



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



**AVALIAÇÃO DE DEPRESSORES DE PIRITA NO CIRCUITO DE FLOTAÇÃO DA
MINA DE MORRO AGUDO: ESTUDO EM ESCALA BANCADA**

DISCENTE: Danilo Guimarães Costa
ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira
COORIENTADOR: Kerollan da Silva Ramos

Ouro Preto/MG
Setembro de 2022

DANILO GUIMARÃES COSTA

**AVALIAÇÃO DE DEPRESSORES DE PIRITA NO CIRCUITO DE FLOTAÇÃO DA
MINA DE MORRO AGUDO: ESTUDO EM ESCALA BANCADA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Engenheiro
Metalúrgico

DISCENTE: Danilo Guimarães Costa
ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira
COORIENTADOR: Kerollan da Silva Ramos

**Ouro Preto/MG
Setembro de 2022**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Danilo Guimarães Costa

Avaliação de depressores de pirita no circuito de flotação da mina de morro agudo: estudo em escala bancada

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 02 de setembro de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Rodrigo Rangel Porcaro - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Victor de Andrade Alvarenga Oliveira - Universidade Federal de Ouro Preto

Carlos Alberto Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/09/2022



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/03/2023, às 14:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0500414** e o código CRC **E0BCFE93**.

RESUMO

A *Nexa Resources* - Unidade Morro Agudo extrai e beneficia um corpo mineral de matriz dolomítica contendo três minerais sulfetados: esfalerita, galena e pirita. No processo de beneficiamento, gera-se três produtos: concentrado sulfetado de zinco, concentrado sulfetado de chumbo e pó calcário agrícola (rejeito final do processo). Devido à associação da pirita em diferentes litologias do corpo mineral de Morro Agudo, partículas desse mineral quando liberadas no circuito de flotação podem ser flotadas com os mesmos parâmetros do mineral galena, prejudicando assim a performance do circuito. O uso de depressores de pirita, como o metabissulfito de sódio e quebracho, pode se tornar uma alternativa para diminuir o impacto desse mineral ganga no circuito de flotação de Morro Agudo. Por meio de ensaios de flotação em bancada, os melhores resultados de recuperação e seletividade da galena e esfalerita foram obtidos com o uso de 200 g/t de metabissulfito de sódio e 200 g/t de quebracho. Os ensaios sem o uso dos depressores apresentaram os piores resultados dentre todos os ensaios realizados. O trabalho conseguiu atingir resultados que comprovam o impacto positivo do uso de depressores de pirita na recuperação e seletividade da galena e esfalerita nos ensaios de flotação realizados em escala bancada.

Palavras-chave: sulfetos; flotação; depressores; pirita; esfalerita; galena.

ABSTRACT

Nexa Resources - Unit Morro Agudo extracts and processes a dolomitic matrix mineral body containing three sulphide minerals: sphalerite, galena and pyrite. In the beneficiation process, three products are generated: zinc sulfide concentrate, lead sulphide concentrate and agricultural limestone powder (final waste of the process). Due to the association of pyrite in different lithologies of the mineral body of Morro Agudo, particles of this mineral when released in the flotation circuit can be floated with the same parameters of the mineral galena, thus impairing the performance of the circuit. The use of pyrite depressants, such as sodium metabisulfite and quebracho, can become an alternative to reduce the impact of this gangue mineral on the Morro Agudo flotation circuit. By means of bench flotation, the best results for recovering the selectivity of galena and sphalerite were obtained using 200 g/t of sodium metabisulfite and 200 g/t of quebracho. The tests without the use of depressants showed the worst results among all the tests performed. The current work was able to achieve results that prove the positive impact of the use of pyrite depressants on the recovery and selectivity of galena and sphalerite in flotation tests carried out on a bench scale.

Key words: sulphide; flotation; depressants; pyrite; sphalerite; galena.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de um circuito comum de flotação	11
Figura 2 - Fluxograma típico para o tratamento de minérios de chumbo-zinco contendo baixos teores.....	12
Figura 3 - Estruturas moleculares dos coletores catiônicos sulfidrílicos (xantatos)	13
Figura 4 - Mineralogia modal do minério de Morro Agudo	15
Figura 5 - Fluxograma circuito de flotação de chumbo usina de Morro Agudo	16
Figura 6 - Fluxograma circuito de flotação de zinco da usina de Morro Agudo.....	17
Figura 7 - Fluxograma dos ensaios de caracterização mineralógica	20
Figura 8 - Fluxograma completo do ensaio de flotação	21
Figura 9 - Recuperação de Pb e teor de Pb no concentrado sulfetado de Pb	25
Figura 10 - Recuperação de Pb na etapa de flotação da esfalerita	26
Figura 11 - Recuperação de Zn e teor de Zn no concentrado sulfetado de Zn.....	27
Figura 12 - Recuperação de Pb e teor de Pb no concentrado sulfetado de Pb	28
Figura 13 - Recuperação de Zn e teor de Zn no concentrado sulfetado de Zn.....	28
Figura 14 - Teores de Zn e Pb no rejeito final de todos os ensaios.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações - Alimentação da planta (AP) da flotação de MA	19
Tabela 2 - Sequência dos ensaios de flotação com MBS	21
Tabela 3 - Sequência dos ensaios de flotação com Quebracho	21
Tabela 4 - Reagentes ensaio de flotação	22
Tabela 5 - Etapas dos ensaios de flotação em bancada	22
Tabela 6 - Especificações para os teores dos concentrados, rejeito final de MA e de recuperação de Zn e Pb	23
Tabela 7 - Resultados dos teores da alimentação dos ensaios de flotação com MBS	24
Tabela 8 - Resultados dos teores da alimentação dos ensaios de flotação com Quebracho	24

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AP	Alimentação da Planta
CF	Concentrado Final
FRX	Espectometria de Fluorescência de Raios X
JF	Juiz de Fora
RF	Rejeito Final
MA	Morro Agudo
MBS	Metabissulfito de Sódio
PAX	Amil Xantato de Potássio
MIBC	Mibcol
PCA	Pó Calcário Agrícola
ROM	<i>Run of Mine</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	9
2.1	OBJETIVO GERAL	9
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1	Flotação	10
3.2	Flotação de Sulfetos	11
3.3	Reagentes para a Flotação de Sulfetos	12
3.3.1	Coletores	12
3.3.2	Depressores	13
3.3.3	Ativadores	14
3.3.4	Espumantes	14
3.4	Mina de Morro Agudo	15
3.4.1	Depósito Mineral	15
3.4.2	Circuito de flotação	16
3.5	Análise Química	18
3.5.1	Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1	Amostragem do Minério	19
4.2	Análise dos Teores e de Granulometria da Alimentação	19
4.3	Ensaio de Flotação em Bancada	20
4.3.1	Reagentes	22
4.3.2	Procedimentos Flotação em Bancada	22
4.4	Especificações do Processo de Flotação de Morro Agudo	23
4.5	Análises Químicas	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1	Teores de Alimentação dos Ensaios	24
5.2	Flotação	24

5.2.1	Ensaio de flotação com Metabissulfito de Sódio	24
5.2.2	Ensaio de flotação com Quebracho.....	27
5.2.3	Análise do Rejeito Final dos Ensaio.....	29
6	CONCLUSÕES.....	30
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

A mina de Morro Agudo, pertencente à *Nexa Resources*, possui um depósito mineral de matriz dolomítica, denominada dolarenito, com a presença de três minerais sulfetados: esfalerita (sulfeto de zinco), galena (sulfeto de chumbo) e pirita (sulfeto de ferro) (CUNHA, COELHO e MISI, 2000; CHAVES e SILVEIRA, 2006). O minério é extraído via método de lavra subterrânea, passando por etapas de cominuição, classificação e concentração. Considerados minerais minérios, a esfalerita e galena são beneficiados em processo de flotação seletiva, obtendo três produtos: concentrado sulfetado de zinco, concentrado sulfetado de chumbo e o rejeito final, que é um coproduto comercializado como PCA (Pó Calcário Agrícola) (PIGNATON *et al.*, 2007). Já a pirita, considerada mineral ganga, também tem sua ocorrência no processo, porém, podendo ser prejudicial nas etapas de flotação.

O depósito mineral de Morro Agudo possui diversas litologias que podem estar associadas ou não ao mineral pirita. Essas associações mineralógicas são observadas e se evidenciam no processo de flotação, já que partículas de pirita podem ser coletadas com os mesmos parâmetros de coleta do mineral galena, sendo assim prejudiciais ao circuito (ANDERSON *et al.*, 2010). O teor de ferro no minério de Morro Agudo é uma especificação para o processo de beneficiamento, que visa a geração de concentrado sulfetado de zinco e chumbo com baixa contaminação de pirita.

Este trabalho propõe otimizar a performance do circuito de flotação de Morro Agudo a partir de ensaios exploratórios de flotação em bancada com reagentes depressores de pirita, como o metabissulfito de sódio e quebracho, que adsorvem as partículas que contém o mineral pirita visando maior enriquecimento e seletividade no circuito de flotação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência do uso de diferentes depressores de pirita no circuito de flotação em bancada, visando melhorar a performance do processo de flotação de Morro Agudo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) realizar ensaios de flotação padrão em escala bancada, sem e com o uso de depressores de pirita;
- b) comparar os resultados entre os ensaios padrões sem e com o uso de depressores de pirita;
- c) avaliar o impacto, em escala de bancada, do uso de depressores de pirita no circuito de flotação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

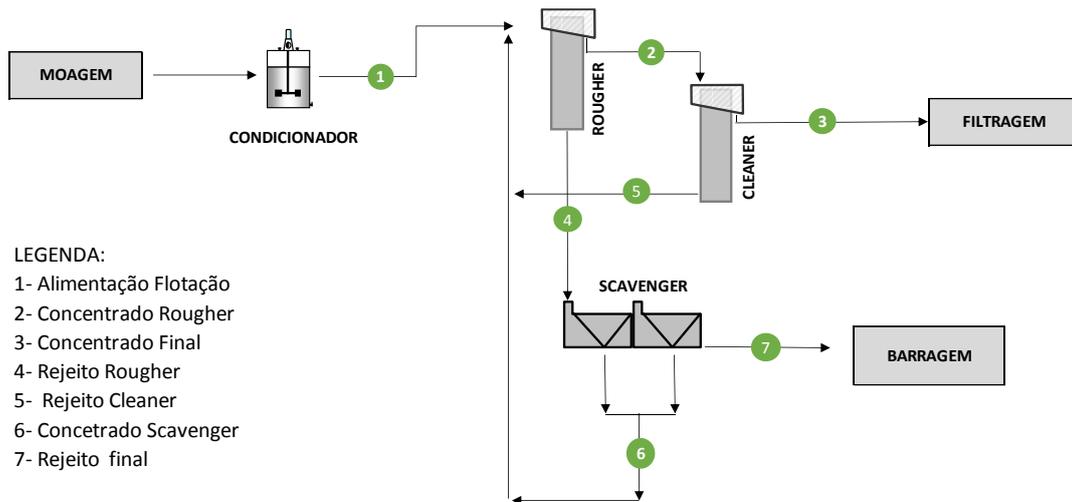
A revisão bibliográfica possui o objetivo de contextualizar o processo de flotação, ressaltando a flotação de sulfetos e os reagentes utilizados. Também enfatiza as principais informações sobre a Mina de Morro Agudo, como características mineralógicas e seu atual processo.

3.1 Flotação

Flotação é um processo de concentração mineral que visa a separação do mineral minério do mineral ganga (YOVANOVIC, 2004). A flotação pode ser realizada por diferentes processos, sendo que a flotação por espuma é o processo mais amplamente utilizado. Neste processo, partículas minerais hidrofobizadas, dispersas em polpa aquosa são coletadas por bolhas de ar e levadas até a superfície, sendo recolhidas na camada de espuma via transbordo ou coleta mecânica (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Devido à dificuldade de recuperar o(s) mineral(ais) de interesse somente em uma etapa, usinas de beneficiamento utilizam mais de uma etapa nos circuitos de flotação. A primeira etapa, denominada *rougher*, tem por objetivo o debaste, ou seja, é uma etapa que visa maior recuperação mássica durante o processo. Em sequência, têm-se a etapa *cleaner*, onde se recebe o fluxo do concentrado da etapa *rougher*. A *cleaner* visa obter um concentrado de alto teor do mineral de interesse, ocorrendo assim uma maior seletividade durante e seu processo. O rejeito da etapa *rougher* ainda possui partículas minerais que podem ser recuperadas, a partir da etapa *scavenger*. Na *scavenger*, obtêm-se um concentrado contendo partículas do mineral útil, e gera-se um rejeito muito pobre, considerado o rejeito final do processo. O rejeito da etapa *cleaner* possui um alto teor de minerais úteis, e juntamente com o fluxo do concentrado da *scavenger*, retornam à etapa *rougher*. Os circuitos de flotação também podem ter a etapa *reclaner*, usada como o último processo do circuito, obtendo o concentrado final e o rejeito, que volta para a etapa *rougher*. Na Figura 1 observa-se um fluxograma habitual utilizado em circuitos de flotação (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Figura 1 - Fluxograma de um circuito comum de flotação



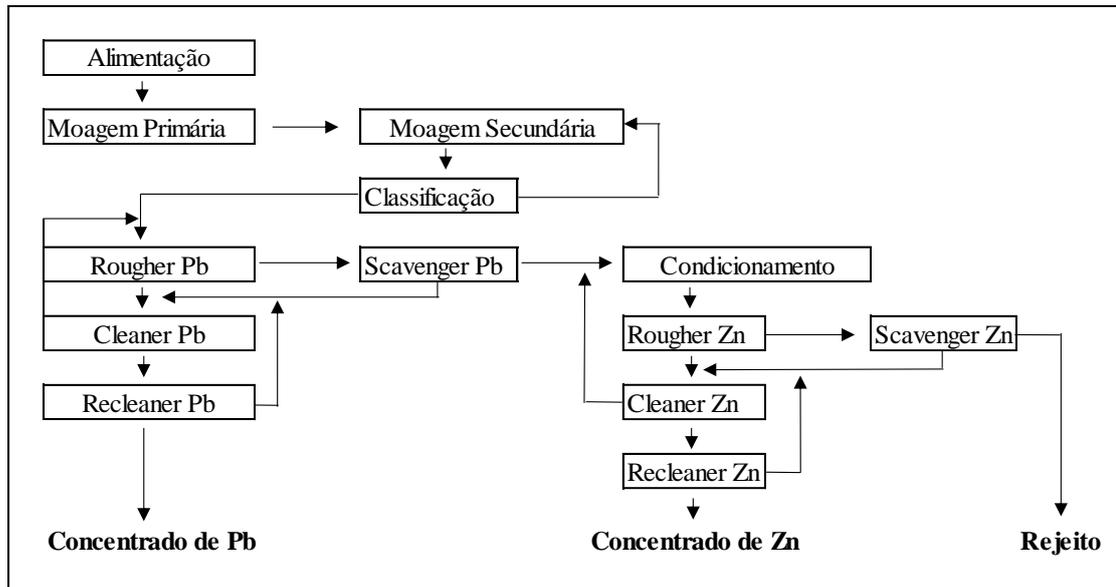
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Flotação de Sulfetos

O processo de flotação de sulfetos iniciou-se entre o final do século XIX e início do século XX. O processo consistia na flotação de partículas minerais com características hidrofóbicas naturais, coletadas a partir da adição de óleo. A partir de 1909, o processo de flotação de sulfetos começou a se desenvolver, com o uso de óleo de pinho como coletor. Posteriormente, entre 1924 e 1925, ocorreu o desenvolvimento dos chamados *aeroflots*, coletores amplamente utilizados até ao presente (Hu *et al.*, 2010).

Para a flotação de sulfetos, usinas de beneficiamento utilizam comumente duas técnicas operacionais: flotação seletiva e flotação coletiva (*bulk*). Na flotação seletiva, o condicionamento e a flotação de cada sulfeto ocorrem separadamente. Já na flotação *bulk*, todos os minerais sulfetados são coletados na mesma etapa e separados posteriormente por meio de reagentes depressores (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010). A Figura 2 apresenta o fluxograma típico para o beneficiamento de minérios sulfetados de zinco-chumbo contendo baixos teores (BULATOVIC, 2007).

Figura 2 - Fluxograma típico para o tratamento de minérios de chumbo-zinco contendo baixos teores



Fonte: Adaptada de BULATOVIC, 2007.

3.3 Reagentes para a Flotação de Sulfetos

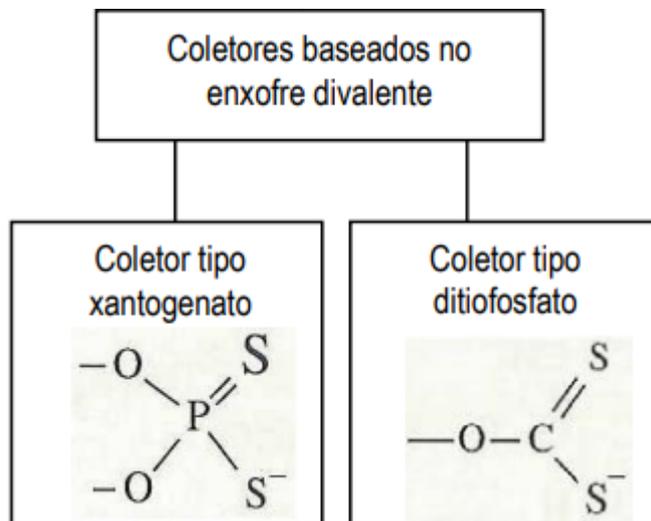
3.3.1 Coletores

Coletores são reagentes utilizados na flotação com o objetivo de coletar partículas previamente ou naturalmente hidrofobizadas. São reagentes surfactantes, compostos por duas estruturas: uma não iônica (de natureza molecular) e uma iônica (de natureza polar). A estrutura de natureza iônica pode apresentar várias funções e a de natureza polar apresenta sempre uma cadeia orgânica em sua estrutura podendo variar de tamanho (VALADÃO e ARAUJO, 2012).

Para a flotação de sulfetos, utiliza-se os coletores conhecidos como tiocompostos. Esses coletores possuem pelo menos um átomo de enxofre não ligado ao oxigênio e apresentam elevada reatividade em relação à superfície dos minerais sulfetados (VALADÃO e ARAUJO, 2012; JOSÉ, 2015). Encontrados na forma de sais de sódio ou potássio, os tiocomposto possuem baixa ou nenhuma atividade na interface entre líquido e ar, alta atividade química aos ácidos, agentes oxidantes e íons metálicos (VALADÃO e ARAUJO, 2012). Um dos coletores mais utilizados na flotação de minerais sulfetados são os chamados xantatos ou ditiocarbamato, coletores com o enxofre divalente em sua estrutura (Figura 3). Os xantatos, de cor amarela e

solúveis em água, possuem maior poder de seletividade e coleta em relação aos ácidos graxos, além do ter um baixo preço comercial (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Figura 3 - Estruturas moleculares dos coletores catiônicos sulfidrílicos (xantatos)



Fonte: LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010.

3.3.2 Depressores

Os depressores podem ser compostos orgânicos ou inorgânicos. Possuem a finalidade de aumentar a coleta das partículas dos minerais de interesse durante a flotação por meio do efeito de inibição da adsorção do coletor em partículas minerais que não devem ser flotadas (SCHONS, s.d). Assim, são utilizados no processo para aumentar a seletividade na flotação (ANDRADE, 2010). Os depressores são dosados e condicionados antes da adição dos coletores (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Depressores utilizados em minérios sulfetados maciços, como cal e cianeto, não são eficazes em minérios sulfetados finamente disseminados. Para usinas de beneficiamento de sulfetos de granulometria fina, são normalmente utilizados cal e sulfito de sódio ou cal e metabissulfito de sódio. Combinações entre cal e os dois depressores já foram utilizados para flotação de minerais sulfetados, com o pH variando entre 10 e 11. O sulfito de sódio e o metabissulfito de sódio não são depressores eficazes para pHs maiores do que 11 (BULATOVIC, 2007).

3.3.3 *Ativadores*

Ativadores são reagentes inorgânicos adicionados em etapas de flotação para aumentar a seletividade dos agentes coletores sobre a superfície das partículas do mineral de interesse (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010). O ativador pode exercer duas funções: modificar a composição química do mineral por meio da formação de um composto, ou modificar a composição química do mineral pela incorporação de íons na rede cristalina do mineral (SCHONS, s.d).

Para flotação da esfalerita com coletores xantatos, utiliza-se o sulfato de cobre como ativador. O sulfato de cobre provoca a substituição do Zn^{2+} pelo Cu^{2+} (Reação 1), formando assim uma leve camada de covelita na superfície da esfalerita (SCHONS, s.d).



3.3.4 *Espumantes*

Espumantes são reagentes utilizados na flotação para melhorar a resistência e estabilidade das bolhas do processo, por meio da redução da tensão superficial entre as interfaces ar e água. Com as bolhas mais estáveis e resistentes, seus rompimentos são evitados, consequentemente, a coleta das mesmas será mais eficiente (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

A estrutura do espumantes é similar à dos coletores, diferindo em relação ao poder do radical das estruturas, onde o radical do coletor consegue interagir eletricamente ou quimicamente com a superfície da partícula mineral. Já o radical do espumante é liofílico, ou seja, possui afinidade com a água (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010). Os espumantes são pertencentes, em grande maioria, aos grupos dos álcoois ou dos éteres. O espumante mais empregado nos processos de flotação é o metil-isobutil-carbinol ou MIBC, do grupo dos álcoois de cadeia ramificada (VALADÃO e ARAUJO, 2012).

3.4 Mina de Morro Agudo

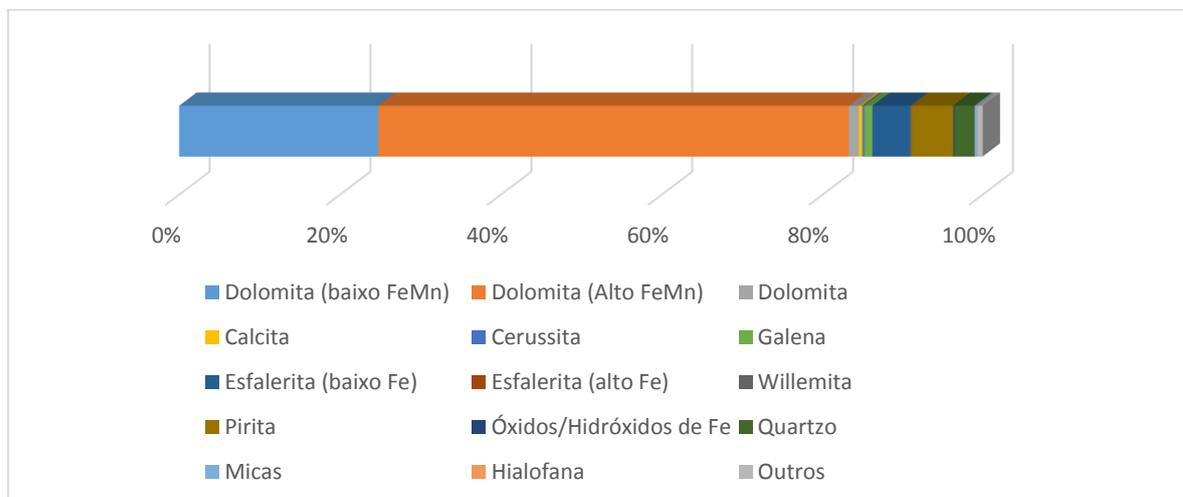
3.4.1 Depósito Mineral

O depósito mineral de Morro Agudo está associado a rochas carbonáticas, pertencentes à formação rochosa denominada Vazante, Grupo Bambuí (CHAVES e SILVEIRA, 2006). Segundo Nunes, Correa e Lopes (2019, p.4-5):

O minério de Morro Agudo, de matriz dolomítica, possui uma composição com cerca de 58,50% de dolomita (*high FeMn*), 24,76% de dolomita (*low FeMn*), 5,21% de pirita, 4,69% de esfalerita, 2,52% de quartzo, 1,27% de dolomita, 0,99% de galena e 2,07% de outros minerais em pequenas quantidades.

Assim, pode-se observar a mineralogia do minério de Morro Agudo na Figura 4.

Figura 4 - Mineralogia modal do minério de Morro Agudo



Fonte: Nunes, Correa e Lopes, 2019 *apud* Lara, 2022.

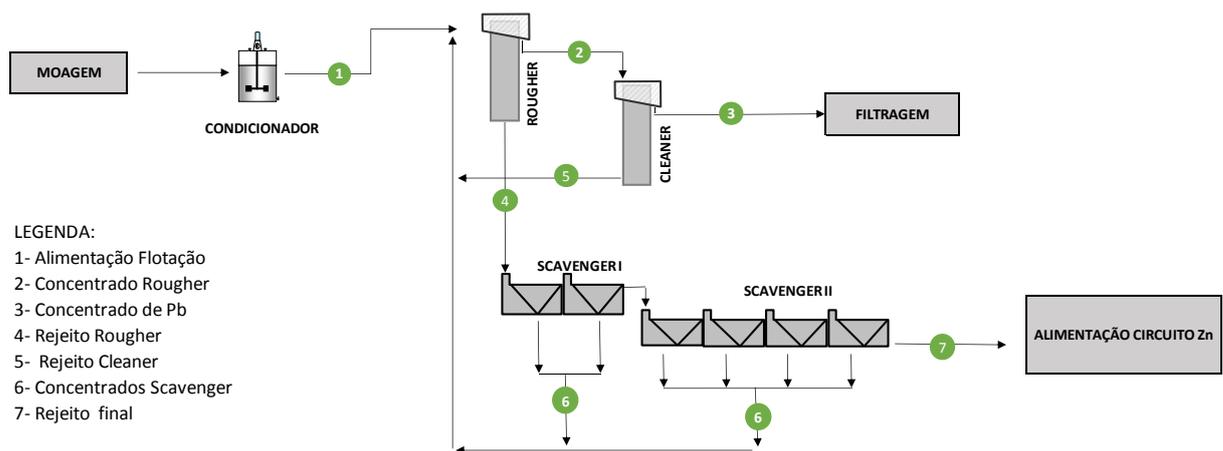
Observa-se que a pirita possui uma porcentagem significativa na composição mineralógica do minério de Morro Agudo. A pirita, em partículas liberadas, é prejudicial na flotação de sulfetos. A sua presença em grandes quantidades dificulta a recuperação e seletividade durante as etapas de flotação de minérios zinco-chumbo associados (ANDERSON *et al.*, 2010).

3.4.2 Circuito de flotação

Na flotação de minerais sulfetados de zinco-chumbo associados, geralmente ocorre a depressão da esfalerita na etapa de flotação da galena (BULATOVIC, 2007). Esse processo ocorre na flotação de minerais sulfetados na unidade de Morro Agudo, a partir da flotação seletiva, composta por etapa de flotação de chumbo (galena) e flotação de zinco (esfalerita).

A primeira etapa visa a flotação de galena. Essa etapa é alimentada com minério sulfetado em polpa, de granulometria ~P65 em 325 mesh (material 65% passante na malha de 325 mesh, equivalente a 44 μm). A polpa é condicionada com adição do amil xantato de potássio (PAX), que é o agente coletor da galena. O circuito de flotação de chumbo é composto por *rougher*, *cleaner* e *scavengers*. As etapas *rougher* e *cleaner* são em colunas de flotação, já as etapas *scavengers* ocorrem em banco de células mecânicas convencionais, divididas em *scavengers* I e II. O concentrado da *rougher* de chumbo alimenta a *cleaner*, e o rejeito da *rougher* alimenta a *scavenger* I. O concentrado da *cleaner* é o concentrado final da etapa de chumbo. O rejeito da *cleaner* e os concentrados das *scavengers* retornam para a *rougher*. O rejeito da *scavenger* I alimenta a *scavenger* II, e o rejeito da *scavenger* II alimenta o circuito de flotação de zinco. Na Figura 5 observa-se o fluxograma do circuito de flotação de chumbo.

Figura 5 - Fluxograma circuito de flotação de chumbo usina de Morro Agudo

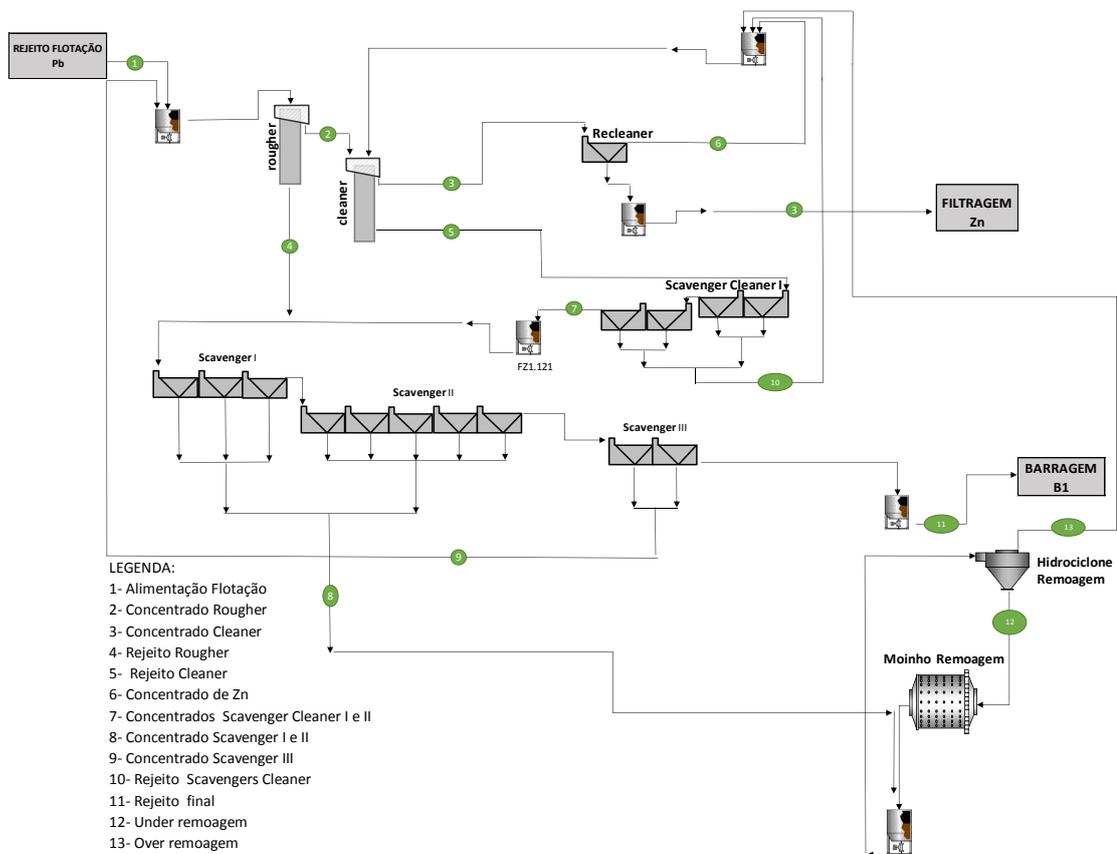


Fonte: Elaborada pelo autor.

O circuito de flotação de zinco é composto por *rougher*, *cleaner*, *reclaner*, *scavengers* e *scavengers cleaner*. A *rougher* e *cleaner* de zinco são em colunas. As etapas *scavengers* (I,

II e III), *reclaner* e *scavenger cleaner* (I e II) são realizadas em células mecânicas convencionais. O concentrado da *rougher* de zinco alimenta a *cleaner*. O rejeito da *rougher* alimenta a *scavenger* I. O concentrado da *cleaner* alimenta a *reclaner*, e o rejeito da *cleaner* alimenta a *scavenger cleaner* I. Os concentrados das *scavengers* I, II alimentam o circuito de remoagem, composto por um moinho e um hidrociclone. Nesta etapa ocorre mais uma etapa de cominuição e classificação granulométrica no circuito de flotação, onde o *overflow* do hidrociclone retorna ao *rougher* de zinco, e o *underflow* retorna à remoagem como carga circulante. O rejeito da *scavenger* I alimenta a *scavenger* II e o rejeito da *scavenger* II alimenta a *scavenger* III. O concentrado da *scavenger* III retorna ao *rougher* e o seu rejeito é o rejeito final do processo. Os concentrados das *scavengers cleaner* I e II retornam ao *cleaner*. O rejeito da *scavenger cleaner* I alimenta a *scavenger cleaner* II. O rejeito da *scavenger cleaner* II é direcionado a *scavenger* I. Por fim, o concentrado da *reclaner* é o concentrado final de zinco e o rejeito da *reclaner* retorna para a *cleaner*. Na Figura 6 observa-se o fluxograma do circuito de flotação de zinco.

Figura 6 - Fluxograma circuito de flotação de zinco da usina de Morro Agudo



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Análise Química

3.5.1 *Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X*

A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica amplamente utilizada para análises de rotina em relação aos elementos químicos presentes em amostras de minérios, advindos de etapas como prospecção mineral, lavra e beneficiamento. A técnica possui a vantagem de realizar a análise do material em estado sólido, obtendo assim economia de tempo de preparação, análise e, por consequência, curto prazo para obter o resultado. O FRX, diferente de outras técnicas, é capaz de analisar uma certa faixa de elementos, na ordem de partículas por milhão (ppm), contendo análises com precisão. Portanto, o FRX é uma técnica que a maioria dos laboratórios químicos optam para realização das análises químicas (VALADÃO e ARAUJO, 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Amostragem do Minério

Para a realização dos ensaios, foi utilizado o *run of mine* (ROM) de Morro Agudo e o material de reprocessamento, que é proveniente da barragem B2. As proporções em massa dos ensaios foram em 80% ROM e 20% de material reprocessado. Para o ensaio com o quebracho, foi utilizado 100% de ROM. Foi amostrado o ROM no fluxo denominado *underflow* do segundo deck da peneira do circuito de britagem terciária, que possui a abertura de malha em 10 milímetros. Já o material de reprocessamento foi coletado em diferentes pontos em uma pilha de rejeito na barragem B2.

4.2 Análise dos Teores e de Granulometria da Alimentação

Para obter o comparativo entre o ensaio de flotação de bancada com atual cenário da usina de flotação, foi realizada no material de alimentação dos ensaios, análises de teores de Zn, Pb, Fe e da granulometria, visando-se as especificações da Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações - Alimentação da planta (AP) da flotação de MA

Especificações AP - Ensaio Flotação em Bancada	
Teor de Zn	$2,0\% \leq x \leq 3,0\%$
Teor de Pb	$0,6\% \leq x \leq 1,0\%$
Teor de Fe	$\leq 3,0\%$
Granulometria	$\sim P65\%$ em 44 μm

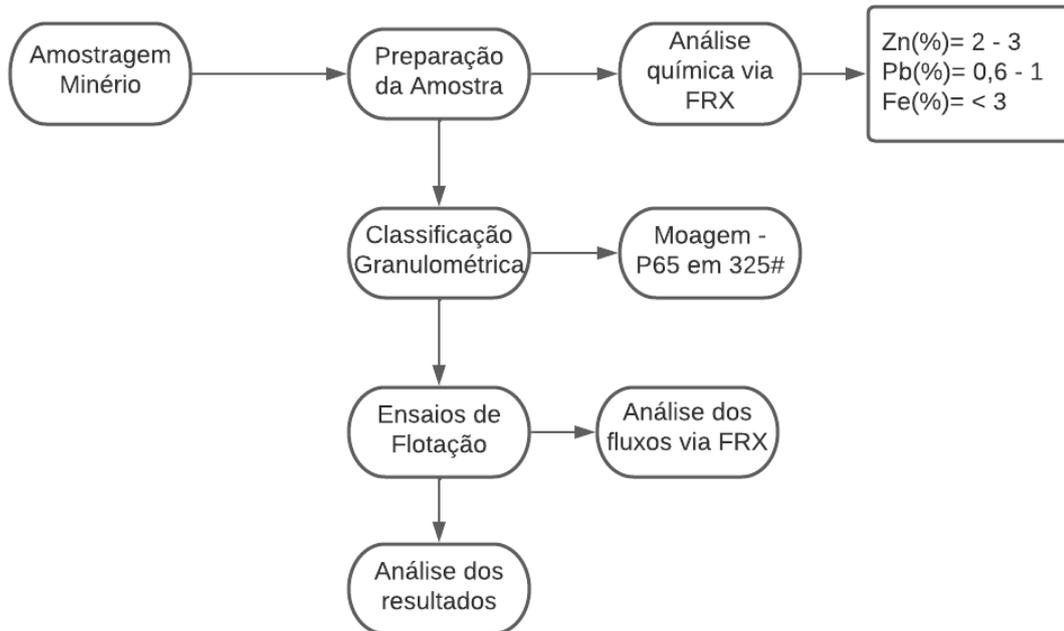
Fonte: Elaborado pelo autor.

A caracterização mineralógica do minério de Morro Agudo seguiu as atividades desenvolvidas do laboratório químico de processos da unidade, por meio de procedimentos operacionais padrões. Primeiro, foi realizado a análise química do material, que consiste na retirada de uma alíquota pulverizada do mesmo. A amostra pulverizada foi homogeneizada, retirando posteriormente uma alíquota com cerca de 5 g para a análise química via espectrometria de fluorescência de raios X. Essa análise teve como objetivo avaliar os teores do material de alimentação do ensaio de flotação.

Para a classificação granulométrica, o material foi cominuído a úmido em um moinho rotativo de barras, com massa de 2,0 kg (composição de 80% ROM e 20% material

reprocessado) adicionando 1 litro de água proveniente unidade de Morro Agudo. O intuito foi obter uma granulometria aproximadamente com P65 em 44 μm . A Figura 7 apresenta o fluxograma do ensaio de classificação granulométrica.

Figura 7 - Fluxograma dos ensaios de caracterização mineralógica

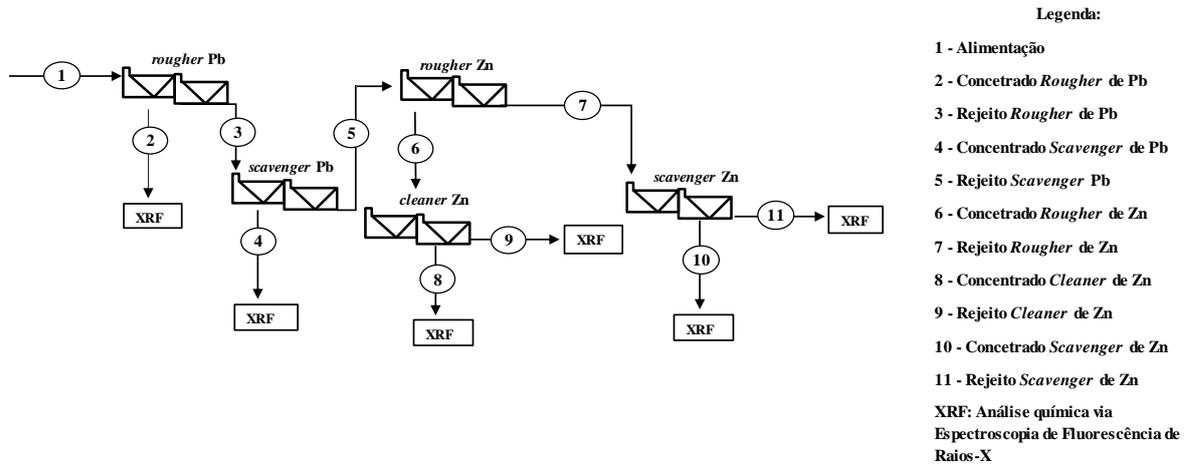


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Ensaio de Flotação em Bancada

Os ensaios de flotação em bancada foram realizados no laboratório químico de processos de Morro Agudo utilizando uma célula de flotação em bancada da marca CDC. Os ensaios seguiram os procedimentos padrões desenvolvidos pela equipe de processos. Na Figura 8 observa-se o passo a passo do ensaio padrão.

Figura 8 - Fluxograma completo do ensaio de flotação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos ensaios 2, 3, 4, 5 foi dosado o metabissulfito de sódio (Tabela 2) e no ensaio 2 da Tabela 3, foi dosado o quebracho. Todos os depressores foram dosados na etapa *rougher* de chumbo, alterando em cada ensaio apenas a dosagem (g/t) e o respectivo reagente. Os ensaios 1 (Tabela 2 e 3) foram realizados sem depressores a fim de utilizá-los como referencial do atual ensaio padrão do processo de Morro Agudo.

Tabela 2 - Sequência dos ensaios de flotação com MBS

Ensaio de Flotação - Metabissulfito de Sódio	
Ensaio 1	Ensaio padrão de flotação sem o uso de depressores
Ensaio 2	Ensaio padrão de flotação dosando 50g/t de metabissulfito de sódio na etapa <i>rougher</i> de chumbo
Ensaio 3	Ensaio padrão de flotação dosando 100g/t de metabissulfito de sódio na etapa <i>rougher</i> de chumbo
Ensaio 4	Ensaio padrão de flotação dosando 150g/t de metabissulfito de sódio na etapa <i>rougher</i> de chumbo
Ensaio 5	Ensaio padrão de flotação dosando 200g/t de metabissulfito de sódio na etapa <i>rougher</i> de chumbo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Sequência dos ensaios de flotação com Quebracho

Ensaio de Flotação - Quebracho	
Ensaio 1	Ensaio padrão de flotação sem o uso de depressores
Ensaio 2	Ensaio padrão de flotação dosando 200g/t de quebracho na etapa <i>rougher</i> de chumbo

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1 Reagentes

Para a realização dos ensaios, foram utilizados os mesmos reagentes utilizados no processo de flotação de Morro Agudo, com as respectivas concentrações conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Reagentes ensaio de flotação

Reagente	Fornecedor	Função	Concentração (%)
Amil Xantato de Potássio	Interfusão	coletor	1
Sulfato de cobre	Nexa (JF)	ativador	2
Cal	Lhoist	regulador ph	5
MBS	Interfusão	depressor	15
Quabrecho	Nexa (Peru)	depressor	20
MIBC	Interfusão	espumante	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2 Procedimentos Flotação em Bancada

Os ensaios de flotação de bancada foram de acordo com os ensaios padrões desenvolvidos pela equipe de processos de Morro Agudo. Conforme a Tabela 5, observa-se as etapas dos ensaios, contendo circuito de flotação de chumbo e zinco.

Tabela 5 - Etapas dos ensaios de flotação em bancada

Etapas	Vol. cuba (L)	Aeração (L/min.)	Rotação (rpm)	Tempo Cond. (min.)	Tempo Flotação (min.)	pH alvo	CuSO ₄ (g/t)	PAX (g/t)	MBS (g/t)	Quebracho (g/t)	MIBC (g/t)
Cond. 1 Pb	4,0	--	1300	2 (PAX) 3 (MBS e Quebracho)	--	--	--	40	50/100/150/200	200	--
RGH Pb	4,0	6	1050	--	4	--	--	--	--	--	20
SCV Pb	4,0	6	1050	--	4	--	--	10	--	--	10
Cond. Zn 1	4,0	--	1200	5	--	9,5	200	--	--	--	--
Cond. Zn 2	4,0	--	1200	2	--	9,5	--	50	--	--	20
RGH Zn	4,0	6	1300	--	5	9,5	--	--	--	--	--
Cond. Zn 3	4,0	--	1300	2	--	9,5	--	60	--	--	20
SCV Zn	4,0	6	1300	--	7	9,5	--	--	--	--	--
CL	1,5	1	700	--	2	9,5	--	--	--	--	--

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 Especificações do Processo de Flotação de Morro Agudo

Para as análises dos resultados dos ensaios de flotação, foram utilizados os seguintes parâmetros: Teor de Zn no concentrado sulfetado de Zn; Teor de Pb no concentrado sulfetado de Pb; recuperação de Pb e Zn; Teor de Fe no concentrado Zn; Teores de Zn, Pb e Fe no rejeito final. Os parâmetros seguem as especificações (Tabela 6) objetivadas pelo processo da unidade de Morro Agudo.

Tabela 6 - Especificações para os teores dos concentrados, rejeito final de MA e de recuperação de Zn e Pb

Fluxo	Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)
Concentrado de Pb	-	≥ 48	-
Concentrado de Zn	≥ 38	-	< 3
Rejeito Final	< 0,200	< 0,100	-
Recuperação de Pb	-	≥ 70	-
Recuperação de Zn	≥ 87	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor

4.5 Análises Químicas

Os resultados dos ensaios foram analisados quantitativamente por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) via pó solto. O equipamento de análise é o EDX 720HS, da marca Shimadzu, pertencente ao laboratório de processos de Morro Agudo. As 56 amostras resultantes dos ensaios de flotação foram avaliadas nas respectivas curvas do FRX, visando a obtenção dos teores de Zn, Pb e Fe das amostras. Os resultados foram utilizados para os cálculos de balanço de massa e metalúrgico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Teores de Alimentação dos Ensaio

A partir das análises de alimentação dos ensaios, observou-se uma diferença entre os valores de Zn, Pb e principalmente para o Fe, na alimentação para os ensaios das tabelas 6 e 7. Isso se deve, pois, os ensaios com MBS e quebracho foram realizados em datas distintas, alterando-se a amostra do minério utilizado para os ensaios.

Tabela 7 - Resultados dos teores da alimentação dos ensaios de flotação com MBS

Ensaio	Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)
Ensaio 1	2,19	0,74	5,69
Ensaio 2	2,27	0,73	5,45
Ensaio 3	2,29	0,78	5,64
Ensaio 4	2,21	0,85	5,98
Ensaio 5	2,23	0,74	5,83

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 - Resultados dos teores da alimentação dos ensaios de flotação com Quebracho

Ensaio	Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)
Ensaio 1	2,16	0,62	3,49
Ensaio 2	2,17	0,53	3,23

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Flotação

Os ensaios de flotação seguiram as etapas descritas na Tabela 5. Todos os ensaios de flotação foram realizados no laboratório de processos da Nexa – MA, seguindo o procedimento operacional padrão de flotação da unidade. O processo de flotação da galena e esfalerita de MA visa a minimização dos valores de perda metálica de Zn e Pb respectivamente nos concentrados finais.

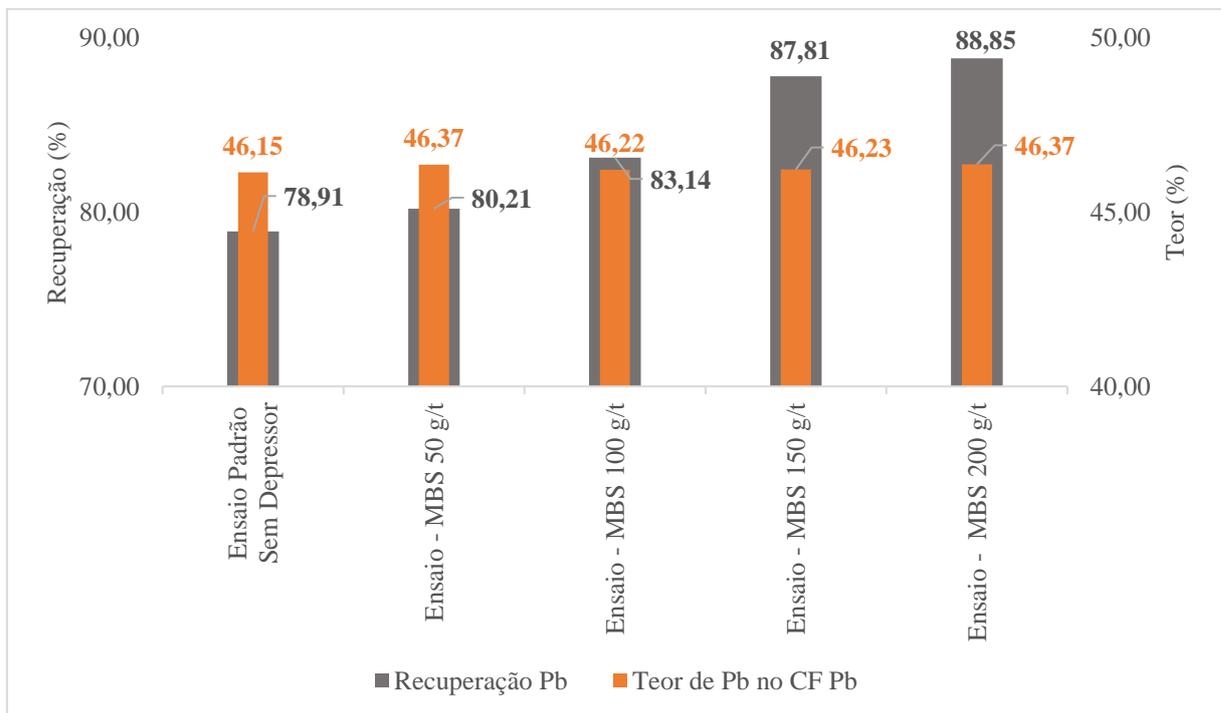
5.2.1 Ensaio de flotação com Metabissulfito de Sódio

5.2.1.1 Flotação da Galena

Na etapa de flotação da galena, os melhores resultados foram obtidos no ensaio 5, onde foi dosado 200 g/t de MBS na etapa *rougher* de Pb. Observou-se que os valores de teor de Pb

no concentrado de Pb não apresentaram grandes variações entre os ensaios (Gráfico 1). Entretanto, os valores de recuperação de Pb cresceram de acordo com o aumento da dosagem em g/t do MBS na rougher de Pb, com o ensaio 5 apresentando melhor resultado de recuperação. Comparando os ensaios com MBS em relação ao ensaio padrão, sem dosagem do depressor, nota-se que o MBS ajudou no aumento da recuperação de Pb, mesmo em dosagens menores, como no ensaio com 50g/t de MBS.

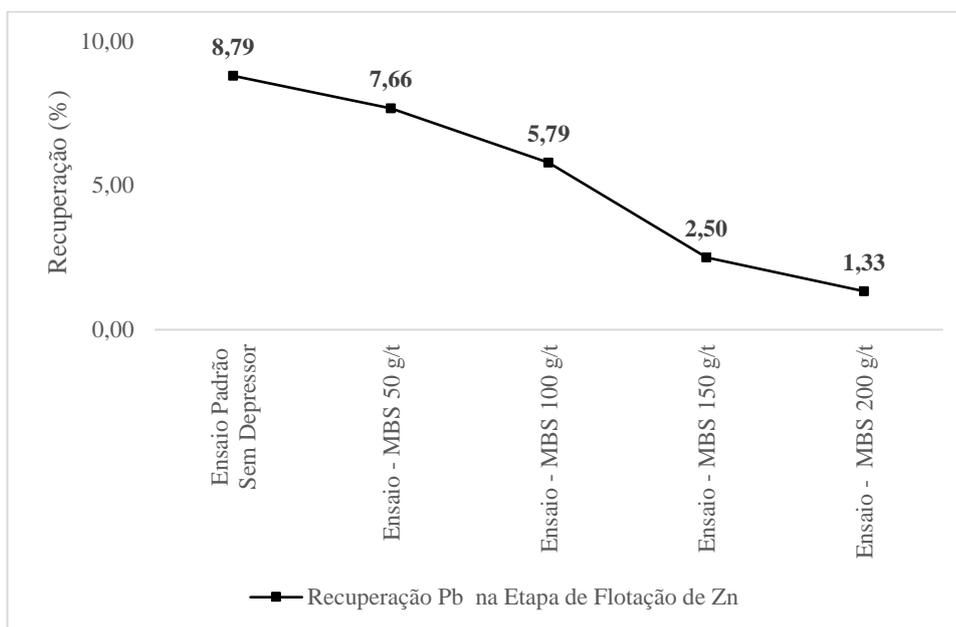
Figura 9 - Recuperação de Pb e teor de Pb no concentrado sulfetado de Pb



Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido a recuperação de Pb aumentar com o uso do MBS, ocorre a diminuição do fluxo de partículas de galena para a etapa de flotação da esfarelita, que é a etapa subsequente à etapa de flotação da galena. Esse efeito foi observado (Figura 10) a partir da diminuição dos valores de recuperação de galena no circuito da esfarelita.

Figura 10 - Recuperação de Pb na etapa de flotação da esfalerita



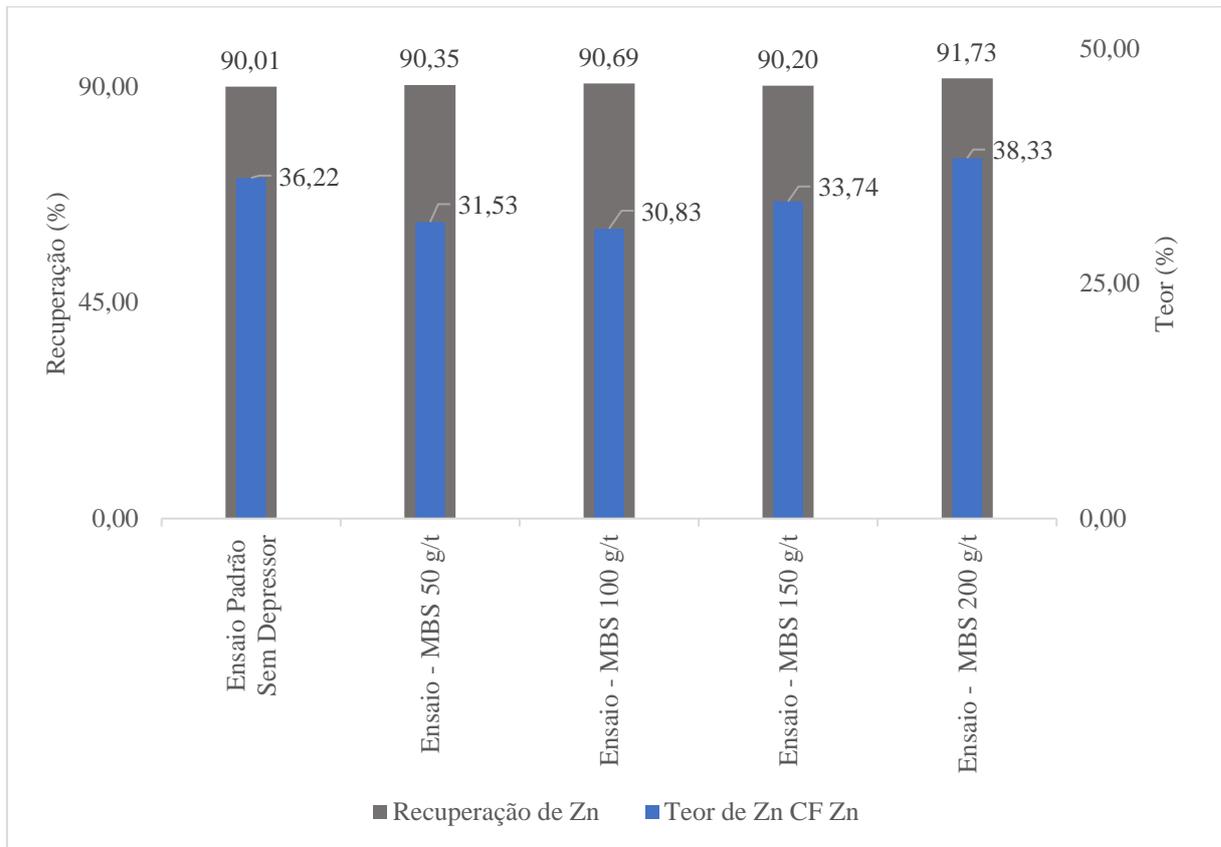
Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, o uso do MBS apresentou o efeito esperado, aumentando a recuperação de Pb e Zn, a partir da inibição da coleta de partículas de pirita durante, principalmente, na etapa de flotação da Galena.

5.2.1.2 Flotação da Esfalerita

Na etapa de flotação da esfalerita, observou-se também que os melhores resultados foram obtidos no ensaio 5. Devido a etapa de flotação de esfalerita ser em sequência da flotação da galena, o MBS impactou positivamente os resultados de recuperação de Zn e no teor de Zn no concentrado final de Zn, como apresentado na Figura 11. Também se observou no ensaio 5 um menor valor Fe no concentrado final de zinco, comparado ao ensaio 1 (2,89% de Fe no CF Zn do ensaio 5 e 3,45% de Fe no CF de Zn no ensaio 1), obtendo assim melhor qualidade no concentrado final de Zn.

Figura 11 - Recuperação de Zn e teor de Zn no concentrado sulfetado de Zn



Fonte: Elaborada pelo autor.

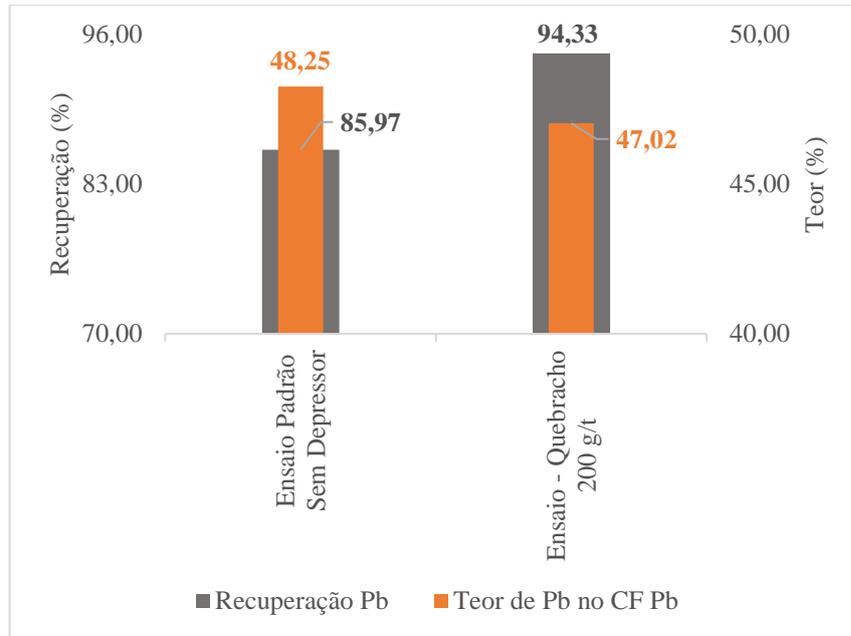
Como a pirita pode ser flotada devido à sua hidrofobicidade natural ou a hidrofobicidade induzida ao efeito do coletor, o uso de depressores são necessários para inibir o efeito de sua coleta em circuitos de flotação (MU, PENG e LAUTEN, 2016). Portanto, conciliando com a literatura, o uso de depressores como o MBS inibiu a coleta de pirita no circuito de Pb, impactando positivamente nos resultados recuperação e seletividade nas etapas de flotação da galena e da esfalerita nos ensaios realizados dosando o depressor.

5.2.2 Ensaio de flotação com Quebracho

Comparando os resultados entre os ensaios com e sem o uso do quebracho, observou-se que o ensaio usando o depressor apresentou melhor resultado de recuperação de Zn na etapa de flotação de Zn (Figura 12) e de recuperação de Pb na etapa de flotação de Pb (Figura 13). Já comparando os resultados dos teores dos concentrados finais, para o concentrado final de Pb, o ensaio padrão, sem o uso do depressor, apresentou um teor maior de Pb no concentrado de Pb

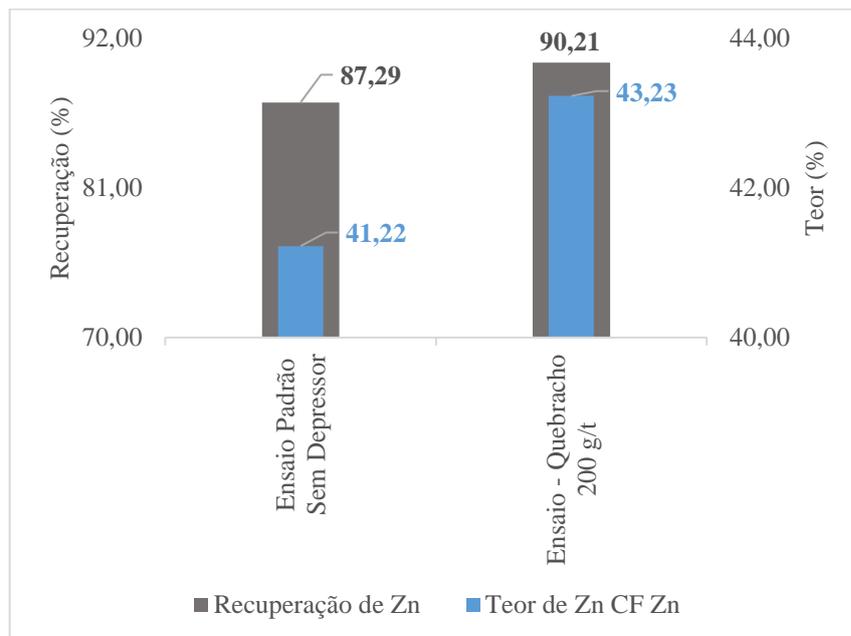
(Figura 12). Já o ensaio com quebracho apresentou um valor de teor de Zn maior no concentrado de Zn (Figura 13). Em relação ao teor de Fe no concentrado final de Zn, o ensaio com quebracho foi o que apresentou um menor valor, com 1,17% de Fe.

Figura 12 - Recuperação de Pb e teor de Pb no concentrado sulfetado de Pb



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13 - Recuperação de Zn e teor de Zn no concentrado sulfetado de Zn



Fonte: Elaborada pelo autor.

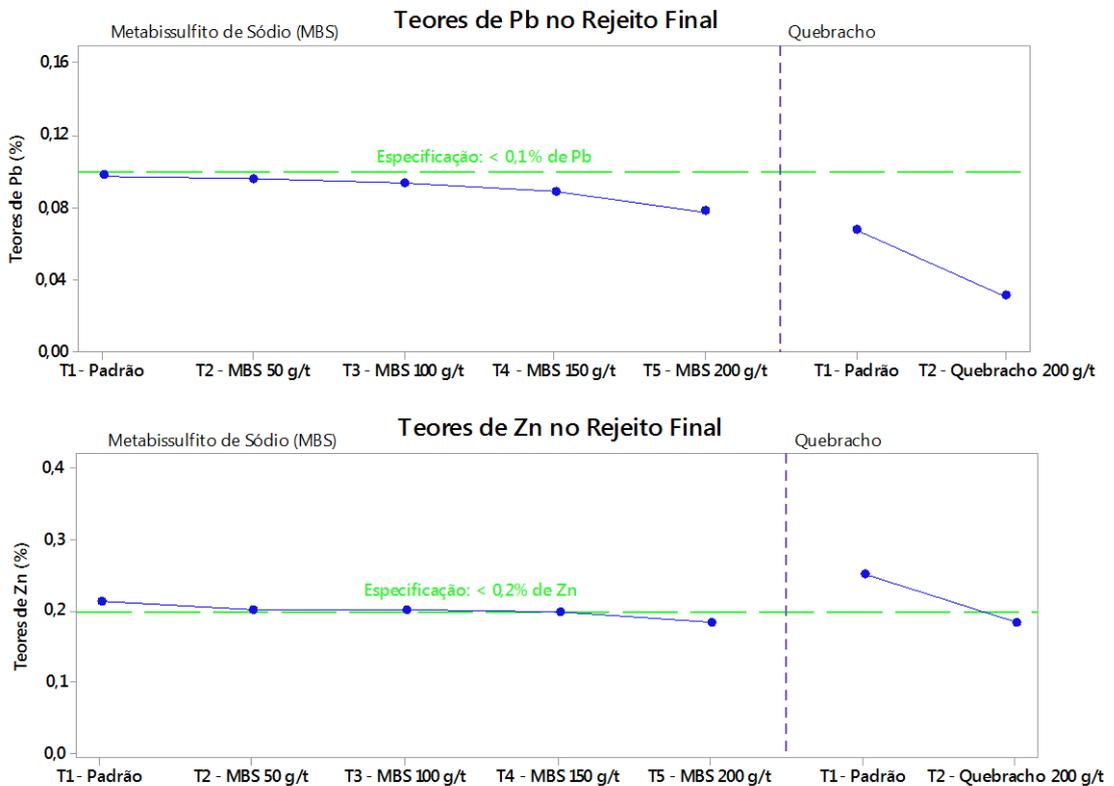
5.2.3 Análise do Rejeito Final dos Ensaio

Objetivando a comparação dos resultados em escala bancada com os valores de especificação do processo, os resultados de teores de Zn e Pb do rejeito final dos ensaios devem se enquadrar dentro das especificações atuais do processo de MA, conforme a Tabela 8. Como o rejeito final do processo de flotação de Morro Agudo é comercializado como coproduto (PCA), é de suma importância a análise dos teores de rejeito dos ensaios.

Analisando os resultados por meio de cartas de controle, observou-se que para os ensaios com MBS, o ensaio 5 apresentou menores teores de Zn e Pb no rejeito final (Figura 14).

Já para o ensaio com quebracho, observou-se que os teores de Zn e Pb diminuíram consideravelmente, comparados aos teores de Zn e Pb resultantes no ensaio sem o uso do quebracho (Figura 14).

Figura 14 - Teores de Zn e Pb no rejeito final de todos os ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CONCLUSÕES

Por meio da realização dos ensaios de flotação em escala bancada, foi possível melhorar os resultados de recuperação e seletividade nas etapas de flotação da galena e esfalerita, a partir do uso de depressores de pirita.

Nos ensaios utilizando o depressor metabissulfito de sódio, os melhores resultados foram com o uso de 200 g/t de MBS (ensaio 5), dosado na etapa *rougher* de Pb. Os resultados obtidos no ensaio 5 apresentaram: 88,85% de recuperação de Pb, com aumento em 9,94% de recuperação comparado ao ensaio padrão (ensaio sem o uso de MBS); teor de 46,37% de Pb no concentrado de Pb; 91,73% de recuperação de Zn; teor de 38,33% de Zn no concentrado de Zn, com aumento de 2,11% de Zn ao comparado com o ensaio padrão e 2,89% de Fe no concentrado final de Zn, ficando dentro da especificação. Já o rejeito final do ensaio 5 apresentou menores valores em porcentagem de Zn e Pb, com 0,185% de Zn e 0,078% de Pb, ficando abaixo dos limites superiores de especificação (< 0,200% de Zn e < 0,100% de Pb) do processo de Morro Agudo.

Na segunda etapa de ensaios, comparando o ensaio padrão (sem o uso do quebracho) em relação ao ensaio com quebracho, observou-se com o uso do depressor, dosando 200 g/t na etapa *rougher* de Pb, obteve-se melhores resultados. O ensaio com o quebracho apresentou uma recuperação de 94,33% de Pb, com um ganho de 8,36% em recuperação comparado ao ensaio padrão, e 90,21% de recuperação de Zn. Observou-se também que o ensaio com o uso do quebracho apresentou menor seletividade na etapa de flotação da galena, em relação ao ensaio padrão, apresentando um valor de 47,02% de Pb no concentrado de Pb, 1,48% menor que o teor de Pb no concentrado de Pb do ensaio padrão. Ambos os ensaios apresentaram teores de Fe no concentrado final de Zn dentro da especificação do processo de MA. Para o rejeito final dos ensaios, o ensaio com quebracho apresentou uma diminuição considerável nos teores de Zn e Pb do RF, com 0,184% de Zn e 0,031% de Pb, ambos ficando abaixo dos limites superiores de especificação do processo de Morro Agudo.

Conclui-se que o uso de depressores de pirita na etapa *rougher* de Pb impactou positivamente na melhoria dos resultados de performance do circuito de Morro Agudo em escala bancada. Os ensaios com diferentes dosagens de MBS demonstraram que quanto maior a dosagem em g/t do depressor, melhores foram os resultados obtidos. Com o quebracho, mesmo realizando apenas um ensaio, foi possível obter resultados efetivos que garantem o

poder de adsorção do reagente. Portanto, o uso de metabissulfito de sódio em 200 g/t e o uso de quebracho em 200 g/t tornaram-se uma alternativa para diminuir o impacto das partículas de pirita no processo de flotação de Morro Agudo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, S. et al. **Mining Chemicals Handbook**. Connecticut: Cytec Inc, 2010. p. 169-170.
- ANDRADE, E. M. **Estudo de Depressores na Flotação de Finos de Minério de Manganês com Oleato de Sódio**. 2010. (130f). Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 21. 2010.
- BULATOVIC, S. M. **Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores**. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 446.
- CHAVES, A. P; SILVEIRA, G. M. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – A Flotação no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Signus, 2006. vol. 4. p. 206-214
- CUNHA, I.A., COELHO, C., MISI, A., (2000). **Fluid inclusion study of the Morro Agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brazil**. Brazilian. J. Geol. 318–321.
- HU, Y., SUN, W., WANG, D. **Electrochemistry of Flotation of Sulphide Minerals**. Beijing: Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009.
- JOSÉ, S. J. **Estudo da flotação coletiva de sulfetos de zinco-chumbo**. 2015. (87 f.)
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 16. 2015.
- LARA, A. G. **Otimização da recuperação de esfalerita na usina de Morro Agudo através do estudo da distribuição granulométrica da flotação**. (52f). Dissertação. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p.21. 2022.
- LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap 11. p. 495-499 p. 501, p. 503 p. 896, 2010.
- MU, Y; PENG, Y; LAUTEN, R, A. **The depression of pyrite in flotation by different reagent systems – A Literature review**, minerals engineering, 2016. v. 96-97, p. 143-156.
- NUNES, C.; CORREIA, E.; LOPES, L. **Comparação da Liberação da Esfalerita de Morro Agudo e Bonsucesso e os Efeitos na Flotação**. In: XXVIII ENTMME, Belo Horizonte, Brasil. 2019. p. 4-5.
- PIGNATON, T. V; SILVESTRE, M. O; PEREIRA, F. A; MEDEIROS, M. M; REZENDE, F. E. O. **Otimização do Circuito de Flotação de Chumbo e Zinco de Morro Agudo**. In: XXII ENTMME / VII MSIIMT, Ouro Preto, Brasil. 2007. p. 1-2.
- SCHONS, Elenice. s.d. **Aula 4 – Reagentes: Espumantes e Modificadores**. [PowerPoint de apoio à disciplina de Fenômenos Interfaciais, lecionada na UFG, Campus Catalão].

Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/fen_int_4.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2022.

VALADAO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. Cap. 3, p. 38-39, 128-129.

YOVANOVIC, A. P. **Modelo operacional - Novo fundamento teórico dos processos minerais - Engenharia da concentração de massa por flotação**: Fundamentos da Flotação, Vol.1. Belo Horizonte: 2004.