REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

ANÁLISE DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DOS CIRCUITOS DE MOAGEM, CLASSIFICAÇÃO E FLOTAÇÃO NO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS DE ZINCO E CHUMBO

ANALYSIS OF OPERATING PARAMETERS IN GRINDING, CLASSIFICATION, AND FLOTATION CIRCUITS FOR ZINC AND LEAD ORE BENEFICIATION

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 17/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/794643238

Raíssa Lóren de Oliveira Fernandes[1]

Letícia Liliam de Souza Dutra[2]

Alessandra Vitória de Jesus[3]

Ângela Maria da Silva[4]

Saulo Eron Pinheiro Cardoso[5]

Leonardo Azevedo Sá Alkmin[6]

Jônatas Franco Campos da Mata[7]

RESUMO

O beneficiamento de minérios de chumbo e zinco depende da integração entre moagem, classificação e flotação, uma vez que a distribuição granulométrica e o grau de liberação condicionam a recuperação metalúrgica e a qualidade dos concentrados. Este trabalho analisa a influência dos principais parâmetros operacionais dessas etapas por meio de revisão bibliográfica de abordagem qualitativa e caráter exploratório. Foram examinados estudos sobre minérios sulfetados, com ênfase no depósito de Morro Agudo, enquanto trabalhos sobre Vazante foram utilizados como referência comparativa, considerando a predominância de willemita nesse depósito. A literatura analisada indica que a moagem insuficiente mantém partículas compostas e limita a separação dos minerais, enquanto a moagem excessiva pode aumentar a geração de partículas ultrafinas e o consumo energético. A eficiência da classificação, a carga circulante e a porcentagem de sólidos também influenciam a distribuição das partículas encaminhadas à flotação. Nessa etapa, o pH, a dosagem de reagentes, as condições de condicionamento e as características superficiais dos minerais afetam a seletividade entre galena, esfalerita e minerais de ganga. Conclui-se que a otimização requer avaliação integrada da granulometria, da liberação mineral, da classificação e das condições de flotação, considerando as diferenças mineralógicas e de escala entre os estudos, sem transferir diretamente parâmetros operacionais entre minérios distintos.

Palavras-chave: cominuição; classificação; flotação; galena; esfalerita; recuperação metalúrgica.

ABSTRACT

The beneficiation of lead and zinc ores depends on the integration of grinding, classification, and flotation, since particle-size distribution

and degree of liberation affect metallurgical recovery and concentrate quality. This study examines the influence of the main operating parameters of these stages through a qualitative and exploratory literature review. Studies on sulfide ores, particularly those from the Morro Agudo deposit, were analyzed, while studies on Vazante were used as a comparative reference, considering the predominance of willemite at that deposit. The reviewed literature indicates that insufficient grinding leaves composite particles and limits mineral separation, whereas excessive grinding may increase ultrafine particle generation and energy consumption. Classification efficiency, circulating load, and solids content also affect the particle-size distribution of the material fed to flotation. In this stage, pH, reagent dosage, conditioning conditions, and mineral surface properties influence selectivity among galena, sphalerite, and gangue minerals. It is concluded that optimization requires an integrated assessment of particle size, mineral liberation, classification, and flotation conditions, while accounting for mineralogical and scale-related differences and avoiding the direct transfer of operating parameters between distinct ores.
Keywords: comminution; classification; flotation; galena; sphalerite; metallurgical recovery.

1. INTRODUÇÃO

O beneficiamento mineral compreende um conjunto de operações unitárias destinadas à separação dos minerais de interesse econômico em relação aos constituintes de ganga, sem alterar a identidade química das espécies processadas.

A integração entre cominuição, classificação, concentração e desaguamento permite produzir correntes com maior teor metálico

e características adequadas às etapas metalúrgicas subsequentes. A definição do fluxograma depende da composição mineralógica, da distribuição granulométrica e das propriedades físicas e superficiais do minério (Luz; Sampaio; França, 2010; Wills; Finch, 2016).

Nos depósitos sulfetados de zinco e chumbo, as principais espécies de interesse são, respectivamente, a esfalerita (ZnS) e a galena (PbS), frequentemente associadas à pirita, pirrotita, dolomita, calcita, quartzo e outros minerais de ganga. A complexidade das associações mineralógicas, o tamanho dos grãos e a textura de intercrescimento condicionam o grau de liberação necessário e, consequentemente, a resposta do minério à moagem e à flotação (Valeriano et al., 2018; Nayak; Jena; Mandre, 2022).

A moagem representa a etapa final da fragmentação e deve gerar uma distribuição granulométrica compatível com a liberação das fases de interesse. A submoagem mantém partículas mistas de galena, esfalerita e ganga, limitando a seletividade; a sobremoagem, por sua vez, eleva o consumo de energia e favorece a geração de partículas ultrafinas, que podem apresentar comportamento desfavorável na flotação. Assim, variáveis como granulometria, carga circulante, porcentagem de sólidos, grau de enchimento e eficiência de classificação precisam ser controladas de forma coordenada (Chaves; Peres, 2003; Wills; Finch, 2016).

A flotação de sulfetos explora diferenças nas propriedades físico-químicas das superfícies minerais. Em circuitos diferenciais de zinco e chumbo, a galena é geralmente recuperada antes da esfalerita; posteriormente, as condições químicas da polpa são modificadas para favorecer a ativação e a flotação do mineral de zinco. O desempenho depende da granulometria, do pH, da condição

superficial dos minerais, da dosagem e seletividade dos reagentes, do condicionamento, da aeração e do tempo de residência (Baltar, 2010; Bulatovic, 2007; Foroutan et al., 2021).

Moagem e flotação constituem, portanto, um sistema interdependente. A distribuição de tamanhos produzida na cominuição determina o grau de liberação e altera a interação entre partículas, reagentes e bolhas. Partículas grossas podem permanecer associadas à ganga ou apresentar menor estabilidade no agregado bolha-partícula, enquanto frações muito finas podem reduzir a eficiência de colisão e aumentar a demanda de reagentes. Além do tamanho, a forma de associação mineralógica também interfere na flotabilidade de partículas com graus semelhantes de liberação (Fosu et al., 2015; Lara, 2022).

Diante desse contexto, este trabalho busca responder à seguinte questão: de que maneira os parâmetros operacionais dos circuitos de moagem, classificação e flotação influenciam a recuperação metalúrgica e a qualidade dos concentrados de chumbo e zinco? Para responder a essa questão, realiza-se uma revisão bibliográfica qualitativa e exploratória, com ênfase na relação entre granulometria, liberação mineral, carga circulante, eficiência de classificação e condições físico-químicas da flotação. O objetivo é discutir os mecanismos e as tendências relatados na literatura e identificar critérios para a otimização integrada dessas operações, considerando as diferenças mineralógicas e de escala entre os estudos analisados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Contexto Geológico dos Depósitos de Chumbo e Zinco no Brasil e no Mundo

A ocorrência de galena (PbS) e esfalerita (ZnS) está relacionada a diferentes processos de formação de depósitos minerais. A composição da rocha hospedeira, a circulação de fluidos mineralizantes, a deformação tectônica e as alterações posteriores controlam a distribuição dos sulfetos. Esses fatores definem a textura do minério, o tamanho dos cristais, a associação com a ganga e a facilidade de liberação durante a moagem. Por isso, a geologia do depósito deve integrar a caracterização tecnológica e a definição da rota de beneficiamento (Valeriano et al., 2018; Leach et al., 2005).

Entre as principais classes de depósitos sedimentares de Pb-Zn estão os hospedados em sequências clásticas, tradicionalmente chamados de SEDEX, e os hospedados em rochas carbonáticas, conhecidos como Mississippi Valley-type (MVT). Os depósitos clásticos ocorrem em contextos de bacias sedimentares e podem apresentar sulfetos finamente laminados em folhelhos e siltitos (Leach et al., 2005).

Os MVT se desenvolvem principalmente em calcários e dolomitos e incluem mineralizações de substituição, preenchimento de cavidades, fraturas e brechas. A distinção entre esses grupos não é absoluta, pois há depósitos com características intermediárias e histórias de alteração complexas (Leach et al., 2005; Leach et al., 2010).

No Brasil, as mineralizações de chumbo e zinco apresentam diferentes contextos geológicos, destacando-se, entre outros, o

cinturão metalogenético de Vazante–Paracatu, em Minas Gerais, cujos depósitos estão hospedados em sequências predominantemente carbonáticas.

Nesse cinturão, as mineralizações associam-se a estratos do Proterozóico e incluem depósitos de zinco sulfetado, como Morro Agudo, Fagundes, Ambrósia e Bonsucesso (Misi et al., 2005; Monteiro et al., 2006; Cordeiro et al., 2018).

O Distrito de Morro Agudo está localizado na porção central dessa faixa e compreende o depósito de Morro Agudo e diversas ocorrências minerais, incluindo Bento Carmelo, Sucuri e Morro do Capão. No que tange à distribuição, os depósitos de zinco silicatado estão localizados na porção sul do cinturão metalogenético, enquanto a maioria dos depósitos de zinco sulfetado se encontra na porção norte.

Em âmbito estratigráfico, o Grupo Vazante abriga depósitos e ocorrências de zinco sulfetado e silicatado (Olivo et al., 2018), sendo constituído predominantemente por uma sucessão de rochas carbonáticas dolomíticas, intercaladas com rochas siliciclásticas e pelíticas. As formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário constituem as principais unidades hospedeiras da mineralização de zinco silicatado e sulfetado, respectivamente.

Além disso, o depósito de zinco e chumbo sulfetados de Ambrósia e as ocorrências de Fagundes e Bonsucesso estão localizados ao norte do Distrito de Morro Agudo e também estão hospedados na Formação Morro do Calcário (Monteiro et al., 2006, 2007; Cunha et al., 2007).

Em escala local, no depósito de Morro Agudo, foram identificadas quatro litofácies dolomíticas, descritas da base para o topo da sequência (Dardenne e Freitas-Silva, 1999; Misi et al., 1999, 2005; Cunha et al., 2000, 2007). Essas unidades compreendem, primeiramente, a brecha dolomítica, caracterizada por clastos angulares de dolomita estromatolítica e laminada em matriz dolomítica com sulfetos disseminados; seguida pela brecha dolarenítica, cujos fragmentos são cimentados por dolomita espática e mineralizados em veios ou preenchimentos intersticiais; em seguida, destaca-se o dolarenito, principal rocha hospedeira da maioria das zonas mineralizadas, composto por ooides, oncóides e intraclastos parcialmente substituídos por esfalerita e galena; por fim, a unidade de dolomita e xisto, formada por laminações milimétricas a centimétricas que abrigam sulfetos laminados associados a sílex e barita (Aldis et al., 2022).

A mineralização apresenta controle estrutural e estratigráfico (Misi et al., 2005; Monteiro et al., 2006; Cunha et al., 2007; Cordeiro et al., 2018). Uma falha normal principal limita os corpos de minério, e a mineralização está restrita ao bloco situado acima do plano da falha, não sendo identificada mineralização significativa no bloco situado abaixo desse plano (Cunha et al., 2007).

Por fim, os corpos de minério geralmente apresentam diferentes estilos de mineralização e várias gerações de minerais, como esfalerita, galena, pirita, dolomita e quartzo (Cordeiro et al., 2018).

No beneficiamento, minérios com sulfetos disseminados em grãos finos podem exigir moagem mais intensa para atingir a liberação. Já minérios com cristais grossos e preenchimentos de fraturas podem

liberar em tamanhos maiores, dependendo do grau de intercrescimento (Leach et al., 2005).

Do ponto de vista do beneficiamento mineral, as características texturais e as associações mineralógicas influenciam diretamente a resposta do minério à cominuição e à concentração. A ocorrência de sulfetos finamente disseminados pode exigir maior redução granulométrica para alcançar níveis adequados de liberação, enquanto mineralizações constituídas por cristais mais desenvolvidos ou preenchimentos de fraturas podem apresentar condições distintas de fragmentação e liberação. Entretanto, o tamanho necessário para promover a separação dos minerais depende do grau de intercrescimento, da distribuição dos grãos e das características físicas da rocha hospedeira. Portanto, a definição das condições de moagem deve ser fundamentada em ensaios de caracterização mineralógica e tecnológica, evitando generalizações baseadas exclusivamente no modelo geológico do depósito.

