



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Geraldo Antônio dos Santos Júnior

**FLOTAÇÃO DE MINÉRIO SULFETADO DE OURO PARA
DIFERENTES PRODUTOS OBTIDOS EM UM EQUIPAMENTO *ORE*
*SORTING***

**OURO PRETO - MG
2018**

Geraldo Antônio dos Santos Júnior

**FLOTAÇÃO DE MINÉRIO SULFETADO DE OURO PARA
DIFERENTES PRODUTOS OBTIDOS EM UM EQUIPAMENTO *ORE*
*SORTING***

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Professor orientador: DSc. Érica Linhares Reis

Professor coorientador: Mariana Caroline Andrade Silva

**OURO PRETO – MG
2018**

S237f

Santos Júnior, Geraldo Antônio dos.

Flotação de minério sulfetado de ouro para diferentes produtos obtidos em um equipamento Ore Sorting [manuscrito] / Geraldo Antônio dos Santos Júnior. - 2018.

29f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Érica Linhares Reis.

Coorientadora: Prof^ª. MSc^ª. Mariana Caroline Andrade Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Beneficiamento de minério. 2. Flotação. 3. Separação (Tecnologia). I. Reis, Érica Linhares. II. Silva, Mariana Caroline Andrade. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 622.765

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 07 dias do mês de dezembro de 2018, às 09h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado *"FLOTACÃO DE MINÉRIO SULFETADO DE OURO PARA DIFERENTES PRODUTOS OBTIDOS EM UM EQUIPAMENTO ORE SORTING"*, pelo aluno **Geraldo Antônio dos Santos Júnior**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Érica Linhares Reis** (orientadora), **Eng^o de Minas Mariana Carolina Andrade Silva** e **M. Sc. Flávio Luiz Martins**.

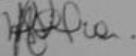
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela aprovação* do candidato, com a nota 7,0, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.*

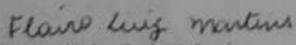
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

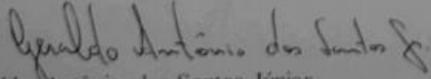
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

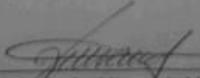
Ouro Preto, 07 de dezembro de 2018.


Prof. Dr. Érica Linhares Reis
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Eng^o de Minas Mariana Carolina Andrade Silva
Membro da Comissão Avaliadora


M. Sc. Flávio Luiz Martins
Membro da Comissão Avaliadora


Geraldo Antônio dos Santos Júnior


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 490 – Trabalho de Conclusão de Curso

À Deus dedico mais esta etapa vencida,
aos meus pais, pelo apoio.

À Universidade Federal de Ouro Preto e
à Escola de Minas pelo ensino de
qualidade.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente à Deus, ao meu Pai Geraldo, à minha mãe Iroene e ao meu irmão Guilherme.

À Prof.^a Érica pelo incentivo e grande ajuda na conclusão desse trabalho.

Enfim, agradeço às pessoas que fizeram parte dessa etapa muito importante da minha vida.

RESUMO

No ano de 2016, a empresa onde este trabalho foi realizado, precisava beneficiar 95 mil toneladas de minério de ouro e não se obtinha uma boa recuperação nas plantas de beneficiamento existentes na unidade. O principal fator relacionado à baixa recuperação dessas unidades está ligado à mineralogia desse minério, visto que é um minério parcialmente oxidado e parcialmente sulfetado, de difícil concentração por métodos convencionais. Com o objetivo de viabilizar o beneficiamento desse minério, a empresa adquiriu um separador a base de sensores, denominado *Ore Sorting*. O *Ore Sorting* foi utilizado para separar os fragmentos de rocha que são mais sulfetados dos demais, sendo que o concentrado deste equipamento (a fração majoritariamente sulfetada), alimentou uma das plantas metalúrgicas da unidade. Neste contexto se insere este trabalho, visando determinar qual é o formato ideal em que o concentrado do *Ore Sorting* deve ser alimentado em uma das plantas da unidade, podendo ser em seu estado puro ou em diferentes proporções de mistura com o minério que usualmente alimenta uma das plantas (minério sulfetado), com o intuito de obter uma melhor recuperação do ouro. Ao longo do texto são descritas etapas de amostragem, etapas do preparo das amostras e a execução dos testes de flotação em bancada, bem como a análise dos resultados obtidos através da curva de seletividade. Os ensaios de flotação foram realizados com os seguintes minérios: (1) minério 100% sulfetado; (2) minério 100% EP (concentrado do *Ore Sorting*); (3) 3% minério concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 97% minério sulfetado; (4) 6% minério concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 94% minério sulfetado. A partir dos testes realizados, foi possível observar que o desempenho do minério composto por 3% do concentrado do *Ore Sorting* com 97% do minério sulfetado se assemelha ao desempenho do minério 100% sulfetado, apresentando uma recuperação metalúrgica de 83,23% para uma recuperação mássica de 25%.

Palavras-chave: *Ore Sorting*, flotação, amostragem, ouro.

ABSTRACT

In the year of 2016, at the company where this work was done, it needed to process 95 million tons of gold ore and it doesn't achieve a good metallurgy recovery in no metallurgy plant present on that mine. The principal factor related to low metallurgy recovery of that unit is the ore mineralogy, since the ore is partially sulfide and partially oxidized. With the aim to enable that ore, the company acquired a sensor-based *Ore Sorting*. *Ore Sorting* was used to separated rock fragment with high percent of Sulphur than the rock fragment with low percent of Sulphur and the *Ore Sorting* concentrate will feed the metallurgy plant of that unit. In this context, in order to determine which is the ideal format that *Ore Sorting* concentrate should be fed to one of the plants of the unit, either in its pure state or in different mixing proportions with the ore that usually feeds a of the plants (sulfide ore), in order to obtain a better recovery of the gold. Throughout the text are described sampling steps, stages of preparation of the samples and the execution of bench flotation tests, as well as the analysis of the results obtained through the selectivity curve. The execution of bench scale flotation test work was done with these ores: 100% sulfide ore (2) ore 100% EP (*Ore Sorting* concentrate); (3) 3% *Ore Sorting* concentrate (EP) and 97% sulfide ore; (4) 6% *Ore Sorting* concentrate (EP) and 94% sulfide ore. Through the bench scale flotation test work carried out, it was possible to observe the performance of the ore composed by 3% *Ore Sorting* concentrate and 97% sulfide ore, that it is like 100% sulfide ore performance, presented a metallurgy recovery of 83,24% for a mass recovery of 25%.

Key-words: *Ore Sorting*, flotation, sampling, gold.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Instalação do <i>Ore Sorting</i> em chutes de descarga e correias transportadoras.	6
Figura 3.2: Fluxograma da Planta <i>Ore Sorting</i>	7
Figura 3.3: Equipamento <i>Ore Sorting</i>	7
Figura 4.1: Fluxograma de preparação das amostras para os testes de flotação em bancada.	11
Figura 4.2: Teste de flotação em bancada.	13
Figura 5.1: Curva de seletividade para o minério 100% Sulfetado.....	15
Figura 5.2: Curva de seletividade para o minério concentrado do <i>Ore Sorting</i> (100% EP) ...	16
Figura 5.3: Curva de seletividade para o minério 3% concentrado do <i>Ore Sorting</i> (EP) e 97% minério sulfetado	17
Figura 5.4: Curva de seletividade para o minério 6% concentrado do <i>Ore Sorting</i> (EP) e 94% minério sulfetado	18
Figura 5.5: Resultados obtidos nos ensaios de flotação para diferentes minérios	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reagentes padrão AGA.....	12
Tabela 2: Parâmetros dos testes utilizando reagentes padrão AGA. Fonte: Elaborada pelo autor.....	12
Tabela 3: Teores da alimentação dos testes de flotação. Fonte: Elaborada pelo autor.	14

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	2
2.1	Objetivo Geral	2
2.2	Objetivos específicos	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Beneficiamento do minério de ouro	3
3.2	Aspectos gerais da utilização da flotação para concentração de minério de ouro.....	3
3.3	Reagentes utilizados na flotação de minério de ouro	4
3.4	Aspectos gerais dos classificadores por sensores e suas aplicações no setor da mineração.....	5
3.5	Aplicação do <i>Ore Sorting</i> na mina em estudo	6
3.6	Contextualização do trabalho de conclusão de curso com a mina de ouro do estudo	7
4	METODOLOGIA	10
4.1	Plano de Amostragem.....	10
4.2	Preparação das amostras para os ensaios de flotação	10
4.3	Reagentes utilizados nos ensaios de flotação	11
4.4	Ensaio de flotação em bancada	12
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
5.1	Caracterização das amostras para os testes de flotação	14
5.2	Ensaio de flotação em bancada	14
5.2.1	Minério 100% Sulfetado.....	15
5.2.2	Minérios 100% concentrado do <i>Ore Sorting</i> (EP)	15
5.2.3	Minério 3% Concentrado do <i>Ore Sorting</i> (EP) e 97% Minério Sulfetado.....	16
5.2.4	Minério 6% Concentrado do <i>Ore Sorting</i> (EP) e 94% Minério Sulfetado.....	17
5.3	Comparando os resultados obtidos nos ensaios de flotação	18
6	CONCLUSÃO	20
	APÊNDICE A – DADOS OBTIDOS A PARTIR DE TESTES DE FLOTAÇÃO	23

1 INTRODUÇÃO

A exploração de ouro no Brasil se iniciou com o ciclo do ouro, que ocorreu entre os anos de 1700 e 1850. Durante este ciclo, o Brasil foi o maior produtor mundial de ouro, sendo este retirado principalmente de aluviões e outros depósitos superficiais. A partir dos anos 90, a produção brasileira começou a decair devido à exaustão de reservas superficiais onde o ouro era encontrado em granulometria grosseira e enriquecido. Paralelamente à diminuição da produção brasileira, iniciaram os investimentos em exploração de ouro por parte das empresas (PORTO, PALERMO, PIRES, 2002).

A exaustão de reservas com alto teor de ouro e de fácil beneficiamento levaram à descoberta de novas reservas de baixo teor, motivando a busca por métodos alternativos de processos de concentração. Alguns fatores responsáveis pela dificuldade na determinação de novas rotas estão associados à complexidade dos minérios, bem como à disseminação do ouro nos minerais presentes no minério (NASCIMENTO, SANTANDREA & LEANDRO, 2016).

Um dos métodos clássicos de concentração de minérios é a flotação. A flotação é um processo de concentração em que a separação das partículas é feita numa suspensão em água (polpa). Para o caso da flotação, a diferença entre as espécies minerais é dada pela capacidade das partículas se prenderem ou não a bolha de ar (CHAVES, BRAGA, FILHO 2010).

Na busca por novas tecnologias de processamento de minérios de ouro, a mina de ouro na qual o trabalho foi realizado, adquiriu um separador a base de sensores (*Ore Sorting*) com o intuito de pré-concentrar minérios que não apresentavam boas recuperações nas plantas metalúrgicas presentes na unidade. Com isso o concentrado do *Ore Sorting* seria utilizado para alimentar uma das plantas metalúrgicas da unidade e assim buscar obter uma boa recuperação metalúrgica para este material.

Desse modo, esse trabalho tem como objetivo a avaliação por ensaios de flotação em bancada a recuperação de ouro para o concentrado do *Ore Sorting* bem como investigar diferentes proporções de misturas do concentrado do *Ore Sorting* com o minério que usualmente alimenta uma das plantas da unidade. Os resultados obtidos foram comparados com a recuperação do minério que usualmente alimenta a planta por ensaios de flotação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Estudar a aplicabilidade do separador *Ore Sorting* e determinar a forma ideal de alimentar o concentrado deste equipamento em uma planta metalúrgica, podendo ser em seu formato puro (100% do concentrado do *Ore Sorting*) ou em diferentes proporções, associadas ao minério que usualmente alimenta a planta metalúrgica, minério sulfetado.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a recuperação de ouro através de testes de flotação em bancada para o concentrado do *Ore Sorting*.
- Determinar a proporção ideal entre o concentrado *Ore Sorting* e o minério sulfetado, para compor a alimentação da planta metalúrgica da unidade, para ter o melhor aproveitamento do ouro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Beneficiamento do minério de ouro

O beneficiamento de minérios de ouro apresenta algumas peculiaridades que o diferencia de outros métodos de tratamento de minérios. As rotas de beneficiamento para minérios de ouro podem ocorrer a partir de etapas de cominuição juntamente com etapas de concentração pelas técnicas usuais de tratamento de minérios ou envolver, além da preparação granulométrica, estágios de metalurgia extrativa, como processos hidrometalúrgicos. Para as rotas de beneficiamento que utilizam estágios de concentração, as propriedades diferenciadoras são a diferença de densidade entre o ouro e os minerais de ganga e a hidrofobicidade. As operações de preparação devem preservar as partículas de ouro livre e o beneficiamento como um todo deve priorizar a recuperação de ouro contido (PERES et al., 2002).

3.2 Aspectos gerais da utilização da flotação para concentração de minério de ouro

A flotação é largamente aplicada ao processamento de uma vasta gama de minérios e dentre eles tem-se os minérios de ouro. O processo de concentração por flotação é baseado no controle das propriedades diferenciadoras baseadas no caráter polar (hidrofilidade) ou apolar (hidrofobicidade) dos minerais que estão presentes na polpa. A grande versatilidade do método de concentração por flotação ocorre por ser o único método capaz de criar e modificar a propriedade diferenciadora. Essas propriedades podem ser naturais ou induzidas através da utilização de reagentes químicos específicos (ANDRADE, 2014). Para o caso específico do ouro, ele pode ser considerado um dos melhores exemplos de hidrofobicidade natural entre os sistemas de extração industrial (MARSDEN, HOUSE, 1992).

Em grande parte dos casos, as partículas de ouro se encontram associadas a uma vasta gama de minerais, especialmente da família dos sulfetos, como os minerais: arsenopirita, pirita, pirotita e calcopirita. Para o caso da flotação das empresas brasileiras, boa parte das mesmas realiza a concentração de sulfetos em geral (PERES et al., 2002).

Segundo Lins (2000), independentemente de o ouro estar associado ao sulfeto ou não, na flotação de minério de ouro a etapa de flotação ocorre em conjunta de ouro e sulfetos. Isso, devido à dificuldade de realizar uma separação seletiva entre o ouro livre e os sulfetos de modo geral.

A flotação é geralmente utilizada para minério de ouro quando: 1) o ouro ocorre ocluso ou associado aos sulfetos; (2) a maior parte do ouro distribui-se em tamanhos considerados finos (inferiores a 200 μ m) para uma concentração gravítica eficiente; (3) é recomendado do ponto de vista econômico, concentrar o ouro por flotação para posteriormente realizar a lixiviação por cianeto (MONTE, 1998).

3.3 Reagentes utilizados na flotação de minério de ouro

Os coletores atuam na interface sólido-líquido modificando a superfície mineral naturalmente hidrofílica, tornando a hidrofóbica. Os coletores utilizados na flotação de minérios sulfetados contendo ouro são da família do tio-compostos ou compostos sulfídricos. As principais propriedades dessa família de coletores são: (i) baixa ou nenhuma atividade na interface líquido/ar (caracterizando ação exclusivamente coletora, ausência de ação espumante); (ii) alta atividade química em relação a ácidos, agentes oxidantes e íons metálicos; e (iii) diminuição da solubilidade com o aumento da cadeia hidrocarbônica (MONTE, PERES, 2010).

Um dos coletores mais utilizados para a flotação de minérios sulfetado de ouro, níquel, zinco e chumbo é o xantato. Para o caso específico da flotação de minério sulfetado de ouro, a utilização do xantato como coletor para as etapas de concentração por flotação predomina na prática industrial e visa tanto a concentração dos sulfetos (pirita, arsenopirita e calcopirita) quanto as partículas de ouro liberadas que não foram recuperadas por métodos gravimétricos (FERREIRA, LINS, MONTE, sem data).

Vale ressaltar que o coletor utilizado para os ensaios de flotação deste trabalho também foi o xantato.

Segundo Oliveira (sem data), pelo fato do xantato ser um reagente de cadeia carbônica curta, é necessário que este reagente esteja acompanhado da utilização de um reagente espumante. Os espumantes comumente empregados para flotar sulfetos contendo ouro são compostos iônicos geralmente pertencentes à classe dos álcoois ou éteres. Os espumantes em sistemas de flotação são responsáveis por reduzir a tensão superficial das bolhas geradas e garantir o transporte das partículas hidrofóbicas na zona da polpa e com isso melhorar as condições para coleta das partículas de mineral hidrofobizado.

Outros reagentes comumente utilizados para flotar sulfetos são os ativadores e ou depressores. Estes reagentes são utilizados com o intuito de garantir uma maior seletividade para as etapas de flotação de sulfetos de ouro (VARELA, BRUM,2007).

3.4 Aspectos gerais dos classificadores por sensores e suas aplicações no setor da mineração

As técnicas de classificação por sensores são amplamente utilizadas nas indústrias da mineração, reciclagem e processamento alimentício. Para a aplicação na indústria mineral a sua faixa granulométrica de classificação fica entre 10 e 100mm.

O processo de classificação por sensores é subdividido em cinco etapas: preparação do material a ser alimentado no classificador, alimentação do material ao sensor, detecção do sensor, processamento de dados e separação física. A etapa de preparação do material deve ser realizada para que as partículas sejam detectadas pelo sensor (LESARD et al., 2014).

Nessa etapa, o material deve estar em uma faixa granulométrica definida e as partículas devem estar posicionadas a certa distância com intuito de não haver contato uma com a outra para que o sensor consiga identificar as partículas que serão selecionadas (LESARD et al., 2014).

A eficiência da classificação do *Ore Sorting* está diretamente ligada à qualidade das cinco etapas do processo de classificação descrito acima. Todas as etapas contribuem para a eficiência do processo juntamente com as características do minério a ser alimentado no equipamento.

Existem dois tipos de classificadores por sensores, os classificadores em chutes e os em correias transportadoras. Para os classificadores em correias transportadoras, a detecção das partículas é realizada horizontalmente enquanto as partículas percorrem a correia. Já para os classificadores em chutes, a detecção ocorre verticalmente no momento em que a partícula está passando pelo chute. A **Figura 3.1** apresenta o *Ore Sorting* instalado tanto no chute de descarga quanto em uma correia transportadora (OUTOTEC,2015).

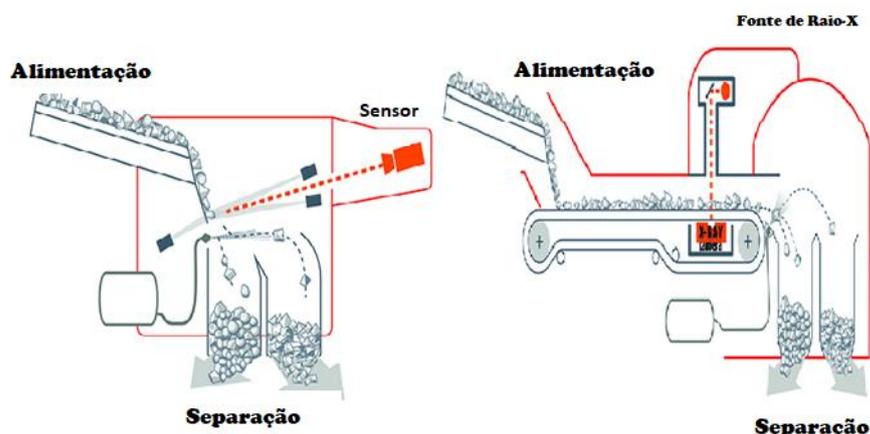


Figura 3.1: Instalação do *Ore Sorting* em chutes de descarga e correias transportadoras. Disponível em: <https://www.tomra.com/en/sorting/mining>

Dentre as diversas aplicações do *Ore Sorting* no processamento mineral, se destacam as seguintes: viabilizar minérios com teores marginais e pré-concentrar minérios com o intuito reduzir o estéril presente no minério (OUTOTEC,2015).

3.5 Aplicação do *Ore Sorting* na mina em estudo

Na mina onde este trabalho foi realizado, o *Ore Sorting* foi utilizado com o intuito de viabilizar minérios com teores marginais que não conseguem obter uma boa recuperação nas plantas metalúrgicas presentes na unidade.

A planta de adequação granulométrica é composta por um britador de mandíbulas e um britador cônico em circuito fechado com uma peneira vibratória de 3 decks, obtendo assim quatro produtos em faixas granulométricas distintas.

O minério proveniente da lavra é alimentado em uma planta de britagem para realizar a adequação granulométrica e então alimentar o *Ore Sorting*. O equipamento de classificação por sensores presente na mina é alimentado com um minério em uma faixa granulométrica de -45+20mm ou -20+10mm, com um teor médio de 5g./ton de ouro e uma taxa horária de 15 toneladas.

O minério presente nas pilhas já formadas é carregado por uma carregadeira convencional e alimenta uma peneira vibratória para garantir que realmente a granulometria obtida na pilha estão 100 % dentro da faixa aceitável pelo equipamento. O produto da peneira alimenta então o *Ore Sorting*, a qual realiza a classificação e a separa em dois fluxos distintos em concentrado do *Ore Sorting* (EP) e rejeito do *Ore Sorting* (AW).

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma simplificado da planta de adequação granulométrica juntamente com *Ore Sorting* e os seus fluxos.

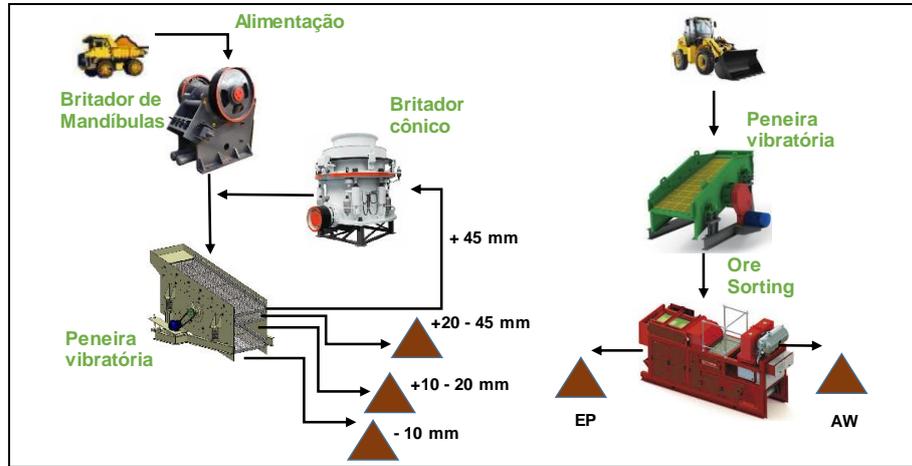


Figura 3.2: Fluxograma da Planta *Ore Sorting*

A Figura 3.3 apresenta de maneira esquemática o equipamento *Ore Sorting*.

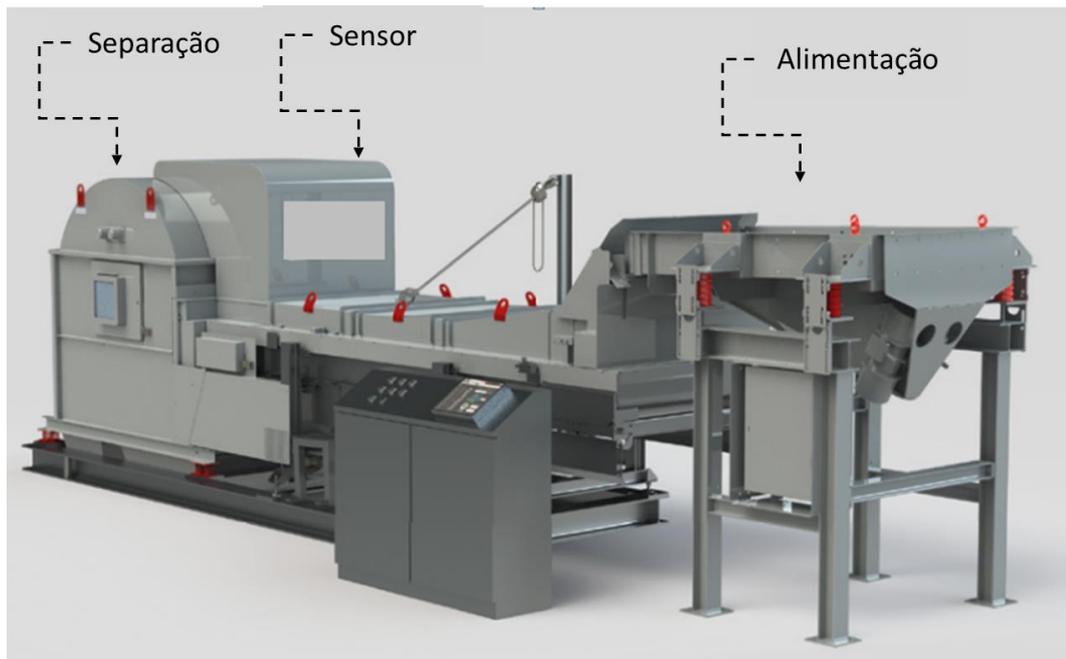


Figura 3.3: Equipamento *Ore Sorting*.

3.6 Contextualização do trabalho de conclusão de curso com a mina de ouro do estudo

A mina na qual o trabalho foi realizado possui duas plantas de beneficiamento, que são denominadas Planta de lixiviação em pilhas e Planta Sulfetado.

A planta de lixiviação em pilhas recebe um minério oxidado vindo de uma mina a céu aberto e o beneficiamento do ouro é realizado através de rotas de lixiviação em pilhas. O beneficiamento se restringe a apenas duas etapas: a preparação (ajustes das propriedades físicas do material) e os processos hidro metalúrgicos para realizar a liberação das partículas do metal ouro.

Já a Planta Sulfetado, recebe um minério sulfetado vindo de uma mina subterrânea. A rota do processo para obtenção do ouro é realizada através de etapas de cominuição, classificação, concentração gravimétrica, flotação, separação sólido-líquido por espessadores, acidulação, oxidação do minério em alta temperatura e pressão por autoclave, adsorção em carvão ativado por CIL, eluição e eletrolise.

No ano de 2016 foi prevista uma extração de 95 mil toneladas de um minério de transição (parcialmente oxidado e parcialmente sulfetado) em que tanto a planta sulfetado quanto a planta de lixiviação em pilhas não obtiveram o beneficiamento do ouro de forma eficiente.

Com o intuito de buscar uma rota de beneficiamento eficiente para o minério comentado acima, a empresa adquiriu o separador a base de sensores *Ore Sorting*. Os produtos obtidos pelo *Ore Sorting* são denominados minério concentrado do *Ore Sorting* (EP) e rejeito do *Ore Sorting* (AW).

Como o *Ore Sorting* não consegue separar totalmente as partes oxidadas e sulfetadas do minério de transição e assim obter uma boa recuperação nas plantas de beneficiamento, o concentrado do *Ore Sorting* foi avaliado por ensaios de flotação para então ser alimentado na Planta Sulfetado. A alimentação do concentrado do *Ore Sorting* pode ser em seu estado puro (minério 100% concentrado do *Ore Sorting*) ou em diferentes proporções de mistura do concentrado do *Ore Sorting* com o minério que usualmente alimenta uma das plantas (minério sulfetado).

A definição da forma ideal de alimentar o concentrado do *Ore Sorting* foi feita a partir da comparação dos resultados dos ensaios de flotação com a recuperação do minério que usualmente alimenta a planta sulfetado (minério sulfetado).

Para a análise dos resultados, foram utilizadas curvas de seletividade para melhor avaliação dos dados. As curvas levam em consideração a recuperação metalúrgica (REC) em função da razão de recuperação em massa (Rcm), ilustrando essas duas variáveis correlacionadas. A curva de seletividade foi desenvolvida pelo Modelo Operacional, a qual

pode ser utilizada, com certa indiferença do teor de alimentação, para avaliar a seletividade de um processo em diferentes condições laboratoriais (YOVANOVIC, 2004).

O memorial de cálculo utilizado para a geração das curvas foi o seguinte:

$$REC = \alpha * Rcm^\beta$$

Onde:

REC = Recuperação metalúrgica

α = Constante de proporcionalidade

β = Índice de seletividade

Rcm = Razão de concentração de massa

4 METODOLOGIA

4.1 Plano de Amostragem

O trabalho preliminar para realizar a amostragem incluiu uma inspeção prévia das instalações da Planta *Ore Sorting*. Na inspeção foi feita a verificação dos pontos de amostragem, acessos aos fluxos, dispositivos utilizados para realizar a amostragem e procedimentos de segurança específicos envolvidos.

Após a inspeção se iniciaram os trabalhos de amostragem. A planta *Ore Sorting* era operada todos os dias durante o horário administrativo (7h. às 17 h.); portanto a amostragem foi realizada diariamente, durante uma semana, num intervalo de 15 em 15 minutos em três pontos distintos: a alimentação da planta *Ore Sorting*, o concentrado da planta *Ore Sorting* (EP) e o rejeito da planta *Ore Sorting* (AW). Após a coleta das amostras, foram analisados os teores de ouro, enxofre e carbono. Em seguida as amostras foram destinadas ao Laboratório de Processos para a realização de testes em escala de bancada.

4.2 Preparação das amostras para os ensaios de flotação

Após a amostragem de uma semana de operação da planta *Ore Sorting*, as amostras coletadas foram homogeneizadas (por pilhas cônica e alongada) e quarteadas, obtendo-se amostras representativas para análise química, para realizar os testes de flotação em bancada e para determinar o tempo ideal de moagem (tempo em que 80% do material seja menor que 74 μ m).

Para determinar o tempo ideal de moagem foram estabelecidos: 5;10;15;20;25;30 minutos. Após a moagem, a amostra moída foi transferida para uma peneira com abertura de 74 μ m e então classificada granulometricamente.

Após determinado o tempo ideal de moagem, as amostras que foram destinadas para os testes de flotação em bancada foram cominuidas em britadores de mandíbulas e moinhos de bolas (de laboratório). O tempo de moagem foi o tempo encontrado através da curva de moagem. Para os casos em que a moagem foi realizada em uma mistura de minérios concentrado do *Ore Sorting* e minério sulfetado, o tempo de moagem foi proporcional à quantidade de cada um dos minérios presente no material a ser cominuído. Todo o material alimentado no moinho foi então filtrado em um filtro de pressão e a torta gerada foi utilizada para alimentar os testes de flotação.

Os testes de flotação foram realizados com as seguintes amostras:

- Minério 100% Sulfetado;
- Minério 100% Concentrado do *Ore Sorting* (EP);
- Minério 3% Concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 97% Minério Sulfetado;
- Minério 6% Concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 94% Minério Sulfetado.

Na Figura 4.1 é apresentado o fluxograma de preparação das amostras para os testes de flotação.

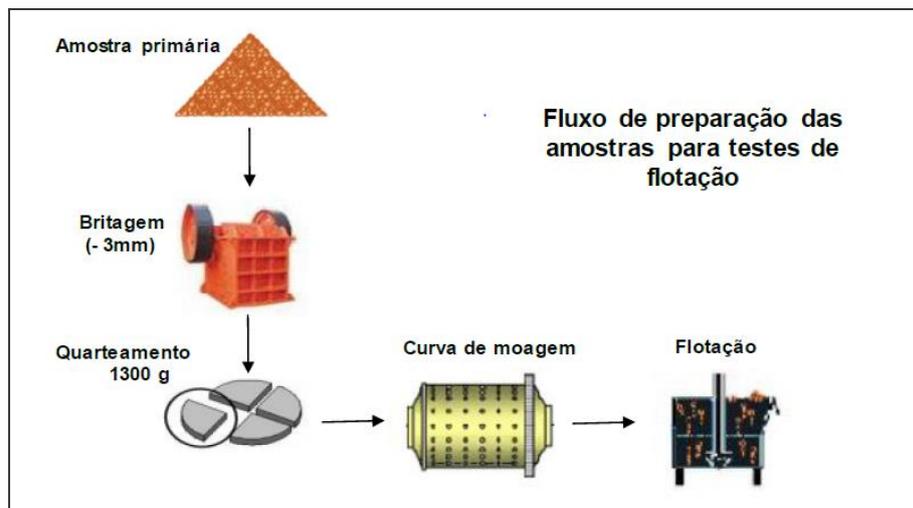


Figura 4.1: Fluxograma de preparação das amostras para os testes de flotação em bancada. Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a realização dos testes, alíquotas de alimentação, concentrado e rejeito foram destinadas para a realização da análise química e determinação dos teores de ouro, enxofre e carbono

Para a análise dos resultados, foram utilizadas curvas de seletividade, que levam em consideração a recuperação metalúrgica em função da razão de recuperação em massa, ilustrando essas duas variáveis correlacionadas.

O memorial de cálculo utilizado para a geração das curvas foi mostrado na Revisão bibliográfica.

4.3 Reagentes utilizados nos ensaios de flotação

Os testes de flotação foram feitos utilizando os reagentes padrões para flotação do minério sulfetado, denominados reagentes padrão AGA. Os reagentes e parâmetros utilizados estão apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2:

Tabela 1: Reagentes padrão AGA. Fonte: Elaborada pelo autor.

Ativador	Coletor	Espumante
Sulfato de cobre	Xantato C3430/Flomin C5460	Flotanol 7538

Tabela 2: Parâmetros dos testes utilizando reagentes padrão AGA. Fonte: Elaborada pelo autor.

Parâmetro dos Testes			Etapa Rougher e Scavenger			
Reagentes			Características da polpa		Célula de Flotação	
Tipo	Dosagem (g/t)	Tempo de condicionamento (minutos)	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Depressor	200	45	Percentual de Sólidos (%)	40	Aeração	1 litro/minuto
Coletor	160	1	pH	10	Rotação do rotor	1100 rpm
Espumante	50	1				

4.4 Ensaios de flotação em bancada

Os testes de flotação em escala de bancada foram realizados com o minério 100% sulfetado, minérios 100% concentrado do *Ore Sorting* (EP), minério 3% concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 97% minério sulfetado e minério 6% concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 94% minério sulfetado.

Os testes foram conduzidos em uma célula de flotação da marca CDC utilizando uma cuba com capacidade de 2400 ml. Em cada um dos testes foi utilizada uma massa de sólidos entre 1200 a 1300 gramas com uma granulometria 80% passante na abertura de 74 μ m. Foi adicionado em torno de 1300 ml de água ao teste para que a polpa fique com um percentual de sólidos de 40%. As massas de sólido e de água não foram tão precisas devido à mudança de litologia e, conseqüentemente, mudança de densidade dos minérios. A vazão de ar utilizado para gerar as bolhas foi de 1 litro/min.

Na **Figura 4.2** é mostrado o comportamento da polpa de minério sulfetado durante o ensaio de flotação.



Figura 4.2: Teste de flotação em bancada. Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram realizados testes de etapas *Rougher* (utilizando os reagentes nas dosagens mencionadas na Tabela 2) e *Scavenger* (utilizando 10% das dosagens mencionadas na Tabela 2).

O arraste foi promovido em intervalos de 15 segundos e os testes tiveram duração de 12 minutos, sendo que os primeiros 8 minutos foram referentes à etapa *Rougher*, e os últimos 4 minutos, à etapa *Scavenger*.

Após finalizado cada teste os produtos (concentrado e rejeito) foram devidamente coletados, filtrados, secos, pesados e enviados para a análise química.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das amostras para os testes de flotação

Durante a semana dos ensaios de flotação, foram separadas três alíquotas para determinar os teores dos elementos ouro, enxofre e carbono das amostras que alimentaram os ensaios de flotação. Essas alíquotas foram encaminhadas para o Laboratório Químico onde a determinação dos teores de ouro foram feitas a partir do método de Fire assay, através de testes de compilação e fusão de amostras.

Na Tabela 3 são mostrados os teores dos minérios sulfetado e minério concentrado do *Ore Sorting* (EP) referente a semana em que os ensaios de flotação ocorreram.

Tabela 3: Teores da alimentação dos testes de flotação. Fonte: Elaborada pelo autor.

Minério utilizado	Au	S	C
	(g/t)	%	%
Minério sulfetado	4,42	0,49	2,23
Minério concentrado do <i>Ore Sorting</i> (EP)	5,15	1,6	1,71

Como pode ser visto, o teor de ouro da amostra composta do produto do *Ore Sorting*, gerada a partir de uma semana de amostragem, é superior ao teor do minério sulfetado, minério que usualmente alimenta a planta sulfetado. Vale ressaltar que os teores de ouro, enxofre e carbono para os minérios com diferentes proporções de misturas do minério do concentrado do *Ore Sorting* (EP) com o minério sulfetado foram calculadas de acordo com as proporções de minério sulfetado e minério concentrado do *Ore Sorting* (EP) presente nas amostras, sendo o cálculo feito por média ponderada.

5.2 Ensaios de flotação em bancada

Foram realizados ensaios de flotação utilizando o minério 100% sulfetado, minério do concentrado do *Ore Sorting* (100% EP), minério com 3% do concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 97% do minério sulfetado e minério com 6% do concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 94% do minério sulfetado. As flotações foram realizadas com os reagentes padrão AGA mostrados na Tabela 1, utilizando os parâmetros mostrados na Tabela 2.

Os dados de análise química da alimentação, concentrado e rejeito dos ensaios de flotação, além dos valores de recuperação estão apresentados com maiores detalhes no Apêndice A.

5.2.1 Minério 100% Sulfetado

Na **Figura 5.1** é mostrada a curva de seletividade obtida a partir dos ensaios de flotação utilizando o minério 100% Sulfetado. Observa-se que, para este minério, obteve-se uma recuperação metalúrgica de 85,44%, fixando-se uma recuperação mássica de 25%, utilizando os reagentes do padrão AGA.

O motivo da análise dos dados serem feitas com base em uma recuperação mássica de 25% está no fato de que a recuperação mássica da etapa de concentração por flotação da Planta Sulfetado da unidade em o trabalho está sendo realizado também ser de 25%.

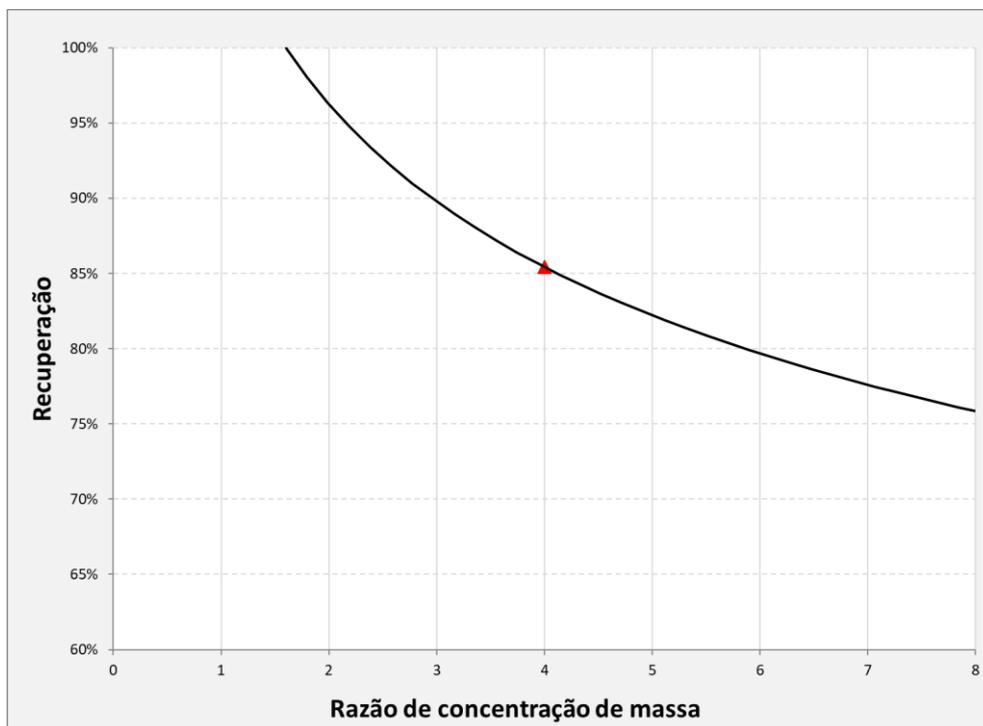


Figura 5.1: Curva de seletividade para o minério 100% Sulfetado

5.2.2 Minérios 100% concentrado do *Ore Sorting* (EP)

Na **Figura 5.2** é mostrada a curva de seletividade obtida a partir dos ensaios de flotação utilizando o concentrado do *Ore Sorting* (100% Minério EP). Observa-se que, para este minério, obteve-se uma recuperação metalúrgica de 78,20%, fixando-se uma recuperação mássica de 25%, utilizando os reagentes do padrão AGA. Comparando os resultados obtidos para os ensaios de flotação com o minério concentrado do *Ore Sorting* (100% EP) com o minério que usualmente alimenta a planta, minério sulfetado, temos que a recuperação do

ouro para o minério concentrado do *Ore Sorting* foi sete pontos percentuais inferior ao resultado dos ensaios de flotação com o minério sulfetado. Portanto, acredita-se que a alimentação da Planta Sulfetado com o minério concentrado do *Ore Sorting* em seu estado puro (100% EP) levará a uma menor recuperação metalúrgica do que quando a planta é alimentada com o minério sulfetado.

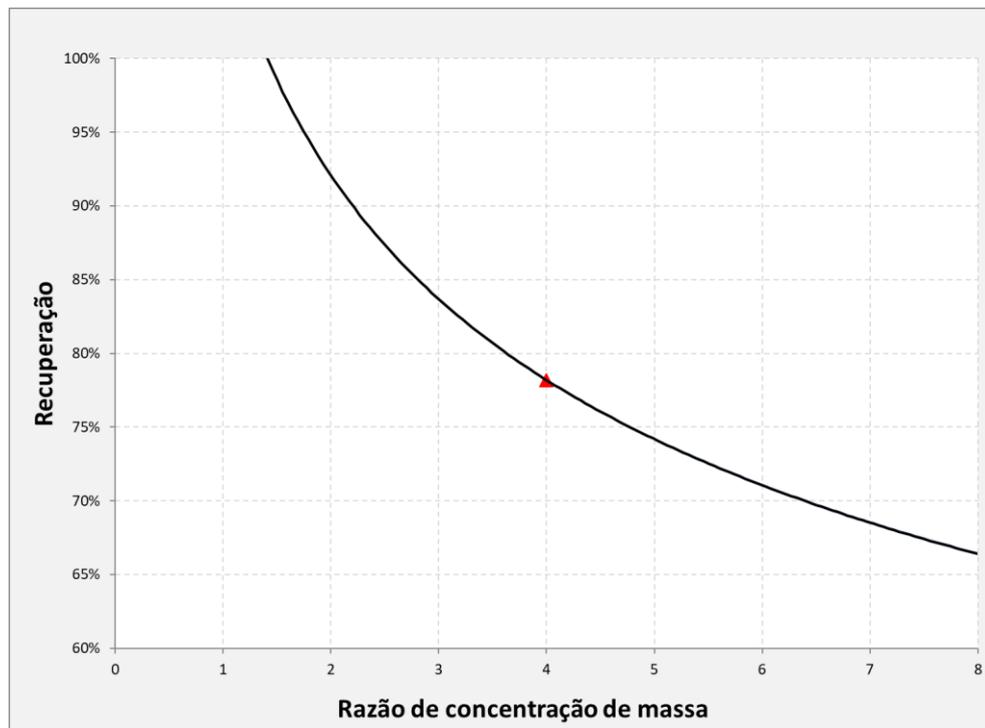


Figura 5.2: Curva de seletividade para o minério concentrado do *Ore Sorting* (100% EP)

5.2.3 Minério 3% Concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 97% Minério Sulfetado

Na **Figura 5.3** é mostrada a curva de seletividade obtida a partir dos ensaios de flotação utilizando o minério 3% concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 97% Minério Sulfetado. Observa-se que, para este minério, obteve-se uma recuperação metalúrgica de 83,23%, fixando-se uma recuperação mássica de 25%, utilizando os reagentes do padrão AGA.

A recuperação metalúrgica para o ouro através dos ensaios de flotação para a mistura de concentrado do *Ore Sorting* com o minério sulfetado em proporção de 3% de concentrado do *Ore Sorting* para 97% do minério sulfetado foi inferior em dois pontos percentuais em relação a recuperação obtida pelos ensaios de flotação com o minério sulfetado. Por se tratar de uma pequena variação acredita-se que a alimentação do minério em proporção de 3% de

concentrado do *Ore Sorting* e 97% de Minério Sulfetado na Planta Sulfetado pode ser aplicada sem aparentes perdas no processo de flotação.

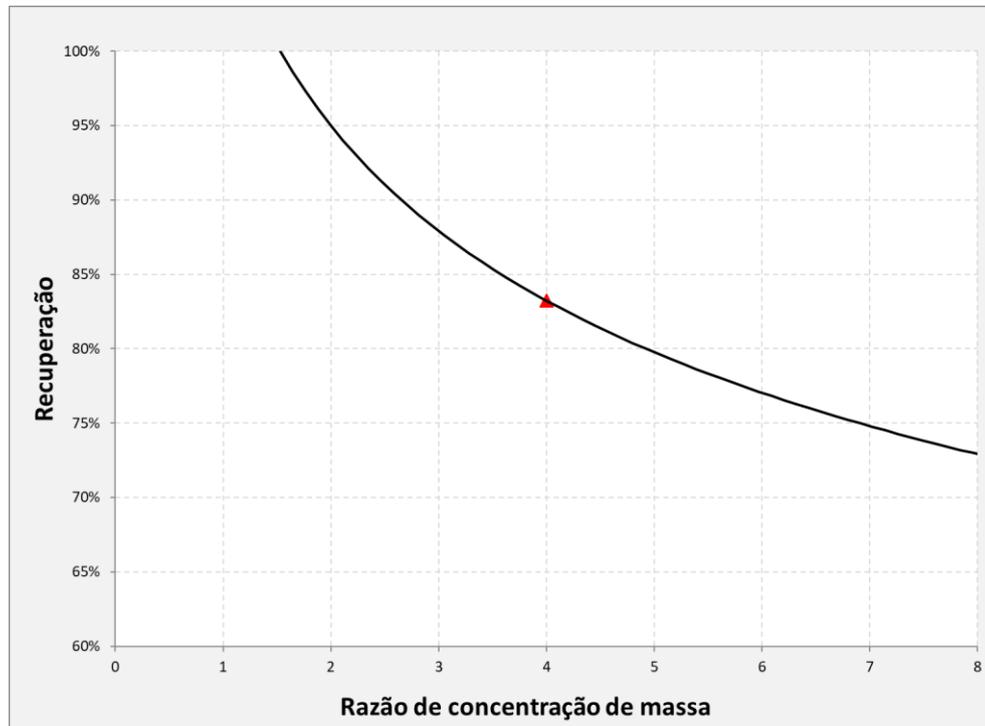


Figura 5.3: Curva de seletividade para o minério 3% concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 97% minério sulfetado

5.2.4 Minério 6% Concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 94% Minério Sulfetado

Na figura **Figura 5.4** é mostrada a curva de seletividade obtida a partir dos ensaios de flotação utilizando o minério 6% concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 94% minério sulfetado. Observa-se que, para este minério, obteve-se uma recuperação metalúrgica de 78,22%, fixando-se uma recuperação mássica de 25%, utilizando os reagentes do padrão AGA. Comparando a recuperação metalúrgica para os ensaios utilizando o minério que usualmente alimenta a planta, minério sulfetado, com a recuperação metalúrgica obtida para o minério 6% concentrado do *Ore Sorting* e 94% minério sulfetado, a recuperação para o minério 6% concentrado do *Ore Sorting* e 94% minério sulfetado ficou sete pontos percentuais abaixo da recuperação para o minério 100% sulfetado. Acredita-se que devido a variação de sete pontos de recuperação, a alimentação do minério concentrado do *Ore Sorting* em uma proporção de

6% do concentrado do *Ore Sorting* para 94% do minério sulfetado na planta sulfetada levará a uma menor recuperação metalúrgica do que quando a planta sulfetado é alimentada com o minério sulfetado.

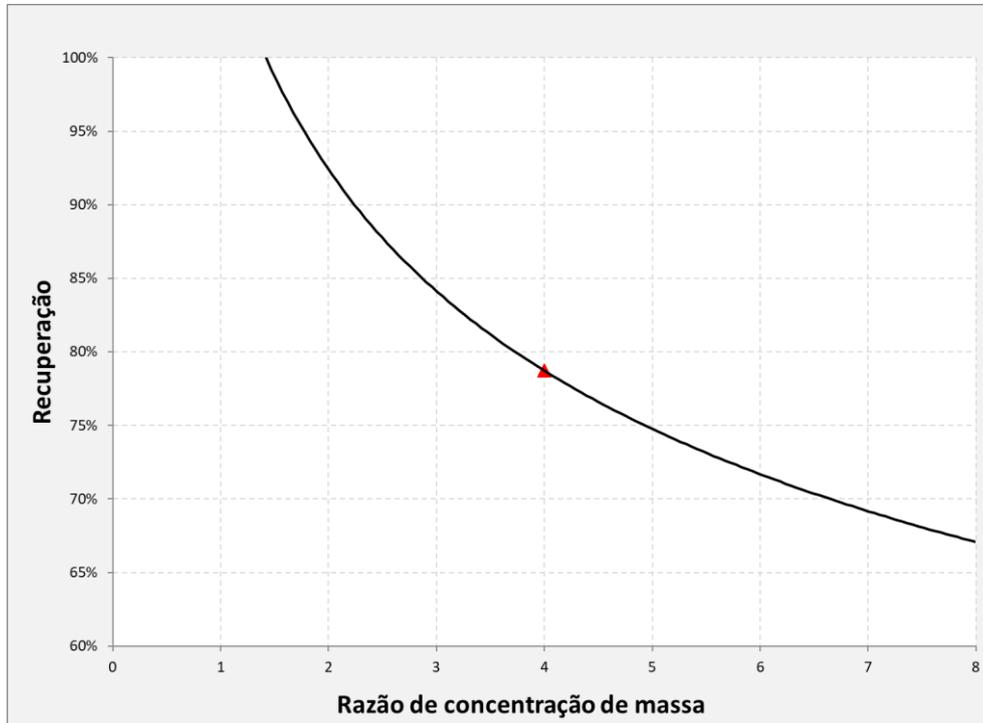


Figura 5.4: Curva de seletividade para o minério 6% concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 94% minério sulfetado

5.3 Comparando os resultados obtidos nos ensaios de flotação

Através da média das recuperações obtidas para cada produto, é possível relacioná-las em um gráfico de recuperação média versus produtos, conforme mostrado na **Figura 5.5**.

Observa-se que apenas os ensaios de flotação utilizando o minério 3% Concentrado do *Ore Sorting* e 97% do Minério Sulfetado alcançaram resultados de recuperação próximos dos resultados para o minério 100% Sulfetado. Já os ensaios feitos com o minério 100% concentrado do *Ore Sorting* (EP) e minério 6% concentrando do *Ore Sorting* (EP) e 94% minério sulfetado alcançaram recuperações próximas de 78%, sete pontos percentuais abaixo da recuperação do minério 100% sulfetado.

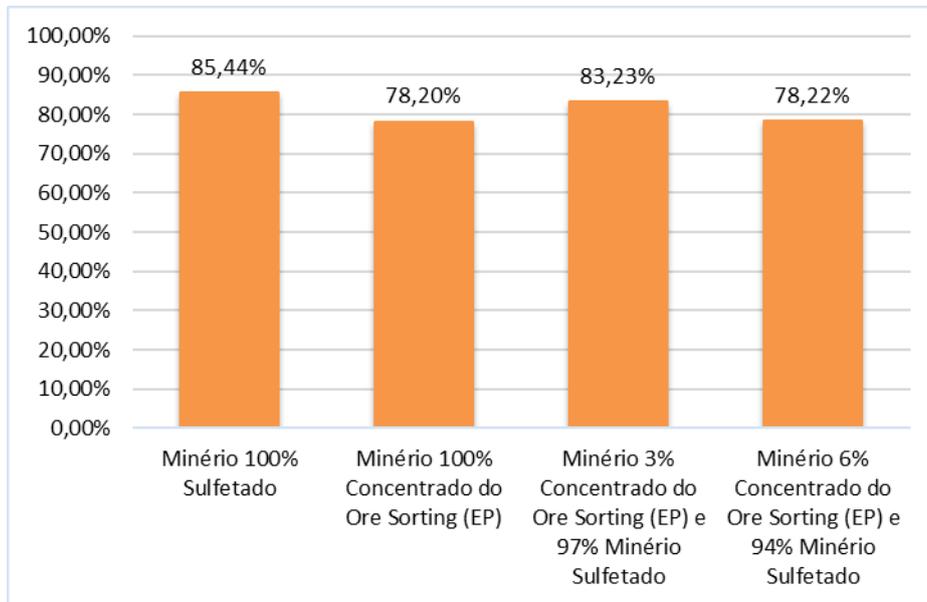


Figura 5.5: Resultados obtidos nos ensaios de flotação para diferentes minérios

6 CONCLUSÃO

- A recuperação metalúrgica média de ouro obtida na flotação, considerando uma recuperação mássica de 25%, para o minério 100% Sulfetado, minério 100% concentrando do *Ore Sorting* (EP), Minério 3% Concentrado do *Ore Sorting* (EP) e 97% Minério Sulfetado, Minério 6% Concentrando do *Ore Sorting* (EP) e 94% Minério Sulfetado foram 85,44% ;78,2%; 83,23% e 78,22%, respectivamente.
- A partir da pequena variação de recuperação metalúrgica obtida nos testes de flotação para o minério 3% concentrando do *Ore Sorting* (EP) e 97% minério sulfetado em relação a recuperação obtida para o minério 100% sulfetado, pode-se alimentar a Planta Sulfetado com o minério nessa proporção, sem perdas relevantes de recuperação.
- A partir da variação de recuperação metalúrgica de sete pontos percentuais obtidos nos testes de flotação tanto para o minério concentrado do *Ore Sorting* (100% EP) quanto para o minério 6% concentrado do *Ore Sorting* e 94% minério sulfetado, não é recomendada a alimentação desses minérios na planta sulfetado.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE, F.S., “**Influência da velocidade de rotação do impelidor na flotação de minério de fosfático**”, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2014.

CHAVES, A.P; FILHO, L.S.L; BRAGA, P.F.A; “**Flotação**”. Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição: CETEM. 2010

FERREIRA.R.L.P., LINS, F.F., MONTE, M.B.M., “**Desempenho de coletores na flotação de um concentrado de sulfetos contendo ouro**”, sem data-

LESSARD, J., DE BAKKER, J., MCHUGH, L.; *Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics. Minerals Engineering* 65 (2014) 88-97

LINS, F.F., “**Flotação de minérios de ouro**”, 2000. (relatório interno CETEM)

MARSDEN, J. e HOUSE, I., “*The chemistry of gold extraction*”, 1992, Ellis Horwood, New York.

MONTE, M.B.M., “**Propriedades de superfície do ouro e da pirita e sua separação por flotação**” Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,1998.

MONTE, M.B.M.; PERES, A.E.C., “**Química de Superfície na Flotação**”. Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição: CETEM. 2010

NASCIMENTO, M.R., SANTADREA. T.C., LEANDRO, A.P., “**Desempenho de coletores e espumantes na flotação direta de minérios auríferos sulfetados**”. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Laboratório de Flotação, fevereiro, 2016.

OLIVEIRA, J.F.; “**Flotação**”, disponível em:

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1287/1/TendênciasParte2.3.pdf>

OUTOTEC. *Outotec – Tomra Sensor Based Ore Sorting Solutions. Finland, April,2015.*

PERES, A.E.C; CHAVES, A.P; LINS, F.A.F.; TOREM, M.L. “**Beneficiamento de minérios de Ouro**”. Extração de Ouro – Princípios, Tecnologias e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.2002.

PORTO, C.G, PALERMO, N., PIRES, F.R.M. “**Panorama da Exploração e Produção do Ouro no Brasil**”. Extração de Ouro – Princípios, Tecnologias e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.2002.

VARELA, J.J, BRUM, I.A.S., **“Reagentes e equipamentos aplicados ao processo de flotação no tratamento de minérios”**, XXII ENTMMME/VII MSHMT- Ouro Preto-MG, novembro, 2007.

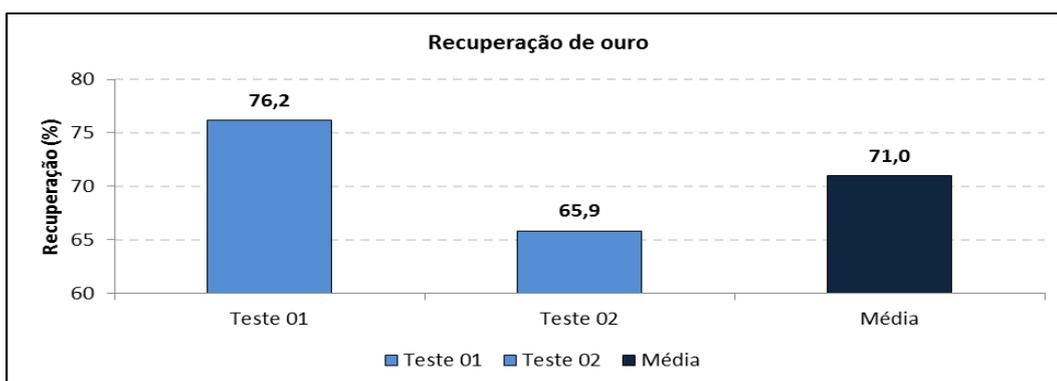
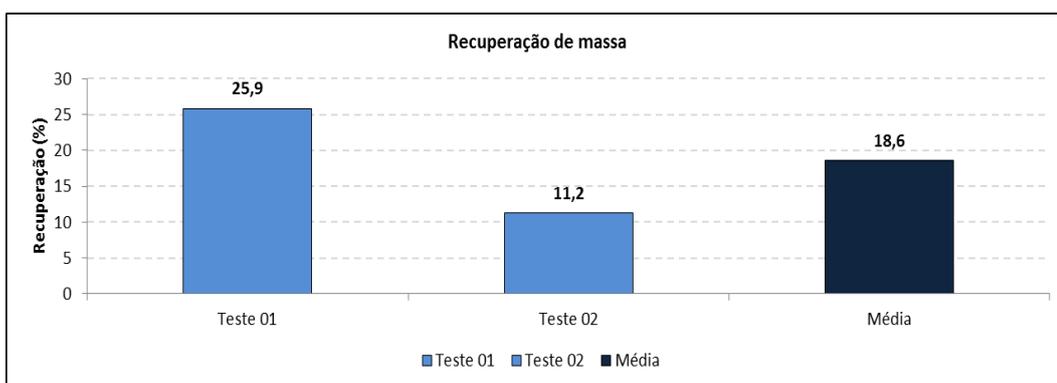
YOVANOVIC, A.P., **Engenharia da Concentração de Massa por Flotação. Volume 1: Fundamentos da Flotação**, Belo Horizonte, Editado por A. Yovanovic, 2004.

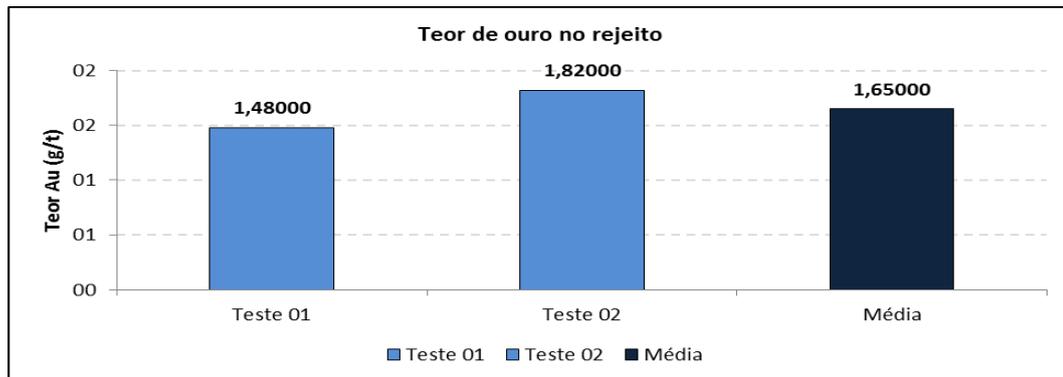
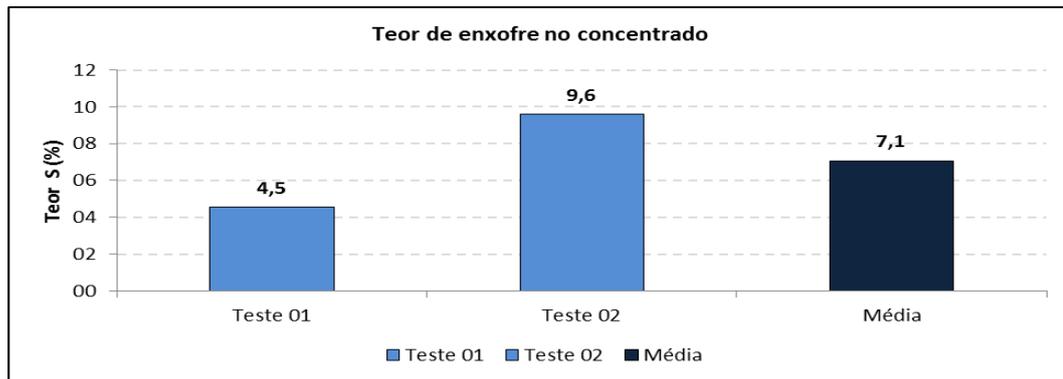
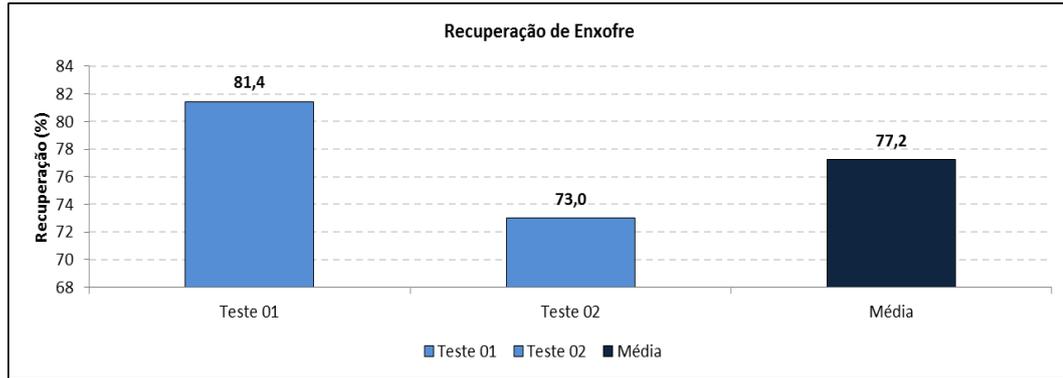
APÊNDICE A – Dados obtidos a partir de testes de flotação

Minério utilizado	Au	S	C
	(g/t)	%	%
Minério sulfetado	4,42	0,49	2,23
Minério EP	5,15	1,60	1,71

Teste realizado com minério 100% EP utilizando reagentes padrão AGA.

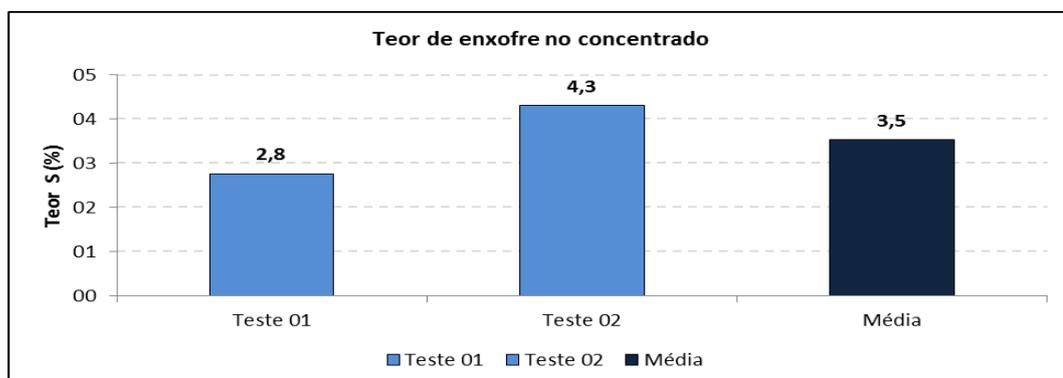
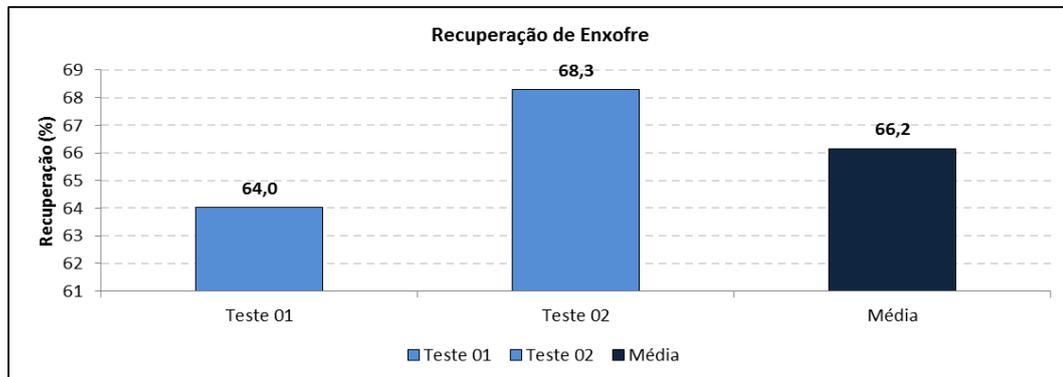
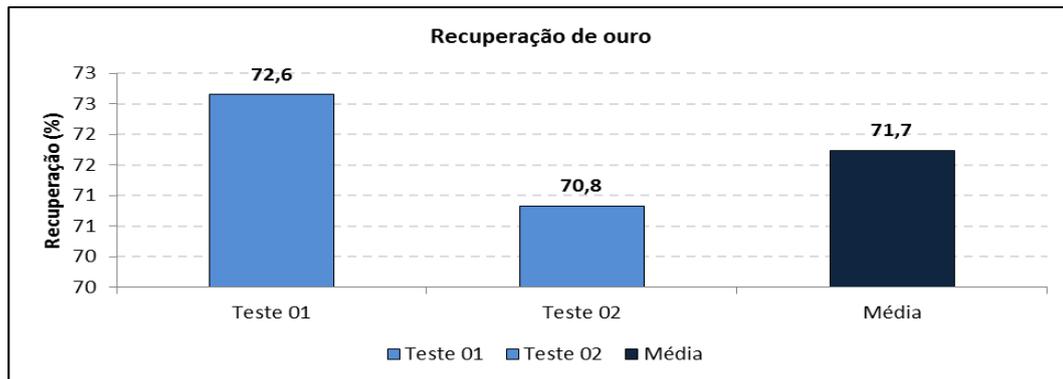
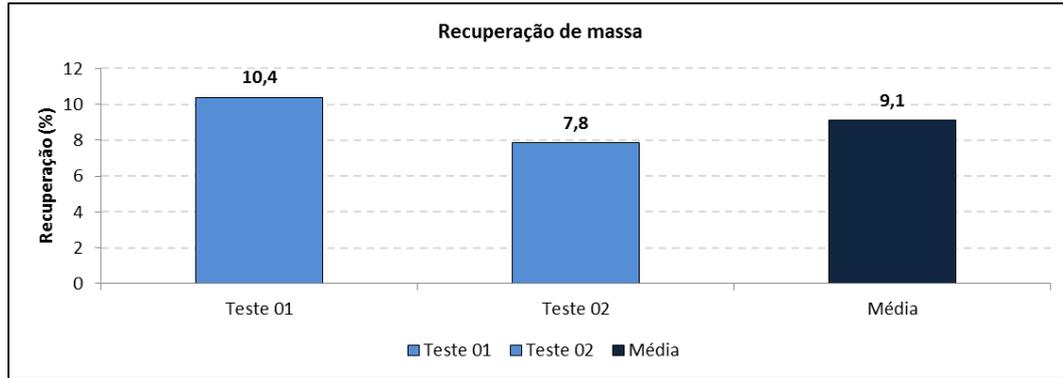
Ensaio	Massa (g)	Teores			Recuperações (%)				
		Au (g/t)	S (g/t)	C (g/t)	Massa	Au	S	C	
01	Alimentação calculada	1292	4,60	1,44	1,68	25,86	76,16	81,45	31,57
	Concentrado	334	13,55	4,53	2,05				
	Rejeito	958	1,48	0,36	1,55				
02	Alimentação calculada	1296	4,73	1,48	1,68	11,24	65,86	73,00	18,77
	Concentrado	146	27,73	9,61	2,81				
	Rejeito	1150	1,82	0,45	1,54				
Média	Alimentação calculada	1294	4,67	1,46	1,68	18,55	71,01	77,22	25,17
	Concentrado	240	20,64	7,07	2,43				
	Rejeito	1054	1,65	0,41	1,55				

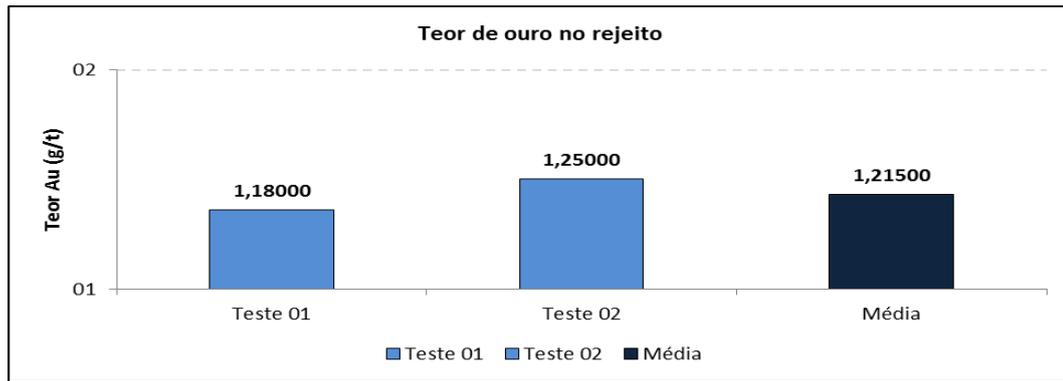




Teste realizado com minério 100% sulfetado utilizando reagentes padrão AGA.

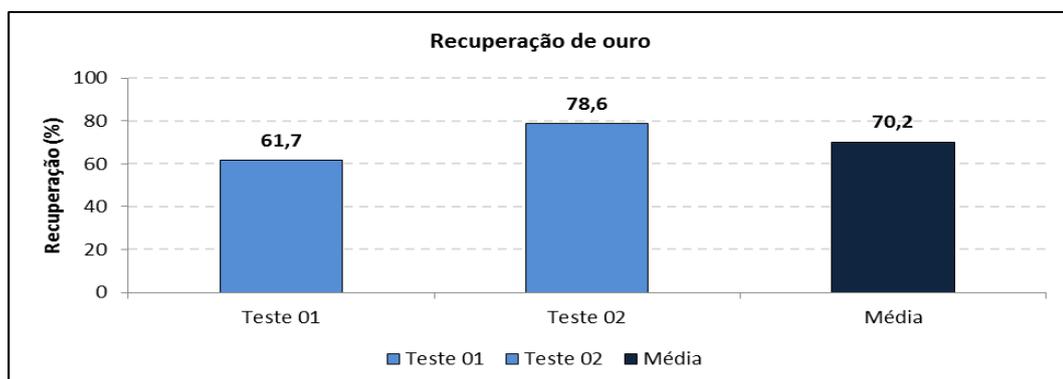
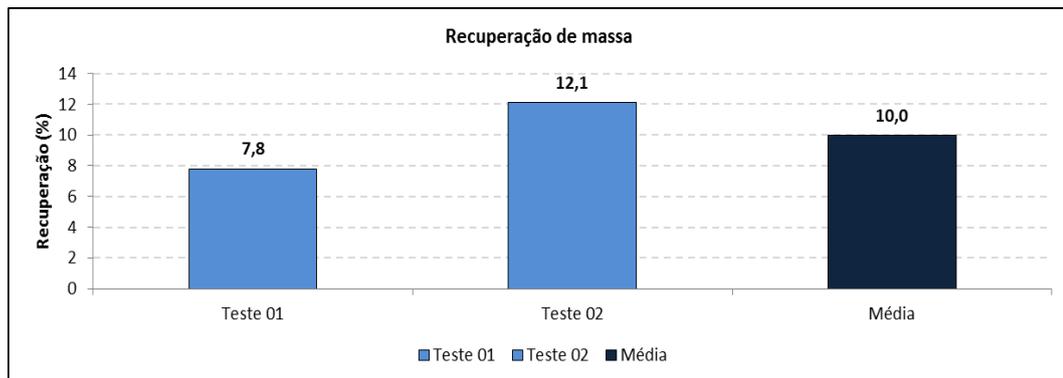
Ensaio	Massa (g)	Teores			Recuperações (%)				
		Au (g/t)	S (g/t)	C (g/t)	Massa	Au	S	C	
01	Alimentação calculada	1298	3,87	0,45	2,21	10,40	72,65	64,03	11,92
	Concentrado	135	27	2,76	2,53				
	Rejeito	1163	1,18	0,18	2,17				
02	Alimentação calculada	1300	3,95	0,49	2,20	7,85	70,83	68,29	9,68
	Concentrado	102	35,65	4,30	2,72				
	Rejeito	1198	1,25	0,17	2,16				
Média	Alimentação calculada	1299	3,91	0,47	2,21	9,12	71,74	66,16	10,80
	Concentrado	119	31,33	3,53	2,63				
	Rejeito	1181	1,22	0,18	2,17				

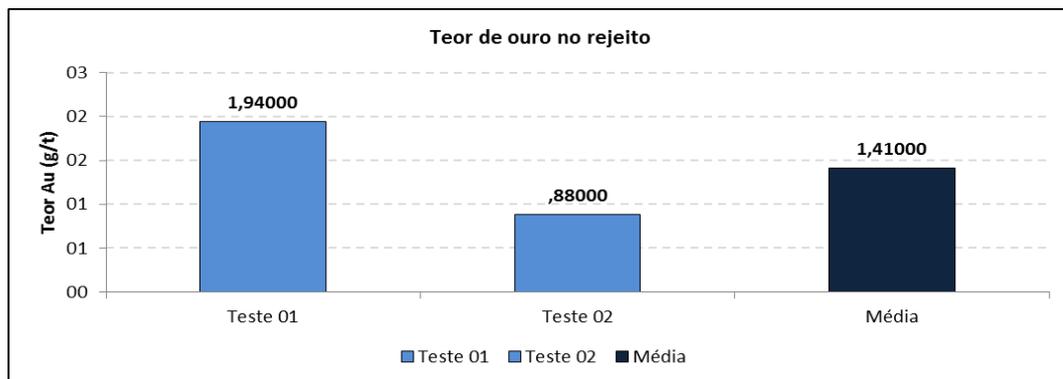
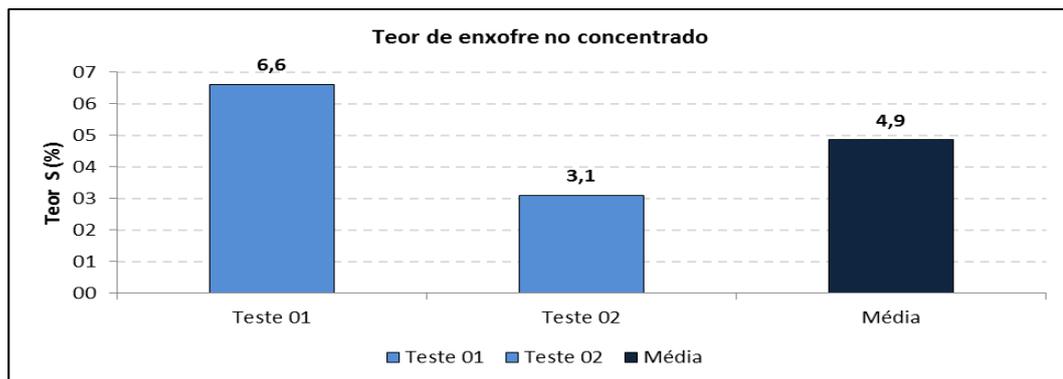
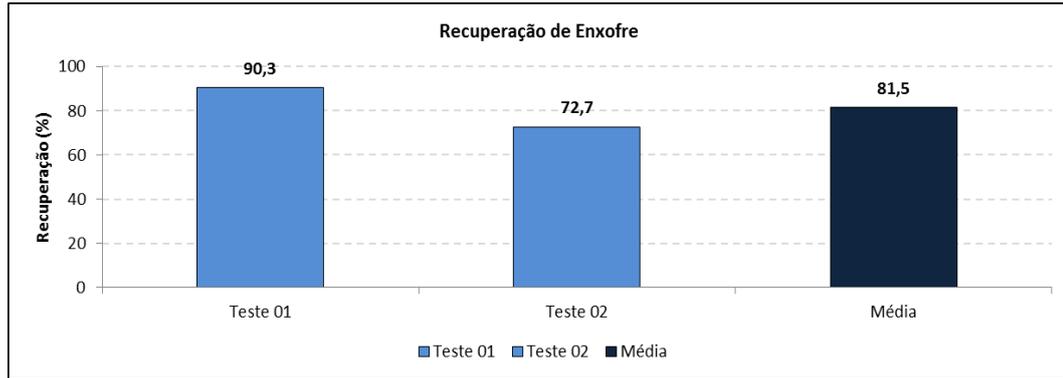




Teste realizado com minério 97% sulfetado e 3% EP utilizando reagentes padrão AGA.

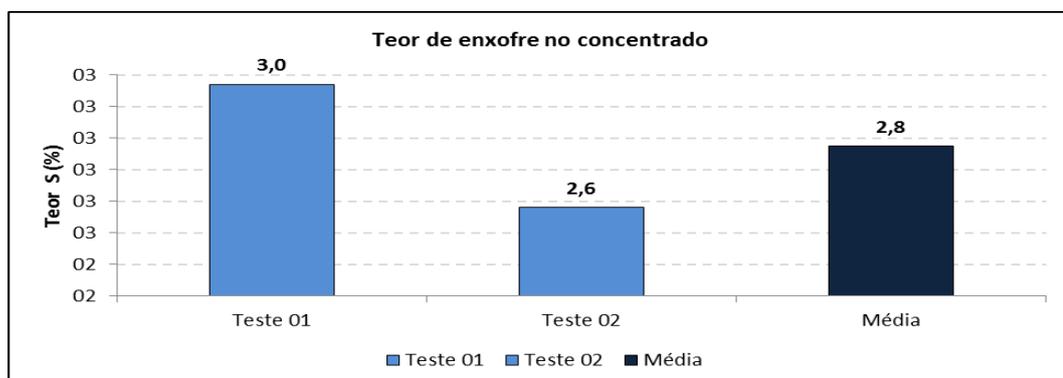
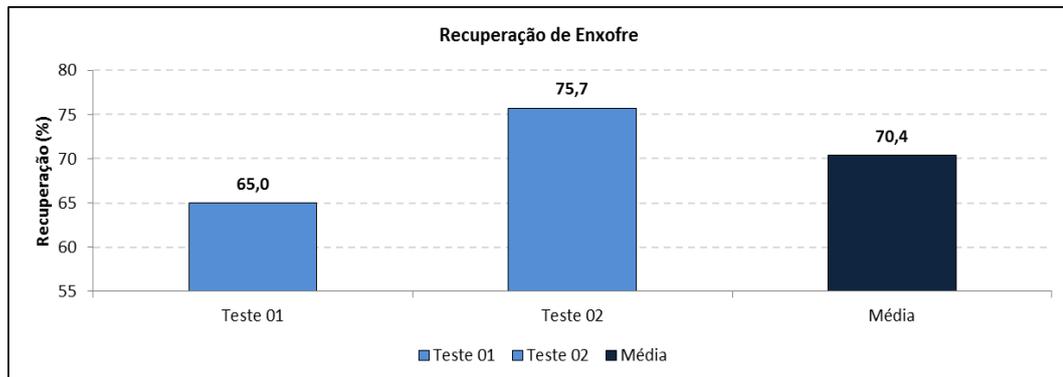
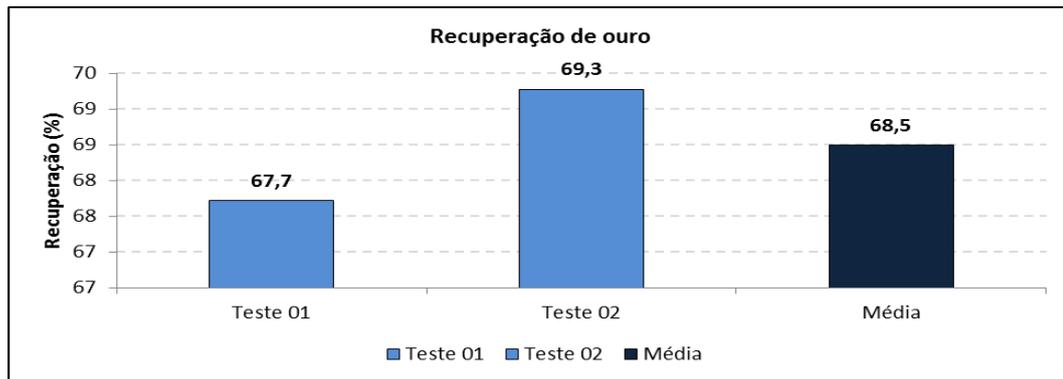
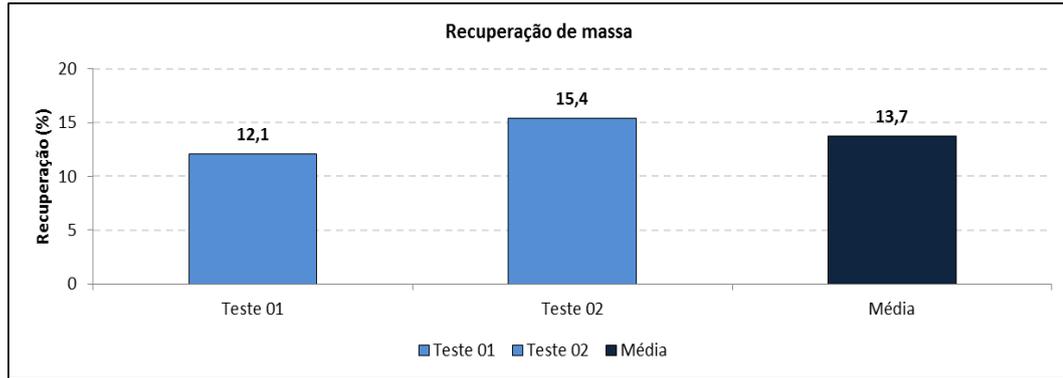
Ensaio	Massa (g)	Teores			Recuperações (%)				
		Au (g/t)	S (g/t)	C (g/t)	Massa	Au	S	C	
01	Alimentação calculada	1250	4,67	0,57	2,32	7,81	61,70	90,33	9,24
	Concentrado	98	36,90	6,62	2,74				
	Rejeito	1152	1,94	0,06	2,28				
02	Alimentação calculada	1240	3,62	0,52	2,21	12,10	78,61	72,73	14,32
	Concentrado	150	23,50	3,10	2,61				
	Rejeito	1090	0,88	0,16	2,15				
Média	Alimentação calculada	1245	4,14	0,54	2,26	9,95	70,16	81,53	11,78
	Concentrado	124	30,20	4,86	2,68				
	Rejeito	1121	1,41	0,11	2,22				

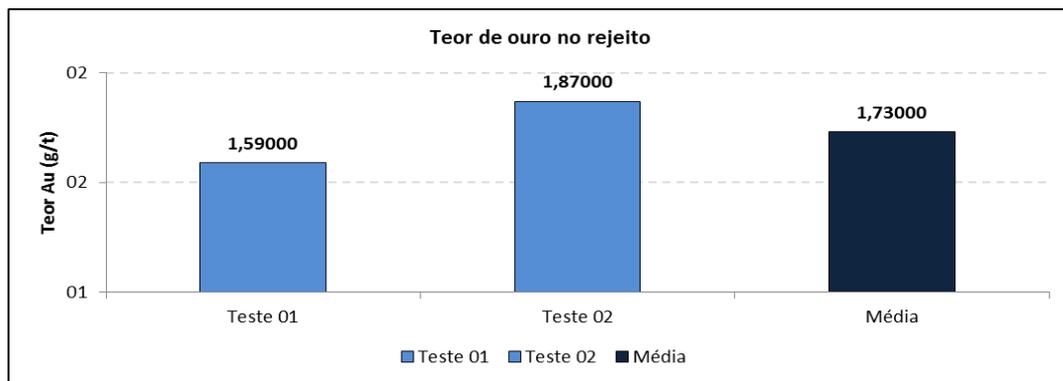
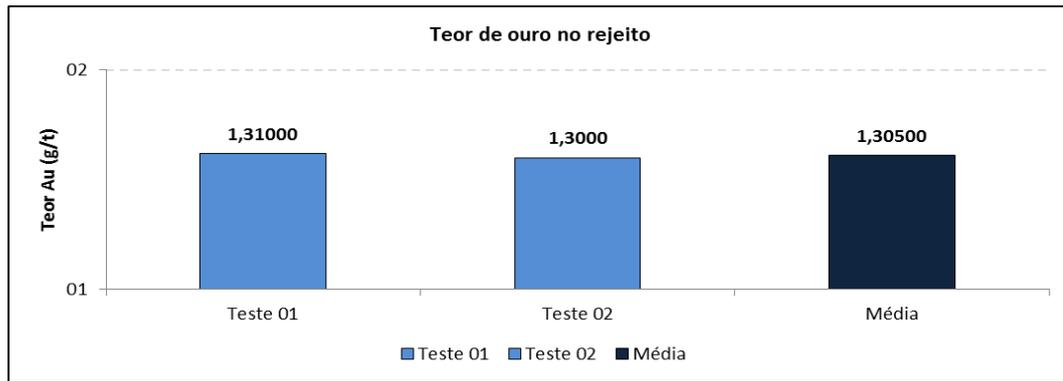




Teste realizado com minério 94% sulfetado e 6% EP utilizando reagentes padrão AGA.

Ensaio	Massa (g)	Teores			Recuperações (%)				
		Au (g/t)	S (g/t)	C (g/t)	Massa	Au	S	C	
01	Alimentação calculada	1281	3,57	0,55	2,20	12,08	67,72	64,97	14,01
	Concentrado	155	20,00	2,97	2,55				
	Rejeito	1126	1,31	0,22	2,15				
02	Alimentação calculada	1276	3,58	0,52	2,18	15,36	69,28	75,74	17,39
	Concentrado	196	16,15	2,58	2,47				
	Rejeito	1080	1,30	0,15	2,13				
Média	Alimentação calculada	1278	3,57	0,54	2,19	13,72	68,50	70,36	15,70
	Concentrado	175	18,08	2,78	2,51				
	Rejeito	1103	1,31	0,19	2,14				





DECLARAÇÃO

Certifico que o aluno **Geraldo Antônio dos Santos Júnior**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "**FLOTAÇÃO DE MINÉRIO SULFETADO DE OURO PARA DIFERENTES PRODUTOS OBTIDOS EM UM EQUIPAMENTO ORE SORTING**", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Érica Linhares Reis
Orientadora
Ouro Preto, 11 de março de 2019