser minimizado pela oxidação destes compostos antes da adição do cianeto ⁹³.

Diversos autores têm estudado a influência da adição de oxigênio puro e peróxido de hidrogênio sobre a dissolução de ouro em minérios ^{98, 99, 100, 101, 102}. As conclusões são de que a velocidade de dissolução do ouro pode ser acelerada aumentando-se a concentração de oxigênio na polpa por meio de borbulhamento de oxigênio ou da adição de oxidantes como H_2O_2 , Na_2O_2 , CaO_2 . Além de reduzir o tempo de residência de lixiviação, a operação com níveis de oxigênio dissolvido mais elevados reduz o consumo de cianeto e pode, em alguns casos, elevar a extração do ouro.

Na prática, diversos indicadores de necessidade de injeção de oxigênio têm sido identificados ¹⁰³:

- concentração molar de oxigênio menor do que 8 vezes a concentração molar de cianeto;
- a velocidade de dissolução de oxigênio na aeração é menor que a velocidade de consumo de oxigênio pela polpa;
- ocorrência de picos de teor de ouro no rejeito;
- tempo de residência inadequado;
- deficiências de agitação, existência de curto-circuito de polpa ou sedimentação;
- água de processo salina;

- alta concentração de tiocianeto na solução (indicativo de consumo de cianeto elevado).

Na prática, existem diversos métodos para avaliar a demanda de oxigênio de um minério e decidir se compensa aplicar industrialmente a lixiviação com injeção de oxigênio, como o desenvolvido por Jara et al. ⁹⁹. O consumo de oxigênio dependerá do tipo de minério, variando nas seguintes faixas ¹⁰⁴:

- 0,08 a 0,15 m³/t para minérios oxidados;
- 0,2 a 0,4 m³/t para misturas de minérios oxidados e primários;
- 0,6 a 6,0 m³/t para minérios primários sulfetados.

A lixiviação com borbulhamento de oxigênio puro pode ser vantajosa em muitos casos. Entretanto, deve-se tomar cuidado e estudar bem o assunto, uma vez que um grande número de usinas que adotou a injeção de oxigênio puro não obteve resultados econômicos favoráveis e retornou ao borbulhamento de ar convencional ⁸⁵.

A injeção de oxigênio para acelerar a dissolução do ouro aumenta o potencial de se empregar usinas de ouro modulares para recuperar o ouro de pequenas a médias jazidas. Um estudo técnico-econômico empregando o reator Filblast demonstrou que os tamanhos dos tanques de cianetação são bastante reduzidos, mesmo para usinas com capacidade de 1 milhão t/ano, permitindo o seu transporte por caminhões ⁶⁹.

4.3.4 Alcalinidade

A adição de álcalis ao processo de cianetação tem várias finalidades, entre elas a de evitar a perda de cianeto por hidrólise ou reação com o dióxido de carbono do ar, assim como neutralizar compostos ácidos da água e do minério. Quando a base é a cal hidratada, existe a vantagem adicional de aumento da velocidade de sedimentação das partículas de minério no espessamento ⁹⁴.

Por um lado, deve-se manter o pH acima de 9,5 para evitar a formação de HCN que, além de ser um gás letal, leva a um aumento de consumo de cianeto e,

consequentemente, à elevação do custo operacional. Por outro lado, a adição de álcalis em excesso leva à passivação da superfície do ouro e inibição de sua dissolução. Entretanto, é importante mencionar que, mesmo em caso de pH abaixo de 9,5, a liberação de HCN para a atmosfera não ocorre facilmente, conforme foi constatado por uma medição da Câmara de Mineração da África do Sul: foram encontrados níveis aceitáveis de HCN sobre pачucas operando com pH 7⁹⁷.

O efeito dos hidróxidos de cálcio e sódio sobre a velocidade de dissolução do ouro é mostrado na figura 4.6. Quando se usa hidróxido de cálcio, a velocidade de dissolução do ouro cai rapidamente à medida que o pH se aproxima de 11 e quase se anula no pH 12,2. Já com hidróxido de sódio, a queda na velocidade de dissolução do ouro só se acentua a partir do pH 12,5 e mesmo em pH 13,5, em igual concentração de cianeto, esta velocidade é muito superior à do caso de pH 12,2 com hidróxido de cálcio⁹⁴.

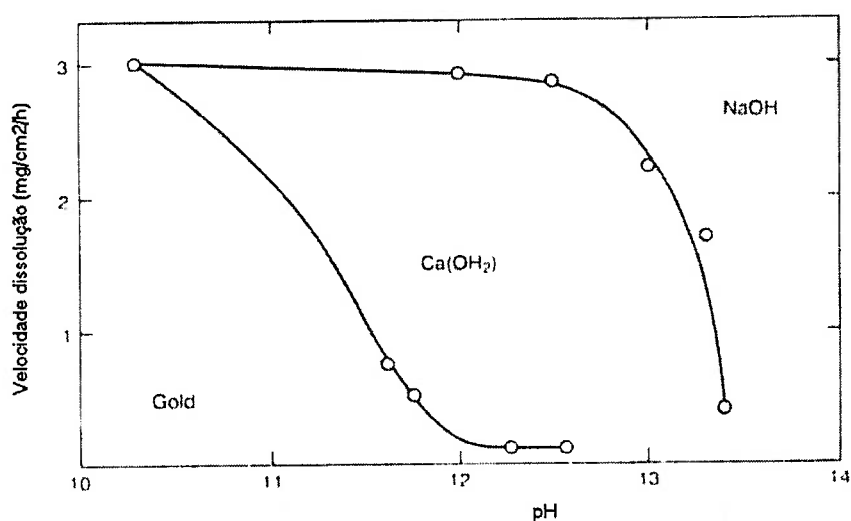


Figura 4.6 - Efeito da concentração de hidróxido de cálcio sobre a velocidade de dissolução do ouro⁹⁴

A velocidade de dissolução do ouro é comprometida seriamente em baixos valores de pH. A cianetação é mais eficiente para pH's superiores a 10 e diminui abruptamente até atingir praticamente zero em baixo pH¹⁰⁵.

No beneficiamento de minérios contendo cianídeos, especialmente pirrotita, o pH deve ser mantido o mais baixo possível. Principalmente na etapa de pré-aeração, o pH deve ser menor do que 10, para evitar a produção de cianídeos, como íons sulfetos, sulfatos e tiosulfatos, que aumenta em razão direta com a alcalinidade ⁹⁷.

4.3.5 Granulometria de moagem ⁸⁵

A cominuição tem grande importância para o processo de cianetação. Ela é responsável pela exposição das partículas de ouro à solução de cianeto. A granulometria ótima de moagem é governada por fatores econômicos, ou seja, pelo balanço entre a recuperação de ouro e os custos envolvidos. De um modo geral, uma granulometria de moagem mais fina resulta em maior recuperação de ouro (receita mais elevada), contrabalançado por maiores custos de moagem e consumo de reagentes. A granulometria de moagem pode ser otimizada determinado-se a sensibilidade do valor incremental da recuperação contra o acréscimo de custo para obter esta recuperação.

A prática normal na indústria do ouro consiste em determinar a granulometria ótima de moagem medindo-se as recuperações de ouro em relação ao tamanho de moagem do minério. Usualmente este tamanho é expresso pela porcentagem de material passante em 75 μm (200 mesh).

Diversos estudos com minérios da região de Witwatersrand, África do Sul, demonstraram que o teor de ouro no rejeito da cianetação é diretamente proporcional à porcentagem de material acima de 105 μm (150 mesh). Por conseguinte, a eficiência de remoção de partículas grossas, para o seu retorno ao moinho, é de grande importância para a eficiência da cianetação.

4.3.6 Concentração gravítica

O efeito da concentração gravítica sobre a cianetação do ouro está diretamente relacionado ao tamanho das partículas de ouro e sua influência sobre os parâmetros da

cianetação. Quando partículas grossas são enviadas para a cianetação, elas podem não se dissolver completamente no tempo de residência disponível nos tanques. Neste caso, a prática usual é remover, por meio de concentração gravítica, o máximo possível destas partículas antes da cianetação, de modo a manter o tempo de lixiviação tão curto quanto possível e minimizar a segregação do ouro grosso no circuito. Outra prática, que reduz o tamanho das partículas de ouro a serem alimentadas à cianetação, consiste em moer e classificar o minério em circuito fechado. Neste caso, a permanência das partículas de ouro no circuito de moagem é maior do que a dos minerais de ganga devido à diferença de densidade. Assim, as partículas grossas de ouro são recirculadas ao moinho até que elas fiquem suficientemente pequenas ou laminadas para saírem no overflow do classificador e serem enviadas ao circuito de cianetação ⁹⁰.

Existe uma grande variedade de separadores gravíticos usados para recuperar ouro. Em todos eles a concentração é realizada em polpa de minério moído. Os sistemas de concentração gravítica são de custo relativamente baixo, não poluidores e eficientes do ponto de vista energético. Sua eficiência depende do tamanho das partículas e geralmente diminui para partículas muito grossas e muito finas. Sempre ocorre uma grande queda de eficiência para partículas abaixo de 100 μm . O menor tamanho para uma separação efetiva (70% de eficiência) depende da forma e densidade das partículas, sendo: 50 a 200 μm para jigues, 30 a 90 μm para espiral, 10 a 15 μm para mesas vibratórias, 5 a 10 μm para concentradores centrífugos (Knelson). Como a concentração gravítica depende da forma das partículas, além de seu tamanho e peso específico, a presença de palhetas de ouro tende a reduzir a recuperação, assim como a presença de substâncias que tornam as partículas de ouro hidrofóbicas, como por exemplo coletores ou graxas, que possibilitam às partículas de ouro flutuarem na superfície da água ^{83, 106, 107, 108, 109}. A presença de argilo-minerais na água prejudica o desempenho da concentração gravítica devido ao aumento da viscosidade da polpa.

Os critérios da decisão de se usar ou não concentração gravítica em usinas hidrometalúrgicas variam bastante de empresa para empresa, e de certa maneira são governados pela proporção de ouro grosso na alimentação. A concentração gravítica não tem constado do circuito de diversas usinas sul-africanas, principalmente as que

empregam moagem semi-autógena. Nestes casos, muitas vezes o tempo de residência nos tanques de cianetação é aumentado para mais de 40 horas para garantir que as partículas de ouro grosso sejam totalmente dissolvidas ¹¹⁰. A não utilização de concentração gravítica aumenta o tempo de residência das partículas de ouro no circuito de moagem, bem como o acúmulo deste metal entre e atrás das placas de revestimento dos moinhos ¹¹¹. Contribui, também, para aumentar o recobrimento da superfície das partículas de ouro por uma camada de óxidos de ferro gerados no circuito de moagem, o que diminui a extração de ouro na cianetação ¹¹². Medidas alternativas à concentração gravítica, para evitar ou minimizar a retenção de ouro no moinho, incluem a adição de cianeto ao circuito de moagem, ou mesmo o emprego de placas de revestimento maiores, com fixação por parafusos de alta resistência ¹¹¹.

Em uma sessão especial sobre concentração gravítica do Randol Gold Forum 96 ^{113, 114, 115, 116, 117}, ficou enfatizada a tendência de crescimento do emprego da concentração gravítica devido ao grande sucesso dos concentradores centrífugos. Eles operam automaticamente (reduzem a mão-de-obra e os problemas de segurança), aumentam a recuperação gravítica de ouro, diminuem a quantidade de ouro em circulação e reduzem a frequência de dessorção do carvão ativado (menor custo operacional).

4.3.7 Tempo de lixiviação

O tempo necessário para lixiviar o ouro em tanques agitados varia bastante de minério para minério. Na prática industrial são encontrados tempos de 6 a 72 horas. Minérios que requerem um tempo mais longo para obter a máxima extração de ouro levam a um maior investimento na usina ⁹⁴. Na maioria dos casos, o aumento do tempo de lixiviação resulta em maior extração de ouro. Mas o incremento de extração vai diminuindo gradativamente até um ponto em que não ocorre mais a dissolução do metal. Em outros casos, a extração passa por um máximo e depois diminui, o que pode ser explicado pela adsorção do ouro por substâncias ativas presentes no minério (efeito "*preg-robbing*") ⁸⁵.

O tempo de lixiviação é influenciado por muitos fatores, como as condições do minério, a concentração de oxigênio, a taxa de agitação, a temperatura, o tipo do álcali usado, entre outros. O cálculo teórico do tempo de residência, a partir destes parâmetros básicos, não é viável para os graus de precisão requeridos em projetos industriais. Sua determinação deve ser feita por ensaios em laboratório ¹¹⁸.

A lixiviação em presença de carvão ativado (CIL) usualmente requer um tempo de residência menor do que um circuito convencional de cianetação seguido de estágios de carvão-em-polpa (CIP). Ao passo que no CIL a lixiviação é concomitante com a adsorção do ouro, no CIP convencional a adsorção só é iniciada após a lixiviação estar completa. O uso de carvão ativado pode aumentar a recuperação de ouro, seja pelo tempo de lixiviação extra disponível nos tanques CIP, seja pela competição do carvão ativado com substâncias ouro-adsorvente no caso de minérios "*preg-robbing*" ⁸⁵.

4.3.8 Densidade da polpa

Na prática industrial são encontradas operações com porcentagens de sólidos na polpa variando desde 33% até 56% em peso. Se por um lado polpas mais diluídas possibilitam extrações de ouro mais rápidas ou menores tempos de pré-aeração, por outro lado implicam em um investimento mais elevado devido ao tamanho maior de tanques, tubulações e bombas, além de ser mais difícil de manter os sólidos em suspensão. A concentração de sólidos ideal é um compromisso entre estes dois aspectos e varia de acordo com a viscosidade da polpa, ficando na maioria dos casos entre 45% e 52% de sólidos em peso ⁸⁵.

A maioria dos minérios lixivia bem em concentrações de 50% de sólidos. Entretanto existem minérios que produzem polpas muito viscosas, como o de Pinson, Estados Unidos, que apresentam um considerável aumento de viscosidade a partir de 40% de sólidos. Por esta razão, a concentração de sólidos na sua cianetação é limitada neste valor. Existem casos de usinas de pequeno porte onde, devido à grande sensibilidade do investimento sobre a rentabilidade do projeto, a lixiviação é feita numa porcentagem de sólidos mais baixa para evitar o investimento num espessador antes da

cianetação. Neste caso, a prática mais usual é recircular parte do overflow do ciclone ao moinho para garantir a concentração de polpa mais elevada possível na cianetação ¹¹⁹.

Quando a recuperação do ouro solubilizado for feita pelo processo CIP, a concentração de sólidos na cianetação deve ser igual ou superior ao valor mínimo admitido por esta rota. A recuperação máxima de ouro no CIP é obtida para polpas com densidade entre 1,40 e 1,45 g/cm³ (45% a 49% de sólidos em peso para minérios com densidade de 2,7 g/cm³), exceto em casos com problemas de viscosidade, como o do minério de Pinson ¹¹⁹.

4.3.9 Temperatura

A elevação da temperatura tem dois efeitos opostos: o aumento da velocidade de reação e a diminuição da concentração do oxigênio dissolvido na solução. Julian e Smart encontraram que a velocidade de dissolução do ouro em solução de 0,25% de KCN aumenta com a temperatura até chegar a um máximo em 85°C, embora a concentração de oxigênio dissolvido nesta temperatura seja menos da metade do que a 25°C. Acima de 110°C, a decomposição do cianeto torna-se relevante ^{90, 120}. Na prática, a extração de ouro com soluções aquecidas apresenta uma série de desvantagens como: custo de aquecimento da polpa; aumento do consumo de cianeto devido à decomposição pelo calor e aceleração das reações entre o cianeto e substâncias cianicidas do minério ⁹⁰.

4.3.10 Adição de carvão ativado ⁸⁵

A adição de carvão ativado à polpas de lixiviação (processos CIP e CIL) pode aumentar a extração do ouro devido a duas causas principais. A primeira, refere-se à disponibilidade de um tempo de lixiviação adicional no caso de circuito CIP. A segunda, é relacionada ao efeito de deslocamento do equilíbrio entre as concentrações de ouro em solução e adsorvido nas espécies ativas do minério ("*preg-robbers*", como por exemplo material carbonoso). Por ser um adsorvente mais poderoso, o carvão

ativado causa um grande abaixamento da concentração de ouro da solução, o que faz com que parte do ouro adsorvido nas espécies ativas do minério seja ressolubilizado e, então, adsorvido pelo carvão ativado. Este fenômeno pode ser observado em diversas operações com minérios ustulados na África do Sul (Paringa, Fairview, New Consort, President Brand, Harmony).

4.3.11 Efeitos químicos dos outros constituintes da polpa

Os efeitos químicos dos outros constituintes da polpa, que podem ter uma influência negativa na extração do ouro e na cinética da cianetação, podem ser usualmente atribuídos a um dos seguintes fatores ¹²¹:

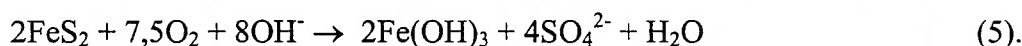
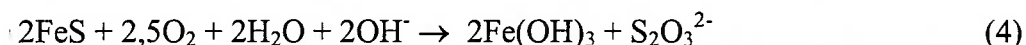
- consumo do cianeto e do oxigênio da polpa devido a reações com outros constituintes da polpa;
- formação de filmes passivadores na superfície das partículas de ouro, os quais podem retardar a dissolução anódica do ouro;
- presença de materiais carbonosos, que podem adsorver os íons aurocianeto da polpa.

Na prática industrial, a ação de íons cianídeos e/ou consumidores de oxigênio pode afetar significativamente a velocidade de dissolução do ouro. A formação de uma película de recobrimento de óxido de ferro, a passivação da superfície do ouro pela adsorção de AuCN e a formação de um filme de sulfetos são causas frequentes para a diminuição da velocidade de dissolução do ouro ⁸³. A presença de íons de metais pesados, como o chumbo, mercúrio, bismuto e tálio reduz a passivação e aumenta significativamente a velocidade de dissolução do ouro ^{83, 122}. Uma partícula de ouro em contato com minerais condutores pode ser passivada por efeito galvânico ¹²³.

Crundwell ¹²⁴ observou que a formação do leito de passivação sobre a superfície do ouro tem pequena influência sobre a sua velocidade de dissolução no início da cianetação. Entretanto, nas fases mais avançadas do processo, quando a cobertura relativa da superfície do ouro pelo leito de passivação aumenta, ela causa uma grande diminuição da velocidade de dissolução. Em consequência, afirmou que um modelo

cinético com a constante de velocidade proporcional à raiz quadrada da concentração de cianeto e oxigênio descreve melhor uma operação real do que o modelo de difusão, que prevê uma dependência de primeira ordem sobre a concentração de cianeto e oxigênio.

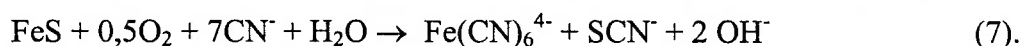
Sulfetos de ferro como a pirita, a marcassita e a pirrotita estão comumente associados ao ouro. Estes minerais apresentam vários graus de decomposição em soluções alcalinas aeradas de cianeto, com a reatividade crescendo na seguinte ordem: pirita < marcassita < pirrotita. Na ausência de íons cianeto, têm-se observado produtos de reação tais como hidróxido férrico, íon sulfeto, enxofre elementar, tiosulfato, politionatos e sulfatos. A formação de estados de oxidação mais elevados do enxofre consome cal hidratada e oxigênio ¹²¹ :



A concentração de oxigênio dissolvido em polpas contendo pirrotita torna-se muito baixa devido ao seu alto grau de oxidação e consumo de oxigênio. Nestas condições, a pirrotita pode dissolver-se não-oxidativamente, produzindo íons sulfeto e hidróxido ferroso ¹²¹:



A velocidade de todas estas reações aumenta em relação direta com a alcalinidade. Na presença de íons cianeto, os sulfetos de ferro são instáveis em relação à oxidação, produzindo ferrocianeto solúvel e tiocianato como os principais produtos da reação ⁹⁴ :



Entretanto, tiosulfatos, politionatos e sulfatos também podem ser produzidos. Não existe uma concordância sobre a melhor prática de cianetar minérios que contêm sulfetos de ferro. Na maioria dos casos, as adições de ar e cianeto são suficientes para dissolver o ouro. Se o consumo de cianeto for alto, pode ser necessário fazer uma pré-aeração da polpa em pH alcalino.

Especial atenção deve ser dada ao controle do pH, principalmente na presença de quantidades razoáveis de sulfetos de ferro solúveis. Deve-se evitar a pré-aeração em pH superior a 10 para não favorecer a decomposição adicional de sulfetos. A adição de sais solúveis de chumbo também ajuda a reduzir o consumo de cianeto, assim como possibilita aumentar a extração de ouro em alguns casos ⁹⁰.

Minerais de cobre associam-se frequentemente ao ouro e causam uma grande interferência no processo de cianetação. Recentemente, a lixiviação de minérios de ouro com minerais de cobre tem sido objeto de um grande número de trabalhos em congressos internacionais e revistas especializadas devido ao elevado potencial de reservas em todo o mundo. No Brasil, o assunto tem merecido atenção especial de empresas como a CVRD, que dispõe de grandes reservas de ouro e cobre na região da Serra de Carajás ¹²⁵.

A extensão da reação com o cianeto dependerá dos minerais de cobre presentes, da sua granulometria e da concentração de cianeto da solução. A velocidade de dissolução dos minerais de cobre aumenta em relação direta com a finura de moagem, com a concentração de cianeto, e com a temperatura. Esta reação de dissolução é indesejável durante a lixiviação, uma vez que ela pode consumir grande quantidade de cianeto e oxigênio dissolvido e, conseqüentemente, retardar a velocidade de dissolução do ouro e interferir com os processos de recuperação subsequentes ^{94, 121, 125, 126, 127}. Em decorrência, é importante conhecer as condições de solubilidade dos minerais de cobre para otimizar a extração de ouro.

A tabela 4.1 ilustra a solubilidade de minerais de cobre moídos a 100% < 150 µm e lixiviados em solução de 0,1% de NaCN. Azurita, malaquita, cuprita, calcosita, cobre nativo e bornita dissolvem-se completamente, ou quase, nas condições usuais de cianetação. Já a calcopirita (o mineral de cobre mais comum) é bem menos solúvel, mas mesmo assim pode causar problemas à cianetação. Quando o cobre ocorre na rede de outros minerais não solúveis, ele praticamente não é atacado pelo cianeto ⁹⁰.

A dissolução dos minerais de cobre em cianeto forma uma série de complexos solúveis altamente estáveis de Cu(I), dos quais o $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ é a espécie predominante nas condições usuais da cianetação ⁹⁴:

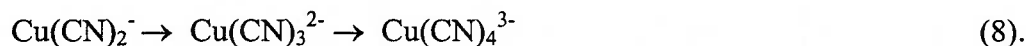
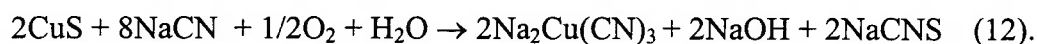
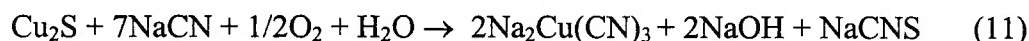
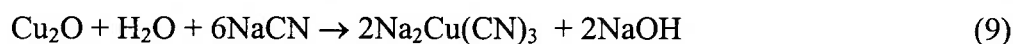


Tabela 4.1 - Solubilidade de minerais de cobre em solução de 0,1% de NaCN às temperaturas de 23 e 45 °C ⁹⁰

Mineral	Composição	% do Cobre Total Dissolvido	
		23 °C	45 °C
Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	94,5	100,0
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	90,2	100,0
Calcosita	Cu_2S	90,2	100,0
Cobre metálico	Cu	90,0	100,0
Cuprita	Cu_2O	85,5	100,0
Bornita	$\text{FeS} \cdot 2\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{CuS}$	70,0	100,0
Enargita	$3\text{CuS} \cdot \text{As}_2\text{S}_5$	65,8	75,1
Tetrahedrita	$4\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$	21,9	43,7
Crisocola	CuSiO_3	11,8	15,7
Calcopirita	CuFeS_2	5,6	8,2

Algumas reações possíveis são ¹²⁶:



O cobre divalente, que ocorre em minerais oxidados como a azurita e a malaquita, além de consumir cianeto para formar o complexo $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$, consome cianeto adicional para formar cianato. Já no caso dos sulfetos, além do consumo

adicional de um ou dois moles de cianeto para formar tiocianato (dependendo do estado de oxidação do cobre), verifica-se também o consumo de oxigênio.

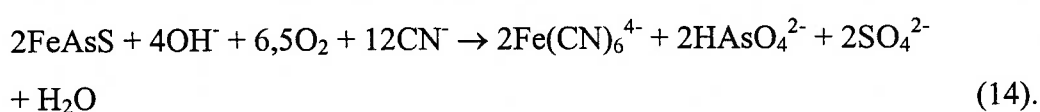
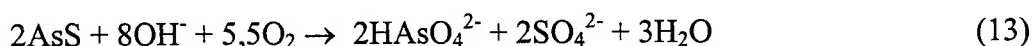
O efeito dos produtos da reação do cobre com cianeto sobre a lixiviação do ouro já foi amplamente estudado ou relatado por diversos pesquisadores ^{36, 85, 90, 121, 125}. Existe um consenso de que a velocidade de dissolução do ouro não é afetada pela presença destes produtos, desde que um excesso considerável de íons cianeto seja mantido em solução. Para tanto, a relação molar entre a concentração de cianeto total e de cobre na solução deverá ser maior ou igual a 4, ou mesmo a 4,5 conforme alguns autores. Em termos práticos, equivale a usar uma relação de massas mínima de 3 NaCN para 1 Cu em solução.

Em recente estudo sobre a cianetação de minérios de ouro com alto cobre, Chamberlin ⁴⁹ discutiu processos inovadores e propôs árvores lógicas para a definição do processo, incluindo:

- Se o consumo de NaCN do minério for menor do que 1,0 kg /t , não compensa regenerar o cianeto. Neste caso, os esforços devem ser dirigidos para minimizar o seu consumo.
- Se o consumo de cianeto for superior a 1,0 kg/t, deve-se considerar a sua regeneração. Os processos AVR e Cyanisorb podem ser utilizados se não se deseja produzir cobre. Caso contrário, podem ser utilizadas combinações de processos convencionais, como a lixiviação sulfúrica do cobre seguida de neutralização e cianetação do ouro, em pilhas ou em tanques. Também podem ser utilizados processos inovadores, como o Augment, o de extração por solventes com guanidinas, ou o Scerecini.

Estes processos inovadores baseiam-se nas elevadas extrações conjuntas de ouro e cobre possíveis pela cianetação. O processo Scerecini, já comprovado industrialmente em Mt. Gibbson e Red Dome, Austrália, usa carvão ativado para separar e recuperar o cobre e o ouro solubilizados ¹²⁸. Os processos Augment e Guanidinas ainda encontram-se em fase de desenvolvimento e visam agregar valor pela produção de ouro e cobre metálicos, bem como pela regeneração do cianeto ^{126, 129}.

Sulfetos de arsênio ¹²¹ comumente associados ao ouro, como a arsenopirita (FeAsS), o realgar (AsS) e o orpimento (As₂S₃) podem influenciar a extração do ouro devido às suas reações de decomposição em polpas alcalinas aeradas de cianeto. A reatividade aumenta na seguinte ordem: FeAsS < AsS < As₂S₃, resultando em produtos altamente estáveis:



Estas reações consomem grandes quantidades de oxigênio e cal hidratada (AsS e As₂S₃), assim como de cianeto (FeAsS) e, em consequência, podem retardar a cianetação do ouro. Outros compostos também podem ser produzidos durante a cianetação na presença de minerais de arsênio: S²⁻, SCN⁻, S₂O₃²⁻, AsS₃³⁻ e HAsO₃²⁻. Contudo, com adequado suprimento de oxigênio, os produtos intermediários como o tioarsenieto, AsS₃³⁻, e o mono-meta-arsenito, HAsO₃²⁻, são oxidados a íons arsenatos.

Não há evidências de que os compostos com arsênio e oxigênio tenham algum efeito químico sobre a extração do ouro além do resultante do consumo do oxigênio. Hedley e Tabachnik ⁹⁰ sugeriram que a adsorção de íons tioarsenietos na superfície do ouro pode retardar a dissolução deste metal. O efeito deletério dos íons sulfeto sobre a extração do ouro, devido à formação de um filme passivador, é bem conhecido. A adição de nitrato de chumbo demonstrou aumentar a oxidação dos íons sulfeto e tioarsenieto.

Sulfetos de antimônio ¹²¹ consomem oxigênio e cal hidratada por dissolução em soluções alcalinas. A estibinita, Sb₂S₃ é o único sulfeto de antimônio que associa-se ao ouro e possui uma química similar à do As₂S₃. Oxida-se em solução alcalina a antimoniotos (HSbO₃²⁻), antimoniatos (HSbO₄²⁻) e tioantimonioto (SbS₃³⁻). Hedley e Tabachnick ⁹⁰ sugeriram que íons tioantimoniotos podem se adsorver na superfície do ouro e retardar a dissolução do metal. A aeração em solução alcalina (pH 10 ou mais

baixo) antes da adição de cianeto pode aumentar a dissolução do ouro. A adição de nitrato de chumbo acelera a oxidação dos íons sulfeto a tioantimoniato.

Ânions contendo enxofre ¹²¹ podem influenciar consideravelmente a cianetação do ouro. Os ânions sulfeto, tioarseniato e tioantimoniato são conhecidos como fortes venenos para a cianetação, uma vez que podem adsorver sobre a superfície do ouro, tornando-a inerte por impedir o acesso de oxigênio e cianeto. A formação de sulfeto auroso insolúvel sobre a superfície do ouro pode reduzir a velocidade de dissolução deste metal pela metade. Apesar dos ânions sulfeto, tioarseniato e tioantimoniato serem termodinamicamente instáveis nas condições da cianetação, sua velocidade de oxidação é consideravelmente baixa. Assim, para contornar o seu efeito nocivo, frequentemente é adicionado chumbo à solução (como nitrato, acetato ou litargírio), o que pode aumentar bastante a velocidade de dissolução. No caso dos íons sulfeto, este efeito tem sido explicado pela formação de um precipitado de sulfeto de chumbo sobre as partículas de sulfeto, que reduz a continuidade de sua oxidação. Os íons tiosulfato e politionatos, produzidos pela oxidação de muitos sulfetos, podem consumir oxigênio, cal hidratada e cianeto, apesar de não existirem evidências de que influam diretamente na dissolução do ouro. Os íons tiocianato, comumente produzidos durante a oxidação dos sulfetos, aparentemente não influenciam o processo de cianetação.

Ciano-complexos de metais básicos ¹²¹ de Fe^{2+} , Ni^{2+} , Cu^+ , Zn^{2+} e Mn^{2+} não têm efeito direto sobre a cianetação, embora durante a sua formação, a dissolução do ouro tenha sido retardada pelo consumo de uma grande quantidade de cianeto. O ferricianeto pode agir como um oxidante e lixiviar ouro. Baixas concentrações de Pb^{2+} , Hg^{2+} , Bi^{3+} e Tl^+ podem aumentar a lixiviação do ouro em certas condições, o que tem sido explicado por evitar a formação de um leito macromolecular temporário de AuCN adsorvido sobre a superfície do ouro em lixiviação.

Íons cálcio ¹²¹, normalmente introduzidos na polpa de cianeto sob a forma de cal hidratada, podem influenciar a velocidade de dissolução do ouro. Esta velocidade é bastante reduzida se o pH for elevado acima de 11 com cal hidratada, e quase se anula quando o pH atinge 12,2. Importante é o fato de que é necessário que ambos os íons

cálcio e hidróxido estejam presentes para que o efeito seja observado. A adição de cálcio por meio de outra fonte, como por exemplo cloreto de cálcio, não afeta a dissolução do ouro.

Material carbonoso ¹²¹ pode reduzir a recuperação do ouro, ou por restringir a sua liberação da matriz carbonosa, ou por adsorver o ouro do licor. O tratamento destes minérios pode ser feito através de diversas rotas, como ustulação, adição de querosene ou óleos pesados, flotação e cloração aquosa.

4.3.12 Pré-Aeração ⁸⁵

Existem minérios que requerem um condicionamento da polpa antes da adição do cianeto. Tal condicionamento, chamado de pré-aeração, ou pré-oxidação, envolve a adição de um álcali (geralmente leite de cal) e o borbulhamento de ar (ou mesmo de oxigênio) com o objetivo final de aumentar a extração de ouro e/ou reduzir o consumo de cianeto. Para atingir o seu objetivo final, a pré-aeração tem os seguintes objetivos imediatos:

- ajustar e estabilizar o pH;
- oxidar substâncias consumidoras de oxigênio e cianeto;
- oxidar substâncias passivadoras da solubilização do ouro;
- passivar a superfície de sulfetos reativos.

A pré-aeração é efetiva em termos de custos quando o minério possui sulfetos de ferro solúveis, como a pirrotita ou pirita parcialmente oxidada. Os íons ferroso e sulfeto resultantes da dissolução consomem grandes quantidades de oxigênio e cianeto e interferem com a dissolução do ouro. Consequentemente, precisam ser eliminados da solução.

Na pré-aeração, os íons ferroso são rapidamente oxidados a férrico, em pH superior a 7. Em seguida, os íons férrico formados são precipitados como hidróxido férrico, inerte ao cianeto. A taxa de oxidação dos íons ferroso é significativamente

reduzida na presença de espécies orgânicas contendo grupos funcionais hidroxila e carboxila. Este fato é de grande importância no tratamento de minérios carbonosos.

A pré-aeração também é capaz de inibir a superfície de partículas de pirrotita, recobrando-as com uma camada de hidróxido férrico formado durante este processo. Em pH 12, ou superior, o hidróxido férrico dissolve-se como $[\text{Fe}(\text{OH})_4]^-$ e não é mais capaz de inibir a superfície da pirrotita. A pré-aeração também é usada nos casos em que a água contém quantidades significativas de CO_2 dissolvido, para evitar que parte da cal adicionada para elevar o pH seja consumida para neutralizar o HCO_3^- decorrente. Uma aeração vigorosa em pH inferior a 7 removerá o CO_2 e reduzirá o consumo de cal.

As causas mais comuns de resultados inadequados da pré-aeração incluem a operação em pH muito elevado e/ou acentuado curto-circuito da polpa, uma vez que quase sempre esta operação é feita em apenas um ou dois tanques. Durante a pré-aeração, o pH deve ser mantido abaixo de 12 para evitar o excesso de formação de íons sulfeto ¹²¹.

4.3.13 Agitação e eficiência de mistura ⁸⁵

A eficiência de mistura é importante para se obter a velocidade ótima de dissolução de ouro e minimizar o volume de tanque e a potência de agitação. Sistemas de agitação deficientes podem levar à redução do volume útil dos tanques devido à sedimentação de partículas ou não garantir uma mistura adequada da polpa. Como resultado, obtêm-se velocidades de dissolução e recuperações de ouro menores do que em sistemas bem projetados. A viscosidade e a distribuição granulométrica da polpa determinam a seleção do sistema de agitação. Existem dois casos extremos de dificuldades. Por um lado, é difícil manter em suspensão polpas diluídas contendo sólidos grossos. Por outro lado, são necessárias altas potências de agitação para operar com polpas muito viscosas (elevada porcentagem de sólidos, principalmente com granulometrias muito finas ou presença de argilominerais).

A partir da década de 80, os esforços dos fabricantes de agitadores mecânicos resultaram em uma acentuada diminuição da potência necessária para a operação. Com isto, a lixiviação passou a ser feita por equipamentos de menor custo (motores e redutores menores) e menor consumo de energia por tonelada de minério. Atualmente, os agitadores mecânicos possibilitam excelentes eficiências de mistura com consumos de energia inferiores ao da agitação pneumática. Como consequência, a maioria das usinas modernas passou a usar tanques com agitação mecânica em vez de pachucas.

A maioria das usinas usa sistemas contínuos de lixiviação, nos quais a polpa flui por gravidade de um tanque para o próximo por transbordamento através de um vertedouro. O tempo nominal de lixiviação é calculado como a razão entre o volume total da série de tanques e a vazão da polpa. Entretanto, as partículas de minério em um tanque agitado não fluem uniformemente desde a sua entrada até a saída. Existe sempre a probabilidade de uma dada partícula encontrar um caminho direto para a saída, com a consequente redução do seu tempo de residência neste estágio. Por outro lado, outras partículas podem permanecer no tanque um tempo superior ao nominal.

O projeto da entrada e saída dos tanques deve dificultar ao máximo o curto-circuito. Deve-se evitar que a polpa seja introduzida no mesmo nível da saída, o que pode ser conseguido por tubos de descida ("*downcomers*") ou tubos de subida ("*upcomers*") apropriados.

O número de tanques instalados em série influi sobre a probabilidade de uma partícula sair do último tanque em tempo menor que o tempo nominal de residência. A tabela 4.2 mostra estas probabilidades.

Na prática, usam-se um número mínimo de 4 tanques de cianetação em série, de forma a garantir que cerca de 98% das partículas atendam ao tempo de residência nominal.

Tabela 4.2 Porcentagem de partículas que escapam de tanques bem agitados, dispostos em série, com menos de 100% do tempo de residência nominal ⁸⁵

Número de Tanques em série	% Partículas que escapam com menos de 100% TRN
1	63
2	26
3	7,5
4	1,9
5	0,34

4.4 Otimização de circuitos de cianetação

Diversos autores e institutos de pesquisa têm concentrado esforços para desenvolver métodos para otimizar circuitos de extração de ouro via cianetação ^{47, 48, 130, 131}. Em geral, estes métodos são dirigidos ao estudo das variáveis mais significativas do ponto de vista da economia do processo e não existe uma abordagem única que satisfaça a todos os tipos de minério. As sequências de ensaios são adaptadas em função das características dos minérios e experiência com minérios semelhantes.

4.4.1 MINTEK ^{47, 48}

Para selecionar o processo e determinar as condições ótimas para recuperar ouro de um minério, Johns desenvolveu no MINTEK um programa de ensaios denominado Goldservice. Não existe uma sequência preestabelecida de ensaios. Eles são definidos de acordo com os conhecimentos gerados segundo a estratégia do programa, que envolve duas etapas:

- estudo das associações ouro/minerais;
- avaliação das operações unitárias.

O estudo das associações do ouro com os minerais hospedeiros é o ponto de partida do programa em questão. Compreende uma caracterização química, mineralógica e um ensaio de diagnóstico de lixiviação. Através de difratometria de raios-X e microscopia ótica, suportada por microsondagem de varredura com análise de imagem, são conhecidos os minerais portadores de ouro, os minerais hospedeiros, o tamanho e a composição das partículas de ouro e as formas de associação dos minerais de ouro com os minerais hospedeiros. Tais conhecimentos são importantes para adaptar o ensaio de diagnóstico de lixiviação às características do minério. Este ensaio, realizado logo em seguida, quantifica as eficiências de extração que podem ser obtidas e as formas de associação do ouro. Em geral, são consideradas as seguintes associações:

- ouro disponível para cianetação direta;
- ouro adsorvível em espécies ativas do minério (CIL);
- ouro associado com óxidos e carbonatos;
- ouro associado com sulfetos;
- ouro associado com matéria carbonosa;
- ouro associado com quartzo.

Na segunda etapa, avaliação das operações unitárias, estuda-se o impacto de diversas rotas de processo sobre a recuperação de ouro. Em função dos resultados da etapa anterior, podem ser considerados os seguintes processos genéricos:

- Cominuição: verifica a influência de diversas granulometrias de britagem/moagem sobre a recuperação de ouro por lixiviação em pilhas ou processos envolvendo moagem.
- Concentração: avalia o emprego de concentração gravítica e flotação (quando indicada pela caracterização mineralógica / diagnóstico de lixiviação).
- Oxidação: realizada quando for necessário liberar o ouro incluso em sulfetos contidos no concentrado ou oxidar a matéria carbonosa.
- Extração: avalia a cianetação quanto ao tempo de pré-oxidação, tempo de lixiviação, adição de cianeto, adição de carvão ativado (CIL), pH.
- Recuperação: avalia processos CIP/RIP (isoterma de equilíbrio, curva cinética de adsorção, simulação).

Os estudos de concentração envolvem ensaios de flotação e de concentração gravítica para recuperar o ouro grosso, se o ensaio de diagnóstico de lixiviação recomendar. A concentração gravítica é realizada em separador Knelson de laboratório (3"). Uma cianetação intensiva do concentrado gravítico quantifica o ouro incluso em sulfetos.

Os estudos de extração compreendem uma sequência de ensaios de cianetação, otimizando-se uma variável por vez. Os ensaios seguintes só são realizados após o fechamento e otimização da variável dos ensaios anteriores. Para iniciar os estudos de extração, fixa-se o valor inicial das variáveis com a ajuda de um ensaio exploratório. À medida o trabalho prossegue, passa-se a adotar o valor da variável otimizada em substituição ao inicial.

Para estudar a recuperação do ouro dissolvido é produzida uma polpa cianetada nas condições otimizadas de extração. Esta polpa é submetida a ensaios para determinar as isotermas de equilíbrio e a cinética de adsorção de ouro em um carvão ativado de boa qualidade. Uma simulação do processo em computador, utilizando-se os dados obtidos, define o fluxograma e parâmetros de processo.

Em um estudo com um minério sulfetado com ouro livre, a sequência e a finalidade dos ensaios de extração foi a seguinte ⁴⁷:

- Avaliação da necessidade de usar processo CIL: ensaios de cianetação, sem e com diferentes adições de carvão ativado, para verificar o seu efeito na dissolução do ouro.
- Definição da granulometria ótima de moagem: ensaios de cianetação com diferentes tamanhos de moagem.
- Determinação da melhor adição de cianeto: ensaios de cianetação variando-se a adição de cianeto
- Determinação do tempo de lixiviação: diferentes ensaios de cianetação, variando-se o tempo de contato.

- Determinação do pH ótimo: ensaios de cianetação variando-se a adição de cal.
- Determinação do efeito da pré-oxidação: ensaios de cianetação sem e com diferentes tempos de pré-oxidação.

