

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Carolina Maia Coelho

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO TRATAMENTO
DE EFLUENTE ÁCIDO COM SULFATO DE MAGNÉSIO UTILIZANDO
METSIM[®] PARA REUSO DE ÁGUA**

Belo Horizonte

2025

Carolina Maia Coelho

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO TRATAMENTO
DE EFLUENTE ÁCIDO COM SULFATO DE MAGNÉSIO UTILIZANDO
METSIM[®] PARA REUSO DE ÁGUA**

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientadora: Profa. Dra. Sônia Denise Rocha

Belo Horizonte

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e oito dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09h:50 , a estudante Carolina Maia Coelho, matrícula 2023700773 defendeu o Trabalho intitulado "**MODELAGEM E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO TRATAMENTO DE EFLUENTE ÁCIDO COM SULFATO DE MAGNÉSIO UTILIZANDO METSIM® PARA REUSO DE ÁGUA**".

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 100

Situação: Aprovada

Orientadora: Professora Sônia Denise Ferreira Rocha

Examinadora: Professora Andreia Bicalho Henriques

Examinadora: Professora Risia Magriotis Papini



Documento assinado eletronicamente por **Sonia Denise Ferreira Rocha, Professora do Magistério Superior**, em 18/08/2025, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Bicalho Henriques, Professora do Magistério Superior**, em 15/10/2025, às 09:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Risia Magriotis Papini, Usuária Externa**, em 29/10/2025, às 21:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4440695 e o código CRC A0688AE6.

*A Deus, pela dádiva da vida, e à minha família
pelo constante incentivo, apoio e compreensão.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Dra. Sônia pelos valiosos conhecimentos compartilhados, que foram fundamentais para o meu desenvolvimento e para a realização deste trabalho.

Ao Rodrigo agradeço por todo suporte técnico e incentivo.

Aos meus pais, expresso minha profunda gratidão por todo o esforço dedicado para que eu pudesse me dedicar aos estudos e seguir em direção aos meus sonhos e objetivos.

À minha irmã Carla, à minha sobrinha Laura e ao meu cunhado David, agradeço o constante apoio e carinho.

Ao meu namorado, Luiz Fernando, meu querido companheiro, agradeço por todo o cuidado, atenção e paciência ao longo desta jornada.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original” (Albert Einstein).

RESUMO

O reuso de água de processo depende de suas características químicas. Efluentes contendo sulfatos e magnésio são comumente encontrados em processos hidrometalúrgicos. A precipitação de magnésio (Mg) a partir de soluções contendo sulfatos por meio da adição de cal virgem (CaO) produz um resíduo com alto teor de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Este trabalho apresenta um estudo das variações químicas do precipitado por meio de simulação com o uso do *software* METSIM[®] e a comparação com os resultados da caracterização de um resíduo obtido em escala de laboratório. Os resultados mostraram que no processo simulado, para uma eficiência de remoção de Mg de 65,8%, ainda tem-se um acréscimo considerável desse elemento na alimentação do circuito de neutralização. Em média, para a eficiência de remoção de Mg de projeto (94,0%), o resíduo formado seria composto de 73,3% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 19,2% $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Nos experimentos obteve-se um precipitado cristalino, composto majoritariamente por cálcio (34,4% de CaO) e magnésio (13,1% de MgO), com densidade real de 2,33 g/cm³, D₉₀ de 27,7 µm e composto pelas fases gesso, portlandita e brucita.

Palavras-chave: Hidróxido de magnésio; Precipitação; Simulação de processos; METSIM; Purificação de Soluções.

ABSTRACT

Process water reuse depends on its chemical characteristics. Effluents containing sulfates and magnesium are commonly found in hydrometallurgical processes. The precipitation of magnesium (Mg) from sulfate-containing solutions through the addition of quicklime (CaO) produces a residue with a high content of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and magnesium hydroxide ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). This work presents a study of the chemical variations of the precipitate through simulations using the METSIM[®] software and a comparison with the characterization results of a residue obtained in a laboratory-scale setup. The results showed that in the simulated process, for a magnesium removal efficiency of 65.8%, there is still a considerable increase in the amount of this element in the feed to the neutralization circuit. On average, for the design magnesium removal efficiency (94.0%), the resulting residue would be composed of 73.3% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and 19.2% $\text{Mg}(\text{OH})_2$. In the experiments, a crystalline precipitate was obtained, composed mainly of calcium (34.4% CaO) and magnesium (13.1% MgO), with a true density of 2.33 g/cm³, a D₉₀ of 27.7 μm, and consisting of the gypsum, portlandite, and brucite phases.

Keywords: Magnesium hydroxide; Precipitation; Process simulation; METSIM; Solution purification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Circuito de precipitação de Mg para adequação da composição química para reuso da água no processo industrial.....	13
Figura 2 - Remoção de magnésio em função do pH e tempo do experimento de precipitação.	15
Figura 3 – Sólidos formado no experimento de precipitação. (A) Amostra após secagem; (B) Amostra após secagem e desagregação manual em gral de ágata.	15
Figura 4 - Distribuição granulométrica do resíduo precipitado. (A) Perfil de distribuição; (B) Curva de passante acumulado.....	16
Figura 5 – Comparativo entre os resultados simulados e os obtidos experimentalmente.	18
Figura 6 – Difratoograma do sólido precipitado obtido em laboratório.....	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação da alimentação média do circuito de neutralização de Mg de acordo com diferentes eficiências de precipitação – Simulação METSIM [®]	14
Tabela 2 – Compostos formados na precipitação do Mg na etapa de neutralização segundo simulação do METSIM [®]	14
Tabela 3 - Composição química da solução utilizada no teste laboratorial de precipitação de Mg	15
Tabela 4 – Composição química do sólido precipitado	16

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVO.....	11
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
4.1 Simulação METSIM®	13
4.2 Ensaios de Precipitação.....	14
5 CONCLUSÕES.....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a atividade de mineração gera anualmente grandes quantidades de resíduos a serem dispostos, incluindo as frações de estéril e rejeitos. O primeiro é comumente disposto em pilhas e, ou, usado no aterramento de áreas lavradas, enquanto os rejeitos, que geralmente possuem alta carga metálica e reagentes, são, usualmente, destinados às barragens (SINIR, 2022). No contexto da economia circular e sustentabilidade, aplicações para os rejeitos e resíduos da mineração vêm sendo estudadas. Além de reduzir os impactos ambientais, a aplicação desses materiais em outras cadeias produtivas pode gerar receita para as empresas, convertendo passivos ambientais em fontes de lucro. Compostos de magnésio (Mg) obtidos a partir de águas de processo e de efluentes líquidos se inserem nesse contexto, associado a uma demanda crescente nas indústrias automobilística, de fertilizantes, papel e celulose, e tratamento de águas e efluentes. Adicionalmente, o magnésio é considerado uma das 30 matérias-primas críticas pela União Europeia (Tan; Choi, 2023).

A precipitação de hidróxido de magnésio de soluções contendo 12g/L foi estudada por Karidakis, Agatzini-Leonardou e Neou-Syngouna (2005) com intuito de reciclar a solução resultante para economizar água e obter um precipitado com valor de mercado para ser utilizado como carga para polímeros. No trabalho desenvolvido por Agatzini-Leonardou, Karidakis e Tsakiridis (2005), os autores propuseram a aplicação do precipitado gesso/brucita em substituição ao gesso no cimento Portland. Alternativamente ao processo de recuperação de magnésio usualmente realizado por precipitação com cal virgem ou cal hidratada, Wanderley (2018) propôs a recuperação de magnésio por cristalização do sulfato de magnésio hidratado a alta temperatura. Souza *et al.* (2021) estudou a obtenção de magnésia (MgO) a partir de solução com alta concentração de magnésio, 43g/L, via precipitação de nesqueonita ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

A modelagem e simulação de processos são ferramentas importantes no contexto industrial, seja na predição de cenários ou mesmo na otimização de processos. No setor mineral, a utilização de *softwares* visando maiores eficiências das atividades, desde a mina até a obtenção do produto final, é cada dia mais presente e contribui tanto no âmbito econômico como ambiental. Então, a utilização de técnicas de simulação de processos envolvendo a precipitação de compostos de magnésio e a caracterização dos sólidos formados a partir da neutralização de soluções concentradas constituem etapas importantes para a determinação da viabilidade técnica e econômica dos processos. A combinação do uso de *softwares* de simulação com resultados de estudos experimentais possibilita prever variações da composição das soluções bem como das características químicas do resíduo de acordo com modificações nas

variáveis e no fluxograma de processo. Experimentos, além de viabilizar a obtenção de soluções reais, fornecem informações dos sólidos gerados via caracterização física e química e oferece subsídios para avaliar a sua toxicidade e possíveis aplicações. Além disso, essa abordagem viabiliza a validação e a comparação entre as previsões realizadas e os resultados obtidos, garantindo maior precisão na análise e segurança no aproveitamento dos resíduos.

O *software* de simulação de processos METSIM[®], permite a combinação de módulos em um único modelo, tornando possível a simulação de praticamente qualquer processo do início ao fim. Utiliza do método sequencial modular, que envolve a execução do fluxograma do processo como um grupo de unidades de processo para cada uma das quais existem sub-rotinas ou módulos de cálculo. Além disso, trata-se de um *software* programada em APL (sigla para “*A programming Language*”) a qual fornece uma grande capacidade de tratamento e manipulação de dados dentro do próprio *software* (Montero, 2010). Dentre as operações unitárias, a precipitação de metais pode ser simulada por meio do fornecimento de dados reais obtidos de plantas operacionais ou piloto, de processos similares ou de estimativas fornecidas pela equipe de processos. Essa abordagem permite o desenvolvimento de projetos mais realísticos e mais precisos. As transformações físicas e químicas podem ser modeladas dentro das operações unitárias, sendo o nível de complexidade estabelecido pelo usuário (Bartlett; Holtzapple; Rempel; 2014; Qiuyue, *et al.*, 2012).

2 OBJETIVO

O presente trabalho objetivou avaliar a robustez da modelagem de uma unidade de precipitação do magnésio contido em soluções ácidas de sulfato proveniente de processo industrial, em que leite de cal é utilizado como reagente precipitante. Também visou a comparação das características do sólido gerado com aquela prevista pela simulação com o uso do *software* METSIM[®].

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho baseou-se na utilização e adequação de um modelo de projeto desenvolvido no *software* METSIM[®] de um processo típico de processamento de minérios lateríticos. O modelo integrado inclui um circuito voltado à neutralização de soluções com alta concentração de magnésio, considerando uma remoção de 94% do Mg alimentado no circuito em pH 10,2. Foram simulados e analisados cenários de eficiência de precipitação de Mg de 84,6%, 65,8% e 47,0%, que representam possíveis ineficiências do circuito ou mesmo dificuldades operacionais.

Experimento de precipitação com uma solução com composição similar à média da alimentação do circuito do modelo METSIM[®] integrado à planta industrial foi realizado, visando validar as premissas assumidas para a condição de projeto do modelo (precipitação de 94% do Mg em pH 10,2), assim como para verificar as características do precipitado previstas por simulação. Os experimentos de precipitação do hidróxido de magnésio contido em solução foram realizados com cal virgem. Utilizou-se uma solução de alimentação preparada a partir de soluções geradas em planta industrial. Dessa forma foi possível obter um ambiente químico similar ao da composição prevista pelo modelo METSIM[®] e permitir a comparação das características do sólido previsto e o real. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente de 25°C, em béquer de 3 L, e 2 L de solução foi adicionada e iniciada a agitação mecânica de 1500 RPM. Leite de cal a 22% de sólidos foi adicionado ao sistema e o pH da solução foi monitorado ao longo do tempo até atingir sua estabilização. A adição do leite de cal ocorreu de forma gradual, com um excesso de 5%, calculado para a formação dos hidróxidos e neutralização da acidez da solução. Ao final, a polpa foi filtrada a vácuo, e os sólidos secos em estufa a 105°C por 24 h. Foram determinados, por espectrofotometria de absorção atômica, as concentrações de magnésio (Mg), níquel (Ni), ferro (Fe), cobalto (Co), alumínio (Al) e manganês (Mn) na solução de alimentação, além do magnésio (Mg) nas soluções coletadas durante os experimentos.

Os sólidos foram enviados para análise química por fluorescência de raio X (FRX), análise da distribuição de tamanhos por difratometria a laser, análise de densidade real por picnometria de Gay-Lussac e identificação de fases por difratometria de raios X (DRX) em difratômetro da PANalytical, utilizando radiação CuK α e cristal monocromador de grafita.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Simulação METSIM®

O diagrama simplificado indicando as etapas do circuito de precipitação de Mg presentes no modelo usado na simulação é apresentado na Figura 1.

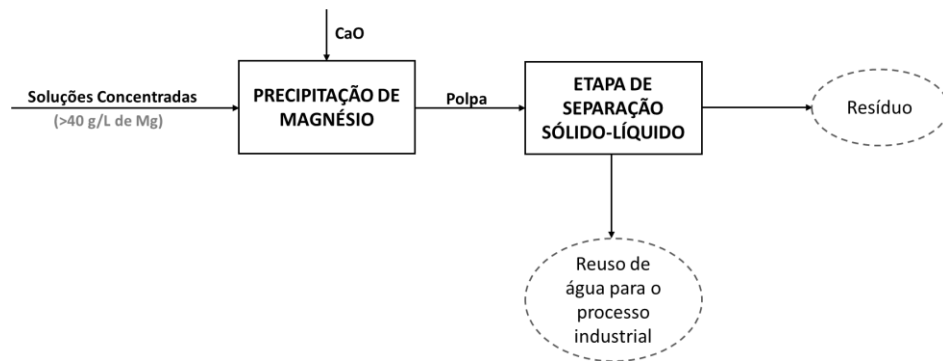


Figura 1 – Circuito de precipitação de Mg para adequação da composição química para reuso da água no processo industrial.

O circuito de neutralização compreende o reator de precipitação seguido por uma etapa de separação sólido-líquido com a geração de um resíduo rico em gesso/brucita e água reciclada que retorna ao processo industrial. O modelo de projeto, pautado em testes laboratoriais, considera que em pH 10,2 tem-se remoção de 94,0% do magnésio alimentado no circuito. Na Tabela 1 são apresentadas as concentrações médias de metais na corrente de alimentação do circuito de neutralização e a acidez livre, considerando diferentes eficiências de precipitação do Mg simuladas. Como esperado, menores eficiências de precipitação estão associadas a uma maior concentração de magnésio na corrente que alimenta o circuito de neutralização. Observa-se que para uma eficiência de 65,8% tem-se um acréscimo considerável da concentração de Mg médio alimentado no circuito de neutralização (48,9 g/L). Para essa eficiência de precipitação — que representa 70% de precipitação em relação à condição de projeto — a análise estatística por percentis indica que 5% dos resultados referentes à concentração de magnésio (Mg) alimentado no circuito estão acima de 61,2 g/L. Essa situação pode ser um indicativo de dificuldades operacionais, atribuídas às altas concentrações do Mg reciclado nas correntes do modelo integrado, sugerindo, portanto, a possível necessidade de expansão do circuito de precipitação.

Tabela 1 – Variação da alimentação média do circuito de neutralização de Mg de acordo com diferentes eficiências de precipitação – Simulação METSIM®

Eficiência de remoção de Mg (%)	Alimentação do circuito (g/L)								
	Mg	Ni	Co	Al	Fe	Mn	Zn	Cr	Acidez Livre
94,0	43,509	0,001	0,001	2,653	0,728	0,679	0,052	0,003	6,186
84,6	44,769	0,001	0,001	2,666	0,731	0,665	0,054	0,003	6,219
65,8	48,919	0,001	0,001	2,705	0,742	0,648	0,056	0,003	6,332
47,0	57,093	0,001	0,001	2,781	0,763	0,636	0,058	0,003	6,544

Para os cenários das várias eficiências também foram estudadas as modificações nas características do sólido produzido. Na Tabela 2 pode ser visto os componentes gerados e suas proporções. Observa-se que, de maneira geral, a composição do sólido formado não muda consideravelmente com a variação das eficiências de remoção de Mg. Esse comportamento está relacionado ao aumento da concentração de Mg alimentado no circuito, que mesmo sendo precipitado em menor quantidade, é alimentado em maior concentração.

Tabela 2 – Compostos formados na precipitação do Mg na etapa de neutralização segundo simulação do METSIM®

Eficiência de remoção de Mg (%)	Resíduo sólido precipitado (%)								
	Mg(OH) ₂	CaSO ₄ .2H ₂ O	Al(OH) ₃	Ni(OH) ₂	Co(OH)	Fe(OH) ₃	CaCO ₃	Mn(OH) ₂	Cr(OH) ₃
94,0	19,2405	73,2676	3,1531	0,0005	0,0002	0,9473	1,2089	0,2061	0,0036
84,6	19,0111	73,1454	3,0845	0,0005	0,0002	0,8981	1,2168	0,2139	0,0034
65,8	18,8418	72,8232	3,1477	0,0006	0,0002	0,8246	1,2192	0,2339	0,0033
47,0	18,3924	72,8586	3,3832	0,0006	0,0003	0,8267	1,2162	0,2615	0,0036

Em média, o sólido formado possui aproximadamente 73,0% de CaSO₄.2H₂O e 18,9% Mg(OH)₂. Os resultados obtidos por simulação são semelhantes aos encontrados por Karidakis, Agatzini-Leonardou e Neou-Syngouna (2005) que produziram um resíduo a 20°C com composição de 75,8% de gesso e 24,2% de hidróxido de magnésio.

4.2 Ensaio de Precipitação

A composição química da solução de alimentação é apresentada na Tabela 3. A precipitação do hidróxido de magnésio se deu pelo fornecimento de íons hidroxila pelo leite de cal, o que ocorreu de forma gradual até o alcance de pH 10. Uma precipitação máxima foi observada quando o pH atingiu 10,1, e que se manteve para pH's mais elevados, conforme ilustrado na Figura 2. A precipitação foi considerada máxima a partir do momento que se obteve

resultados abaixo do limite de quantificação estabelecido pelo laboratório de análise (25 mg de Mg/kg de solução).

A condição de 94% de remoção e de estabilização foram observadas após 108 e 113 min de teste, respectivamente. Foi observado aumento dos valores de pH até 13,05 sendo esse estabilizado. Operacionalmente, a elevação do pH até 10,1 já seria suficiente para obtenção de concentrações de Mg abaixo de 25 mg/kg na água de processo reciclada.

Tabela 3 - Composição química da solução utilizada no teste laboratorial de precipitação de Mg

Mg (g/L)	Ni (g/L)	Fe (g/L)	Co (g/L)	Al (g/L)	Mn (g/L)	Acidez Livre (g/L)	Densidade (g/cm ³)
38,322	0,110	0,008	0,136	0,014	0,625	7,110	1,185

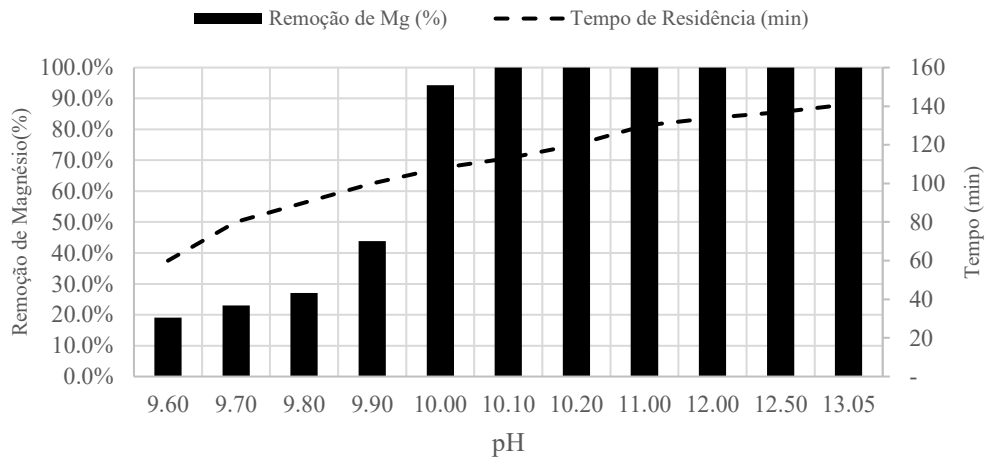


Figura 2 - Remoção de magnésio em função do pH e tempo do experimento de precipitação.

Não houve dificuldade na filtração do material precipitado formado. A amostra sólida após secagem apresentou coloração branca, como pode ser visualizado na Figura 3.

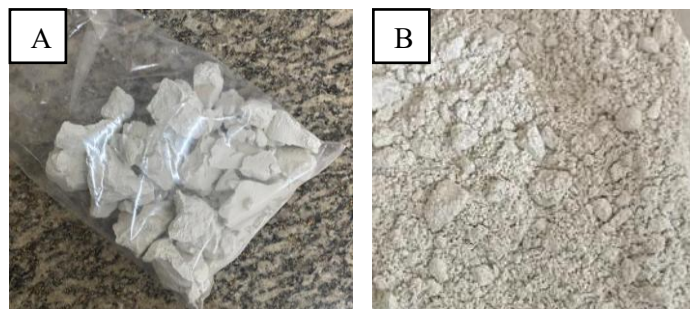


Figura 3 – Sólidos formado no experimento de precipitação. (A) Amostra após secagem; (B) Amostra após secagem e desagregação manual em gal de ágata.

A análise química do sólido precipitado, apresentada na Tabela 4, revela que o material obtido é composto majoritariamente por cálcio (34,4% de CaO), como era esperado, e contém uma quantidade significativa de magnésio (13,1% de MgO). O teor de magnésio no sólido obtido no laboratório, em Mg(OH)₂, foi de 19,0% (13,1% em MgO), valor muito próximo ao estimado pela simulação do METSIM[®], que foi de 19,2%. Essa pequena variação pode ser explicada pela diferença na concentração de magnésio na solução utilizada para os experimentos, que apresentou aproximadamente 12% menos Mg em comparação à média da concentração de magnésio na solução alimentada no circuito simulado.

Tabela 4 – Composição química do sólido precipitado

MgO (%)	CaO (%)	Ni (%)	Fe (%)	Co (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	LOI (%)
13,10	34,40	0,05	0,06	0,03	<0,10	0,15	0,07	0,72	0,03	20,94

O sólido precipitado apresentou uma densidade real de 2,33 g/cm³ e uma área superficial específica de 1,6 m²/g, obtida em análise por granulometria a laser, além de uma granulometria fina, conforme ilustrado na Figura 4. Os tamanhos característicos D₉₀, D₅₀ e D₁₀ de 27,7; 9,0 e 1,9 μm, respectivamente, indicam esse tamanho reduzido dos sólidos, o que é esperado nas operações de precipitação. O diâmetro médio das partículas foi de 16,7 μm.

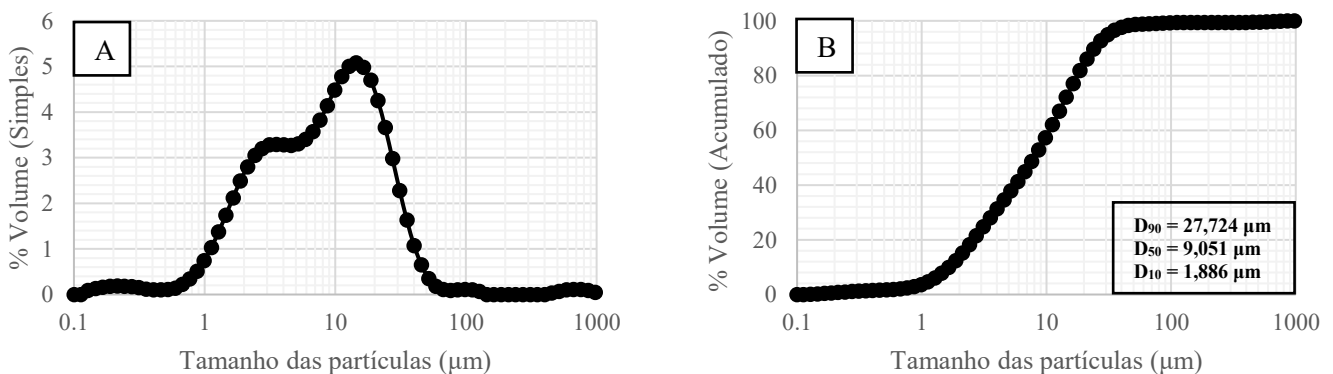


Figura 4 - Distribuição granulométrica do resíduo precipitado. (A) Perfil de distribuição; (B) Curva de passante acumulado.

No estudo de Agatzini-Leonardou, Karidakis e Tsakiridis (2005), os autores obtiveram um material com granulometria mais fina do que o precipitado deste trabalho. Os autores relataram um tamanho médio de partícula de 6,9 μm, com 100% do material abaixo de 20 μm.

As fases cristalinas quantificadas pelo refinamento de Rietveld foram gesso (sulfato de cálcio dihidratado), portlandita (Ca(OH)₂) e brucita (Mg(OH)₂), nas proporções de 60,1, 20,9 e

19,0%, respectivamente. Pelo cálculo estequiométrico, considerando a completa precipitação dos metais presentes na solução usada no experimento e a adição de aproximadamente 5,9% de excesso de cal, esperava-se a formação de aproximadamente 71,4% de gesso, 22,9% de brucita e o somatório dos demais hidróxidos e o excesso do reagente totalizando 5,7%.

Em concordância com a análise química do sólido foram quantificadas fases contendo os elementos químicos mais abundantes, cálcio e magnésio, na análise de difração de raio X. O limite de detecção da análise de DRX é de cerca de 1-2%. Portanto, pode haver a presença de fases traço, além daquelas que foram identificadas. A simulação do METSIM[®] previu, além da formação de $Mg(OH)_2$ e $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, a formação de $Al(OH)_3$, com uma proporção superior a 2%. No entanto, a amostra com alta concentração de magnésio usada para alimentação dos ensaios de precipitação para a purificação da solução e consequente geração do sólido, apresentou um desvio considerável na concentração de alumínio (0,014 g/L), se comparada à concentração média prevista para a alimentação da unidade de precipitação de Mg no METSIM[®] (2,653 g/L). Esse fato, justifica a não identificação da gibbissita ($Al(OH)_3$) como fase cristalina na análise de difração realizada para o resíduo produzido. Os demais elementos, representando pequenas quantidades da amostra e que foram detectados na análise química, não foram identificados na porção cristalina da amostra na análise de fases, por possivelmente estarem abaixo do limite de detecção da análise.

Observa-se nas fases contendo cálcio que, aproximadamente, 74% é gesso e 26% é portlandita. Assumindo que a fração contendo cálcio da amostra é cristalina, ou seja, todo o cálcio presente na amostra está contido em fases cristalinas, tem-se, considerando a quantificação da amostra por FRX (Tabela 4), que dos 34,4% de CaO, 78,4% correspondem a gesso e 11,7% à portlandita. Comparando os resultados obtidos com a simulação utilizando o *software* METSIM[®], obteve-se valor médio de $Ca_2SO_4 \cdot 2H_2O$ de 73,3%, valor ligeiramente inferior e que pode ser justificado pela diferença na química média assumida no modelo em comparação à solução de alimentação do teste.

Na Figura 5 é representado de forma sintetizada a comparação entre os resultados obtidos por simulação e os resultados obtidos por meio do teste laboratorial.

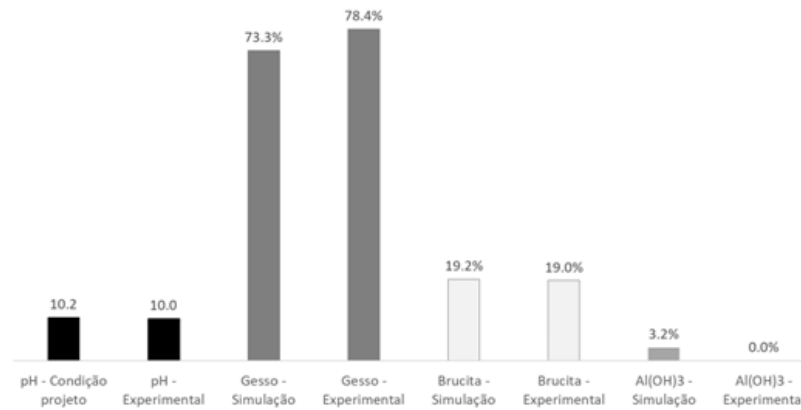


Figura 5 – Comparativo entre os resultados simulados e os obtidos experimentalmente.

O perfil do difratograma (Figura 6) e a intensidade dos picos confirmam a obtenção de um material cristalino, especialmente para o gesso, a fase cristalina predominante na amostra.

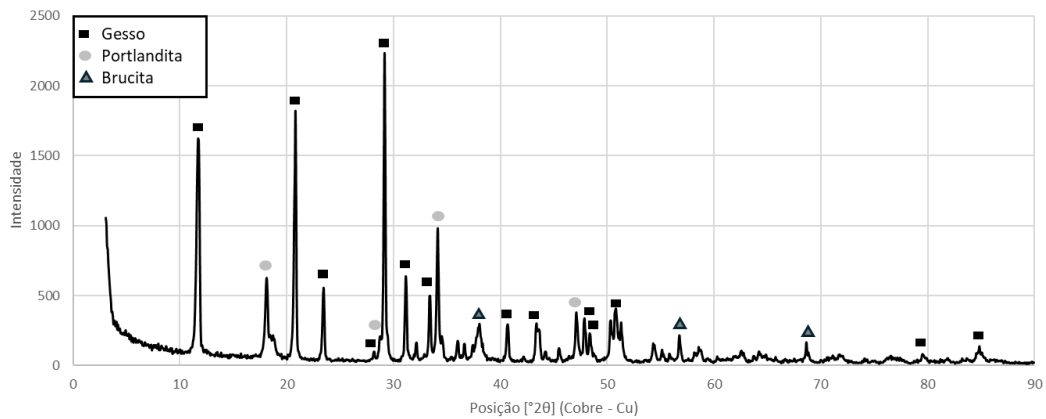


Figura 6 – Difratograma do sólido precipitado obtido em laboratório.

Comparando os resultados obtidos por difração com o estudo de Agatzini-Leonardou *et al.* (2009), obteve-se características semelhantes em relação às fases cristalinas identificadas no sólido precipitado. Os autores confirmaram a produção de um sólido cristalino, naturalmente branco e facilmente filtrável.

5 CONCLUSÕES

A simulação da remoção de magnésio por precipitação com leite de cal, a partir de soluções concentradas, utilizando o *software* METSIM[®], permitiu avaliar os impactos da eficiência de precipitação tanto na alimentação do circuito de neutralização quanto nas características do sólido gerado e validar a robustez da modelagem e simulação. Os resultados indicaram que, para uma eficiência de precipitação de Mg de 65,8%, há um aumento significativo da concentração desse elemento na alimentação do circuito de neutralização. Esse cenário sugere uma necessidade de ampliação do circuito, a fim de manter as concentrações de magnésio nas soluções recicladas em níveis adequados, evitando prejuízos às operações unitárias de separação sólido/líquido, aos processos de bombeamento e aos sistemas sensíveis ao aumento de pressão. Observou-se que a composição do sólido não muda consideravelmente com a variação das eficiências de remoção de Mg.

A análise do precipitado gerado constatou a presença de gesso, portlandita e brucita. O material produzido apresentou densidade real de 2,33 g/cm³ e D₅₀ de 9,1 µm. Em pH 10,0, segundo os experimentos, 94% do magnésio foi precipitado, valor próximo ao assumido para o modelo de projeto no *software* METSIM[®] (10,2). A diferença absoluta do conteúdo de Mg(OH)₂ entre o valor simulado e o medido pela análise química foi de apenas 0,2%.

Os resultados obtidos com os cenários simulados com o uso do METSIM[®] mostraram a importância do uso desse *software* na previsibilidade das características das soluções recirculadas no circuito, assim como os possíveis impactos ao processo, sugerindo a necessidade antecipada de tomada de decisão em um cenário de operação ou mesmo redesenho na fase de projeto. A realização de testes laboratoriais é importante no contexto de validação da modelagem ou mesmo ajuste das premissas assumidas para o modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGATZINI-LEONARDOU, S.; TSAKIRIDIS, P. E.; OUSTADAKIS, P.; KARIDAKIS, T.; KATSIAPI, A. Hydrometallurgical process for the separation and recovery of nickel from sulphate heap leach liquor of nickeliferrous laterite ores. **Minerals Engineering**, v. 22, p. 1181-1192, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.06.006>.
- AGATZINI-LEONARDOU, S.; KARIDAKIS, T.; TSAKIRIDIS, P. E. Use of gypsum/brucite mixed precipitate instead of gypsum in Portland cement. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 80, p. 320-324, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01803-3>.
- BARTLETT, J.; HOLTZAPPLE, A.; REMPEL, C. A brief overview of the process modeling/simulation and design capabilities of METSIM. **Conference of Metallurgists Proceedings**, Vancouver: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2014. p. 1-13.
- KARIDAKIS, T.; AGATZINI-LEONARDOU, S.; NEOU-SYNGOUNA, P. Removal of magnesium from nickel laterite leach liquors by chemical precipitation using calcium hydroxide and the potential use of the precipitate as a filler material. **Hydrometallurgy**, v. 76, p. 105-114, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.09.007>.
- MONTERO, R. G. A. **Estudio de Actualización del Balance de Masa para la Simulación del Proceso de Refinación de Ferro-Níquel em Horno Cuchara de Cerromatoso S.A Empleando METSIM®**. 2010. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Metalúrgica e Ciência dos Materiais) – Universidade Industrial de Santander, Bucaramanga.
- QIUYUE, Z.; TINGAN, Z.; GUOZHI, L.; XIAOFENG, Z. Application of process simulation software METSIM in metallurgy. **Telkomnika**, v. 10, p. 2202-2208, 2012. [10.11591/telkomnika.v10i8.1660](https://doi.org/10.11591/telkomnika.v10i8.1660).
- SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre Gestão de Resíduos Sólidos. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, 2022. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 21 de abril 2024.
- SOUZA, C. R.; VANUGHAN, J.; ROCHA, S. D. F.; BIRCHAL, V. S. Manufacturing reactive magnesia from nickel laterite waste solution via nesquehonite precipitation. **Hydrometallurgy**, v. 204, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105725>.
- TAN, K. E. B.; CHOI, A. E. S. Development of Separation Techniques for Magnesium Recovery: A Mini-Review. **Chemical Engineering Transactions**, v. 106, p. 55-60, 2023. [10.3303/CET23106010](https://doi.org/10.3303/CET23106010).
- WANDERLEY, K. B. **Recuperação de magnésio do licor de lixiviação de minério limonítico por cristalização**. 2018. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo.