

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas
Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

**USO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NA MINERAÇÃO DO OURO – UM ESTUDO
DOS ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS**

Autor: Vinicius Moreira Assis

Orientadora: Dra. Andréia Bicalho Henriques

Belo Horizonte

2020

Vinicius Moreira Assis

**USO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NA MINERAÇÃO DO OURO – UM ESTUDO
DOS ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS**

Versão Final

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Orientadora: Dra. Andréia Bicalho Henriques

Área de concentração: Tecnologia Mineral e Meio Ambiente

Belo Horizonte

2020

A848u

Assis, Vinicius Moreira.

Uso da inovação tecnológica na mineração do ouro – um estudo dos aspectos técnicos e econômicos [recurso eletrônico] / Vinicius Moreira Assis. – 2020.

1 recurso online (34 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Andréia Bicalho Henriques.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 23-34.

Bibliografia: f. 22.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Minérios - Teses. 4. Ouro - Minas e mineração - Teses. I. Henriques, Andréia Bicalho. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UFMG

**USO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NA MINERAÇÃO DO OURO – UM
ESTUDO DOS ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS**

VINICIUS MOREIRA ASSIS

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 16 de novembro de 2020.

Por:

Prof.ª Andreia Bicalho Henriques, Dr.ª (UFMG)
Orientadora

Prof. Roberto Galery, Dr. (UFMG)

Prof. Carlos Alberto Pereira, Dr. (UFOP)

DEDICATÓRIA

A minha esposa, Líbia Mara Angelo Felipe Assis e ao meu filho João Felipe Assis, pelo amor e incentivo.

Inovação não se faz com intenções ou discursos inócuos. Inovar é ter ousadia de ir além da mesmice, e ter a coragem para desafiar a mediocridade.

(Mauricio Costa)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por sempre me guiar e ajudar na realização dos meus sonhos.

À minha esposa Libia Mara Angelo Felipe Assis e ao meu filho João Felipe Assis pelo constante incentivo e ensinamentos da vida.

Aos meus pais por terem me proporcionado uma educação de qualidade.

À Dra. Andréia Bicalho Henriques, pela orientação e confiança durante a minha jornada no mestrado. Meu sincero agradecimento.

À todos os professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG, que ajudou no meu desenvolvimento técnico.

À instituição UFMG pelo ensino de qualidade.

À toda equipe do laboratório de processos da AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração e em especial a Tatiane Assis Fernandes pelo apoio na execução dos testes.

À empresa AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração pelos ensinamentos profissionais e pessoais.

RESUMO

O setor da mineração tem um importante papel financeiramente e economicamente para os países que praticam essa atividade. Além dos empregos gerados e desenvolvimento sociocultural, a mineração promove um crescimento econômico para o país. Entretanto, o setor vem enfrentando diversos desafios devido à COVID-19, incidentes envolvendo barragens de rejeitos, aumento dos custos de energia, baixo teor nos depósitos existentes, restrições no marco regulatório da mineração e dificuldade de acesso aos recursos disponíveis. Diante desse contexto, o estudo desenvolvido, teve como objetivo central o aproveitamento de minério, atualmente considerado não economicamente viável, da mina de Córrego do Sítio Mineração, localizado na cidade de Santa Bárbara, Minas Gerais. A metodologia utilizada no trabalho contemplou a identificação e transporte de uma lavra com teor abaixo do teor de corte; a operação da planta *ore sorting*; ensaios em bancadas e a caracterização química, por fim, foi realizado a análise de viabilidade técnica e econômica para confirmação do benefício da operação. Para realizar a análise técnica, foram considerados os parâmetros operacionais utilizados atualmente na lavra de minério. Para planta *ore sorting* e planta de beneficiamento, foram avaliados os resultados de granulometria e recuperação metalúrgica para os principais elementos químicos: ouro (Au); enxofre (S); carbono (C); antimônio (Sb); ferro (Fe) e arsênio (As). A análise financeira contemplou os custos na operação de mina subsolo, na planta *ore sorting*, na planta de beneficiamento e as recuperações metalúrgicas obtidas durante os testes. Foram realizados três cenários, considerando o preço do ouro em: 1400 US\$/oz; 1500 US\$/oz e 1600 US\$/oz. O resultado do estudo, demonstrou que tecnicamente é viável a utilização da planta *ore sorting* para a lavra de nomenclatura 539 130N. A recuperação metalúrgica na planta *ore sorting* foi de 89,9% (incluindo finos) para 65% da massa concentrada e com base nos testes em bancada, a recuperação metalúrgica da planta de processamento foi de 90%. Do ponto de vista econômico, baseado no método de análise de custo-benefício, considerando os três cenários para o preço do ouro: 1400 US\$/oz; 1500 US\$/oz e 1600 US\$/oz, a operação com a lavra começa a ser lucrativa após 1,07 g/t, 1,02 g/t e 0,94 g/t, respectivamente.

Palavras-chave: *Ore sorting*; Minério refratário; Ouro; pré-concentração.

ABSTRACT

The mining sector has a fundamental financial and economical role in the country where it practices these activities. In addition to employment creation and social-cultural development, the mining sector brings economic growth to the country. However, the sector is facing challenges due to COVID-19, incidents involving tailings dam facilities, rising energy costs, low grade ore deposits, restrictions in mining regulations and access to the available resources. In this context, the main objective of the study was to identify gold ores below cut-off grade from the underground mine at Córrego do Sítio Mineração, located at Santa Barbara, Minas Gerais. The methodology used in this work included the identification of ores below cut-off grade; operation of the ore sorting plant; chemical analysis of the ore sorting plant concentrated and bench tests, finally, the technical and economic feasibility analysis was carried out to ensure the benefit of the total operation. In order to carry out the technical analysis, the parameters currently used in the mining were considered. For processing plant, the results of granulometry and metallurgical recovery were evaluated for the main chemical elements: gold (Au); sulfur (S); carbon (C); antimony (Sb); iron (Fe) and arsenic (As). The financial analysis included the costs currently practiced in the mining operation, in the ore sorting plant, in the processing plant and the metallurgical recoveries obtained during the all stages. Three different scenarios were carried out, considering gold price at: 1,400 US\$/oz, 1,500 US\$/oz and 1,600 US\$/oz. The potential of underground refractory gold ore viability using ore sorting technology has been proven technically feasible for a very specific stope application at Córrego do Sítio Mineração. The overall recovery (including fines) in ore sorting was 92% for 65% of the mass and based on metallurgical test work, the predicted processing plant recovery was 89.9%. From an economic perspective, based on the cost benefit analysis, for 1,400 US\$/oz, 1,500 US\$/oz and 1,600 US\$/oz, the stope starts to be profitable after 1.07 g/t, 1.02 g/t, 0.94 g/t of gold, respectively.

Keywords: ore sorting, refractory ore, gold, pre-concentration, processing.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo global	3
2.2	Objetivos específicos	3
3	MATERIAIS E MÉTODOS	4
3.1	Lavra selecionada para teste	4
3.2	Metodologia para operação ore sorting	5
3.3	Teste em bancada	6
3.4	Avaliação econômica	7
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	8
4.1	Resultados da lavra na mina subsolo	8
4.2	Resultados planta ore sorting	8
4.2.1	Reconciliação	8
4.2.2	Britagem e peneiramento	9
4.2.3	Máquina XRT	10
4.2.4	Máquina laser	10
4.2.5	Máquina XRT e laser	11
4.3	Resultados teste em bancada com concentrado ore sorting	12
4.3.1	Teste de moagem em bancada	13
4.3.2	Teste de gravimetria em bancada	14
4.3.3	Teste de flotação em bancada	15
4.4	Modelo financeiro	17
5	CONCLUSÕES	19
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	21
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
8	APÊNDICES	23
8.1	APÊNDICE I – Carta de decisão emitida pela REM- International Engineering Journal do artigo relacionado ao trabalho	23

8.2 APÊNDICE II – Artigo submetido e aceito pelo periódico REM - International Engineering Journal.....	24
--	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de lavra selecionada para teste.	5
Figura 2: Planta <i>ore sorting</i>	5
Figura 3: Fluxograma planta <i>ore sorting</i>	6
Figura 4: Diagrama de blocos dos testes em bancada.	7
Figura 5: (a) Resultados de recuperação máquina XRT e (b) Resultados de teor máquina XRT.	10
Figura 6: (a) Resultados de recuperação máquina <i>laser</i> e (b) Resultados de teor máquina <i>laser</i>	11
Figura 7: (a) Resultados global de recuperação máquinas XRT e <i>laser</i> e (b) Resultados global de teor máquinas XRT e <i>laser</i>	11
Figura 8: Diagrama de blocos dos procedimentos experimentais.	12
Figura 9: Análise de custo-benefício variando preço do ouro em 1400, 1500 e 1600 US\$/oz.	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultado operacional do minério lavrado.	8
Tabela 2: Reconciliação de massa e teor.	9
Tabela 3: Resultado operacional do circuito de britagem.	9
Tabela 4: Distribuição granulométrica em 30 min de moagem.	13
Tabela 5: Distribuição granulométrica em 40 min de moagem.	14
Tabela 6: Distribuição granulométrica em 50 min de moagem.	14
Tabela 7: Variáveis utilizadas para teste de gravimetria.	14
Tabela 8: Resultados dos testes de gravimetria.	15
Tabela 9: Variáveis utilizadas para o teste de flotação etapa <i>rougher</i>	15
Tabela 10: Variáveis utilizadas para o teste de flotação etapa <i>scavenger</i>	15
Tabela 11: Caracterização química após os testes de flotação.	16
Tabela 12: Resultado de recuperação metalúrgica nos testes de flotação.	16
Tabela 13: Cenário base.	17
Tabela 14: Custos operacionais unitários.	17

1 INTRODUÇÃO

A demanda pelos principais metais que a sociedade precisa para produzir insumos, aumentou de forma significativa ao longo das últimas décadas. O aumento dessa demanda faz com que o setor da mineração tenha um papel importante no desenvolvimento da cadeia produtiva global e da sociedade.

Paralelamente, a indústria da mineração vem enfrentando desafios devido as restrições relacionadas a pandemia COVID-19, incidentes envolvendo barragens de rejeitos, aumento dos custos de energia, baixo teor nos depósitos existentes, restrições no marco regulatória da mineração e dificuldade de acesso aos recursos disponível.

Em resposta aos desafios encontrados no setor da mineração, diversas tecnologias de exploração mineral e beneficiamento estão mudando o desenho do setor e abrindo novas oportunidades nos processos da cadeia produtiva.

Investimentos contínuos em inovação vêm impulsionando o mercado de *commodities*. *Sensor based sorting* já é uma realidade dentro das empresas no mundo e principalmente na mineração.

Atualmente, a tecnologia é conhecida e aplicada mundialmente na indústria alimentícia, recuperação de materiais reciclados, seleção de grãos e processamento de metais preciosos, tal qual, diamante e ouro.

As tecnologias de pré-concentração do minério, antes de ingressar nas usinas de beneficiamento, utilizando mecanismos de separação, são capazes de otimizar processos, analisando e selecionando partículas de minério que contém o metal de interesse.

Para a indústria da mineração, *ore sorting* pode solucionar diversos problemas, tais como: investimentos de capital através de menores construções de circuito de moagem, adição de reservas não economicamente viáveis através do processo convencional de lavra e processamento, aumento de recuperação nas plantas de processamento através do gerenciamento de *blends*, viabilização de pilhas consideradas estéril e pré-concentração do minério em minas remotas.

Diante desse contexto, pode-se destacar ainda mais a importância da inovação dentro da cadeia da mineração do ouro, aqui abordada a tecnologia *ore sorting*, para melhorar a eficiência das minas e contribuir de forma sustentável o desenvolvimento do país e da sociedade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo global

O objetivo desse trabalho foi avaliar tecnicamente e financeiramente a aplicação da tecnologia *ore sorting* para operações de lavra e processamento de minério contendo teores de ouro abaixo do teor de corte, da mina subsolo de Córrego do Sítio Mineração.

2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral proposto, foram realizados os seguintes objetivos específicos:

- i. identificar uma lavra com características similares a proposta do trabalho, ou seja, com teores de ouro abaixo do teor de corte;
- ii. realizar testes com o minério na planta *ore sorting*;
- iii. avaliar o comportamento e o grau de enriquecimento na planta *ore sorting*;
- iv. realizar caracterização química do produto e rejeito gerado na *planta ore sorting*;
- v. avaliar e simular o comportamento dos principais elementos: ouro (Au), enxofre (S), carbono (C), antimônio (Sb), ferro (Fe) e arsênio (As) na usina de beneficiamento através de testes em bancada utilizando o protocolo de geometurgia;
- vi. correlacionar as informações e os parâmetros obtidos, com os custos praticados atualmente na operação da mina subsolo, planta *ore sorting* e planta de beneficiamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram mapeadas lavras com teores abaixo do teor de corte nas minas Laranjeiras, Carvoaria e Cachorro Bravo. Todas as minas, pertencem a AngloGold Ashanti localizada na cidade de Santa Bárbara em Minas Gerais.

O minério extraído foi transportado para o pátio de estoque da planta *ore sorting*. Para a realização dos testes, foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- a) britagem;
- b) peneiramento do material britado nas frações:
 - a. + 20 mm – 45 mm.
 - b. + 10 mm – 20 mm.
 - c. – 10 mm.
- c) para cada fração de tamanho + 20 mm – 45 mm e + 10 mm – 20 mm, o material foi processado nas duas máquinas de *ore sorting* com tecnologias de raios X de transmissão XRT e *laser*. A fração – 10 mm não foi processada nas máquinas devido à restrição da tecnologia para o processamento de finos;
- d) balanço metalúrgico da planta *ore sorting*.

Os testes em bancada, foram conduzidos no laboratório de processos da própria AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração. As amostras geradas do concentrado da planta *ore sorting*, foram preparadas e realizados testes em bancada de britagem, moagem, gravimetria e flotação. O objetivo principal dos testes, foi simular e avaliar o comportamento do concentrado da planta *ore sorting*, na atual planta de beneficiamento de Córrego do Sítio Mineração.

Com os resultados obtidos nas etapas anteriores, foi desenvolvido um modelo com técnicas de viabilidade financeira utilizando a análise de custo-benefício. Essa etapa foi importante para avaliar o nível de atratividade do investimento para tomada de decisão.

3.1 Lavra selecionada para teste

A lavra de nomenclatura 539 130N da mina Laranjeiras, foi definida para o teste devido a sua representatividade na composição mineralógica e por obter teores próximo aos domínios geometalúrgicos do depósito da mina subsolo de Córrego do Sítio Mineração.

A Figura 1 representa a área de lavra com 70 m de comprimento e 2,22 m de espessura que foi lavrada pelo método de *sublevel stope*, dividido em três etapas.

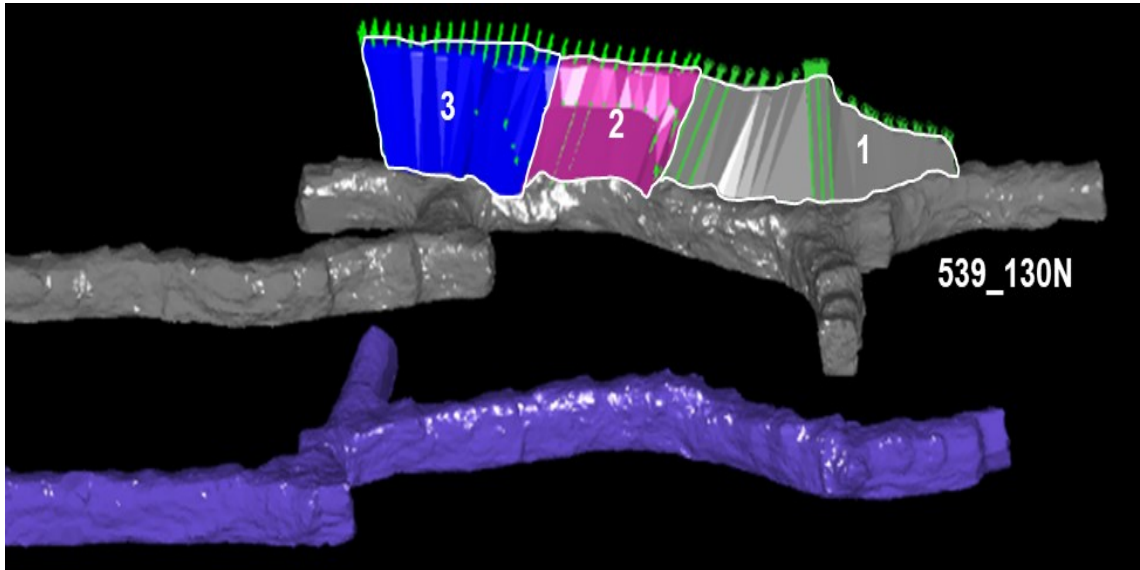


Figura 1: Área de lavra selecionada para teste.

3.2 Metodologia para operação ore sorting

Após o mapeamento e lavra, o minério 539 130N da mina Laranjeiras foi transportado para a pilha de estoque da planta *ore sorting* para posterior processamento. A planta *ore sorting*, Figura 2, é composta por um britador de mandíbula modelo FAÇO 8050 que alimenta uma peneira de dois *decks* modelo IMIC 50020 e um britador secundário modelo BCL 200, o produto dessa etapa é direcionado via correias transportadoras para a alimentação nas máquinas de raios X e *laser*.



Figura 2: Planta *ore sorting*.

A máquina XRT instalada em Córrego do Sítio Mineração, possui duas tecnologias na etapa de detecção e classificação: transmissão dupla de raios X (DE-XRT) e transmissão única de raios X. Para as duas tecnologias, a operação básica consiste na emissão de um feixe de raios X sobre a amostra e em seguida ocorre a interpretação das informações pelo detector (ROBBEN et al., 2020). Este princípio de classificação é uma das tecnologias mais utilizadas na mineração de corpos com características de veios estreitos (PILLAY et al., 2011; MURPHY; VAN ZYL; DOMINGO, 2012).

Além da máquina XRT, para recuperar o ouro associado ao quartzo, uma máquina a *laser* opera em série, recebendo o rejeito da máquina XRT. Essa tecnologia detecta reflexão e difração de luz através de *laser* emitidos na superfície da rocha processada (SALTER; WYATT, 1991).

A Figura 3 representa o fluxograma utilizado para os testes na planta *ore sorting*, além da etapa de britagem e peneiramento, foram utilizados as duas máquinas XRT e *laser*.

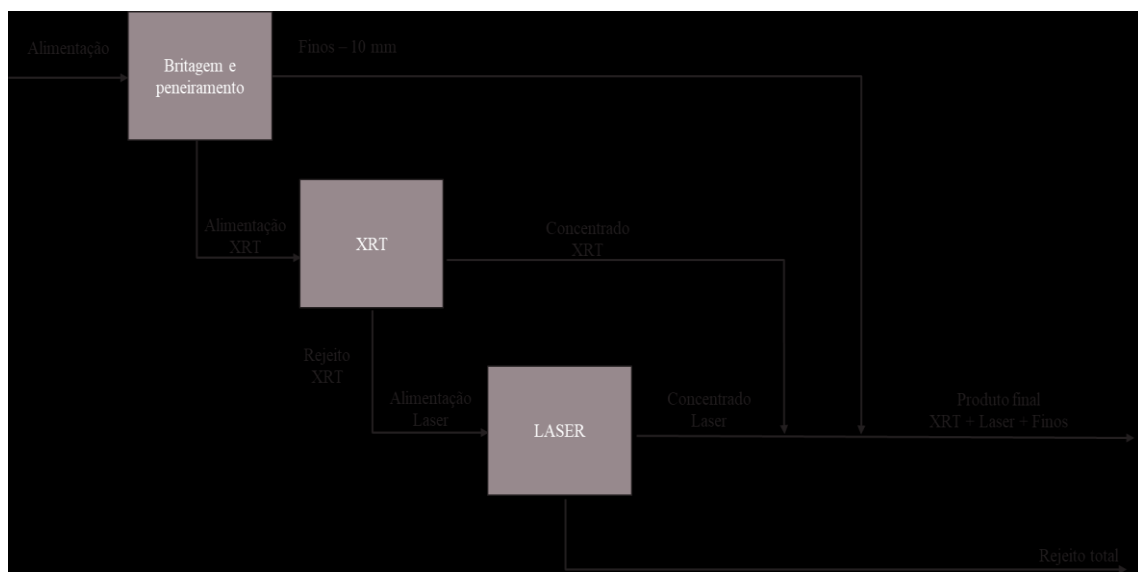


Figura 3: Fluxograma planta *ore sorting*.

3.3 Teste em bancada

As amostras geradas no produto final (XRT e *laser*) da planta *ore sorting*, foram encaminhadas para o laboratório de geometurgia da Anglogold Ashanti Córrego do Sítio Mineração. Conforme o diagrama de blocos detalhado na Figura 4, foram desenvolvidos testes em bancada para simular o comportamento do concentrado da planta *ore sorting* na planta de beneficiamento.

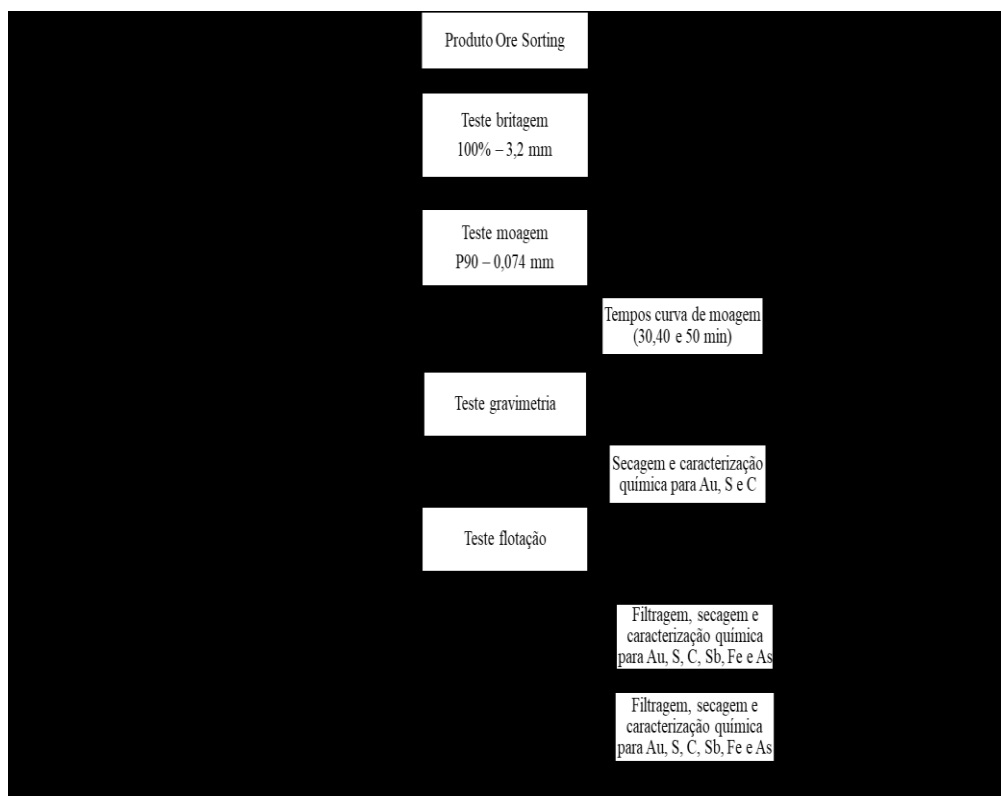


Figura 4: Diagrama de blocos dos testes em bancada.

Para os testes em bancada, foi utilizado o protocolo de geometurgia aplicado no laboratório de processos seguindo os seguintes passos:

- a) recebimento e preparação das amostras;
- b) teste de britagem em 100% – 3,2 mm;
- c) quarteamento das amostras em seis alíquotas de 1.000 gramas;
- d) teste de moagem em p90 – 0,074 mm;
- e) teste de gravimetria;
- f) teste de flotação utilizando o rejeito do teste gravimétrico.

3.4 Avaliação econômica

A análise econômica utilizada no estudo, considerou os custos variáveis envolvidos na operação de mina, os custos totais da planta *ore sorting* e os custos variáveis da planta de beneficiamento.

Para um entendimento e garantia se a operação é lucrativa ou não, foi utilizado a análise de custo-benefício (ACB) que forneceu informações gerais do benefício do projeto frente aos custos envolvidos da operação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, será apresentado e discutido os resultados obtidos durante as etapas de lavra, processamento do minério na planta *ore sorting*, testes de bancada simulando a planta de beneficiamento e a análise financeira.

4.1 Resultados da lavra na mina subsolo

Após o planejamento e sequenciamento de lavra, foi retirado o minério 539 130N da mina Laranjeiras. Foram transportadas 3.935 t de minério contendo um teor médio de 3,02 g/t. O teste foi dividido em três estágios para melhorar a representatividade na planta *ore sorting*.

O primeiro estágio, com 34 m de comprimento, com uma diluição planejada normal e teor médio acima do teor de corte. O segundo estágio, foi aplicada uma diluição de 25 cm para cada lado em 15 m de comprimento, deixando o médio teor abaixo do teor de corte da lavra. O terceiro e último estágio da lavra, teve 21 m de comprimento, aplicado uma diluição de 50 cm para cada lado e com teor médio abaixo do teor de corte. A Tabela 1 mostra o resultado operacional do minério lavrado e os teores de cada estágio do teste.

Tabela 1: Resultado operacional do minério lavrado.

Estágio	Espessura média m	Extensão minério m	Massa t	Teor g/t
1	1,73	34	1.040	3,35
2	2,64	15	936	2,10
3	2,30	21	1.722	1,99

Observa-se que quanto maior a diluição aplicada na lavra menor foi o teor de ouro.

4.2 Resultados planta *ore sorting*

4.2.1 Reconciliação

A reconciliação foi realizada com base nas informações coletadas nas etapas de planejamento, lavra e tratamento do minério na planta *ore sorting*.

A reconciliação de massa e dos teores de ouro é apresentada na Tabela 2. Nesta pode-se observar que, embora houve uma diferença entre o que estava previsto no planejamento para o

que foi realizado na etapa de operação de lavra, a diferença entre o ouro reconciliado na planta de *ore sorting* foi de -10% comparado ao valor reportado pela lavra.

Tabela 2: Reconciliação de massa e teor.

Etapa	Massa	Au	Au
	t	g/t	oz
Planejado	3.698	2,40	285
Lavrado	3.935	3,02	382
Reconciliado planta <i>ore sorting</i>	4.246	2,51	343

Segundo estudos, essas variações podem ocorrer devido a vários fatores operacionais, tais como: variação no modelo geológico, ineficiência do projeto de detonação da rocha, variação na geometria do minério, erro humano, entre outros (KAPLUNOV, 1999; JANG; TOPAL; KAWAMURA, 2015).

A reconciliação é uma das etapas importantes dentro da cadeia produtiva da mineração. Nesta é possível analisar o desempenho da operação, tal qual garantir as informações adequadas nos processos e confirmar a eficiência desde a estimativa de recursos até o metal produzido (CHIEREGATI, 2008; PARHIZKAR et al., 2012; EL HAJJ et al., 2013; MORLEY, 2014).

4.2.2 Britagem e peneiramento

Após a estocagem do minério lavrado no pátio da planta *ore sorting*, o minério foi processado no circuito de britagem. A Tabela 3 apresenta os resultados de minério britado por fração, teor de ouro e teor de enxofre. Nesta, pode-se observar que, 29% do minério britado, foi passante na malha da peneira de 10 mm, com teor 3,08 g/t de ouro e 0,41% de enxofre, enquanto 71% do minério britado foi retido na malha de 10 mm, com teor 2,28 g/t de ouro e 0,36% de enxofre.

Tabela 3: Resultado operacional do circuito de britagem.

Malha	Massa		Au	S
	t	%	g/t	%
Minério passante (-10 mm)	1.231	29	3,08	0,41
Minério retido (+10 mm – 45 mm)	3.015	71	2,28	0,36

O teor de enxofre analisado em todas as etapas está dentro do limite praticado na mina subsolo de Córrego do Sítio Mineração.

4.2.3 Máquina XRT

Os resultados dos testes na máquina XRT, contendo o minério britado com granulometria retido na malha de 10 mm, são ilustrados na Figura 5.

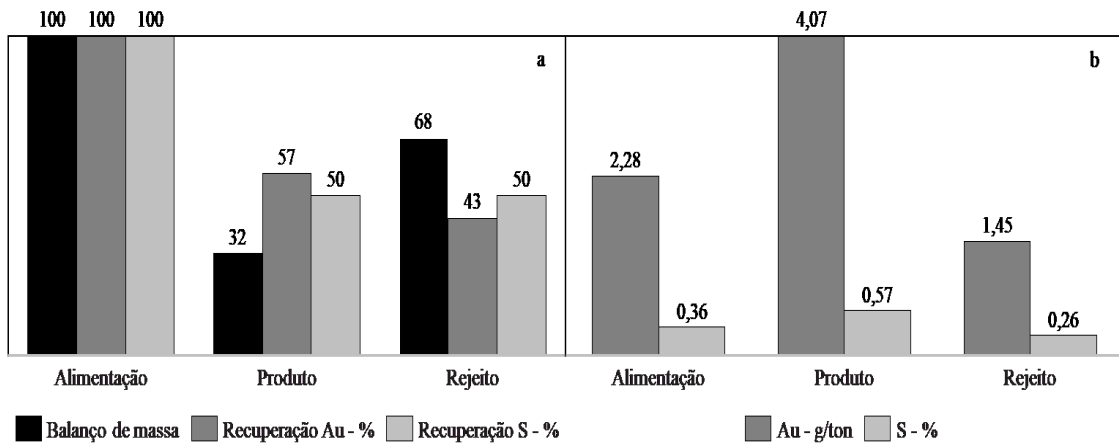


Figura 5: (a) Resultados de recuperação máquina XRT e (b) Resultados de teor máquina XRT.

Apresentou-se teor de ouro de 4,07 g/t no produto e 1,45 g/t no rejeito, enquanto os teores de enxofre no produto e rejeito foram de 0,57% e 0,26%, respectivamente.

A máquina XRT foi capaz de recuperar 57% do ouro em 32% da massa. O fator de enriquecimento do teor de ouro no produto da máquina, comparado ao teor alimentado, foi de 1,8. Apesar do aumento pouco significativo, o teor de enxofre passou de 0,36% na alimentação para 0,57% no produto.

Nota-se que a máquina XRT, apresentou um resultado satisfatório para o minério processado e para todo minério alimentado na máquina, 32% da massa virou produto e 68% da massa foi rejeitado para posterior processamento na máquina *laser*.

4.2.4 Máquina laser

O minério rejeitado na máquina XRT foi processado na máquina *laser*. Os resultados obtidos durante esta etapa são ilustrados na Figura 6.

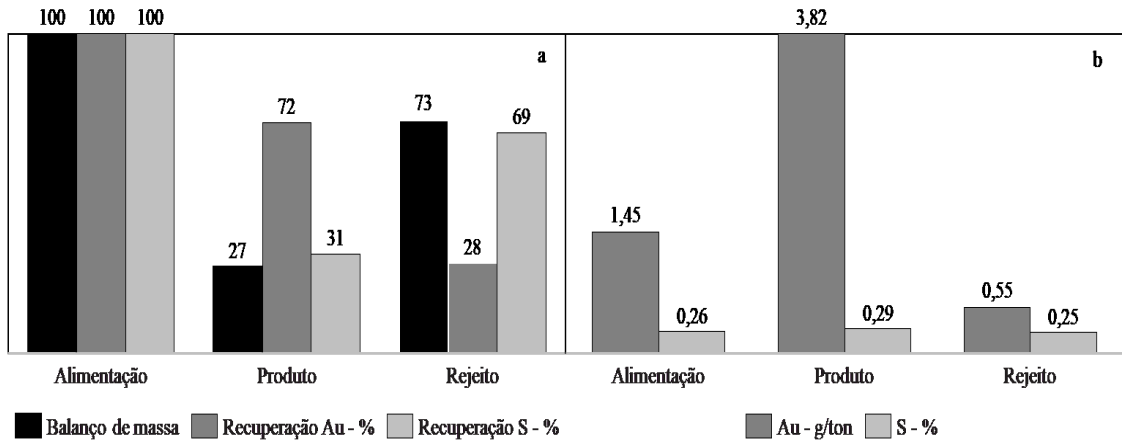


Figura 6: (a) Resultados de recuperação máquina *laser* e (b) Resultados de teor máquina *laser*.

O teor de ouro obtido no produto foi 3,82 g/t e no rejeito 0,55 g/t, enquanto o teor de enxofre no produto e rejeito foram de 0,29% e 0,25%, respectivamente. A recuperação de ouro na máquina foi de 72% em 27% da massa.

Os resultados obtidos na máquina *laser*, apresentaram um resultado satisfatório onde o fator de enriquecimento do teor de ouro no produto, comparado ao teor alimentado, foi 2,6.

4.2.5 Máquina XRT e *laser*

As máquina XRT e *laser* operaram em série, sendo assim, a combinação dos resultados obtidos durante o processamento do minério nas máquinas XRT e *laser*, são apresentados na Figura 7.

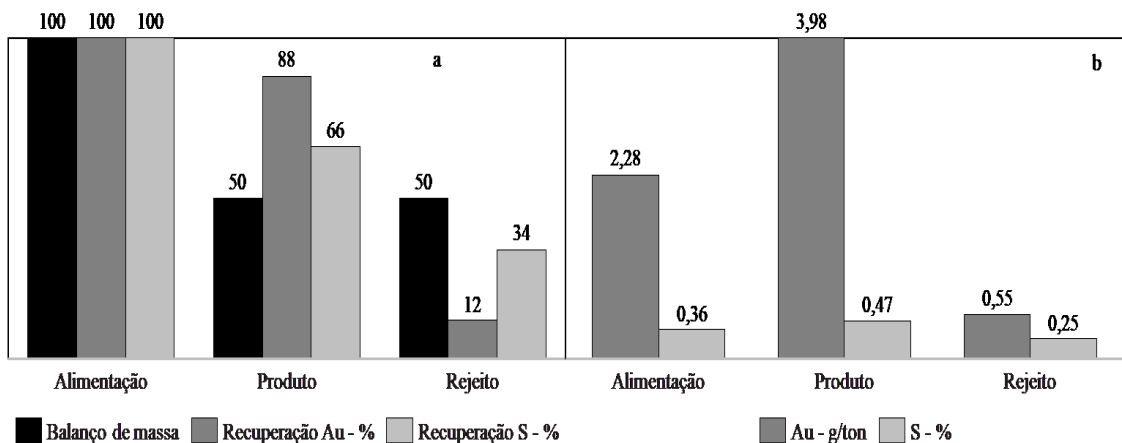


Figura 7: (a) Resultados global de recuperação máquinas XRT e *laser* e (b) Resultados global de teor máquinas XRT e *laser*.

Houve aumento do teor de ouro da alimentação de 2,28 g/t para 3,98 g/t no produto e rejeito de 0,55 g/t. A recuperação metalúrgica do ouro foi 88% em 50% da massa processada, o que resulta a um fator de enriquecimento de 1,7 comparado ao teor alimentado. O teor de enxofre no produto e rejeito foi 0,47% e 0,25%, respectivamente.

O desempenho total da planta *ore sorting*, considerando o minério passante na malha de 10 mm na etapa da britagem, reduziu 35% da massa alimentada e aumentou o teor de ouro alimentado na planta *ore sorting* de 2,51 g/t para 3,57 g/t no produto final.

De maneira geral, a operação das máquinas em série apresentou um excelente resultado de enriquecimento para posterior tratamento na planta de beneficiamento.

4.3 Resultados teste em bancada com concentrado *ore sorting*

As amostras geradas no concentrado final da planta *ore sorting*, foram preparadas para o desenvolvimento dos testes em bancada. O diagrama de blocos dos procedimentos experimentais é apresentado na Figura 8.

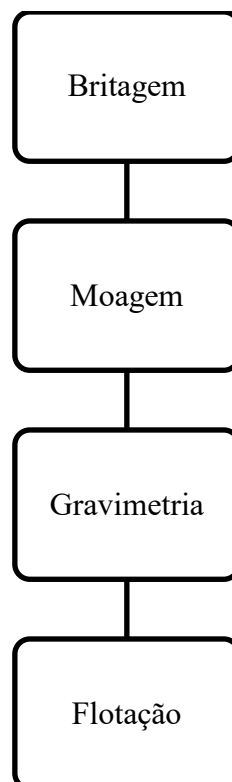


Figura 8: Diagrama de blocos dos procedimentos experimentais.

Para a análise química dos elementos ouro, enxofre, carbono, ferro, antimônio e arsênio foram utilizadas técnicas de espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente, ICP OES, enquanto que, para enxofre e carbono, foi utilizado o equipamento LECO modelo SC 632.

4.3.1 Teste de moagem em bancada

Antes de iniciar o teste de moagem, toda a amostra passou por uma etapa de britagem. O objetivo desta etapa foi reduzir a granulometria para a faixa 100% menor que 3,2 mm em britador de mandíbula.

A carga de corpos moedores no interior do moinho foi de 7 kg e com *top size* de 25,4 mm. A quantidade de sólidos foi de 60% na polpa formada e uma rotação de 1.250 rpm.

Os resultados dos ensaios de moagem realizado variando o tempo são ilustrados na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Nos 30 minutos de teste, é possível observar que 83% das partículas foi passante na malha de 200 mesh (0,074 mm) e com p80 de 70,0 μm .

Tabela 4: Distribuição granulométrica em 30 min de moagem.

Malha peneira		Massa retida		Massa acumulada	
mesh	μm	g	%	Retido %	Passante %
100	149	6,62	2,81	2,8	97,2
150	105	10,26	4,35	7,2	92,8
200	74	23,29	9,88	17,0	83,0
270	53	32,45	13,76	30,8	69,2
325	44	14,60	6,19	37,0	63,0
400	37	8,62	3,66	40,6	59,4
<400	<20	139,93	59,35	100,0	0,00

Para um tempo de moagem de 40 minutos, não houve uma mudança significativa na distribuição granulométrica final, visto que na malha de 200 mesh (0,074 mm), obteve-se 83,4% de material passante e p80 de 68,7 μm .

Tabela 5: Distribuição granulométrica em 40 min de moagem.

Malha peneira		Massa retida		Massa acumulada	
mesh	μm	g	%	Retido %	Passante %
100	149	9,14	4,02	4,0	96,0
150	105	9,01	3,97	8,0	92,0
200	74	19,63	8,64	16,6	83,4
270	53	28,50	12,54	29,2	70,8
325	44	14,63	6,44	35,6	64,4
400	37	8,80	3,87	39,5	60,5
<400	<20	137,50	60,52	100,0	0,00

Já para um tempo de moagem de 50 minutos, notou-se uma maior redução da distribuição granulométrica final, onde obteve-se 92,5% de material passante na malha de controle de 200 mesh (0,074 mm) e um p80 de 50,5 μm .

Tabela 6: Distribuição granulométrica em 50 min de moagem.

Malha peneira		Massa retida		Massa acumulada	
mesh	μm	g	%	Retido %	Passante %
100	149	1,95	0,7	0,7	99,3
150	105	3,54	1,3	2,0	98,0
200	74	14,85	5,46	7,5	92,5
270	53	29,51	10,9	18,3	81,7
325	44	16,88	6,2	24,6	75,4
400	37	10,90	4,0	28,6	71,4
<400	<20	194,11	71,4	100,0	0,00

4.3.2 Teste de gravimetria em bancada

Os testes de gravimetria foram realizados para identificar o potencial de recuperação de ouro nesta etapa. Aproximadamente, 1.000 g de material foi alimentado no equipamento e três testes foram realizados. As variáveis utilizadas nos testes de gravimetria estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7: Variáveis utilizadas para teste de gravimetria.

Etapa	Força G's	Pressão PSI	Vazão l/min
Alimentação	60	7	14

A Tabela 8 mostra o resultado dos testes de gravimetria realizado com o concentrado da planta *ore sorting*.

Tabela 8: Resultados dos testes de gravimetria.

Teste	Etapa	Massa	Au	Massa	Au
		g	g/t	%	%
1	Alimentação	1000	2,33		
	Concentrado	55	24,70	5,52	58,46
	Rejeito	945	1,03		
2	Alimentação	1000	2,48		
	Concentrado	51	30,36	5,09	62,24
	Rejeito	949	0,99		
3	Alimentação	1000	2,43		
	Concentrado	48	30,82	4,81	61,09
	Rejeito	952	0,99		
Média	Alimentação	1000	2,41		
	Concentrado	51	28,63	5,14	60,60
	Rejeito	949	1,00		

Nota-se que a média do concentrado gerado nos testes de gravimetria foi de 28,63 g/t de ouro e obteve-se 60,60% de recuperação metalúrgica. A média do teor de rejeito foi 1,00 g/t de ouro, mostrando que o minério testado teve um desempenho muito satisfatório e até mesmo acima do valor praticado na unidade, atualmente em 30%.

4.3.3 Teste de flotação em bancada

As variáveis da Tabela 9 e Tabela 10, serviram como base para realização dos testes de flotação de bancada usando célula Denver de laboratório. O teste de flotação foi realizado em dois estágios *rougher* e *scavenger*. Para ambos os estágios, foram utilizados uma cuba de 2,5 m³, com um sistema de aeração de bolhas no interior da cuba.

Tabela 9: Variáveis utilizadas para o teste de flotação etapa *rougher*.

Tempo	Aeração	pH	Rotação	Densidade	Ativador CuSO ₄	Coletor Xantato + C5460	Espumante F650
min	l/min		rpm	g/cm ³	g/t	g/t	g/t
6	0,5	8	1.200	1,35	300	250	30

Tabela 10: Variáveis utilizadas para o teste de flotação etapa *scavenger*.

Tempo	Aeração	pH	Rotação	Densidade	Ativador CuSO ₄	Coletor Xantato + C5460	Espumante F650
min	l/min		rpm	g/cm ³	g/t	g/t	g/t
4	0,5	8	1.200	1,35	0	25	30

Na Tabela 11 é apresentada a caracterização química da alimentação, concentrado e rejeito dos testes de flotação. O teor médio da alimentação foi 1,00 g/t de ouro, confirmando os valores do teor de rejeito do teste de gravimetria.

Tabela 11: Caracterização química após os testes de flotação.

Teste	Etapa	Massa g	Au g/t	S %	C %	Sb %	Fe %	As %
1	Alimentação	945	1,03	0,42	1,77	0,02	7,06	0,23
	Concentrado	132	6,46	2,38	1,83	0,06	11,16	1,10
	Rejeito	812	0,14	0,10	1,76	0,01	6,39	0,09
2	Alimentação	945	0,99	0,43	1,77	0,02	7,50	0,27
	Concentrado	132	6,33	2,49	1,83	0,07	11,73	1,29
	Rejeito	813	0,12	0,09	1,76	0,01	6,81	0,10
3	Alimentação	952	0,99	0,46	1,78	0,01	6,79	0,24
	Concentrado	134	5,93	2,44	1,86	0,05	9,72	0,88
	Rejeito	817	0,18	0,13	1,77	0,01	6,31	0,14
Média	Alimentação	947	1,00	0,43	1,80	0,02	7,12	0,25
	Concentrado	133	6,24	2,44	2,36	0,06	10,87	1,09
	Rejeito	814	0,15	0,11	1,77	0,01	6,50	0,11

Para os três testes, houve um comportamento semelhante para o ouro, enxofre, carbono e antimônio, tanto no concentrado quanto no rejeito. Apesar da seletividade e aumento do teor de ouro para 6,24 g/t, os teores de enxofre no concentrado final foi 2,44%, esse valor é bem abaixo do que é praticado (5% a 10%) na operação da planta de beneficiamento.

De posse dos resultados, foi possível calcular a recuperação mássica e a recuperação metalúrgica para: ouro, enxofre, carbono, antimônio, ferro e arsênio.

Conforme apresentado na Tabela 12, a média da recuperação mássica do concentrado foi 14,04%. Em relação ao ouro e enxofre, a recuperação foi de 87,4% e 78,9%, respectivamente.

Tabela 12: Resultado de recuperação metalúrgica nos testes de flotação.

Teste	Massa %	Au %	S %	C %	Sb %	Fe %	As %
1	14,00	88,26	79,49	14,48	54,98	22,14	66,56
2	13,98	89,55	81,80	14,45	55,83	21,87	67,70
3	14,13	84,42	75,54	14,74	50,70	20,22	50,84
Média	14,04	87,41	78,94	14,56	53,84	21,41	61,70

Essas recuperações demonstram que, os resultados obtidos nos testes são compatíveis com a performance histórica realizado na etapa de flotação da planta de beneficiamento.

Vale ressaltar que as recuperações metalúrgica média do carbono, antimônio, ferro e arsênio foram 14,56%, 53,84%, 21,41% e 61,70%, respectivamente. Os resultados foram satisfatórios e apresentaram um comportamento similar do que é praticado na planta de beneficiamento.

4.4 Modelo financeiro

A Tabela 13 e Tabela 14, representam os parâmetros utilizados no modelo financeiro obtidos durante os testes na planta *ore sorting* e os resultados nos testes em bancada.

Tabela 13: Cenário base.

Etapa	Unidade	Valor	Condição
Britagem e peneiramento primeiro deck	mm	45	testado
Britagem e peneiramento segundo deck	mm	10	testado
Minério britado passante (-10 mm)	%	29,0	testado
Minério britado retido (+10 mm – 45 mm)	%	71,0	testado
XRT rejeito	%	68,3	testado
XRT produto	%	31,7	testado
<i>Laser</i> rejeito	%	72,7	testado
<i>Laser</i> produto	%	27,3	testado
XRT+ <i>Laser</i> rejeito	%	35,3	testado
XRT+ <i>Laser</i> produto	%	64,7	testado
Recuperação global XRT+ <i>Laser</i> (incluindo finos – 10 mm)	%	91,5	testado
Recuperação global planta beneficiamento	%	89,9	testado

Tabela 14: Custos operacionais unitários.

Composição de custo	Unidade	Valor	Condição
Custo variável mina subsolo	US\$/t	29,0	premissa
Custo total planta <i>ore sorting</i>	US\$/t	5,0	premissa
Carregamento e transporte rejeito e produto <i>ore sorting</i>	US\$/t	1,2	premissa
Custo variável planta metalúrgica	US\$/t	30,3	premissa
Impostos	%	1,50	premissa

É importante observar que as premissas da modelagem financeira são baseadas em uma operação já implantada, ou seja, o capital investido na planta *ore sorting* já foi pago. Portanto, o cálculo de receita, não leva em consideração qualquer reembolso de capital. O modelo financeiro também incorre apenas em custos variáveis incrementais na mina e na planta de beneficiamento, uma vez que os custos fixos atuais já são utilizados para a operação corrente da mina.

O modelo financeiro foi obtido através da formula (1).

$$\frac{US\$}{t} = \left[(T * OSr * PA * PPr) - \left((OSc + UVc) + (OSm * (PBVc + CTc) - (OSr * T * PA * PPr * I)) \right) \right] \quad (1)$$

Onde **T** é o teor alimentado na planta de *ore sorting*, **OSr** é a recuperação metalúrgica da planta *ore sorting*, **PA** é o preço do ouro, **PPr** é a recuperação metalúrgica na planta de beneficiamento, **OSc** é o custo operacional total da planta *ore sorting*, **UVc** é o custo variável da mina subsolo, **OSm** é a recuperação de massa obtido no produto da planta *ore sorting*, **PBVc** é o custo variável da planta de beneficiamento, **CTc** é o custo do transporte do produto da planta *ore sorting* para planta de beneficiamento e **I** se refere aos impostos.

A taxa de câmbio utilizada para o modelo foi de 4,50 R\$/US\$, sendo que todos os parâmetros obtidos durante os testes, foram fixados com exceção do preço do ouro. As análises de sensibilidade variando o preço do ouro são demonstradas na Figura 9.

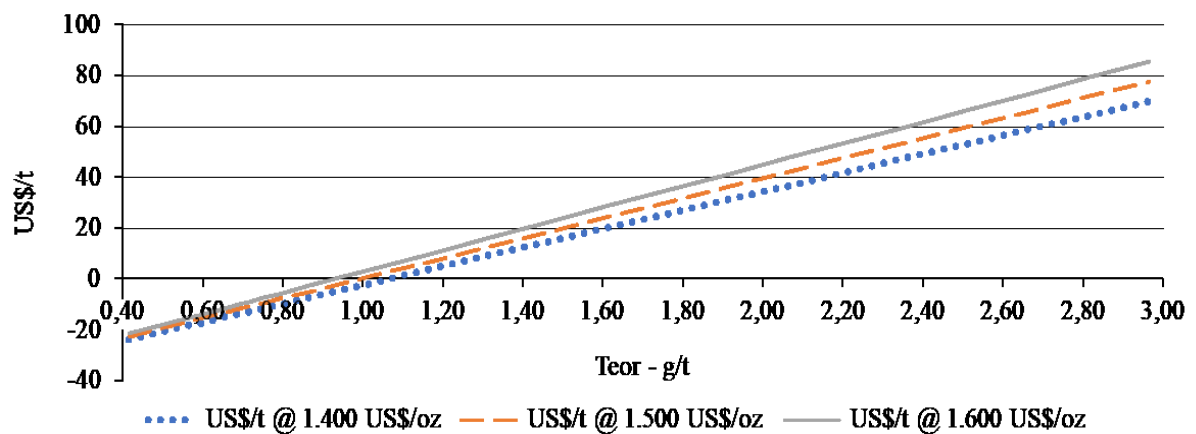


Figura 9: Análise de custo-benefício variando preço do ouro em 1400, 1500 e 1600 US\$/oz.

Os resultados obtidos no modelo financeiro apresentou uma viabilidade a partir de 1,07 g/t, 1,02 /t e 0,84 g/t para 1.400 US\$/oz, 1.500 US\$/oz e 1400 US\$/oz, respectivamente. Esse resultado mostra uma análise de negócio positiva e significativos ganhos financeiros para operação de *ore sorting* com minério abaixo do teor de corte atual da mina de Córrego do Sítio Mineração.

5 CONCLUSÕES

O sequenciamento da lavra, foi dividida em três etapas nas quais foram aplicadas diluições para melhor representatividade do teste na planta *ore sorting*.

Comparado ao teor alimentado na planta *ore sorting*, a combinação dos sensores XRT e *laser*, resultaram em um aumento de teor próximo a 1,7 vezes, onde 88% do ouro foi recuperado em 50% do minério total alimentado nas máquinas de *ore sorting*. A recuperação global (incluindo finos) na planta *ore sorting* foi de 92% para 65% da massa.

Os ensaios de bancada, demonstraram ser viável tecnicamente o tratamento do concentrado da planta *ore sorting* na planta de beneficiamento. Atualmente, a planta de beneficiamento é composta pelos processos unitários: britagem, moagem, gravimetria, flotação, autoclave, *carbon-in-leach*, eluição e eletrólise.

Os testes em bancadas contemplaram além de britagem e moagem, as etapas de gravimetria e flotação. Os ensaios de gravimetria apresentaram resultados expressivos com relação a recuperação metalúrgica do ouro, atingindo uma recuperação média de 60,60% para os três testes realizados. As amostras do rejeito dos testes de gravimetria, foram preparadas e realizados três testes de flotação. A média dos testes apresentaram bons resultados de flotação em célula denver, validando a seletividade do teste desenvolvido. Os teores médios do concentrado foi de 6,24 g/t de ouro e com recuperação metalúrgica de 87,41%.

A assinatura da mineralização são sequências metassedimentares cortadas por diques máficos. Os sulfetos ocorrem em venulações e são principalmente pirita e arsenopirita. Próximo aos contatos do dique, a alteração hidrotermal é representada por cloritização, carbonatização e sericitização. Esses contrastes entre halos hidrotermais e rochas hospedeiras foram essenciais para a diferenciação via sensores e assim classificação bem-sucedida.

Do ponto de vista econômico e com base na análise de custo-benefício para: 1.400 US\$/oz, 1.500 US\$/oz e 1.600 US\$/oz, a lavra começa a ser lucrativa a partir de 1,07 g/t, 1,02 g/t e 0,94 g/t de ouro, respectivamente.

Portanto, o potencial para utilização da tecnologia *ore sorting* para minério refratário do subsolo

demonstrou ser viável tecnicamente e financeiramente para uma aplicação específica na lavra 539 130N da mina Laranjeiras em Córrego do Sítio Mineração. Por fim, ressalta-se a importância do mapeamento dos corpos de minérios no *life of mine* abaixo do teor de corte do atual plano de produção da mina Córrego do Sítio afim de estudar e viabilizar outras frentes de lavra.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido a aplicabilidade da tecnologia em diversas etapas do processo de lavra e beneficiamento, o estudo realizado recomenda alguns trabalhos futuros para aprofundar o entendimento da tecnologia *ore sorting*, sendo:

- a) mapeamento das regiões abaixo do teor de corte da mina com o objetivo de viabilizar outras frentes de lavras da mina subsolo;
- b) realizar análise de viabilidade econômica considerando a planta *ore sorting* como uma das etapas da operação de mina;
- c) testar novos reagentes de flotação com o objetivo de aumentar a seletividade do ouro e enxofre;
- d) desenvolver estudo para tratamento de pilhas de estéril.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHIEREGATI, A. C. et al. Proactive reconciliation in mining industry. **International Engineering Journal**, v. 61, n. 3, p. 297–302, 2008.

EL HAJJ, T. M. et al. Illusory reconciliation: the importance of sample representativeness. **International Engineering Journal**, v. 66, n. 3, p. 383–389, 2013.

JANG, H., TOPAL, E., KAWAMURA, Y. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neuro-fuzzy system. **Applied Soft Computing**, v. 32, [s.n.], p. 1–12, 2015.

KAPLUNOV, D. R. Problems of planning theory for developing bowels with underground mining of ore deposits. **Journal of Mining Science**, v. 35, n. 3, p. 286–290, 1999.

MORLEY, C. Beyond reconciliation: a proactive approach to using mining data. In: **Large Open Pit Conference**, [s.l: s.n.]. p. 185–192.

MURPHY, B., VAN ZYL, J., DOMINGO, G. Underground preconcentration by ore sorting and coarse gravity separation. In: **Narrow Vein Mining Conference**, [s.l: s.n.]. p. 1–8.

PARHIZKAR, A. et al. A probabilistic model to improve reconciliation of estimated and actual grade in open-pit mining. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 5, [s.n.], p. 1279–1288, 2012.

PILLAY, K. et al. The effect of gangue mineralogy on the density separation of low grade nickel ore. In: **Southern African Base Metals Conference**, [s.l: s.n.]. p. 493–510.

ROBBEN, C. et al. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine. **Minerals Engineering**, v. 145, n. 105870, 2020.

SALTER, J. D., WYATT, N. P. G. Sorting in the minerals industry: past, present and future. **Minerals Engineering**, v. 4, n. 7–11, p. 779–796, 1991.

8 APENDICES

8.1 APÊNDICE I – Carta de decisão emitida pela REM- International Engineering Journal do artigo relacionado ao trabalho.

Carta de decisão (REM-2020-0097)

De: editor@rem.com.br
Para: vnicikus.eng@gmail.com
CC:
Assunto: REM - International Engineering Journal - Decision on Manuscript ID: REM-2020-0097
Corpo: 12-Oct-2020

Dear Mr. Assis:

It is a pleasure to accept your manuscript entitled "Technological innovation in Córrego do Sítio Mineração - A study of technical and economic aspects by using sensor based sorting for refractory gold ore." in its current form for publication in the REM - International Engineering Journal. The comments of the reviewer(s) who reviewed your manuscript are included at the foot of this letter.

Thank you for your fine contribution. On behalf of the Editors of the REM - International Engineering Journal, we look forward to your continued contributions to the Journal.

Sincerely,
 Dr. Zélio Coelho
 Editor-in-Chief, REM - International Engineering Journal
 editor@rem.com.br

Associate Editor
 Comments to the Author:
 (There are no comments.)

Entire ScoreSheet
 Reviewer: 1
 Recommendation: Accept
 Comments:
 interesting article
 Additional Questions:
 Does the manuscript contain new and significant information to justify publication?: Yes
 Does the Abstract (Summary) clearly and accurately describe the content of the article?: Yes
 Is the problem significant and concisely stated?: Yes
 Are the methods described comprehensively?: Yes
 Are the interpretations and conclusions justified by the results?: Yes
 Is adequate reference made to other work in the field?: Yes
 Is the language acceptable?: Yes
 Please rate the priority for publishing this article (1 is the highest priority, 10 is the lowest priority): 2
 Length of article is: Adequate
 Number of tables is: Adequate
 Number of figures is: Adequate
 Number of references is: Adequate
 Please state any conflict(s) of interest that you have in relation to the review of this paper (state "none" if this is not applicable): none
 Ratings:
 Interest: 2: Good
 Quality: 2: Good
 Originality: 2: Good
 Overall: 2: Good

Data do envio: 12-out-2020

8.2 APÊNDICE II – Artigo submetido e aceito pelo periódico REM - International Engineering Journal.

REM - International Engineering Journal



Technological innovation in Córrego do Sítio Mineração – A study of technical and economic aspects by using sensor based sorting for refractory gold ore.

Journal:	<i>REM - International Engineering Journal</i>
Manuscript ID:	Draft
Manuscript Type:	Original Article - Mining
Keyword:	ore sorting, refractory ore, gold, pre-concentration, processing

SCHOLARONE™
Manuscripts

1
2 **Technological innovation in Córrego do Sítio Mineração – A study of technical and economic**
3 **aspects by using sensor based sorting for refractory gold ore.**
4

5 **Abstract**
6

7
8 The mining sector has a fundamental role financially and economically to the country in which it
9 practices these activities. In addition to employment creation and social-cultural development, the
10 mining sector brings economic growth to the country. However, the sector is facing challenges due
11 to COVID-19, incidents involving tailings dam facilities, rising energy costs, low grade ore deposits,
12 restrictions in mining regulations and access to the available resources. Currently sensor-based sorting
13 (SBS) is well known and applied worldwide in the food, recycling, grains separation industries, and
14 processing of metals, such as diamond, gold, platinum, and feldspar. In the mining industry, ore
15 sorting technology can results in significant improvement in ore quality by removing gangue, uplift
16 grades, cost reduction and mineral recovery. In this article, we discuss the ore sorting test work and
17 modeled cost-benefit analysis (CBA) for refractory gold ore at Córrego do Sítio Mineração, based on
18 the test results and operating parameters.
19

20
21 **Keywords:** ore sorting; refractory ore; gold; pre-concentration; processing.
22

23 **1. Introduction**
24

25
26 Worldwide, the industry has been facing challenges due to COVID-19 (Stephany *et al.*, 2020), where
27 some operations had to make significant changes to operations or shut down and lay off employees.
28 In parallel, power costs have been increasing yearly, the average grade in deposits continuously
29 declining and becoming difficult to access with available resources and technology (Li *et al.*, 2019).
30 Many problems in environmental impacts require consideration of the global mining industry (Mudd,
31 2007).
32

33
34 In response to these challenges in the mining sector, several technologies have the potential to change
35 the sector's design and unlock new opportunities in the mining industry. Currently, sensor based
36 sorting is well known and applied worldwide in the food industry, recycling, grains separation,
37 processing metals, such as diamond, gold, copper, platinum and feldspar (Cutmore *et al.*, 1998; Riedel
38 and Wotruba, 2004; Dalm *et al.*, 2014).
39

40
41 For the mining industry, ore sorting technology can solve several issues related to capital investment
42 by reducing milling circuit design, addition of previously non-economical reserves, increased
43 recovery in gold plants through blending strategies and pre-concentrate ores in remote areas for
44 processing elsewhere (Iyakwari and Glass, 2014; Clapham and Clapham, 2015; Lessard *et al.*, 2016;
45 Dumont and Lemos, 2017).
46

47
48 The basics of SBS consists in contact-free detection of material properties of single particles by means
49 of sensors where the measurement data is analyzed and particles with specific characteristics are
50 ejected from the material stream by an external force (Wotruba *et al.*, 2014).
51

52
53 Many applications of ore sorting have been reported in literature: waste rock gold dumps can be
54 exploited at good profit margins and be separated at low mass-pull to concentrate (5% to 10%) at a
55 gold recovery rate of 70% (Von Ketelhodt *et al.*, 2011). The relationship between recovery/rejection
56 and energy savings using ore sorting for molybdenum ore suggests that at least 30% of energy
57 reduction is possible (Lessard *et al.*, 2014). Another study of laboratory-scale work using sensor-
58 based ore sorting for lead-zinc ore presented the overall metal (lead and zinc) recoveries and grades
59 were improved in the flotation circuit (Tong, 2012).
60

1
2 In this study, the same approach has been taken in order to focus on evaluating the technical and
3 financial viability of ore sorting using refractory gold ores below cut-off grade from the underground
4 mine at AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração.
5

6
7 The Córrego do Sítio gold mine is located in southeastern Brazil in the state of Minas Gerais, near
8 the city of Belo Horizonte, belonging to AngloGold Ashanti, with the Open Pit operations starting in
9 the 1990's. In 2008, AngloGold Ashanti purchased the former São Bento underground mine and plant
10 from Eldorado Gold, and along with the Open Pit operation, was renamed AngloGold Ashanti Córrego
11 do Sítio Mineração.
12

13
14 For this study, the ore mined from the underground was processed in an ore sorting plant to quantify
15 the overall recovery. Thereafter bench test work was performed with ore sorting concentrate in order
16 to evaluate the technical feasibility and predict the behavior in the Córrego do Sítio Mineração
17 processing plant. Additionally, financial modelling was performed for the entire process.
18

19 2. Materials and methods

20
21 A stope below the cut-off grade was selected from the current mine plan. For this study, stope 539
22 130N in the Laranjeiras ore body, represents the mineralogical composition and grade representative
23 of the geometallurgical domains at the Córrego do Sítio Mineração deposit. The stope area had strike
24 of 70 meters (length) and 2.22 meter (thickness) and was mined by the sublevel stope method.
25

26
27 The ore mined was hauled to the stockpile in the ore sorting plant. To carry out the test, the following
28 steps were developed:
29

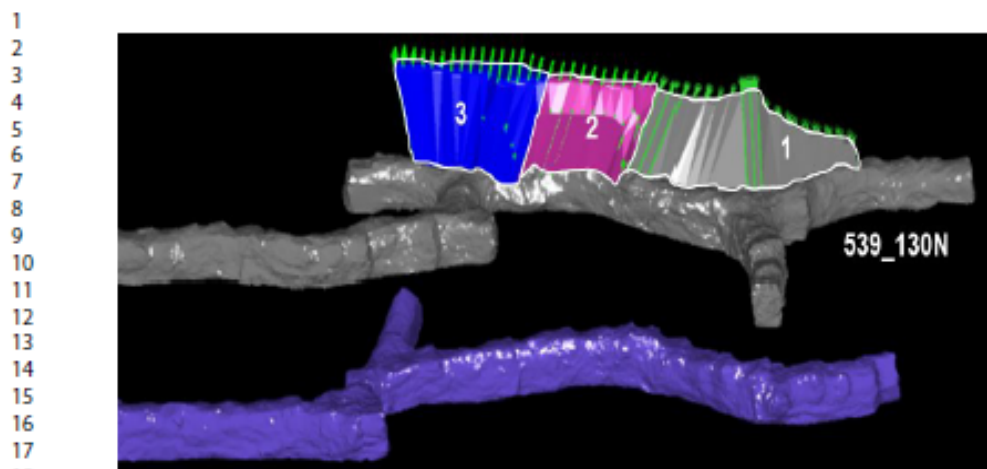
- 30 1. Crushing;
- 31 2. Screening of the material into the following size fractions:
 - 32 • + 20.00 mm – 45.00 mm.
 - 33 • + 10.00 mm – 20.00 mm.
 - 34 • – 10.00 mm.
- 35 3. For each size fraction (+ 20.00 mm – 45.00 mm and + 10.00 mm – 20.00 mm), material was
36 processed and sorted through XRT (X-ray transmission) and Laser technology combined. The
37 size (– 10.00 mm) was not sorted due to technological constraints;
- 38 4. Calculation of the XRT and LASER recoveries and grade uplift.
39
40
41

42 Metallurgical test work was conducted in the processing laboratory on samples of the ore sorting
43 concentrate consisting of crushing, milling, gravity and flotation tests. The main objective was to
44 predict and assess the behavior of the pre-concentrated material in relation to the current processing
45 plant used for refractory gold ores.
46

47
48 With the results obtained previously, the last step was undertaken according to the financial viability
49 techniques for the cost-benefit analyses. This step provides the attractiveness of the investment for
50 decision making.
51

52 2.1. Ore mined for testing

53
54 After the mine planning sequence and mine infrastructure preparation in Figure 1, 3,698 tons of ore
55 was planned, blasted and hauled with a grade of 2.40 g/t gold content to the ore sorting plant. In
56 regular operations, the ore previously mentioned would not have been mined, since the stope is below
57 cut-off grade.
58
59
60



19 Figure 1 - Mine planning sequence. Source: AngloGold Ashanti courtesy.

20 Table 1, presents the mine sequence planned which was divided into three stages.

21 Table 1 - Parameters related to mine sequence.

22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32

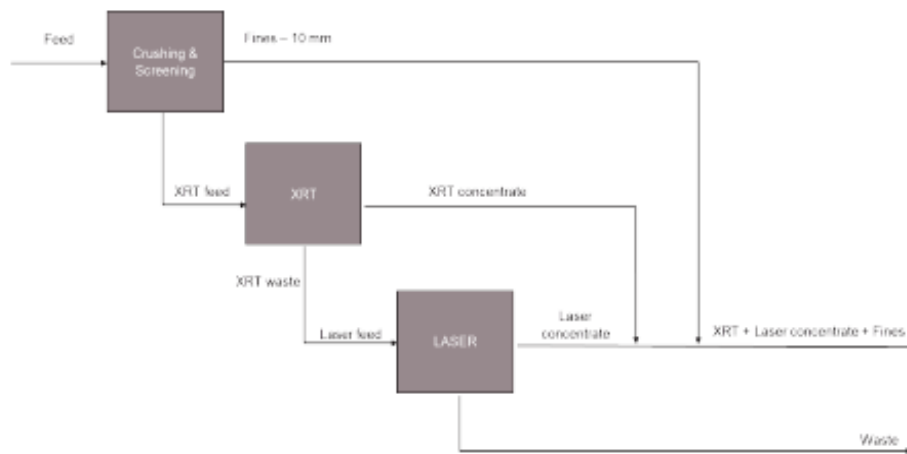
	Average thickness	Strike	Mass	Grade	Dilution plan
	m	m	t	g/t	%
Stage 1	1.73	34	1,040	3.35	42
Stage 2	2.64	15	936	2.10	63
Stage 3	2.30	21	1,722	1.99	65

33 2.2. Ore Sorting test work methodology

34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

In the XRT machine installed in the AngloGold Ashanti Mineração, two technologies are applied in the detection stage for classification: Dual Energy X-ray transmission (DE-XRT) and single X-ray signal (for inclusion analysis). For both technologies, the basic operation consists of emission of an x-ray beam on the sample and interpretation by the detector (Christopher *et al.*, 2020). This sorting principle is one of the most widely used technologies for narrow vein mining (Murphy *et al.*, 2012). In addition, to recover gold in quartz veins, with in the same operation, a Laser machine operates in series, receiving XRT waste. This technology detects reflection and diffraction of laser light from the surface of crushed rocks (Robben and Wotruba, 2019).

For the tests in the ore sorting plant located at Córrego do Sítio, both XRT and Laser technology were applied, Figure 2. The aim of this phase of the work was to confirm if the ore processed was appropriately feasible for separating.



23
24
25
26
27
28
29

Figure 2 - Ore sorting plant flowsheet.

30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53

2.3. Metallurgical testwork

The metallurgical test work was conducted by the processing laboratory at Córrego do Sítio Mineração on the concentrated samples from the ore sorting process. Valuable information was gained in order to simulate the plant behavior, grade parameters and gold recovery. The test work program is shown in Figure 3.

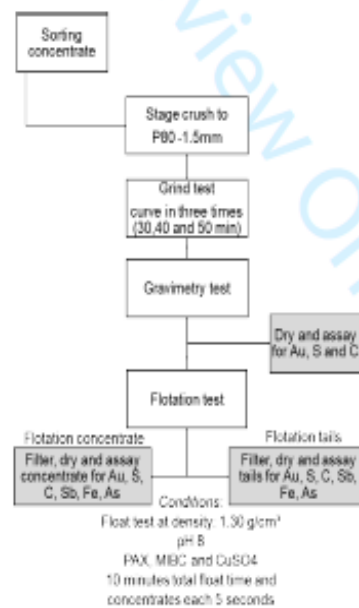


Figure 3 - Metallurgical testwork program.

2.4. Financial

The main impact of revenue from the pre-concentration process is related to metal recovery in the entire process. Metallurgical recovery is defined as the percentage metal recovered from a metallurgical process.

1
2 Cost-benefit analysis (CBA) is a method that applies a systematic process for calculating and
3 comparing benefits and costs. It is a widely used financial and economic approach for assessing
4 whether the benefits of a particular action are greater than their costs.
5

6
7 In order to understand and guarantee if an operation is profitable or not, this step is highly essential
8 in the overall evaluation and will provide information of project benefits versus project costs.
9

10 3. Results and discussion

11 3.1. Ore sorting operational results

12 A summary of the analyses and mass balance of the reconciliation is provided in Table 2.
13

14 Table 2 - Total mass and grade reconciliation.

	Mass t	Au g/t
Mine planned	3,698	2.40
Ore mined	3,935	3.02
Ore sorting recalculated grade	4,246	2.51

15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25 The jaw crusher operates in closed circuit with cone crushing and screening. The undersize ore (-10
26 mm) was transported by conveyor belt and stockpiled, this material cannot be sorted due to current
27 technological constraints. The results are shown in Table 3.
28

29 Table 3 - Crushing and screening results.

	Mass t	Au g/t	S %
Undersize ore (-10 mm)	1,231	3.08	0.41
Oversize ore (+10 mm - 45 mm)	3,015	2.28	0.36

30
31
32
33
34
35
36
37
38
39 The metallurgical performance of the XRT sorter Figure 4, is shown in the concentrated ore with an
40 average gold grade of 4.07 g/t and 1.45 g/t in waste. The XRT sorter was able to recover 57% of the
41 gold into 32% of the mass. The concentrate grade was improved by a factor of 1.8 compared to the
42 XRT sorter feed grade and no considerable improvement factor was observed for sulfur.
43

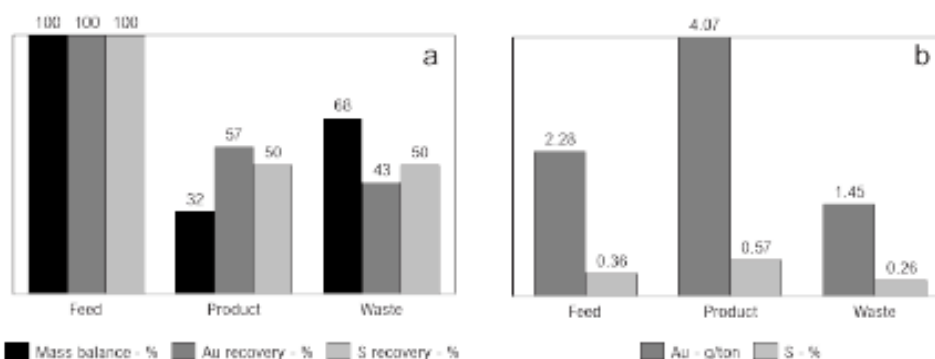


Figure 4 – (a) XRT sorter recoveries results and (b) XRT grade uplift results.

In the Laser sorter Figure 5, high gold recovery was observed with 72% of the gold concentrated into 27% of the mass. The waste results were 73% of the mass and contained only 0.55 g/t of the gold.

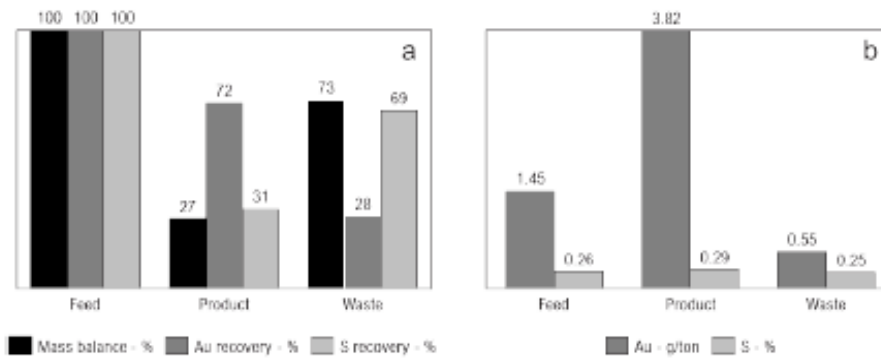


Figure 5 - (a) Laser sorter recoveries results and (b) Laser grade uplift results.

The combined XRT sorter and Laser sorter concentrate which is the final concentrate in the ore sorting plant, Figure 6, has shown great opportunity to combine both technologies for increasing grade in refractory gold ore deposits.

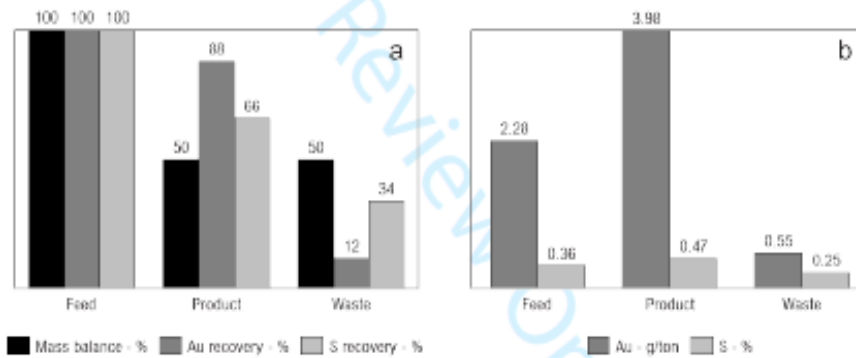


Figure 6 - (a) XRT and Laser sorter combined recoveries results and (b) XRT and Laser combined grade uplift results.

The combined operation, XRT and LASER, upgraded the feed grade of 2.28 g/t to a product of 3.98 g/t with only minimal gold content 0.55 g/t in waste. Gold recovery was 88% into 50% of the mass which leads to a significant increase for further treatment. The sulfur content of the concentrate was 0.47%. The total operation performance which including fines material screened (-10 mm) and ore sorting concentrate, reduced 35% of ore feeded and upgraded the feed grade of 2.51 g/t to a final product of 3.57 g/t which represents an upgrade factor of 42%.

3.2. Metallurgical test work results

After sample preparation, the sample was crushed to a P80 of -1.5 mm. The crushed product was milled to a size P90 -74 μ m and gravity concentration experiments were performed in order to identify the potential of gold recovery using a gravity circuit. Approximately 1.0 kg of material was fed into the concentrate bowl and three tests were performed. For the tests the following variables were conducted in Table 4.

Table 4 - Variables used for gravity concentration test.

	Force G's	Pressure PSI	Flow l/min
Feed	60	7	14

The assay results of the gravity concentration experiments are shown in Table 5.

Table 5 - Results of gravity concentration experiments for P90 -74 μm .

		Mass g	Au g/t	S %	C %	Mass pull %	Gold recovery %
Run 1	Feed	1000	2.33	0.55	1.80		
	Concentrate	55	24.70	2.82	2.32	5.52	58.46
	Tailings	945	1.03	0.42	1.77		
Run 2	Feed	1000	2.48	0.59	1.80		
	Concentrate	51	30.36	3.70	2.34	5.09	62.24
	Tailings	949	0.99	0.43	1.77		
Run 3	Feed	1000	2.43	0.61	1.81		
	Concentrate	48	30.82	3.66	2.41	4.81	61.09
	Tailings	952	0.99	0.46	1.78		
Average	Feed	1000	2.41	0.58	1.80		
	Concentrate	51	28.63	3.39	2.36	5.14	60.60
	Tailings	949	1.00	0.43	1.77		

As seen in Table 5, an average concentrate assay of 28.63 g/t Au is obtained with 60.60 % of gold recovered. The average tailings grade assayed was 1.00 g/t, showing great gravity recovery performance was achieved.

The gravity tailings was retained for flotation tests using a Denver flotation machine. Some conditions were assumed, pH was 8, speed was 1200 rpm and the air flow rate was 0.5 l/min. In a two-stage rougher and scavenger, three tests were performed for a total of 10 min each. The assay results for Au, S, C, Sb, Fe and As, are shown in Table 6 and Table 7.

Table 6 - Results of assays in flotation tests.

		Mass g	Au g/t	S %	C %	Sb %	Fe %	As %
Run 1	Feed	945	1.03	0.42	1.77	0.02	7.06	0.23
	Concentrate	132	6.46	2.38	1.83	0.06	11.16	1.10
	Tailings	812	0.14	0.10	1.76	0.01	6.39	0.09
Run 2	Feed	945	0.99	0.43	1.77	0.02	7.50	0.27
	Concentrate	132	6.33	2.49	1.83	0.07	11.73	1.29
	Tailings	813	0.12	0.09	1.76	0.01	6.81	0.10
Run 3	Feed	952	0.99	0.46	1.78	0.01	6.79	0.24
	Concentrate	134	5.93	2.44	1.86	0.05	9.72	0.88
	Tailings	817	0.18	0.13	1.77	0.01	6.31	0.14
Average	Feed	947	1.00	0.43	1.80	0.02	7.12	0.25
	Concentrate	133	6.24	2.44	2.36	0.06	10.87	1.09
	Tailings	814	0.15	0.11	1.77	0.01	6.50	0.11

Table 7 - Results of recovery in flotation tests.

	Mass %	Au %	S %	C %	Sb %	Fe %	As %
Run 1	14.00	88.26	79.49	14.48	54.98	22.14	66.56
Run 2	13.98	89.55	81.80	14.45	55.83	21.87	67.70
Run 3	14.13	84.42	75.54	14.74	50.70	20.22	50.84
Average	14.04	87.41	78.94	14.56	53.84	21.41	61.70

The flotation results show that for three tests performed, Au, S, Sb and As can be floated off into concentrate and C and Fe had a slight increase in content. Approximately 87% of gold and 79% of sulfur reported for the concentrate and mass pull was 14%.

3.3. Financial model

The financial model was based on the operational parameters in Table 8 and Table 9.

Table 8 - Base case inputs.

Input	Units	Value	Condition
Fines (10 mm) by passing sorter	per cent of total feed	29.0	tested
Sorter crushing & pre-screen upper size	mm	45	tested
Sorter crushing & pre-screen lower size	mm	10	tested
XRT sorter waste reject	%	68.3	tested
XRT sorter concentrate	%	31.7	tested
LASER sorter waste reject	%	72.7	tested
LASER sorter concentrate	%	27.3	tested
XRT+LASER sorter waste reject	%	35.3	tested
XRT+LASER sorter concentrate	%	64.7	tested
XRT+LASER overall recovery (including fines)	%	91.5	tested
Average processing plant recovery	%	89.9	tested

Table 9 - Unit operating costs.

Input	Units	Value	Condition
Underground variable costs	US\$/t	29.0	assumption
Ore Sorting cost	US\$/t	5.0	assumption
Sorter concentrate/rejects load & haul	US\$/t	1.2	assumption
Mill plant variable cost	US\$/t	30.3	assumption
Federal taxation	%	1.50	assumption

It is important to note that the financial modeling assumptions are based on a brownfield operation, which has already paid back the capital of the ore sorting plant. The revenue calculation therefore does not account for any payback of capital. It also only incurs incremental variable costs in both the mine and the plant, as the fixed cost are deemed to be sunk by the operation. The cost benefit analysis can be calculated using the formula:

$$\text{Benefit}^{\text{US\$}} = [(G * OSr * GP * MPr) - ((OSc + UVc) + (OSm * (MPVc + CTC)) - (OSr * G * GP * MPr * I))]$$

Where G is the feed grade in the ore sorting plant, OSr is the gold recovered in the ore sorting plant, GP is the gold price, MPr is the mill plant recovery, OSc is the operational cost of ore sorting, UVc

is the underground variable costs, OSm is the result of ore sorting mass recovered into concentrated, $MPVc$ is the mill plant variable cost, CTc is the concentrate transport cost and I is the federal income taxation.

All parameters were fixed except the gold price and the exchange rate was 4.50 R\$/US\$. The sensitivity of each scenario evaluated (1,400 US\$/t, 1,500 US\$/t, 1,600 US\$/t) is demonstrated in Figure 7.

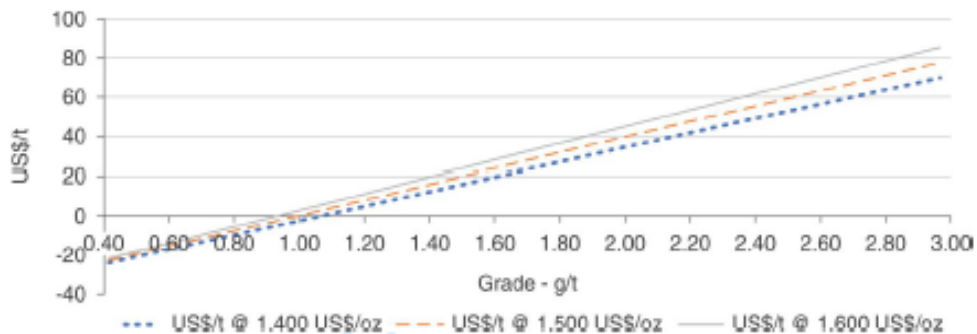


Figure 7 - Cost benefit analyses for different gold prices.

4. Conclusion

The potential of underground refractory gold ore viability using ore sorting technology has been proven technically feasible for a very specific stope application at Córrego do Sítio Mineração. From an economic perspective, based on the cost benefit analysis, for 1,400 US\$/oz, 1,500 US\$/oz and 1,600 US\$/oz, the stope starts to be profitable after 1.07 g/t, 1.02 g/t, 0.94 g/t of gold, respectively. The combination of sensor sorting using XRT and Laser resulted in improved grade by a factor of 1.7 compared to feed grade, and 88% of gold was recovered in 50% of the mass fed into the ore sorting machine. The overall recovery (including fines) in ore sorting was 92% for 65% of the mass and based on metallurgical test work, the predicted processing plant recovery was 89.9%.

The mineralization signature of the ore, that makes it amenable for successful ore sorting, is metasedimentary sequences between mafic dyke swarms. Sulfide of the lodes are mainly arsenic-pyrite and arsenopyrite. Near the dike contacts, hydrothermal alteration is represented by chloritization and carbonatization. These contrasts between hydrothermal halos and host rocks were essential for differentiation via sensors and successful separation.

Future ore characterization of marginal and low grade areas are possible through applying the relevant mineralogical characterization and amenability tests in the mine going forward.

Acknowledgements

The authors would like to thank AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração and CPGEM-UFMG for supporting this research.

References

- CLAPHAM, B., CLAPHAM, E. Innovative technologies for the improved pre-concentration of gold-bearing ores. In: *World Gold Conference*, 7. Joanesburgo, 2015.
- CUTMORE, N.G., LIU, Y., MIDDLETON, A.G. On-line ore characterization and sorting. *Minerals Engineering*, v. 9, n. 9, p. 843–847, 1998.

1
2
3 DALM, M., BUXTON, M.W.N., VAN RUITENBEEK, F.J.A., VONCKEN, J.H.L. Application of
4 near-infrared spectroscopy to sensor based sorting of a porphyry copper ore. *Minerals Engineering*,
5 v. 58, 7–16, 2014.
6

7
8 DUMONT, J.A., LEMOS, M.G. Ore sorting methodology investigation applied to gold ores. In:
9 *International Mineral Processing Conference*, 13. Santiago, 2017.
10

11 IYAKWARI, S., GLASS, H.J. Influence of mineral particle size and choice of suitable parameters
12 for ore sorting using near infrared sensors. *Minerals Engineering*, v. 69, p. 102–06, 2014.
13

14 LESSARD, J., DE BAKKER, J., MCHUGH, L. Development of ore sorting and its impact on mineral
15 processing economics. *Minerals Engineering*, v. 65, p. 88–97, 2014.
16

17
18 LESSARD, J., SWEETSER, W., BARTRAM, K., FIGUEROA, J., MCHUGH, L. Bridging the gap:
19 Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit. *Minerals*
20 *Engineering*, v. 91, 92–99, 2016.
21

22 LI, G., KLEIN, B., SUN, C., KOU, J., YU, L. Development of a bulk ore sorting model for sortability
23 assessment. *Minerals Engineering*, v. 141, n. 105856, 2019.
24

25
26 MUDD, G.M. Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource
27 sustainability?. *Resources Policy*, v. 32, n. 1–2, p. 42–56, 2007.
28

29 MURPHY, B., VAN ZYL, J., DOMINGO, G. Underground preconcentration by ore sorting and
30 coarse gravity separation. In: *Narrow Vein Mining Conference*, 2. Perth, 2012.
31

32 RIEDEL, F., WOTRUBA, H. Pre-concentration by sensor-based sorting devices in mineral
33 processing. Mineral Processing. In: *International Seminar on Mineral Processing Technology*, 5.
34 Bhubaneswar, 2004.
35

36
37 ROBBERN, C., CONDORI, P., PINTO, A., MACHACA, R., TAKALA, A. X-ray-transmission based
38 ore sorting at the San Rafael tin mine. *Minerals Engineering*, v. 145, n. 105870, 2020.
39

40
41 ROBBERN, C., WOTRUBA, H. Sensor-based ore Sorting technology in mining – past, present and
42 future. *Minerals*, v. 9, n. 523, 2019.
43

44 STEPHANY, F., STOEHR, N., DARIUS, P., NEUHAUSER, L., TEUTLOFF, O., BRAESEMANN,
45 F., 2020. The CoRisk-Index: A data-mining approach to identify industry-specific risk assessments
46 related to COVID-19 in real-time. *ArXiv*, v.3, p. 1–18.
47

48
49 TONG, Yan. *Technical amenability study of laboratory-scale sensor-based ore sorting on a*
50 *Mississippi valley type lead-zinc ore*. 2012. 101 f. Master's thesis - The University of British
51 Columbia, Vancouver, 2012.
52

53 VON KETELHODT, L., FALCON, L.M., FALCON, R.M.S. Optical sorting of Witwatersrand gold
54 ores: an update – waste rock dump sorting at gold fields; run-of-mine sorting at central rand gold. In:
55 *Alta Gold Conference*, 2. Perth, 2011.
56

57
58 WOTRUBA, H., KNAPP, H., NEUBERT, K., SCHROPP, C. Viable applications of sensor-based
59 sorting for the processing of mineral resources. *Chembioeng Reviews*, v. 1, n. 3, p. 86–95, 2014.
60