4.4.2 Anglo American Research Laboratories - AARL ^{58, 130}

O AARL recomenda executar um programa completo de ensaios em pelo menos uma amostra composta de um determinado minério, no sentido de definir as condições ótimas de lixiviação com cianeto. Este programa inclui os seguintes estudos:

a - Determinação da adição ótima de cianeto

Compreende diversos ensaios com diferentes quantidades de cianeto para definir a adição que minimiza as perdas de ouro lixiviável. Os ensaios são realizados, sob condições controladas, em béqueres com agitação. As perdas de ouro lixiviável são determinadas em um segundo ensaio de cianetação realizado em garrafão sobre mesa de rolos.

b - Identificação dos consumidores de cianeto

Realizado por meio da análise de um ou dois licores ricos obtidos nos ensaios de cianetação.

c - Efeito de alto teor de oxigênio dissolvido

Ensaio semelhante aos descritos em a, mas com borbulhamento de oxigênio.

d - Efeito da pré-oxidação

Compreende diversos ensaios variando-se o tempo de pré-oxidação. A adição de cianeto é feita após a pré-oxidação, no nível ótimo determinado em a ou c. As perdas de ouro lixiviável, consumo de cianeto e cinética de lixiviação são comparadas com a dos ensaios sem pré-oxidação.

e - Efeito da adição de sais de chumbo

Em alguns casos a adição de sais de chumbo aumenta a cinética de lixiviação e reduz as perdas de ouro. Em outros, esta adição não traz benefícios e é supérflua. Em alguns casos raros, ela chega a ser prejudicial à extração de ouro. Quando a adição é benéfica, ela normalmente ocorre em baixas concentrações de cianeto. Em decorrência, a verificação deste efeito é feita com uma adição de cianeto 10% abaixo do valor ótimo. Um único nível de adição de sal de chumbo pode ser suficiente para avaliar o seu efeito.

f - Lixiviação com um nível fixo de oxigênio dissolvido

Quando a oxigenação é benéfica, o AARL recomenda verificar o efeito de diferentes níveis de oxigênio dissolvido sobre a extração do ouro. Os ensaios de cianetação são feitos em béquer com agitação, injeção de oxigênio e titulação automática. Verifica-se o efeito de diversos níveis de oxigênio dissolvido (por exemplo, 3, 7, 12 e 18 mg/l) e comparam-se os resultados de cinética de lixiviação, perda de ouro lixiviável e consumo de cianeto com os dos ensaios de referência (a, c).

g - Determinação da demanda absoluta de oxigênio

O AARL dispõe de uma montagem especial que permite determinar a demanda absoluta de oxigênio em função do tempo, pH e teor de oxigênio dissolvido.

h - Determinação do pH ótimo de lixiviação

Muitas vezes a recuperação de ouro e o consumo de cianeto são dependentes do pH. As perdas de ouro lixiviável podem diminuir e o consumo de cianeto aumentar quando se reduz ligeiramente o pH. Os ensaios de cianetação são feitos com três níveis de pH, por exemplo: 10,3; 10,8; 11,3. Como nos ensaios anteriores, os resultados de perda de ouro lixiviável, cinética de lixiviação e consumo de cianeto obtidos são comparados com os dos ensaios de referência.

i - Determinação de uma possível redução no tempo de lixiviação

Dois ou três ensaios de cianetação com tempo reduzido, seguidos de uma segunda cianetação, são suficientes para tal verificação. Muitas vezes estes ensaios são realizados em amostras coletadas ao longo do circuito industrial.

j - Determinação do efeito da densidade de polpa

São pesquisados normalmente o efeito de três níveis de densidade de polpa sobre as principais respostas do processo.

4.4.3 Kondos et al. (CANMET) ¹³¹

Kondos et al., pesquisadores do CANMET, têm feito esforços para esclarecer o papel das variáveis de processo da cianetação e estabelecer uma estratégia para otimizá-las. Para tanto, dois minérios sulfetados complexos foram estudados para se conhecer o efeito das principais variáveis (concentração de cianeto, teor de oxigênio dissolvido e adição de nitrato de chumbo) sobre a velocidade de dissolução, a extração do ouro e o consumo de cianeto.

O primeiro minério, com um teor de ouro de 5,3 g/t, 1,7% de S (4,4% de pirita e <0,5% de pirrotita), com ganga constituída por albita, quartzo, calcita e clorita, apresentou o seguinte comportamento:

- O consumo de cianeto apresentou uma pequena variação com o pH, sendo mínimo na faixa de 10,5 a 11,0. Tal consumo aumentou acentuadamente em razão direta com a concentração de cianeto (figura 4.7).
- A operação com maiores concentrações de oxigênio e a adição de nitrato de chumbo aumentou consideravelmente a velocidade de dissolução de ouro. Para uma determinada concentração de oxigênio, a adição de nitrato de chumbo deslocou o valor máximo da velocidade de dissolução de ouro em direção a regiões com concentrações mais elevadas de cianeto (figuras 4.8, 4.9 e 4.10).

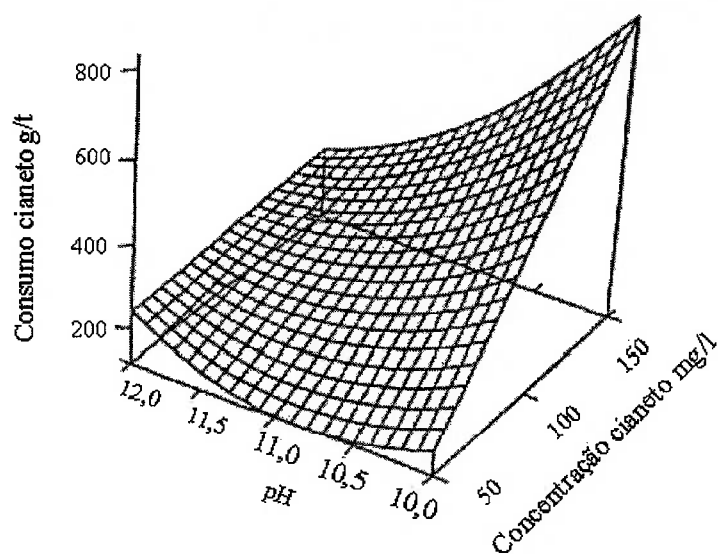


Figura 4.7 - Consumo de cianeto em função do pH de lixiviação e concentração de cianeto livre (12 mg/l de oxigênio dissolvido e adição de 12,5 g/t de nitrato de chumbo)

131

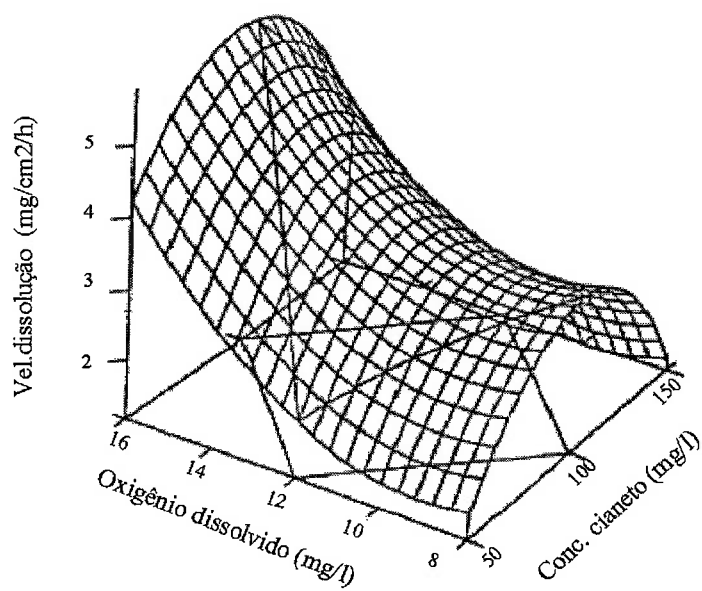


Figura 4.8 - Velocidade de dissolução do ouro em função do teor de oxigênio dissolvido e concentrações de cianeto livre (pH = 11 sem adição de nitrato de chumbo) ¹³¹

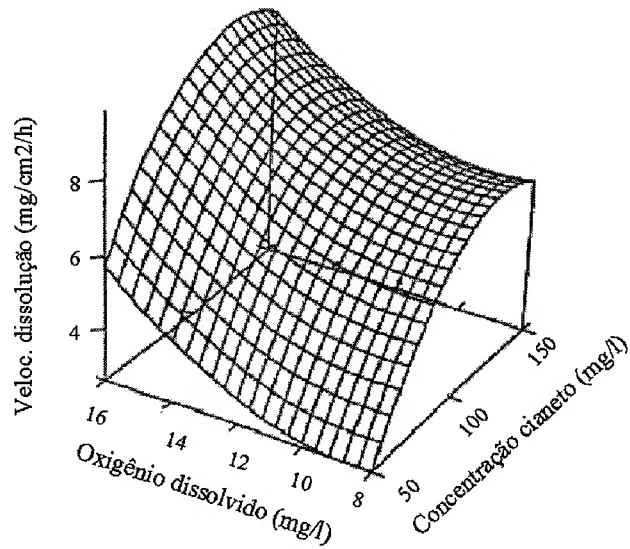


Figura 4.9 - Velocidade de dissolução do ouro em função do teor de oxigênio dissolvido e concentração de cianeto livre (pH = 11 e adição de 12,5 g/t de nitrato de chumbo) ¹³¹

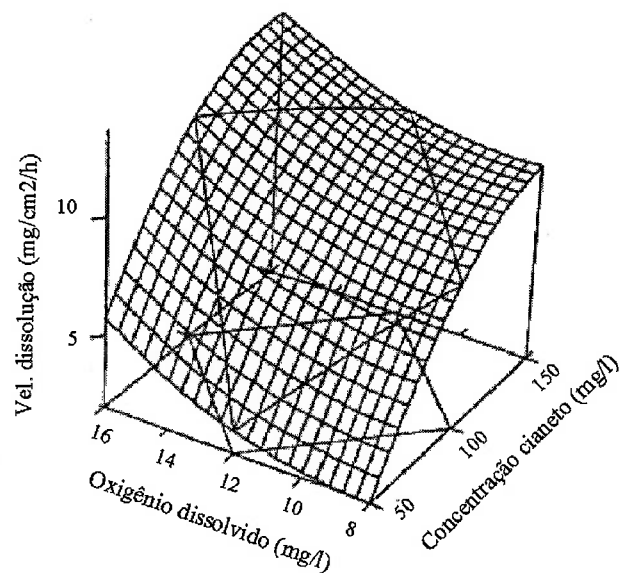


Figura 4.10 - Velocidade de dissolução do ouro em função do teor de oxigênio dissolvido e concentração de cianeto livre (pH = 11 e adição de 25 g/t de nitrato de chumbo) ¹³¹

O segundo minério, com um teor de ouro de 6,8 g/t, 6,9% de S (12% pirita e 1,4% de pirrotita), com ganga constituída por quartzo, moscovita, clinocloro, dolomita e calcita, apresentou os seguintes resultados:

- Foram estudadas 3 granulometrias de moagem: 70, 80 e 90 % passante em 74 μm . O melhor resultado foi obtido com 80% < 74 μm (figura 4.11).
- O nitrato de chumbo mostrou ser mais efetivo do que o oxigênio para oxidar os sulfetos solúveis. Uma adição de 100 g/t de nitrato de chumbo possibilitou maior recuperação de ouro e menor consumo de cianeto do que a operação com 16 mg/l de oxigênio. O uso de dosagens de nitrato de chumbo superiores a 100 g/t resultou em menores recuperações de ouro (figura 4.12).
- A extração de ouro apresentou uma grande sensibilidade ao pH. A recuperação de ouro no pH de 10,5 foi 5% maior do que com pH de 11,5, apesar de um acréscimo de consumo de cianeto de 200 g/t (tabela 4.3).
- A extração de ouro mostrou ser muito sensível à concentração de cianeto, para valores abaixo de 380 mg/l de CN^- . A maior extração de ouro foi obtida com 480 mg/l de CN^- (figura 4.13). A concentração relativamente alta de cianeto necessária para lixiviar efetivamente o ouro foi atribuída ao fato do minério conter sulfetos solúveis.
- o erro experimental na recuperação de ouro, relacionado à reprodutibilidade dos ensaios, foi de $\pm 0,5\%$.

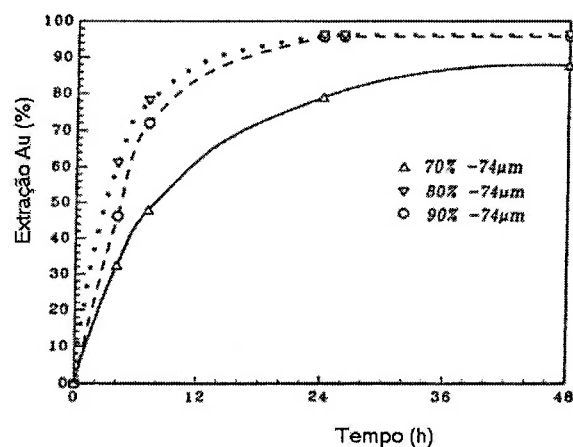


Figura 4.11 - Efeito do tamanho de moagem na recuperação do ouro (16 mg/l de oxigênio dissolvido, pH = 10,5, 80% < 74 μm) ¹³¹

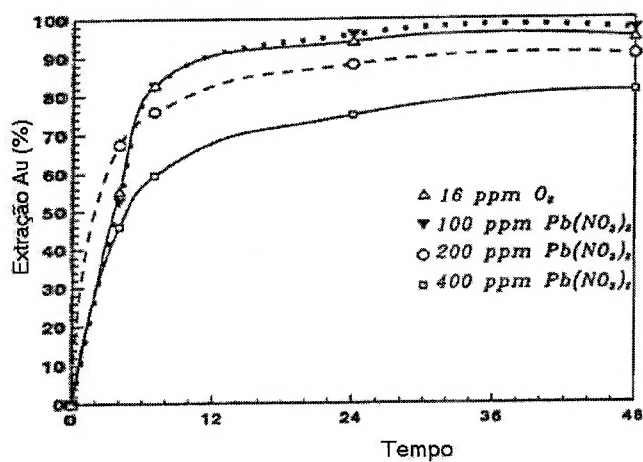


Figura 4.12 - Efeito do teor do oxigênio dissolvido e adição de nitrato de chumbo na recuperação de ouro (730 mg/l CN^- , pH = 11,5 e 80% < 74 μm)¹³¹

Tabela 4.3 Efeito do pH na lixiviação do ouro (480 mg/l CN^- , 200 g/t $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 16 mg/l de oxigênio dissolvido, 24 h)¹³¹

PH	Recuperação ouro (%)	Consumo NaCN (kg/t)
10,5	96,0	0,70
11,5	91,2	0,52

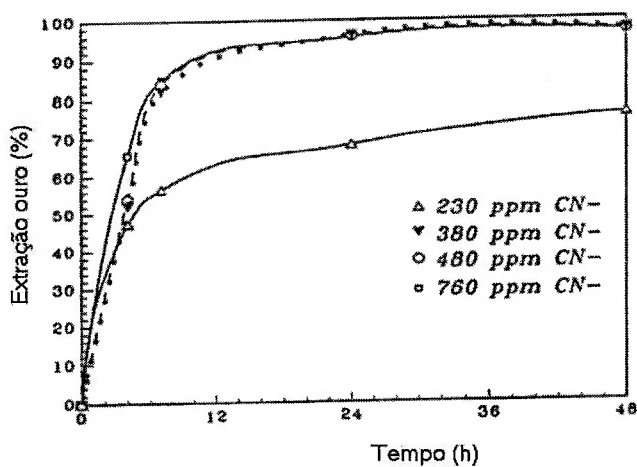


Figura 4.13 - Efeito da concentração de cianeto na recuperação do ouro (16 mg/l de oxigênio dissolvido, pH = 10,5 e 80% < 74 μm)¹³¹

Kondos et al.¹³¹ demonstraram que o pH, a concentração de cianeto e a adição de nitrato de chumbo possuem papel relevante na cianetação de minérios sulfetados, chegando a afetar a recuperação de ouro. Cada minério é único e tem um comportamento particular na cianetação. Sugeriram que a adição do nitrato de chumbo favoreceu o processo de cianetação por meio dos seguintes mecanismos: ativação da superfície passivada do ouro; prevenção da formação de filmes passivadores de sulfetos sobre a superfície do ouro; precipitação de sulfetos solúveis; atuação como intermediário na oxidação do enxofre a sulfato.

4.4.4 Discussão dos métodos

O Autor observa que Johns^{47, 48} priorizou a sequência de ensaios conforme o impacto técnico-econômico no processo. No caso estudado, após se certificar que a recuperação gravítica era marginal (além do ouro estar quase todo abaixo de 20 μm , a sua recuperação foi de apenas 33%), e que a adição de carvão não afetava a recuperação de ouro (ausência de “*preg-robbers*”), partiu logo para a otimização da cianetação direta. Foram priorizados os estudos da granulometria de moagem e da adição de cianeto, variáveis de maior impacto no custo operacional e na receita. A menor importância dada aos ensaios para otimizar o tempo de pré-aeração pode ser explicada pelo fato do minério conter pouco sulfeto (predominantemente pirita) e ter apresentado um baixo consumo de cianeto nos ensaios exploratórios. Certamente, se o minério apresentasse um teor de sulfetos mais elevado, ou espécies mais reativas como a pirrotita, a pré-aeração teria uma maior prioridade.

O AARL utiliza um procedimento prático para quantificar as perdas de ouro cianetável: a própria recianetação do resíduo do primeiro ensaio¹³⁰. Com isto, reduz o erro estatístico de coleta da alíquota para análise de ouro por fusão-copelação, ou seja, evita o efeito pepita resultante da natureza particulada deste metal. A análise do ouro cianetável por meio do licor da recianetação elimina tal fonte de erro. Para tanto, procuram trabalhar com a menor quantidade de amostra possível, sempre respeitando

uma massa mínima de 0,1 mg de ouro contido no resíduo, o que usualmente leva a massas de 200 a 500 g por ensaio.

A precisão da análise do resíduo é a principal fonte de erro experimental na determinação da recuperação de ouro. A ordem de grandeza deste erro dificulta a seleção da melhor condição de processo nos casos em que as diferenças de recuperação de ouro entre as alternativas estudadas são pequenas. No caso anterior, os pesquisadores do CANMET determinaram que o erro experimental da recuperação do ouro foi de $\pm 0,5\%$ ¹³¹. Este valor é equivalente a um coeficiente de variação de cerca de 12% na análise do teor de ouro do rejeito, compatível com a precisão típica de análises de rejeitos por fusão-copelação, conforme tabela 4.4 ⁴⁶.

Tabela 4.4 - Precisões típicas de análises de ouro de minérios sul-africanos por fusão-copelação ⁴⁶

Teor de Ouro g/t	Desvio Padrão g/t	Coefficiente de Variação %
0,5 a 1	0,12	12
1 a 3	0,20	10
3 a 5	0,40	10
5 a 7	0,50	8
7 a 10	0,50	6
10 a 15	0,68	5
15 a 20	0,68	4
60 a 100	2,50	3

Obs: Determinações simples em alíquotas de 100 g para amostras com menos de 1 g Au/t e alíquotas de 50 g para amostras com mais de 1 g Au/t.

5 PROCEDIMENTOS PARA A ANÁLISE CRÍTICA

Este capítulo contém um resumo dos procedimentos utilizados para se fazer a análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados.

A elaboração destes procedimentos foi feita de maneira dinâmica, procurando-se identificar os fatores mais importantes para o desenvolvimento de processos de beneficiamento de minérios. À medida que alguns fatores eram levantados e analisados, surgia a necessidade de novos fatores, dentro de um processo interativo, demandando a ampliação da revisão bibliográfica e dos procedimentos para análise crítica.

O início do trabalho foi focado na constatação de que o domínio da tecnologia de cianetação de minérios de ouro é fundamental para o desenvolvimento do processo, mas que por si só não é suficiente. Ao contrário de uma indústria de ponta, onde a inovação tecnológica é a base da vantagem competitiva e as tecnologias utilizadas usualmente não são acessíveis no mercado, a indústria do ouro caracteriza-se por utilizar uma tecnologia madura, de domínio público. O processo de cianetação já tem mais de 100 anos, apesar de ainda passar por frequentes melhorias. Entretanto, estas melhorias, ou mesmo inovações nas tecnologias associadas, podem ser facilmente acessíveis ou adquiridas no mercado. A vantagem competitiva pode estar no gerenciamento da tecnologia, ou seja, em como assegurar o uso da tecnologia para o sucesso do negócio, buscando-se um ponto ótimo entre o risco e a recompensa.

Os procedimentos utilizados para se fazer a análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados podem ser divididos em três etapas, conforme apresentado na figura 5.1. Na primeira etapa foi feita uma revisão bibliográfica com o objetivo de prover as informações necessárias para, na segunda etapa, determinar e priorizar os fatores de sucesso para o desenvolvimento de processos. A partir desta priorização, foram estabelecidas as diretrizes para o desenvolvimento de processos. Estas diretrizes foram, então, desdobradas em atividades importantes para

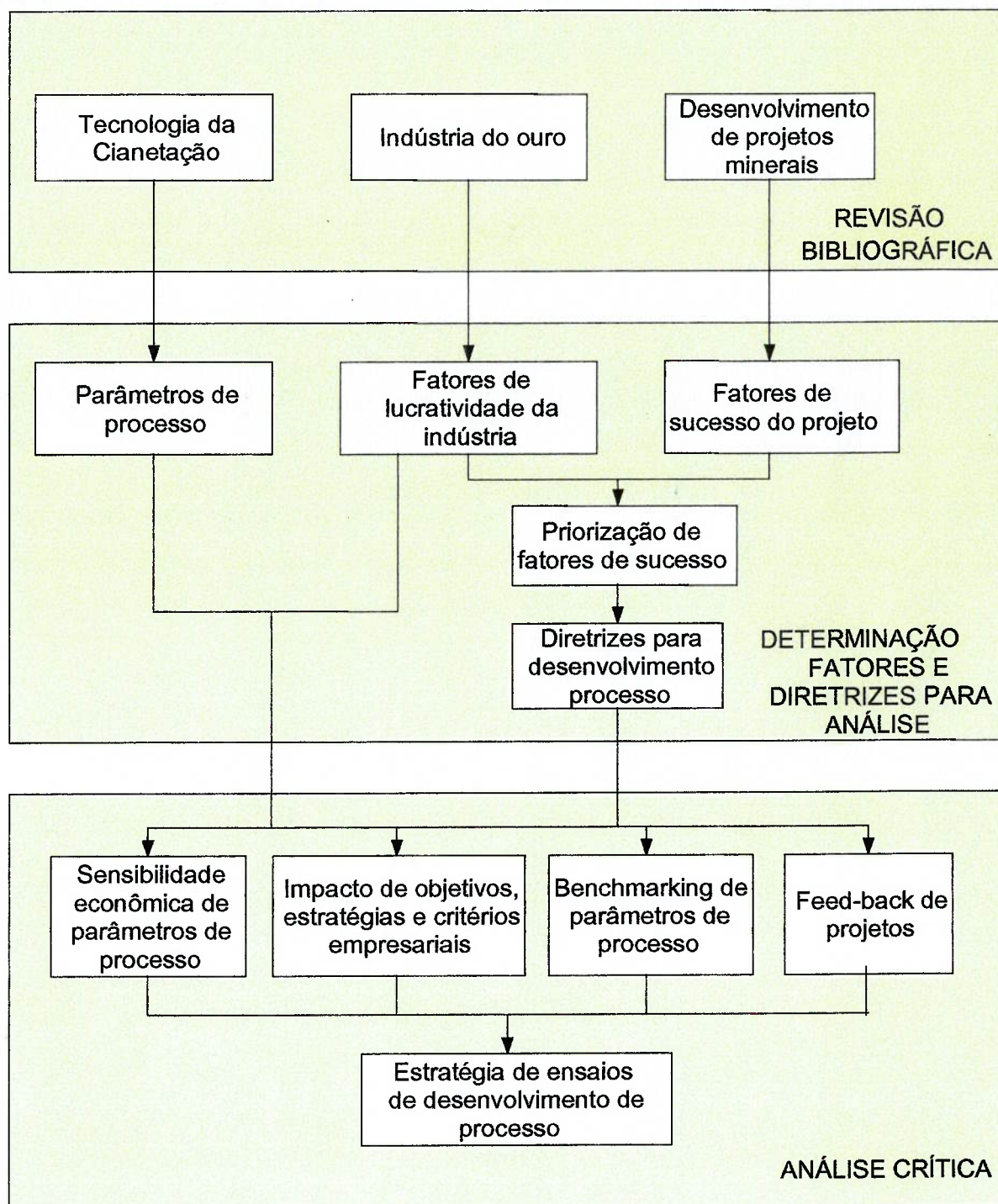


Figura 5.1 – Procedimento para análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados.

desenvolver, com sucesso, um processo mineral. Na terceira etapa, tais atividades serviram de base para se fazer a análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados, que incluiu:

- análise da sensibilidade da economia da cianetação em relação aos parâmetros de processo;
- análise da influência dos objetivos, estratégias e critérios empresariais sobre o desenvolvimento de processo;
- “*Benchmarking*” para estabelecer dados de referência de projetos similares.
- análise do “*feed-back*” de projetos para conhecer o impacto dos parâmetros e variáveis de processo sobre a extração de ouro / economia da cianetação em tanques agitados.

Finalmente, as estratégias de ensaios de desenvolvimento de processo de cianetação em tanques agitados foram analisadas considerando-se as informações e análises realizadas nas atividades acima citadas.

5.1 Revisão bibliográfica

Para embasar a análise crítica objeto desta tese, iniciou-se um levantamento de informações por meio duma revisão bibliográfica voltada à compreensão e análise do desenvolvimento de processos e projetos na indústria mineral, assim como da tecnologia de cianetação em tanques agitados. Com o avançar dos trabalhos, reconheceu-se que a especificidade do setor do ouro demandava uma análise de sua indústria, buscando-se compreender os seus fatores particulares de competitividade, de sucesso e os riscos associados.

5.1.1 Desenvolvimento de projetos minerais

A revisão do desenvolvimento de projetos minerais (Capítulo 2) iniciou-se com uma abordagem geral do processo de suprimento mineral, procurando-se identificar os seus principais fatores e as tendências modernas. A fase de desenvolvimento / avaliação

dos depósitos minerais e os estudos de engenharia associados foram enfatizados por se tratar da etapa que mais agrega valor dentro do processo de suprimento mineral, principalmente os associados aos projetos conceituais.

Fez-se, também, uma revisão da avaliação de projetos minerais após a entrada em operação de rotina (avaliação “*ex-post*”) visando-se conhecer os fatores de sucesso para se atingir os objetivos dos projetos.

Finalmente, foram revisados: a abordagem e os ensaios usuais para desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados; os fatores que afetam a seleção do processo e as estratégias mais comuns para o desenvolvimento de processos.

5.1.2 Contexto da indústria do ouro

Uma revisão da indústria do ouro (Capítulo 3) fez-se necessária para conhecer melhor a sua estrutura, comportamento e desempenho, no sentido de se determinarem os fatores de competitividade, as tendências, as oportunidades e a perspectiva de evolução do preço do metal.

O levantamento do contexto da indústria foi feito tanto a nível mundial quanto ao nível do Brasil, neste caso para identificar as tendências e as necessidades específicas do País.

5.1.3 Processo de cianetação em tanques agitados

A revisão da cianetação em tanques agitados (Capítulo 4) foi voltada à compreensão dos fundamentos da tecnologia e ao conhecimento do impacto de seus parâmetros e variáveis sobre o desempenho do processo. Apesar de se tratar de um assunto exhaustivamente explorado em trabalhos anteriores, optou-se por manter esta revisão em proveito de uma maior unidade e independência desta tese.

5.2 Determinação dos fatores e diretrizes para análise

Os fatores e diretrizes importantes para desenvolver processos de cianetação em tanques agitados e embasar a análise crítica objeto desta tese foram identificados por meio da análise do levantamento bibliográfico e da experiência do Autor.

A análise da tecnologia de cianetação permitiu identificar os parâmetros de processo a serem incluídos na análise crítica. A análise de situação da indústria do ouro permitiu levantar os seus fatores de competitividade / lucratividade. A análise do levantamento bibliográfico do desenvolvimento de projetos minerais, e em especial da avaliação de projetos após a sua entrada em operação de rotina, permitiram identificar os fatores importantes para o desenvolvimento de processos (causas de insucessos, fatores críticos) que, por sua vez, permitiram determinar os fatores de sucesso. Os fatores de sucesso foram priorizados para definir diretrizes para o desenvolvimento de processos.

Em seguida, as diretrizes foram desdobrados em seus aspectos mais relevantes e associadas a ações para o desenvolvimento de processos. Posteriormente, estas ações foram agrupadas em atividades importantes para desenvolver, com sucesso, um processo mineral dentro de uma abordagem integrada e em sintonia com os objetivos e as estratégias das empresas. Estas atividades passaram a constituir a base para a análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados, conforme será detalhado nos itens 5.3 a 5.6.

5.3 Avaliação da sensibilidade da economia da cianetação em relação aos parâmetros de processo

Para analisar o desenvolvimento de processos ou planejar os ensaios é importante conhecer a sensibilidade da economia do projeto em relação aos parâmetros

de processo. Este conhecimento permite priorizar os parâmetros de processo e dirigir os esforços de otimização para os mais relevantes.

Desta maneira, os parâmetros de processo de cianetação em tanques agitados, identificados por meio da literatura e da experiência dos projetos em que o Autor trabalhou, passaram por uma etapa preliminar de priorização mediante a análise de sua relação com os fatores de lucratividade da indústria do ouro. Utilizou-se a matriz Parâmetros de Processo x Fatores de Lucratividade para melhor visualizar esta relação e selecionar os principais parâmetros de processo para serem submetidos à análise de sensibilidade.

Os seguintes procedimentos foram então utilizados para se fazer a análise de sensibilidade de projetos de cianetação em tanques agitados:

- estabelecer um fluxo de caixa para um projeto típico e determinar o valor líquido presente para o caso base;
- estabelecer faixas de variação dos principais parâmetros de processo típicas da indústria;
- estabelecer separadamente o valor presente líquido para cada variação considerada nos parâmetros de processo;
- dispor os resultados na forma de um diagrama, para melhor visualizar a sensibilidade da economia de cianetação em relação aos parâmetros de processo (diagrama de tornado);

Os dados e critérios para estabelecer o caso base e variações de parâmetros para análise foram obtidos através do banco de dados de referência para “*benchmarking*”.

5.4 Análise da influência dos objetivos, estratégias e critérios empresariais

Como o desenvolvimento de processos deve ser realizado em sintonia com os objetivos, estratégias e critérios empresariais, é essencial conhecer e compreender claramente estes aspectos para planejar e conduzir as atividades de desenvolvimento de

processos. Embora quase sempre estes objetivos, estratégias e critérios sejam decididos, ou pelo menos aprovados pela alta direção das empresas, é cada vez mais comum, e importante, a participação do pessoal técnico na sua formulação.

Esta tese incluiu um levantamento dos objetivos, estratégias e critérios mais comuns das empresas de mineração e a análise de seus impactos sobre a estratégia de desenvolvimento de processos. Os levantamentos foram feitos a partir da bibliografia e, principalmente, da experiência do Autor.

5.5 “*Benchmarking*”: estabelecimento de dados de referência de projetos similares

A disponibilidade de um banco de dados de projetos similares é importante para balizar os resultados de desenvolvimento de processo. Mesmo que cada minério seja único e os parâmetros de processo possam variar amplamente em função das próprias características do minério, este balizamento é importante para:

- detectar se existe alguma diferença substancial nos parâmetros para, em caso positivo, verificar se é devida ao próprio minério ou ao erro de determinação;
- concentrar os estudos de otimização nos parâmetros que apresentarem maior potencial de ganho ou impacto negativo na rentabilidade;
- avaliar a posição competitiva do processo.

Para respaldar as análises desta tese, estabeleceu-se um banco de dados sucinto para “*benchmarking*” dos principais parâmetros envolvidos no processo de cianetação em tanques agitados. Foram utilizadas informações de livros, revistas, teses, dissertações e consultas a especialistas. O banco de dados incluiu: capacidade de usinas, configuração de circuito, extração de ouro, granulometria de moagem, tempo de residência, concentração e consumo de cianeto, pH e consumo de cal.

5.6 Análise do "*feed-back*" de projetos

Para embasar a análise crítica objeto desta tese, levantou-se o "*feed-back*" dos desenvolvimentos de processos para os minérios de ouro da Companhia Vale do Rio Doce, realizados, orientados ou coordenados pelo Autor.

A experiência acumulada em projetos é de suma importância para o desenvolvimento de novos processos, seja pela lição dos acertos, seja principalmente pela lição dos erros cometidos. Entretanto, trata-se de uma prática que requer cuidados para minimizar o risco de se consolidarem vícios e práticas que poderiam ser melhoradas ou otimizadas. Deve-se lembrar que a informação por si só não constitui um conhecimento aproveitável se ela não for processada e transformada pela mente humana. A simples posse de uma informação não assegura um diferencial competitivo para uma empresa se seus funcionários não souberem como analisar, organizar, avaliar e aplicar essa informação para fins objetivos.

Por esta razão, os dados de "*feed-back*" foram estruturados por meio de uma análise crítica dos métodos, critérios de processo e impacto dos parâmetros de cianetação sobre a economia dos empreendimentos, à luz dos fundamentos do processo, tendências e inovações da indústria do ouro.

Como, em geral, os impactos econômicos mais relevantes são relacionados à recuperação, o "*feed-back*" do desenvolvimento de processos foi focado na análise do impacto dos parâmetros e variáveis de processo sobre a extração do ouro. A granulometria de moagem e o tempo de residência nos tanques de cianetação mereceram uma atenção especial, uma vez que os seus valores ótimos são um compromisso entre os custos e a receita. Assim, a análise incluiu a avaliação dos acréscimos mínimos de extração de ouro necessários para compensar a realização de uma moagem mais fina ou aumentar o tempo de residência nos tanques.

5.6.1 Dados e informações utilizados

Foram utilizados dados dos seguintes projetos:

- Fazenda Brasileiro;
- Ouro Itabira;
- Fazenda Maria Preta;
- Igarapé Bahia;
- Almas;
- Serra Leste.

Projeto Fazenda Brasileiro ^{44, 87, 132, 133}

A Mina de Ouro de Fazenda Brasileiro localiza-se no município de Teofilândia, BA. O minério primário é sulfetado e contém ouro nativo, predominantemente livre, associado a sulfetos e a silicatos. A sua análise mineralógica típica é: quartzo (30 a 39%); oligoclásio (22 a 26%); clorita (18 a 22%); calcita (6 a 8%), dolomita (4 a 6%), pirita (0,8 a 3%), arsenopirita (0,2 a 3,5%), pirrotita (0,4 a 2,5%), grafita (0,05 a 0,3%) e calcopirita (0,0 a 0,2%). O teor de ouro atual é de 3 a 5 g/t; no início da operação da mina atingia a 8 g/t. O processo consta de moagem, concentração gravítica, fundição direta do concentrado e cianetação CIP do rejeito gravítico. A capacidade atual da usina é de 2.800 t/dia, com produção de ouro de 4,5 t/ano. O minério oxidado de baixo teor é processado em uma unidade de lixiviação em pilhas.

Projeto Ouro Itabira ^{44, 87}

O Projeto Ouro Itabira compreende uma instalação anexa à Usina de Concentração de Itabiritos do Cauê, que processa os minérios de ouro lavrados nas minas de Cauê e Conceição, em Itabira, MG. Sua capacidade inicial de 72 t/dia foi expandida posteriormente para 800 t/dia. O processo consta de desagregação do itabirito aurífero em moinho de bolas, concentração gravítica, fundição direta do concentrado e cianetação CIL do rejeito gravítico. O minério contém ouro livre e é composto predominantemente por quartzo (68%) e hematita (30%). No início da operação o teor médio de ouro era de 40 g/t, tendo caído para cerca de 3 g/t na atualidade. A produção de ouro, em 1999, foi de 620 kg.

Projeto Ouro Maria Preta ^{44, 87}

A Mina de Maria Preta localiza-se nos municípios de Valente e Santa Luz, BA. A mina operou entre 1990 e 1996 lavrando e processando um minério oxidado de mineralogia bastante variada: quartzo (32 a 96%), plagioclásio (0 a 44%), esmectita (0 a 30%), sericita (0 a 18%), caulinita (0 a 12%), goethita / limonita (0 a 6%), clorita (0 a 5%) e hematita (0 a 2%). No final da vida útil da mina a céu aberto apareceram bolsões de minérios carbonosos de refratariedade moderada a alta. O minério de alto teor, com 3 a 5 g Au/t, foi processado em uma usina de cianetação CIP com capacidade de 500 t/dia. A produção anual de ouro era da ordem de 700 kg.

Projeto Ouro Igarapé Bahia ^{44, 87}

A Mina de Igarapé Bahia localiza-se no município de Parauapebas, na Serra de Carajás, PA. O minério é oxidado e contém ouro livre fino, em ganga de hematita (30 a 35%), goethita (30 a 36%), quartzo (1 a 3%), gibbsita (2 a 10%). O minério de alto teor (3 a 5 g Au/t) é tratado numa usina de cianetação CIP com capacidade para 6.000 t/dia. O minério de baixo teor (1,5 g Au/t) é alimentado a uma unidade de lixiviação em pilhas com capacidade para 10.000 t/dia. Anualmente, são produzidos cerca de 12 t de ouro.

Projeto Almas ^{47, 134}

A mina de Almas localiza-se no município de igual nome, no Estado de Tocantins. Atualmente encontra-se em operação uma unidade de lixiviação em pilhas com capacidade para 1.000 t/dia, projetada para operar com o minério oxidado superficial. O minério primário sulfetado de profundidade passou por estudos de desenvolvimento de processo, seja para avaliar o seu processamento na unidade de lixiviação em pilhas (requer britagem fina ou em prensa de rolos de alta pressão para se obter extrações aceitáveis de ouro), seja para alimentar uma usina com cianetação CIP. O minério é composto predominantemente por quartzo, clorita, ankerita e feldspato, com pouco sulfeto (basicamente pirita, com menos de 2% da massa de minério). O ouro encontra-se preponderantemente livre. As pequenas reservas de minério sulfetado não viabilizaram o seu aproveitamento por meio de mina subterrânea e usina CIP. Parte

da reserva de minério sulfetado está sendo lavrada a céu aberto e processada numa unidade de lixiviação em pilhas com britagem fina em britador de impacto de eixo vertical ⁷⁰.

Projeto Serra Leste ^{48, 135}

A jazida de Serra Leste localiza-se em Curionópolis, no sudeste do estado do Pará. O ouro encontra-se predominantemente livre, em ganga de quartzo, clorita, mica e caulinita. Uma amostra de minério com um teor de ouro de 13,8 g/t foi estudada para a concepção preliminar do processo. O projeto não prosseguiu uma vez que a expectativa de reserva não foi comprovada.

5.6.2 Acréscimos mínimos de extração de ouro para compensar moagens mais finas ou aumentar o tempo de residência da cianetação

Os valores ótimos de granulometria de moagem e tempo de residência em tanques de cianetação normalmente são determinados pela maximização do valor presente líquido. Este método, entretanto, pode não ser o mais interessante na fase de concepção do processo. Ele utiliza uma linguagem econômica que, além de ser específica para cada caso, é mais dirigida para a tomada de decisões sobre o projeto como um todo do que sobre o processo em particular. Assim, para uma avaliação preliminar do processo, e mesmo para o objetivo desta tese, seria desejável um método mais rápido e fácil de se utilizar, que empregasse uma linguagem mais compatível com a engenharia de processo. Em outras palavras, este método deveria explicitar a influência das variáveis de processo e possibilitar que as decisões sejam tomadas em função destas variáveis sem, no entanto, perder o foco na análise econômica. Além de assegurar uma decisão correta em termos econômicos, o método deveria permitir o aprimoramento do "*feeling*" dos engenheiros sobre o efeito das variáveis de processo, custo dos insumos e preço do ouro sobre a economia do empreendimento. Procurando atender a tais requisitos, o Autor desenvolveu um método para possibilitar a tomada mais rápida de decisão.

Este método considerou os efeitos dos principais parâmetros e variáveis de processo sobre a economia do projeto e não explicitou os indicadores econômicos. Foram determinados os acréscimos de custos para se fazer uma moagem mais fina ou aumentar o tempo de residência nos tanques de cianetação e calculadas as extrações incrementais de ouro necessárias para compensá-los. Os resultados obtidos foram mostrados em gráficos de fácil uso, que permitem determinar os valores ótimos da granulometria e tempo de residência a partir dos resultados de ensaios de cianetação.

Para avaliar os incrementos de extração de ouro para compensar uma moagem mais fina foram considerados os parâmetros de projeto mais frequentes em usinas de cianetação em tanques com agitação. A sensibilidade destes parâmetros em relação aos incrementos de extração de ouro foi investigada utilizando-se três a quatro níveis de variação:

- moagem a 60%, 70%, 80% e 90% < 75 μm ;
- teores de ouro de 3, 5, 10 e 15 g/t de minério;
- “*work index*” de Bond 10, 12 e 15 kWh/t;
- preço médio do ouro de US\$ 8,84 / g (US\$ 275,00 / oz), preço otimista de US\$ 10,00 / g (US\$ 311,00 / oz) e preço pessimista de US\$ 8,00 / g (US\$ 249,00 / oz).

Para avaliar os incrementos de extração de ouro para compensar um tempo de residência adicional, além dos níveis de preço do ouro acima, foram consideradas vidas úteis para o empreendimento de 5, 10 e 15 anos.

Os demais parâmetros e variáveis (investimento unitário, custo dos insumos, rentabilidade mínima desejada) foram fixados em valores correntes ou mais frequentes. No caso da moagem, fixou-se também a vida útil em 10 anos. Porém, quando necessário, todos estes parâmetros podem ser facilmente ajustados aos dados específicos dos projetos. Pode-se assim, para cada projeto, estabelecer fácil e rapidamente, gráficos de extrações incrementais de ouro necessárias para compensar os custos incorridos em afinar a moagem ou aumentar o tempo de residência nos tanques de cianetação.

Estas extrações incrementais foram calculadas em planilha eletrônica Excel 97. Para tanto, foram determinados os investimentos e custos operacionais para cada caso, conforme mostrado a seguir.

Investimento unitário na moagem

Para se estimarem os incrementos nos investimentos adotou-se como hipótese de trabalho que a moagem em granulometria mais fina não impacta significativamente o tempo de residência na cianetação, nem o consumo de cianeto e cal. Ou seja, admitiu-se investimento e custo operacional constantes na cianetação e variáveis na moagem. Na realidade, granulometrias mais finas podem diminuir ligeiramente o tempo de residência e aumentar um pouco o consumo de reagentes. Entretanto, além dos impactos isolados destes dois fatores sobre a economia do processo serem pequenos, o efeito combinado é menor ainda, uma vez que eles são contrários e podem até se anular. Tal consideração agiliza o estudo, não compromete o seu resultado e também é utilizada nos procedimentos de ensaios para otimizar a granulometria de moagem de importantes centros de pesquisas, como o Mintek ⁴⁷.

O investimento na moagem por tonelada processada partiu do cálculo da energia específica de moagem conforme fórmula de Bond ¹³⁶:

$$W = 10W_i.(P_{80}^{-0,5} - F_{80}^{-0,5}) \quad (15)$$

Onde:

W - consumo específico de energia na moagem (kWh/t);

W_i - “*work index*” de moagem (kWh/t);

P₈₀ - malha que deixa passar 80% do produto (μm);

F₈₀ - malha que deixa passar 80% da alimentação (μm).

Em seguida, estimou-se o valor total do investimento da moagem a partir do valor básico de US\$ 3,13 milhões para uma instalação completa com um moinho de

1.000 kW, descrita na tabela 5.1, ajustado para as demais capacidades pela fórmula dos seis décimos^{135, 136, 137} :

$$I = 3,13.(1,1.W.Q/1000)^{0,6} \quad (16)$$

Onde,

I = investimento (US\$ milhões);

Q = capacidade da instalação (t/h).

O fator de 1,1 da fórmula acima foi utilizado para cobrir as ineficiências do circuito (fator de tamanho excessivo de alimentação e perdas mecânicas na transmissão).

Tabela 5.1 Estimativa de investimento de uma moagem com moinho de bolas de 1000 kW^{135, 136, 137}.

INVESTIMENTO	US\$ 1,000.00
1 moinho de bolas com motor 1000 kW	1,300.00
2 bombas 10"x 8", 75 kW, uma com variador de velocidade	44.00
4 ciclones 15", com distribuidor e caixa de descarga	32.00
1 alimentador de correia, velocidade variável	25.00
1 analisador granulométrico "on line"	89.00
1 medidor de vazão	25.00
1 medidor de concentração de sólidos	25.00
A – Subtotal (equipamentos principais)	1,540.00
Instalações, montagem eletromecânica (30% de A)	462.00
Tubulação	30.00
Edificações (40% de A)	616.00
Utilidades (5% de A)	77.00
B – Subtotal (instalações fixas)	2,725.00
Engenharia e gerenciamento (15% de B)	408.75
C – TOTAL	3,133.75

O investimento da tabela 15.1 foi estimado pelo método da fatoraçoão. Isto é, calculado o investimento com os equipamentos principais de processo, os gastos complementares são estimados como porcentagens daquele, estabelecidos pela experiência anterior de projetos semelhantes. Esta estimativa preliminar tem uma precisão de $\pm 30\%$.

Investimento unitário na cianetação

O investimento unitário na cianetação foi calculado a partir de uma estimativa feita para uma unidade com 6 tanques de 700 m³ de capacidade, cujo valor foi de US\$ 1,45 milhões, ou US\$ 345/m³, ou US\$ 242 mil por tanque (tabela 5.2). O investimento foi ajustado para outros tamanhos de tanques através da fórmula do expoente (utilizou-se um expoente de 0,765, baseado em informações de literatura de projetos similares⁸⁵):

$$I = 242 \cdot (V / 700)^{0,765} \quad (17)$$

Onde,

I = investimento (US\$ mil);

V = volume de cada tanque (m³).

Tabela 5.2 Estimativa de investimento em uma área de cianetação com 6 tanques de 700 m³ de capacidade^{20, 135}

INVESTIMENTO	US\$ 1,000.00
6 agitadores com 2 hélices de 4 pás, 3785 mm dia., 50 kW	324.00
2 bombas 10"x 8", 45kW	39.00
2 bombas verticais de poço 3"x 3", 7,5 kW	9.60
1 talha elétrica, capacidade 2 t	9.00
1 analisador "on line" de cianeto	75,00
1 compressor de ar	14.00
A – Subtotal (equipamentos principais)	470.60
Montagem mecânica (20% A)	94.12
6 tanques, calhas, estruturas metálicas	553.00
Construção civil	53.00
Sistema elétrico	88.00
B – Subtotal (instalações fixas)	1,258.72
Engenharia e gerenciamento (15% de B)	188.81
C – TOTAL	1,447.53

De maneira semelhante ao caso anterior, o investimento da tabela 15.2 possui uma precisão de $\pm 30\%$.

Custo de investimento por tonelada processada

Os valores dos investimentos por tonelada processada foram calculados mediante a fórmula:

$$I_u = 1000.I \cdot R / Q \cdot h \quad (18)$$

Onde,

I_u = investimento unitário (US\$/t);

h = número de horas efetivamente operadas por ano.

R = fator de recuperação de capital (em valor unitário por ano), dado pela fórmula ¹:

$$R = i \cdot (1+i)^n / ((1+i)^n - 1) \quad (19)$$

onde n é a vida útil do projeto em anos de operação e i é a rentabilidade desejada para o projeto (em unidade).

Custo de energia elétrica

O custo de energia elétrica foi obtido multiplicando-se o consumo específico de energia pelo seu preço unitário corrente no Brasil, considerado como US\$ 0,028 / kWh ¹³⁸. No caso da moagem, considerou-se apenas o consumo específico de energia no moinho de bolas. O custo de energia elétrica dos demais motores do circuito de moagem foi considerado constante para todas as alternativas e, conseqüentemente, não foi calculado. No caso dos tanques de cianetação, considerou-se um consumo específico de energia de 0,06 kW/m³ de tanque ⁸⁵.

Custo de bolas e revestimentos

Foram estimados a partir dos consumos específicos de bolas e revestimentos multiplicados pelo consumo específico de energia elétrica na moagem e, respectivamente, pelos preços de bolas e revestimentos vigentes no Brasil. Admitiu-se,

para o caso base, um consumo de bolas de 50 g/kWh e um consumo de revestimento de 7 g/kWh, valores bastante usuais para minérios de ouro sulfetados*. Foram considerados os preços de US\$ 0,80/kg para bolas e US\$ 2,10/kg para revestimentos¹³⁷.

Custo de manutenção

O custo anual de manutenção, incluindo peças, materiais e mão-de-obra foi considerado como 6,5% do investimento da moagem¹³⁹ e 6,0% do investimento da cianetação²⁰.

Demais custos

Os outros custos, inclusive mão-de-obra de operação, não foram calculados por serem constantes e não impactarem o estudo.

Cálculo do acréscimo mínimo de extração de ouro

O acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar uma moagem mais fina ou um tempo de residência adicional foi calculado através da receita necessária para contrabalançar os incrementos de custos incorridos:

$$\Delta e_i = D_i \cdot 100 / T \cdot O \quad (20)$$

Onde,

Δe_i = acréscimo de extração necessária para compensar moer o minério mais fino ou aumentar o tempo de residência (%);

D_i = custos incorridos (US\$ / t) para moer o minério mais fino (somatório dos custos de energia elétrica, bolas, revestimentos e manutenção) ou aumentar o tempo de residência (somatório dos custos de energia elétrica e de manutenção);

T = teor de ouro do minério (g/t);

* DIAS GOMES, A. M. Comunicação pessoal (1997)

O = preço do ouro (US\$ / g).

5.7 Estratégias para ensaios e desenvolvimento de processo

As estratégias de desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados encontradas na literatura foram adaptadas para se adequarem ao desenvolvimento dos negócios, em consonância com os seus objetivos, estratégias e diretrizes de desenvolvimento de processos.

A análise das estratégias de ensaios considera as etapas mais comuns de um projeto mineral:

- avaliação preliminar;
- estudo conceitual ou de escopo (“*scoping study*”);
- estudo de pré-viabilidade ou segunda etapa do estudo conceitual;
- estudo de viabilidade final.

Em cada uma das etapas são discutidos os aspectos mais importantes para a elaboração do estudo. Os ensaios para determinar os parâmetros do processo de cianetação são levantados e priorizados para cada etapa de acordo com:

- os objetivos, estratégias e critérios empresariais;
- os fatores de sucesso e de lucratividade da indústria do ouro;
- as diretrizes para o desenvolvimento de processo;
- o impacto dos parâmetros de processo sobre a economia da cianetação;
- a análise do “*feed-back*” de desenvolvimento de processo.

O enfoque foi gerar com rapidez, baixo custo e confiabilidade, o mínimo necessário de dados para suportar decisões com a precisão requerida pelas empresas nas diferentes etapas de desenvolvimento do processo. São propostos diagramas lógicos para sinalizar o melhor caminho para o desenvolvimento de processos, à medida que se caminha da descoberta para a produção. Também foram consideradas as questões

críticas mais comuns envolvidas nos projetos de cianetação de minérios de ouro, levantadas a partir dos projetos em que o Autor trabalhou.

6 ANÁLISE CRÍTICA DO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE CIANETAÇÃO

Neste capítulo, é feita a análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados. Ele inicia com a determinação dos fatores, diretrizes e atividades importantes para a análise. Em seguida, avalia a sensibilidade da economia da cianetação em relação aos parâmetros de processo. Prossegue com a análise da influência dos objetivos, estratégias e critérios empresariais sobre o desenvolvimento de processos. Estabelece-se um banco de dados auxiliar de referência e analisa-se o "*feed-back*" de projetos, verificando-se o impacto dos parâmetros e variáveis de processo sobre a extração de ouro / economia dos projetos de cianetação em tanques agitados. Finalmente, são analisadas as estratégias para desenvolvimento de processo por etapas do processo decisório de projetos para produzir ouro por cianetação em tanques agitados.

6.1 Fatores e diretrizes para análise

O desenvolvimento de processo é parte integrante do desenvolvimento do projeto mineral. Ou seja, ambos perseguem objetivos comuns, que podem ser traduzidos pelo sucesso do negócio. Desta maneira, a estratégia de ensaios para determinar os parâmetros de processo deve estar em sintonia com os objetivos, estratégias, fatores de competitividade e fatores de sucesso do negócio.

Assim, para se fazer a análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados foram identificados:

- os parâmetros de processo e ensaios para a sua determinação;
- os fatores de sucesso para o desenvolvimento de processos;
- os fatores de lucratividade da indústria do ouro;
- as diretrizes para o desenvolvimento de processos.

6.1.1 Parâmetros de processo e ensaios

Os parâmetros para o desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados foram identificados a partir da análise da tecnologia de cianetação (Capítulo 4) e do "feed-back" de projetos em que o Autor trabalhou. Eles podem ser divididos em dois grupos: os parâmetros gerais e os parâmetros de processo. Os parâmetros gerais são estabelecidos para o projeto como um todo e fornecidos como dados de entrada para o desenvolvimento do processo. Já os parâmetros de processo são gerados por meio de ensaios tecnológicos.

Parâmetros gerais

- capacidade da instalação;
- teor de ouro;
- preço do ouro.

Parâmetros de processo

- recuperação global de ouro;
- recuperação de ouro na concentração gravítica;
- recuperação de ouro na cianetação;
- granulometria de moagem;
- densidade de polpa;
- tempo de pré-aeração;
- tempo de cianetação;
- concentração de cianeto (adição de cianeto);
- pH (adição de cal);
- adição de oxigênio;
- adição de carvão ativado;
- "work index" de Bond (Wi).

A seguir, são discutidos cada um destes parâmetros e os procedimentos para a sua determinação quando se tratar de parâmetro de processo.

Capacidade da instalação

A capacidade da instalação está relacionada às reservas e a vida útil da mina. Além de impactar a rentabilidade do empreendimento, a capacidade de processamento influencia a seleção da rota de processo. Por exemplo, maiores capacidades podem favorecer processos mais intensivos em capital, como a cianetação em tanques agitados, em detrimento da lixiviação em pilhas.

Como geralmente as reservas de ouro são pequenas, procura-se projetar as novas minerações com a maior capacidade possível, buscando-se diminuir o impacto dos custos fixos sobre a economia do empreendimento. Assim, a vida das novas minas de ouro tem sido relativamente baixa. Uma parcela considerável não atinge 10 anos.

Nas fases iniciais do desenvolvimento pode-se utilizar a Regra de Taylor ¹ para determinar a capacidade da instalação:

$$\text{Vida mina (anos)} = 6,5 \times (\text{reserva depósito em milhões t})^{0,25} \times (1 \pm 0,2) \quad (21).$$

A capacidade ótima da instalação também pode ser determinada por meio de fluxos de caixa descontados, com ou sem avaliação de riscos, procurando-se a combinação de capacidade de processamento / vida útil que maximize o valor presente líquido do empreendimento ¹⁴⁰. Em alguns casos de projetos de risco elevado, os empresários têm preferido adotar o período de “*pay-back*” (calculado com fluxo de caixa descontado) para tomar a decisão. Procuram, assim, recuperar o capital investido o mais rápido possível, possibilitando-os sair do empreendimento caso ocorra algum problema. O método dos fluxos de caixa descontado é mais apropriado para as etapas mais avançadas do desenvolvimento.

Em ambos os procedimentos, a capacidade ótima calculada é função das reservas e vida útil. Entretanto, nas fases iniciais do desenvolvimento do projeto, as reservas ainda possuem um nível de incerteza elevado. Também existe a possibilidade de descoberta de reservas adicionais nas imediações da jazida. Estes fatores, juntamente com as variações do preço do ouro a longo prazo, constituem uma apreciável fonte de erro para os métodos determinísticos apresentados. Por esta razão, muitas empresas preferem adotar métodos de julgamento para definir a capacidade ótima da instalação, com avaliação sucinta dos riscos envolvidos. Nestes casos, usa-se frequentemente a experiência de projetos anteriores acoplada às evidências geológicas da jazida em questão.

A seleção da capacidade também pode ser influenciada pela disponibilidade de equipamentos. Como a vida média das minas é baixa, muitas vezes as empresas possuem equipamentos disponíveis, ou conhecem oportunidades para aquisição de equipamentos usados, que podem influenciar decisivamente a capacidade da usina e a rota de processo. Em locais remotos (Amazônia) tenta-se adotar modelos e tamanhos de equipamentos similares aos dos vizinhos para socorrer-se em caso de emergência.

Seja qual for o procedimento adotado, a decisão da capacidade de produção é uma tarefa multi-disciplinar típica.

Teor de ouro

Depois do preço do ouro, trata-se do parâmetro de maior impacto sobre a viabilidade do empreendimento e seleção da rota de processo. No caso de minérios de ouro não refratário, teores mais elevados favorecem ao emprego de cianetação em tanques agitados.

Obviamente, o(s) teor(es) de ouro para um projeto são determinados pela Geologia (teor dos recursos geológicos) e pela Lavra (teor da reserva lavrável). Desta maneira, as decisões relativas ao processo devem ser feitas considerando-se os teores

informados pela Geologia ou pela Lavra, o que estiver mais atualizado, em detrimento do teor das amostras recebidas para estudos de processo.

Raramente as amostras recebidas para estudos de processo possuem teores idênticos ao valor médio da jazida, ou da parte da jazida que elas representam. Mesmo adotando-se um procedimento criterioso para garantir a representatividade das amostras, são normais pequenas diferenças de teor. Mesmo porque, na época da colheita das amostras, o teor definitivo das reservas lavráveis não é conhecido. Entretanto, deve-se procurar trabalhar com amostras de características o mais próximo possível da média da jazida, ou de períodos de operação caso ocorram variações consideráveis do teor lavrável ao longo da vida da mina. Maiores detalhes sobre a representatividade e teores das amostras serão feitas na análise das estratégias de desenvolvimentos de processos de cianetação em tanques agitados.

Preço do ouro

O preço do ouro possui extrema relevância para a economia da cianetação, seleção da rota e definição dos parâmetros ótimos de processo. Como se trata de um fator fora de controle das empresas de mineração, ele é responsável pela maior parte do risco associado ao projeto.

Dada a extrema importância deste fator, a empresa de mineração deve definir claramente no seu plano de negócios o preço de ouro, ou evolução deste preço, a serem adotados em todo o processo decisório. Esta consideração evita ou minimiza a necessidade de refazer ensaios e revisar o projeto.

Recuperação global de ouro

Este importante parâmetro para a viabilidade do empreendimento depende dos demais parâmetros de processo que contribuem para a sua otimização.

A recuperação global de ouro para minérios de fácil processamento é função da recuperação da concentração gravítica, quando utilizada, e da extração na cianetação. Ambos os casos serão discutidos mais em detalhes a seguir.

Recuperação de ouro na concentração gravítica

A recuperação de ouro na concentração gravítica é estimada por meio de ensaios de laboratório. A prática mais difundida atualmente é o emprego de concentradores centrífugos de laboratório, como o Concentrador Knelson com caçamba de 75 mm (3" de diâmetro) ou o Concentrador Falcon com caçamba de 100 mm (4" de diâmetro).

A tendência das minas modernas é produzir um concentrado gravítico para fundição direta (teores de ouro no concentrado superiores a 10% e de preferência acima de 20%). Desta maneira, o concentrado rougher obtido em laboratório necessita ser enriquecido mais de cem vezes para se estimar a recuperação final de ouro. Esta tarefa é geralmente feita em bateia, uma vez que ensaios em mesa vibratória demandariam uma quantidade absurda de amostra e teriam um custo-benefício desfavorável. Esta tem sido uma das maiores dificuldades dos ensaios de concentração gravítica, uma vez que o bateamento requer uma grande habilidade e as variações de resultados entre operadores podem ser consideráveis. A determinação da recuperação gravítica também é dificultada pelas variabilidades acentuadas apresentadas pelos minérios. Entretanto, como a concentração gravítica possui função auxiliar em processos de lixiviação em tanques agitados e raramente eleva a recuperação global de ouro da usina, a precisão necessária à sua determinação basta ser a suficiente para decidir entre incluir ou não a concentração gravítica no circuito industrial.

A prática tem mostrado que, na maioria dos casos, a recuperação de ouro para fundição direta fica na faixa de 75% da recuperação obtida no concentrado rougher, conforme experiência da Knelson.

Recuperação de ouro na cianetação

A recuperação de ouro na cianetação é determinada por meio de ensaios de cianetação em garrafão sobre mesa de rolos ou em béqueres com agitação, com ou sem acompanhamento da cinética. A extração dependerá dos demais parâmetros de processo, notadamente granulometria de moagem, adição de cianeto, tempo de pré-aeração, tempo de cianetação, pH. A extração ótima deve ser determinada por estratégias de otimização, como as utilizadas pelo MINTEK (item 4.4.1).

Granulometria de moagem

É um parâmetro de grande importância para os projetos de cianetação em tanques agitados. Trata-se de uma decisão típica da área de processamento mineral.

O procedimento tradicional de ensaios consiste em determinar as extrações de ouro e consumos de cianeto e cal para diversas granulometrias de moagem. São utilizados ensaios de cianetação, quase sempre em garrafão sobre mesa de rolos, sem acompanhamento da cinética. Ensaios com acompanhamento de cinética podem ser realizados nas fases mais avançadas do desenvolvimento de processo. A otimização da granulometria ótima de moagem usualmente é feita através de um estudo econômico, determinando-se a sensibilidade do valor incremental da recuperação de ouro contra o acréscimo de custo para obter esta recuperação.

Além da resposta do minério à extração de ouro para diferentes graus de moagem, a granulometria ótima é influenciada pelo preço do ouro, W_i e capacidade de processamento.

Densidade de polpa

A densidade de polpa afeta a cinética de cianetação e o volume dos tanques. Polpas mais diluídas possibilitam cinéticas mais rápidas, mas em contrapartida levam a grandes volumes de tanques e a maiores dificuldades de se manter os sólidos em

suspensão na polpa. A concentração de sólidos ideal é um compromisso entre estes dois aspectos, ficando na maioria dos casos entre 45% e 52% de sólidos em peso.

Como será mostrado adiante, trata-se de um parâmetro que afeta pouco a economia da cianetação, além de poder ser modificado no transcorrer da vida do empreendimento. Portanto, nas fases iniciais do desenvolvimento de processo, costuma-se trabalhar com concentrações de polpa pré-definidas, por exemplo 50% de sólidos em peso. Às vezes, nas fases mais avançadas, são realizados ensaios de cianetação variando-se a concentração de sólidos para verificar se o processo é sensível à densidade de polpa. Maior atenção é requerida no caso de minérios com muita lama, com tendência de gerar polpas muito viscosas. A cianetação destes minérios deve ser feita com polpa mais diluída, como por exemplo 40% sólidos em peso.

Tempo de pré-aeração

A pré-aeração é um parâmetro que pode influenciar significativamente a extração de ouro e o consumo de cianeto e deve ser sempre avaliada ao se desenvolver um processo, notadamente para minérios sulfetados. Para tanto, são realizados ensaios em garrafão sobre mesa de rolos, contactando-se a polpa de minério durante diferentes tempos e pHs antes de se adicionar cianeto. A influência da pré-aeração é avaliada por meio da resposta da extração de ouro e do consumo de cianeto em relação ao pH e tempo.

Tempo de cianetação

O tempo de cianetação tem uma grande influência sobre a extração de ouro. Ele é determinado por meio de ensaios de cianetação com acompanhamento da cinética, medindo-se a evolução da extração de ouro e o consumo de cianeto em relação ao tempo de operação. Estes ensaios podem ser realizados em garrafão sobre mesa de rolos ou em béqueres com agitação.

De modo semelhante à granulometria de moagem, o tempo ótimo de cianetação pode ser obtido por meio de um estudo econômico, determinando-se a sensibilidade do valor incremental da recuperação de ouro contra o acréscimo de custo para obter esta recuperação.

Adição de cianeto (concentração de cianeto)

A adição / concentração de cianeto é um parâmetro de grande impacto sobre a economia da cianetação. Para determinar a adição ótima de cianeto (relacionada à concentração inicial) são realizados ensaios em garrafão sobre mesa de rolos ou béqueres agitados variando-se a quantidade de cianeto adicionada e medindo-se as extrações de ouro. No caso de minérios de fácil processamento, é mais prático adicionar todo o cianeto no início do ensaio do que manter uma concentração de cianeto constante durante o experimento. O valor ótimo de adição de cianeto é determinado por meio de um estudo econômico, comparando-se o valor da recuperação incremental de ouro com o custo incorrido para obter esta recuperação.

pH

Este parâmetro é importante para os tipos de minérios mais sensíveis ao pH de cianetação, como por exemplo minérios sulfetados contendo pirrotita. O procedimento usual para verificar o impacto do pH consiste em fazer ensaios de cianetação com adições diferenciadas de cal e monitoramento do pH para determinar o seu efeito sobre a extração de ouro e consumo de cianeto.

Adição de oxigênio

A adição de oxigênio permite reduzir o tempo de lixiviação. Pode ter um custo / benefício favorável nos casos em que possibilita aumentar a extração de ouro ou em casos de se usarem instalações modulares relocáveis para processar minérios de jazidas de pequena vida útil. Os ensaios são realizado com o borbulhamento de oxigênio em frascos agitados, com cuidadoso monitoramento do teor de oxigênio dissolvido.

Adição de carvão ativado

Minérios com espécies ouro-adsorventes, como carbono elementar, necessitam ser cianetados na presença de carvão ativado para evitar que o ouro recém-lixiviado seja reincorporado ao minério. Os ensaios são realizados em béquer com agitação, ou em garrafão sobre mesa de rolos, com adição de cerca de 1 g/l de carvão ativado. Pequenos acréscimos na extração do ouro em relação ao processo CIP são suficientes para justificar o uso de CIL (existem minérios moderadamente “*preg-robbing*”, como algumas frentes de Fazenda Brasileiro, em que a adição de carvão ativado é suficiente para reverter o equilíbrio e possibilitar a transferência para o carvão ativado do ouro readsorvido pelo minério durante a cianetação).

***“Work index”* de Bond (Wi)**

O “*work index*” do minério influencia a economia, seleção da rota de processo e granulometria de moagem para cianetação. Apesar do “*work index*” ser menos variável do que as características para moagem semi-autógena ou autógena, ele deve ser determinado sistematicamente em amostras distribuídas espacialmente em toda a jazida.

6.1.2 Fatores de sucesso para o desenvolvimento de processo

Os seguintes fatores de sucesso para o desenvolvimento de processos foram identificados por meio da avaliação “*ex-post*” de projetos constantes na revisão bibliográfica (Capítulo 2) e “*feed-back*” de diversos projetos em que o Autor trabalhou:

- conhecimento adequado da tecnologia;
- foco no negócio e no seu processo decisório;
- representatividade da amostra estudada;
- “*feed-back*” de projetos;
- comparação com “*benchmarking*”;
- caracterização do projeto e planejamento inicial bem formulados;

- foco na minimização de riscos;
- desenvolvimento de processo desde a fase inicial da pesquisa geológica;
- programa de ensaios em estágios de acordo com as etapas dos estudos de engenharia;
- trabalho em equipe com abordagem sistêmica e multi-disciplinar;
- uso de técnicas modernas de modelamento e simulação;
- consideração de oportunidades específicas do projeto.

A seguir, discute-se brevemente cada um destes fatores de sucesso.

Conhecimento adequado da tecnologia

O conhecimento adequado da tecnologia é uma condição fundamental para desenvolver um processo. Este conhecimento deve abranger os fundamentos do processo, seus mecanismos e o impacto de seus parâmetros e variáveis sobre a extração de ouro e, em consequência, sobre a economia dos empreendimentos.

Foco no negócio e no seu processo decisório

O foco no negócio pressupõe que o desenvolvimento de processo seja feito em sintonia com os objetivos e estratégias da empresa e do projeto, em conformidade com as etapas do processo decisório. A clareza dos objetivos, das estratégias e dos critérios do projeto e a ênfase de toda a equipe em alcançá-los é muito importante para o sucesso do empreendimento. Evita-se, assim, a dispersão de esforços, revisão de trabalhos e o não cumprimento de prazo e orçamento. Como a sobrevivência de qualquer empresa pressupõe a geração de lucros, é importante usar critérios econômicos para a tomada de decisões sobre o processo.

Representatividade da amostra estudada

Problemas de representatividade de amostras têm sido um dos principais fatores de falhas de projetos, razão pela qual deve-se dar uma atenção especial a esta questão por ocasião do desenvolvimento de processos.

***"Feed-back"* de projetos**

A experiência de projetos concluídos é de grande importância para buscar um aprimoramento constante e otimizar a aplicação de recursos no desenvolvimento de processos. Entretanto, este procedimento deve ser realizado com cautela para não repetir ou consolidar vícios ou práticas susceptíveis de aprimoramento.

Comparação com *"benchmarking"*

Os parâmetros e critérios estabelecidos para um processo em desenvolvimento devem ser comparados com os de outros projetos bem sucedidos. Esta comparação é importante para verificar a posição competitiva do novo projeto, identificar os seus pontos críticos para uma abordagem mais cuidadosa e buscar as melhores práticas para a condução do projeto.

Caracterização do projeto e planejamento inicial bem formulados

Uma boa caracterização inicial do projeto é imprescindível para identificar, priorizar e planejar todas as atividades para o seu desenvolvimento. Este trabalho deve ser feito por uma equipe multi-disciplinar atuando em grande cooperação e sintonia.

Uma caracterização inicial adequada permite elaborar um programa de trabalho e cronograma de decisões em sintonia com as características e necessidades do projeto. De posse deles, tudo irá evoluir melhor. Deve-se procurar identificar o quanto antes os problemas críticos de processo, no sentido de planejar as atividades e definir as responsabilidades para o seu estudo. A descoberta de problemas críticos em etapas

tardias pode causar atrasos e prejudicar sensivelmente a economia do empreendimento. Em alguns casos, pode chegar mesmo a inviabilizá-lo, com grande perda de tempo e dinheiro, além das consequências desagradáveis de se abandonar um projeto em fase adiantada. Os problemas críticos podem, e devem, ser identificados nas etapas iniciais do desenvolvimento mediante uma boa caracterização e avaliação formal.

Foco na minimização de riscos

A elaboração de um programa de desenvolvimento de processo com foco na minimização de riscos pressupõe o planejamento dos ensaios em etapas, concentrado-se os estudos nas áreas de maior incerteza e potencial de ganhos. Devem-se avaliar prioritariamente tecnologias convencionais. Auditorias de rotina sobre a concepção do processo contribuem para minimizar os riscos do processo. Sessões de “*brain-storm*” facilitam identificar estes riscos e planejar os estudos para a sua minimização.

Desenvolvimento de processo desde a fase inicial da pesquisa geológica

O desenvolvimento de processo desde a fase inicial da pesquisa geológica é fundamental para se fazer uma boa caracterização inicial e planejamento do projeto e evitar a armadilha de deixar evoluir a pesquisa geológica em uma área com minério de processamento antieconômico.

Programa de ensaios em estágios de acordo com as etapas dos estudos de engenharia

O programa de ensaios tecnológicos deve considerar as etapas dos estudos de engenharia realizados para o processo decisório de desenvolvimento da mina. A divisão dos ensaios de processo nas etapas clássicas de estudo de laboratório e estudo em usina piloto, quando desvinculada do processo decisório, é uma fonte de má aplicação de recursos e prejuízos para os projetos.

A abordagem moderna consiste em gerar o mínimo de informações para garantir a precisão da decisão que se deseja tomar e ir aprofundando os estudos tecnológicos gradativamente para trazer as informações ao nível de precisão de cada etapa dos estudos de engenharia.

Trabalho em equipe com abordagem sistêmica e multi-disciplinar

O desenvolvimento de um projeto é o resultado da interação de uma diversidade de disciplinas. As informações de uma área são importantes para as decisões das outras disciplinas, dentro de uma abordagem sistêmica e sinérgica.

Uso de técnicas modernas de modelamento e simulação

O desenvolvimento de técnicas modernas de modelamento e simulação tem facilitado, agilizado e reduzido o custo dos estudos para as tomadas de decisão. O uso destas ferramentas é importante para gerar projetos com posição competitiva favorável. Entretanto, deve-se cuidar que estes programas de modelamento e simulação sejam operados por pessoas habilitadas e alimentados com dados confiáveis e relevantes. Caso contrário, a credibilidade conferida pelo uso de uma ferramenta moderna e poderosa pode levar a erros e fracassos desastrosos.

Consideração de oportunidades específicas do projeto

As especificidades de um projeto podem favorecer o uso de tecnologias inovadoras, ou mesmo menos convencionais, ou combinações pouco usuais de tecnologias existentes. Esta consideração é útil para evitar que a tendência do emprego de tecnologias convencionais para minimizar os riscos cegue a visão das oportunidades, que podem resultar em maior rentabilidade às custas de um acréscimo de risco aceitável.

6.1.3 Fatores de lucratividade da indústria do ouro

A análise de situação da indústria do ouro, tanto a nível mundial, quanto a nível do Brasil (Capítulo 3), permite concluir que:

- Os produtores não competem pelo mercado e não existe uma diferenciação entre a qualidade do produto de diversas empresas. Todo o ouro produzido é facilmente vendido pelo preço das bolsas.
- Como consequência, no aspecto tecnológico, predomina a cooperação. Trata-se de uma tecnologia madura e aberta. A competitividade está na gestão técnica e administrativa do negócio.
- Face aos baixos preços do ouro, o lucro operacional encontra-se ameaçado.
- Está ocorrendo um enorme esforço para melhorar ou mesmo manter o desempenho da indústria, por meio de redução dos custos operacionais, diminuição do tempo de maturação dos projetos, redução do investimento, aumento da receita, aumento da escala de produção.

Os fatores de competitividade são usualmente definidos como aqueles que tornam os produtos de uma empresa preferidos pelo mercado, conferindo assim um diferencial competitivo ¹⁴¹. Como não existe uma diferença de qualidade entre o ouro produzido por diversas empresas, além de que os produtores do metal não competem pelo mercado, os fatores de competitividade, neste caso, são mais apropriadamente considerados como os fatores de lucratividade.

Os principais fatores de lucratividade identificados para a indústria do ouro são:

- redução dos investimentos;
- redução do custo operacional;
- aumento da escala de produção;
- aumento da receita;
- diminuição do tempo de maturação dos projetos;
- minimização de riscos.

Redução dos investimentos

A redução dos investimentos sem comprometer o desempenho das usinas é muito importante para a economicidade dos projetos. A concepção do processo e o arranjo mecânico das instalações contribuem bastante para atingir este objetivo.

Redução dos custos operacionais

A redução dos custos operacionais das usinas existentes e a concepção de processos para os novos projetos que possibilitam atingir baixos custos operacionais são vitais para a sobrevivência da indústria do ouro em épocas de baixo preço do metal. Neste sentido, as filosofias usualmente adotadas para o desenvolvimento de processo incluem o uso do maior tamanho de equipamento que se adeque à capacidade do projeto e que já tenha sido comprovado na indústria, além do emprego intensivo de sistemas modernos de instrumentação e controle. Os parâmetros que mais impactam o custo operacional devem ser cuidadosamente estudados.

Aumento da escala de produção

A escala de produção é governada pelas reservas e rentabilidade x vida útil. Os custos fixos impactam muito a economia dos projetos de ouro. As reservas são geralmente pequenas. Como consequência, o máximo de rentabilidade possível para uma jazida geralmente está associado a uma capacidade que resulta em uma vida útil baixa, geralmente entre 4 e 10 anos. Por sua vez a escala de produção afeta a otimização dos parâmetros de processo, como será discutido mais adiante.

Aumento da receita

O aumento da receita pode estar associado à escala de produção, sequenciamento da lavra e aumento de recuperação. Neste aspecto, todos os parâmetros de processo que impactam a recuperação de ouro são de grande importância.

Diminuição do tempo de maturação dos projetos

Uma das características da indústria do ouro é possuir uma maior proporção de investimentos em pesquisa geológica e desenvolvimento do que outros bens minerais. Como estes investimentos são feitos bem antes do início da produção, eles penalizam muito o valor presente de um projeto. Assim, existe uma forte pressão no sentido de se reduzir o tempo de maturação dos projetos.

Apesar do maior potencial de ganho em relação ao tempo de maturação do projeto estar relacionado à pesquisa geológica, a área de processo pode contribuir através de:

- estratégia de ensaios voltada a definir rapidamente apenas o necessário para garantir a precisão requerida na tomada de decisão;
- procedimentos modernos para a tomada de decisão (modelos de custos, trabalho em equipe, objetivos claros, etc.);
- evitar que as atividades de desenvolvimento de processo sejam responsáveis pelo aumento do tempo de gestação e implantação do projeto.

Minimização de riscos

A minimização de riscos é extremamente importante para o desenvolvimento de um projeto. Os riscos podem ser minimizados por uma abordagem do projeto voltada a:

- desenvolvimento do processo desde as etapas iniciais da pesquisa geológica;
- aplicação prioritária de tecnologias tradicionais da indústria do ouro.
- concentração dos ensaios nas áreas de maior incerteza e potencial de ganho;
- estudo cuidadoso da variabilidade do minério;
- submeter a concepção do processo a auditorias de rotina.

6.1.4 Priorização dos fatores de sucesso

Para orientar a análise crítica do desenvolvimento de processo, procurou-se ordenar expeditamente os fatores de sucesso em relação ao respectivo grau de importância. Para tanto, utilizou-se a matriz Fatores de Sucesso Tecnológico x Fatores de Lucratividade. O impacto de cada fator de sucesso sobre o fator de lucratividade foi julgado como alto (A), médio (M) ou baixo (B) e colocado na célula correspondente da tabela 6.1. O fator de lucratividade “Aumento da escala de produção” não foi considerado na matriz por depender basicamente da reserva mineral e praticamente não interagir com os fatores de sucesso tecnológico.

Tabela 6.1 – Matriz fatores de sucesso tecnológico x fatores de lucratividade

Fatores de sucesso tecnológico	Fatores de lucratividade				
	Redução do investimento	Redução do custo operacional	Redução do tempo maturação	Aumento da Receita	Redução risco do projeto
Conhecimento adequado da tecnologia	A	A	A	A	A
Foco no negócio e no seu processo decisório	A	A	A	M	A
Assegurar representatividade da amostra	A	A	A	A	A
Usar "feed-back" de projetos	M	M	A	M	A
Comparação com bench-mark	B	B	M	B	A
Planejamento inicial bem formulado	A	A	A	M	A
Foco na minimização de riscos	A	A	B	M	A
Desenv. Processo desde fase inicial pesquisa	A	M	A	B	A
Programa de ensaios em estágios	A	M	A	B	A
Trabalho em equipe multidisciplinar	A	M	A	M	A
Uso técnicas modernas modelamento / simulação	M	M	A	B	M
Consideração de oportunidades / ameaças	M	A	M	M	A

Obs.: as letras nas células indicam o grau de impacto:
A = alto; M = médio; B = baixo

Apesar de se tratar de um julgamento subjetivo e, assim, poder variar de pessoa a pessoa, o conjunto de pontuações recebidas por fator de sucesso tecnológico facilita agrupá-los por ordem de importância:

Grupo mais importante:

- Conhecimento adequado da tecnologia.
- Assegurar a representatividade da amostra.
- Foco no negócio e no seu processo decisório.
- Planejamento inicial bem formulado.
- Trabalho em equipe com abordagem sistêmica e multi-disciplinar.

Grupo de importância média:

- Uso de "*feed-back*" de projetos.
- Foco na minimização de riscos.
- Programa de ensaios em estágios de acordo com as etapas dos estudos de engenharia.
- Desenvolvimento de processo desde a fase inicial da pesquisa geológica.
- Consideração das oportunidades / ameaças e fatores externos aos projetos.

Grupo de menor importância:

- Uso de técnicas modernas de modelamento e simulação;
- Comparação com "*bench marking*".

Por sua vez, estes grupos orientam o estabelecimento de diretrizes para o desenvolvimento de processo, assim como ajudam a planejar e a priorizar os estudos correlatos, permitindo concentrar os esforços sobre as atividades mais importantes.

O primeiro grupo mostra a importância em se ter uma equipe altamente qualificada para desenvolvimento do processo, seja no aspecto técnico, seja na sua orientação para o negócio. Um planejamento inicial bem formulado, realizado por uma equipe multidisciplinar com visão sistêmica, é de fundamental importância para o sucesso do projeto. Neste aspecto, as considerações sobre o planejamento da amostragem devem ser minuciosas no sentido de assegurar a sua representatividade.

No grupo intermediário aparecem os fatores ligados aos procedimentos e considerações para o desenvolvimento de processo. A empresa deve dispor e utilizar um "*feed-back*" de seus projetos anteriores devidamente estruturado e organizado. O foco na minimização de riscos deve considerar o início do desenvolvimento de processo desde as etapas iniciais da pesquisa geológica, a realização do programa de ensaios de acordo com as etapas dos estudos de engenharia, a intensificação de ensaios nas áreas de maior incerteza e potencial de ganhos, além de submeter a concepção do processo a auditorias de rotina. A equipe deve estar atenta às oportunidades e ameaças ao projeto, assim como aos fatores externos, como a adequação do processo a requisitos ambientais de aceitação internacional, assim como a requisitos políticos e governamentais.

Finalmente, aparecem as ferramentas de trabalho e balizamento, como os programas para modelamento e simulação e banco de dados de projetos similares. Deve-se ressaltar que a menor pontuação recebida por este grupo não exclui a sua importância para o sucesso dos projetos minerais.

6.1.5 Diretrizes para o desenvolvimento de processo

A análise dos fatores de sucesso e de lucratividade permitiram estabelecer as seguintes diretrizes para o desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados:

- o desenvolvimento de processo deve ser realizado com foco no negócio;
- a equipe de processo deve possuir um sólido conhecimento da tecnologia utilizada e dispor de "*feed-back*" de projetos analisado e estruturado, assim como de um banco de dados de projetos similares para "*benchmarking*";
- ao se planejar os ensaios para desenvolver o processo deve-se considerar cuidadosamente a minimização de riscos;
- os fatores externos ao projeto devem ser considerados amplamente, incluindo-se as oportunidades / ameaças, requisitos ambientais de aceitação internacional, assim como fatores políticos e governamentais.

Em seguida, as diretrizes foram desdobradas procurando-se identificar ações específicas para orientar o desenvolvimento de processos e a sua análise crítica. Este desdobramento pode ser visto na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Diretrizes e ações para o desenvolvimento de processo e sua análise crítica

FOCO	DIRETRIZ	AÇÃO
Negócio	Sintonia com a estratégia e objetivos da empresa	Desenvolver o projeto em sintonia com os objetivos, estratégias e critérios da empresa
	Sintonia com as etapas do processo decisório	Estabelecer com clareza as etapas do processo decisório e programas de estudos correlatos
	Desenvolvimento com abordagem sistêmica e multidisciplinar	Estruturar o projeto e tomar decisões com equipe multidisciplinar e visão sistêmica
	Uso de critérios econômicos para a tomada de decisão	Definir os critérios e utilizá-los para priorizar os ensaios e otimizar os parâmetros de processo
Conhecimento	Domínio da tecnologia do processo	Conhecer os fundamentos e a influência dos parâmetros de processo
	"Feed-back" de projetos anteriores	Disponer de "feed-back" de projetos anteriores de maneira analítica e estruturada
	"Benchmarking" de projetos similares	Disponer de "benchmarking" dos principais parâmetros de projetos similares
Minimização de riscos	Programa de ensaios em etapas	Elaborar programa de ensaios com precisão e custos crescentes
	Ensaio de processo desde as fases iniciais da pesquisa geológica	Estabelecer rotina para caracterização tecnológica e ensaios exploratórios
	Planejamento inicial bem formulado	Estabelecer procedimentos formais para o planejamento inicial
	Assegurar a representatividade da amostra	Definir amostragem por meio de ampla discussão e procedimentos formalizados
Fatores externos	Estar atento às oportunidades / ameaças do projeto	Avaliar se o uso de tecnologias inovadoras ou menos convencionais gera ganhos para o projeto
	Adequação do processo aos requisitos ambientais de aceitação internacional	Elaborar programa de ensaios para adequar o processo aos requisitos ambientais
	Adequação do processo aos requisitos políticos e governamentais	Considerar aspectos fiscais e tributários na avaliação econômica do processo

A partir destas ações, podem ser estabelecidas as seguintes atividades importantes ao desenvolvimento do processo, que devem ser consideradas na análise objeto desta tese:

- análise da sensibilidade da economia da cianetação em função dos parâmetros de processo;
- análise do impacto dos objetivos, estratégias e critérios empresariais sobre o desenvolvimento do processo;

- estabelecimento de banco de dados de projetos similares para "*benchmarking*" no desenvolvimento de processo;
- estruturação e análise do "*feed-back*" de projetos quanto ao impacto dos parâmetros e variáveis de processo sobre a extração de ouro por cianetação em tanques agitados;
- análise das estratégias de ensaios para desenvolvimento de processos.

6.2 Sensibilidade da economia de cianetação em função dos parâmetros de processo

A matriz Parâmetros de Processo x Fatores de Lucratividade foi utilizada para fazer uma triagem dos parâmetros de processo para serem submetidos a uma análise de sensibilidade quanto à economia do processo. Como os fatores de lucratividade “Redução do tempo de maturação dos projetos” e “Aumento da escala de produção” praticamente não têm interação com os parâmetros de processo, eles foram excluídos da matriz. O impacto de cada parâmetro de processo sobre os fatores de lucratividade foi julgados como alto (A), médio (M) ou baixo (B) e colocado nas células correspondentes da tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Matriz parâmetros de processo x fatores de lucratividade

Parâmetros de processo	Fatores de lucratividade			
	Investimento	Custo operacional	Receita	Risco do projeto
Recuperação de ouro	M	A	A	A
Granulometria de moagem	A	A	M	M
Densidade de polpa	B	B	B	B
Tempo de pré-aeração	B	B/A	B/A	B/A
Tempo de cianetação	B	B	A	A
Adição de cianeto	-	A	A	A
Adição de cal	B	B/M	B/M	B/M
Adição de oxigênio	B	B/M	B/A	B/A
Adição de carvão	B	B	B/A	B/A
" <i>work index</i> "	A	A	M	M

O impacto de alguns parâmetros do processo sobre os fatores de lucratividade pode variar bastante em função do tipo de minério. A pré-aeração geralmente tem uma influência baixa sobre a recuperação de ouro (receita) e consumo de cianeto (custo operacional) para minérios oxidados e pouco sulfetados. No entanto, para minérios contendo teores de sulfeto mais elevados, principalmente pirrotita, o impacto sobre a receita, o custo operacional e, conseqüentemente sobre o risco do processo passa a ser alto.

A adição de cal é sempre importante para manter o pH acima de 9,3 (normalmente entre 10 e 11) para evitar a formação de HCN. Alguns minérios possuem natureza mais ácida e requerem maiores adições de cal para atingir o pH desejado para a operação, passando a ter uma influência média sobre o custo operacional. Já outros minérios apresentam alguma sensibilidade de extração de ouro em relação ao pH (como minérios pirrotíticos), gerando uma influência de baixa a média na receita e no risco.

A adição de oxigênio pode ser importante nos casos em que são desejáveis tanques de cianetação relativamente pequenos, implicando em impactos baixo a médio para o custo operacional e o risco e baixo a alto para a receita (extração de ouro).

A adição de carvão ativado (CIL) pode ser interessante para minérios que apresentam cinética de extração de ouro rápida e, principalmente, espécies ouro-adsorventes. Neste caso, a adição de carvão ativado é fundamental para manter uma extração de ouro aceitável, passando a ter um impacto alto sobre o aumento da receita e minimização do risco do processo.

Apesar de também se tratar de um julgamento subjetivo, o conjunto de pontuações permite agrupar os parâmetros de processo em grupos de prioridade:

Prioridade alta:

- recuperação de ouro;
- granulometria de moagem;

- "work index";
- adição de cianeto.

Prioridade média:

- tempo de pré-aeração;
- tempo de cianetação.

Prioridade baixa:

- adição de carvão;
- adição de oxigênio;
- adição de cal;
- densidade de polpa.

Entretanto, é importante ressaltar que, para alguns casos, o tempo de pré-aeração, a adição de carvão e a adição de oxigênio necessitam ter a prioridade aumentada, conforme indicado na matriz da figura 6.3.

Visando-se quantificar a sensibilidade da economia de projetos de cianetação em tanques agitados em relação aos principais parâmetros de processo considerou-se, como caso base, o seguinte projeto típico de ouro com lavra a céu aberto e operação com minério de fácil processamento:

• Capacidade de processamento (t/a):	1.000.000
• Teor de ouro (g/t):	5,0
• Recuperação de ouro (%):	90,0
• Vida útil da mina (anos):	15
• Investimento total (US\$ 1,000):	60,000.0
• Investimento na moagem (US\$ 1,000):	8,000.0
• Investimento na lixiviação (US\$ 1,000):	2,200.0
• Custo operacional total (US\$ / t):	17.00
• Custo operacional da moagem (US\$ / t):	1.91

• Custo operacional dos tanques lixiviação* (US\$ / t):	0.14
• Custo operacional de cianeto (US\$ / t):	0.56
• Custo operacional de cal hidratada (US\$ / t):	0.06
• Preço do ouro (US\$ / g):	8.84

Elaborou-se um fluxo de caixa simplificado para este caso base, considerando-se todo o investimento no ano 1 e a obtenção da capacidade de produção já a partir do ano 2 (primeiro ano de operação). Calculou-se, então, o valor presente líquido – VPL – antes dos impostos e para uma taxa de desconto de 12% a. a. Em seguida quantificou-se expeditamente a sensibilidade deste VPL em relação aos seguintes agrupamentos de parâmetros de processo:

- Recuperação de ouro: admitidas variações de +3% a –5%, resultando numa recuperação máxima de 93% e mínima de 85%.
- Moagem: o efeito dos parâmetros granulometria de moagem e "*work index*" foram considerados juntos, uma vez que ambos influenciam os tamanhos do moinho. Admitiu-se uma variação de $\pm 30\%$ tanto para o investimento quanto para o custo operacional.
- Adição de cianeto: considerada uma variação típica de $\pm 50\%$ sobre o custo operacional de cianeto do caso base.
- Tempo de residência nos tanques: o impacto do tempo de pré-aeração e o tempo de cianetação ocorrem sobre o volume dos tanques. Assim, estes dois efeitos foram considerados juntos, equivalente a $\pm 30\%$ do investimento e custo operacional respectivos do caso base.
- Adição de cal: considerada uma variação de $\pm 30\%$ em relação ao custo operacional respectivo do caso base.
- Densidade de polpa: pequenos ajustes na densidade de polpa influem sobre o volume dos tanques. Foi considerada uma variação de $\pm 15\%$ dos volumes dos tanques para possibilitar ajustes na densidade de polpa.
- As adições de carvão ativado e oxigênio não foram consideradas neste exercício uma vez que o caso base considera um minério de fácil processamento tratado numa instalação o mais convencional possível.

* Não inclui mão-de-obra.

A planilha completa do fluxo de caixa encontra-se no Anexo A. O resumo dos resultados podem ser vistos na figura 6.1.

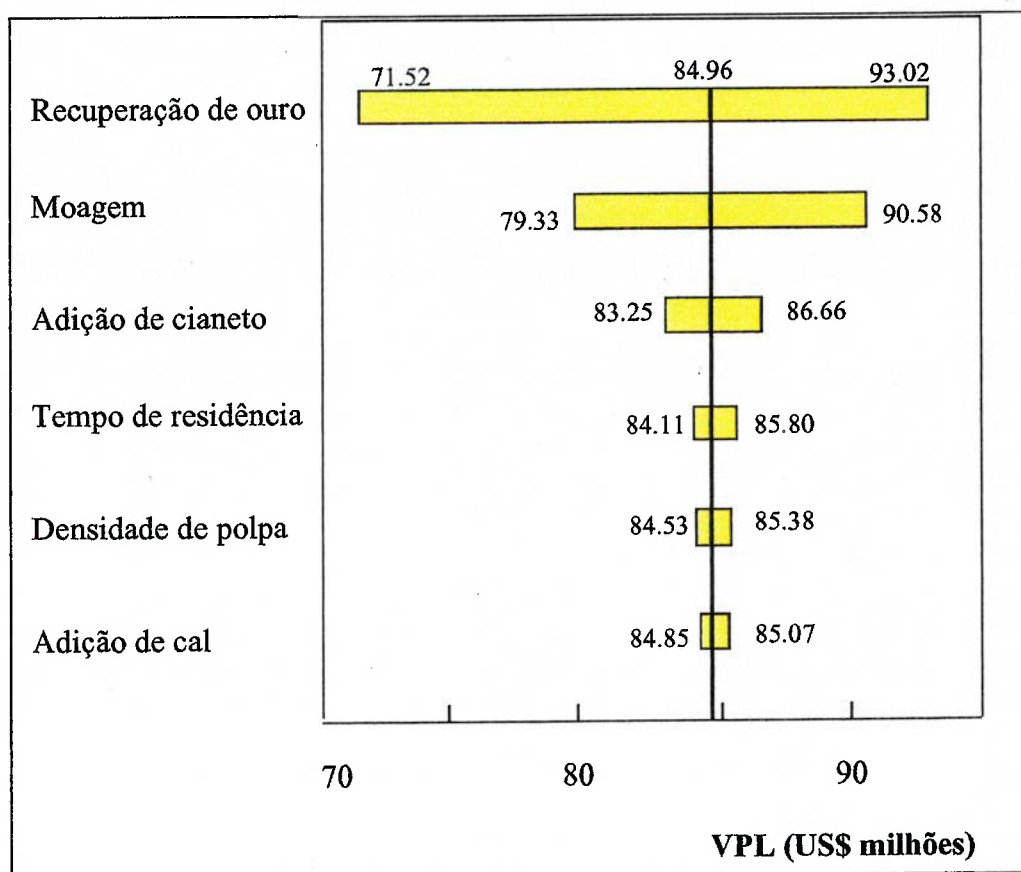


Figura 6.1 – Diagrama de sensibilidade da economia da cianetação em relação aos parâmetros de processo (diagrama de tornado).

A análise deste diagrama mostra que, de longe, a recuperação de ouro é a variável que mais impacta a economia de processos de cianetação em tanques agitados. Desta maneira, torna-se imprescindível otimizar o processo quanto à recuperação de ouro e, principalmente, avaliar com cuidado a variabilidade de recuperação de ouro da jazida em relação ao processo do caso base. Geralmente a variabilidade da jazida é a principal fonte de variação da recuperação de ouro.

A moagem é outro parâmetro de grande impacto, seja em função da granulometria de moagem, seja em função de variações do "*work index*" do minério. Em geral, o impacto econômico de variações na granulometria de moagem é contrabalançado pelo impacto econômico das variações de recuperação de ouro dele advindas. Ou seja, se for necessária uma moagem mais fina são necessários investimento e custo operacional maiores. Entretanto, em geral, a recuperação de ouro é mais elevada. Em consequência, ocorre um acréscimo de receita que se opõe aos custos e atenua o efeito total sobre a economia do processo. Este efeito será tratado detalhadamente no item 6.5. As variações de "*work index*" também devem ser cuidadosamente avaliadas na exploração geológica / desenvolvimento do processo.

A adição de cianeto merece uma atenção cuidadosa dado o seu impacto sobre a economia do projeto. Já os tempos de residência e consumo de cal possuem um impacto direto pequeno sobre a economia da cianetação. Entretanto, é importante salientar que os seus impactos indiretos em relação à extração de ouro podem ser grandes, razão pela qual uma certa segurança no tempo de residência é quase sempre um seguro barato para o desenvolvimento do processo. A densidade de polpa, além de ter uma influência direta pequena sobre a economia da cianetação, também possui uma influência indireta pequena sobre a extração de ouro.

6.3 Análise do impacto dos objetivos, estratégias e critérios empresariais sobre o desenvolvimento de processo

Os objetivos de uma empresa de mineração, de um modo geral, incluem o lucro, o crescimento e a sobrevivência. Estes objetivos normalmente são desdobrados em metas, que influenciam diretamente o desenvolvimento de um projeto mineral. As estratégias são então formuladas para estabelecer como estes objetivos e metas serão perseguidos.

Existe uma grande variação de objetivos e metas de empresa a empresa. É praticamente impossível buscar uma estratégia de desenvolvimento de processo que

atenda a todos os casos. Entretanto, o conhecimento e análise das metas e estratégias mais comuns é útil para o planejamento dos estudos de desenvolvimento de processo.

Uma classe de meta frequentemente utilizada refere-se ao porte do projeto e à capacidade de produção. Por exemplo, bloquear uma quantidade mínima de reserva, desenvolver projetos para uma dada produção mínima de ouro, crescer anualmente a produção de ouro a uma certa taxa. Este tipo de meta afeta mais diretamente as atividades de exploração geológica ou de avaliação de oportunidades para compra de jazidas ou associações, dependendo da estratégia adotada pela companhia. Do ponto de vista de processo é válido afirmar que maiores capacidades de produção suportam e demandam uma maior quantidade de ensaios tecnológicos. Projetos de maior capacidade também favorecem processos mais intensivos em capital. Por exemplo, o limite do teor de ouro para aplicação do processo de cianetação em tanques agitados, em relação à lixiviação em pilhas diminui.

As metas que consideram custos, capital e rentabilidade, principalmente quando acopladas ao porte mínimo de instalação, já influenciam mais diretamente a formulação da estratégia de desenvolvimento de processo. Esta classe de meta pode conter:

- uma rentabilidade mínima desejada (valor presente líquido ou relação entre o valor presente líquido do projeto e o valor presente do investimento ou taxa interna de retorno);
- uma restrição de custo operacional;
- uma restrição de capital disponível.

Estas metas econômicas ajudam a responder uma das primeiras questões que surgem ao se iniciar um projeto de exploração mineral. Qual é o tamanho e teor mínimo necessário para que um depósito seja de interesse da empresa? A resposta pode ser obtida por meio de um trabalho para estabelecer os alvos mínimos aceitáveis para exploração. Ou seja, de posse da capacidade de produção e rentabilidade mínimos admitidos pela companhia, são calculados diversos teores em função da reserva para se atingir a rentabilidade mínima admitida, considerando-se outros fatores como preço do ouro, características da jazida (morfologia, profundidade, etc.), método de lavra, rota e

parâmetros de processo, efeito da localização do depósito. Este é um exercício típico para ser realizado em equipe multidisciplinar, resultando em curvas de teores mínimos admissíveis x reservas para cada conjunto de condições. Estas curvas, além do balizamento das atividades de exploração geológica, são de grande contribuição para a elaboração da estratégia de ensaios para o desenvolvimento do processo. Elas permitem definir os diagramas lógicos de decisão entre rotas de processo, buscando-se a melhor combinação de teor de corte entre processos em relação à capacidade e reserva. Tal prática, permite que toda a equipe trabalhe em sintonia, com os mesmos objetivos e critérios de decisão.

Conforme mencionado antes, o preço do ouro precisa ficar bem estabelecido e claro para toda a equipe de desenvolvimento do projeto. De preferência, os valores a serem utilizados nos processos decisórios dos projetos devem ser estabelecidos nos planos de negócio das empresas de mineração.

Uma restrição de capital disponível pode levar à decisão de se estudar e implantar uma rota de processo de menor rentabilidade para um dado caso. Neste enfoque, o processo de lixiviação em pilhas pode ser a rota escolhida em casos em que a cianetação em tanques seja mais rentável. Ou mesmo, pode ocorrer a seleção de cianetação em tanques em casos de minérios moderadamente refratários para os quais os processos de oxidação / cianetação apresentariam maior rentabilidade, mas às custas de um investimento elevado.

Critérios de nível aceitável de riscos também influenciam a definição dos estudos para o desenvolvimento de processo. Maior aceitação de riscos favorece o estudo de processos ou melhorias ainda não consolidadas na indústria, como por exemplo o uso de prensa de rolos de alta pressão para criar micro-fissuras nas partículas e, assim, favorecer o acesso da solução de cianeto ao ouro, no sentido de aumentar a recuperação do metal. Menor aceitação do nível de risco já direciona o desenvolvimento do processo às rotas mais tradicionais possíveis.

As estratégias das empresas para perseguir os seus objetivos também podem influenciar o desenvolvimento de processo. Por exemplo, estratégias de exploração, de aquisição e de venda de ativos minerais podem levar a abordagens diferentes. No caso de exploração e, principalmente, de aquisição, é natural dedicar um maior esforço ao levantamento de problemas críticos que podem impedir um depósito em se transformar em uma mina, do que no caso de desenvolvimento de reservas para venda. No caso de aquisições, deve-se avaliar cuidadosamente a probabilidade de melhorar os resultados apresentados pelo vendedor, o que pode agregar um valor substancial ao projeto. No caso de desenvolvimento de reservas para venda (caso comum nas companhias juniores), devem-se enfatizar mais os ensaios para definir os parâmetros de processo, demonstrar os pontos fortes do minério, ou equacionar os problemas que dificultem a comercialização da área.

Outros tipos de estratégia que influenciam o desenvolvimento de processo são os que buscam desenvolver vantagens competitivas por meio de maior conhecimento da tecnologia do processo (maior eficácia) e de similaridade de operações / estratégias de desenvolvimento (maior eficiência). Similaridade de operações / estratégias de desenvolvimento podem levar uma empresa a preferir determinado tipo de processo e configuração de usina, ou mesmo a se especializar em certas oportunidades, como por exemplo, aproveitar reservas de pequeno porte por meio de instalações modulares relocáveis. Este tipo de estratégia e instalação pode demandar a realização de ensaios com adição de oxigênio para acelerar a cinética de dissolução do ouro e minimizar o volume dos tanques.

6.4 Estabelecimento de dados de referência para "*benchmarking*" no desenvolvimento de processo

Os dados de referência foram estabelecidos em caráter sucinto, considerando-se o mínimo necessário de informações a respeito dos parâmetros de processo para respaldar a análise crítica desta tese. Na prática, um banco de dados de "*benchmarking*"

deve ser bem mais abrangente, incorporando informações de outras disciplinas, como materiais construtivos, instrumentação e controle, custos, além de outros.

O conceito de “*benchmarking*” aqui utilizado não é conhecer para perseguir ou superar o melhor resultado ou a melhor prática industrial de instalações similares. Trata-se, sim, de conhecer a faixa de variação dos parâmetros de processo na indústria, suas causas e valores mais frequentes. Cada minério é único e os parâmetros de processo dependerão basicamente das características de cada minério, e não do esforço de perseguir os parâmetros determinados para outro minério. Contudo, o conhecimento da posição competitiva de um processo desde as fases iniciais do desenvolvimento, por meio do balizamento dos parâmetros de processo, possibilita aprimorar o planejamento dos ensaios. Pode-se, assim, concentrar os esforços para estudar os parâmetros mais relevantes, o que contribui bastante para o sucesso dos projetos.

6.4.1 Teor de ouro

Os teores de ouro para cianetação em tanques agitados de minérios de fácil processamento variam usualmente na faixa de 1 g/t a 10 g/t. Os teores mais comuns ocorrem em torno de 5 g/t. Minérios de teores muito baixos geralmente são concentrados por flotação antes de serem cianetados em tanques, como por exemplo na Rio Paracatu, Brasil (0,6 g/t), ou na Ergo, África do Sul (processa rejeitos antigos com 0,3 g/t). Teores muito elevados são pouco frequentes e muitas vezes característicos de jazidas pequenas. Por exemplo, a Usina de Ouro de Itabira, da CVRD, operou na sua fase inicial com um minério com teor superior a 40 g/t^{85, 87}.

6.4.2 Capacidade das instalações

A capacidade das instalações varia amplamente, existindo valores desde 150 t/dia até 60 mil t/dia. A média ponderada da capacidade das instalações para produção de ouro no mundo está por volta de 6.000 t/dia. No Brasil, esta média é da ordem de 3.600 t/dia. Estas médias são bastante afetadas pela capacidade das instalações que operam com minérios de baixo teor, geralmente com pré-concentração por flotação,

como por exemplo em Ergo na África do Sul (60 mil t/dia) e Rio Paracatu no Brasil (55 mil t/dia) ⁸⁷.

6.4.3 Recuperação de ouro

A recuperação de ouro por cianetação em tanques agitados varia de 80% a 98%. A faixa inferior normalmente está associada a minérios moderadamente refratários, que não compensam um tratamento mais agressivo para recuperar o ouro. A faixa superior refere-se a minérios com ouro livre, geralmente oxidados ou pouco sulfetados. A faixa de recuperação mais usual é de 90 a 95% ⁸⁵.

6.4.4 Concentração de cianeto livre

A concentração de cianeto livre pode ser tão baixa quanto 140 mg/l (Western Deep Level, África do Sul) até valores da ordem de 5.000 mg/l para lixiviação de minérios ustulados. Para minérios de fácil processamento, esta concentração geralmente fica em torno de 300 mg/l. A lixiviação de concentrados pode requerer elevadas concentrações de cianeto livre, como por exemplo 3.500 mg/l ⁸⁵.

6.4.5 Consumo de cianeto

O consumo de cianeto é bastante variável. A literatura cita consumos tão baixos como 200 g/t para minérios de fácil processamento (Western Deep Level) até valores da ordem de 6 kg/t para minérios ustulados. Um consumo típico para minérios de fácil processamento é da ordem de 500 g/t. O consumo aumenta bastante para minérios portadores de alguma complexidade, como cobre solúvel. Em El Indio, Chile, o consumo de cianeto chegou a 5,4 kg/t ⁸⁵.

6.4.6 pH

O pH mais comum na cianetação em tanques agitados fica na faixa de 10 a 11. Entretanto, existem operações com baixo pH, como por exemplo 8,5 a 9,0 na Austrália, principalmente devido ao efeito de tamponamento das águas com elevadas concentrações de magnésio. Valores mais elevados também ocorrem, como por exemplo 12,5 obtido com cal, em Lac Short, Quebec ⁸⁵.

6.4.7 Consumo de cal

A literatura registra consumos desde tão baixos quanto 0,13 kg/t até da ordem de 5 kg/t quando o minério apresenta componentes ácidos ou a água possui efeito de tamponamento, como na Austrália ⁸⁵.

6.4.8 Tempo de residência

Os tempos de residência típicos para cianetação em tanques agitados variam de 12 a 24 horas, sendo que valores próximos a este limite superior são mais comuns. Operações com tempo de residência inferior a 12 horas são raras. Já tempos de residências superiores a 24 horas são mais comuns, principalmente na África do Sul onde o uso consagrado de apenas um estágio de moagem SAG para fazer a cominuição necessária à cianetação dificulta o uso de concentração gravítica. Em decorrência, para evitar perda de ouro adotam-se tempos de residência elevados, como 48 h em Vaal Reefs. Quando o minério contém muita prata, os tempos de residência geralmente são também mais elevados, como 48 horas em Silver Peak, Canadá ⁸⁷.

6.4.9 Concentração de sólidos

A faixa de concentração de sólidos mais comum para a cianetação em tanques agitados vai de 40 a 52%, peso / peso. O valor típico é de 50% de sólidos. As

concentrações mais altas encontradas na literatura estão por volta de 60%, como por exemplo em Dornkop, África do Sul. Concentrações na faixa de 40 a 45% de sólidos são frequentemente utilizadas para minérios que resultam em polpas de viscosidade alta, como os minérios da região de Carlin, Nevada. Concentrações de polpas inferiores a 40% de sólidos são pouco comuns e geralmente empregadas em projetos pequenos para economizar o espessador antes da cianetação ⁸⁷.

6.4.10 Número de tanques / volume dos tanques

O número mais frequente de tanques de cianetação está na faixa de 4 a 6. Instalações com menos de 4 tanques são raras. Na África do Sul é comum o uso de um maior número de tanques, porque muitas vezes os maiores agitadores disponíveis no mercado são insuficientes para atender a capacidade das instalações com pequeno número de tanques. Por exemplo, em Vaal Reefs são usados 10 tanques de 2.000 m³ de capacidade ⁸⁷. Thomas et al.¹¹⁸ demonstraram que para minérios de ouro convencionais o número ótimo de tanques é 4, contanto que se providencie um pequeno tempo de residência adicional para compensar o pequeno curto circuito de polpa. Um número maior de tanques pode ser necessário em projetos de grande capacidade para evitar o uso de equipamentos de tamanho ainda não comprovados na indústria.

6.4.11 Potência de agitação

A potência requerida para agitação depende de uma série de fatores, como distribuição granulométrica do minério, concentração de sólidos, necessidades específicas do processo (pré-aeração usualmente requer maior potência de agitação do que a cianetação). Valores típicos de 0,08 kW/m³ são encontrados em Nevada e 0,04 kW/m³ na África do Sul ⁸⁷.

6.5 "Feed-back" de projetos: análise do impacto dos parâmetros e variáveis de processo sobre a extração de ouro / economia dos projetos

O "feed-back" de projetos em que o Autor trabalhou foi estruturado quanto ao impacto dos parâmetros de processo sobre a extração do ouro / economia do processo. Os parâmetros de processo destes projetos foram analisados individualmente em função da extração de ouro.

6.5.1 Granulometria de moagem

A granulometria de moagem é muito importante para a economia de projetos de lixiviação de ouro e tem merecido atenção especial no desenvolvimento de processos correlatos da CVRD. Neles, a granulometria ótima de moagem geralmente é determinada através da metodologia tradicional. Ou seja, são realizados ensaios de cianetação em diversas granulometrias de moagem. Os dados obtidos são então submetidos a estudos econômicos, visando-se selecionar a granulometria que agregue maior valor ao projeto ¹³². Entretanto, ao longo da vida do empreendimento, podem ocorrer variações nas características dos minérios (teor, extração de ouro, W_i de moagem), preço dos insumos e, principalmente, preço do ouro, que podem alterar a granulometria ótima de moagem. O engenheiro de processo deve estar atento a tais variações, no sentido de ajustar a granulometria de moagem sempre que necessário e, assim, maximizar a extração de valor do negócio.

Visando-se discutir o efeito da granulometria de moagem sobre a economia de projetos de cianetação, serão apresentados alguns dados práticos. A figura 6.2 mostra o gráfico com as curvas de extração de ouro na cianetação em função da granulometria de moagem para duas amostras do minério primário de Fazenda Brasileiro colhidas em épocas diferentes. No domínio do estudo, ambas as amostras apresentaram a mesma tendência de aumento de extração de ouro com o afinamento da moagem. Entretanto, em uma das amostras, ocorreu um razoável aumento de extração entre as granulometrias de 70% e 80% passante em 75 μm (cerca de 3%). Na outra, este aumento foi de apenas 0,5%.

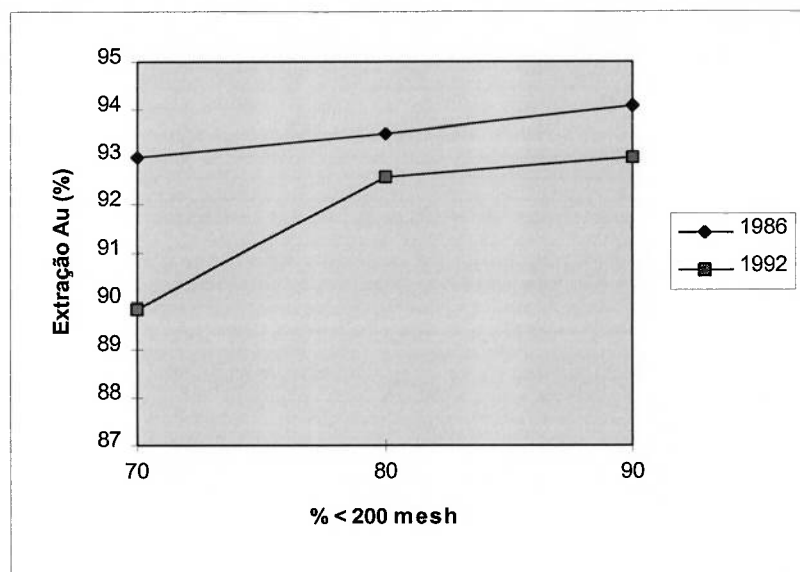


Figura 6.2 Extração de ouro em função da granulometria de moagem de duas amostras de Fazenda Brasileiro ^{132, 142, 143}

Na figura 6.3 apresenta-se a comparação da influência da granulometria de moagem de um minério sulfetado compacto (Almas) com o de um minério oxidado pulverulento (Serra Leste). O minério sulfetado compacto apresenta uma queda acentuada de extração de ouro para granulometrias mais grossas do que 70% abaixo de 75 μm . Já para o minério oxidado pulverulento, boas extrações de ouro podem ser obtidas até com granulometrias de britagem de -6mm. Tal diferença de comportamento pode ser explicada pelas diferenças de textura e granulometria natural do minério. Além da amostra de Serra Leste ter uma granulometria natural pulverulenta (45% < 75 μm), o elevado grau de oxidação do minério conferiu alta porosidade às partículas mais grossas.

Estes exemplos ilustram como as recuperações de ouro podem variar em função da granulometria de moagem. As recuperações incrementais mínimas para compensar uma moagem mais fina foram calculadas pelo método adaptado pelo Autor (item 5.6.2). Os resultados obtidos estão resumidos nos gráficos das figuras 6.4 a 6.7. As planilhas completas estão no Anexo B.

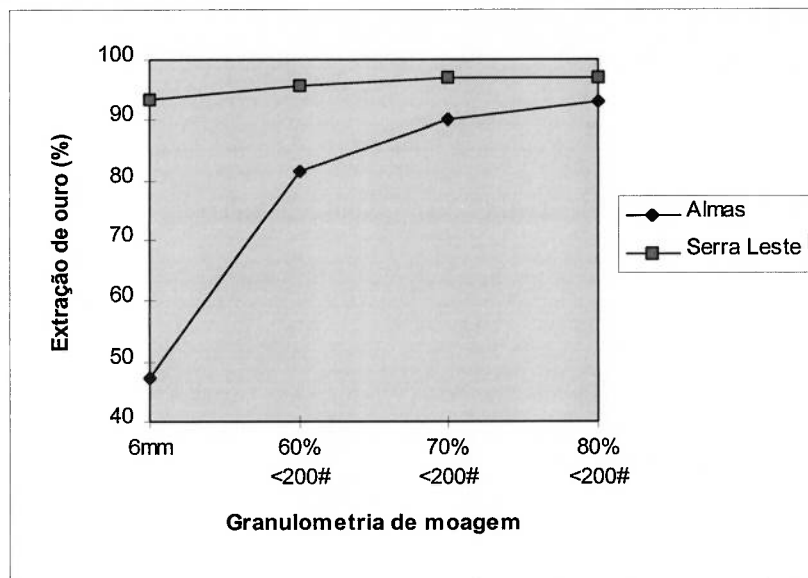


Figura 6.3 Influência da granulometria de moagem sobre a extração de ouro de um minério sulfetado compacto (Almas) e de um minério oxidado pulverulento (Serra Leste) ^{47, 48}.

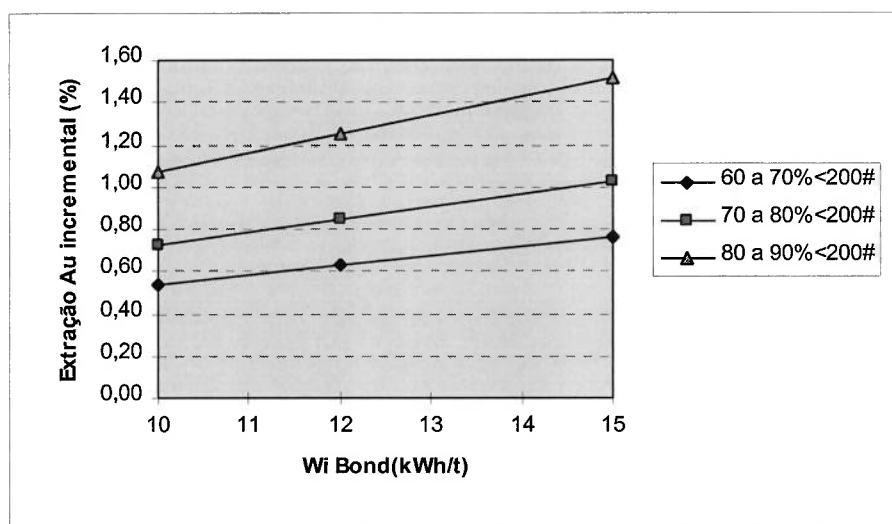


Figura 6.4 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar moagem mais fina.
Teor de ouro de 3 g/t a US\$ 8.84 / g

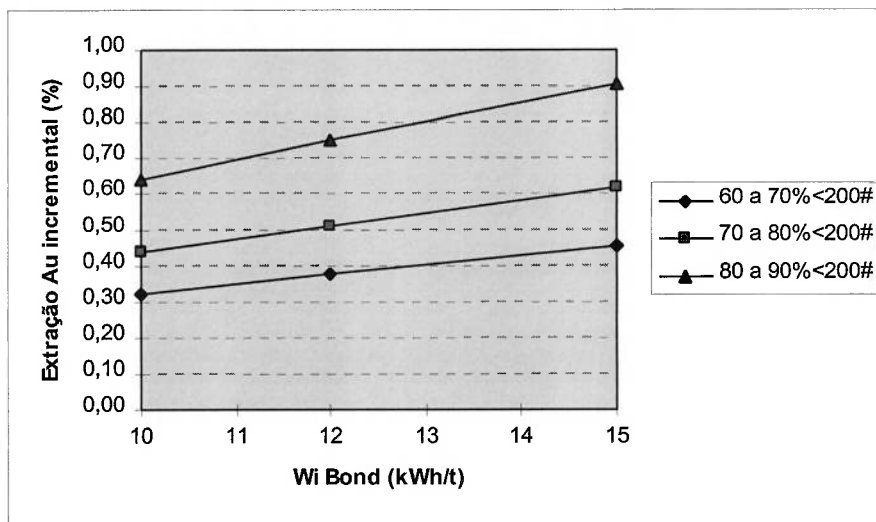


Figura 6.5 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar moagem mais fina
- Teor de ouro de 5 g/t a US\$ 8.84 /g

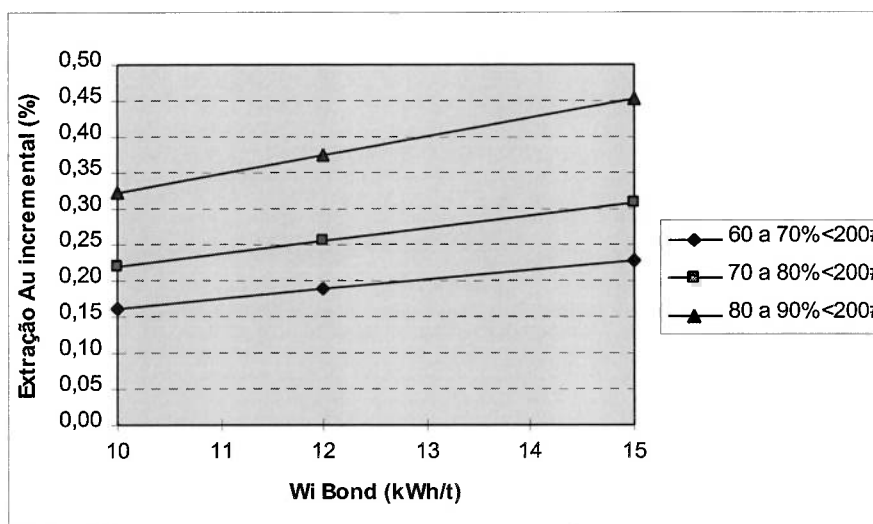


Figura 6.6 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar moagem mais fina
- Teor de ouro de 10 g/t a US\$ 8.84 /g

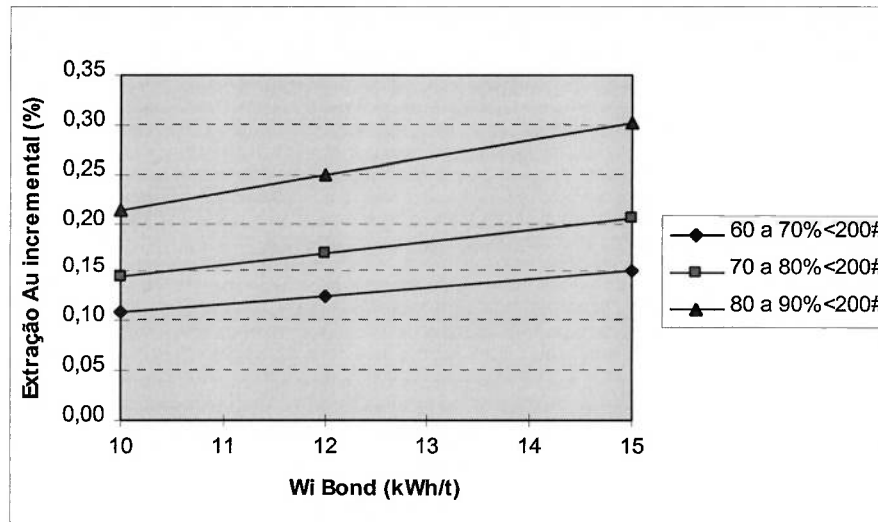


Figura 6.7 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar moagem mais fina
- Teor de ouro de 15 g/t a US\$ 8.84 /g

Todos os gráficos foram elaborados considerando-se uma vida útil de 10 anos e taxa interna de retorno de 12%. Estes gráficos demonstram as seguintes tendências:

- minérios mais ricos compensam moagens mais finas;
- quanto mais fina for a moagem, maior será o incremento de recuperação de ouro necessário para compensá-la;
- quanto maior for o “*work index*” de Bond, maior será o incremento de recuperação de ouro para justificar uma moagem mais fina.

O acréscimo mínimo de recuperação de ouro para justificar passar de uma moagem de 60% para 70% < 75 μm é muito baixo. Na faixa de domínio estudada, varia de 0,5 a 0,8% para minérios com teor de ouro de 3 g/t chegando à faixa de 0,1 a 0,2% para minérios com 15 g Au/t. Nos casos reais, tais acréscimos mínimos são obtidos para a quase totalidade dos minérios. Por exemplo, examinando-se a figura 6.3, observam-se extrações adicionais de ouro de 8,7% para o minério sulfetado de Almas e de 1,4% para o minério oxidado de Serra Leste, muito além dos valores necessários. O Autor tem observado serem raros os casos de usinas modernas e bem projetadas que adotam uma moagem a 60% < 75 μm .

Para se passar de 70 para 80% < 75 μm são necessários acréscimos mínimos de recuperação algo mais elevados: 0,7 a 1,0% para minérios com teor de ouro de 3 g/t até 0,2% para minérios mais ricos, com 15 g Au/t. Aqui já começa a ocorrer a distribuição de casos. Geralmente minérios oxidados não justificam passar de 70 para 80% < 75 μm . O caso apresentado de Serra Leste (figura 6.3) não propiciou um acréscimo de extração e a melhor granulometria de moagem é claramente 70% < 75 μm , mesmo em se tratando de minério de alto teor. Já no caso de minérios sulfetados (figura 6.2), os acréscimos de extração de ouro obtidos foram de 3% para Almas e de 0,5% a 3,0% para Fazenda Brasileiro. Ou seja, na maioria dos casos de minérios sulfetados, compensa fazer a moagem a 80% < 75 μm . Justifica-se, assim, a tendência observada na granulometria de moagem industrial de minérios sulfetados.

A passagem da granulometria de moagem de 80 para 90% < 75 μm requer acréscimos de extração de ouro nem sempre obtidos nos casos usuais: 1,1 a 1,5% para minérios com 3 g Au/t e 0,2 a 0,3% para casos de teores de 15 g Au/t. Os incrementos de extração mostrados nas figuras 6.2 e 6.3 são inferiores aos valores mínimos necessários. Mesmos os minérios sulfetados, que apresentaram incrementos de até 0,5% de extração, não justificaram o emprego de uma moagem a 90% < 75 μm . Na prática industrial, são poucos os casos de minérios que são moídos tão finos.

6.5.2 Tempo de residência

O tempo de residência necessário para estabilizar a extração de ouro para uma dada granulometria de moagem pode variar amplamente de minério para minério, ou mesmo ao longo da vida de uma mina, conforme mostrado na figura 6.8. Esta figura inclui curvas cinéticas típicas de minérios de Fazenda Brasileiro estudados entre 1986 e 1995.

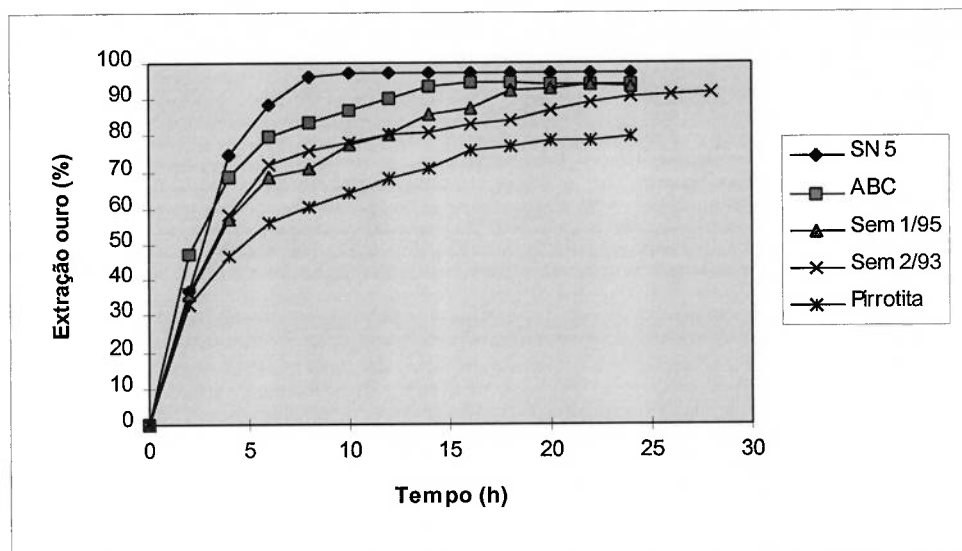


Figura 6.8 Curvas cinéticas de cianetação de amostras de Fazenda Brasileiro ^{144, 145, 146,}

147

Pode ser observado que algumas amostras apresentavam uma cinética de extração de ouro muito rápida. A amostra do Subnível 5 (curva SN5), por exemplo, atingiu o patamar de extração em apenas 10 horas. Outras, como a amostra composta ABC - Segunda Remessa (curva ABC - 1,60% S), teve a extração de ouro estabilizada em 16 horas. A amostra do primeiro semestre de 1995 (curva Sem 1/95, 0,98% S) teve um comportamento típico da maioria das amostras e atingiu o patamar de extração em 24 horas (tempo nominal de residência da cianetação de Fazenda Brasileiro). Amostras com maior teor de sulfetos apresentam um comportamento típico da amostra do segundo semestre de 1993 (curva Sem 2/93, 1,80% S). Nela, a extração de ouro foi crescendo lentamente e ainda se encontrava ascendente após 26 horas. Uma amostra localizada com 5% de pirrotita demonstra como a mineralogia pode prejudicar a extração de ouro (curva Pirrotita).

A tabela 6.4 mostra os tempos de estabilização da extração obtidos com diversas amostras, assim como os incrementos de extração das duas últimas horas antes da estabilização.

Tabela 6.4 Extração de ouro em função do tempo de residência para minérios de
Fazenda Brasileiro ^{142, 143, 144, 145, 146, 147, 148}

AMOSTRA	DATA	TEMPO (h)	EXTRAÇÃO OURO (%)	Acréscimo extração nas duas últimas horas (%)
Composta ABC	08/86	24	93,5	1,0
Composta ABC - 2º R.	05/88	16	94,1	1,0
Subnível 5	05/88	10	97,1	1,1
Subnível 7	01/89	16	94,7	2,3
Alta pirrotita	08/91	24*	79,8	1,3
Segundo sem. / 93	04/94	28*	91,8	0,6
Corpo C	03/95	24	93,8	ND
Corpo E	03/95	28*	90,8	1,1
Corpo G	03/95	26	91,3	1,4
Corpo D	03/95	8	89,2	5,9
Corpo EW	03/95	8	90,5	1,7
Primeiro sem. / 95	04/95	26	93,9	1,2
Nível 320	11/95	24*	91,3	1,5

Obs.: * Curva cinética ainda com nítida tendência de aumento de extração.

Apesar de algumas amostras terem apresentado uma estabilização de extração de ouro em períodos relativamente curtos (8 a 16 horas), a maioria delas necessitou do tempo final de 24 horas, utilizado nos ensaios, para atingir tal estabilização. Mesmo assim, após as 24 horas, umas poucas amostras ainda apresentaram uma curva cinética com nítida tendência de aumento de extração. Os poucos ensaios que ultrapassaram este tempo tiveram o objetivo de pesquisar a causa de picos de teor de ouro no rejeito na usina.

Analisando estes dados, pode-se afirmar que:

- Minérios com menor teor de sulfetos, ou provenientes das zonas mais superficiais da jazida, necessitaram de menores tempos de residência (amostras do subnível 5, subnível 7, corpo G, corpo EW);
- Minérios com maior teor de sulfetos, principalmente pirrotita e arsenopirita, necessitaram de maiores tempos de residência na lixiviação. Geralmente foram os causadores dos picos de teor de ouro no rejeito da usina industrial.

Assim, as variações no tempo de residência geralmente têm como causa primária as variações mineralógicas do minério. Tais variações ocorrem ao longo da vida de uma mina de ouro, razão pela qual os engenheiros de processo devem ficar atentos no desenvolvimento de um novo projeto.

Como diferentes tipos de minérios podem necessitar de diferentes tempos de residência para se alcançar a máxima extração de ouro, torna-se necessário estabelecer uma estratégia para definir o tempo de residência para o projeto industrial. O engenheiro de processo deve optar entre utilizar o tempo máximo obtido nos ensaios de laboratório, ou definir um valor que atenda à maioria dos minérios e aceitar perder um pouco de recuperação quando, eventualmente, processar um minério que requer um tempo de residência maior. Para se estabelecer tal estratégia, deve-se analisar a relação custo benefício e riscos assumidos ao se definir o tempo de residência.

Para compensar o prolongamento do tempo de residência além de um certo limite, deverá haver uma extração de ouro adicional que gere uma receita que, pelo menos, cubra os custos incorridos. Nas figuras 6.9 a 6.11 são apresentados os gráficos dos acréscimos mínimos de extração de ouro necessários para compensar um tempo adicional de lixiviação de 6 horas. No Anexo C podem ser vistas as planilhas completas.

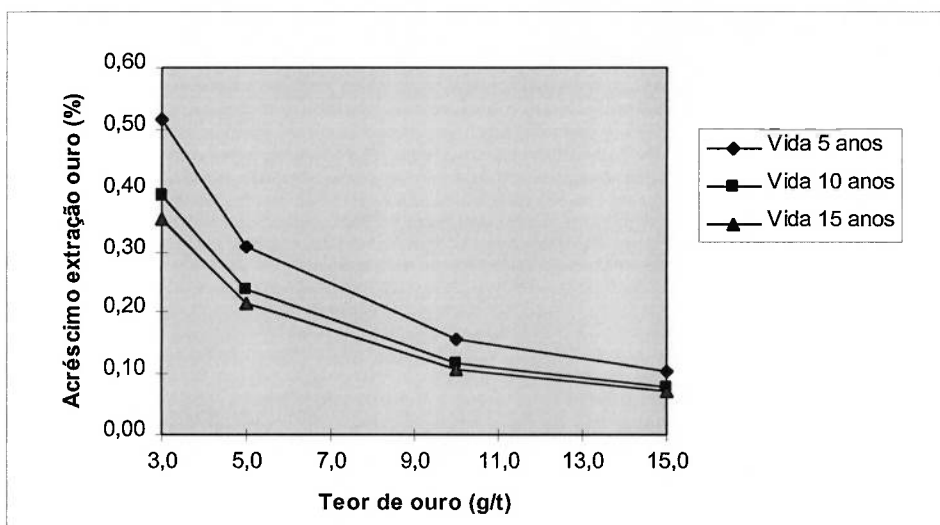


Figura 6.9 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar o aumento do tempo de residência - Usina 1 milhão t/ano - Preço do ouro de US\$ 8,84 /g

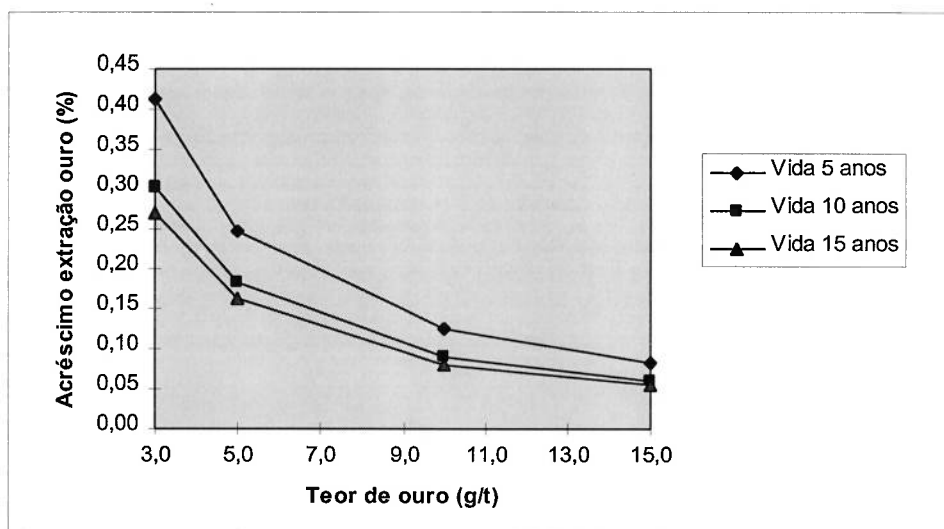


Figura 6.10 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar o aumento do tempo de residência - Usina de 1 milhão t/ano - Preço do ouro de US\$ 10,00/g

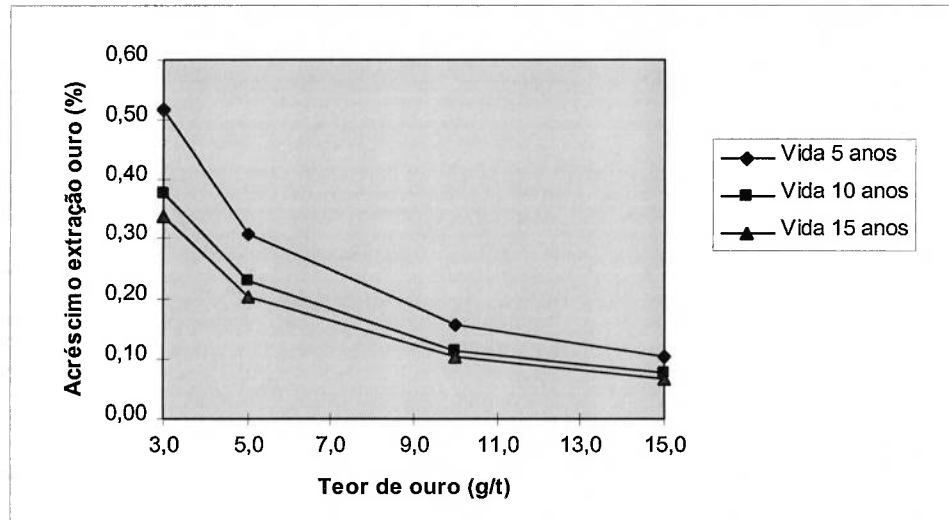


Figura 6.11 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar o aumento do tempo de residência - Usina de 1 milhão t/ano - Preço do ouro de US\$ 8,00/g

Conforme mostrado pelos gráficos, o incremento de extração necessário para compensar o tempo de lixiviação adicional apresenta as seguintes tendências:

- minérios mais ricos necessitam de incrementos de extração de ouro menores;
- quanto maior for a vida útil do empreendimento, menor será o incremento de extração de ouro necessário. A sensibilidade aumenta para vida útil menor do que 10 anos;
- os incrementos de extração tornam-se menores à medida que o preço do ouro aumenta.

De um modo geral, os acréscimos mínimos de extração de ouro para compensar tempos de residência maiores são baixos, quando comparados com o potencial de extração de ouro adicional (tabela 6.4) e riscos de se deparar, ao longo da vida da mina, com minérios que requeiram tempos de residência mais elevados. Por exemplo, para uma usina com capacidade de 1 milhão t/ano, teor de 5 g Au/t, preço do ouro de US\$ 8,84 /g e vida útil de 15 anos, são necessários apenas 0,2% de recuperação de ouro para compensar um acréscimo de um tanque com tempo de residência de 6 horas, ou 0,03% de recuperação adicional por hora de tancagem. Estes dados confirmam as recomendações de renomados autores de que economias no tempo de residência de

cianetação são perigosas. A rentabilidade do projeto pode sofrer muito mais com uma pequena perda de recuperação de ouro devido ao baixo tempo de residência do que com o custo extra de investimento e operação em tanques de maior volume ⁸⁵.

Diversas abordagens têm sido utilizadas para definir o tempo de residência de cianetação. Shoemaker* e Goode**, por ocasião do projeto para o aproveitamento do minério sulfetado de Fazenda Brasileiro, recomendaram utilizar diretamente o tempo máximo de residência obtido em ensaios cinéticos de laboratório. Ward***, por ocasião do projeto Igarapé Bahia, recomendou utilizar parte do tempo de residência do CIP para complementar o tempo de cianetação necessário. O Autor gosta da abordagem de Ward e a utiliza para definir os tempos de residência em projetos industriais. Johns ⁴⁷ determina o tempo de residência com recursos de modelamento e simulação. Aplica o modelo da curva de extração em batelada à distribuição dos tempos de residências em determinados números de tanques em série. Os tempos de residência, assim calculados para a cianetação, são ligeiramente superiores aos obtidos em ensaios em bateladas.

O Autor reconhece a utilidade de se empregarem métodos de simulação para definir o tempo de cianetação. Entretanto, considera que o emprego de modelamento e simulação não é essencial para os projetos industriais, uma vez que os erros devidos às variações do minério são muito maiores do que os erros devido ao modelo. Em decorrência, a experiência de um bom engenheiro de processo com minérios similares pode ser de mais utilidade do que a disponibilidade de um bom modelo para a simulação do tempo de residência.

6.5.3 Tempo de pré-aeração

Nos diversos projetos e estudos de que participou, o Autor pôde observar que a necessidade de pré-aeração aumenta em relação direta com a presença de sulfetos solúveis no minério, o que confirma as informações de literatura. No caso de minérios oxidados, ou a pré-aeração não era necessária, ou demandava um tempo pequeno,

* SHOEMAKER, R. S. Informação pessoal ao Autor (1986)

** GOODE, J. R. Informação pessoal ao Autor (1986)

geralmente o suficiente para estabilizar o pH em valor adequado à cianetação. Já no caso de minérios sulfetados, a necessidade de pré-aeração variava amplamente conforme o teor e o tipo de sulfetos. Entre extremos observados destacam-se o minério primário de Almas (pequena necessidade) e o minério típico de Fazenda Brasileiro (extremamente sensível à pré-aeração).

O efeito da pré-aeração sobre a cianetação do minério oxidado de Serra Leste é mostrado na tabela 6.5. Este minério possui um teor de enxofre desprezível (0,01%) e um tempo de pré-aeração de 1 hora melhora ligeiramente o resultado da cianetação. Entretanto, o aumento deste tempo para 3 horas não afeta significativamente a quantidade de ouro extraída. A tabela 6.6 mostra o efeito da pré-aeração sobre o minério primário de Almas, com baixo teor de pirita (1% de enxofre). Novamente, a necessidade de pré-aeração foi mínima e um tempo de 1 hora é suficiente.

Tabela 6.5 Efeito da pré-aeração sobre a cianetação do minério de Serra Leste ⁴⁸

Tempo de pré-aeração (h)	Adição de cianeto (g/t)	Consumo de cianeto (g/t)	Consumo de cal (g/t CaO eq.)	Extração ouro (%)
0	800	130	1,15	95,9
1	800	130	1,15	96,6
3	800	110	1,17	96,7

Obs: 70% < 75 µm, 24 h de cianetação, 0,01% de enxofre

O minério típico de Fazenda Brasileiro possui uma quantidade razoável de sulfetos solúveis, principalmente arsenopirita e pirrotita, que tornam o minério muito sensível à pré-aeração. Para uma adição constante de cianeto de sódio de 450 g/t, à medida que se aumenta o tempo de pré-aeração, diminui-se o consumo de cianeto e aumenta-se a extração de ouro (tabela 6.7). Assim, a prática de pré-aeração é necessária, efetiva e resulta em grande melhoria na economia do processo.

*** WARD, I. Informação ao Autor (1987)

Tabela 6.6 Efeito da pré-aeração sobre a cianetação do minério primário de Almas ⁴⁷

Tempo de pré-aeração (h)	Adição de cianeto (g/t)	Consumo de cianeto (g/t)	Consumo de cal (g/t CaO eq.)	Extração ouro (%)
0	600	140	0,75	91,7
1	600	100	0,73	92,9
3	600	110	0,74	91,0

Obs: 80% < 75 µm, 24 h de cianetação, 1% de enxofre.

Tabela 6.7 Efeito da pré-aeração sobre a cianetação do minério primário de Fazenda Brasileiro ¹⁴⁹

Tempo de pré-aeração (h)	Adição de cianeto (g/t)	Consumo de cianeto (g/t)	Consumo de cal (g/t CaO eq.)	Extração ouro (%)
0	450	388	0,5	89,5
2	450	245	0,7	91,6
4	450	225	0,8	92,1
8	450	219	0,8	92,9
12	450	195	0,9	94,1

Obs.: 80% < 75 µm, 24 h de cianetação.

Deve-se salientar que em Fazenda Brasileiro, também ocorrem minérios menos sulfetados e, portanto, menos sensíveis à pré-aeração ¹³³. Entretanto, tal prática é vital para a maior parte de suas reservas, conforme observado na operação industrial. Quando um dos dois tanques de pré-aeração está em manutenção, observa-se uma elevação do teor do rejeito*.

A importância da pré-aeração aumenta para minérios que possuem uma quantidade razoável de sulfetos mais reativos. Entretanto, tal prática também deve ser

* PARAENSE FILHO, O. G. Informação ao Autor (1994)

avaliada para minérios oxidados, mesmo que os tempos requeridos sejam pequenos e algumas vezes dispensáveis. Em projetos de maior porte e vida útil, muitas vezes adota-se uma solução conciliadora para fazer face ao pequeno tempo de pré-aeração. Usa-se um tanque agitador pulmão entre o espessamento e a cianetação. Além de garantir uma certa independência entre as áreas de cianetação e moagem/espessamento, neste tanque é adicionado leite de cal para estabilizar o pH e borbulhado ar para oxidar substâncias cianílicas e consumidoras de oxigênio. A Usina de Igarapé Bahia utiliza esta concepção com bons resultados.

6.5.4 Adição de cianeto

A concentração de cianeto influi sobre a extração do ouro e, em decorrência, tem um forte impacto sobre a economia do processo. O método clássico para determinar a adição ideal de cianeto consiste em fazer ensaios comparativos, geralmente em garrafas sobre mesa de rolos, com adição variada de cianeto, mantendo-se as demais condições constantes. Nas tabelas 6.8 a 6.10 são apresentados os estudos do efeito da adição de cianeto para os minérios de Serra Leste, Almas e Fazenda Brasileiro, respectivamente.

Tabela 6.8 Efeito da adição de cianeto sobre a cianetação do minério de Serra Leste ⁴⁸

Adição de cianeto (g/t)	Consumo de cianeto (g/t)	Consumo de cal (kg/t)	Extração de ouro (%)
200	40	1,17	93,9
400	70	1,18	95,5
600	90	1,18	96,2
800	140	1,17	96,7
1000	160	1,18	96,7

Obs.: 70% < 75 µm, 50% sólidos, 1 h pré-aeração, 24 h lixiviação, pH=10,7

Tabela 6.9 Efeito da adição de cianeto sobre a cianetação do minério de Almas⁴⁷

Adição de cianeto (g/t)	Consumo de cianeto (g/t)	Consumo de cal (kg/t)	Extração de ouro (%)
100	30	0,73	58,1
200	30	0,72	84,9
300	50	0,73	89,8
600	80	0,71	92,7
800	150	0,72	92,3
1000	160	0,72	92,4

Obs.: 80% < 75 µm, 50% sólidos, 1 h pré-aeração, 24 h lixiviação, pH=11,3

Tabela 6.10 Efeito da adição de cianeto sobre a cianetação do minério de Fazenda Brasileiro¹⁵⁰

Adição de cianeto (g/t)	Consumo de cianeto (g/t)	Consumo de cal (kg/t)	Extração de ouro (%)
200	84	1,25	89,1
400	128	1,25	91,0
600	98	1,25	92,1
800	98	1,25	91,6
1000	161	1,25	92,1

Obs.: 80% < 75 µm, 50% sólidos, 16 h pré-aeração, 24 h lixiviação, pH=10,5

A extração de ouro do minério de Serra Leste aumenta com a adição de cianeto até o valor de 800 g/t. A partir daí, o uso adicional de cianeto não mais aumenta a extração de ouro e torna-se um custo desnecessário. O elevado teor de ouro do minério

de Serra Leste (13 g/t) garante um balanço positivo entre as diferenças dos incrementos de receita e de custo até a adição de cianeto de 800 g/t.

A extração de ouro do minério primário de Almas (6,7 g Au/t) é bastante sensível em relação à adição de cianeto. Ela cresce rapidamente com o aumento da dosagem de cianeto e vai se atenuando até se estabilizar a partir de 600 g/t. O balanço entre os incrementos de receita e custo são positivos até esta adição.

O minério de Fazenda Brasileiro também possui comportamento parecido. A extração de ouro é crescente até a adição de 600 g cianeto/t. O incremento de custo para cada acréscimo de adição de cianeto de 200 g/t é de US\$ 0,28/t (preço de cianeto de US\$1.40 /kg). Para cobrir este incremento são necessários pelo menos mais 1,2% de recuperação de ouro (baseado no teor de 2,6 g Au/t na amostra estudada e preço de ouro de US\$ 8.84 /g). Neste caso, compensa passar a adição de cianeto de 200 para 400 g/t (aumento de recuperação de ouro de 2,1%). Entretanto, a receita do incremento de ouro extraído ao se passar de 400 para 600 g cianeto/t não paga o acréscimo de custo do reagente. Assim, a adição ideal de cianeto para a amostra estudada é de 400 g/t.

Este parâmetro de processo requer um estudo cuidadoso, uma vez que adição de cianeto em falta resulta em perda de extração de ouro e adição em excesso resulta em custo desnecessário. Apesar de poder ser ajustada no dia a dia da operação industrial, a adição de cianeto deve ser cuidadosamente estudada por ocasião do desenvolvimento de processo para um novo minério, uma vez que ela influencia a recuperação do ouro. A dosagem ótima de cianeto pode variar com o tempo, com o tipo de minério, e é influenciada pelos preços do ouro e do cianeto. Ela deve ser frequentemente levantada ao longo da vida útil da mina, para que a adição de cianeto sempre esteja ajustada no ponto ótimo, maximizando, assim, o lucro operacional.

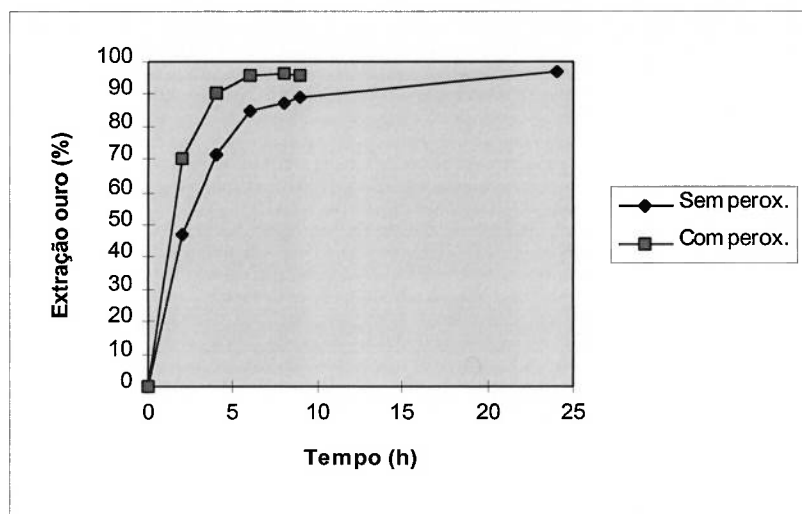
6.5.5 Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido em soluções de cianetação mereceu menor atenção no desenvolvimento dos projetos da CVRD. O Autor fez várias determinações de oxigênio

dissolvido em ensaios com o minério sulfetado de Fazenda Brasileiro com o objetivo de estudar o tempo de pré-aeração. Constatou que o minério apresentava alta demanda de oxigênio, que diminuía à medida que se aumentava o tempo de pré-aeração. Entretanto, a concentração de oxigênio dissolvido só atingia certo grau de estabilidade após ter sido adicionado cianeto à polpa de minério.

Em Fazenda Brasileiro, foram realizados ensaios industriais de cianetação assistida com peróxido de hidrogênio ¹⁵¹. A adição de 0,4 kg/t de H₂O₂ ao primeiro tanque de cianetação elevou o teor de oxigênio dissolvido da faixa de 6,6 a 7,7 mg/l para 12,5 a 14,8 mg/l. Em apenas 7 horas de lixiviação assistida (ou seja, apenas no primeiro tanque) foram recuperados 95 a 98% de todo o ouro extraído no circuito, o que possibilitaria reduzir consideravelmente o tempo de residência da cianetação. Contudo, não foram atingidos os níveis de recuperação de ouro dos ensaios de lixiviação assistida em laboratório (95%). Tampouco elevou-se a extração global de ouro, que variou entre 92 e 94%, mesma faixa obtida sem a adição de peróxido de hidrogênio. Durante a aplicação do peróxido não foram observadas variações significativas de consumo de cianeto. Os ensaios industriais de lixiviação assistida não comprovaram o aumento de extração de ouro necessário para compensar o acréscimo de custo e foram paralisados.

Em Itabira, com o aumento de capacidade da Usina de Ouro, o tempo de residência do circuito CIL foi reduzido para apenas 6 horas por não haver espaço para a instalação de mais tanques. Em consequência, passaram a ocorrer perdas consideráveis de ouro cianetável no rejeito. Estudou-se, então, a adição de peróxido de hidrogênio para elevar a concentração de oxigênio dissolvido e, assim, acelerar a extração de ouro. As curvas dos ensaios cinéticos de extração de ouro, sem e com adição de peróxido de hidrogênio, são mostradas na figura 6.12.



Obs.: Adição de cianeto de 300 g/t, pH de 10,5, 50% sólidos.

Figura 6.12 Curvas cinéticas de extração de ouro no minério de Itabira, sem e com adição de peróxido de hidrogênio ¹⁵²

Sem a adição de peróxido, a extração de ouro em 6 horas foi de 85%, e em 24 horas atingiu 97%. Já com elevação do teor de oxigênio dissolvido para 12 mg/l (adição de 400 g H₂O₂/t), a extração final foi atingida em apenas 6 horas, propiciando uma elevação de recuperação de 12%. Assim, a adição de peróxido na Usina de Itabira apresenta vantagens econômicas:

- Receita: 12% de recuperação @ 1,8 g Au/t @ US\$ 8.84/g = US\$ 1.91/t
- Custo: 0,4 kg/t @ US\$ 1.26/kg = US\$ 0.50/t
- Lucro operacional = US\$ 1.41/t.

Como o peróxido de hidrogênio é uma fonte de oxigênio de preço elevado, novos estudos foram realizados com o borbulhamento de oxigênio puro, que confirmou o benefício apresentado pelo peróxido. Em decorrência, passou-se a injetar, com sucesso, oxigênio nos tanques de cianetação de Itabira.

Os exemplos mostrados ilustram o efeito da elevação do oxigênio dissolvido na polpa sobre a cinética de extração de ouro. No caso de Fazenda Brasileiro, onde o investimento em tanques com tempo de residência suficiente para extrair o ouro cianetável já foi feito, o custo da adição de peróxido teria de ser compensado por um

aumento de recuperação de ouro. Ou seja, seria necessária uma recuperação adicional de, pelo menos, 0,06 g Au/t (cerca de 2% de aumento de recuperação), o que não foi verificado. No caso de Itabira, a existência da restrição de espaço para a instalação de tanques adicionais foi fator decisivo para tornar a adição de peróxido compensadora. Entretanto, o emprego de oxigênio poderia ter vantagens mesmo em relação ao custo de instalação e operação de tanques para completar o tempo de residência de 24 horas. Considerando-se um consumo de oxigênio de 0,30 Nm³/t ao preço de US\$ 0,40/Nm³ (valores bastante conservadores), o custo do reagente seria de US\$ 0,12/t, contra cerca de US\$ 0,45/t para instalação e operação dos tanques para acréscimo de 16 horas de tempo de residência (Anexo C - vida útil de 5 anos). No caso de projetos maiores, que compensem fabricar o oxigênio no local, o custo deste insumo pode cair para a faixa de US\$ 0,10/Nm³, o que pode tornar a adição de oxigênio competitiva mesmo para minérios sulfetados, de maior consumo. Além disto, existe a possibilidade de se aumentar ligeiramente a extração de ouro. Por tais razões, recomenda-se estudar o efeito da elevação da concentração de oxigênio dissolvido por ocasião do desenvolvimento de processo para um novo minério. Deve-se atentar para o fato de que a adição de oxigênio pode possibilitar o uso de instalações modulares reutilizáveis, o que pode viabilizar o aproveitamento de pequenas reservas de ouro.

6.5.6 pH

O desenvolvimento de processo para as usinas de cianetação da CVRD foi realizado utilizando-se um pH de 10,5, na faixa ótima citada pela literatura. Não foram realizados estudos do efeito da variação do pH sobre o desempenho da cianetação, a não ser nos casos dos desenvolvimentos de processo para os minérios de Almas e Serra Leste (tabelas 6.11 e 6.12).

A variação do pH em ambos os minérios teve pouco efeito sobre a extração do ouro. No caso de Almas, a adição de 0,76 kg/t de cal (pH de 11,3) deu o melhor resultado do ponto de vista de extração de ouro e consumo de cianeto. Já para o minério de Serra Leste, a operação em pH intermediário ao das duas primeiras adições, ou seja,

da ordem de 10,5, provavelmente será a melhor alternativa, de modo a garantir uma alta extração de ouro e baixo consumo de cianeto.

Tabela 6.11 Efeito do pH sobre a lixiviação do minério de Almas ⁴⁷

Adição cal kg/t CaO eq.	pH	Consumo cianeto kg/t NaCN	Extração de ouro %
0,61	10,5	0,18	92,4
0,76	11,2	0,10	92,9
1,06	11,6	0,09	92,6

Obs: Granulometria 80% < 75 µm, 50% sólidos, adição de 0,6 kg/t NaCN, 1 h pré-aeração, 24 h lixiviação

Tabela 6.12 Efeito do pH sobre a lixiviação do minério de Serra Leste ⁴⁸

Adição cal kg/t CaO eq.	pH	Consumo cianeto kg/t NaCN	Extração de ouro %
0,11	9,7	0,35	97,0
1,21	11,3	0,13	96,6
2,27	12,1	0,13	96,2

Obs: Granulometria 80% < 75 µm, 40% sólidos, adição de 0,8 kg/t NaCN, 1 h pré-aeração, 24 h lixiviação

De maneira semelhante, o efeito do pH sobre a extração de ouro dos outros minérios da CVRD deverá ser pequeno. Entretanto, trata-se apenas de uma hipótese formulada em função de dados industriais e de ensaios isolados, nos quais o pH variou ligeiramente em torno de 10,5 sem haver uma indicação de tendências nas extrações de ouro ou no consumo de cianeto.

Apesar de não ser um fator chave para definir a viabilidade de um projeto, e de poder ser ajustado ao longo da operação da usina, o Autor recomenda avaliar o efeito do pH pelo menos na etapa final de desenvolvimento do processo.

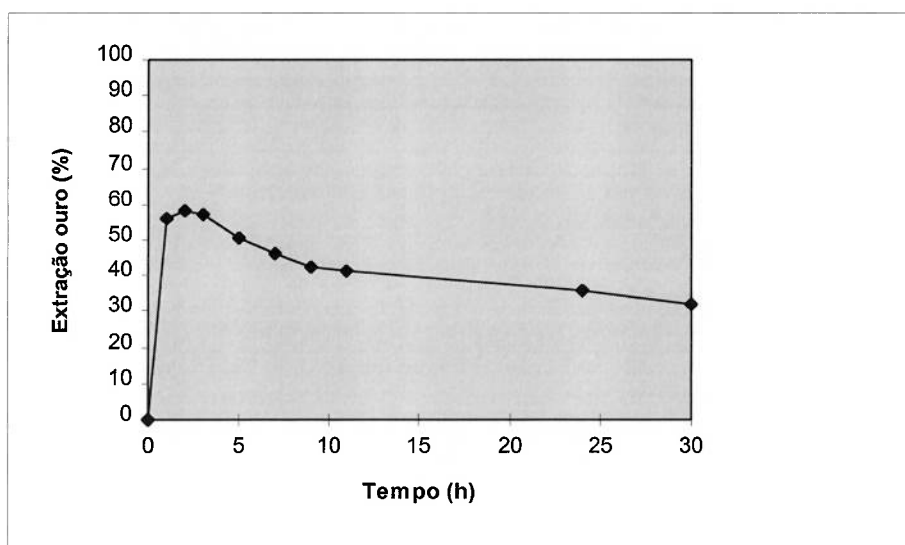
6.5.7 Adição da carvão ativado

Diversos casos práticos têm comprovado que, quando o minério contém substâncias ouro-adsorventes ("*preg-robbing*"), a adição de carvão ativado pode aumentar a extração de ouro na cianetação.

O caso mais típico estudado pelo Autor foi o da mineração de Fazenda Maria Preta. Superficialmente, até profundidades da ordem de 30 m, ocorria um minério oxidado "*free-milling*", que foi objeto de um projeto com lavra a céu aberto e beneficiamento por cianetação CIP. Desde a época da implantação deste projeto, era conhecida a existência de minérios carbonosos ouro-adsorventes abaixo da cava final prevista para a mina. A amostra de testemunhos de sondagem do Nível 200 constitui um dos exemplos de minérios carbonosos estudados por ocasião do projeto. Tal amostra, com 6,6 g Au/t e 2,33% de carbono amorfo, passou por uma série de estudos de caracterização tecnológica ¹⁵³. Inicialmente, uma concentração gravítica simulando a produção de um concentrado para fundição direta recuperou 24% de ouro em 0,6% da massa inicial de minério. Em seguida, o rejeito gravítico foi submetido a um ensaio de cianetação, cuja curva cinética de extração de ouro pode ser vista na figura 6.13.

A reincorporação do ouro ao minério por adsorção na matéria carbonosa causou uma queda acentuada de extração ao longo do tempo. Procurando-se contornar o problema, foram realizados ensaios CIL, adicionando-se 20 g/l de carvão ativado Norcarbon NCD-3 juntamente com cianeto. Na tabela 6.13 são mostrados os resultados destes ensaios.

O primeiro ensaio CIL, realizado com o rejeito gravítico, recuperou 83,8% do ouro em 16 horas, demonstrando que o carvão ativado compete favoravelmente com a matéria carbonosa pela adsorção do ouro e contorna parcialmente o problema. Os três ensaios seguintes, realizados com a amostra inicial, demonstraram que o tempo de 12 horas já era suficiente para atingir o patamar de extração de ouro do CIL.



Obs: Granulometria de 75% < 74 μm , 50% sólidos p/p, pH de 10,5, adição de 500 g/t e consumo de 225 g/t de NaCN, adição de 2,4 kg/t CaO equivalente.

Figura 6.13 Extração de ouro por cianetação do rejeito gravítico de uma amostra carbonosa do minério de ouro do nível 200 de Fazenda Maria Preta ¹⁵³

Tabela 6.13 - Ensaio CIL do rejeito gravítico e da amostra inicial do minério carbonoso do nível 200 de Fazenda Maria Preta ¹⁵³

Tempo (h)	Extração Au (%)	Adição NaCN (g/t)	Consumo NaCN (g/t)	Adição CaO equiv. (kg/t)	Observ.
16	83,8	500	270	1,35	rej. gravítico
12	74,9	500	361	1,50	minério inic.
16	73,7	500	300	1,50	minério inic.
20	74,5	500	333	1,50	minério inic.
16	74,7	800	430	1,50	minério inic.
3 + 13	61,7	800	383	1,50	minério inic.

Obs: Granulometria 75% < 74 μm , 50% sólidos p/p, pH de 10,5.

Demonstraram também que, quando o minério contém substâncias ouro-adsorventes, é importante recuperar o máximo possível de ouro por concentração gravítica antes do CIL (o processo combinado de concentração gravítica e CIL para a amostra do Nível 200 acenava com recuperações totais de 88% contra 75% do CIL direto). No último ensaio, o carvão ativado foi adicionado 3 horas após iniciada a

cianetação. Com esta prática, a recuperação de ouro foi inferior à dos ensaios anteriores, evidenciando a necessidade de se adicionar carvão ativado junto com o cianeto.

Enquanto alimentada com minério oxidado sem matéria carbonosa, a Usina CIP de Fazenda Maria Preta operou a contento, com recuperações de ouro da ordem de 95%. Entretanto, o aparecimento imprevisto de bolsões de minérios carbonosos, no final da vida da mina a céu aberto, causou uma acentuada queda na recuperação do metal. Os bolsões apareciam erratically e apresentavam uma grande variação de poder ouro-adsorvente. Houve casos de minérios em que a recuperação de ouro no carvão ativado ficou abaixo de 20%. Os estudos realizados em decorrência do problema resultaram nas seguintes providências ¹⁵⁴:

- Foi desenvolvida uma metodologia para caracterizar rapidamente os minérios a serem lavrados, no sentido de alimentar a usina somente com minérios sem ou com baixo poder ouro-adsorvente (minérios de atividade moderada). Os minérios de alta atividade contidos na cava da mina eram empilhados para um possível aproveitamento futuro.
- Modificou-se o circuito para CIL, com tempo de residência de 16 horas.

Com estas providências, a Usina passou a operar com recuperações de ouro entre 80 e 90%, comprovando os estudos realizados na época da implantação do projeto e assegurando uma sobrevida de quase dois anos para a mineração.

Em Fazenda Brasileiro, tem ocorrido a diluição do minério com rochas encaixantes contendo xisto grafitoso. No entanto, as propriedades ouro-adsorventes deste xisto grafitoso são bem mais moderadas do que a da matéria carbonosa do minério de Fazenda Maria Preta. Na figura 6.14 são mostrados estudos de cianetação de uma amostra de minério de Fazenda Brasileiro com diversas proporções de diluição com tais rochas encaixantes.

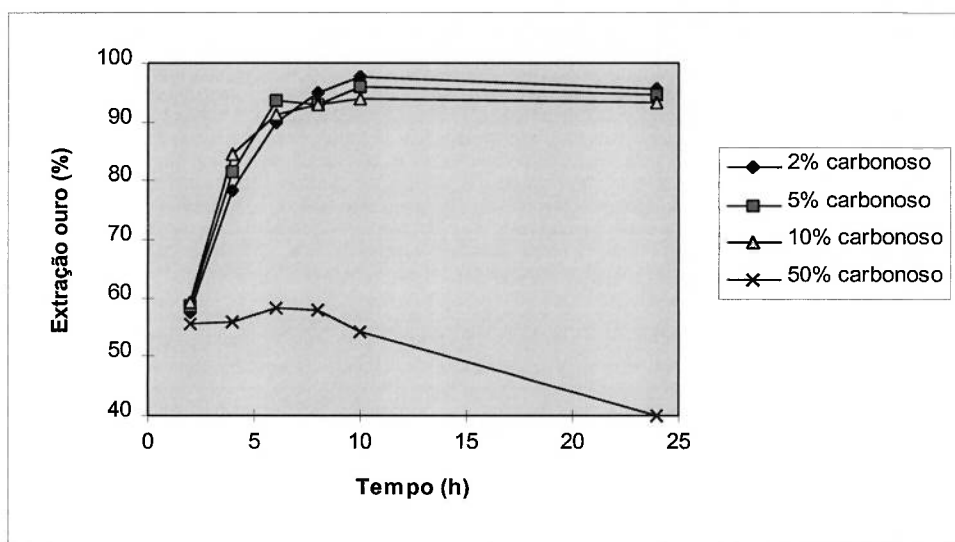


Figura 6.14 Cianetação do minério de Fazenda Brasileiro diluído com encaixantes contendo matéria carbonosa ^{145, 155}

À medida que se aumenta a proporção de diluição, a extração de ouro na cianetação vai caindo devido ao efeito ouro-adsorvente da rocha grafitosa. Com 2% de diluição, a extração de ouro foi de 95,7%, em 24 horas. Já para as diluições de 5% e 10%, as extrações de ouro em 24 horas caíram para 94,5% e 93,5%, respectivamente. Adicionaram-se, então, 20 g/l de carvão ativado à polpa final de cada um dos ensaios de lixiviação realizados com as amostras das três condições de diluição. Após 9 horas de contato com carvão ativado, para simular o processo CIP industrial, foram obtidas recuperações de ouro da ordem de 96% em todos os ensaios ¹⁴⁵. Tal resultado comprovou que a atividade da matéria carbonosa do minério de Fazenda Brasileiro era moderada e podia ser revertida pela ação do carvão ativado.

A figura 6.14 mostra também o efeito da adição de 50% de rocha carbonosa ao minério de ouro (tratam-se de amostras diferentes das discutidas no parágrafo anterior) ¹⁵⁵. Esta mistura já apresentou um efeito ouro-adsorvente bem mais pronunciado, embora a proporção de diluição possa ser considerada exagerada e não representar o que ocorre industrialmente.

Em Fazenda Brasileiro, a presença de matéria carbonosa na lixiviação pode ser constatada visualmente na forma de uma finíssima camada hidrofóbica sobre a superfície da polpa nos tanques. O perfil de extração de ouro demonstra a atividade moderada desta matéria carbonosa. A cianetação era realizada em 4 tanques, cada um com um tempo de residência nominal de 6 horas. No primeiro tanque, a extração de ouro sempre foi pronunciada (cerca de 66%). Mas na saída do último tanque de cianetação, ficava apenas na casa dos 80% (teor de minério na saída de 0,65 g Au/t), apesar de decorridas pouco mais de 24 horas de lixiviação. Entretanto, a extração voltava a crescer rapidamente quando a polpa passava pelos 6 tanques CIP em série (tempo de residência total no CIP de 9 horas). Ao final, atingia-se uma extração de ouro da ordem de 92% (teor do rejeito de 0,28 g/t)¹³³. Confirmava-se, assim, a extração prevista pelos ensaios em garrafão feitos na mesma época (primeiro semestre de 1994), muito embora realizados sem a diluição com rochas encaixantes grafitosas¹⁴⁶.

Este fato pode ser explicado pela ação do carvão ativado. Ou seja, o carvão ativado adsorve o ouro rapidamente, abaixando a sua concentração na solução. Com isto, desloca-se o equilíbrio do ouro adsorvido na matéria carbonosa, que volta para a solução, e daí para o carvão ativado (por ter uma atividade muito superior à da matéria carbonosa). Os ensaios de diagnóstico de lixiviação realizados com os rejeitos desta época mostravam que a quantidade de ouro associado com a matéria carbonosa era muito baixa (0,01 a 0,02 g/t), comprovando, assim, que a adição de carvão ativado revertia a adsorção do ouro na matéria carbonosa^{156, 157, 158, 159, 160, 161, 162}.

A reversibilidade do efeito ouro-adsorvente do minério lixiviado em Fazenda Brasileiro também foi comprovada industrialmente. No final de 1994, uma das linhas de cianetação foi modificada. Transformou-se o penúltimo tanque de cianetação para operar como CIL (o último tanque continuou operando como de cianetação). Com esta mudança, o teor de ouro do minério na saída da cianetação caiu de 0,65 g Au/t para 0,37 g Au/t. Entretanto, o teor de ouro no rejeito final continuou o mesmo de antes: 0,28 g/t. Tal modificação não resultou em aumento de recuperação¹³³.

O caso de Fazenda Brasileiro demonstra a importância de se estudar o efeito da diluição do minério com as rochas encaixantes por ocasião do desenvolvimento de um novo projeto. O critério de diluição e tipos de rochas encaixantes a serem avaliados devem ser consensados com os geólogos e engenheiros de lavra.

A ocorrência de minérios ouro-adsorventes é relativamente comum, o que demanda a necessidade de se verificar se um determinado minério possui tal propriedade no desenvolvimento de um processo. Esta verificação pode ser feita por meio de um simples estudo comparativo de cianetação x CIL, em garrafão sobre mesa de rolos. Na tabela 6.14 são mostrados tais estudos feitos com os minérios de Almas, Serra Leste e Fazenda Brasileiro.

Tabela 6.14 Efeito da adição de carvão ativado sobre a cianetação de minérios de ouro ^{47, 48, 163}

Concent. Carvão (g/l)	Almas		Serra Leste		Fazenda Brasileiro	
	Cons. Cianeto (kg/t)	Extração ouro (%)	Cons. cianeto (kg/t)	Extração Ouro (%)	Cons. Cianeto (kg/t)	Extração ouro (%)
0	0,05	87,4	0,11	97,0	0,32	93,0
5	0,06	87,3	-	-	-	-
20	0,12	85,6	0,33	97,2	0,60	92,9

A presença de matéria carbonosa não significa necessariamente que o minério seja ouro-adsorvente. O caso do minério de Serra Leste ilustra bem este fato. A amostra do ensaio apresentado na tabela 6.14 continha 4% de carbono orgânico, sem, entretanto, apresentar efeito ouro-adsorvente.

6.5.8 Concentração de sólidos

Trata-se de outro parâmetro pouco estudado durante os desenvolvimentos de processos para as usinas de cianetação da CVRD. Geralmente os ensaios eram feitos

com a concentração de sólidos típica da indústria do ouro (50% em peso). A não ser no caso do minério de Serra Leste onde, devido a problemas de alta viscosidade, a cianetação teve de ser feita com 40% de sólidos. Este parâmetro também não tem merecido considerações especiais de outros centros de pesquisa por ocasião do desenvolvimento de processo, como, por exemplo, o MINTEK. Existe um consenso de que as concentrações de sólidos na faixa de 45 a 50% de sólidos são as melhores, tanto para a cianetação, quanto para o CIP.

Dias Gomes ^{133, 164} verificou, na operação industrial de Fazenda Brasileiro, que existe uma tendência de aumento de teor de ouro no rejeito de 0,09 g/t em função da elevação da densidade de polpa de 1,51 para 1,57 t/m³ (51% para 55% sólidos p/p). Ou seja, apesar do aumento do tempo de residência devido à elevação da concentração de sólidos, a extração de ouro cai. As causas mais prováveis são a diminuição da taxa de transferência do oxigênio e cianeto para a superfície de reação (elevação da concentração de sólidos e viscosidade da polpa), bem como a elevação da concentração de íons interferentes na solução. Esta importante constatação alerta para a necessidade de operar a usina sem ultrapassar a concentração de 50% de sólidos na alimentação e estudar melhor o efeito da densidade de polpa sobre a cianetação do minério de Fazenda Brasileiro. Alerta também para a necessidade de se verificar o efeito da concentração de sólidos por ocasião do desenvolvimento de processo para um novo minério.

6.5.9 Efeito da concentração gravítica

A remoção de partículas grossas, por meio de concentração gravítica antes da cianetação, pode reduzir o tempo de residência na lixiviação ^{83, 90, 94, 110}. O Autor constatou esta diminuição num estudo realizado com o minério de Fazenda Brasileiro. O emprego de concentração gravítica reduziu o tempo de residência de 20 para 16 horas ¹⁴⁴. O fato da diferença não ter sido mais acentuada pode ser explicado pela granulometria fina do ouro e pela laminação ocorrida na moagem, permitindo que as partículas de ouro fossem completamente dissolvidas a partir da menor dimensão. Em casos semelhantes (minérios sulfetados com ouro fino e recuperação gravítica inferior a 40%), a definição do tempo de residência pode ser feita a partir de ensaios de cianetação

direta, caso se aceite um projeto com um fator de segurança razoável (o impacto na economia do projeto é mínimo). Entretanto, deve-se tomar cuidado com minérios com ouro grosso, como o itabirito aurífero do Cauê (recuperação gravítica de até 90%: ocorriam partículas de ouro com dimensões da ordem de milímetros, e até mesmo de centímetros). O desenvolvimento de processo de cianetação para este minério foi todo feito com amostras de rejeito de concentração gravítica, caso contrário seria estabelecido um tempo de lixiviação excessivo^{165, 166}.

O emprego de concentração gravítica também pode afetar a definição da adição ótima de cianeto. Com a diminuição do teor de alimentação da lixiviação, diminui-se também o incremento de receita do ouro adicional recuperado devido ao aumento da dosagem de cianeto. Pode acontecer que as alternativas de cianetação, com ou sem concentração gravítica, apresentem diferentes dosagens ótimas de cianeto. Neste caso, a melhor alternativa econômica será a operação com concentração gravítica, o que leva a uma menor dosagem de cianeto.

O Autor recomenda cuidado ao se fazer ensaios de concentração gravítica em laboratório antes da cianetação. Dois problemas podem prejudicar os resultados. O primeiro refere-se à relação de concentração. Geralmente a concentração gravítica industrial gera um produto para fundição direta, com teores de ouro da ordem de 10 a 50%, ou seja, chega-se a relações de concentração da ordem de 100.000. A massa de amostra utilizada em laboratório impossibilita atingir tais valores. A operação com relações de concentração inferiores a 100 pode remover uma quantidade apreciável de sulfetos e mascarar o seu efeito sobre a cianetação do ouro. O Autor sempre procura trabalhar com uma relação de concentração superior a 500, mesmo que tenha de recorrer a um bateamento. O segundo problema refere-se à lavagem excessiva do minério. A grande quantidade de água utilizada na concentração gravítica de laboratório pode remover as substâncias consumidoras de oxigênio e cianeto presentes no minério e mascarar os resultados da cianetação. Ensaios de cianetação direta em paralelo com ensaios da cianetação do rejeito gravítico permitem averiguar se este problema ocorre com determinado minério. Duas ações podem ser tomadas se forem constatadas

diferenças acentuadas de extração de ouro, e/ou concentração de oxigênio dissolvido e/ou consumo de cianeto:

- ou se projetam os dados da cianetação direta para a cianetação do rejeito gravítico;
- ou se realiza a concentração gravítica com a recirculação de água, de modo a utilizar a quantidade mínima deste insumo, que será utilizada para constituir a polpa para o ensaio de cianetação.

6.5.10 Impacto da cianetação sobre o meio ambiente

No desenvolvimento de um novo processo deve-se analisar cuidadosamente o impacto da cianetação sobre o meio ambiente, no sentido de definir os estudos para estabelecer as medidas mitigadoras necessárias e avaliar o efeito dos processos de tratamento e disposição de efluentes sobre a economia do projeto.

Por ocasião do desenvolvimento do processo de cianetação de Fazenda Brasileiro, o licor final da lixiviação de laboratório foi caracterizado para verificar se nele ocorriam elementos prejudiciais ao meio ambiente. A análise dos metais em solução está apresentada na tabela 6.15.

Observa-se que o cobre, o ferro e o arsênio estão fora dos limites da Resolução CONAMA nº 20. Optou-se, então, por iniciar o projeto com descarga zero de efluente líquido. Para tanto, impermeabilizou-se a barragem de rejeito com manta de PVC a sua água sobrenadante passou a ser bombeada de volta para a usina.

Como os ciano-complexos de cobre e ferro não interferem com a lixiviação do ouro, eles não receberam atenção especial durante o desenvolvimento do processo. Contudo, como o arsênio pode formar tio-arsenieto, que constitui um forte veneno para a solubilização do ouro, foi pesquisada a influência do arsênio solúvel na lixiviação. Foram realizados uma série de ensaios sequenciais de cianetação / CIP com recirculação do licor de um ensaio para o seguinte. Não foram observadas reduções na extração de ouro em qualquer etapa, e o teor de arsênio em solução estabilizou-se em 14 mg/l¹⁶⁷.

Tabela 6.15 Análise de metais no licor de cianetação de ensaios em laboratório com o minério de Fazenda Brasileiro ¹⁶⁷

ELEMENTO	ANÁLISE (mg/l)
As	7,4
Cu	14,2
Fe	17,0
Zn	1,4
Co	0,25
Pb	0,18
Mn	0,02
Cd	0,01
Ni	0,07
Sb	0,05
Hg	0,005

Uma amostragem da água recirculada ao processo (sobrenadante da barragem) feita um ano após o início de operação de Fazenda Brasileiro apresentou a composição mostrada na tabela 6.16.

O objetivo desta análise era caracterizar o efluente para, então, estudar um processo de tratamento, tendo em vista o lançamento do excesso de água da barragem ao meio ambiente. Como resultado, desenvolveu-se um processo para tratamento desta água por meio de adição de sulfato ferroso, que foi implantado industrialmente.

As análises de caracterização confirmaram que o teor de arsênio na água recirculada estabilizou-se conforme previsto nos ensaios de laboratório, e na operação da usina não ocorreram problemas devido ao arsênio solúvel.

Em todos os desenvolvimentos de processo e projetos de usinas para ouro que se seguiram, sempre foi dedicada atenção especial ao meio ambiente.

Tabela 6.16 Caracterização química da água sobrenadante na barragem de rejeito de Fazenda Brasileiro ¹⁶⁸

ANÁLISE	TEOR (mg/l)	CONAMA 20	COPAM 010/86
Cianeto livre	0,90	0,2	0,2
Cianeto total	4,30	-	-
As	12,3	0,5	0,2
Cu	< 1,0	1,0	0,5
Fe	<1,0	15,0	10,0
Zn	< 1,0	5,0	5,0
Co	< 1,0	Não definido	Não definido
Pb	< 1,0	0,5	0,1

6.5.11 Impacto dos parâmetros de processo sobre a economia da cianetação

Para se avaliar o impacto dos principais parâmetros de processo sobre a economia da cianetação foram utilizados os dados do estudo de lixiviação do minério sulfetado de Almas, aplicados a um projeto hipotético com capacidade para tratar 1 milhão t/ano de minério de ouro com 5 g/t. A partir de um caso base, com moagem a 80% < 75 µm, adição de 600 g/t de cianeto de sódio e tempo de lixiviação de 24 horas, foram variados os tempos de residência, as granulometrias de moagem e as adições de cianeto. Para melhor visualizar o impacto dos parâmetros de processo sobre a economia da cianetação, foram calculados os valores presentes líquidos - VPL - antes dos impostos, utilizando-se as extrações de ouro mostradas na tabela 6.17 ⁴⁷. Para o caso base, foram considerados um investimento de US\$ 60 milhões e um custo operacional de US\$ 17 milhões por ano. Para montagem do fluxo de caixa, considerou-se todo o investimento realizado no final do primeiro ano. A receita e o custo operacional foram admitidos constantes e gerados a partir do segundo ano, assim permanecendo durante os 15 anos seguintes, sem a reposição de equipamentos. As variações de investimento e custo operacional em relação ao caso base foram estimadas a partir dos métodos e dados

apresentados no item 5.6.2. Para calcular o VPL, o fluxo de caixa foi descontado com a taxa de 12% ao ano. Os resultados obtidos também estão na tabela 6.17. As planilhas completas com os fluxos de caixa podem ser vistas no Anexo D.

Tabela 6.17 Extrações de ouro e valores presentes líquidos, VPL, em função das variações dos parâmetros da cianetação do minério sulfetado de ouro de Almas

Tempo (h)	Granul. %<75 µm	Extração de ouro (%) / VPL (US\$ milhões)					
		Adição de cianeto (kg/t)					
		0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,0
24	60	-	-	-	81,5/ 66,1	-	-
24	70	-	-	-	90,2/ 88,7	-	-
24	80	58,1/3,5	84,9/ 76,0	89,8 /88,5	92,9/ 94,4	92,3 /91,1	93,5/ 92,6
16	80	-	-	-	91,3/ 90,7	-	-
48	80	-	-	-	94,1 /96,0	-	-

Conforme demonstrado, uma adição deficiente de cianeto pode ser um desastre. Por exemplo, adicionando-se 100 g/t, atingiram-se concentrações de NaCN nas soluções inicial e final de 100 mg/l e 70 mg/l, respectivamente⁴⁷. Ou seja, na faixa ótima teórica para lixiviação de ouro em solução de cianeto pura (veja item 4.3.2). Mesmo assim, a extração de ouro e o VPL foram baixos. Aumentando-se a dosagem de cianeto, a extração de ouro e o VPL foram crescendo até passar por um máximo para 600 g/t de NaCN. Nesta condição, o teor de cianeto livre da solução final foi muito alto (520 mg/l), recomendando-se estudos para recircular o máximo de solução, ou mesmo para regenerar o cianeto.

A adição ótima de cianeto deve merecer atenção especial no desenvolvimento de processo para um novo minério, e deve ser acompanhada ao longo da vida de toda a mina, no sentido de extrair o máximo de valor do negócio.

A granulometria de moagem também tem forte impacto sobre o VPL do projeto. Trata-se de um parâmetro que deve ser muito bem estudado. Seja por que a moagem é

responsável pela maior parte dos custos de uma usina hidrometalúrgica para minérios de ouro “*free-milling*”, seja por que, uma vez comprado e instalado o moinho, não há como voltar atrás.

O exemplo estudado comprova que o tempo de residência em falta pode levar à perda de alguns milhões de dólares no VPL. É preferível pecar ligeiramente pelo excesso do que pela falta. O custo de instalar e operar tanques de cianetação adicionais é baixo. Um aumento de recuperação de ouro de apenas 1,8% compensou aumentar o tempo de residência de 24 para 48 horas. Entretanto, para aumentar o tempo de residência, devem ser disponíveis ensaios cinéticos com mais pontos de amostragem na faixa pesquisada, seja para minimizar efeitos de erros de amostragem e análise, seja para evitar o risco da extração se estabilizar antes do período final. No caso estudado, no período de 24 para 48 horas não houve acompanhamento. Parte dos 1,8% de aumento de extração pode ser devida aos erros de amostragem e análise (o erro na extração é da ordem de pelo menos 0,5% - por exemplo, foram realizados 3 ensaios com o caso base, obtendo-se extrações de ouro de 92,7%, 93,2% e 92,9%).

A conclusão final é de que o impacto dos parâmetros de processo sobre a economia da cianetação é elevado. Sua ordem de grandeza atinge até dezenas de milhões de dólares, ao passo que o custo para a realização de estudos criteriosos custa cem a mil vezes menos. Assim, não se deve economizar em áreas de custo-benefício tão favorável.

6.6 Análise das estratégias de ensaios para desenvolvimento de processo

As estratégias de ensaios para desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados encontradas na literatura enfocam o processo de uma maneira não claramente vinculada ao desenvolvimento do negócio. Portanto, não possuem uma aderência explícita aos fatores de sucesso e às diretrizes para o desenvolvimento de processo. Desta maneira, é preciso adaptar estas estratégias ao negócio e ao seu processo decisório para aumentar a probabilidade de sucesso dos projetos.

Uma adaptação geral é dificultada pelo fato das estratégias de desenvolvimento de negócios variarem amplamente de empresa a empresa, tornando difícil estabelecer uma estratégia de ensaios que atenda a todos os casos. Entretanto, algumas simplificações podem facilitar esta tarefa, como considerar a estratégia de exploração geológica “*grass roots*” como o caso mais geral. Todas as outras estratégias passam a ser um caso particular de alguma(s) etapa(s) da exploração “*grass-roots*”. Também pode-se exprimir a estratégia geral em função de diagramas lógicos que permitam incorporar os diferentes objetivos e metas das empresas no processo decisório.

Isto feito, os diagramas lógicos que exprimem a estratégia geral de ensaios passam a funcionar como uma sinalização do melhor caminho para o desenvolvimento do processo, à medida que se caminha da descoberta para a produção, em sintonia com os objetivos e estratégias empresariais, fatores de sucesso e fatores de lucratividade da indústria do ouro. Assim, tal sinalização indica a melhor sequência de ensaios em função das características específicas de cada minério e permite que minérios diferentes tenham abordagens diferentes. Os diagramas lógicos não devem buscar uma receita rígida, mas devem subsidiar o pensamento, sem nunca substituí-lo.

Também é importante que os diagramas lógicos e diretrizes para o desenvolvimento de processo estejam em conformidade com as etapas decisórias dos projetos, que podem variar caso a caso ou de empresa a empresa. Conforme mostrado no Capítulo 2, as etapas mais comuns do processo decisório, que requerem informações de processo, são:

- decidir se compensa passar da etapa de pesquisa geológica para a etapa de desenvolvimento / avaliação;
- ao se avançar suficientemente nos trabalhos de desenvolvimento, estabelecer uma concepção preliminar para o empreendimento (estudo conceitual) para verificar se compensa continuar com os trabalhos e, em caso positivo, estabelecer uma programação de detalhe para a orientar o desenvolvimento do projeto;
- ao se concluir a pesquisa de delimitação do depósito, fazer um estudo de pré-viabilidade (segunda etapa do estudo conceitual) para decidir se compensa

fazer a geologia de detalhe (sondagens “in fill”) e concluir os trabalhos para definição final do projeto;

- ao se concluir a geologia de detalhe, fazer o estudo de viabilidade final para decidir se compensa implantar o projeto e, em caso positivo, servir de base à contratação do financiamento e detalhamento da engenharia.

A seguir, as estratégias de desenvolvimento de processo são adaptadas e analisadas em conformidade com estas etapas do processo decisório.

6.6.1 Decisão de início do desenvolvimento de depósitos de ouro

A decisão de iniciar o desenvolvimento / avaliação de depósitos de ouro deve ser suportada pelo tamanho de alvo mínimo aceitável para exploração, que depende da expectativa de reservas, de teor, de recuperação de ouro, de investimento e de custo operacional, além da rentabilidade mínima exigida. Os procedimentos para determinações destes alvos mínimos estão bem cobertos na literatura ¹.

O conhecimento da mineralogia e textura dos minérios é um excelente ponto de partida para selecionar os processos mais adequados e prever o desempenho do minério no processo. Contudo, por si só não é suficiente. Vale apenas como uma indicação e não dispensa a realização de ensaios tecnológicos exploratórios, mais simples, baratos e quantitativos, para compor a caracterização tecnológica do minério. Conforme discutido no item 6.1, o início dos ensaios tecnológicos desde o começo da pesquisa geológica contribui para o sucesso do projeto e constitui uma importante diretriz para o desenvolvimento de processos.

Por isto, os objetivos dos ensaios tecnológicos realizados no início da pesquisa geológica, antes da etapa de desenvolvimento / avaliação do depósito devem ser:

- conhecer a resposta dos diversos tipos de minério quanto aos processos convencionais de beneficiamento de minérios de ouro;

- fornecer informações para a avaliação econômica preliminar e, se for o caso, para o relatório de pesquisa para demonstrar a exequibilidade econômica do depósito;
- dar uma idéia das possíveis rotas de processo, recuperações e custos operacionais, para se decidir pela continuidade ou não da pesquisa geológica;
- servir de suporte ao planejamento das atividades de desenvolvimento de processo.

Uma vez estabelecidos estes objetivos, podem-se discutir as estratégias de ensaios para alcançá-los. Deve-se considerar que nesta etapa são disponíveis poucos furos de sondagem, feitos com grande espaçamento, dando uma idéia muito vaga do teor e limites do depósito. Em geral, as informações existentes não justificam a realização de um estudo conceitual, nem tampouco permitem a retirada de uma amostra de representatividade assegurada. Desta maneira, não compensa avançar além de ensaios exploratórios de processo, voltados para dar uma noção do(s) tipo(s) de processo(s) recomendado(s), da recuperação de ouro, investimentos e custos envolvidos, ainda que em caráter muito preliminar. Estes dados auxiliarão na decisão de se entrar ou não na etapa de desenvolvimento / avaliação do depósito.

Esta decisão, é muitas vezes feita por intuição, em função dos dados serem muitos preliminares. O uso de modelos de custos ou sistemas especialistas ajuda a estabelecer uma base de dados mais objetiva para a decisão. Neste caso, devem ser utilizados os parâmetros básicos de projeto em conformidade com a melhor informação disponível no momento. No entanto, a divulgação destes parâmetros altamente preliminares e de baixa precisão (recursos geológicos, teores, recuperações, tipo de processo, investimento, custo operacional) pode gerar falsas expectativas e cobranças posteriores pela alta direção das empresas, se elas não estiverem familiarizadas com o processo decisório e o risco envolvido. O sigilo das informações é fundamental para as empresas que têm ações em bolsas em decorrência do alto grau de incerteza das informações utilizadas.

A definição dos ensaios exploratórios de processo deve ser feita após uma análise cuidadosa de todas as informações disponíveis. Uma reunião com a equipe de exploração geológica permite conhecer a mineralogia, tipos litológicos, tipos de estruturas mineralizadas, ordem de grandeza de teores, possível morfologia dos corpos mineralizados. Tais informações, notadamente as análises mineralógicas e químicas realizadas em apoio à geologia, já dão uma primeira idéia de quais ensaios exploratórios são apropriados.

Análises de ouro cianetável, realizadas sistematicamente ao longo dos primeiros furos de sondagem, dão uma idéia da recuperação de ouro, sua variabilidade e permitem verificar se o minério apresenta algum problema potencial de processo. Ajudam, também, a definir os ensaios exploratórios e como colher as amostras necessárias. Estas análises podem ser feitas conforme o procedimento inicial do diagnóstico de lixiviação proposto por Torres ⁴³, utilizando-se alíquotas das amostras pulverizadas para as análises químicas regulares (200 g são suficientes). Entretanto, por se tratar de um procedimento analítico, que não pode depender de julgamento e ajustes pelo operador, recomenda-se trabalhar com concentrações de sólidos não superiores a 40% em peso, no sentido de evitar eventuais problemas de viscosidade de polpa. É suficiente realizar análises de ouro cianetável em pequena fração das amostras (por exemplo 10%) dos intervalos com teores interessantes do metal. A seleção destes intervalos pode ser feita aleatoriamente ou sistematicamente, sendo esta última modalidade preferível por facilitar a estratificação do depósito.

Para fazer os ensaios exploratórios deve(m) ser colhida(s) amostra(s) composta(s) por tipo de minério. Os critérios de amostragem devem ser acertados de comum acordo com a geologia, procurando-se representar, da melhor maneira possível, cada tipo de minério. Mesmo assim, dificilmente será obtida uma amostra de boa representatividade em etapa tão preliminar.

A quantidade de amostra a ser retirada para cada tipo de minério merece uma discussão especial. Em geral, nas fases iniciais de pesquisa geológica de depósitos auríferos com características para cianetação em tanques agitados, são disponíveis

apenas amostras de testemunhos de sondagem a diamante. Tratam-se de amostras caras e limitadas. Portanto, elas devem ser usadas da maneira mais criteriosa possível. Usualmente, estes testemunhos são serrados ao meio e uma das metades é preparada para análise química, enquanto a outra é mantida intacta em arquivo. Esta preparação passa por uma cominuição inicial antes de se retirar uma alíquota para ser pulverizada e enviada para análise química. Contudo que a cominuição inicial não seja muito fina (por exemplo 0,5 mm ou mais grossa), as reservas destas amostras moídas prestam-se para estudos exploratórios de concentração gravítica e cianetação. Desta maneira podem ser facilmente compostas amostras de pelo menos 10 kg para estudos exploratórios de concentração gravítica e cianetação em garrafão sobre mesa de rolos (equivalente à cerca de 5 m de testemunhos HQ serrados ao meio).

O mesmo não se pode dizer sobre amostras para ensaios de alvo de extração em garrafão para simular lixiviação em pilhas. Neste caso, a cominuição inicial não pode ser mais fina do que 6 mm, o que ocorre frequentemente por se tratar de minério de ouro. Em decorrência, torna-se necessário serrar a outra metade de trechos selecionados dos testemunhos restante para obter a amostra necessária.

Amostras de sondagem roto-percussiva, apesar de menor custo, definitivamente não são indicadas para ensaios de beneficiamento em qualquer dos estágios de desenvolvimento do processo. Elas alteram profundamente as características físicas do minério, podem produzir uma elevada segregação e alterar a composição química e mineralógica e, assim, alterar a resposta do minério aos processos. Quando a perfuração roto-percussiva for a escolha para a pesquisa geológica por se tratar de um método rápido e barato, deve-se ter em mente que sondagens complementares a diamante serão necessárias para gerar as amostras para os estudos de beneficiamento, além de outros como RQD e determinações de densidades.

A figura 6.15 mostra o diagrama lógico de desenvolvimento de processo durante as etapas iniciais da pesquisa geológica. As informações geradas vão subsidiar a avaliação preliminar para decidir se compensa ou não continuar com as atividades de pesquisa geológica e desenvolvimento do projeto.

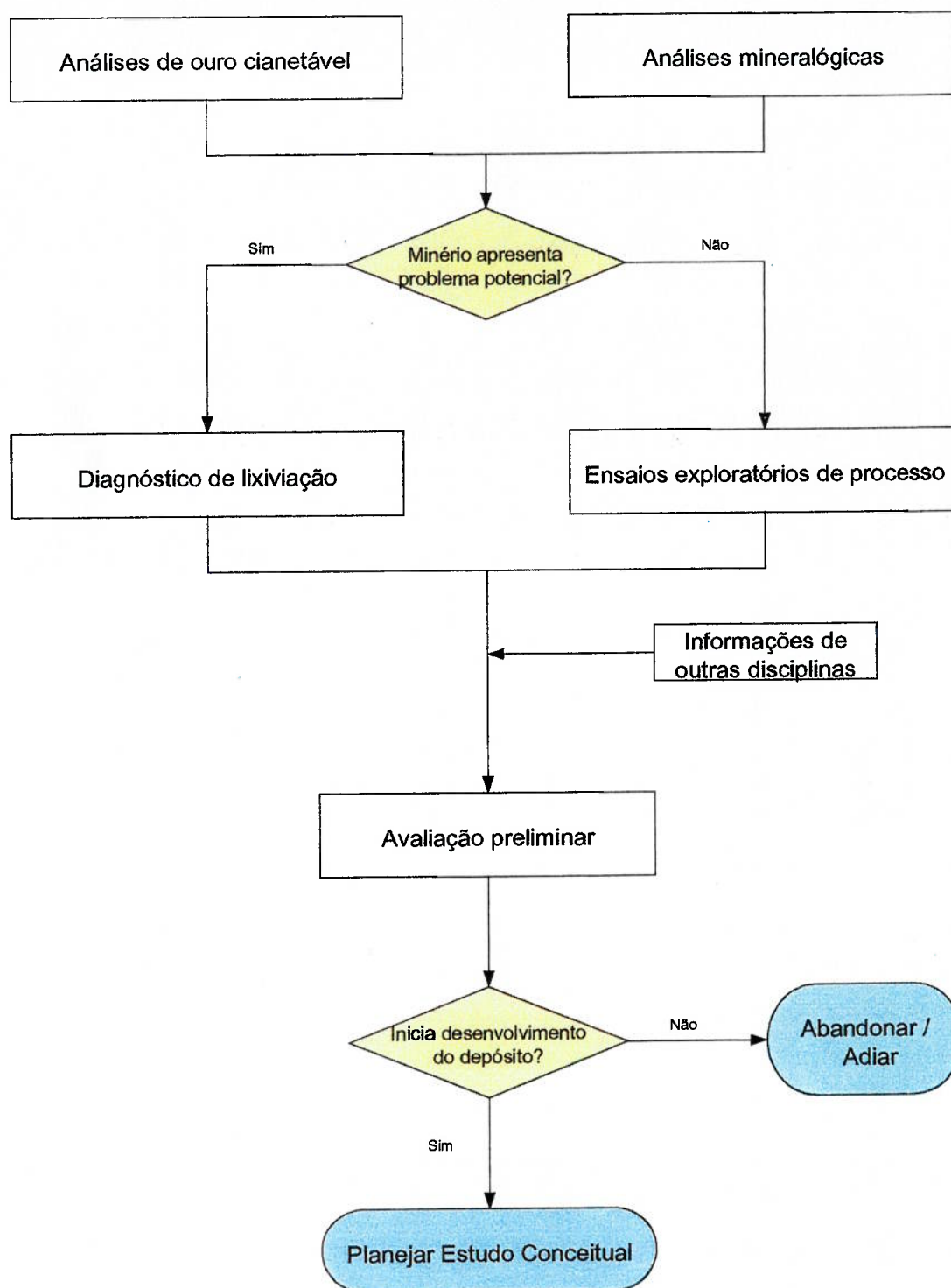


Figura 6.15 – Diagrama para ensaios exploratórios durante a etapa de pesquisa geológica

Se a mineralogia e/ou análises de ouro cianetável indicarem algum problema potencial de processo, recomenda-se realizar, desde já, ensaio(s) de diagnóstico de lixiviação. Caso contrário, deve-se partir diretamente para os ensaios exploratórios de processo, mais simples e baratos. O custo de um diagnóstico de lixiviação pode ser suficiente para fazer pelo menos quatro ensaios exploratórios. Portanto, só compensa fazer ensaios de diagnósticos de lixiviação em amostras de baixa representatividade se houverem suspeitas ou indicações de problemas de processo.

Para minérios com características adequadas à cianetação, os ensaios exploratórios devem ser realizados numa condição fixa e mais convencional possível. Por exemplo, um ensaio exploratório de cianetação, conforme indicado pela análise de "*feed-back*" dos projetos (item 6.5), deve incluir:

- granulometria de moagem: 80% < 75 μm para minérios sulfetados, ou 70% < 75 μm para minérios oxidados;
- tempo de pré-aeração: 2 horas;
- pH: 10,5 com cal;
- adição de cianeto: 600 g/t (valor relativamente conservador para minérios de fácil processamento, ainda sem preocupação de otimização);
- tempo de cianetação de 24 horas, sem acompanhamento da cinética.

Uma massa de 500 g por amostra já é suficiente para este ensaio, que dará uma boa idéia do potencial de recuperação de ouro e consumo de cianeto. Minérios com indicação de boa proporção de ouro livre grosso podem considerar uma etapa de concentração gravítica antes da cianetação, mas nestes casos é necessário uma massa maior de amostra (pelo menos 10 kg).

Neste estágio inicial, o foco do desenvolvimento do processo deve ser mais voltado a uma caracterização abrangente do que propriamente para a seleção do processo. Assim, mesmo que as características do minério indiquem ser a cianetação o processo mais indicado para o minério, é recomendável fazer um ensaio de alvo de extração em garrafão sobre mesa de rolos com 2 ou 3 kg de amostra britada a -6mm. O tempo de duração deste ensaio deve ser de pelo menos 5 dias. Recomenda-se, também,

submeter a(s) amostra(s) a ensaios exploratórios de flotação quando elas apresentarem alguma refratariedade ou complexidade.

Quando for necessário avançar os estudos de desenvolvimento de processo para a elaboração do relatório de pesquisa para o DNPM, devem-se incluir ensaios de diagnósticos de lixiviação e ensaios preliminares de otimização de processo. No caso de cianetação em tanques agitados, os parâmetros de processo a serem considerados são a adição de cianeto, a granulometria de moagem e o tempo de pré-aeração (caso se tratar de minério sulfetado complexo). Um ensaio cinético de cianetação em garrafão deve ser feito na condição otimizada dos ensaios anteriores. Analisa-se o licor rico para avaliar se ocorre a presença de substâncias que necessitem de tratamento para disposição dos efluentes no meio ambiente.

6.6.2 Estudo conceitual

Os ensaios tecnológicos de beneficiamento para o estudo conceitual representam a parte mais importante do desenvolvimento de processo, uma vez que se destinam à seleção do processo. O fator de lucratividade “redução do tempo de maturação de projetos” embasa a importância da seleção acertada do processo desde esta etapa. Apesar dos trabalhos de pesquisa geológica de detalhe poderem demandar pelo menos mais dois ou três anos e, portanto, ainda haver muito tempo para se fazer as correções que se fizerem necessárias, uma seleção firme e segura é fundamental para reduzir gastos e evitar atrasos na implantação do projeto. Principalmente quando se tratam de tecnologias maduras, que não dão espaço para divagações.

Desta maneira, os objetivos dos ensaios tecnológicos e estudos de processo para esta etapa devem incluir:

- seleção da rota de processo;
- estabelecimento de ensaio padrão para conhecer a variabilidade de recuperação de ouro da jazida;
- levantamento dos aspectos críticos e mais relevantes relativos ao beneficiamento;

- programação das atividades futuras para a definição do processo.

Para alcançar estes objetivos, bem mais ambiciosos do que na etapa anterior, é fundamental que a estratégia de desenvolvimento a ser adotada esteja em sintonia com os fatores de sucesso, fatores de lucratividade e diretrizes para o desenvolvimento do processo:

- trabalho em equipe multi-disciplinar: será necessário que a equipe de processo trabalhe em sintonia e estreita colaboração com as outras equipes envolvidas no negócio.
- conhecimento adequado da tecnologia: a equipe utilizada devem ser forçosamente sênior, de reconhecida experiência e competência (com "*feedback*" de outros projetos).
- planejamento inicial bem formulado: deve ser feito por toda a equipe envolvida, logo após a decisão de se iniciar o desenvolvimento / avaliação do depósito.
- foco no negócio e no seu processo decisório: os objetivos do projeto, as estratégias, as etapas e critérios de decisão, o que se espera descobrir e a priorização de alvos devem ser claramente estabelecidos na reunião para o planejamento inicial.
- assegurar a representatividade da amostra: definir o plano de amostragem em conjunto com as equipes de geologia e lavra e estabelecer uma estratégia para verificações futuras da representatividade.
- foco na minimização de riscos: desde o planejamento inicial devem ser levantados todos os aspectos críticos possíveis para o projeto e verificar se existem problemas fatais que possam inviabilizá-lo.
- consideração de oportunidades específicas: buscar todas as possibilidades que possam viabilizar ou aumentar a atratividade dum projeto.

O planejamento inicial para todas as atividades do Estudo Conceitual possui, então, uma importância capital para o sucesso do projeto. É imprescindível fazer uma reunião com representantes de todas as disciplinas envolvidas no estudo para iniciar este planejamento. As informações disponíveis sobre o depósito devem ser analisadas

previamente por todos os participantes da equipe do estudo conceitual (equipe pequena, mas altamente qualificada). Na reunião, o representante de cada disciplina envolvida deverá apresentar uma proposta de abordagem para o problema e expor claramente as necessidades de sua área, os pontos mais relevantes para o projeto e as expectativas de resultados.

Na reunião inicial devem ser estabelecidos claramente os objetivos e estratégias para o projeto, que deverão estar em consonância com os objetivos e estratégias da empresa. Deve-se definir o que é necessário descobrir para que o prospecto seja de interesse da empresa e quais critérios serão utilizados para se decidir pela continuidade do projeto. A maior armadilha ao se entrar num estudo de desenvolvimento é não conhecer as consequência do sucesso. A partir dos objetivos devem ser traçadas as estratégias, ou seja, as formas cuidadosamente planejadas que serão utilizadas para atingir tais objetivos. Muitas vezes é necessário priorizar alvos dentro de um mesmo prospecto.

A partir das definições básicas acima, são planejadas todas as atividades necessárias para gerar as informações que serão utilizadas no estudo conceitual, incluindo-se; sondagens; preparação dos testemunhos para análise; os tipos de análises; os estudos geotécnicos, hidrogeológicos, ambientais e de infra-estrutura; o levantamento dos aspectos legais; além da amostragem e estudos de beneficiamento.

No âmbito do desenvolvimento de processo, uma possível estratégia está mostrada na figura 6.16, que envolve os seguintes passos principais:

- definição do plano de amostragem para obter a(s) amostra(s) para o estudo;
- caracterização química e mineralógica de cada amostra, para planejamento de detalhe dos ensaios diagnósticos e de desenvolvimento de processo;
- seleção do tipo de processo a ser adotado e, no caso de cianetação em tanques agitados, definição dos parâmetros preliminares de processo e ensaio padrão.

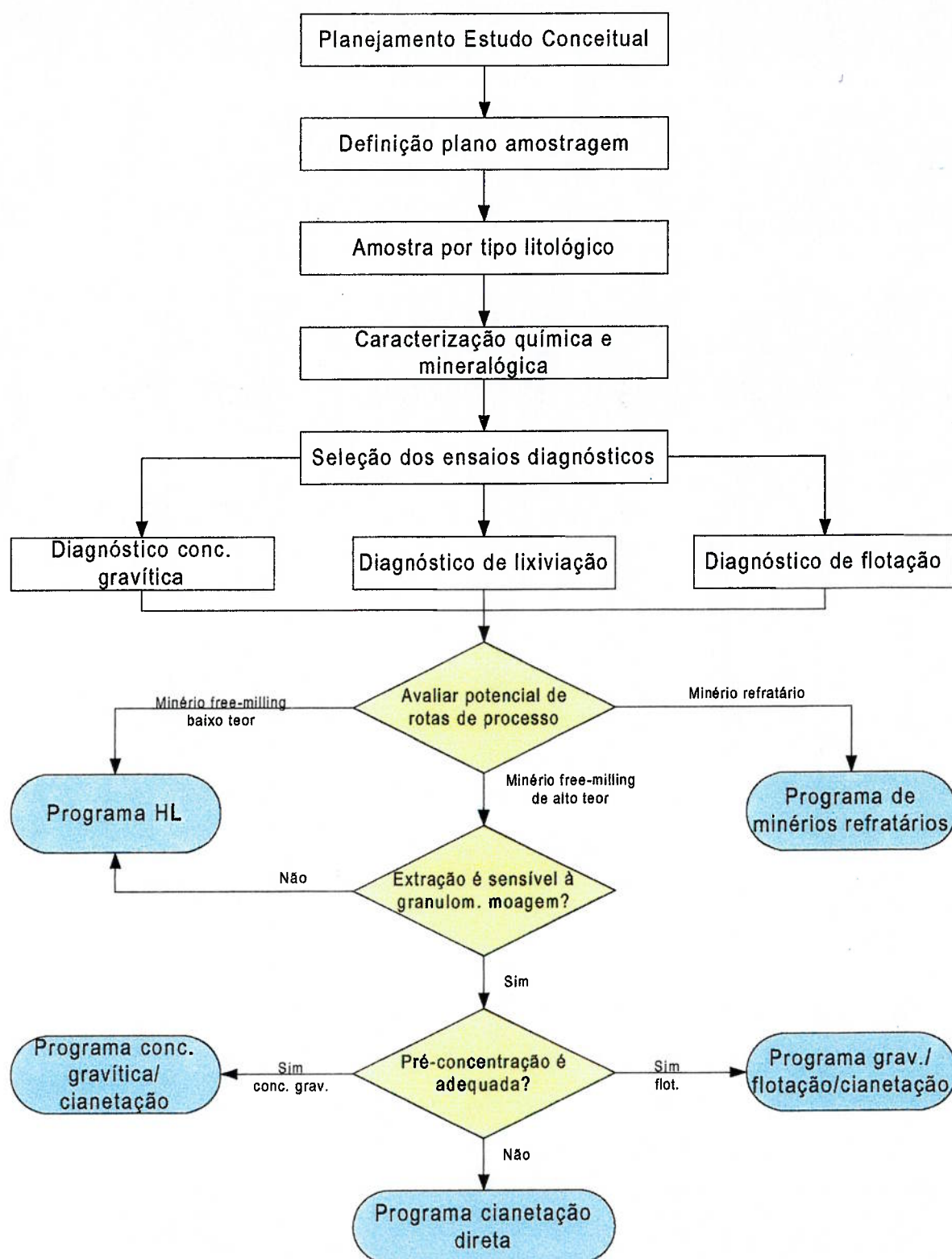


Figura 6.16 – Diagrama de ensaios de processo para o estudo conceitual

A primeira discussão surge sobre como assegurar a representatividade da amostra. Sem dúvida, uma interação entre as equipes de geologia, lavra e beneficiamento é essencial, uma vez que cada uma dispõe de importantes informações. A representatividade pressupõe que cada amostra apresente características iguais ou muito próximas às dos minérios que serão efetivamente processados. Assim, devem ser considerados o teor médio, a composição litológica / mineralógica, a textura do minério e sua resposta ao processo. Além disto, deve-se ter uma noção do método de lavra provável, para definir os locais, critérios de diluição e seletividade para a amostragem (comprimento mínimo de interseção mineralizada dos testemunhos e teor de corte para compor a amostra). As informações de análises de ouro cianetável e ensaios exploratórios do processo também são muito importantes para a definição do plano de amostragem.

Alguns cuidados básicos devem ser tomados ao se elaborar o plano de amostragem. Deve-se evitar de misturar amostras de litologias diversas, de profundidades muito diferentes e de regiões distantes da jazida. Este cuidado evita de estudar juntos minérios que podem apresentar comportamento muito diferente no processo, ou mesmo estudar amostras de minérios de regiões que nunca serão lavradas juntas. Por outro lado, não se devem criar muitos tipos de minérios. Se isto estiver ocorrendo, é sempre prático recuar um pouco e procurar reduzir os tipos de minérios. Neste sentido, deve-se, por um lado, verificar se a proporção de algum tipo de minério é pouco significativa em relação ao volume total de minério, a ponto de não justificar o seu estudo separado. Por outro lado, podem ser necessários mais ensaios exploratórios no sentido de se procurar agrupar mais as amostras.

A experiência tem mostrado que o processo de cianetação em tanques agitados é bastante robusto e na maioria das vezes tipos litológicos muito distintos apresentam comportamentos similares no processo e podem ser beneficiados na mesma instalação, como foi o caso dos minérios de Fazenda Maria Preta (item 6.5).

Mesmo com todos estes cuidados, uma jazida mineral nunca é uniforme e o minério processado ao longo de sua vida vai apresentar variações de resposta ao processo. Também, não está demonstrada e assegurada a representatividade das amostras. Deve ficar bem claro que os cuidados mencionados asseguram apenas que foram retiradas as melhores amostras possíveis de serem obtidas no momento. Portanto, são necessários procedimentos para verificar, nas etapas seguintes, a representatividade das amostras e o efeito da variabilidade do minério sobre o processo. Ressalta-se, assim, a importância de se estabelecer um ensaio padrão para avaliar a variabilidade do minério e a representatividade das amostras.

Para desenvolver o processo para o estudo conceitual, é suficiente uma quantidade de amostra da ordem de 50 kg por tipo de minério. A granulometria de britagem não deve ser inferior a 6 mm para possibilitar fazer ensaios de alvo de extração. Quando se tratar de minérios com forte indicação para lixiviação em pilhas, é recomendável que a amostra seja mais grossa ainda (por exemplo, - 12mm).

A prática usual é submeter cada amostra a uma caracterização química e mineralógica inicial, para obter as informações necessárias a um planejamento objetivo dos ensaios de beneficiamento. Uma análise química de varredura permite determinar os elementos que serão analisados. Além do ouro e prata, frequentemente são analisados enxofre total, carbono, carbonato, As, Cu, Ni, Co, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Si, Al. As análises mineralógicas devem identificar e quantificar os minerais presentes, seu modo de ocorrência, tamanho de grão e associação. Principalmente para os minerais portadores de ouro.

Em função das características químicas e mineralógicas de cada amostra, são planejados os ensaios diagnósticos, que devem incluir um diagnóstico de lixiviação (recomenda-se o método proposto por Torres ⁴³), um diagnóstico de concentração gravítica (cerca de 4 kg de amostra) e um ensaio de alvo de extração para diagnóstico de lixiviação em pilhas (cerca de 2 kg de amostra). Ensaios de flotação só devem ser realizados se o minério se mostrar refratário, ou se for necessária uma pré-concentração para tornar a cianetação mais atrativa economicamente.

Os ensaios diagnósticos geram as informações necessárias para se decidir qual tipo de programa deve ser utilizado para estabelecer um processo padrão para estudar a variabilidade da jazida. Às vezes podem ser necessários alguns ensaios adicionais para quantificar consumos de reagentes e determinar o “*work index*” de Bond. O tipo de processo indicado pode ficar muito claro em alguns casos. Por exemplo, minérios altamente refratários serão destinados ao programa de estudos de processos oxidativos antes da cianetação. Já os minérios oxidados de fácil processamento, baixo teor e lavra a céu aberto são indicados diretamente para o programa de lixiviação em pilhas. Em outros casos, é necessário um estudo de “*trade-off*” para decidir pela melhor linha de processo. O uso de sistemas especialistas ¹⁴, ou de modelos de custos ^{10, 11, 169} podem ajudar nos estudos necessários para esta decisão.

Na atual conjuntura, a decisão mais comum certamente será entre os processos de cianetação em tanques agitados e lixiviação em pilhas. Como estas rotas levam a procedimentos e custos de desenvolvimento de processo completamente diversos, tal decisão deve ser tomada o mais cedo possível. Os baixos preços vigentes para o ouro têm favorecido a lixiviação em pilhas em muitos casos. Para ilustrar, apresenta-se, na tabela 6.18, uma estimativa do acréscimo de recuperação de ouro necessário para recuperar o capital extra investido numa usina de cianetação em relação ao investimento que teria uma unidade de lixiviação em pilhas de mesma capacidade.

Tabela 6.18 – Acréscimo de recuperação de ouro necessário para recuperar o capital adicional investido numa usina de cianetação em tanques agitados em relação à lixiviação em pilhas de mesma capacidade ¹⁷⁰.

Teor do minério g Au/t	Recuperação adicional (%)
5,0	12
3,0	21
2,0	31

Obs: Preço do ouro a US\$ 300.00 / oz.

Quanto mais baixo o preço do ouro, maior será o acréscimo de recuperação necessário para recuperar o capital extra investido numa usina de cianetação em tanques agitados. É importante mencionar que este acréscimo poderá variar bastante caso a caso, em função de vários fatores. Por exemplo, minérios argilosos geralmente necessitam de acréscimos de recuperação menores devido aos elevados custos de aglomeração e potencial de apresentarem recuperações industriais inferiores às dos ensaios de lixiviação em colunas (problemas de percolação de pilhas, com colmatação e formação de canais preferenciais). Algumas vezes podem ser necessários mais ensaios além dos exploratórios para fornecer uma base mais confiável para a decisão. Persistindo a dúvida, recomenda-se optar pela lixiviação em pilhas, menos intensiva em capital. Trata-se de uma área que o conhecimento e a experiência prevalecem sobre qualquer método ou programa.

De um modo geral, a lixiviação em pilhas vai ser vantajosa para minérios oxidados com lavra a céu aberto e teores de ouro inferiores a 4 g/t, ou até mesmo 5 g/t em alguns casos. Minérios sulfetados dificilmente terão a lixiviação em pilhas como a melhor alternativa, dada a sua extrema sensibilidade de recuperação em relação a granulometria de moagem. O diferencial de recuperação de ouro é que governará o limite de teor entre os processos.

Uma vez estando bem definido que o processo de cianetação em tanques agitados é o mais indicado, deve-se avaliar se é conveniente fazer uma concentração gravítica prévia ou não. Ou então, se o minério apresenta alguma complexidade ou problema que possa ser contornado com uma pré-concentração por flotação.

A concentração gravítica passou a ser uma etapa quase obrigatória em usinas modernas de ouro após o advento dos concentradores centrífugos. Trata-se de um processo de baixo investimento e elevado potencial para reduzir custos de produção. Assim, nesta etapa é preciso verificar se a concentração gravítica afeta significativamente o desempenho da cianetação em tanques agitados. Ou mesmo se a

concentração gravítica será o processo principal para a recuperação de ouro, ou então se terá um papel auxiliar para a cianetação em tanques agitados.

No caso de minérios com ouro muito grosso (por exemplo, Projeto Ouro Itabira, discutido no item 6.5), as elevadas recuperações do metal na concentração gravítica (acima de 80%) fazem com que esta rota seja a principal. Além disto, a não remoção prévia do ouro grosso pode alterar consideravelmente os parâmetros ótimos da cianetação, como aumentar o tempo de residência e a adição de cianeto, conforme mostrado na análise do "feed-back" de projetos, item 6.5. Neste caso, é recomendável desenvolver um procedimento padrão com ensaios de concentração gravítica integrados ao de cianetação, que requer uma quantidade maior de amostra (pelo menos 4 kg por ensaio) e apresenta custo mais elevado.

No caso de minérios com ouro mais fino (como por exemplo para Fazenda Brasileiro, Fazenda Maria Preta, Almas), onde as recuperações gravíticas são geralmente inferiores a 50% e as partículas de ouro raramente excedem a 100 μm , a concentração gravítica passa a ter função auxiliar e interfere pouco na definição dos parâmetros ótimos da cianetação. Neste caso, o ensaio padrão pode constar apenas da cianetação em garrafão sobre mesa de rolos.

No caso de minérios de fácil processamento, a pré-concentração por flotação é vantajosa quando é possível descartar um estéril final e o custo da flotação e cianetação do concentrado é inferior ao da cianetação de todo o minério, a ponto de compensar as perdas de ouro no rejeito da flotação. Na prática, estas condições ocorrem quando se opera com baixos teores de ouro, como no reprocessamento de rejeitos de usinas antigas (África do Sul) ou com minérios de baixo "work index" (Rio Paracatu, no Brasil).

Desta maneira, completa-se a triagem dos programas de processo mostrada na figura 6.16. A partir daí pode-se iniciar a definição dos parâmetros de processo de cianetação para cada amostra. Na opinião do Autor, a abordagem do MINTEK, descrita no item 4.4.1 e discutida no item 4.4.4 é a mais adequada ao desenvolvimento do processo. As informações resultantes deste procedimento, complementadas com a

determinação do “*work index*” de Bond para cada tipo de minério, juntamente com as análises realizadas no item 6.5, permitem definir os parâmetros ótimos para o ensaio padrão de cianetação, incluindo:

- granulometria de moagem;
- concentração de sólidos;
- pH;
- tempo de pré-aeração;
- adição de cianeto;
- se há necessidade de adição de carvão ativado (CIL);
- se há necessidade de adicionar sais de chumbo.

Um ensaio cinético deve ser realizado na condição otimizada para cada amostra e ao final devem ser caracterizados os efluentes para disposição ambiental. Analisa-se o licor rico para metais pesados e substâncias deletérias e caracteriza-se a estabilidade dos sólidos para serem dispostos em bacias de rejeitos. Estabelece-se também o procedimento para tratamento dos efluentes e abatimento do cianeto. Não serão discutidos maiores detalhes a este respeito por estarem fora dos objetivos desta tese.

Nos casos de estudos com diversas amostras, os parâmetros a serem estabelecidos para o ensaio padrão devem atender à maioria dos casos. A realização do ensaio padrão com diversas composições de amostras ajuda bastante a consolidar os parâmetros ótimos para avaliar a variabilidade da jazida. Também deve-se avaliar a necessidade de variar alguns destes parâmetros ao longo da operação, assim que o minério for mudando. Por exemplo, a adição de cianeto e o pH podem ser ajustados facilmente em qualquer época. A granulometria de moagem já não admite tanta flexibilidade. Uma vez especificados e adquiridos os moinhos, eles passam a limitar a granulometria de moagem e qualquer tentativa de torná-la mais fina passa necessariamente por modificações de vulto, com a compra de equipamentos adicionais. O aumento do tempo de residência requer a instalação de tanques adicionais, mas é sempre mais fácil do que no caso da moagem. Frequentemente nos projetos é deixado espaço livre para instalar tanques adicionais, caso necessário. Outro recurso possível

para resolver problemas de tempo de residência é enriquecer a polpa com oxigênio para aumentar a cinética de dissolução do ouro em épocas de dificuldades.

Ensaio de espessamento em proveta são realizados por tipo de minério ou por amostra composta caso os ensaios de cianetação indiquem ser possível tratar os diversos tipos de minérios juntos.

Alguns projetos apresentam oportunidades específicas, que devem ser consideradas no desenvolvimento do processo: a disponibilidade de equipamentos; a padronização de equipamentos; a especialização da empresa em atividades específicas, como por exemplo no uso de instalações modulares, que podem ser reaproveitadas em outros projetos. Instalações modulares podem ser interessantes no caso brasileiro, uma vez que a maior parte dos depósitos são de pequeno porte e não justificam economicamente um projeto convencional. As instalações modulares, para serem relocáveis, devem incorporar inovações na cianetação e CIP⁶⁹. Neste caso, é importante incluir ensaios de cianetação com oxigênio para acelerar a cinética de dissolução do ouro, no sentido de reduzir o tempo de residência e o volume dos tanques, para facilitar o seu transporte.

É muito importante fazer um controle de qualidade da preparação de amostras e análises químicas desde o início do desenvolvimento dos trabalhos de geologia e beneficiamento. Os procedimentos de preparação de amostra devem ser respaldados por normas internacionais, ou até mesmo estar de acordo com abordagens formais como a de Gy, modificada por Bongarçon^{171, 172} para se adequar aos minérios de ouro. Programas de análises interlaboratoriais e a verificação rotineira de parte das análises em diferentes laboratórios contribuem para minimizar o risco e garantir a confiabilidade de todo o trabalho.

Para minimizar riscos, deve-se fazer, nesta etapa, um levantamento minucioso das questões críticas do processo, ou mesmo de questões fatais que possam inviabilizar o projeto. Uma lista de verificação é de grande ajuda para este levantamento. Por exemplo:

- variabilidade mineralógica e de resposta ao processo;
- existência de minérios “*preg-robbing*”;
- presença de matéria carbonosa “*preg-robbing*” nas encaixantes;
- minérios superficiais com substâncias orgânicas e ácidos húmicos;
- parte da jazida é composta por minérios refratários, com transição indefinida e riscos de bolsões de minérios refratários junto ao minério de fácil processamento;
- ocorrência de minerais formadores de ácido;
- ocorrência de minerais cianídeos;
- presença de consumidores de oxigênio;
- presença de elementos tóxicos;
- presença de metais básicos;
- problemas de ouro grosso.

Uma vez definidos o ensaio padrão e os parâmetros de processo, faz-se a concepção do processo, com dimensionamento dos equipamentos, balanços de massas e estimativas do investimento e custo operacional. Parte-se, então, para o fechamento do estudo conceitual em conjunto com as outras disciplinas, incluindo-se a recomendação, programação e orçamentação dos estudos para as próximas etapas.

6.6.3 Estudo de pré-viabilidade

Os objetivos dos ensaios tecnológicos realizados para o estudo conceitual incluíram a seleção do processo, a definição de um ensaio padrão, o levantamento de aspectos críticos de processo e a programação das atividades futuras. Para tanto, foram utilizadas amostra(s) de melhor(es) representatividade(s) possível(eis) de ser(em) obtida(s) naquela ocasião. Cabe agora, assegurar que a(s) amostra(s) estudadas era(m) realmente representativas, além de melhorar a precisão da estimativa da recuperação de ouro, uma vez que se trata do parâmetro de processo mais crítico para a economia da cianetação (item 5.3).

Assim, o objetivo dos ensaios tecnológicos para o estudo de pré-viabilidade deve estar voltado ao levantamento da variabilidade da jazida em relação ao processo selecionado, além do equacionamento de aspectos críticos eventualmente encontrados na etapa anterior (minimização de riscos).

Torna-se então necessário discutir como devem ser colhidas as amostras para se estudar a variabilidade da jazida quanto à cianetação. Três requisitos básicos tornam-se evidentes. Em primeiro lugar, tais amostras devem ter representatividade espacial limitada e bem definida, uma vez que os dados de recuperação gerados idealmente devem compor o modelo de blocos para planejamento de lavra, além de minimizar o risco de mistura de minérios de comportamentos diferentes no processo. Em segundo lugar, as amostras devem cobrir todo o volume mineralizado delimitado pela cava projetada para a mina, mas podendo-se detalhar mais os blocos que serão lavrados nos primeiros anos (por exemplo, nos primeiros 5 anos de operação). Em terceiro lugar, o planejamento de amostragem deve ser o mais simples possível e integrado ao trabalho de rotina com os testemunhos de sondagem.

Tais requisitos conduzem a amostras relativamente pontuais, abrangendo intervalos mineralizados de testemunhos de sondagem com comprimento preestabelecido em função das características da jazida e dos ensaios previstos. De preferência, as amostras devem ser colhidas sistematicamente nas interseções da sondagem com determinados planos horizontais, dentro de um padrão o mais regular possível, de modo a facilitar o lançamento dos resultados obtidos em modelos de blocos para o planejamento de lavra. O número de amostras e ensaios padrão poderão variar em função da variabilidade do corpo mineral e tamanho da reserva. Numa estimativa inicial, 50 a 100 amostras são suficientes para um estudo de pré-viabilidade. Estas amostras vão sendo colhidas à medida que a pesquisa geológica avança com as sondagens para a delimitação final do corpo mineral e as sondagens “*in-fill*” para detalhamento da geologia.

A integração da amostragem para ensaios de variabilidade de cianetação deve ser feita com relação aos outros usos previstos para os testemunhos de sondagem,

destacando-se as análises químicas de rotina para a geologia (geralmente a cada um ou dois metros) e os ensaios de variabilidade de moagem, destinados principalmente a conhecer as variações de comportamento dos minério frente à moagem semi-autógena ou autógena. Dois procedimentos são utilizados para estes ensaios. O primeiro é o DWT – “*Drop Weight Test*”, criado e desenvolvido pela equipe técnica do JKMRC – Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre - na Austrália, e adaptado por Delboni ^{77, 173}, no Brasil, para estudar a variabilidade a partir de pequenas amostras de testemunhos de sondagem. O segundo, SPI – “*SAG Power Index*”- foi criado e desenvolvido pela Minnovex, no Canadá ⁷⁶. Ambos necessitam de uma amostra com pelo menos 25 mm de tamanho máximo.

Como os testemunhos de sondagem constituem um bem precioso e limitado e os ensaios de moagem não são destrutivos e requerem amostras com partículas relativamente grossas, pode-se adotar um procedimento integrado: primeiro utilizam-se as amostras para os estudos de moagem e depois para os ensaios padrão de cianetação e análises químicas de rotina. Um mínimo de 5 kg de amostras é necessário para estes testes. O ideal seria dispor de amostras integrais de pelo menos dois metros de testemunhos de sondagem H, equivalentes a cerca de 10 kg.

Após os ensaios de variabilidade de moagem, as amostras são preparadas para os ensaios de variabilidade de cianetação em garrafão, cujos resultados permitem prever as recuperações de ouro por bloco da jazida e a avaliar se existe uma parcela considerável de minério que requer um novo estudo de otimização de processo. Se este fato ocorrer, uma amostra com estes minérios problemáticos é composta para ser submetida ao procedimento descrito no item anterior, procurando-se melhorar o seu desempenho no processo. Trata-se, assim, de um processo iterativo, que promove um aprimoramento contínuo, assegura a representatividade da amostra e fornece uma distribuição de dados bastante confiável para demonstrar a viabilidade da jazida. Este procedimento vai levar a estudos de amostras com variações substanciais de teor e mineralogia, o que pode antecipar problemas de processo que só seriam detetados no decorrer da lavra, conforme experiência ocorrida com os minérios de Fazenda Brasileiro, Fazenda Maria Preta e Igarapé Bahia (item 6.5). É prudente verificar o efeito da granulometria de moagem e

adição de cianeto sobre a extração de ouro em algumas amostras do estudo de variabilidade (por exemplo, 5 a 10% das amostras).

Muitas vezes, durante a pesquisa geológica para a pré-viabilidade são sondados alvos secundários, que vão gerar amostras para serem estudadas conforme o procedimento da etapa do estudo conceitual.

Os dados obtidos serão utilizados para revisar a engenharia conceitual. Na área de cianetação, os maiores avanços ocorrerão no aumento da precisão da estimativa da recuperação de ouro e consumo de cianeto, além obviamente de maior precisão na estimativa do investimento devido ao maior grau de engenharia utilizado. Os parâmetros de menor impacto na economia do processo, como tempo de residência, densidade de polpa e adição de cal não deverão merecer atenção especial nesta etapa (a não ser que nos estudos de variabilidade tenham sido detetados problemas imprevistos), uma vez que considera-se que a metodologia utilizada já tenha permitido uma abordagem suficiente destes parâmetros durante o estudo conceitual.

Idealmente, a engenharia para o estudo de pré-viabilidade deve servir de base para o Plano de Aproveitamento Econômico a ser submetido ao DNPM.

6.6.4 Estudo de viabilidade final

O desenvolvimento de processo de cianetação em tanques agitados para a etapa de pré-viabilidade enfocou principalmente a variabilidade da jazida em relação à resposta ao processo, sem necessariamente concluir esta atividade, uma vez que ela depende da continuidade das sondagens para obter as amostras necessárias.

À medida que são feitos novos furos de sondagem “*in-fill*” para o detalhamento final das reservas e teores, continua-se a colheita de amostras para os estudos de variabilidade, conforme discutido no item anterior. São colhidas mais cerca de 50 a 100 amostras para os ensaios de variabilidade. O número de amostras pode variar em função das características e tamanho da jazida. Altman ¹⁷⁴ propõe um procedimento estatístico

para avaliar se a quantidade de ensaios de beneficiamento realizada é suficiente para representar o minério que será processado. Tal procedimento pode ser de grande serventia para assegurar a representatividade da amostra.

Nesta etapa, os estudos de lavra e o conhecimento da variabilidade da resposta do minério à cianetação já terão evoluído o suficiente para permitir a composição de amostras por tipo de minério (se pertinente) e período de lavra. Recomenda-se submeter pelo menos mais três amostras de cada tipo de minério à abordagem do MINTEK (item 4.4.1) para otimização final do processo. Estas amostras devem ser compostas para representar, por exemplo, o primeiro quartil da vida da mina, o segundo quartil e a metade final das reservas. Tais amostras devem ser submetidas também aos ensaios complementares para a definição do processo, como espessamento e tratamento de efluentes.

O desenvolvimento de processos de cianetação de minérios de fácil processamento em tanques agitados não requer ensaios piloto. Entretanto, a moagem semi-autógena, cada vez mais utilizada para reduzir custos, pode requerer a realização de ensaios piloto, principalmente se o projeto for ser submetido à auditoria para financiamento. Neste caso, muitas vezes é necessário abrir galerias para retirar a amostra necessária.

O estudo de engenharia da etapa anterior é, finalmente, revisado para incorporar as novas informações e gerar o projeto básico, que servirá de base à engenharia de detalhe para implantação industrial.

7 CONCLUSÕES

A indústria do ouro passa por um período de crise em função dos baixos preços do metal, aliado ao fraco desempenho da indústria mineral em geral. As empresas de mineração têm sido pressionadas pelos acionistas na busca de rentabilidades mais elevadas. Entre as alternativas utilizadas para enfrentar este cenário destacam-se o desenvolvimento de projetos com mais baixo custo de produção e o adiamento, ou mesmo abandono, dos projetos menos atrativos.

Por si só, o conhecimento técnico não é suficiente para desenvolver projetos de baixo custo de produção. Como a indústria do ouro utiliza uma tecnologia madura, facilmente acessível no mercado, ela isoladamente não é suficiente para alcançar significativas reduções de custos e, assim, constituir em diferencial competitivo. O principal desafio a ser enfrentado para obter êxito nesta alternativa é como descobrir ou adquirir depósitos de qualidade excepcional, cada vez mais difíceis de serem encontrados. A chave do problema está em como utilizar a tecnologia para este objetivo. Deve-se aliar a capacidade técnica à visão de negócios, à habilidade gerencial e a modernos elementos organizacionais e de suporte para buscar, encontrar e desenvolver projetos, com eficiência, em jazidas de valor intrínseco elevado.

A análise crítica do desenvolvimento de projetos de cianetação em tanques agitados, realizada neste enfoque, mostrou que:

- O desenvolvimento de processos persegue objetivos comuns com o desenvolvimento do projetos, ou seja, o sucesso do negócio. Desta maneira, a estratégia de ensaios para determinar os parâmetros de processo deve estar em sintonia com os objetivos, estratégias, fatores de competitividade e fatores de sucesso do negócio.
- O levantamento e a análise dos fatores de sucesso de projetos minerais, dos fatores de lucratividade da indústria do ouro, em conjunção com os

parâmetros do processo de cianetação em tanques agitados, permitiram estabelecer as seguintes diretrizes:

- ✓ O desenvolvimento de processos deve ser realizado com foco no negócio, por meio de uma abordagem sistêmica e multi-disciplinar, em sintonia com as estratégias, objetivos e etapas do processo decisório das empresas. Devem-se usar critérios econômicos para a tomada de decisão.
- ✓ A equipe de processo deve possuir um sólido conhecimento da tecnologia utilizada e dispor de “*feed-back*” de projetos analisado e estruturado, assim como de um banco de projetos similares para “*benchmarking*”.
- ✓ Ao se planejar os ensaios para desenvolver o processo deve-se considerar cuidadosamente a minimização de riscos. É necessário fazer um planejamento inicial bem formulado, programando-se os ensaios em etapas desde as fases iniciais da pesquisa geológica, com atenção especial em assegurar a representatividade das amostras.
- ✓ Os fatores externos ao projeto devem ser considerados amplamente, incluindo-se as oportunidades, ameaças, requisitos ambientais de aceitação internacional, assim com fatores políticos e governamentais.
- A partir destas diretrizes foram identificadas atividades importantes para o desenvolvimento de processos, consideradas na análise objeto desta tese:
 - ✓ Análise da sensibilidade da economia de cianetação em função dos parâmetros de processo.
 - ✓ Análise do impacto dos objetivos, estratégias e critérios empresariais sobre o desenvolvimento de processo.
 - ✓ Estabelecimento de banco de dados de projetos similares para “*benchmarking*” no desenvolvimento de processo.
 - ✓ Estruturação e análise do “*feed-back*” de projetos quanto ao impacto dos parâmetros e variáveis de processo sobre a extração de ouro por cianetação em tanques agitados.
 - ✓ Análise das estratégias de ensaios para desenvolvimento de processos.
- A análise da sensibilidade da economia de cianetação em função dos parâmetros de processo revelou que uma maior atenção deve ser dada à

recuperação de ouro, granulometria de moagem e consumo de cianeto, nesta ordem.

- É importante considerar o impacto dos objetivos, estratégias e critérios empresariais sobre o desenvolvimento de processos. As metas econômicas e de capacidade determinam o tamanho e o teor mínimo de um depósito para que ele seja de interesse da empresa, além de influenciarem os diagramas lógicos de decisão entre as rotas de processo. Estratégias de exploração, de aquisição e de venda de ativos minerais podem levar a abordagens de desenvolvimento de processo diferentes. Similaridades de operações / estratégias de desenvolvimento podem levar uma empresa a preferir um determinado processo ou configuração de usina, ou mesmo a se especializar no aproveitamento de oportunidades específicas.
- A disponibilidade de um banco de dados de projetos similares para “*benchmarking*” é importante para balizar os parâmetros de processo, avaliar a sua posição competitiva, buscar a melhor prática de desenvolvimento e concentrar esforços para estudar os parâmetros mais relevantes.
- O “*feed-back*” dos projetos em que o Autor trabalhou, após ser analisado, estruturado e avaliado em relação à extração de ouro, indicou práticas e cuidados a serem tomados no desenvolvimento de processos, com ênfase para a metodologia e condições de ensaios para definir a granulometria de moagem, o consumo de cianeto e o tempo de residência.
- As estratégias de ensaios para desenvolvimento de processos existentes na literatura necessitam ser adaptadas às diretrizes levantadas nesta tese para ficarem em sintonia com o desenvolvimento dos negócios e maximizarem o grau de sucesso dos projetos:
 - ✓ A estratégia de ensaios deve ser necessariamente vinculada ao processo decisório de desenvolvimento dos projetos, em sintonia com os objetivos e estratégias adotados pela empresa.
 - ✓ Na fase inicial de pesquisa geológica, os ensaios devem ter caráter exploratório, dar uma idéia das possíveis rotas de processo, recuperações de ouro e custos operacionais para, então, decidir se compensa iniciar o

desenvolvimento do projeto e, em caso positivo, servir de suporte ao planejamento da amostragem e ensaios tecnológicos.

- ✓ Na etapa inicial de estudo conceitual deve-se fazer a triagem do processo por meio de ensaios diagnósticos. Confirmando-se a seleção do processo de cianetação em tanques agitados, uma amostra de cada tipo de minério deve ser submetida a um procedimento para estudo e otimização das variáveis de processo, levantamento de aspectos críticos para o beneficiamento e estabelecimento de um ensaio padrão para investigar a variabilidade de recuperação de ouro da jazida, além de servir de suporte à programação de todas as atividades futuras de desenvolvimento do processo.
- ✓ O objetivo dos ensaios tecnológicos para o estudo de pré-viabilidade, além do equacionamento de aspectos críticos eventualmente encontrados na etapa anterior, deve estar voltado ao levantamento da variabilidade da jazida em relação ao processo selecionado, buscando-se aumentar a precisão do estudo e assegurar a representatividade das amostras.
- ✓ Na etapa de viabilidade final, deve-se prosseguir com o levantamento da variabilidade da jazida. De posse de maior conhecimento do comportamento do minério no processo e definição do plano de lavra, devem ser compostas amostras por períodos de lavra para otimização final do processo e definição dos parâmetros de processo definitivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 MACKENZIE, B. W. **Economic guidelines for mineral exploration**. Rio de Janeiro, s. n., 1995. 500p. /Curso apresentado a CVRD, Rio de Janeiro, 1995/
- 2 CROWSON, P. The supply of minerals. **Mining Journal**, v. 332, n. 8519, p. 5-11, 1999. Supplement.
- 3 NARDI, R. P. et. al. **Planejamento estratégico de tecnologia: ouro**. Belo Horizonte, Companhia Vale do Rio Doce/SUMEN/SUTEC/DOCEGEO, 1996. 56p. (Documento Interno Companhia Vale do Rio Doce)*
- 4 SUPERINTENDÊNCIA DE METAIS NOBRES / Companhia Vale do Rio Doce. **Ciclo do planejamento estratégico de 1995: plano de negócios da área do ouro**. Rio de Janeiro, 1995. 30 p. (Documento Interno Companhia Vale do Rio Doce)*
- 5 BURTON, P. Trends shaping the gold industry into the millenium. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO OURO, 11., Rio de Janeiro, 1998. **Anais**. São Paulo, Minérios & Minerales, 1998. 26p.
- 6 KAHN, H.; TASSINARI, M. M. L.; CASSOLA, M. S. Metodologias de caracterização de minérios auríferos. In: SIMPÓSIO EPUSP DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NA ENGENHARIA E INDÚSTRIA MINERAL, São Paulo, 1990. **Anais**. São Paulo, EPUSP, 1990. p. 421-50.
- 7 LLOYD, G. W.; SEHIC, O. A. Carbon-in-pulp testwork and flowsheet development. In: CARBON-IN-PULP SEMINAR, Perth, 1982. **Proceedings**. Victoria, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1982. p. 131-45.
- 8 WILSON, R. A.; DAWSON, H. A. Metallurgical flowsheet development. In: MULAR, A. L.; BHAPPU, R. B. **Mineral processing plant design**. 2. ed. New York, Society of Mining Engineers of AIME, 1985. p. 183-200.
- 9 HANKS, J. T. **Process development for exploration projects**. Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1997. Preprint 97-41. /Apresentado ao SME ANNUAL MEETING, Denver, 1997/
- 10 CAMN, T. W. **Simplified cost models for prefeasibility mineral evaluations**. Washington, United States Department of Interior. US Bureau of Mines, 1991. 35p. (USBM. Information Circular, 9298).
- 11 PINCOCK ALLEN. **Capital and operating cost models for western U.S. gold mines, revisions**. Lakewood, Pincock Allen & Holt, 1987. (Confidential Report)*
- 12 O'HARA, T. A. Quick guides to the evaluation of orebodies. **CIM Bulletin**, v. 73, n. 814, p. 87-99, Feb. 1980.
- 13 GOMES, J. I. A. **Preliminary economic evaluation of brasilian gold orebodies**. Fontainebleau, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1993. 54 p. /Trabalho Final/
- 14 TORRES, V. M. **Sistema especialista para o processamento de minérios de ouro**. São Paulo, 1999. 206p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 15 TORRES, V. M.; CHAVES, A. P.; MEECH, J. A. Process design for gold ores: a diagnostic approach. **Minerals Engineering**, v. 12, n. 3, p. 245-54, 1999.

- 16 WALL, N. C. Feasibility studies for gold projects: an engineering contractors approach. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO OURO, 4., Rio de Janeiro, 1987. **Anais.** São Paulo, Minérios & Minerales, 1987. n.p.
- 17 CHAVES, A. P. **Gerenciamento de projetos de mineração.** São Paulo, EPUSP, 1997. /Notas de aula/
- 18 VALLÉE, M.; CÔTE, D. The guide to evaluation of gold deposits: integrating deposit evaluation and reserve inventory practices. **CIM Bulletin**, v. 85, n. 957, p. 50-61, 1992.
- 19 RUHMER, W. T. **Handbook on the estimation of metallurgical process costs.** Randburg, MINTEK, 1991. 175 p. (Publicação Especial, n. 14)
- 20 NOAKES, M.; LANZ, T. **Cost estimation handbook for the australian mining industry.** Victoria, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1993. 412 p.
- 21 BENSON, D. K.; BLAK, H. Summary shareholders value analysis for mining and metals companies. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO OURO, 11., Rio de Janeiro, 1998. **Anais.** São Paulo, Minérios & Minerales, 1998. 7p.
- 22 MINERAÇÃO SERRA DO SOSSEGO. **Project Sossego: Scoping Study.** Rio de Janeiro, 1999. (Documento Interno da Mineração Serra do Sossego / CVRD / Phelps Dodge)*
- 23 WHAT bankers look for in project loan applications. **Mining Engineering**, v. 30, n. 12, p. 1646-8, Dec. 1978.
- 24 WHITE, L. Bankable feasibility studies: five bankers points the way. **Engineering and Mining Journal**, v. 198, n. 11, p. 16h-16k, Nov. 1997.
- 25 SBRAGIA, R. **Avaliação "ex-post" de projetos de cooperação técnica-procedures for project desinger, ILO.** São Paulo, Faculdade de Economia e Administração USP / Instituto de Estudos Avançados, 1991. 47p. /Documento apresentado ao Programa de Gestão da Cooperação Técnica Internacional/
- 26 CAMPOS, V. F. **Gerência da qualidade total: estratégia para aumentar a competitividade da empresa brasileira.** Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1990. 187 p.
- 27 HICKSON, R. J. **Project management for dummies, or how to improve your project success ratio in the new millenium.** Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2000. 15p. Preprint 00-133 /Apresentado ao SME Annual Meeting, Salt Lake City, 2000/
- 28 CHAMPIGNY, N. Current and best practices in Latin America. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO OURO, 11., Rio de Janeiro, 1998. **Anais.** São Paulo, Minérios & Minerales, 1998. 4 p.
- 29 CHAMPIGNY, N. **Recentes sucessos e fracassos na mineração na América Latina.** s.l., Arthur Andersen, 1999. 19 p. /Apresentado para a Diretoria de Metais Básicos da CVRD/
- 30 ARANTES, D.; MACKENZIE, W. **A posição competitiva do Brasil na exploração e mineração de ouro.** Brasília, DNPM, 1995. 102 p. (Estudos de Política e Economia Mineral, 7)
- 31 OWEN, T. L. **An approach to sucessful development of international mineral projects.** Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2000. Preprint 00-135 17p. /Apresentado ao SME Annual Meeting, Salt Lake City, 2000/
- 32 SILVA, J. O. O efeito do custo operacional na margem bruta das empresas. **Brasil Mineral**, n. 169, p. 30-3, jan./fev. 1999.

- 33 REIS FILHO, E. Princípios econômicos na mineração. **Minérios & Minerales**, n. 249, p. 10-3, jun. 2000.
- 34 VALLÉE, M. Mineral resource + engineering, economic and legal feasibility = ore reserve. **CIM Bulletin**, v. 93, n. 1038, p. 53-61, Mar. 2000.
- 35 BARRY, M. Mitigating financing risks in emerging markets. **Mining Journal**, v. 331, p. 13-5, Oct. 1998. Supplement.
- 36 MARSDEN, J. O.; HOUSE, I. **The chemistry of gold extraction**. London, Ellis Horwood, 1993. 597 p.
- 37 GOODE J. R. et al. Back to basics: the feasibility study. **CIM Bulletin**, v. 84. n. 953, p. 53-61, 1991.
- 38 RATTI, G.; CHAVES, A. P. Análises químicas na indústria mineral - parte 1. **Brasil Mineral**, n. 127, p. 50-5, fev. 1995.
- 39 RATTI, G.; CHAVES, A. P. Análises químicas na indústria mineral - parte 2. **Brasil Mineral**, n. 128, p. 48-51, mar. 1995.
- 40 RATTI, G.; CHAVES, A. P. Análises químicas na indústria mineral - parte 3. **Brasil Mineral**, n. 129, p. 32-7, abr. 1995.
- 41 TORRES, V.; COSTA, R.; NARDI, R. Characterization of gold-bearing ores using diagnostic leaching tests. In: WILKOMIRSKY, I.; SANCHEZ, M.; HECKER, C., eds. **Chemical metallurgy: a volume in memory of Alexander Sutolov**. Concepción, Universidad de Concepción, 1994. v. 3, p. 119-24. /Apresentado ao 4. Meeting of Southern Hemisphere on Mineral Technology; e 3. Latin-American Congress on Froth Flotation - Anais/
- 42 TORRES, V.; COSTA, R. Characterization of gold ores and CIP tailings using a diagnostic leaching technique. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 19., Littleton, 1995. **Proceedings**. New York, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1995. v.1, p. 15-8.
- 43 TORRES, V. **Diagnóstico de lixiviação para minérios de ouro**. São Paulo, 1996. 75p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 44 NARDI, R. P.; PÓVOA, F. V.; COSTA, R. S. Programa para desenvolvimento de processos para minérios de ouro na CVRD. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO OURO, 10., Rio de Janeiro, 1997. **Anais**. São Paulo, Minérios & Minerales, 1997. /Paper 13/
- 45 TORRES, V. M. Desenvolvimento de processo para minérios de ouro—uma abordagem objetiva. **Minérios & Minerales**, n. 224, p. 28-38, 1997.
- 46 BARTLETT, H. E.; HAWKINS, D. M. Process evaluation. In: STANLEY G. G., ed. **The extractive metallurgy of gold in South Africa**. Johannesburg, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1987. p. 745-92. (Monograph Series, 7).
- 47 JOHNS, M. W. **Department of gold and unit operation appraisal on the Almas sample**. Randburg, MINTEK, 1995. (Relatório Técnico)*
- 48 JOHNS, M. W. **Department of gold and unit operation appraisal on the Redenção sample**. Randburg, MINTEK, 1995. (Relatório Técnico)*
- 49 CHAMBERLIN, P. D. Process selection for gold/copper ores. In: RANDOL GOLD FORUM '96. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 303-6.

- 50 K LAPWIJK, P. et al. **Gold survey 2000**. Londres, Gold Field Mineral Services, 2000. 113 p.
- 51 CHENDER, M. As estratégias corporativas e o custo de descobrir ouro. **Minérios: Extração & Processamento**, n. 161, p. 28-33, jul./ago. 1990.
- 52 SUPERINTENDÊNCIA DE METAIS NOBRES / Companhia Vale do Rio Doce. **Ciclo do planejamento estratégico de 1996: plano de negócios da área do ouro**. Rio de Janeiro, 1996. 37p. (Documento Interno da Companhia Vale do Rio Doce)*
- 53 CARIDE, D. Preço afeta exploração de ouro. **Gazeta Mercantil**, São Paulo, 2 out. 1997.
- 54 VALÊNCIO, N. Eldorado revisitado. **Minérios & Minerales**, n. 223, p.13-21, Out. 1997.
- 55 CARIDE, D. Mercado de ouro cai, mas expectativas são otimistas. **Gazeta Mercantil**, São Paulo, 29 set. 1998.
- 56 BRASIL. Secretaria das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa de reservas e produção de ouro no Brasil**. Rio de Janeiro, CPRM, 1998.
- 57 WADSWORTH, M. E. Advances in gold and silver practice. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 19., 1994. **Proceedings**. Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1994. v. 2.
- 58 NARDI, R.P.; NOGUEIRA, P. R. S. **Relatório de viagem à África do Sul**. Belo Horizonte, CVRD, 1992. 2 v. (Relatório Técnico)
- 59 NARDI, R. P.; PIRES, M.A. **Missão técnica aos Estados Unidos**. Belo Horizonte, CVRD, 1994. 2 v. (Relatório Técnico)
- 60 MAZONI, P. R. et al. **Plano diretor de capacitação em cobre**. Belo Horizonte, CVRD/GETEK, 1998. (Documento Interno da Companhia Vale do Rio Doce)*
- 61 MORE cost saving innovations-heap & dump leaching. **Mining Opportunity Bulletin**, v. 5, n. 2, p. B3, 1998
- 62 GOLD-OPTIMIZING heap leaching profitability. **Mining Opportunity Bulletin**, v. 6, n. 2, p. 8, 1999.
- 63 FLEMING, C. Resin-in-pulp as alternative process for gold recovery from cyanide leach slurries. In: ANNUAL CANADIAN MINERAL PROCESSORS CONFERENCE, 23., Ottawa, 1991. Ottawa, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1991. 14p. /Separata/
- 64 SCOTT, P. D. et al. Gold resin technology and mini gold refineries. In: RANDOL GOLD FORUM '98. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1998. p. 133-41.
- 65 NARDI, R. P. O tratamento de minérios complexos de ouro-cobre. **Minérios & Minerales**, n. 232, p. 38-40, set. 1998.
- 66 BOTZ, M. M.; PARODI, S. Removal of copper from cyanide leach solutions. In: RANDOL COPPER HYDROMET '97. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1997. 7p.
- 67 BOTZ, M. M.; MUDDER, T. Cyanide recovery for silver leaching operation. In: RANDOL GOLD FORUM '98. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1998. p. 243-6.

- 68 FLEMING, C. A.; TRANG, C. V. Review of options for cyanide recovery at gold and silver miners. In: RANDOL GOLD FORUM '98. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1998. p. 313-23.
- 69 SCERESINI, B. The filblast cyanidation system makes modular plants a reality. In: RANDOL GOLD FORUM '96, Squaw Creek, 1996. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 369-74.
- 70 EVELIN, S. S. **Viabilização da recuperação de ouro de minérios primários por lixiviação em pilha mediante o uso de britadores não convencionais. Um estudo de caso: o minério primário da mina de Almas - Paiol, To.** São Paulo, 2000. 132p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 71 NARDI, R. P. **Projeto Fazenda Brasileiro. Avaliação do produto do moinho de rolos de alta pressão.** Belo Horizonte, CVRD, 1990. 67 p. (Relatório Técnico)
- 72 DUNNE, R.; GOULSBRA A.; DUNLOP, I. High pressure grinding rolls and the effect on liberation: comparative test results. In: RANDOL GOLD FORUM '96. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 46-54.
- 73 BAUM, W.; PATZELT, N.; KNECHT, J. Metallurgical benefits of high pressure roll grinding for gold and copper recovery. In: Kawatra, S.K., ed. **Comminution practices**. Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1997. p. 111-6. /Apresentado ao 126. Annual Meeting and Exhibit of the Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Denver, 1997/
- 74 DRIVING costs down. **Mining Opportunity Bulletin**, v. 5, n. 2, p.B1, 1998.
- 75 GOLD-COSTS down dramatically. **Mining Opportunity Bulletin**, v. 6, n. 2, p. 2, 1999.
- 76 KOSIK, G. A.; BENNETT, C. The value of orebody power requirement profiles for SAG circuit design. In: **ANNUAL CANADIAN MINERAL PROCESSORS CONFERENCE**, 31., Ottawa, 1999. Ottawa, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1999. 11p. /Separata/.
- 77 DELBONI JUNIOR, H. Moagem autógena: método de dimensionamento e otimização da operação. **Brasil Mineral**, n. 180, p. 28-39, jan./fev. 2000.
- 78 FILMER, A. O.; LAWRENCE, P. R.; HOFFMANN, W. A comparison of cyanide, thiourea and chlorine as lixiviantes for gold. In: **REGIONAL CONFERENCE ON GOLD MINING, METALLURGY AND GEOLOGY. Proceedings**. Victoria, The Aus.I.M.M., 1984. p. 279-88.
- 79 AVRAAMIDES, J. Prospects for alternative leaching systems for gold: a review. In: **SEMINAR ON CARBON-IN-PULP TECHNOLOGY IN THE EXTRACTION OF GOLD**, Perth and Kalgoorlie, 1982. **Carbon-in-pulp technology for the extraction of gold**. Parkville, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1982. p. 369-91. (Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Symposia Series, 32)
- 80 SEVERS, K. New process for leaching copper from concentrates. **Chemical Engineering in Australia**, p. 10-4, Dec./ Feb. 1998.
- 81 BHAPPU, R. R.; SEVERS, K. Technological advances in treating copper concentrates: the INTEC Copper Process. In: **SME ANNUAL MEETING**, Denver, 1999. Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1999. 8 p. /Separata/
- 82 CHAVES, A. P. Métodos de concentração e extração de ouro. **Brasil Mineral**, v. 2, n. 14, p. 26-36, 1985.

- 83 HENLEY, K. J. The role of mineralogy in gold ore metallurgy. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO OURO, 2., Rio de Janeiro, 1986. *Anais.* s. L., ABRAMO, 1986. p. 1-58. /Paper 7/
- 84 McQUISTON, F. W.; SHOEMAKER, R. S. **Gold and silver cyanidation: plant practice monograph.** New York, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1975.
- 85 RANDOL INTERNATIONAL LTD. **Gold and silver recovery innovations: phase III.** Golden, 1987. v. 4, p. 1935-2551.
- 86 ADDISON, R. Gold and silver extraction from sulfide ores. *Mining Congress Journal*, v. 66, n. 10, p. 47-54, 1980.
- 87 HORTA, R. M. **O estado da arte em tratamento de minérios de ouro.** São Paulo, 1996. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 88 MADEIRA, R. G. **O estado da arte da cianetação de minérios auríferos.** São Paulo, 1997. 108 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 89 BROOY, H. G.; LINGE, H. G.; WALKER, G. S.. Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*, v. 7, n. 10, p. 1213-41, 1994.
- 90 HEDLEY, N.; TABACHNICK, H. **Chemistry of cyanidation.** Rev. ed. s.L., American Cyanamid Company, 1968. 54 p. (Mineral Dressing Notes, n. 23)
- 91 CIMINELLI, V. S. T. Princípios da extração do ouro. In: Companhia Vale do Rio Doce. **Hidrometalurgia do ouro.** s.L., Fazenda Brasileiro, 1992. p. 1.1-1.36. /Curso apresentado a CVRD/
- 92 HAQUE, K. E. The role of oxygen in cyanide leaching of gold ore. *CIM Bulletin*, v. 85, n. 963, p. 31-8, 1992.
- 93 FLEMING, C. A. Hydrometallurgy of precious metals recovery. *Hidrometallurgy*, v. 30, p. 127-62, 1992.
- 94 YANNOPOULOS, J. C. **The extractive metallurgy of gold.** New York, Van Nostrand Reinhold, 1991. 281 p.
- 95 GASPARRINI, C. The mineralogy of gold and its significance in metal extraction. *CIM Bulletin*, v. 76, n. 851, p. 144-53, 1983.
- 96 HAUSEN, D. M. Characterizing the textural features of gold ores for optimizing gold extraction. *JOM*, v. 52, p. 14-6, Apr. 2000.
- 97 RANDOL INTERNATIONAL LTD. **Gold and silver innovations.** Bethlehen, 1981. v. 1.
- 98 STOYCHEVSKY, M.; WILLIAMS, L. R. Influence of oxygen, hydrogen peroxide and ozone on dissolution of gold from pyrite ore. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*. Section C, v. 102, p. 93-8, 1993.
- 99 JARA, J. O.; BUSTOS, A. A. Effect of oxygen on gold cyanidation: laboratory results. *Hidrometallurgy*, v. 30, p. 195-210, 1992.
- 100 LORÖSH, J. Peroxide-assisted gold leaching. *Engineering and Mining Journal*, v. 192, n. 6, p. 36-7, June 1991. /Apresentado ao Canadian Mineral Processors Annual Meeting, Vancouver, 1990/

- 101 LORÖSH, J. Peroxide-assisted leach: three years of increasing success. In: RANDOL GOLD FORUM '90. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1990. p. 215-9.
- 102 DESCHÊNES, G.; WALLINGFORD, G. Effect of oxygen and lead nitrate on the cyanidation of a sulphide bearing gold ore. **Minerals Engineering**, v. 8, n. 8, p. 923-31, 1995.
- 103 HOECHER, W. Should your gold plant be using oxygen - how to find out. In: RANDOL GOLD FORUM '96, Squaw Creek, 1996. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 459-64.
- 104 HOECHER, W.; WATSON, S. Oxygen enhanced gold leaching - case studies. In: RANDOL GOLD FORUM '96, Squaw Creek, 1996. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 459-64.
- 105 PERRY, R. et al. Low pH cyanidation of gold. **Minerals Engineering**, v. 12, n. 12, p. 1431-40, 1999.
- 106 BATH, M. D.; DUNCAN, A. J.; RUDOLPH E. R. Some factors influencing gold recovery by gravity concentration. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 73, p. 363-83, June 1973.
- 107 WELLINGS, D. E. A. Recent developments in cone and spiral separators. **World Mining Equipment**, v. 10, n.6, p. 20-5, June 1986.
- 108 FERREE, T. J. Uma opção na recuperação de finos. **Minérios: Extração & Processamento**, n. 92, p. 59-60, set. 1984. / Apresentado ao 1. Simpósio Internacional de Recuperação de Metais Preciosos, Reno /
- 109 HARRIS, D. The Knelson concentrator: applications in Australia. In: REGIONAL CONFERENCE ON GOLD MINING, METALLURGY AND GEOLOGY. **Proceedings**. s.L., The Aus.I.M.M, 1984. p. 101-6.
- 110 BOYDELL, D. W. The recovery of gold from South African ores. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO OURO, 2., Rio de Janeiro, 1986. **Anais**. s. L., ABRAMO, 1986. p. 1-31. / Paper 3 /
- 111 PHILLIPS, A. B.; PATERSON, D. B. The lock-up of gold in run-of-mine mills at Randfontein Estates. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 88, n. 10, p. 333-43, Oct. 1988.
- 112 FEATHER, C. E.; KOEN, G. M. The significance of the mineralogical and surface characteristics of gold grains in the recovery process. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, v.73, n.7, p. 223-34, Feb. 1973.
- 113 GRAVITY gold concentration: special feature at conference. **Mining Opportunity Bulletin**, v. 2, n. 5, p. B10, 1996.
- 114 HEALEY, S. Gravity concentration at TVX Mineral Hill Mine. In: RANDOL GOLD FORUM '96, Squaw Creek, 1996. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 75-7.
- 115 GREGORY, S. et al. Gravity concentration at the Telfers and New Celebration Gold Mines. In: RANDOL GOLD FORUM '96, Squaw Creek, 1996. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 79-85.
- 116 JOHNSON, R. H. Gravity concentration at Viceroy's Castle Mountain Mine. In: RANDOL GOLD FORUM '96, Squaw Creek, 1996. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 87-92.

- 117 HEWITT, B. Gravity concentration at Campbell Mine. In: RANDOL GOLD FORUM '96, Squaw Creek, 1996. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 93-6.
- 118 THOMAS, J. A.; BAKER, F. R.; WAYNE, A. P. **Optimização dos circuitos de lixiviação e absorção no processo CIP**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO OURO, 2., Rio de Janeiro, 1986. **Anais**. s.L., ABRAMO, 1986. 27 p. /Paper 13/.
- 119 RANDOL INTERNATIONAL LTD. **Gold and silver innovations: trip reports**. Bethlehen, 1981. v.1.
- 120 GRANATO, M. **Metalurgia extrativa do ouro**. Brasília, DNPM/CETEM, 1986. 79 p. (Série Tecnologia Mineral, n. 37; Seção Metalurgia Extrativa, n. 14)
- 121 NICOL, M. J.; FLEMING, C. A.; PAUL, R. L. The chemistry of the extraction of gold. In: STANLEY G. G., ed. **The extractive metallurgy of gold in South Africa**. Johannesburg, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1987. p. 831-901. (Monograph Series, n.7)
- 122 CHIMENOS, J. M. et al. Kinetics of the reaction of gold cyanidation in the presence of a thallium(I) salt. **Hydrometallurgy**, v. 44, p. 269-86, 1997.
- 123 LORENZEN, L.; VAN DEVENTER, J. S. V. Electrochemical interactions between gold and its associated minerals during cyanidation. **Hydrometallurgy**, v. 30, p. 177-94, 1992.
- 124 CRUNDWELL, K. F.; GODORR S. A. A mathematical model of the leaching of gold in cyanide solutions. **Hydrometallurgy**, v. 44, p. 147-62, 1997.
- 125 COSTA, R. S. et al. **Process development options for a complex gold-copper ore**. S. n. t. /Apresentado ao International Symposium on the Processing of Complex and Refractory Ores, Bulawayo, 1997/
- 126 DREISINGER, D. B. et al. Solvent extraction eletrowinning recovery of copper and cyanide: Recent developments. In: RANDOL GOLD FORUM '96. **Proceedings**. Golden, Randol International., 1996. p. 315-9.
- 127 NGUYEN, H. H.; TRAN T.; WONG, P. M. L. Copper interactions during the dissolution of gold. **Minerals Engineering**, v. 10, n. 5, p. 491-505, 1997.
- 128 SCERESINI, B. Filblast application in copper-gold ores. In: RANDOL COPPER HYDROMET ROUNDTABLE '95. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1995. p. 45-9.
- 129 YOUNTS, B. Comercial applicability of AuGMENT's copper-gold cyanidation technology. In: RANDOL GOLD FORUM '96. **Proceedings**. Golden, Randol International, 1996. p. 33-6.
- 130 WEICHSELBAUN, J. **Leach circuit optimization testwork scope**. s.L., Anglo-American Research Laboratories, 1994. 5p. (Relatório técnico)
- 131 KONDOS, P. D.; DESCHÊNES, G.; MORRISON, R. M. Process optimization studies in gold cyanidation. **Hydrometallurgy**, v. 39, p. 235-50, 1995.
- 132 FIUZA, M. R.; SILVA, T. J.; NARDI, R. P. Concepção do processo de beneficiamento do minério primário de ouro de Fazenda Brasileiro. In: ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, 2.; ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 12., Rio de Janeiro, 1987. **Anais**. s. L., s. ed., 1987. v. 2, p. 447-64.

- 133 DIAS GOMES, A. M. **Avaliação técnica dos processos de cianetação e adsorção da Mina de Fazenda Brasileiro - CVRD**. São Paulo, 1997. 107p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- 134 PROJETO ALMAS - Uma mina de ouro muda o perfil de Tocantins. **Jornal da Vale**, n. 197, p.1-4, maio 1996.
- 135 MINERCONSULT. **Projeto Serra Leste: estudo de pré-viabilidade**. Belo Horizonte, 1996. 179 p. (Documento Interno Companhia Vale do Rio Doce)*
- 136 BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo, Edgard Blucher, 1987. 143 p.
- 137 SUPERINTENDÊNCIA DE METAIS NOBRES / Companhia Vale do Rio Doce. **Projeto Igarapé Bahia: estudo de pré-viabilidade**. Rio de Janeiro, 1996. 212 p. (Documento Interno Companhia Vale do Rio Doce)*
- 138 DIRETORIA DE METAIS NOBRES / Companhia Vale do Rio Doce. **Relatório gerencial de custos**. Belo Horizonte, 1999. (Documento Interno da Companhia Vale do Rio Doce)*.
- 139 HUMPHREYS, K. K.; MULAR, A. L. Capital and operating cost estimation. In: MULAR, A. L.; JERGENSEN, G. V. **Design and installation of comminution circuits**. New York, AIMME, 1982. p. 84-9.
- 140 CAVENDER, B. Determination of the optimum lifetime of a mining project using discounted cash flow and option pricing techniques. **Mining Engineering**, v. 44, n. 10, p. 1262-8, Oct. 1992.
- 141 VASCONCELLOS, E.; WAAK R.; PEREIRA R. Avaliação tecnológica da empresa: estudo de caso. In: VASCONCELLOS E., coord. **Gerenciamento da tecnologia: um instrumento para a competitividade empresarial**. São Paulo, Edgard Blücher, 1992. p. 21-38.
- 142 SILVA, T. J. **Estudo de cianetação dos minérios sulfetados de ouro de Fazenda Brasileiro**. Belo Horizonte, CVRD, 1986. 79 p. (Relatório Técnico)
- 143 FREITAS, L. R. **Projeto ouro Fazenda Brasileiro - Estudo de sedimentação, determinação de Wi e cianetação de algumas amostras de minério de Fazenda Brasileiro**. Belo Horizonte, CVRD, 1992. 46 p. (Relatório Técnico)
- 144 NARDI, R. P. **Projeto ouro Fazenda Brasileiro - Caracterização tecnológica dos minérios sulfetados - Subníveis 04, 05 e nível 80**. Belo Horizonte, CVRD, 1988. 72 p. (Relatório Técnico)
- 145 SILVA, T. J. **Projeto ouro Fazenda Brasileiro - Estudo de caracterização e concentração de amostras de dois tipos de minérios de ouro: pirrotítico e carbonoso**. Belo Horizonte, CVRD, 1991. 48 p. (Relatório Técnico)
- 146 MADEIRA, R. G. **Estudo da simulação do processo CIP de Fazenda Brasileiro - Relatório de Progresso 5**. Belo Horizonte, CVRD, 1995. 48 p. (Relatório Técnico)
- 147 MADEIRA, R. G. **Estudo de caracterização do minério de Fazenda Brasileiro - Relatório de Progresso 2**. Belo Horizonte, CVRD, 1994. 34 p. (Relatório Técnico)
- 148 NARDI, R.P. **Projeto Ouro Fazenda Brasileiro - Caracterização tecnológica dos minérios sulfetados - Sub-nível 07**. Belo Horizonte, CVRD, 1989. 37 p. (Relatório Técnico)
- 149 GONÇALVES, L. R. L. **Influência do tempo de pré-aeração na recuperação de ouro no minério de Fazenda Brasileiro**. Belo Horizonte, CVRD, 1996. 15 p. (Relatório Técnico)

- 150 NARDI, R. P.; TEIXEIRA, R. H. A. **Ensaio para treinamento de técnicos de Fazenda Brasileiro.** Belo Horizonte, CVRD, 1997. 5 p. (Relatório Técnico)
- 151 PARAENSE FILHO, O. G. **Desenvolvimento de tecnologia, estudos e pesquisa na Usina CIP.** 16 p. / Apresentado ao Seminário Interno de Tecnologia do Ouro da CVRD, Belo Horizonte, 1993 /
- 152 SOUZA, D. R. **Adição de peróxido de hidrogênio na cianetação de amostra de Itabira.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1997. 9 p. (Relatório Técnico)
- 153 NARDI, R. P.; SILVA, T. J. **Projeto Fazenda Maria Preta - Estudos com o minério subterrâneo do Alvo Antas I e ensaios complementares.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1988. 52 p. (Relatório Técnico)
- 154 NARDI, R. P.; COSTA, R. S. **Consolidação dos estudos de beneficiamento dos minérios carbonosos de Fazenda Maria Preta.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1993. 13 p. (Relatório Técnico)
- 155 SOUZA, D. R. **Estudo comparativo CIP x CIL de amostras contendo minério carbonoso.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1993. 16 p. (Relatório Técnico)
- 156 TORRES, V. **Caracterização dos rejeitos de Fazenda Brasileiro.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1993. 18 p. (Relatório Técnico)
- 157 TORRES, V. **Diagnostic leaching de rejeitos de Fazenda Brasileiro - Amostra de nov/92 a jan/93.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1993. 12p. (Relatório Técnico)
- 158 TORRES, V. **Diagnostic leaching de rejeitos de Fazenda Brasileiro (II).** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1993. 12 p. (Relatório Técnico)
- 159 TORRES, V. **Diagnostic leaching de rejeitos de Fazenda Brasileiro (III).** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1993. 18p. (Relatório Técnico)
- 160 TORRES, V. **Diagnostic leaching de rejeitos de Fazenda Brasileiro - Fase IV.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1993. 10p. (Relatório Técnico)
- 161 TORRES, V. **Diagnostic leaching de rejeitos de Fazenda Brasileiro - Fase V.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1994. 10p. (Relatório Técnico)
- 162 COSTA, R. S. **Caracterização tecnológica de amostras de alimentação e rejeito da Usina CIP de Fazenda Brasileiro.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1993. 35 p. (Relatório Técnico)
- 163 SOUZA, D. R. **Projeto Ouro Fazenda Brasileiro - Estudo CIP x CIL com amostras do Corpo C e alimentação CIP.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1994. 18p. (Relatório Técnico)
- 164 DIAS GOMES, A. M. Cianetação de minérios de ouro em tanques agitados: uma discussão prática. *Minérios & Minerales*, n. 238, p. 39-44, maio 1999.
- 165 NARDI, R. P. **Projeto Ouro Cauê - Estudo de concentração de itabirito aurífero.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1986. 34 p. (Relatório Técnico)
- 166 NARDI, R. P. **Projeto Ouro Cauê - Estudo de concentração de itabirito aurífero de Cauê e Conceição.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1987. 37p. (Relatório Técnico)

- 167 COSTA, R. S. **Relatório de caracterização dos efluentes da Planta de Fazenda Brasileiro.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1987. 37 p. (Relatório Técnico)
- 168 COSTA, R. S. **Projeto Ouro Fazenda Brasileiro - Tratamento de arsênio da barragem de rejeitos de Fazenda Brasileiro.** Belo Horizonte, CVRD / SUTEC, 1989. 59 p. (Relatório Técnico)
- 169 DOREY, R; VAN ZYL, D.; KIEL, J. Overview of heap leaching technology. In: VAN ZYL, D.; HUTCHISON, I. P. G.; KIEL, J. E. **Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects.** Littleton, SME, 1988. p. 3-22.
- 170 KAPPES, D. Heap leach or mill? – Economic consideration in a period of stable gold prices. In: RANDOL GOLD FORUM '98. **Proceedings.** Golden, Randol International, 1998. p. 37-8.
- 171 FRANÇOIS-BONGARÇON, D. The practice of the sampling theory of broken ores. **CIM Bulletin**, v. 86, n. 970, p. 75-81, May 1993.
- 172 ASSIBEY-BONSU, W. Summary of present knowledge on the representative sampling of ore in the mining industry. **The Journal of South Africa Institute of Mining and Metallurgy**, v. 96, p. 286-93, Nov. 1996.
- 173 DELBONI JR., H. **Caracterização de amostras e dimensionamento do circuito de moagem do Sossego.** São Paulo, HDA, 2000. 47 p. (Relatório Técnico)
- 174 ALTMAN, K. A.; TAYLOR, D. L.; SMITH, R. W. **How much testing should I do? Are the samples really representative?** Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2000. 11p. Preprint 00-71 /Apresentado ao SME Annual Meeting, Salt Lake City, 2000/

* Documento acessível mediante autorização da empresa.

ANEXO A

**Avaliação do impacto das variáveis de processo sobre a economia da
cianetação**

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

Capacidade (t/a):	1.000.000	Opex caso base (US\$/t)		17,00	Recup +3				Recup -5				
	5,00	Opex moagem (US\$/t)	Opex tanques (US\$/t)	1,91	60000	60330	59670	60000	60000	60000	60000	60000	60000
Recuperação ouro (%):	90%	Opex cianeto (US\$/t)		0,56	49800	49800	49800	49800	49800	49800	49800	49800	49800
Vida útil (a):	15	Opex cal (US\$/t)		0,06	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Capex caso base US\$M	60.000	Preço ouro (US\$/g)		8,84	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200
Capex moagem US\$ M	8.000	Impostos		0%									
Capex lixiviação US\$ M	2.200												
INVESTIMENTO													
Investimentos diversos	60000	Moagem +30	Moagem -30	Cianeto +50	Cianeto -50	Tanque +30	Tanque -30	Cal +30	Cal -30	Dens. +15	Dens. -15	Recup +3	Recup -5
Investimento Moagem	49800	62400	57600	60000	60000	60660	59340	60000	60000	60330	59670	60000	60000
Investimento lixiviação	8.000	10.400	5.600	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.860	1.540	2.200	2.200	2.530	1.870	2.200	2.200
	17,00	17,57	16,43	17,28	16,72	17,04	16,96	17,02	16,98	17,02	16,98	17,00	17,00
	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33
	1,91	2,48	1,34	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,18	0,10	0,14	0,14	0,16	0,12	0,14	0,14
	0,56	0,56	0,56	0,84	0,28	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06
TEOR OURO	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Recuperação ouro	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,93	0,85
RECEITA (US\$/t)	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78	41,11	37,57
MARGEM OPER. (US\$/t)	22,78	22,21	23,35	22,50	23,06	22,74	22,82	22,76	22,80	22,76	22,80	24,11	20,57
FLUXO CAIXA													
Ano 1	-60000	-62400	-57600	-60000	-60000	-60660	-59340	-60000	-60000	-60330	-59670	-60000	-60000
Ano 2	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 3	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 4	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 5	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 6	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 7	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 8	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 9	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 10	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 11	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 12	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 13	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 14	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 15	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
Ano 16	22780	22207	23353	22500	23060	22738	22822	22762	22798	22759	22801	24106	20570
VPL @ 12%	84.956,7	79.329,3	90.584,0	83.254,0	86.659,4	84.112,0	85.801,4	84.847,2	85.066,2	84.534,3	85.379,0	93.020,3	71.517,4

ANEXO B

**Estudo do acréscimo mínimo de recuperação de ouro para compensar
moagem mais fina**

ESTUDO DO ACRÉSCIMO MÍNIMO DE RECUPERAÇÃO DE OURO PARA COMPENSAR MOAGEM MAIS FINA

Dados do minério:	
Consumo de bolas (g/kWh)	50
Consumo de revestimento (g/kWh)	7
F80 (microns)	8000
P80 @ 60% <75 (microns)	115
P80 @ 70% <75 (microns)	95
P80 @ 80% <75 (microns)	75
P80 @ 90% <75 (microns)	55

Preços de insumos:	
Bolas (US\$/kg)	0,80
Revestimento moinho (US\$/kg)	2,10
Energia elétrica (US\$/kWh)	0,028

Dados da instalação:	
Capacidade (t/h)	130
Horas operadas/ano	7692
Investimento unitário (US\$/kWh)	3130
Vida útil do projeto (anos)	10
Rentabilidade (%)	12

Amortização 0,1770

% < 200#	Energia (kWh/t)			Custo de Investimento			Custo energia			Custo de bolas + revestimento			Custo manutenção			Custo - Subtotal		
	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15
60	9,03	10,83	13,54	0,646	0,720	0,824	0,253	0,303	0,379	0,494	0,593	0,741	0,219	0,244	0,279	1,611	1,860	2,223
70	10,06	12,07	15,08	0,689	0,769	0,879	0,282	0,338	0,422	0,550	0,660	0,825	0,234	0,261	0,298	1,754	2,027	2,424
80	11,47	13,77	17,21	0,746	0,832	0,951	0,321	0,385	0,482	0,628	0,753	0,941	0,253	0,282	0,322	1,947	2,252	2,696
90	13,60	16,32	20,40	0,826	0,921	1,053	0,381	0,457	0,571	0,744	0,893	1,116	0,280	0,312	0,357	2,231	2,583	3,098

% < 200#	Diferença custo US\$/t			Acres. mín. rec.- 3 g/t Au @ US\$8,84/g			Acres. mín. rec.- 5 g/t Au @ US\$8,84/g			Acres. mín. rec.- 10 g/t Au @ US\$8,84/g			Acres. mín. rec.- 3 g/t Au @ US\$10,00/g			Acres. mín. rec.- 5 g/t Au @ US\$10,00/g		
	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15
60 a 70	0,143	0,167	0,201	0,54	0,63	0,76	0,32	0,38	0,46	0,16	0,19	0,23	0,48	0,56	0,67	0,29	0,33	0,40
70 a 80	0,193	0,225	0,272	0,73	0,85	1,03	0,44	0,51	0,62	0,22	0,25	0,31	0,64	0,75	0,91	0,39	0,45	0,54
80 a 90	0,284	0,331	0,401	1,07	1,25	1,51	0,64	0,75	0,91	0,32	0,37	0,45	0,95	1,10	1,34	0,57	0,66	0,80

% < 200#	Diferença custo US\$/t			Acres. mín. rec.- 10 g/t Au @ US\$8,00/g			Acres. mín. rec.- 5 g/t Au @ US\$8,00/g			Acres. mín. rec.- 3 g/t Au @ US\$8,00/g			Acres. mín. rec.- 10 g/t Au @ US\$8,00/g			Acres. mín. rec.- 5 g/t Au @ US\$8,84/g		
	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15	Wi = 10	Wi = 12	Wi = 15
60 a 70	0,143	0,167	0,201	0,14	0,17	0,20	0,60	0,69	0,84	0,36	0,42	0,50	0,18	0,21	0,25	0,11	0,13	0,15
70 a 80	0,193	0,225	0,272	0,19	0,23	0,27	0,80	0,94	1,14	0,48	0,56	0,68	0,24	0,28	0,34	0,15	0,17	0,21
80 a 90	0,284	0,331	0,401	0,28	0,33	0,40	1,18	1,38	1,67	0,71	0,83	1,00	0,35	0,41	0,50	0,21	0,25	0,30

ANEXO C

**Estudo do acréscimo mínimo de recuperação de ouro para compensar
o aumento do tempo de residência**

ESTUDO DO ACRÉSCIMO MÍNIMO DE RECUPERAÇÃO DE OURO PARA COMPENSAR O AUMENTO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA

DADOS DO PROJETO		1.000.000
Capacidade (t/ano)		7692
Horas operadas / ano		50
Conc. sólidos (% p/p)		3,00
Peso específico sólidos (t/m ³)		90
Granulometria minério (P80)		6
Aumento tempo residência (h)		345
Investimento unitário (US\$/m ³)		0,05
Consumo específico energia (kWh/m ³)		0,03
Preço energia elétrica (US\$/kWh)		12
TIR mínima admissível (%)		

CÁLCULOS		130,0
Capacidade (t/h)		173,3
Vazão polpa (m ³ /h)		1040
Volume tanque adicional (m ³)		326,9
Investimento adicional (US\$ 1000)		

Caso base - preço do ouro (US\$/g): 8,84

Teor de ouro g/t	Custo de Investimento (US\$/t)			C. manut. US\$/t	Custo energ. US\$/t	Acrescimo custo (US\$/t)			Acrescimo recuperacao (%)		
	Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos			Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos	Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos
3,0	0,091	0,058	0,048	0,033	0,013	0,137	0,104	0,094	0,52	0,39	0,35
5,0	0,091	0,058	0,048	0,033	0,013	0,137	0,104	0,094	0,31	0,24	0,21
10,0	0,091	0,058	0,048	0,033	0,013	0,137	0,104	0,094	0,15	0,12	0,11
15,0	0,091	0,058	0,048	0,033	0,013	0,137	0,104	0,094	0,10	0,08	0,07

Hipótese otimista: preço do ouro (US\$/g) 10,00

Teor de ouro g/t	Custo de Investimento (US\$/t)			C. manut. US\$/t	Custo energ. US\$/t	Acrescimo custo (US\$/t)			Acrescimo recuperacao (%)		
	Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos			Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos	Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos
3,0	0,091	0,058	0,048	0,020	0,013	0,124	0,091	0,081	0,41	0,30	0,27
5,0	0,091	0,058	0,048	0,020	0,013	0,124	0,091	0,081	0,25	0,18	0,16
10,0	0,091	0,058	0,048	0,020	0,013	0,124	0,091	0,081	0,12	0,09	0,08
15,0	0,091	0,058	0,048	0,020	0,013	0,124	0,091	0,081	0,08	0,06	0,05

Hipótese pessimista: preço ouro (US\$/g) 8,00

Teor de ouro g/t	Custo de Investimento (US\$/t)			C. manut. US\$/t	Custo energ. US\$/t	Acrescimo custo (US\$/t)			Acrescimo recuperacao (%)		
	Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos			Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos	Vida 5 anos	Vida 10 anos	Vida 15 anos
3,0	0,091	0,058	0,048	0,020	0,013	0,124	0,091	0,081	0,52	0,38	0,34
5,0	0,091	0,058	0,048	0,020	0,013	0,124	0,091	0,081	0,31	0,23	0,20
10,0	0,091	0,058	0,048	0,020	0,013	0,124	0,091	0,081	0,15	0,11	0,10
15,0	0,091	0,058	0,048	0,020	0,013	0,124	0,091	0,081	0,10	0,08	0,07

ANEXO D

**Impacto da granulometria de moagem, adição de cianeto e tempo de
residência sobre a economia da cianetação**

IMPACTO DA GRANULOMETRIA DE MOAGEM SOBRE A ECONOMIA DO PROJETO

DADOS DE ENTRADA	
Capacidade (t/ano)	1.000.000
Horas operadas por ano	7692
Teor ouro (g/t)	5,0
Preço ouro (US\$/g)	8,84
Taxa de desconto (%)	12
Vida do projeto (anos)	15
Concentração sólidos (p/p)	50
Peso específico sol. (t/m ³)	3
Número tanques	4
Work Index Bond (kWh/t)	15
Preço de energia elétrica (kWh)	0,028
Preço de bolas de moinho (US\$/kg)	0,80
Preço de revestimento (US\$/kg)	2,10
Consumo unitário de bolas (g/kWh)	50
Consumo unitário revestimento (g/k)	7

CÁLCULOS	
Capacidade (t/h)	130,0
Vazão polpa (m ³ /h)	173,34

CASO BASE	
P80 (% < 75 microns)	80
Adição cianeto (g/t)	600
Tempo cianetação (h)	24
Tempo pré-aeração (h)	1
Investimento (US\$ 100)	60.000,0
Custo oper. (US\$1000/	17.000,0

	60	70	80
Moagem (% < 75 microns)			
Extração ouro (%)	81,5	90,2	92,9
P80 (micra)	115	95	75
Investimento moagem (US\$ 1000)	4.353	4.644	5.025
Investimento total (US\$ 1000)	59.327,1	59.618,1	60.000,0
Receita (US\$ 1000 / ano)	36.023,0	39.868,4	41.061,8
Custo moagem (US\$ 1000 / ano)	1.555,1	1.711,8	1.925,6
Custo operacional total (US\$ 1000 / ano)	16.629,5	16.786,2	17.000,0
Fluxo caixa (US\$ / ano)	19.393,5	23.082,2	24.061,8
VPL (US\$ 1000)	66.144,9	88.719,9	94.437,9

IMPACTO DA ADIÇÃO DE CIANETO SOBRE A ECONOMIA DO PROJETO

DADOS DE ENTRADA	
Capacidade (t/ano)	1.000.000
Horas operadas por ano	7.692
Teor ouro (g/t)	5,00
Preço ouro (US\$/g)	8,84
Taxa de desconto (%)	12
Vida do projeto (anos)	15
Concentração sólidos (p/p)	50
Peso específico sol. (t/m ³)	3
Número tanques	4
Preço cianeto (US\$/kg)	1.40

CÁLCULOS	
Capacidade (t/h)	130,0
Vazão polpa (m ³ /h)	173,34

CASO BASE	
P80 (% < 75 microns)	80
Adição cianeto (g/t)	600
Tempo cianetação (h)	24
Tempo pré-aeração (h)	1
Investimento (US\$ 100)	60.000,0
Custo oper. (US\$ 1000)	17.000,0

	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,0
Adição de cianeto (kg/t)	58,1	84,9	89,8	92,9	92,3	93,5
Extração ouro (%)	60.000,0	60.000,0	60.000,0	60.000,0	60.000,0	60.000,0
Investimento total (US\$ 1000)	25.680,2	37.525,8	39.691,6	41.061,8	40.796,6	41.327,0
Receita (US\$ 1000 / ano)	140,0	280,0	420,0	840,0	1.120,0	1.400,0
Custo cianeto (US\$ 1000 / ano)	16.300,0	16.440,0	16.580,0	17.000,0	17.280,0	17.560,0
Custo operacional total (US\$ 1000 / ano)	9.380,2	21.085,8	23.111,6	24.061,8	23.516,6	23.767,0
VPL (US\$ 1000)	3.533,9	76.011,4	88.554,5	94.437,9	91.062,2	92.612,6

IMPACTO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA SOBRE A ECONOMIA DO PROJETO

DADOS DE ENTRADA	
Capacidade (t/ano)	1.000.000
Horas operadas por ano	7692
Teor ouro (g/t)	5
Preço ouro (US\$/g)	8,84
Taxa de desconto (%)	12
Vida do projeto (anos)	15
Concentração sólidos (p/p)	50
Peso específico sol. (t/m ³)	3
Número tanques	4
Cons. específico energia (kWh/t)	0,06
Preço energia (US\$/kWh)	0,028

CÁLCULOS	
Capacidade (t/h)	130,0
Vazão polpa (m ³ /h)	173,34

CASO BASE	
P80 (% < 75 microns)	80
Adição cianeto (g/t)	600
Tempo cianetação (h)	24
Tempo pré-aeração (h)	1
Investimento (US\$ 100)	60.000,0
Custo oper. (US\$ 1000)	17.000,0

TEMPO RESIDÊNCIA (h)	16	24	48
Extração ouro (%)	91,3	92,9	94,1
Volume tanques (m ³)	693	1.040	2.080
Investimento cianetação (US\$ 1000)	961,0	1.310,4	2.226,9
Investimento total (US\$ 1000)	59.650,5	60.000,0	60.916,5
Receita (US\$ 1000 / ano)	40.354,6	41.061,8	41.592,2
Custo oper. cianetação (US\$ 1000 / ano)	131,9	184,8	330,2
Custo operacional total (US\$ 1000 / ano)	16.947,1	17.000,0	17.145,4
Fluxo caixa (US\$ / ano)	23.407,5	24.061,8	24.446,8
VPL (US\$ 1000)	90.704,2	94.437,9	95.988,5

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Atividades e produtos do ciclo de exploração mineral	7
Tabela 4.1 - Solubilidade de minerais de cobre em solução de 0,1% de NaCN às temperaturas de 23 e 45°C.	78
Tabela 4.2 - Porcentagem de partículas que escapam de tanques bem agitados, dispostos em série, com menos de 100% do tempo de residência nominal.....	85
Tabela 4.3 - Efeito do pH na lixiviação do ouro.	94
Tabela 4.4 - Precisoões típicas de análises de ouro de minérios sul-africanos por fusão-copelação.....	96
Tabela 5.1 - Estimativa de investimento em uma moagem com moinho de bolas de 1000 kW.	110
Tabela 5.2 - Estimativa de investimento de uma área de cianetação com 6 tanques de 700 m ³ de capacidade.	111
Tabela 6.1 - Matriz fatores de sucesso tecnológico x fatores de produtividade.....	133
Tabela 6.2 - Diretrizes e ações para o desenvolvimento de processo e sua análise crítica.....	136
Tabela 6.3 - Matriz parâmetros de processo x fatores de lucratividade.....	137
Tabela 6.4 - Extração de ouro em função do tempo de residência para minérios de Fazenda Brasileiro.....	157
Tabela 6.5 - Efeito da pré-aeração sobre a cianetação do minério de Serra Leste.....	162
Tabela 6.6 - Efeito da pré-aeração sobre a cianetação do minério primário de Almas.....	163
Tabela 6.7 - Efeito da pré-aeração sobre a cianetação do minério primário de Fazenda Brasileiro.....	163

Tabela 6.8 - Efeito da adição de cianeto sobre a cianetação do minério de Serra Leste.....	164
Tabela 6.9 - Efeito da adição de cianeto sobre a cianetação do minério de Almas.	165
Tabela 6.10- Efeito da adição de cianeto sobre a cianetação do minério de Fazenda Brasileiro	165
Tabela 6.11 -Efeito do pH sobre a lixiviação do minério de Almas.	170
Tabela 6.12 -Efeito do pH sobre a lixiviação do minério de Serra Leste.	170
Tabela 6.13 -Ensaio CIL com o rejeito gravítico e a amostra inicial do minério carbonoso do nível 200 de Fazenda Maria Preta.	172
Tabela 6.14 -Efeito da adição de carvão ativado sobre a cianetação de minérios de ouro... ..	176
Tabela 6.15 -Análise de metais no licor de cianetação de ensaios de laboratório com o minério de Fazenda Brasileiro.	180
Tabela 6.16 -Caracterização química da água sobrenadante na barragem de rejeito de Fazenda Brasileiro.....	181
Tabela 6.17 -Extrações de ouro e valores presentes líquidos, VPL, em função das variações dos parâmetros da cianetação do minério sulfetado de ouro de Almas.	182
Tabela 6.18 -Acréscimo de recuperação de ouro necessário para recuperar o capital adicional investido numa usina de cianetação em tanques agitados em relação à lixiviação em pilhas de mesma capacidade.	197

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de suprimento mineral.	5
Figura 2.2 - Ciclo de exploração mineral.	8
Figura 2.3 - Processo de decisão para o desenvolvimento de minas.	12
Figura 2.4 - Valor relativo de uma propriedade mineral.	13
Figura 2.5 - Desenvolvimento de processos para o beneficiamento de minérios de ouro	26
Figura 2.6 - Efeito do teor de ouro no desenvolvimento de processo.	33
Figura 2.7 - Ensaios metalúrgicos com minérios de ouro.....	34
Figura 3.1 - Evolução da oferta mundial de ouro.	35
Figura 3.2 - Evolução da demanda mundial de ouro.	36
Figura 3.3 - Evolução do preço do ouro nas últimas décadas.....	37
Figura 3.4 - Balanço oferta – demanda e transferências de e para o estoque de ouro em 1999.....	38
Figura 3.5 - Evolução do custo caixa de produção de ouro em diversas regiões do mundo.....	40
Figura 3.6 - Curvas de custo caixa e custo total de produção de ouro.....	41
Figura 3.7 - Produção de ouro no Brasil.....	44
Figura 4.1 - Minérios de ouro - Classificação de Brooy para a seleção de rotas de processo.....	54
Figura 4.2 - Principais processos para produção de ouro	55
Figura 4.3 - Mecanismos de cianetação - Esquema de reação sólido-líquido de dissolução de ouro em cianeto.	57

Figura 4.4 - Efeito da concentração de cianeto na velocidade de dissolução do ouro e da prata.	65
Figura 4.5 - Efeito da concentração de cianeto na recuperação de ouro na lixiviação de produto de ustulação.....	65
Figura 4.6 - Efeito da concentração de hidróxido de cálcio sobre a velocidade de dissolução do ouro.	69
Figura 4.7 - Consumo de cianeto em função do pH de lixiviação e concentração de cianeto livre (12 mg/l de oxigênio dissolvido e adição de 12,5 g/t de nitrato de chumbo).	91
Figura 4.8 - Velocidade de dissolução do ouro em função do teor de oxigênio dissolvido e concentração de cianeto livre (pH = 11 sem adição de nitrato de chumbo).	91
Figura 4.9 - Velocidade de dissolução do ouro em função do teor de oxigênio dissolvido e concentração de cianeto livre (pH = 11 e adição de 12,5 g/t de nitrato de chumbo).	92
Figura 4.10 – Velocidade de dissolução do ouro em função do teor de oxigênio dissolvido e concentração de cianeto livre (pH = 11 e adição de 25 g/t de nitrato de chumbo)	92
Figura 4.11 - Efeito do tamanho de moagem na recuperação de ouro (16 mg/l de oxigênio dissolvido, pH = 10,5, 80% < 74 µm).....	93
Figura 4.12 - Efeito do teor de oxigênio dissolvido e adição de nitrato de chumbo na recuperação de ouro (730 mg/l de CN ⁻ , pH = 11,5 e 80% < 74 µm)	94
Figura 4.13 - Efeito da concentração de cianeto na recuperação do ouro (16 mg/l de oxigênio dissolvido, pH = 10,5 e 80% < 74 µm).	94
Figura 5.1 - Procedimentos para análise crítica do desenvolvimento de processos de cianetação em tanques agitados.....	98
Figura 6.1 - Diagrama de sensibilidade da economia da cianetação em relação aos parâmetros de processo (diagrama de tornado).....	141
Figura 6.2 - Extração de ouro em função da granulometria de moagem de duas amostras de Fazenda Brasileiro.....	151

Figura 6.3 - Influência da granulometria de moagem sobre a extração de ouro de um minério sulfetado compacto (Almas) e de um minério oxidado pulverulento (Serra Leste).....	152
Figura 6.4 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar moagem mais fina - Teor de ouro de 3 g/t @ US\$ 8.84/g.....	152
Figura 6.5 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar moagem mais fina - Teor de ouro de 5 g/t @ US\$ 8.84/g.....	152
Figura 6.6 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar moagem mais fina - Teor de ouro de 10 g/t @ US\$ 8.84/g.....	153
Figura 6.7 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar moagem mais fina - Teor de ouro de 15 g/t @ US\$ 8.84/g.....	154
Figura 6.8 - Curvas cinéticas de cianetação de amostras de Fazenda Brasileiro.....	156
Figura 6.9 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar o aumento do tempo de residência - Usina 1 milhão t/ano - Preço do ouro de US\$ 8.84/g.....	159
Figura 6.10 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar o aumento do tempo de residência - Usina 1 milhão t/ano - Preço do ouro de US\$ 10.00/g.....	159
Figura 6.11 - Acréscimo mínimo de extração de ouro para compensar o aumento do tempo de residência - Usina 1 milhão t/ano - Preço do ouro de US\$ 8.00/g.....	160
Figura 6.12 - Curvas cinéticas de extração de ouro no minério de Itabira, sem e com adição de peróxido de hidrogênio.....	168
Figura 6.13 - Extração de ouro por cianetação do rejeito gravítico de uma amostra carbonosa do minério de ouro do nível 200 de Fazenda Maria Preta.....	172
Figura 6.14 - Cianetação do minério de Fazenda Brasileiro diluído com encaixantes contendo matéria carbonosa.....	174
Figura 6.15 - Diagrama para ensaios exploratórios durante a etapa de pesquisa geológica.....	189
Figura 6.16 - Diagrama de ensaios de processo para o estudo conceitual.....	194