2.2. Principais Depósitos Brasileiros e Sua Relação com o Beneficiamento

A organização estratigráfica e estrutural da Faixa Brasília, na região do Grupo Vazante (Valeriano et al., 2008; Sotero et al., 2019), fornece informações relevantes para compreender o comportamento do minério durante a cominuição e subsidiar o dimensionamento dos circuitos de moagem. No depósito de Morro Agudo, essa variabilidade é evidenciada pela presença de quatro litofácies mineralizadas, que incluem desde sulfetos disseminados na matriz dolomítica até mineralizações em vênulas e bandas milimétricas associadas a sílex e barita (Aldis et al., 2022).

Essas diferenças na forma de ocorrência e na distribuição dos minerais podem resultar em variações na resistência à moagem e no tamanho necessário para a liberação das partículas. Assim, mesmo quando apresentam teores semelhantes de chumbo (Pb) e zinco (Zn), diferentes lotes de minério podem responder de maneira distinta ao processo de moagem. Por esse motivo, a definição do P80 do produto de moagem destinado à flotação deve considerar previamente as características texturais do minério e o grau de liberação mineral em cada faixa granulométrica (Lara, 2022).

Fagundes e Ambrósia também apresentam mineralização sulfetada hospedada em carbonatos, com associações de esfalerita, galena e pirita e evidências de silicificação, dolomitização e alterações hidrotermais. Em Fagundes, são descritas texturas bandadas e coloformes, além de preenchimentos de espaços gerados pela dissolução das rochas encaixantes (Valeriano et al., 2018).

Essas características podem produzir respostas diferentes de moagem e flotação mesmo dentro da mesma província geológica. Por isso, parâmetros definidos para Morro Agudo não devem ser transferidos diretamente a Fagundes ou Ambrósia sem caracterização e ensaios específicos (Monteiro et al., 2006).

A jazida de Vazante exige uma distinção importante: seu minério de zinco é predominantemente willemítico, constituído por silicato de zinco (Zn_2SiO_4), e não por esfalerita. Embora existam sulfetos subordinados, a rota de concentração e a química superficial da willemita diferem das aplicadas aos minérios sulfetados de Pb-Zn (Valeriano et al., 2018).

O estudo de Bechir (2019) demonstra a influência da granulometria e da liberação sobre a recuperação de zinco em Vazante, mas seus resultados não devem ser apresentados como prova direta do comportamento da esfalerita. O caso serve como comparação sobre a integração entre geologia, moagem e flotação (Valeriano et al., 2018; Bechir, 2019).

2.3. Exemplos Internacionais de Depósitos Sulfetados de Pb-Zn

Em escala mundial, os depósitos sedimentares hospedados constituem importantes fontes de chumbo e zinco, concentrando parcela expressiva dos recursos globais desses metais (Leach et al., 2005). Um exemplo representativo é o depósito de Red Dog, localizado na região de Brooks Range, no Alasca, Estados Unidos. A mineralização de Zn-Pb-Ag está hospedada principalmente em rochas sedimentares da Formação Kuna, de idade carbonífera, incluindo folhelhos negros, rochas silicosas e níveis carbonáticos (Leach et al., 2005; Slack et al., 2004).

Esfalerita, galena, pirita e barita ocorrem associadas aos corpos mineralizados e às zonas de alteração. A evolução tectônica posterior promoveu deformações, deslocamentos e repetições estruturais de partes dos corpos mineralizados, modificando sua configuração original (Ayuso et al., 2004; Slack et al., 2004). Do ponto de vista do beneficiamento, a ocorrência de sulfetos em intercrescimentos finos e a heterogeneidade das associações minerais podem influenciar a distribuição granulométrica, a fragmentação e o grau de liberação. Essas características devem ser consideradas na definição das condições de moagem e na avaliação da resposta à flotação, mediante caracterização mineralógica e ensaios específicos.

Na Austrália, destacam-se importantes depósitos de zinco e chumbo associados a diferentes contextos geológicos do norte do país. O depósito de McArthur River está localizado na Bacia de McArthur, no Território do Norte, e integra o Cinturão de Zinco de Carpentaria (Carpentaria Zinc Belt). A mineralização está hospedada em sequências sedimentares proterozoicas, especialmente nas unidades da Formação Barney Creek, pertencente ao Grupo McArthur, caracterizadas pela presença de rochas sedimentares finamente laminadas e ricas em matéria orgânica (Leach et al., 2005; Blaikie; Kunzmann, 2020).

A mineralização de McArthur River é reconhecida como um importante exemplo de depósito sulfetado sedimentar hospedado, frequentemente associado ao modelo SEDEX (sedimentary exhalative). A ocorrência de sulfetos em camadas e intercrescimentos de pequena escala pode impor desafios à liberação mineral, uma vez que a redução granulométrica necessária à separação dos minerais de interesse também pode favorecer a geração de partículas ultrafinas. Nesse contexto, a obtenção de concentrados seletivos depende da avaliação conjunta da granulometria, do grau de liberação e das condições físico-químicas da flotação (Leach et al., 2005; Leach et al., 2010).

Outro contexto importante na Austrália é a região de Mount Isa, em Queensland, associada ao Mount Isa Inlier, uma província metalogenética que reúne diferentes estilos de mineralização de zinco e chumbo. Embora apresente relações geológicas regionais com outras áreas mineralizadas do norte australiano, essa região possui características estruturais, metamórficas e mineralógicas próprias. Os depósitos podem apresentar diferentes graus de deformação e metamorfismo, com consequências para a

preservação das texturas originais e para a distribuição dos minerais sulfetados (Creus et al., 2023).

Nos depósitos do tipo Mississippi Valley-Type (MVT), bem representados na América do Norte, a mineralização de chumbo e zinco ocorre predominantemente em sequências carbonáticas, especialmente calcários e dolomitos. Esfalerita e galena constituem os principais minerais de interesse econômico, frequentemente associados a pirita, calcita, dolomita e outros minerais de ganga. A mineralização pode ocorrer em brechas, fraturas e espaços de dissolução, apresentando relações variadas com as rochas hospedeiras (Leach et al., 2005; Leach; Taylor, 2009).

Do ponto de vista do beneficiamento, a presença de ganga carbonática e a variabilidade textural desses depósitos devem ser consideradas na caracterização tecnológica do minério. A composição mineralógica pode influenciar as condições químicas da polpa, enquanto o tamanho dos grãos e o grau de intercrescimento condicionam a liberação durante a moagem. Dessa forma, o modelo geológico MVT fornece informações importantes para orientar o planejamento dos ensaios de caracterização e concentração, mas não substitui a avaliação experimental das condições de moagem e flotação para cada domínio mineralizado (Leach; Taylor, 2009; Leach et al., 2010).

2.4. Implicações Geometalúrgicas para Moagem e Flotação

A comparação dos depósitos brasileiros e internacionais mostra que a composição química global do minério é insuficiente para prever seu desempenho. Duas amostras com teor semelhante de zinco podem apresentar respostas distintas se uma contém esfalerita

grossa em carbonatos e a outra apresenta sulfetos finamente disseminados em folhelhos (Aldis et al., 2022; Fosu et al., 2015).

A diferença modifica o tamanho de liberação, a proporção de partículas mistas, a energia de moagem e a área superficial exposta aos reagentes. A classificação geológica dos corpos mineralizados deve, portanto, ser acompanhada por análises mineralógicas quantitativas, microscopia, curvas de liberação e ensaios de flotação por fração granulométrica (Aldis et al., 2022; Fosu et al., 2015).

Na prática, a integração geometalúrgica pode começar pela separação de amostras por litologia, tipo de minério, alteração e textura. Para cada domínio, recomenda-se medir a distribuição granulométrica, o P_{80}, a liberação de galena e esfalerita, os teores por classe de tamanho e a recuperação metalúrgica (Aldis et al., 2022; Fosu et al., 2015).

A comparação desses indicadores ajuda a distinguir perdas causadas por partículas mistas, por finos com baixa probabilidade de colisão ou por condições inadequadas de reagentes. Assim, a geologia passa a orientar decisões operacionais concretas, como ajuste da carga circulante, eventual remoagem de intermediários e adequação do condicionamento, sem pressupor uma granulometria ótima única para toda a jazida (Aldis et al., 2022; Fosu et al., 2015).

A aplicação da abordagem geometalúrgica permite relacionar a variabilidade mineralógica do depósito às condições operacionais necessárias ao beneficiamento. Nesse contexto, a caracterização por domínios geológicos e tecnológicos contribui para identificar diferenças de comportamento à fragmentação, distribuição granulométrica, liberação e resposta à flotação. A integração dessas

informações possibilita avaliar a necessidade de ajustes na alimentação dos circuitos, na intensidade de moagem e nas condições de classificação e concentração. Dessa forma, a otimização deixa de considerar exclusivamente o teor químico da alimentação e passa a incorporar as características mineralógicas que efetivamente condicionam a recuperação dos minerais de interesse.

2.5. Beneficiamento de Minérios de Zinco e Chumbo

A definição da rota de beneficiamento de minérios de zinco e chumbo deve partir da caracterização tecnológica da alimentação, considerando sua composição química, mineralogia, textura e distribuição granulométrica. Em depósitos sulfetados, a esfalerita (ZnS) e a galena (PbS) constituem as principais espécies minerais de interesse econômico. Já os minérios oxidados ou mistos podem apresentar minerais como willemita, hemimorfita, smithsonita, cerussita, anglesita e piromorfita. Como essas fases apresentam propriedades físico-químicas e características superficiais distintas, sua identificação é fundamental para a seleção do fluxograma de beneficiamento e das condições de concentração e reagentes (Nayak; Jena; Mandre, 2022; Nunes, 2022; Figueiredo et al., 2022).

De maneira geral, o beneficiamento pode envolver etapas de britagem, moagem, classificação e concentração, cuja configuração depende das características mineralógicas e tecnológicas do minério. Em condições favoráveis, a pré-concentração pode ser empregada para reduzir a quantidade de material encaminhada às etapas subsequentes, contribuindo para diminuir a demanda energética do circuito. Bergerman et al. (2014) discutem a pré-concentração gravimétrica de minerais sulfetados como alternativa

para reduzir a massa submetida à moagem, ressaltando que sua aplicação depende do contraste de massa específica entre os minerais e de sua distribuição nas partículas.

Em muitos circuitos destinados ao tratamento de minérios sulfetados de chumbo e zinco, a flotação é realizada de forma diferencial, frequentemente com recuperação inicial da galena e posterior concentração da esfalerita. Na etapa de chumbo, são empregados coletores sulfidrílicos e condições químicas destinadas a favorecer a flotabilidade da galena, enquanto a concentração subsequente de zinco geralmente requer a ativação da superfície da esfalerita, favorecendo sua interação com os coletores. Conforme as características do minério e os objetivos metalúrgicos, o circuito pode apresentar etapas de desbaste (rougher), limpeza (cleaner), recuperação de partículas remanescentes (scavenger) e limpeza adicional (recleaner), organizadas para atender aos requisitos de recuperação e qualidade dos concentrados (São José, 2015; Carvalho, 2018).

A eficiência dessa rota não depende exclusivamente do teor global de chumbo e zinco presente na alimentação. As características texturais, o tamanho dos grãos minerais e a forma de associação entre os minerais de interesse e a ganga também condicionam a resposta metalúrgica. Fosu et al. (2015) demonstraram que partículas de esfalerita com graus semelhantes de liberação podem apresentar comportamentos distintos durante a flotação em função de suas texturas de intercrescimento. Esse comportamento evidencia que a avaliação da eficiência do beneficiamento deve considerar conjuntamente a distribuição granulométrica, o grau de liberação e as características mineralógicas das partículas, evitando que a

recuperação global seja utilizada isoladamente como indicador do desempenho da concentração.

2.6. Circuitos de Moagem e Parâmetros Operacionais

A moagem tem como finalidade reduzir o tamanho das partículas e favorecer a liberação dos minerais de interesse, possibilitando sua posterior separação nas etapas de concentração. Por constituir uma operação de elevada demanda energética, sua eficiência depende do equilíbrio entre a granulometria necessária à liberação mineral, a capacidade de processamento do circuito e o consumo específico de energia. Nesse contexto, variáveis como granulometria da alimentação, velocidade de rotação, grau de enchimento, porcentagem de sólidos, carga circulante e tempo de residência influenciam a distribuição granulométrica do produto e o desempenho da operação (Chaves; Peres, 2003; Wills; Finch, 2016).

A velocidade de rotação determina o regime de movimentação dos corpos moedores, influenciando as condições de impacto e atrição responsáveis pela fragmentação das partículas. O grau de enchimento interfere na quantidade de corpos moedores e de material presente no interior do moinho, condicionando a transferência de energia e a capacidade de processamento. A porcentagem de sólidos, por sua vez, afeta as propriedades da polpa e as condições de transporte das partículas, enquanto o tempo de residência está relacionado ao período de exposição do material às ações de fragmentação. Como esses parâmetros atuam de maneira interdependente, sua avaliação deve considerar as características do minério e a configuração do equipamento, evitando análises isoladas que não representem o comportamento global do circuito (Chaves; Peres, 2003; Wills; Finch, 2016).

Nos circuitos fechados, a classificação desempenha papel fundamental no controle da granulometria do produto encaminhado à flotação. As partículas que atendem às condições granulométricas estabelecidas seguem para a etapa de concentração, enquanto a fração classificada como grosseira retorna ao moinho para nova cominuição. A eficiência dessa separação influencia diretamente a carga circulante, a distribuição granulométrica do produto e a quantidade de material submetida à moagem adicional. Quando a classificação apresenta desempenho inadequado, partículas ainda grosseiras podem alcançar a flotação, enquanto partículas já suficientemente finas podem retornar desnecessariamente ao moinho, favorecendo a sobremoagem e o aumento do consumo energético (Wills; Finch, 2016).

Em circuitos de moagem de minérios polimetálicos de chumbo e zinco hospedados em rochas carbonáticas, as diferenças de massa específica entre os minerais também podem influenciar o comportamento das partículas durante a classificação por hidrociclones. A galena apresenta massa específica superior à da esfalerita, da pirita e da dolomita, podendo, para partículas de dimensões semelhantes, apresentar maior probabilidade de direcionamento ao underflow. Essa condição pode favorecer a recirculação de partículas portadoras de galena e contribuir para sua sobremoagem, com possível geração de partículas ultrafinas e comprometimento da recuperação metalúrgica. Entretanto, a partição mineralógica não depende exclusivamente da massa específica, sendo também influenciada pela distribuição granulométrica, pressão de alimentação do hidrociclone, porcentagem de sólidos e geometria do equipamento. Assim, a confirmação desse comportamento requer a análise das curvas de partição e a caracterização granulométrica e química das correntes

de alimentação, overflow e underflow (Wills; Finch, 2016; Correia; Couto, 2018).

O P_{80} corresponde ao tamanho de partícula para o qual 80% em massa da amostra apresenta dimensão inferior. Embora seja um indicador amplamente utilizado no acompanhamento da granulometria dos produtos de moagem, não representa isoladamente a distribuição completa de tamanhos nem o grau de liberação dos minerais. Produtos com valores semelhantes de P80 podem apresentar diferentes proporções de partículas grossas, intermediárias e ultrafinas, bem como distintas condições de associação entre os minerais de interesse e a ganga. Por essa razão, a avaliação do desempenho da moagem deve considerar o P80 em conjunto com a distribuição granulométrica completa, a eficiência da classificação e os resultados metalúrgicos da flotação (Wills; Finch, 2016).

Nesse contexto, a caracterização granuloquímica constitui uma ferramenta importante para compreender a distribuição dos elementos de interesse entre as diferentes classes granulométricas. Quando associada à caracterização mineralógica e à determinação do grau de liberação, permite identificar a ocorrência de metais em partículas grossas, partículas mistas e frações ultrafinas, contribuindo para a identificação das possíveis causas das perdas metalúrgicas (Sampaio; França; Braga, 2007; Fosu et al., 2015; Lara, 2022). A avaliação conjunta dos teores de chumbo e zinco, da distribuição dos minerais e da recuperação por classe granulométrica possibilita distinguir perdas relacionadas à cominuição e à classificação daquelas associadas às limitações da flotação (Nunes, 2022; Lara, 2022).

A influência da granulometria sobre a resposta cinética da flotação também foi demonstrada por Cabral (1995), que identificou variações nas constantes cinéticas do mineral valioso e da ganga entre diferentes classes granulométricas de um minério sulfetado de chumbo e zinco. Esses resultados reforçam que o tamanho das partículas influencia não apenas as condições de liberação mineral, mas também o comportamento das espécies minerais durante a concentração. Dessa maneira, a avaliação das perdas metalúrgicas deve considerar tanto as características granulométricas e mineralógicas das partículas quanto sua resposta cinética à flotação (Cabral, 1995).

Dessa forma, a definição das condições operacionais da moagem deve considerar não apenas a redução do tamanho das partículas, mas também o grau de liberação mineral, a eficiência da classificação, o consumo energético e a resposta metalúrgica das diferentes frações granulométricas. A determinação de condições adequadas depende das características mineralógicas e texturais de cada minério, exigindo a integração entre ensaios de caracterização, avaliação granulométrica e análise do desempenho dos circuitos de moagem e flotação.

2.7. Flotação de Minerais Sulfetados de Zinco e Chumbo

A flotação baseia-se na diferenciação das propriedades superficiais dos minerais e na capacidade de adesão das partículas hidrofóbicas às bolhas de ar, permitindo sua separação seletiva em meio aquoso. Para controlar esse processo, são utilizados diferentes tipos de reagentes: coletores, responsáveis por promover a hidrofobicidade das superfícies minerais; espumantes, que controlam a formação e a estabilidade da espuma; depressores, que reduzem a flotabilidade

de espécies indesejadas; ativadores, que modificam as superfícies minerais e favorecem a adsorção dos coletores; e reguladores de pH e dispersantes, que ajustam as condições químicas da polpa e as interações entre as partículas (Baltar, 2010; Bulatovic, 2007; Nayak; Jena; Mandre, 2022).

A recuperação dos minerais por flotação também depende da cinética de interação entre partículas e bolhas. Em ensaios realizados em batelada, o modelo cinético de primeira ordem de Garcia-Zúñiga descreve a recuperação acumulada em função do tempo por meio da seguinte expressão:

$$R(t) = R_{\infty}[1 - \exp(-kt)]$$

Em que R(t) corresponde à recuperação acumulada no tempo t, R∞ representa a recuperação assintótica e k corresponde à constante cinética de flotação, expressa em min^{-1}. Esse modelo permite avaliar a velocidade de recuperação das espécies minerais e estimar a influência do tempo de flotação sobre o desempenho da concentração. Entretanto, os parâmetros cinéticos devem ser determinados para cada condição operacional, uma vez que variáveis como granulometria, pH, concentração de coletor e grau de liberação podem modificar a resposta do sistema (Garcia-Zúñiga, 1935; Cabral, 1995).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros cinéticos determinados por Cabral (1995) para a flotação de sulfetos de chumbo e zinco nas etapas rougher e cleaner. Os resultados foram obtidos em ensaios de bancada utilizando o modelo de Garcia-Zúñiga, que apresentou bom ajuste aos dados experimentais, com erro aproximado de 0,03. Observa-se que a etapa rougher apresentou constante cinética de 1,92 min^{-1}, superior à obtida na etapa cleaner, de 1,30 min^{-1},

indicando uma recuperação mais rápida dos sulfetos na etapa inicial. As recuperações assintóticas estimadas foram de 95,24% e 96,26%, respectivamente (Cabral, 1995).

Tabela 1. Parâmetros cinéticos de flotação nas etapas de desbaste e limpeza (adaptado de Cabral, 1995; Nunes, 2022).

Etapa	**Constante cinética k (min^{-1})**	**Recuperação assintótica R_∞ (%)**
Rougher	1,92	95,24
Cleaner	1,30	96,26

Fonte: Adaptado de Cabral (1995, p. 76).

É importante destacar que esses parâmetros representam resultados de ensaios de bancada e não devem ser interpretados como constantes cinéticas industriais. Cabral (1995) também realizou estudos em escala piloto, mas não obteve ajuste satisfatório dos resultados aos modelos matemáticos avaliados, evidenciando a necessidade de considerar as diferenças entre as condições experimentais e operacionais.

Na flotação diferencial de minérios sulfetados de chumbo e zinco, a seletividade da separação depende do controle das condições físico-químicas da polpa e da interação entre os minerais e os reagentes. Geralmente, a galena é recuperada inicialmente no circuito de chumbo, enquanto a esfalerita e a pirita são mantidas deprimidas para evitar sua recuperação indesejada no concentrado de chumbo.

Para essa finalidade, podem ser empregados depressores como sulfato de zinco ($ZnSO_4$), sulfito de sódio (Na_2SO_3) e, em

determinadas rotas, compostos à base de cianeto. A coleta da galena é realizada principalmente com reagentes sulfidrílicos, como os xantatos de cadeia curta, a exemplo do etil xantato e do isopropil xantato de sódio (SIPX), além de coletores da classe dos ditiofosfinatos e ditiofosfatos (Bulatovic, 2007; Carvalho, 2018; Foroutan et al., 2021).

As condições de pH utilizadas nessa etapa variam conforme a mineralogia do minério e o sistema de reagentes empregado. Foroutan et al. (2021), ao investigarem a flotação de um minério complexo de chumbo, zinco e ferro, identificaram pH 8 como condição favorável à obtenção de concentrado de chumbo com maior teor, utilizando Aero 3418 como coletor. No mesmo estudo, a flotação de zinco apresentou os melhores resultados de teor e recuperação em pH 6, utilizando aero 3477. Esses resultados demonstram que a definição do pH deve considerar a composição mineralógica, os reagentes utilizados e os objetivos metalúrgicos de cada etapa, não sendo adequado transferir diretamente essas condições para outros minérios sem ensaios específicos.

Na etapa subsequente, a recuperação da esfalerita geralmente requer ativação prévia com sulfato de cobre ($CuSO_4$), que fornece íons Cu^{2+} responsáveis pela modificação da superfície do mineral e pelo aumento de sua afinidade pelos coletores sulfidrílicos. Entre os coletores empregados nessa etapa estão os xantatos, como o amil xantato de potássio (PAX), e os ditiofosfatos, como o Aero 3477. A eficiência da ativação também depende da composição cristaloquímica da esfalerita. A substituição parcial de Zn^{2+} por Fe^{2+} na estrutura cristalina caracteriza variedades ferríferas do mineral, como a marmatita, e pode modificar suas propriedades superficiais e sua resposta aos reagentes de flotação (Boulton; Fornasiero;

Ralston, 2005; Rao, 2004). Portanto, a dosagem do ativador e o tempo de condicionamento devem considerar as características mineralógicas do minério e a seletividade desejada (Chandra; Gerson, 2009).

Outro mecanismo que pode comprometer a seletividade da flotação diferencial é a ativação inadvertida da esfalerita por íons Pb^{2+}. A dissolução parcial da galena durante a moagem e o condicionamento pode disponibilizar espécies de chumbo em solução, que interagem com a superfície da esfalerita e favorecem a formação de espécies superficiais contendo Pb. Essa modificação aumenta a afinidade da esfalerita pelos coletores sulfidrílicos, favorecendo sua recuperação indevida durante a etapa de flotação do chumbo e, consequentemente, a contaminação do concentrado de galena por zinco (Basilio; Kartio; Yoon, 1996; Rashchi; Sui; Finch, 2002; Sarvaramini; Larachi; Hart, 2016).

O sulfato de zinco é empregado para reduzir esse efeito, contribuindo para a depressão da esfalerita ativada por chumbo e para a preservação da seletividade entre galena e esfalerita. Entretanto, sua eficiência depende das condições físico-químicas do sistema, especialmente do pH, do potencial eletroquímico e da concentração de espécies dissolvidas na polpa e na água de recirculação (El-Shall; Elgillani; Abdel-Khalek, 2000; Bulatovic, 2007; Carvalho, 2018).

Em minérios com ganga dolomítica, como os estudados em Morro Agudo, a dissolução dos carbonatos também pode modificar a composição química da polpa por meio da liberação de íons Ca^{2+} e Mg^{2+}. Essas espécies podem alterar a força iônica, as interações eletrostáticas e as condições de dispersão das partículas,

interferindo na seletividade da flotação. A influência da composição química da água sobre a superfície dos minerais sulfetados e a estabilidade da espuma também foi investigada por Biçak et al. (2012) e Ikumapayi et al. (2012).

Silvestre et al. (2009) investigaram a influência da dispersão das partículas na flotação de um minério sulfetado de chumbo e zinco, utilizando amostras de galena, esfalerita, pirita e dolomita. Os autores avaliaram diferentes agentes dispersantes e combinações entre eles, demonstrando que os reagentes que proporcionam maior dispersão nem sempre resultam no melhor desempenho metalúrgico. Esses resultados evidenciam que a escolha e a dosagem dos dispersantes devem considerar a resposta conjunta dos minerais presentes no sistema, evitando condições que favoreçam perdas de metais ou comprometam a qualidade dos concentrados.

Além das condições de ativação e depressão, a escolha do coletor também influencia a resposta dos minerais durante a flotação. Embora os xantatos sejam amplamente empregados no beneficiamento de sulfetos, outras classes de reagentes sulfidrílicos, como os ditiofosfinatos e os ditiofosfatos, também apresentam aplicações em circuitos de chumbo e zinco (Bulatovic, 2007; Lotter; Bradshaw, 2010). Entre essas alternativas, destaca-se o ditiofosfinato de diisobutila de sódio, comercializado como Aero 3418A, investigado quanto à sua interação com superfícies de galena ativadas e não ativadas (Pecina-Treviño et al., 2003). Os ditiofosfatos, por sua vez, também são utilizados na concentração de minerais sulfetados, incluindo a esfalerita (Foroutan et al., 2021).

A aplicação desses reagentes em minérios brasileiros foi investigada por Nunes (2022), que avaliou amostras de um novo corpo mineral da Formação Morro do Calcário, considerando sua possibilidade de processamento na usina existente. Nos ensaios de otimização, foram avaliadas rotas com ditiofosfinato na flotação de chumbo, associado a sulfato de zinco, goma guar e DETA, e ditiofosfato na flotação de zinco, associado a sulfato de cobre e DETA. Nos ensaios em escala mini piloto com a configuração otimizada, foram obtidos concentrados de zinco com teor de 51,94%, recuperação metalúrgica de 93,88% e teor de ferro de 2,74%. Para o concentrado de chumbo, foram obtidos teor de 51,35% e recuperação de 67,75%. Esses resultados demonstram a importância da seleção integrada de coletores, ativadores e depressores para adequar o desempenho da flotação às características mineralógicas do minério (Nunes, 2022).

Nesse contexto, a dietilenotriamina (DETA) tem sido investigada como reagente auxiliar no controle da flotabilidade de sulfetos de ferro previamente ativados por espécies cúpricas. Agorhom, Skinner e Zanin (2014) estudaram a depressão de pirita ativada por cobre e hidrofobizada com xantato, verificando que a DETA pode atuar por meio da complexação de espécies de cobre presentes na solução ou adsorvidas na superfície mineral, além de competir pelos sítios de adsorção do cobre. Os autores também observaram que a combinação entre aeração e DETA pode intensificar a depressão da pirita. Asare-Asher (2019) investigou a aplicação desse reagente em sistemas de flotação de sulfetos complexos. No contexto dos minérios de chumbo e zinco, Nunes (2022) incluiu a DETA nas rotas de reagentes otimizadas, evidenciando sua aplicação como reagente auxiliar no controle da seletividade dos concentrados. Entretanto, sua eficiência depende das condições operacionais,

especialmente da dosagem, do pH, da sequência de adição e da composição mineralógica.

Outra possibilidade para o controle da flotabilidade de minerais indesejados envolve o emprego de polissacarídeos e polímeros modificados, como goma guar, dextrinas e amidos modificados (Bulatovic, 1999; Bulatovic, 2007; Luz; Sampaio; França, 2010). Esses reagentes podem atuar por adsorção nas superfícies minerais, modificando sua interação com os coletores e reduzindo a flotabilidade de determinadas espécies. A resposta desses materiais depende da estrutura química do polímero, da natureza dos minerais, do pH e da sequência de adição dos reagentes (Liu; Laskowski, 1989; Biçak et al., 2007).

Um exemplo dessa aplicação é apresentado por Tan et al. (2020), que investigaram a utilização de goma guar catiônica na separação entre galena e esfalerita, empregando dietilditiocarbamato de sódio (DTC) como coletor da galena. Os resultados demonstraram que a adição da goma guar catiônica após o coletor favoreceu a depressão seletiva da esfalerita, enquanto a adsorção do coletor na superfície da galena foi relativamente preservada. Esse comportamento evidencia que a sequência de adição dos reagentes pode modificar significativamente a seletividade da flotação. Entretanto, os resultados foram obtidos em ensaios experimentais com minerais específicos e devem ser avaliados antes de sua aplicação em circuitos industriais de minérios complexos.

Além das interações químicas entre minerais e reagentes, a recuperação dos sulfetos também pode ser influenciada pelo arraste hidrodinâmico (entrainment). Diferentemente da flotação verdadeira, na qual a recuperação ocorre pela adesão das partículas

hidrofóbicas às bolhas de ar, o arraste promove o transporte de partículas finas para o concentrado pelo fluxo de água associado à espuma. Esse mecanismo pode favorecer a recuperação de minerais de ganga e comprometer a qualidade do produto, mesmo quando não ocorre adesão efetiva entre as partículas e as bolhas.

A contribuição do arraste depende principalmente da recuperação de água, da distribuição granulométrica, da estabilidade da espuma e das condições hidrodinâmicas do equipamento. Cabral (1995), ao estudar a flotação primária de sulfetos de chumbo e zinco em escala piloto, registrou recuperação total de sulfetos de aproximadamente 94%, enquanto a flotação verdadeira foi de 34% e o grau de arraste alcançou 0,78. A autora associou o elevado arraste possivelmente a variações no sistema de aeração e ao pequeno tamanho das partículas sulfetadas. Esse resultado demonstra que uma recuperação global elevada não representa necessariamente uma separação seletiva, sendo necessário distinguir a contribuição da flotação verdadeira daquela decorrente do transporte hidráulico das partículas.

Nas etapas de limpeza, o controle da recuperação de água, da profundidade da espuma e das condições de lavagem pode reduzir o transporte de partículas hidrofílicas para o concentrado. Em colunas de flotação, a utilização de água de lavagem constitui uma alternativa para diminuir o arraste de ganga e melhorar o enriquecimento do produto, desde que as condições operacionais sejam ajustadas à distribuição granulométrica e às características da alimentação (Cabral, 1995; da Luz et al., 2010; Wills; Finch, 2016).

2.8. Integração Entre Moagem e Flotação

A moagem altera o tamanho, a exposição das superfícies minerais e a proporção de partículas mistas que chegam à flotação. O efeito não é uniforme: partículas grossas podem apresentar baixa liberação ou desprendimento das bolhas; partículas muito finas podem ter menor eficiência de colisão e maior participação em fenômenos de arraste.

A textura de intercrescimento também modifica a resposta, mesmo entre partículas com graus de liberação semelhantes (Fosu et al., 2015; Bechir, 2019). Assim, avaliar apenas o consumo de energia da moagem ou a recuperação global da flotação pode esconder a origem das perdas.

A análise integrada deve cruzar o P_{80}, a distribuição granulométrica completa, a carga circulante, a porcentagem de sólidos e a eficiência da classificação com o teor e a recuperação de Pb e Zn em cada produto. Recomenda-se calcular os balanços de massa e metal por campanha de amostragem e separar os resultados por classes granulométricas. Isso ajuda a distinguir perdas causadas por falta de liberação, excesso de finos, arraste ou baixa seletividade química (Sampaio et al., 2007; Lara, 2022).

A avaliação de circuitos com recirculação exige distinguir os ensaios de flotação em batelada, os testes em circuito fechado e os ensaios de ciclo fechado (locked-cycle tests) (da Luz et al., 2010; Wills e Finch, 2016). Nos testes em ciclo fechado, as correntes intermediárias são recirculadas de acordo com a configuração do fluxograma, permitindo avaliar o comportamento do processo após sucessivos ciclos e a formação de cargas circulantes (Andrade, Santos e Gonçalves, 2001; Carvalho, 2018). Essa abordagem permite examinar a influência das correntes de retorno sobre a distribuição dos metais,

a qualidade dos concentrados e a recuperação global, aproximando a avaliação experimental das condições de operação contínua (Sehlotho et al., 2018; Carvalho, 2018; Nunes, 2022). Entretanto, a recirculação não implica necessariamente aumento da seletividade, pois o retorno de partículas, água e espécies químicas pode modificar a composição da polpa e as condições de adsorção dos reagentes (Azevedo et al., 2018; Carvalho, 2018; Nunes, 2022). Por isso, os resultados devem ser interpretados com base nos balanços de massa e metal e na caracterização das correntes recirculantes (da Luz et al., 2010; Carvalho, 2018; Nunes, 2022).

2.9. Estudos de Caso de Circuitos de Moagem em Vazante e Morro Agudo

2.9.1. Circuito de Moagem da Unidade de Vazante

Na unidade de Vazante, o minério é predominantemente constituído por willemita (Zn_2SiO_4), sendo submetido a etapas de britagem, moagem, classificação e flotação. De acordo com Bechir et al. (2017), o circuito de moagem da Usina W era constituído por um moinho de bolas operando em circuito fechado com peneiras de alta frequência. O minério britado era encaminhado ao moinho, cujo produto seguia para uma caixa de bombas e, posteriormente, para as peneiras. A fração retida retornava ao moinho, constituindo a carga circulante, enquanto a fração passante representava o produto final da moagem, encaminhado à flotação de zinco.

No circuito industrial estudado por Bechir et al. (2017), a alimentação nova apresentava vazão de aproximadamente 134 t/h, enquanto a carga circulante alcançava cerca de 275 t/h, equivalente a aproximadamente 205% da alimentação nova. O produto da

moagem apresentava cerca de 18% de material retido em 0,15 mm. Esses valores caracterizam as condições operacionais do circuito investigado e demonstram a importância da classificação no controle da distribuição granulométrica e da vazão de material que retorna ao moinho.

A relação entre granulometria de moagem e recuperação metalúrgica foi investigada por Bechir et al. (2016), em ensaios de flotação em escala de bancada realizados com minério willemítico de Vazante. Os resultados demonstraram que a recuperação de zinco aumentou de 65,20% para 80,33% quando a fração retida em 0,15 mm foi reduzida de 24% para 6%, representando um ganho de 15,13 pontos percentuais. Na condição de referência, com 18% de material retido nessa malha, a recuperação foi de 69,49%. Os resultados evidenciam a influência da granulometria e da liberação da willemita sobre a recuperação metalúrgica. Entretanto, a moagem excessivamente fina, correspondente a 1% de material retido em 0,15 mm, embora tenha proporcionado recuperação de 84,29%, reduziu o teor de zinco no concentrado para 34,50%, indicando comprometimento da seletividade pela maior incorporação de ganga (Bechir et al., 2016).

A influência da granulometria também foi analisada por Bechir (2019), em estudo sobre a moagem e a liberação do minério de zinco da mina de Vazante. Nos ensaios de bancada, os melhores resultados, considerando conjuntamente teor e recuperação, foram obtidos com aproximadamente 12% de material retido em 0,150 mm. Na operação industrial, foi observada uma redução da fração retida nessa malha, de 15,70% em 2015 para 10,49% entre 2016 e 2017, acompanhada de aumento de aproximadamente 2% na recuperação de zinco, quantificado em 2,47% na análise apresentada

pelo autor. Essa melhoria esteve associada a um conjunto de iniciativas operacionais, incluindo aumento da eficiência de classificação por peneiras e hidrociclones, melhor controle do grau de enchimento dos moinhos, ajuste da taxa de alimentação nova e implementação de um sistema especialista no circuito. Dessa forma, embora os resultados indiquem associação entre a redução granulométrica e o ganho metalúrgico, não permitem atribuir o aumento de recuperação exclusivamente à moagem mais fina (Bechir, 2019).

O estudo de Bechir et al. (2017) também avaliou alternativas para elevação da capacidade do circuito de moagem de Vazante, incluindo a instalação de um moinho vertical em segundo estágio. As simulações consideraram equipamentos com potência de até 3.000 HP, sendo essa a alternativa selecionada para o cenário de ampliação analisado. O trabalho demonstrou a possibilidade de elevar a capacidade de processamento mantendo as especificações granulométricas estabelecidas para o produto, embora se trate de uma configuração avaliada por simulação, e não de comprovação de instalação efetiva do equipamento na unidade.

2.9.2. Circuito de Moagem da Unidade de Morro Agudo

No contexto dos depósitos sulfetados, a mina de Morro Agudo, localizada em Paracatu (MG), constitui um importante estudo de caso de processamento de minério de zinco e chumbo. Nunes (2012) estudou e modelou o circuito de moagem da antiga Votorantim Metais Zinco – Morro Agudo. Na configuração analisada, o circuito era composto por dois moinhos de bolas, com capacidade combinada média de aproximadamente 145 t/h, sendo 95 t/h na Linha 1 e 50 t/h na Linha 2. A alimentação das linhas era proveniente

de uma pilha pulmão formada pelo material passante em peneira de 10 mm, oriundo das etapas de britagem. Cada linha de moagem operava de forma independente, em circuito fechado com sua respectiva bateria de hidrociclones de 10 polegadas de diâmetro. O produto nominal do circuito deveria apresentar 75% passante em 44 µm (Nunes, 2012).

Na configuração industrial modelada por Nunes (2012), a carga circulante alcançava aproximadamente 400% da alimentação nova. O estudo também identificou eventos frequentes de by-pass de partículas grosseiras para o overflow dos hidrociclones, resultando em um produto mais grosseiro do que o especificado para a moagem. Esses resultados demonstram que a avaliação do circuito não deve considerar apenas a magnitude da carga circulante, mas também a eficiência da classificação e a distribuição granulométrica das correntes de alimentação, overflow e underflow. A presença de partículas grosseiras no produto da classificação pode comprometer a adequação granulométrica da alimentação da flotação, enquanto a recirculação excessiva de partículas já suficientemente finas pode favorecer a sobremoagem e elevar a demanda energética do processo (Nunes, 2012).

Além dos aspectos granulométricos, as condições eletroquímicas da polpa também influenciam a flotação dos minerais sulfetados. Alexandrino et al. (2009) investigaram a influência do potencial eletroquímico (Eh) na flotação de galena e esfalerita provenientes da mina de Morro Agudo. Nos ensaios, o potencial redox foi monitorado continuamente durante a flotação por meio de um eletrodo de platina, sendo avaliados os efeitos da adição de sulfeto de sódio e sulfito de sódio, na presença e na ausência de nitrogênio como gás de flotação. Os resultados demonstraram que a interação entre os

reagentes e o gás utilizado modificou as condições eletroquímicas da polpa e influenciou a recuperação dos concentrados. Os autores observaram que a interação do sulfeto de sódio com o nitrogênio diminuiu a recuperação de chumbo no concentrado, enquanto o nitrogênio isoladamente aumentou a recuperação de zinco no concentrado na configuração de flotação com recuperação de galena seguida de esfalerita. Esses resultados evidenciam a importância do controle das condições eletroquímicas na seletividade da flotação diferencial (Alexandrino et al., 2009).

2.9.3. Integração dos Estudos de Caso E Implicações Operacionais

A comparação entre os circuitos de Vazante e Morro Agudo demonstra que a moagem não deve ser analisada isoladamente, mas como uma etapa integrada às operações de classificação e concentração. Em Vazante, os estudos de Bechir et al. (2016, 2017) e Bechir (2019) evidenciam a influência da granulometria e da liberação da willemita sobre a recuperação de zinco. Em Morro Agudo, Nunes (2012) destaca a importância da carga circulante e da classificação por hidrociclones em um circuito destinado ao tratamento de minério sulfetado de chumbo e zinco, enquanto Alexandrino et al. (2009) demonstram a relevância das condições eletroquímicas para a flotação desses minerais.

Embora os estudos contribuam para a compreensão da relação entre cominuição e desempenho metalúrgico, suas diferenças mineralógicas impedem a transferência direta dos parâmetros operacionais. A willemita, predominante em Vazante, apresenta propriedades mineralógicas e superficiais distintas da esfalerita e da galena presentes em Morro Agudo. Portanto, os resultados devem

ser interpretados considerando as particularidades de cada minério e a configuração dos respectivos circuitos.

De maneira geral, variáveis como vazão de alimentação, granulometria da alimentação, potência do moinho, grau de enchimento, velocidade de rotação, porcentagem de sólidos, carga circulante e eficiência de classificação interferem na distribuição granulométrica do produto e, consequentemente, no grau de liberação e no desempenho da flotação. A avaliação conjunta desses parâmetros permite identificar limitações operacionais e estabelecer condições de moagem compatíveis com as características mineralógicas do minério.

Assim, a definição das condições operacionais deve buscar o equilíbrio entre a obtenção da granulometria necessária à liberação dos minerais de interesse e o consumo energético do processo. Uma moagem insuficiente pode manter partículas mistas e reduzir a recuperação dos minerais úteis, enquanto a moagem excessiva pode elevar o consumo de energia, aumentar a geração de ultrafinos e comprometer a seletividade da flotação. Os estudos de Vazante e Morro Agudo reforçam, portanto, a necessidade de determinar condições específicas de moagem para cada tipo de minério, considerando a integração entre caracterização mineralógica, eficiência de classificação, consumo energético e recuperação metalúrgica.

2.10. Recirculação de Água e Aproveitamento de Rejeitos

A recirculação de água nos circuitos de beneficiamento constitui uma estratégia para reduzir a demanda por água nova, mas pode modificar a composição química da polpa ao longo do processo

(Levay, Smart e Skinner, 2001; Liu, Moran e Vink, 2013; Muzenda, 2010; Azevedo, Oliveira e Rubio, 2018). A água recuperada nas etapas de espessamento e filtragem pode conter íons dissolvidos, espécies residuais de reagentes e produtos da interação entre a água e os minerais processados (Liu et al., 2013; Azevedo et al., 2018; Nunes, 2022). Em minérios sulfetados hospedados em rochas carbonáticas, a presença de íons como Ca^{2+}, Mg^{2+} e sulfato pode modificar a força iônica da solução, a química superficial dos minerais e a estabilidade da espuma, influenciando o desempenho da flotação (Biçak et al., 2012; Ikumapayi et al., 2012; Wang e Peng, 2014).

Adicionalmente, espécies dissolvidas de chumbo podem promover a ativação indesejada da esfalerita, modificando sua resposta aos coletores sulfidrílicos e comprometendo a seletividade da separação entre galena e esfalerita (Basilio, Kartio e Yoon, 1996; Rashchi, Sui e Finch, 2002; Nunes, 2022). Esses efeitos podem interferir na adsorção dos reagentes e na dispersão das partículas, alterando a recuperação e a qualidade dos concentrados (Silvestre et al., 2009; Muzenda, 2010; Carvalho, 2018). Por essa razão, o controle da água recirculada deve considerar parâmetros como pH, potencial eletroquímico (Eh), condutividade elétrica e concentração de íons dissolvidos, especialmente cálcio, magnésio, chumbo e zinco (Levay, Smart e Skinner, 2001; Liu et al., 2013; Wang e Peng, 2014; Nunes, 2022).

O aproveitamento dos rejeitos também pode integrar a avaliação do desempenho dos circuitos de beneficiamento, contribuindo para a redução do volume de materiais destinados à disposição final e para a valorização de subprodutos minerais (Wills e Finch, 2016; Nunes, 2022). Em Morro Agudo, a fração carbonática presente no rejeito foi investigada como matéria-prima potencial para a produção de pó de calcário agrícola (PCA), possibilitando avaliar o aproveitamento de

parte do material gerado no beneficiamento como corretivo de acidez do solo. Nunes (2022) estudou o reaproveitamento do rejeito da flotação de minérios sulfetados de chumbo e zinco nessa aplicação, relacionando a recuperação dos minerais de interesse às características químicas e à qualidade do material residual. Essa avaliação deve considerar não apenas os teores remanescentes de Pb e Zn, mas também a composição dos componentes carbonáticos e a concentração de elementos potencialmente tóxicos (Nunes, 2022).

Dessa forma, a recuperação seletiva dos minerais de interesse deve ser analisada conjuntamente com os requisitos de qualidade do material obtido a partir do rejeito (Nunes, 2022). Sua caracterização deve considerar parâmetros como os teores de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), o poder de neutralização (PN), a reatividade das partículas (RE), o poder relativo de neutralização total (PRNT), a distribuição granulométrica e os teores de contaminantes. O controle da concentração de metais potencialmente tóxicos é necessário para avaliar a segurança e a adequação do material ao uso agrícola, observando-se os limites e as especificações estabelecidos pela regulamentação do Ministério da Agricultura e Pecuária (Brasil, 2006a, 2006b, 2013). A utilização do rejeito como coproduto representa, portanto, uma alternativa de valorização dos materiais gerados no beneficiamento, mas não dispensa a caracterização química, a avaliação da viabilidade agronômica, o controle ambiental e o atendimento aos requisitos de registro e comercialização aplicáveis (Nunes, 2022).

3. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa e caráter exploratório, desenvolvida com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros operacionais dos circuitos de moagem, classificação e flotação no beneficiamento de minérios de chumbo e zinco. A pesquisa foi fundamentada na consulta a artigos científicos, livros técnicos, dissertações, teses, monografias e trabalhos publicados em eventos técnico-científicos.

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio de consultas ao Google Acadêmico, à plataforma SciELO e ao Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Também foram consultados repositórios institucionais de universidades, especialmente da Universidade de São Paulo (USP), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Complementarmente, foram examinadas as listas de referências bibliográficas das publicações selecionadas, possibilitando a identificação de outros trabalhos relacionados ao tema.

A pesquisa não estabeleceu um limite temporal para a seleção das publicações, permitindo a inclusão de estudos clássicos e recentes, desde que apresentassem relevância científica ou contribuição técnica para os objetivos do trabalho. Essa abordagem possibilitou reunir fundamentos teóricos sobre os processos de cominuição e concentração mineral, bem como resultados experimentais e aplicações industriais desenvolvidos em diferentes períodos.

A estratégia de busca foi orientada por termos relacionados ao beneficiamento de minérios de chumbo e zinco, incluindo moagem, classificação, flotação, galena, esfalerita, granulometria, P_{80}, carga circulante, liberação mineral, recuperação metalúrgica e reagentes

de flotação, considerando também suas correspondentes denominações em inglês. Foram contemplados estudos relacionados aos depósitos de Morro Agudo e Vazante, além de publicações sobre outros depósitos utilizados como referência para a compreensão dos processos de beneficiamento.

A seleção das publicações considerou sua relação com o objetivo da pesquisa, priorizando estudos que apresentassem informações sobre características mineralógicas e texturais dos minérios, parâmetros operacionais dos circuitos, condições de moagem e classificação, grau de liberação, consumo energético e desempenho da flotação. Também foram considerados trabalhos que apresentassem resultados de teor dos concentrados, recuperação metalúrgica, seletividade dos reagentes e influência da qualidade da água de processo.

As informações obtidas foram organizadas de acordo com os principais temas abordados no trabalho e analisadas qualitativamente, considerando as características dos minérios estudados, a escala dos ensaios e as condições operacionais utilizadas. A comparação entre as publicações buscou identificar relações entre a distribuição granulométrica, a liberação mineral, a eficiência da classificação e o desempenho metalúrgico, respeitando as diferenças mineralógicas e tecnológicas entre os depósitos analisados.

Ressalta-se que o trabalho não foi desenvolvido segundo um protocolo de revisão sistemática, não envolvendo procedimentos padronizados de triagem quantitativa ou avaliação estatística das publicações. Trata-se, portanto, de uma revisão bibliográfica qualitativa e exploratória, baseada na seleção e interpretação de

estudos considerados relevantes para a compreensão integrada das operações de moagem, classificação e flotação de minérios de chumbo e zinco.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desempenho dos circuitos de moagem e flotação de minérios de chumbo e zinco depende da relação entre granulometria, grau de liberação, textura mineralógica e condições de concentração. A literatura indica que a redução do tamanho das partículas pode favorecer a recuperação dos sulfetos, mas não assegura melhores resultados em todas as condições. A geração de finos, o consumo energético e as diferenças mineralógicas entre depósitos limitam a definição de uma granulometria ótima universal. Os estudos de Bechir (2019), Lara (2022) e Fosu et al. (2015) permitem discutir essas limitações a partir de abordagens industriais, granuloquímicas e mineralógicas.

A moagem insuficiente pode manter partículas de galena e esfalerita associadas à ganga, reduzindo sua recuperação ou comprometendo a qualidade dos concentrados. Entretanto, a moagem excessiva amplia a proporção de ultrafinos, aumenta o consumo de energia e pode prejudicar a seletividade da flotação. Esse equilíbrio exige avaliar a distribuição granulométrica completa, e não somente o P80, pois produtos com valores semelhantes desse indicador podem apresentar proporções diferentes de partículas mistas e ultrafinas (Luz; Sampaio; França, 2010; Wills; Finch, 2016).

Lara (2022) identificou partículas de esfalerita parcialmente liberadas na alimentação da flotação de Morro Agudo, mesmo com P80 próximo de 90 µm. O estudo registrou recuperação global de 87,4%,

demonstrando que um resultado metalúrgico satisfatório pode coexistir com perdas concentradas em determinadas classes granulométricas. Essa observação limita o uso da recuperação global como único indicador de desempenho e reforça a necessidade de relacionar os teores dos rejeitos ao tamanho e à liberação das partículas. Entretanto, a presença de partículas mistas não justifica, isoladamente, reduzir a granulometria de toda a alimentação, pois isso pode aumentar a geração de lamas e o gasto energético.

A análise por classes granulométricas realizada por Lara (2022) também identificou diferenças na recuperação de zinco em função do tamanho das partículas. Na fração superior a 106 µm (+106 µm), a recuperação foi de 71,7%, enquanto a recuperação global do circuito alcançou 87,4%. O estudo relacionou o desempenho inferior da fração grossa às limitações das colunas de flotação presentes no circuito industrial. Os resultados indicam que a recuperação global não representa necessariamente o comportamento de todas as classes granulométricas e que partículas grossas podem constituir uma parcela relevante das perdas metálicas, mesmo quando a recuperação global é elevada. O trabalho também avaliou a inclusão de um novo estágio de limpeza, com potencial de elevar a recuperação global em aproximadamente 2,71% e melhorar a recuperação da fração superior a 106 µm em 12,58%, em relação à configuração estudada (Lara, 2022).

Esses resultados são específicos da configuração industrial investigada e não permitem estabelecer uma limitação generalizada das colunas de flotação para o tratamento de sulfetos. A seleção entre células mecânicas e colunas deve considerar a distribuição granulométrica, a estabilidade do agregado partícula-bolha, o grau de liberação e a função de cada estágio no circuito. Para minérios

com perdas concentradas na fração grossa, a avaliação de células mecânicas ou de estágios adicionais de limpeza constitui uma alternativa operacional a ser investigada por ensaios específicos.

Fosu et al. (2015) aprofundam essa discussão ao demonstrar que partículas compostas de esfalerita com graus semelhantes de liberação podem apresentar respostas diferentes à flotação. Os autores associaram esse comportamento à textura de intercrescimento e à exposição superficial do mineral útil. Enquanto Lara (2022) evidencia a permanência de partículas parcialmente liberadas em um circuito específico, Fosu et al. (2015) mostram que a própria medida de liberação pode ser insuficiente para prever a flotabilidade. A comparação indica que o diagnóstico das perdas deve incluir a geometria das associações minerais e a superfície de esfalerita disponível para interação com os reagentes, especialmente nas frações grosseiras.

Esses resultados também orientam a avaliação da remoagem seletiva. Se as perdas estiverem concentradas em correntes com partículas mistas, a redução granulométrica deste material pode ser mais eficiente do que aumentar a intensidade de moagem de toda a alimentação. Contudo, o benefício dessa alternativa depende da massa submetida à remoagem, da liberação adicional alcançada, da recuperação obtida e do consumo específico de energia. Lara (2022) fornece elementos para investigar essa estratégia em Morro Agudo, enquanto Fosu et al. (2015) indicam que a melhora de liberação precisa ser acompanhada de maior exposição superficial e resposta efetiva à flotação.

Bechir (2019) apresenta uma perspectiva industrial diferente ao investigar o minério de zinco de Vazante, predominantemente

constituído por willemita, um silicato de zinco. O autor observou aumento da liberação com a redução do tamanho das partículas, embora granulometrias mais finas também tenham provocado diminuição do teor do concentrado em determinadas condições. O estudo apontou desempenho favorável com aproximadamente 12% do material retido em 0,150 mm, considerando conjuntamente teor e recuperação. O resultado confirma que a moagem deve ser avaliada por seus efeitos metalúrgicos, e não apenas pela redução granulométrica.

Na operação industrial de Vazante, Bechir (2019) registrou redução da fração retida em 0,150 mm, de aproximadamente 15% a 18% para 10% a 12%, acompanhada de aumento de aproximadamente 2% na recuperação de zinco. Entretanto, o mesmo período envolveu melhorias na classificação, no controle dos moinhos e na automação do circuito. Assim, embora os resultados indiquem associação entre as alterações operacionais e o ganho metalúrgico, não permitem atribuí-lo exclusivamente à moagem mais fina. Essa limitação é relevante porque estudos industriais frequentemente avaliam intervenções simultâneas, dificultando a identificação do efeito individual de cada parâmetro.

A comparação entre Bechir (2019) e Lara (2022) exige ainda distinguir a natureza dos minerais estudados. Em Vazante, o zinco ocorre predominantemente na willemita, enquanto em Morro Agudo está associado principalmente à esfalerita. As diferenças de composição e propriedades superficiais afetam a química da flotação e impedem a transferência direta das condições de reagentes entre os depósitos. Portanto, os resultados de Vazante são úteis para discutir a relação entre granulometria, liberação e recuperação, mas não comprovam que a mesma faixa de tamanho

produzirá desempenho equivalente em um circuito de flotação de sulfetos.

Além da granulometria produzida pelo moinho, a classificação influencia a quantidade de partículas adequadamente liberadas que alcança a flotação. Nos circuitos fechados, alterações na pressão de alimentação, na porcentagem de sólidos e nas condições dos hidrociclones modificam a distribuição das partículas entre o overflow e o underflow. Uma classificação inadequada pode encaminhar partículas grossas à concentração e devolver partículas finas ao moinho, favorecendo a sobremoagem. Por isso, o P80 e a carga circulante devem ser interpretados juntamente com as curvas granulométricas, as vazões e a eficiência de separação do classificador (Luz; Sampaio; França, 2010; Sampaio; França; Braga, 2007).

Essa análise permite diferenciar perdas que exigem intervenções distintas. A presença de sulfetos grossos e pouco liberados no rejeito pode indicar problemas de moagem ou classificação. Por outro lado, quando as perdas ocorrem em partículas já liberadas, a investigação deve priorizar a hidrodinâmica das células, o tempo de residência e as condições químicas da flotação. Nas frações ultrafinas, também devem ser considerados o recobrimento superficial por lamas e o arraste de ganga. O diagnóstico, portanto, depende da combinação entre balanços de massa e metal, análise granulométrica e caracterização mineralógica dos produtos (Fosu et al., 2015; Lara, 2022).

A influência das características do minério sobre a cominuição também aparece no trabalho de Figueiredo et al. (2022), que determinaram índice de trabalho de 23,45 kWh/t e massa específica

de 3,71 g/cm³ para o minério do Extremo Norte, além de identificarem concentração dos elementos de interesse em frações inferiores a 38 µm.

Esses dados contribuem para o planejamento da moagem, mas não permitem prever diretamente a recuperação na flotação. O índice de trabalho caracteriza a resistência à fragmentação, enquanto a distribuição dos metais por tamanho informa onde eles se encontram. Para estabelecer a relação com a recuperação, seriam necessários ensaios de flotação por classe granulométrica e avaliação do grau de liberação.

A interpretação desses resultados deve considerar a variabilidade geológica. Aldis et al. (2022) apresentam evidências mineralógicas e geoquímicas da formação da mineralização sulfetada de Morro Agudo, incluindo processos de circulação e mistura de fluidos. As diferenças texturais decorrentes da formação do depósito podem influenciar a fragmentação e a exposição dos minerais durante a moagem. Entretanto, essa relação constitui uma interpretação geometalúrgica, pois o estudo não quantifica diretamente os efeitos de parâmetros operacionais sobre a recuperação. A comparação com Lara (2022) sugere a necessidade de investigar diferentes domínios mineralógicos de Morro Agudo, relacionando textura, liberação e desempenho metalúrgico, sem presumir comportamento uniforme para toda a jazida.

Na flotação diferencial, a qualidade dos concentrados depende da recuperação seletiva de galena e esfalerita. A galena geralmente é concentrada primeiro, enquanto a recuperação posterior da esfalerita pode exigir ativação química. Nesse processo, pH, coletores, depressores, dispersantes e condições de

condicionamento atuam de forma interdependente. O aumento da recuperação de um mineral pode ser acompanhado de maior contaminação do concentrado por outras espécies, tornando necessário avaliar simultaneamente teor, recuperação e seletividade (Bulatovic, 2007; Luz; Sampaio; França, 2010).

Carvalho (2018) investigou diferentes combinações de coletores e depressores aplicados ao minério sulfetado de Morro Agudo. No melhor ensaio em circuito fechado de laboratório, foram obtidos concentrado de chumbo com teor de 46,0% de Pb e recuperação de 76,0%, além de concentrado de zinco com teor de 46,5% de Zn e recuperação de 87,2%. Embora esses resultados demonstrem a viabilidade de avaliar simultaneamente a seletividade dos dois concentrados, sua interpretação exige considerar a representação das correntes de retorno e os procedimentos experimentais, não permitindo inferir diretamente o comportamento de um circuito industrial em regime permanente. A comparação com resultados de escala mini-piloto e de operação contínua deve, portanto, ponderar as diferenças de escala, a composição das alimentações e a configuração das etapas de limpeza (Carvalho, 2018; Nunes, 2022).

Pignaton et al. (2007) também abordaram a otimização da flotação de chumbo e zinco em Morro Agudo, mas em contexto industrial. A comparação com Carvalho (2018) é relevante porque aproxima duas escalas de investigação do mesmo distrito mineral. Os ensaios laboratoriais permitem avaliar combinações de reagentes sob maior controle das variáveis, enquanto a operação industrial incorpora variações de alimentação, recirculações e restrições de capacidade. Embora ambos os trabalhos contribuam para o ajuste da seletividade, seus resultados não devem ser comparados apenas por

valores de teor e recuperação, sem considerar as diferenças de escala, configuração do circuito e condições de alimentação.

Foroutan et al. (2021) acrescentam a influência do pH e do tipo de coletor à discussão, demonstrando que diferentes combinações dessas variáveis modificam a flotação de galena e esfalerita. Enquanto Carvalho (2018) apresenta resultados para combinações de reagentes aplicadas ao minério de Morro Agudo, Foroutan et al. (2021) reforçam que a resposta depende da condição química da polpa. Os trabalhos convergem quanto à necessidade de ajustar o regime de reagentes à mineralogia e ao objetivo de cada etapa, mas não fornecem uma condição universal de pH ou dosagem. A comparação também indica que resultados obtidos com diferentes coletores não devem ser interpretados sem considerar as condições químicas em que foram produzidos.

Silvestre et al. (2009) ampliam essa análise ao investigar o efeito de dispersantes na flotação de minério sulfetado de chumbo e zinco. Os autores observaram que determinadas condições favoreceram a recuperação de chumbo, mas também aumentaram a presença de zinco no concentrado de galena. Esse resultado complementa os trabalhos de Carvalho (2018) e Foroutan et al. (2021), pois evidencia que uma melhora na recuperação de Pb pode representar perda de seletividade. Assim, a avaliação dos reagentes precisa considerar a distribuição de ambos os metais entre concentrados e rejeitos. A recuperação isolada de chumbo não é suficiente para demonstrar melhoria do circuito quando ocorre aumento da contaminação por zinco.

A comparação dos estudos de Carvalho (2018), Pignaton et al. (2007), Foroutan et al. (2021) e Silvestre et al. (2009) demonstra que a

seletividade resulta da interação entre mineralogia, química superficial e condições operacionais. Entretanto, os trabalhos apresentam diferenças de escala, objetivos e desenhos experimentais, o que limita comparações numéricas diretas. Também não permitem separar, de maneira uniforme, os efeitos individuais de pH, tipo de coletor, dosagem de depressor, dispersão e granulometria. Para avançar nessa análise, são necessários ensaios controlados que mantenham constantes as demais variáveis e avaliem as interações entre condições de moagem e reagentes.

Os trabalhos sobre moagem e flotação também revelam uma limitação metodológica comum. Bechir (2019) apresenta resultados industriais associados a intervenções simultâneas; Lara (2022) identifica perdas relacionadas à distribuição granuloquímica e à liberação; Fosu et al. (2015) demonstra a influência das características texturais das partículas; e Carvalho (2018) avalia combinações de reagentes em condições laboratoriais. Essas abordagens são complementares, mas não permitem determinar isoladamente uma relação quantitativa universal entre P_{80}, grau de liberação, dosagem de reagentes e recuperação de zinco ou chumbo. A principal convergência está na necessidade de caracterizar a alimentação e interpretar os resultados a partir das condições específicas de cada circuito.

A Tabela 2 sintetiza estudos de caracterização, moagem, classificação e flotação realizados em diferentes minérios e escalas. São apresentados resultados de ensaios laboratoriais e piloto, dados de operação industrial e informações de caracterização mineralógica. Por envolverem mineralogias e condições distintas, os valores devem ser interpretados no contexto de cada estudo, não como uma comparação direta de desempenho entre as operações.

Tabela 2. Síntese comparativa dos parâmetros operacionais de moagem e flotação nos estudos selecionados.

Referência	Minério / escala	Granulometria / moagem	Reagentes / condições	Resultados principais
Fosu et al. (2015)	Partículas compostas de esfalerita / bancada	P80 de 390 µm; partículas entre 75 e 600 µm	SIPX: 75 g/t	Recuperação de Zn de 77%; a textura de intercrescimento influenciou a flotabilidade.
Silvestre et al. (2009)	Minério sulfetado Pb-Zn / bancada	Produto de moagem dos ensaios	Dispersantes: nove produtos e seis combinações	Algumas condições elevaram a recuperação de Pb, mas aumentaram a presença de Zn no concentrado de Pb; 3223 e hexametafosfato favoreceram a flotação de Zn.
Nunes (2012)	Morro Agudo / industrial	Produto nominal: 75% passante em 44 µm	N/A (estudo de moagem e classificação)	Capacidade combinada informada de 145 t/h; carga circulante de cerca de 400%; ocorrência de by-pass de partículas grossas no overflow.

Siqueira (2013)	Vazante / bancada	Liberação dos sulfetos próxima de 16 µm	Flotação bulk e remoagem do concentrado de sulfetos	Avaliação da separação prévia dos sulfetos em minério predominantemente silicatado.
Carvalho (2018)	Morro Agudo / bancada (LCT)	Produto de moinho de bolas; malha não especificada nesta síntese	Combinações de coletores e depressores	Pb: teor 46,0% e recuperação 76,0%; Zn: teor 46,5% e recuperação 87,2%.
Bechir et al. (2016)	Vazante / bancada e piloto	Ensaios com 24%, 18%, 12%, 6% e 1% retido em 0,150 mm	Condições de flotação de willemita	6% retido: teor de Zn 38,27% e recuperação 80,33%; 1% retido elevou a recuperação a 84,29%, mas reduziu o teor a 34,50%.
Bechir (2019)	Vazante / bancada e industrial	Melhor condição experimental: 12% retido em 0,150 mm; usina passou de 15–18% para 10–12%	N/A (foco em moagem, liberação e flotação de willemita)	A mudança industrial foi associada a aumento aproximado de 2% na recuperação de Zn.
Foroutan et al. (2021)	Gushfil, Irã / bancada	Granulometria de ensaio; P80 não informado nesta síntese	Pb: pH 8 / Aero 3418; Zn: pH 6 / Aero 3477	No concentrado de Zn: teor de 42,9% e recuperação de 76,7%.

Lara (2022)	Morro Agudo / industrial	P80 próximo de 90 µm; classe grosseira +106 µm	Condições industriais; avaliação de estágio adicional de limpeza	Zn: recuperação global 87,4%; fração +106 µm: 71,7%. Ganhos potenciais estimados: 2,71% global e 12,58% na fração grosseira.
Figueiredo et al. (2022)	Extremo Norte / caracterização de minério predominantemente oxidado	Fração inferior a 38 µm: 39,96% da massa	N/A (caracterização; não é ensaio de flotação)	Wi: 23,45 kWh/t; massa específica: 3,71 g/cm³; nessa fração: 38,57% do Zn, 44,74% do Pb e 39,32% da Ag.

Rec.: recuperação metalúrgica; P_{80}: abertura pela qual passam 80% das partículas; Wi: índice de trabalho de Bond; SIPX: isopropil xantato de sódio; LCT: ensaio em ciclo fechado (locked-cycle test); N/A: não aplicável ou não informado. Os estudos envolvem minérios e escalas diferentes, portanto seus resultados não são diretamente comparáveis. Em Lara (2022), os ganhos de 2,71% e 12,58% são potenciais estimados para a configuração proposta. Em Figueiredo et al. (2022), os valores apresentados são de caracterização mineralógica e granulométrica, não de recuperação por flotação.

A associação entre os minerais de interesse e os minerais de ganga possui relação direta com a necessidade de liberação das partículas. Quando a esfalerita ou a galena estão associadas a outros minerais, a redução do tamanho das partículas pode ser necessária para expor as superfícies dos minerais de interesse e permitir sua posterior

separação. Essa relação pode ser observada no minério de zinco estudado por Siqueira (2013), no qual o tamanho de liberação dos minerais sulfetados de zinco e chumbo foi determinado em torno de 16 µm. A autora destaca que a necessidade de atingir essa condição de liberação precisa ser considerada juntamente com a granulometria utilizada nas etapas posteriores do processamento.

Embora a redução granulométrica seja necessária para promover a liberação, uma moagem excessivamente fina não necessariamente melhora o beneficiamento. A geração excessiva de partículas finas pode prejudicar as etapas posteriores de concentração. Siqueira (2013) observou justamente essa questão ao estudar a recuperação de sulfetos em minério de zinco predominantemente silicatado. O trabalho destaca a necessidade de separar os minerais sulfetados antes da flotação do zinco silicatado, para evitar a geração de concentrados de baixa qualidade. Portanto, percebe-se a influência conjunta dos parâmetros de moagem e flotação sobre a eficiência do circuito, indicando que a avaliação isolada de cada operação limita a compreensão do comportamento global do beneficiamento mineral.

Para integrar esses resultados à operação, recomenda-se acompanhar, na moagem, potência consumida, taxa de alimentação, carga circulante, porcentagem de sólidos e distribuição granulométrica. Na classificação, devem ser avaliadas as condições dos hidrociclones e a composição de suas correntes. Na flotação, é necessário registrar pH, dosagens de reagentes, teores e recuperações dos concentrados e perdas por classe granulométrica. O fechamento dos balanços de massa e metal é indispensável para verificar a consistência das informações e distinguir mudanças reais

de desempenho de possíveis erros de amostragem (Sampaio; França; Braga, 2007; Lara, 2022).

A decisão operacional deve partir das características das perdas observadas. Quando o rejeito contém partículas grossas com sulfetos pouco liberados, devem ser investigadas a intensidade de moagem e a classificação. Se as perdas predominam em partículas finas e liberadas, o diagnóstico deve considerar cinética, hidrodinâmica e química superficial. Já a presença excessiva de zinco no concentrado de chumbo exige examinar o regime de depressão, a seletividade dos coletores e possíveis mecanismos de arraste. Essas relações representam hipóteses técnicas que precisam ser confirmadas por amostragens representativas e ensaios específicos (Carvalho, 2018; Fosu et al., 2015; Lara, 2022).

A avaliação de alternativas também deve incluir o consumo energético e os custos dos reagentes. Uma moagem mais fina pode elevar a recuperação, mas aumentar a produção de lamas e o desgaste dos corpos moedores. Da mesma forma, maior dosagem de coletor pode melhorar a recuperação de determinado mineral e comprometer a seletividade. Portanto, ganhos metalúrgicos precisam ser confrontados com a qualidade comercial dos concentrados e os custos necessários para obtê-los. Sem dados econômicos comparáveis, os estudos permitem identificar tendências e critérios de decisão, mas não estabelecer uma condição ótima universal (Luz; Sampaio; França, 2010; Bulatovic, 2007).

A principal contribuição conjunta da literatura está em demonstrar que a otimização da moagem depende da resposta da flotação, enquanto o ajuste dos reagentes depende das características

mineralógicas e granulométricas do material alimentado. As evidências de Bechir (2019), Lara (2022), Fosu et al. (2015) e Carvalho (2018) mostram que granulometria, liberação, exposição superficial e seletividade devem ser avaliadas de maneira integrada. Contudo, a diversidade de minérios e métodos limita a transferência direta dos resultados. Estudos futuros devem priorizar experimentos que relacionem simultaneamente granulometria, textura mineralógica, regime de reagentes, recuperação por classe de tamanho e consumo energético, permitindo identificar com maior precisão os fatores responsáveis pelas perdas e pelos ganhos metalúrgicos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A otimização dos circuitos requer o equilíbrio entre liberação mineral, recuperação metalúrgica, consumo energético e qualidade dos concentrados produzidos. O controle das condições operacionais constitui uma ferramenta essencial para aumentar a estabilidade dos processos e reduzir perdas de minerais de interesse durante o beneficiamento. No circuito de moagem e classificação, destacam-se como variáveis operacionais críticas a taxa de alimentação, a fração mássica de sólidos na polpa, o grau de enchimento do moinho, o perfil de distribuição de corpos moedores, a velocidade de rotação e a pressão de operação na bateria de hidrociclones. Na flotação, o controle operacional atua sobre o pH, o potencial eletroquímico da polpa (*Eh*), a dosagem e o ponto de adição de reagentes, a taxa de aeração, a altura da camada de espuma e o tempo de residência, os quais determinam as variáveis de resposta do circuito: teores de concentrado e rejeito, seletividade e recuperação metalúrgica.

Conclui-se que a otimização de circuitos de processamento de chumbo e zinco exige a subordinação dos parâmetros de moagem e classificação aos limites de seletividade da flotação diferencial. O dimensionamento operacional deve fundamentar-se na determinação da liberação mineral e da partição metalúrgica por classe granulométrica, integrando o controle da carga circulante e da eficiência de hidrociclonagem ao ajuste fino de depressores, ativadores e coletores frente às variações texturais e mineralógicas da alimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGORHOM, E. A.; SKINNER, W.; ZANIN, M. Diethylenetriamine depression of Cu-activated pyrite hydrophobised by xanthate. *Minerals Engineering*, v. 57, p. 36–42, 2014. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.12.010.

ALDIS, C. *et al.* Proterozoic carbonate-hosted Morro Agudo sulfide Pb-Zn district, Brazil: Mineralogical and geochemical evidence of fluid mixing during the ore stage. **Ore Geology Reviews,** v. 141, p. 104592, 2022.

ALEXANDRINO, J. S. *et al.* Eletroquímica de flotação de minerais de sulfetos de chumbo e zinco. REM: **Revista Escola de Minas,** Ouro Preto, v. 62, n. 4, p. 533–538, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0370-44672009000400018.

ANDRADE, V. L. L.; SANTOS, N. A.; GONÇALVES, K. L. C. Ensaios de flotação em ciclo fechado. *In*: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA, S. L. M. (ed.). **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

ASARE-ASHER, S. **Depression of copper activated pyrite in complex massive sulphide flotation using diethylenetriamine (DETA).** 2019. Tese (Doutorado) – University of South Australia, Adelaide, 2019.

AYUSO, R. A. *et al.* Geochemistry of organic-rich black shale and chert of the Kuna Formation, Red Dog district, Alaska. **Economic Geology,** v. 99, n. 7, p. 1533–1554, 2004.

AZEVEDO, A.; OLIVEIRA, H.; RUBIO, J. Reúso de água no processamento mineral. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (ed.). **Tratamento de minérios.** 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

BALTAR, C. A. M. **Flotação no tratamento de minérios.** 2. ed. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2010. 232 p.

BASILIO, C. I.; KARTIO, I. J.; YOON, R.-H. Lead activation of sphalerite during galena flotation. **Minerals Engineering,** v. 9, n. 8, p. 869–879, 1996.

BECHIR, J. L. C. Avaliação do impacto da granulometria e da liberação na flotação do minério de zinco da mina de Vazante. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. DOI: https://doi.org/10.11606/D.3.2019.tde-26112019-084552.

BECHIR, J. L. C. et al. Determination of ideal grinding product size for zinc flotation in Vazante unit – Votorantim Metais. In: 24th WORLD MINING CONGRESS, 2016, Rio de Janeiro. *Proceedings: Mineral Processing*. Rio de Janeiro: IBRAM, 2016. p. 99–105.

BECHIR, J. L. C. et al. Estudo de elevação da capacidade do circuito de moagem W da Usina de Vazante da Votorantim Metais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 27., 2017, Belém. *Anais [...]*. Belém: UFPA, 2017. p. 1–8.

BERGERMAN, M. G. *et al.* Redução do consumo de energia de circuitos de moagem com a utilização de pré-concentração de minerais sulfetados. **HOLOS,** v. 3, p. 176–183, 2014.

BIÇAK, B.; EKMEKÇI, Z.; BRADSHAW, D. J.; HARRIS, P. J. Adsorption of guar gum and CMC on pyrite. **Minerals Engineering,** v. 20, n. 10, p. 996–1002, 2007.

BIÇAK, Ö.; EKMEKÇI, Z.; CAN, M.; ÖZTÜRK, Y. The effect of water chemistry on froth stability and surface chemistry of the flotation of a Cu–Zn sulfide ore. International Journal of Mineral Processing, v. 102–103, p. 32–37, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.09.005

BLAIKIE, T. N.; KUNZMANN, M. Geophysical interpretation and tectonic synthesis of the Proterozoic southern McArthur Basin, northern Australia. **Precambrian Research,** v. 343, 105728, 2020. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105728.

BOULTON, A.; FORNASIERO, D.; RALSTON, J. Effect of iron content in sphalerite on flotation. **Minerals Engineering,** v. 18, n. 11, p. 1120–1122, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 53, de 23 de outubro de 2013 (alterada pela IN nº 14, de 2014). Dispõe sobre o registro de estabelecimentos e de

produtos fertilizantes e corretivos. **Diário Oficial da União,** Brasília, DF, 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 27, de 5 de junho de 2006, alterada pela Instrução Normativa SDA nº 7, de 12 de abril de 2016. Estabelece limites de concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos e metais pesados tóxicos em fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília, DF, 2016b.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 35, de 4 de julho de 2006. Aprova as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, corretivos de alcalinidade, corretivos de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário Oficial da União,** Brasília, DF, 12 jul. 2006a.

BULATOVIC, S. M. **Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Volume 1: Flotation of Sulfide Ores.** Amsterdam: Elsevier, 2007.

BULATOVIC, S. M. Use of organic polymers in the flotation of polymetallic, complex sulfide ores. **Minerals Engineering,** v. 12, n. 4, p. 341–354, 1999.

CABRAL, S. A. Desenvolvimento de um processo de beneficiamento para o minério sulfetado de chumbo e zinco da Cia. Brasileira do Cobre (CBC), RS. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

CARVALHO, N. L. N. de. **Avaliação de coletores e depressores na flotação do minério sulfetado de chumbo e zinco de Morro Agudo.** 2018. 70 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CHANDRA, A. P.; GERSON, A. R. A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite. **Advances in Colloid and Interface Science,** v. 145, n. 1–2, p. 97–110, 2009.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem.** 3. ed. São Paulo: Signus Editora, 2003.

CORDEIRO, P. F. O. *et al.* The carbonate-hosted MVT Morro Agudo Zn-Pb deposit, central Brazil. **Ore Geology Reviews,** v. 101, p. 437–452, 2018.

CORREIA, J. C. G.; COUTO, H. J. B. Classificação e peneiramento. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (org.). Tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap. 5, p. 225–272.

CREUS, P. K. et al. The Dugald River-type, shear zone hosted, Zn-Pb-Ag mineralisation, Mount Isa Inlier, Australia. **Ore Geology Reviews,** v. 155, 105369, 2023. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105369.

CUNHA, I. A. *et al.* Lead isotope constraints on the genesis of Pb-Zn deposits in the Neoproterozoic Vazante Group, Minas Gerais, Brazil. **Gondwana Research,** v. 11, n. 3, p. 382–395, 2007.

CUNHA, L. A.; COELHO, C. E. S.; MISI, A. Fluid inclusion study of the Morro Agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências,** v. 30, n. 2, p. 318–321, 2000.

DARDENNE, M. A.; FREITAS-SILVA, F. H. Pb-Zn ore deposits of the Bambuí and Vazante Groups, in São Francisco and Brasília Fold Belt. *In*: DA GLÓRIA DA SILVA, M.; MISI, A. (ed.). **Base Metal Deposits of Brazil.** Salvador: MME/CPRM/DNPM, 1999. p. 75–83.

EL-SHALL, H.; ELGILLANI, D. A.; ABDEL-KHALEK, N. A. Role of zinc sulfate in depression of lead-activated sphalerite. **International Journal of Mineral Processing,** v. 58, n. 1–4, p. 67–75, 2000.

FIGUEIREDO, T. D.; RODRIGUES, G. H. G.; SILVA, P. H. L. da; NOGUEIRA, F. C.; PEREIRA, C. A.; RODRIGUES, K. F. Caracterização do minério de zinco, chumbo e prata da Mina do Extremo Norte. HOLOS, v. 38, n. 4, e11276, 2022. DOI: https://doi.org/10.15628/holos.2022.11276

FOROUTAN, A.; ABBAS ZADEH HAJI ABADI, M.; KIANINIA, Y.; AGHAZADEH, V. Critical importance of pH and collector type on the flotation of sphalerite and galena from a low-grade lead-zinc ore. *Scientific Reports*, v. 11, art. 3103, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-82759-3.

FOSU, S. *et al.* Characterisation of coarse composite sphalerite particles with respect to flotation. **Minerals Engineering,** v. 71, p. 105–112, 2015.

GARCIA-ZÚÑIGA, H. La recuperación por flotación es una función exponencial del tiempo. **Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería,** Santiago, v. 47, p. 83–86, 1935.

IKUMAPAYI, F.; MAKITALO, M.; JOHANSSON, B.; RAO, K. H. Recycling of process water in sulphide flotation: Effect of calcium and sulphate ions on flotation of galena. **Minerals Engineering,** v. 39, p. 77–88, 2012.

LARA, A. G. **Otimização da recuperação de esfalerita na usina de Morro Agudo através do estudo da distribuição granuloquímica da flotação.** 2022. 59 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

LEACH, D. L. *et al.* Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History. **Economic Geology,** v. 105, n. 3, p. 593–625, 2010.

LEACH, D. L. *et al.* Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits: A Global Perspective. *In*: HEDENQUIST, J. W.; THOMPSON, J. F. H.; GOLDFARB, R. J.; RICHARDS, J. P. (ed.). **Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume.** Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. p. 561–607.

LEACH, D. L.; TAYLOR, R. D. Mississippi Valley-type lead-zinc deposit model. Reston: U.S. Geological Survey, 2009. (Open-File Report 2009-1213). 5 p. DOI: https://doi.org/10.3133/ofr20091213

LEVAY, G.; SMART, R. St. C.; SKINNER, W. M. The impact of water quality on flotation performance. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy,** v. 101, n. 2, p. 69–75, 2001.

LIU, Q.; LASKOWSKI, J. S. The interactions between dextrin and metal hydroxides in aqueous solutions. **Journal of Colloid and Interface Science,** v. 130, n. 1, p. 101–111, 1989.

LIU, W.; MORAN, C. J.; VINK, S. A review of the effect of water quality on flotation. **Minerals Engineering,** v. 53, p. 91–100, 2013.

LOTTER, N. O.; BRADSHAW, D. J. The formulation and use of mixed collectors in sulphide flotation. **Minerals Engineering,** v. 23, n. 11–13, p. 945–951, 2010.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (ed.). **Tratamento de minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Disponível em: https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/476/4/tratamento-de-minerios-5-edicao.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

MISI, A. *et al.* Sediment hosted lead-zinc deposits of the Neoproterozoic Bambuí Group and correlative sequences, São Francisco Craton, Brazil: A review and a possible metallogenic evolution model. **Ore Geology Reviews,** v. 26, n. 3–4, p. 263–304, 2005.

MISI, A.; IYER, S. S.; TASSINARI, C. C. G.; KYLE, J. R.; COELHO, C. E. S.; FRANÇA-ROCHA, W. J. S.; GOMES, A. S. R.; CUNHA, I. A.; CARVALHO, I. G. Geological and isotopic constraints on the metallogenic evolution of the Proterozoic sediment-hosted Pb-Zn (Ag) deposits of Brazil. **Gondwana Research,** v. 2, n. 1, p. 47–65, 1999.

MONTEIRO, L. V. S. *et al.* Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrosia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. **Ore Geology Reviews,** v. 28, n. 2, p. 201–234, 2006.

MONTEIRO, L. V. S. *et al.* Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrosia and Fagundes deposits, Minas Gerais, Brazil: Mass balance and stable isotope characteristics

of the hydrothermal alterations. **Gondwana Research,** v. 11, n. 3, p. 362–381, 2007.

MUZENDA, E. An investigation into the effect of water quality on flotation performance. International Journal of Chemical and Molecular Engineering, v. 4, n. 9, p. 562–566, 2010. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.1077880

NAYAK, A.; JENA, M. S.; MANDRE, N. R. Beneficiation of lead-zinc ores: a review. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,** v. 43, n. 5, p. 564–583, 2022.

NUNES, A. L. Modelagem e simulação do circuito de moagem da Votorantim Metais Zinco Morro Agudo. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. DOI: https://doi.org/10.11606/D.3.2012.tde-14062013-142637.

NUNES, C. C. **Caracterização e comparação na flotação de minérios sulfetados chumbo-zinco com reaproveitamento do rejeito como pó de calcário agrícola.** 2022. 157 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

OLIVO, G. *et al.* The Proterozoic Vazante Hypogene Zinc Silicate District, Minas Gerais, Brazil: A review of the ore system applied to mineral exploration. **Minerals,** v. 8, n. 1, p. 22, 2018.

PECINA-TREVIÑO, E. T.; URIBE-SALAS, A.; NAVA-ALONSO, F.; PÉREZ-GARIBAY, R. On the sodium-diisobutyl dithiophosphinate (Aerophine 3418A) interaction with activated and unactivated galena and pyrite.

International Journal of Mineral Processing, v. 71, n. 1–4, p. 201–217, 2003.

PIGNATON, T. V. *et al.* Otimização do circuito de flotação de chumbo e zinco de Morro Agudo. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 22., 2007, Ouro Preto. **Anais** [...]. Ouro Preto: ENTMME, 2007.

RAO, S. R. **Surface Chemistry of Froth Flotation.** 2. ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004.

RASHCHI, F.; SUI, C.; FINCH, J. A. Recognition of lead-activation of sphalerite by DRIFTS and XPS. **International Journal of Mineral Processing,** v. 67, n. 1–4, p. 43–58, 2002.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (ed.). **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SÃO JOSÉ, F. de. **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, 2015.

SARVARAMINI, A.; LARACHI, F.; HART, B. Collector attachment to lead-activated sphalerite – Experiments and DFT study on pH and solvent effects. **Applied Surface Science,** v. 367, p. 459–472, 2016.

SEHLOTHO, N.; SINDAI, K.; BRYSON, M.; LIND, P. Locked cycle test methodology and interpretation in polymetallic sulphide flotation. **Minerals Engineering,** v. 122, p. 112–120, 2018.

SILVESTRE, M. O. *et al.* Dispersion effect on a lead-zinc sulphide ore flotation. **Minerals Engineering,** v. 22, n. 9–10, p. 752–758, 2009.

SIQUEIRA, J. de S. **Recuperação de sulfetos em minério de zinco predominantemente silicatado.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SLACK, J. F. *et al.* Multistage hydrothermal silicification and Fe-Tl-As-Sb-Ge-Be mineralization in the Red Dog Zn-Pb-Ag district, northern Alaska. **Economic Geology,** v. 99, n. 7, p. 1481–1508, 2004.

SOTERO, M. P. *et al.* Análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região da mina de Morro Agudo, Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais. **Geologia USP. Série Científica,** v. 19, p. 195–214, 2019. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v19-144761.

TAN, X.; ZHU, Y.; SUN, C.; ZHANG, X.; SU, J. Adding cationic guar gum after collector: A novel investigation in flotation separation of galena from sphalerite. *Minerals Engineering*, v. 157, art. 106542, 2020. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106542.

VALERIANO, C. de M. *et al.* Zinco e chumbo. *In*: PEDROSA-SOARES, A. C.; VOLL, E.; CUNHA, E. C. (org.). **Recursos minerais de Minas Gerais on-line: síntese dos conhecimentos sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais.** Belo Horizonte: CODEMGE, 2018. v. 1, p. 1–18.

VALERIANO, C. M. *et al.* Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. **Geological Society, London, Special Publications,** v. 294, p. 197–210, 2008.

WANG, B.; PENG, Y. The effect of saline water on mineral flotation: A critical review. **Minerals Engineering,** v. 66–68, p. 13–24, 2014.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.** 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

---

[1] Discentes do Curso Superior de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - *Campus* Janaúba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[2] Discentes do Curso Superior de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - *Campus* Janaúba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[3] Discentes do Curso Superior de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - *Campus* Janaúba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[4] Discentes do Curso Superior de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - *Campus* Janaúba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[5] Discentes do Curso Superior de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - *Campus* Janaúba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[6] Docentes do Curso Superior de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - *Campus* Janaúba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[7] Docentes do Curso Superior de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - *Campus* Janaúba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail