



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado



**Precipitação de Níquel e de Cobre por Íons Sulfeto
para o Tratamento de Efluentes Industriais**



**Autora: Flávia Donária Reis da Silva
Orientador: Prof. Versiane Albis Leão**

Setembro de 2011



REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
UFOP - CETEC - UEMG

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



"Precipitação de Níquel e de Cobre por Íons Sulfeto para Tratamento de Efluentes Industriais"

Autor(a): Flávia Donária Reis da Silva

Dissertação defendida e aprovada, em 21 de setembro de 2011, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Versiane Albis Leão (Doutor) - Orientador
Universidade Federal de Ouro Preto / REDEMAT / DEMET

Psq. Ana Cláudia Queiroz Ladeira (Doutora)
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Prof. Carlos Antônio da Silva (PhD)
Universidade Federal de Ouro Preto / REDEMAT / DEMET



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Flávia Donária Reis da Silva

Precipitação de Níquel e Cobre por Íons Sulfeto para o Tratamento de Efluentes Industriais

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Versiane Albis Leão

Ouro Preto, Setembro de 2011.

S586p Reis, Flávia Donária.
Precipitação de níquel e cobre por íons sulfeto para o tratamento de efluentes industriais [manuscrito] / Flávia Donária Reis da Silva – 2011. xi, 88 f. : il. color., grafs.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Versiane Albis Leão.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

1. Resíduos industriais - Teses. 2. Efluente - Qualidade - Teses. 3. Precipitação (Química) - Teses. 4. Sulfetos - Teses. 5. Cristalização - Nucleação - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 548.51:628.5

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela coragem de recomeçar, me mostrando que cada dia é uma nova oportunidade pela qual a história da vida é feita e o conteúdo a ser escrito depende de cada um de nós, através de nossas atitudes e sentimentos.

A realização desta dissertação de Mestrado foi possível devido à colaboração e apoio de um conjunto de pessoas; às quais não poderia deixar de expressar a minha gratidão.

Agradeço à minha família, por sempre me apoiar, incentivar e dar força para encarar a vida de frente, em especial à avó **Adelina Reis da Silva** (sempre presente), ao avô **Antônio Cirilo da Silva** (Sr. Niquinho), à tia **Maria da Conceição Reis da Silva** (Zizi) e aos irmãos **Jacqueline Juliana Reis da Silva** e **Ricardo Antônio Reis da Silva**.

Ao apoio incondicional de **Reginaldo José Gonzaga**, que me faz acreditar que tudo é possível.

Ao **Prof. Dr. Versiane Albis Leão**, orientador dessa dissertação, pela confiança, dedicação, sabedoria e, acima de tudo, pela exigência, estimulando o meu interesse pela busca do conhecimento e ampliação dos meus horizontes.

Ao **Graciliano Dias Francisco**, pelas análises por microscopia óptica.

Ao **Prof. Dr. Geraldo Magela da Costa** pelas análises por difração de raios-X.

À **Profª. Drª. Rosa Malena** e ao **Luis Sacramento**, pelas análises de distribuição granulométrica e de potencial zeta.

Aos amigos de longa data, que sempre me transmitiram votos de confiança e estímulo.

À **Adarlene Moreira Silva**, pela amizade, auxílio na realização dos ensaios e correção da dissertação.

À **Emmanoelle Cintra da Cunha**, pelas análises por ICP-OES e por me auxiliar na realização dos ensaios.

À **Sueli Moura Bertolino**, pelas amostras de sulfeto biogênico.

Às novas amizades que conquistei durante a convivência no Laboratório de Bio&Hidrometalurgia da UFOP, em especial, **Flávio Luciano dos Santos Cruz**, **Michael Leonardo Marques Rodrigues**, **Sérgio Chaves dos Santos** e **Tácia Costa Veloso**.

À UFOP e ao programa de pós graduação da Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. Justificativa e relevância	4
4. Estado da Arte	6
4.1. Química do processo	6
4.2. Parâmetros cinéticos da precipitação e modelamento.....	8
4.3. Precipitação de sulfetos metálicos	14
5. Materiais e métodos.....	23
5.1. Preparo de soluções.....	23
5.2. Ensaios de remoção de cobre e níquel em sistema em batelada.....	23
5.3. Ensaios de remoção de cobre e níquel em sistema contínuo	24
5.4. Aplicação do sulfeto biogênico para a remoção de cobre e níquel.....	26
5.5. Modelamento da cinética de precipitação	26
5.6. Análises físico-químicas.....	27
5.6.1. Análises químicas.....	27
5.6.2. Difração de raios-X	27
5.6.3. Potencial Zeta.....	27
5.6.4. Distribuição do Tamanho de Partícula	28
5.6.1. Microscopia Óptica	28
6. Resultados e discussões	29
6.1. Ensaios em sistema em batelada para a remoção de metais	29
6.2. Ensaios em sistema contínuo para remoção de metais.....	34

6.3. Modelamento da cinética de precipitação em sistema contínuo.....	42
6.4. Ensaios para a remoção de metais com sulfeto biogênico	50
7. Conclusões	58
8. Sugestões de trabalhos futuros	59
9. Referências Bibliográficas	60
10. Apêndice	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Dependência das espécies de sulfeto com o pH.	7
Figura 4.2. Variação da energia livre da cristalização em função do tamanho dos núcleos. ...	11
Figura 4.3. Diagrama dos mecanismos de nucleação.....	12
Figura 5.1: Esquema do sistema contínuo com reator de mistura perfeita.....	25
Figura 6.1. Cinética de remoção de cobre (A) e níquel (B) com sulfeto de sódio, para ensaios realizados com solução sintética, em diferentes valores de pH inicial, contendo 262mg.L ⁻¹ em íons cobre com (A); 275mg.L ⁻¹ em íons níquel (B); tempo total de ensaios de 60 minutos e temperatura de 22±2°C.....	29
Figura 6.2. Eficiência de remoção de cobre (A) e níquel (B) com sulfeto de sódio, para ensaios realizados com solução sintética, em diferentes valores de pH inicial, contendo 262mg.L ⁻¹ em íons cobre com (A); 275mg.L ⁻¹ em íons níquel (B); tempo total de ensaios de 60 minutos e temperatura de 22±2°C.	30
Figura 6.3. Comportamento do pH durante a precipitação de cobre (A) e níquel (B) com sulfeto de sódio, para ensaios realizados com solução sintética, em diferentes valores de pH inicial, contendo 262mg.L ⁻¹ em íons cobre com (A); 275mg.L ⁻¹ em íons níquel (B); tempo total de ensaios de 60 minutos e temperatura de 22±2°C.....	31
Figura 6.4. Solubilidade dos sulfetos metálicos em função do pH (Lewis, 2010).....	33
Figura 6.5. Cinética da precipitação de cobre com sulfeto de sódio (A) e comportamento do pH (B) em sistema contínuo, tempo de residência de 7 minutos e temperatura de 22±2°C. ...	34
Figura 6.6. Cinética da precipitação de níquel com sulfeto de sódio (A) e comportamento do pH (B) em sistema contínuo, tempo de residência de 10 minutos e temperatura de 22 ± 2°C.	35

Figura 6.7. Comportamento da supersaturação durante os ensaios realizados em sistema contínuo, em diferentes valores de pH, para precipitação de cobre (A) e de níquel (B); tempo de residência de 7 minutos (A) e de 10 minutos (B).....	37
Figura 6.8. Distribuição do tamanho da partícula para os precipitados de cobre (A e B) e níquel (C e D) para os ensaios em sistema contínuo.....	39
Figura 6.9. Difratomogramas de raios-X dos precipitados de cobre formados durante os ensaios realizados em sistema contínuo e difratogramas padrões da covelita e da chalcantita.	40
Figura 6.10. Difratomogramas de raios-X dos precipitados de níquel formados durante os ensaios realizados em sistema contínuo e difratograma padrão da milerita.	41
Figura 6.11. Imagem de microscopia óptica característica, com aumento de 25x, dos sulfetos de cobre (A) e de níquel (B) precipitados em sistema contínuo.	42
Figura 6.12. Aplicação do modelo ASL aos ensaios de precipitação do cobre em sistema contínuo para relação estequiométrica entre cobre e sulfeto e pH inicial 1 (A), 2 (B) e 4 (C); proporção entre cobre e sulfeto de 1:1,5 e pH inicial 1 (D).....	46
Figura 6.13. Modelo ASL, aplicado aos ensaios de precipitação em sistema contínuo para precipitação de níquel para condição estequiométrica entre níquel e sulfeto e pH inicial 3 (A), 5 (B) e 7 (C) e proporção entre níquel e sulfeto de 1:1,5 e pH inicial 3 (D).	48
Figura 6.14. Comportamento do potencial zeta com o pH para o sulfeto de cobre (A) e o sulfeto de níquel (B) precipitados em sistema contínuo à temperatura ambiente $22\pm 2^{\circ}\text{C}$	50
Figura 6.15. Difratomogramas de raios-X dos precipitados de cobre formados durante os ensaios realizados com sulfeto biogênico, e difratograma padrão da covelita.	52
Figura 6.16. Difratomogramas de raios-X dos precipitados de níquel formados durante os ensaios realizados com sulfeto biogênico e difratogramas padrões da milerita e do fosfato hexahidratado de amônio e níquel.....	53
Figura 6.17. Cinética de precipitação de cobre em solução sintética a 437mg.L^{-1} com sulfeto biogênico em sistema contínuo para $1[\text{Ni}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$, pH inicial da solução em 2, tempo de residência de 7 minutos e temperatura de $22\pm 2^{\circ}\text{C}$	54

Figura 6.18. Difratoograma de raios-X para o precipitado de cobre em sistema contínuo com sulfeto biogênico e difratogramas padrões da covelita e da chalcantita.....55

Figura 6.19. Cinética de precipitação de níquel em solução sintética a 400mg.L^{-1} com sulfeto biogênico em sistema contínuo; proporção estequiométrica entre níquel e sulfeto e valor inicial de pH da solução em 5, tempo de residência de 10 minutos e temperatura $22\pm 2^\circ\text{C}$56

Figura 6.20. Difratoograma de raios-X do precipitado de níquel com sulfeto biogênico em sistema contínuo e difratograma padrão da milerita.57

Figura 10.1. Imagens de microscopia óptica dos sulfetos de cobre precipitados em sistema contínuo e $1[\text{Cu}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 1 (A), 2 (B) e 4 (C); $1[\text{Cu}^{2+}]:1,5[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 1 (D).71

Figura 10.2. Imagens de microscopia óptica dos sulfetos de cobre precipitados em sistema contínuo e proporção $1[\text{Ni}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de níquel com pH inicial de 3 (A), 5 (B) e 7 (C); proporção $1[\text{Ni}^{2+}]:1,5[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 3 (D).80

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1. Operações de tratamento de efluentes com sulfeto (BIOTEQ, 2010).....	4
Tabela 6.1. Dados cinéticos da precipitação de cobre (Modelo ASL).	46
Tabela 6.2. Dados cinéticos da precipitação de níquel (Modelo ASL).	48
Tabela 6.3. Resultados dos ensaios realizados com sulfeto biogênico para remoção de cobre e de níquel em solução.	51
Tabela 10.1. Resultados da cinética de precipitação de sulfeto de cobre.....	67
Tabela 10.2. Resultados da cinética de precipitação de sulfeto de níquel.....	68
Tabela 10.3. Resultados dos ensaios de remoção de cobre com sulfeto de sódio, em sistema contínuo.	69
Tabela 10.4. Resultados dos ensaios realizados em sistema contínuo para remoção de níquel com sulfeto de sódio.....	70
Tabela 10.5 Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.1 (A)....	72
Tabela 10.6. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.1 (B)...	73
Tabela 10.7. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.1 (C)...	74
Tabela 10.8. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.1 (D)...	75
Tabela 10.9. Dados para modelamento cinético do sulfeto de cobre precipitado a 1[Cu ²⁺]:1[S ²⁻] e solução de cobre com pH inicial de 1.....	76
Tabela 10.10. Dados para modelamento cinético do sulfeto de cobre precipitado a 1[Cu ²⁺]:1[S ²⁻] e solução de cobre com pH inicial de 2.....	77
Tabela 10.11. Dados para modelamento cinético do sulfeto de cobre precipitado a 1[Cu ²⁺]:1[S ²⁻] e solução de cobre com pH inicial de 4.....	78
Tabela 10.12. Dados para modelamento cinético do sulfeto de cobre precipitado a 1[Cu ²⁺]:1,5[S ²⁻] e solução de cobre com pH inicial de 4.....	79

Tabela 10.13. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.2 (A).	81
Tabela 10.14. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.2 (B).	82
Tabela 10.15. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 6.2 (C).	83
Tabela 10.16. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.2 (D).	84
Tabela 10.17. Dados para modelamento cinético do sulfeto de níquel precipitado a 1[Ni ²⁺]:1[S ²⁻] e solução de níquel com pH inicial de 3.	85
Tabela 10.18. Dados para modelamento cinético do sulfeto de níquel precipitado a 1[Ni ²⁺]:1[S ²⁻] e solução de níquel com pH inicial de 5.	86
Tabela 10.19. Dados para modelamento cinético do sulfeto de níquel precipitado a 1[Ni ²⁺]:1[S ²⁻] e solução de níquel com pH inicial de 7.	87
Tabela 10.20. Dados para modelamento cinético do sulfeto de níquel precipitado a 1[Ni ²⁺]:1,5[S ²⁻] e solução de níquel com pH inicial de 3.	88

RESUMO

O uso da precipitação de sulfetos metálicos para remoção de metais contidos em efluentes vem ganhando destaque nas últimas décadas devido às vantagens apresentadas por este processo em relação aos tradicionais métodos empregando hidróxidos. O presente trabalho teve em vista o estudo da precipitação, por íons sulfeto, de metais presentes em drenagens ácidas de minas (DAM). Utilizando sulfeto de sódio (Na_2S), a precipitação dos sulfetos de cobre e níquel foi favorecida quando o pH inicial da solução contendo cada um desses metais foi ajustada para 4 (Cu) e 7 (Ni). Nestas condições, a remoção foi de 99,9% para ambos os metais, o que equivale ao teor residual de $0,07\text{mg.L}^{-1}$ para cobre e de $0,13\text{mg.L}^{-1}$ para níquel. Os parâmetros cinéticos foram calculados através do modelo Abbe-Stevens-Larson aplicado à distribuição do tamanho das partículas formadas, o qual considera as taxas de crescimento e de nucleação dependente do tamanho da partícula. Para a precipitação de cobre em solução com pH 4, as taxas de nucleação e crescimento foram de $1,0 \times 10^{15} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,9 \times 10^{-10} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. A precipitação do níquel em solução com pH 7 apresentou taxa de nucleação de $4,7 \times 10^{17} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ e a taxa de crescimento, $3,2 \times 10^{-12} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. O emprego do sulfeto biogênico foi uma alternativa ao sulfeto de sódio para a remoção de cobre, assim como para o níquel. Os melhores valores de pH inicial para remoção destes metais foram, respectivamente, 2 e 5, para os quais os teor residual do metal foi de $0,28\text{mg.L}^{-1}$ para cobre e de $0,09\text{mg.L}^{-1}$ para o níquel. Tanto o sulfeto de sódio quanto o sulfeto biogênico podem ser utilizados para remover cobre e níquel e adequar efluentes industriais conforme a legislação vigente.

Palavras chaves: Precipitação; Sulfeto; Cinética de precipitação; Nucleação; Crescimento.

ABSTRACT

Precipitation of metal sulfides from acid mine drainage (AMD) and pregnant leach solutions has been focused in recent decades due to the advantages presented by this process over traditional methods employing hydroxides. The aim of this work was to explore technologies for precipitation of valuable metals such as copper and nickel present in AMD by sulfides ions. The removal of copper and nickel sulfides was favored when the initial pH of the solution containing of each metal was set to 4 (Cu) and 7 (Ni). As a result, the removal efficiency was 99.9% for both metals, corresponding to the residual level of 0.07mg.L^{-1} for copper and 0.13mg.L^{-1} for nickel. The kinetic parameters were calculated using the Stevens-Larson Abegg model applied to the particle size distribution of particles formed, which considers the growth rates and nucleation dependent on particle size. For the precipitation of copper in solution at pH 4, the nucleation and growth rates were around $1.0 \times 10^{15} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.9 \times 10^{-10} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The precipitation of nickel at pH 7 showed a nucleation rate of $4.7 \times 10^{17} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and a growth rate value of $3.2 \times 10^{-12} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. The biogenic sulfide was a suitable alternative to sodium sulfide for copper as well as for nickel removal. The optimum initial pH for copper and nickel precipitation were respectively 2 and 5, for which the residual metal content was around 0.28mg.L^{-1} for copper and 0.09mg.L^{-1} , for nickel. Both sodium sulfide and biogenic sulfide can be used to remove copper and nickel from AMD enabling effluent compliance with environmental legislations.

Keywords: Precipitation; sulfide, precipitation kinetics, nucleation, growth.

1. Introdução

Na maioria das vezes, os processos industriais, em especial os metalúrgicos e os da mineração, produzem efluentes ácidos contendo grande quantidade de metais dissolvidos e que podem causar sérios danos ambientais (Bijmans *et al.*, 2009; Tokuda *et al.*, 2010). Um dos maiores problemas ambientais relacionados a estes efluentes é a DAM - Drenagem Ácida de Mina (Luptakova e Kusnierova, 2004; Cao *et al.*, 2009; Jiménez-Rodríguez *et al.*, 2009), que ocorre quando minerais sulfetados são expostos ao ar e água, sofrendo oxidação, produzindo ácido sulfúrico e carreando metais e outros poluentes para a drenagem. Assim, a DAM apresenta baixo valor de pH e elevadas concentrações de íons metálicos e de sulfato, conforme a composição do depósito mineral a ela associada (Sheoran e Sheoran, 2006).

Muitas tecnologias que estão sendo desenvolvidas e são utilizadas para o tratamento da DAM, baseadas em métodos químicos, físicos e biológicos (Boonstra *et al.*, 1999; Kaksonen, *et al.*, 2003; Ritcey, 2005; Sheoran e Sheoran, 2006) abrangem a cementação, extração por solventes, eletrodeposição, complexação, extração por resina de troca iônica, carvão ativado, flotação e a precipitação (Tokuda *et al.*, 2008). Uma quantidade significativa de pesquisas tem sido desenvolvida para os processos de precipitação para o tratamento de efluentes (van Hille *et al.*, 2005).

A precipitação é um processo complexo e influenciado por vários fenômenos, tendo a nucleação, o crescimento e, eventualmente, a aglomeração e quebra da partícula como etapas do processo (Al-Tarazi *et al.*, 2004). Em processos hidrometalúrgicos e no tratamento de efluentes contendo metais, o uso da precipitação de sulfetos metálicos para recuperação de metais em solução vem ganhando destaque nas últimas décadas devido às vantagens apresentadas por este processo em relação aos tradicionais métodos empregando hidróxidos (van Hille *et al.*, 2005). Em sintonia com esta tendência está o emprego do sulfeto de hidrogênio (H_2S) biogenicamente produzido em substituição às fontes químicas como Na_2S , $NaHS$ e o H_2S . O sulfeto de hidrogênio pode ser produzido por bactérias redutoras de sulfato (BRS), através de um processo que permite um manuseio mais seguro, com menor custo de produção (Huisman *et al.*, 2006) e possibilidade de produção *in loco*, sem a necessidade de armazenamento.

O propósito deste trabalho concerne à etapa de precipitação de metais por sulfeto de sódio, assim como a aplicação do sulfeto biogênico produzido a partir de redução de sulfato por BRS para tratamento de efluentes contendo cobre e níquel.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Estudar a precipitação de metais contidos em efluentes de mineração utilizando o sulfeto de sódio ou o sulfeto biogênico como agente precipitante, avaliando os fatores cinéticos envolvidos no processo.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o efeito de parâmetros como pH, tempo de residência e proporção estequiométrica sobre a eficiência e a cinética da precipitação, utilizando o sulfeto de sódio.
- Caracterizar os precipitados quimicamente, de forma qualitativa e quantitativa, e morfologicamente.
- Avaliar o efeito de parâmetros como pH e proporção estequiométrica sobre a eficiência e a cinética da precipitação, utilizando o sulfeto biogênico.
- Modelar a cinética da precipitação de cobre e de níquel com sulfeto de sódio em sistema contínuo.

3. Justificativa e relevância

O tratamento de efluentes, visando à adequação para o descarte conforme a resolução 357 do CONAMA (Brasil, 2005) é uma necessidade do setor industrial em geral, inclusive do setor minero-metalúrgico. A problemática da drenagem ácida e sua carga de metais pesados podem ser exemplificadas na tabela 3.1 que apresenta o volume de drenagem tratada e de metal recuperado como sulfeto por ano, utilizando processos químicos ou biológicos. Nos processos químicos, é feita a adição de NaHS ao efluente para a precipitação dos metais. Na remoção biológica, são utilizadas BRS para produzir H₂S a partir de sulfato ou enxofre elementar.

Tabela 3.1. Operações de tratamento de efluentes com sulfeto (BIOTEQ, 2010).

Operação	Tamanho da operação (m³/h)	Água tratada (10⁶L/ano)	Metal recuperado (t/ano)	Origem do sulfeto
Bisbee, USA	500	2,8	635,03 (Cu)	Biológico
Raglan, Canadá	240	0,92	12,25 (Ni)	Químico
Dexing, China	1000	3000	163,93 (Cu)	Químico
Mt Gordon, Austrália	250	>1000	635,03 (Cu) 61,23 (Co/Ni)	Químico Químico
Lluvia de Oro, Mexico	n.d.	n.d.	40,23 (Cu)	Biológico
Caribou Mine, Canadá	n.d.	n.d.	35,00 (Zn)	Biológico
Wellington oro, USA	34069	n.d.	21,77 (Zn, Cd)	Químico

n.d. não disponível

Como se vê, os volumes de DAM são elevados e mesmo que a concentração dos metais seja baixa (o que nem sempre é o caso), a carga metálica é elevada, o que exige soluções de baixo custo e longo prazo para a solução do problema.

No caso brasileiro, a elevação do pH e precipitação de metais é feita pela adição de cal. Comparando-se o processo biológico com a precipitação dos metais com cal, verifica-se que os íons sulfeto, biologicamente gerados, precipitam metais para níveis, em solução, menores que os observados com a adição de hidróxido de cálcio e os sulfetos precipitados são mais estáveis do que os hidróxidos dos respectivos metais (Boonstra *et al.*, 1999). Além disso, o volume e a toxicidade do lodo produzido são menores, os metais precipitados podem ser reciclados (comercializados) e os custos de operação e manutenção são considerados menores do que aqueles no qual é utilizado a cal (Huisman *et al.*, 2006)

É importante ressaltar que o tratamento de efluentes visando tanto à adequação para o descarte quanto ao reuso de água é uma demanda do setor mineral como um todo, e os desenvolvimentos gerados nessa dissertação poderão ser utilizados no tratamento de efluentes de outras indústrias, contendo metais de transição.

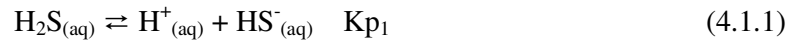
Pretende-se, com este trabalho, contribuir técnica e cientificamente para o uso do sulfeto biogênico para o tratamento de efluente, de forma a permitir uma melhor compreensão a cerca do processo envolvido.

4. Estado da Arte

Neste capítulo, é apresentada uma breve introdução a cerca da precipitação de metais na forma de sulfeto, abordando aspectos químicos e cinéticos da precipitação, suas vantagens e aplicações.

4.1. Química do processo

Conforme Harvey (2000), a reação de precipitação ocorre quando duas ou mais espécies solúveis são misturadas e formam um produto insolúvel, o qual é denominado precipitado. Considerando-se um sistema contendo íons metálicos e sulfeto, representados por Me^{2+} e S^{2-} respectivamente, de acordo com Lewis (2010), o equilíbrio químico envolvido na precipitação de sulfeto metálico pode ser expresso como:



Sendo que nas equações 4.1.1 e 4.1.2, K_{p1} e K_{p2} referem-se às constantes de equilíbrio e são expressas por (Butler e Cogley, 1998):

$$K_{p1} = \frac{[\text{H}^+][\text{HS}^-]}{[\text{H}_2\text{S}]} \therefore \text{p}K_{p1} = 7,0 \quad (4.1.4)$$

$$K_{p2} = \frac{[\text{H}^+][\text{S}^{2-}]}{[\text{HS}^-]} \therefore \text{p}K_{p2} = 13,9 \quad (4.1.5)$$

Os valores de K_{p1} e de K_{p2} referem sistema com diluição infinita ($I \rightarrow 0$) e temperatura de 25°C. Como representado pela equação 4.1.6, a constante de equilíbrio para a reação de precipitação 4.1.3, denominada de Produto de Solubilidade, K_{ps} , em função da temperatura e da força iônica, é dada por:

$$K_{ps} = [\text{Me}^{2+}][\text{S}^{2-}] \quad (4.1.6)$$

Conforme Skoog *et al.* (2006), o íon sulfeto pode formar precipitados com os cátions metálicos, os quais apresentam produtos de solubilidade na faixa de 10^{-10} a 10^{-90} ou ainda menores. Além disso, a concentração de íons sulfeto no equilíbrio é dependente do pH da solução saturada de sulfeto de hidrogênio (Figura 4.1). Essas duas propriedades tornam possíveis inúmeras separações seletivas e permitem obter concentrações residuais de metal em efluentes muito reduzidas e que atendem à legislação pertinente.

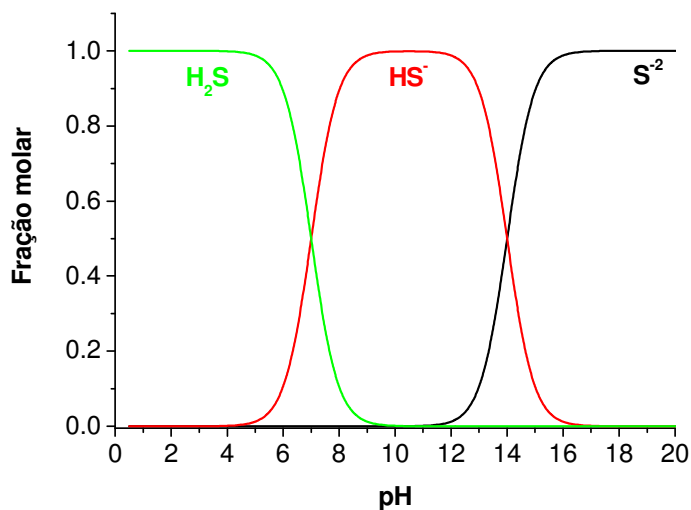
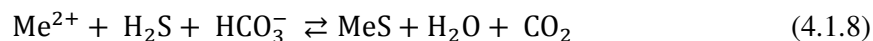
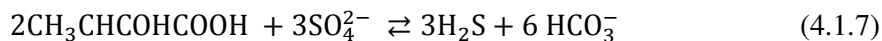


Figura 4.1. Dependência das espécies de sulfeto com o pH.

Como pode ser observado na figura 4.1, a distribuição das espécies sulfídricas presentes no sistema é bastante dependente dos valores de pH do meio, para força iônica e temperatura constante.

Pela descrição de Skoog *et al.* (2006), o sulfeto de hidrogênio é um gás incolor, inflamável, com importantes propriedades químicas e toxicológicas. É produzido por inúmeros processos naturais, ou seja, pela decomposição de materiais que contêm enxofre. Por outro lado, segundo Grigoryan *et al.* (2008), bactérias redutoras de sulfato (BRS) são microrganismos anaeróbios capazes de produzir sulfeto de hidrogênio a partir de sulfato. O uso de BRS para a produção de sulfeto se dá em ambiente redutor, sendo que as mesmas reduzem sulfato em presença de matéria orgânica (doador de elétrons). A oxidação da fonte de elétrons para a redução de sulfato a sulfeto produz alcalinidade na forma de HCO_3^- , a qual eleva o pH do meio (Bhagat *et al.*, 2004),

conforme a equação 4.1.7, para a oxidação do lactato. A equação geral que descreve a precipitação de metais pelo sulfeto biogênico pode ser escrita conforme a equação 4.1.8, na qual a alcalinidade consome a acidez produzida durante a formação da espécie sólida MeS.



Segundo Jiménez-Rodríguez *et al.* (2009), a remoção de metais por processos biotecnológicos envolve dois estágios: a produção de H₂S pelas BRS e a precipitação dos metais por este sulfeto biologicamente produzido, o que pode ocorrer dentro do mesmo reator ou em reatores separados.

A resolução nº357, emitida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA em 17 de março de 2005 (Brasil, 2005) estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, sendo que o pH do efluente deve estar na faixa de 5 a 9. Para o caso dos metais cobre e níquel, os valores máximos permitidos no efluente são, respectivamente, 1,0mg.L⁻¹ e 2,0mg.L⁻¹. Logo, a precipitação de metais com sulfeto é uma das tecnologias disponíveis e contribui para que a legislação seja atendida.

4.2. Parâmetros cinéticos da precipitação e modelamento

Conforme Demopoulos (2009), a precipitação é uma operação unitária importante, muitas vezes negligenciada em vários processos envolvendo meio aquoso para a produção de materiais inorgânicos (hidrometalurgia) ou tratamento de efluentes contendo metais tóxicos. De acordo com a termodinâmica da cristalização, a fase sólida será formada, a partir da solução, quando:

$$\Delta G = -RT \ln \left(\frac{a}{a_{\text{eq}}} \right) < 0 \quad (4.2.1)$$

Onde ΔG é a energia livre de Gibbs, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura, a é atividade inicial do soluto na solução e a_{eq} é a atividade do soluto na

solução, em equilíbrio com a fase sólida. A relação (a/a_{eq}) é a supersaturação, sendo que a energia livre de Gibbs será negativa quando esta razão for maior que a unidade. De acordo com Skoog *et al.* (2006), uma solução supersaturada é instável e contém uma concentração do soluto mais elevada do que uma solução saturada em equilíbrio com o sólido. Com o tempo, a supersaturação desaparece pela precipitação do excesso de soluto.

Conforme Harmandas e Koutsoukos (1996), e adaptando para o sistema de precipitação da fase MeS, a variação da energia livre do sistema de precipitação eletrolítica (equação 4.1.3) se apresenta conforme a equação 4.2.2:

$$\Delta G = \Delta G_{MeS}^0 + R.T. \ln\left(\frac{a_{MeS}}{a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}}}\right) \quad (4.2.2)$$

Onde $a_{Me^{2+}}$ é a atividade do íon do metal, $a_{S^{2-}}$ é a atividade do íon sulfeto em solução e a_{MeS} é a atividade do precipitado formado. Conforme Skoog *et al.* (2006), a atividade de um íon é função da força iônica, assim como depende também da temperatura e da pressão nas quais o sistema está submetido. Para o precipitado puro, $a_{MeS} = 1$, daí:

$$\Delta G = \Delta G_{MeS}^0 + R.T. \ln\left(\frac{1}{a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}}}\right) = \Delta G_{MeS}^0 - R.T. \ln(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}}) \quad (4.2.3)$$

Como

$$\Delta G_{MeS}^0 = -R.T. \ln K_{eq} = -R.T. \ln \frac{1}{(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}})_{eq}} = R.T. \ln(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}})_{eq} \quad (4.2.4)$$

tem-se que:

$$\Delta G = R.T. \ln(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}})_{equilíbrio} - R.T. \ln(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}})_{supersaturada} \quad (4.2.5)$$

Rearranjando a equação 5.2.5,

$$\Delta G = -R.T. \ln \frac{(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}})_{Supersaturada}}{(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}})_{equilíbrio}} = R.T. \ln S \quad (4.2.6)$$

Com isso, a supersaturação (S) do sistema de precipitação de sulfeto metálico é dada por:

$$S = \frac{(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}})_{Supersaturada}}{(a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}})_{equilíbrio}} = \frac{a_{Me^{2+}} \cdot a_{S^{2-}}}{K_{ps}} \quad (4.2.7)$$

Segundo Demopoulos (2009), as moléculas ou pares iônicos da solução supersaturada se combinam para formar núcleos. São estáveis os núcleos formados com tamanho superior ao tamanho crítico. De acordo com a termodinâmica, a formação dos núcleos envolve um acréscimo de energia de superfície, com isso, a variação da energia livre $\Delta G(r)$ associada à formação desses núcleos é dada pela equação 4.2.8:

$$\Delta G(r) = \Delta G_V + \Delta G_S \quad (4.2.8)$$

Onde ΔG_V é a variação energia livre associada à geração de volume e ΔG_S é a variação energia livre associada com a formação da superfície. As equações 4.2.9 e 4.2.10 representam, respectivamente, ΔG_V e ΔG_S .

$$\Delta G_V = \frac{4.\pi.r^3}{3.V_a} . \Delta G \quad (4.2.9)$$

$$\Delta G_S = 4. \pi. r^2. \gamma \quad (4.2.10)$$

Sendo, V_a o volume molar ($\text{m}^3.\text{mol}^{-1}$), γ a energia superficial ($\text{J}.\text{m}^{-2}$), ΔG a variação da energia livre ($\text{J}.\text{mol}^{-1}$) e r é o raio do núcleo (m).

Com isso, a expressão 4.2.8 assume a forma:

$$\Delta G = \frac{4.\pi.r^3}{3.V_a} . \Delta G + 4. \pi. r^2. \gamma \quad (4.2.11)$$

Derivando ΔG em relação a r :

$$\frac{d\Delta G}{dr} = \frac{4.\pi.r^2}{V_a} . \Delta G + 8. \pi. r. \gamma \quad (4.2.12)$$

O valor de ΔG será máximo para o valor de r igual ao tamanho crítico:

$$\frac{d\Delta G}{dr} = \frac{4.\pi.r_c^2}{V_a} . \Delta G + 8. \pi. r_c. \gamma = 0 \quad (4.2.13)$$

Daí,

$$r_c = - \frac{2\gamma.V_a}{\Delta G}, \text{ com } \Delta G < 0 \quad (4.2.14)$$

O tamanho crítico dos núcleos, r_c , é diretamente proporcional à tensão interfacial e inversamente proporcional à energia livre do sistema. Devido à necessidade de se atingir o tamanho crítico, a concentração do soluto precisa atingir um valor acima da solubilidade do mesmo, com isso o tamanho crítico está diretamente relacionado à supersaturação. Em termos práticos, para um alto grau de supersaturação espera-se uma maior população com partículas ultrafinas (Demopoulos, 2009).

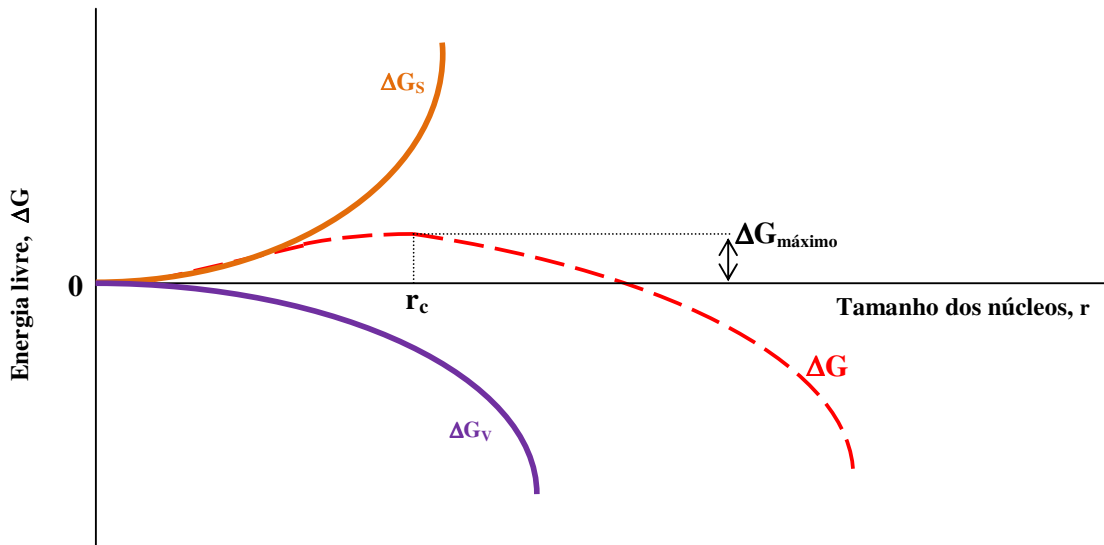


Figura 4.2. Variação da energia livre da cristalização em função do tamanho dos núcleos.

Por esta figura 4.2, nota-se que a energia livre do sistema diminui à medida que o tamanho dos núcleos aumenta, com isso, observa-se que as duas grandezas são inversamente proporcionais. O núcleo tende a crescer para tamanhos maiores que r_c .

De acordo com Mersmann (1999), a precipitação é formada pelos processos de nucleação e de crescimento e estes parâmetros definem o tamanho médio do cristal. Bramley *et al.* (1996) consideram a aglomeração, além de nucleação e crescimento, como um importante mecanismo que influencia o tamanho das partículas precipitadas,

especialmente para material fino. Além disso, Garside *et al.* (2002), as partículas crescem pelo avanço das faces individuais e em geral, cada face cresce a uma taxa diferente e isto determina a forma e o hábito do cristal formado. A taxa de crescimento linear, G é definida como a variação na dimensão L do cristal, no tempo (t), conforme a equação 4.2.15.

$$G = \frac{dL}{dt} \quad (4.2.15)$$

Ainda segundo Garsid *et al.* (2002), o processo de criação de novas superfícies sólidas a partir de uma solução supersaturada é chamada de nucleação. Estas novas superfícies são chamadas de núcleos. De acordo com Leão (1993), a nucleação pode ser classificada como primária ou secundária, sendo que a nucleação primária ocorre na forma de nucleação homogênea ou heterogênea. A nucleação primária ocorre, principalmente, como estágio inicial da precipitação de substâncias pouco solúveis. A nucleação homogênea ocorre em soluções puras e em condições de supersaturação alta. A figura 4.3 expõe os mecanismos da nucleação de forma simplificada.

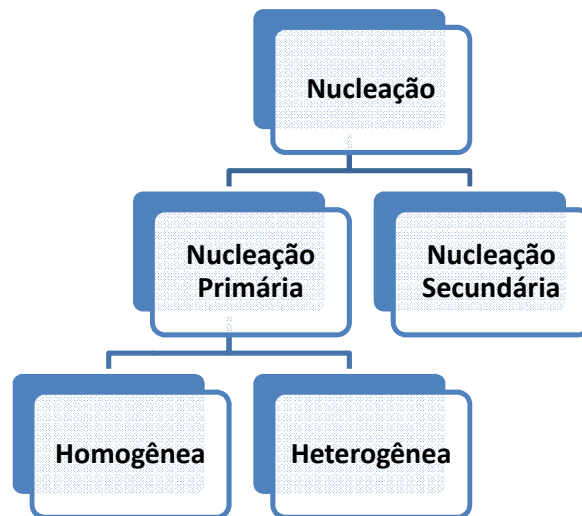


Figura 4.3. Diagrama dos mecanismos de nucleação.

A taxa de nucleação homogênea pode ser definida como a mudança no número N de cristais que são formados num período de tempo dt , num volume V de solução, sendo expressa pela equação 4.2.16 e indica a velocidade de formação de novos núcleos que conseguem dar origem a novos cristais.

$$B = \frac{1}{V} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (4.2.16)$$

Para a nucleação primária homogênea em condições de potencial químico constante, e considerando os precipitados como tendo a forma esférica, a taxa de nucleação primária homogênea pode ser definida conforme a equação 4.2.17. Esta equação diz que a taxa de nucleação é função da tensão superficial σ entre o líquido e o sólido sendo formado, do volume molar do núcleo V_a , da temperatura T , da supersaturação S e da frequência de colisões entre as partículas do sistema, dado pelo termo A . Como se pode notar, a taxa de nucleação primária homogênea cresce de forma não linear com a supersaturação, sendo que para supersaturação baixa, a taxa de nucleação é muito pequena, e na medida em que se aumenta a supersaturação, esta taxa aumenta consideravelmente (Leão, 1993).

$$B = A \cdot S \cdot \exp\left(-\frac{16 \cdot \pi \cdot V_a^2 \cdot \sigma^3}{3(R \cdot T \cdot \ln S)^2}\right) \quad (4.2.17)$$

A nucleação primária heterogênea ocorre com maior frequência para baixa supersaturação e, neste processo, as moléculas do soluto passam a ter afinidade por substratos além das próprias partículas do precipitado como, por exemplo, partículas de poeira e as paredes do reator. A equação 4.2.18 exprime a taxa de nucleação primária heterogênea que é semelhante à equação 4.2.17, com exceção do termo da tensão superficial σ_{efe}^3 que é função do ângulo de molhamento θ , conforme indica a equação 4.2.19 (Leão, 1993).

$$B = A \cdot S \cdot \exp\left(-\frac{16 \cdot \pi \cdot V_a^2 \cdot \sigma_{efe}^3}{3(R \cdot T \cdot \ln S)^2}\right) \quad (4.2.18)$$

$$\sigma_{efe}^3 = \sigma^3 \cdot f(\theta) = \sigma^3 \cdot \frac{(1 - \cos\theta)^2}{4} \quad (4.4.19)$$

Ainda segundo Leão (1993), um comparativo das taxas de nucleação primária homogênea e heterogênea permite inferir que para supersaturações baixas, a taxa de nucleação heterogênea é mais importante que a taxa de nucleação primária homogênea. Já em situações de supersaturação elevada, a taxa de nucleação homogênea prevalece.

Para que a precipitação ocorra, a supersaturação deve ser maior que a unidade, o que leva a nucleação a ocorrer de forma espontânea. Este limite é considerado como sendo o ponto no qual há um aumento significativo na taxa de nucleação quando se eleva a supersaturação. A nucleação secundária ocorre quando há adição do material que está sendo cristalizado ao sistema (sementes), a qual não será abordada neste trabalho por não ser objeto de estudo.

De acordo com Garside *et al.* (2002), experimentos realizados em reator de mistura perfeita propiciam a determinação dos parâmetros cinéticos, como as taxas de crescimento e de nucleação, as quais influenciam diretamente na distribuição do tamanho das partículas formadas.

O modelo cinético para precipitação de sulfetos metálicos será detalhado, nessa dissertação, no item 6.3 – modelamento cinético da precipitação.

4.3. Precipitação de sulfetos metálicos

De acordo com Huisman *et al.* (2006) e Boonstra *et al.* (1999), a cristalização de metais na forma de sulfeto metálico apresenta muitas vantagens sobre a precipitação na forma de hidróxidos, tais como:

- Alta reatividade entre o sulfeto e os íons metálicos, com baixa solubilidade do precipitado numa extensa faixa de valores de pH, resultando em baixa concentração do metal no efluente final.
- Ao contrário da precipitação com hidróxido, a precipitação com sulfeto é relativamente insensível à presença de complexos e à maioria de agentes quelantes.
- Com o íon sulfeto, é possível uma precipitação seletiva de metais pelo controle do pH, o que não ocorre com a hidroxila.
- Os precipitados são mais densos e estáveis, exibindo melhores características de espessamento e secagem em comparação com os hidróxidos metálicos correspondentes.

Lewis (2010) fez uma revisão da precipitação de sulfetos metálicos, compreendendo desde o comportamento físico-químico do íon sulfeto, como sua solubilidade,

estabilidade e complexação em solução, passando pelo estudo cinético da precipitação e caracterização dos precipitados formados até as aplicações industriais (processos hidrometalúrgicos) e ambientais (tratamento de efluentes) da precipitação dos sulfetos metálicos. Neste artigo, Lewis (2010) trata de cada sulfeto metálico em separado e expõe que um dos maiores desafios da precipitação de sulfetos está em obter dados robustos para serem aplicados ao modelamento simultâneo de nucleação, crescimento e aglomeração dos precipitados formados. Outra dificuldade da precipitação utilizando íons sulfeto para a remoção de metais está na formação de complexos com o próprio íon sulfeto.

Mokone *et al.* (2010) avaliaram o efeito da composição da solução sobre as características das partículas formadas na precipitação de sulfetos metálicos. Neste estudo, eles utilizaram um reator contínuo de mistura perfeita com 900mL de capacidade e agitação de 620min^{-1} . Os metais estudados foram cobre e zinco em soluções monoelemento e a sua combinação, na concentração de 500mg.L^{-1} de cada metal. Na primeira parte do trabalho, foi avaliado o comportamento da precipitação de zinco e cobre sob a influência da razão molar do metal e do sulfeto com os valores de 2, 1 e 0,67, feitos em pH constante e igual a 6. Os melhores resultados foram obtidos para a razão molar de 0,67, obtendo-se 97,9% de remoção para o cobre e 94%, para o zinco. Diante desses resultados, na segunda parte, a razão molar foi mantida constante em 0,67 e o pH teve seu valor alterado, sendo que foram utilizados, para o cobre, os valores de 2, 4 e 6, e para o zinco, 3, 4 e 8. O cobre apresentou remoção de 88%, em pH 2, valor no qual o zinco não se precipita, e este último foi removido (99,5%), somente no valor de pH igual a 8. Foram analisados o rendimento da precipitação, a distribuição do tamanho das partículas, a taxa de sedimentação dos precipitados bem como o potencial zeta dos sólidos. Embora os autores não tenham calculado a supersaturação e outros fatores cinéticos, os resultados obtidos foram justificados baseados nesse conceito. Os autores consideraram o efeito do pH na distribuição das espécies sulfídricas como sendo o fator mais importante para a precipitação seletiva dos sulfetos de cobre e zinco.

Sampaio *et al.* (2010) avaliaram a remoção seletiva do zinco com sulfeto de sódio, numa solução contendo zinco e níquel, em um reator contínuo de mistura perfeita, com 1L de capacidade, controlando a concentração de sulfeto, o valor de pH e a supersaturação. Para os ensaios com zinco, as concentrações de sulfeto foram mantidas

em 600mg.L^{-1} , 150mg.L^{-1} e em 50mg.L^{-1} . Os valores do pH utilizados foram 4, 5 e 6. No caso da remoção de níquel, a concentração de sulfeto utilizada foi de 600mg.L^{-1} . A remoção de níquel apresentou melhor resultado para pH com valor igual a 6 e razão estequiométrica de sulfeto para níquel. Os autores consideraram a precipitação de níquel problemática e fortemente dependente do pH. Já a remoção de zinco foi mais eficiente para valor do pH em 5 e relação estequiométrica de zinco para sulfeto de 1:1,2. Em se tratando da solução contendo a mistura dos dois referidos metais, o zinco pode ser removido de forma isolada da solução para pH igual a 5 e a pureza do precipitado formado foi de $99(\pm 3)\%$. A diminuição da supersaturação pelo controle da vazão foi um importante para se alcançar a precipitação seletiva do metal.

Em outro trabalho, Sampaio *et al.* (2009) estudaram a precipitação de cobre com sulfeto de sódio, a temperatura ambiente, em uma solução contendo zinco e o metal, ambos na concentração de 600mg.L^{-1} . Para a remoção seletiva do cobre, o pH da solução foi mantida em 3 e a solução de sulfeto estava com concentração no valor estequiométrico. A recuperação do cobre e sua pureza foram de 100% e, pela análise de difração de raios-X, ficou comprovada a formação de CuS, sendo que o diâmetro médio dos precipitados foi de $36\mu\text{m}$. Os autores sugeriram que um efluente real contém muitas outras substâncias que podem competir com o sulfeto e afetar o processo de precipitação em termos cinéticos e de crescimento das partículas precipitadas. Quando o sulfeto biogênico é utilizado, por exemplo, o comportamento da precipitação é diferente daquele obtido com sulfeto quimicamente produzido, devido à presença de outros ânions como o carbonato e o fosfato. Então, a precipitação realizada por sulfeto biogênico requer um maior controle do pH e da concentração do sulfeto, para se evitar um processo descontrolado de precipitação.

Cao *et al.* (2009) estudaram a precipitação de metais com sulfeto biogênico, à partir de soluções sintéticas de metal e uma DAM, sendo que os autores avaliaram a influência do pH e da temperatura na precipitação do sulfeto metálico. A solução sintética era composta por cátions metálicos nas concentrações: 20g.L^{-1} de Mg^{2+} , 5g.L^{-1} de Fe^{3+} , 2g.L^{-1} de Ni^{2+} e $0,5\text{g.L}^{-1}$ de Cu^{2+} . A eficiência da precipitação dos metais foi fortemente influenciada pela concentração de sulfeto, sendo que a ordem de remoção dos metais foi $\text{Cu} > \text{Fe} > \text{Ni} > \text{Mg}$. A remoção de cobre atingiu o nível de 100% em todos os experimentos, enquanto para o ferro, variou de 62% a 100%. A remoção de níquel

variou de 46% a 100%. Não foi possível a remoção do Mg^{2+} na forma de sulfeto, mas, este cátion metálico foi removido na forma de carbonato. O aumento da temperatura não foi benéfico para a precipitação de todos os metais, apenas para precipitação do níquel. Os autores reforçaram que a quantidade de sulfeto a ser adicionado para a precipitação do metal deve ser tal que garanta a precipitação, porém sem estar em excesso para evitar redissolução do sulfeto metálico, devido a sua complexação como polisulfeto.

Bijmans *et al.* (2009) estudaram a precipitação seletiva de níquel e ferro divalente por sulfeto biogênico. Primeiramente, eles procederam à recuperação de níquel de uma solução com pH ajustado para o valor de 5,5 e concentração do metal de $1000mg.L^{-1}$, e atingiram níveis de 99,6% de precipitação. A precipitação seletiva do ferro e do níquel foi feita a partir de solução sintética em pH 5,0, contendo os dois metais em questão, cada um deles na concentração de $100mg.L^{-1}$. Neste valor de pH, 83% do níquel foi removido da solução, juntamente com 18% do ferro, levando a um precipitado misto com 85% em níquel. Para contornar o problema de pureza, o pH teve seu valor diminuído para 4,8 e, assim houve a precipitação seletiva do níquel.

Sahinkaya *et al.* (2009) utilizaram sulfeto biogênico para a precipitação seletiva de cobre e zinco presentes em DAM. Os autores também testaram soluções sintéticas contendo os íons metálicos nas concentrações de 50, 75 e $100mg.L^{-1}$ e de 50 e $100mg.L^{-1}$, respectivamente. O valor do pH do sistema foi mantido abaixo de 2, para as relações $[Cu^{2+}]:[Zn^{2+}]$ de 1:1 e 0,75:1 e a solução de sulfeto estava na concentração de $275mg.L^{-1}$ do íon. O cobre foi 100% removido, de forma seletiva, nestas condições. Porém, não foi observada a precipitação zinco e os pesquisadores, então, justificaram tal fato à perda de sulfeto do sistema, uma vez que o valor de pH igual a 2 permite a volatilização do mesmo. A precipitação dos íons zinco foi realizada no valor de pH de 3,3, alcançando-se 98% de remoção. Um comparativo da distribuição do tamanho de partícula foi realizado para os dois sulfetos metálicos estudados, sendo que as partículas de sulfeto de cobre apresentaram diâmetro médio de $37\mu m$ contra $12\mu m$ das partículas de sulfeto de zinco.

Djedidi *et al.* (2009) avaliaram o efeito dos ânions cloreto e sulfato, na concentração residual de metal e nas características de sua remoção como sulfeto. Eles estudaram a precipitação dos metais zinco, cobre e níquel em soluções de cloreto ou de sulfato

destes metais, na concentração de 200mg.L^{-1} . Para evitar a volatilização do sulfeto, que estava na concentração de 650mg.L^{-1} , o pH inicial das soluções contendo os íons metálicos foi ajustado para o valor 5,5. Todos estes metais apresentaram remoção da ordem de 99,9%, independente da matriz utilizada, e a formação do sulfeto metálico em questão foi confirmada por difração de raios-X.

Tokuda *et al.* (2008) avaliaram a precipitação com H_2S gasoso, de cobre, zinco e níquel, tendo, cada um desses cátions, a concentração de 100mg.L^{-1} . A concentração de H_2S variou de 2500 a 5000ppm (v/v) em mistura gasosa com nitrogênio. Os autores avaliaram a cinética de precipitação dos referidos metais, porém discutiram detalhadamente apenas a do cobre, considerando-se que os demais metais apresentaram comportamentos semelhantes. Neste estudo cinético, os valores de pH das soluções dos metais foram ajustados, em 1,5 para o cobre, 4,5 para o zinco e 6,5 – 7,0 para o níquel. Os íons cobre foram removidos de forma satisfatória para proporção molar de 1:1 com o sulfeto, sendo que a concentração residual de cobre na solução estava inferior a 1mg.L^{-1} , para um tempo de reação de 25 minutos e a difratometria de raios-X confirmou a formação de CuS . Os autores também estudaram a precipitação seletiva dos referidos metais, cada um deles na concentração de 100mg.L^{-1} . Neste sistema, a remoção de cobre foi de 96,6%; a do zinco, 96,0% e igual a 99,4% para o níquel. O valor do pH para a remoção de cada um desses metais foi igual ao valor do pH utilizado no estudo cinético para o referido metal. Com isso, os autores concluíram que a precipitação de um determinado metal não era afetada significativamente pela presença dos outros metais, o que é alcançado pelo controle preciso dos valores de pH do sistema.

Karbanee *et al.* (2008) estudaram a precipitação de sulfeto de níquel, por sulfeto de sódio em solução e H_2S gasoso. Os estudos em batelada foram conduzidos em reator fechado, com volume de 750mL e agitação mecânica de 330min^{-1} e a concentração de níquel na solução foi de 200mg.L^{-1} , para valores estequiométricos da concentração de sulfeto. Os resultados mostraram que a remoção de níquel ocorre para valores de pH maiores que 4, preferencialmente entre 6 e 8. Os autores também observaram a redissolução do sulfeto de níquel formado, através do aumento gradativo no teor do elemento remanescente na solução após 10 minutos de ensaio, e justificaram este fenômeno pela formação de complexos de polisulfeto de níquel.

O estudo de Lewis e van Hille (2006) comparou o uso de sulfeto nas formas gasosa e aquosa, em termos de rendimento da precipitação dos metais cobre, cobalto e níquel. Foram utilizadas soluções de cobre nas concentrações de 150mg.L^{-1} e 50mg.L^{-1} ; de cobalto, nas concentrações de 100mg.L^{-1} e 1000mg.L^{-1} ; e soluções de níquel com as concentrações de 200mg.L^{-1} e 2000mg.L^{-1} . Segundo os autores, o controle da supersaturação é crucial para minimizar a formação de finos, pela nucleação homogênea. Para a recuperação do sulfeto metálico, a adição do sulfeto deve ser controlada, de acordo com a estequiometria do processo, independente da fonte (gasosa ou aquosa). Porém, o excesso de sulfeto pode levar à formação de complexos na forma de polisulfetos metálicos e comprometer a remoção efetiva do metal. Precipitados muito finos são reativos e os sulfetos não são termodinamicamente estáveis na presença de oxigênio.

Lewis e Swartbooi (2006) estudaram a precipitação de sulfetos de níquel e cobalto em três sistemas diferentes, para avaliar os fatores que afetam a precipitação dos metais em solução. Primeiro, em sistema em batelada, eles avaliaram a precipitação dos referidos metais utilizando sulfeto de sódio, hidróxido e carbonato de sódio como agentes precipitantes. Para o segundo sistema, em um reator de leito fluidizado, fez-se a precipitação com sulfeto de sódio em solução. O terceiro sistema, em semi-batelada, utilizando-se um reator em coluna, envolveu a precipitação com H_2S gasoso. As concentrações de metais utilizadas foram de 250mg.L^{-1} e 2000mg.L^{-1} para níquel e 100mg.L^{-1} e 1000mg.L^{-1} , para o cobalto, enquanto os íons sulfeto e carbonato estavam na concentração de 500mg.L^{-1} . Com os resultados obtidos, os autores chegaram à conclusão que, em termos de remoção do metal, a eficiência da precipitação na forma de sulfeto é superior ou equivalente às respectivas precipitações como hidróxido ou como carbonato. Para os autores, de forma similar a Lewis e van Hille (2006), o uso de excesso de sulfeto também não melhorou a eficiência de remoção, devido à formação de espécies complexadas na forma de polisulfeto. O sistema em reator agitado mostrou-se o mais indicado para a precipitação, uma vez que o reator de leito fluidizado não suportou a elevada concentração de espécies dissolvidas.

O trabalho de van Hille *et al.* (2005) compreendeu a precipitação de sulfeto de cobre em reator de leito fluidizado com soluções de cobre nas concentrações de 50, 100 e 150mg.L^{-1} e razão molar de sulfeto para cobre ($[\text{S}^{2-}]:[\text{Cu}^{2+}]$) de 1:1, 1:5, 1:25 e 0,83:1.

Durante o ensaio, o pH teve seu valor controlado na faixa de 5,5 e 6,0. Os autores observaram uma grande formação de partículas finas e de complexos de polisulfeto de cobre, resultando em remoção dos íons de cobre da solução na faixa de 70 a 80%, valores considerados baixos. Eles atribuíram esta ineficiência do sistema utilizado à alta supersaturação estabelecida durante os ensaios.

Luptakova e Kusnierova (2005) investigaram a cinética de precipitação de íons cobre, presente em uma DAM, utilizando sulfeto biogênico, para os valores de pH mantidos em 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 3,5. Os resultados demonstraram que o cobre foi efetivamente removido da solução utilizando o sulfeto biogênico e a concentração inicial de cobre, que era de 20mg.L^{-1} , reduziu-se para menos de 1mg.L^{-1} . O valor mais adequado de pH foi 2,5 e as análises de difração de raios-X confirmaram a formação de CuS.

Bhagat *et al.* (2004) utilizaram sulfeto biogênico para precipitar cobre e ferro de uma solução sintética seguindo dois procedimentos experimentais: primeiro, utilizando o sulfeto volatilizado do reator e o segundo, misturando o sobrenadante da solução do bioreator diretamente na solução do metal. A solução de sulfeto biogênico apresentava concentração de 600mg.L^{-1} e os experimentos de precipitação foram feitos com as concentrações de 540, 1080 e 2160mg.L^{-1} de cobre, com o valor de pH igual a 5,03. Já as soluções utilizadas nos experimentos de precipitação de ferro, em pH 8, tinham concentrações de 475, 950 e 1900mg.L^{-1} do metal. Os experimentos realizados com a mistura direta do sobrenadante da solução apresentaram resultados melhores, no que diz respeito à remoção dos metais da solução sintética, que alcançou o nível de 100% de remoção tanto para o cobre quanto para o ferro, e este fato foi atribuído à possível presença de outros precipitantes presentes no sobrenadante da solução do bioreator como o carbonato, por exemplo.

Al-Tarazi *et al.* (2004) estudaram a precipitação contínua do sulfeto de zinco em reator de mistura perfeita, o que permitiu a determinação simultânea dos parâmetros cinéticos de nucleação e crescimento, a partir da distribuição do tamanho de partículas (PSD). Estes experimentos permitiram o modelamento da aglomeração, baseados no balanço populacional, enquanto assumiram o tamanho independente da aglomeração. Também avaliaram o efeito da supersaturação, do pH e da velocidade de agitação nas taxas de nucleação, de crescimento e aglomeração. O reator utilizado apresentava volume de

750mL, 11cm de diâmetro e estava equipado com agitador mecânico de velocidade variável, na temperatura de 20°C. Os ensaios cinéticos foram realizados com soluções de zinco nas concentrações de 6g.L⁻¹ a 180g.L⁻¹, variando a velocidade de agitação de 720 a 1700min⁻¹, o tempo de residência de 60 a 170s e valores de pH de 2 a 6. A razão molar de zinco para sulfeto foi de 0,25:1 a 5:1 e a entrada das soluções no reator foram feitas por cima, no meio e pela base. Os autores concluíram que aumento na supersaturação leva ao aumento das taxas de crescimento, de nucleação e na aglomeração, embora estes resultados também tenham sido influenciados pelas alturas utilizadas para a entrada das soluções no reator e pela velocidade de agitação uma vez que esses parâmetros também afetam diretamente a supersaturação.

Veeken e Rulkens (2003) utilizaram sulfeto de sódio para tratar um efluente sintético contendo os metais cádmio, cobre, níquel, chumbo e zinco, todos nas concentrações de 60mg.L⁻¹ e 180mg.L⁻¹. Com o pH da solução sintética de 6, a remoção de chumbo e zinco foi da ordem de 99,9%. No entanto, eles observaram que, para o cobre e o níquel, a remoção foi menor, possivelmente pelo fato das partículas de sulfeto destes metais formados serem menores do que a porosidade do filtro utilizada, uma vez que a remoção foi medida pela análise química quantitativa da solução filtrada.

Em outro artigo, Veeken *et al.* (2003) estudaram a precipitação de zinco com sulfeto, à temperatura ambiente, em reator de mistura perfeita com agitação constante de 500min⁻¹, volume útil de 0,5L, tempo de residência de 30 minutos. A solução de zinco apresentava-se nas concentrações de 800 a 5800mg.L⁻¹ e o pH foi mantido em 6,5. A solução de sulfeto utilizada apresentava concentração estequiométrica do íon para a precipitação do referido metal. Após o reator entrar em regime, o tamanho médio das partículas precipitadas de ZnS diminuiu linearmente de 22 a 1µm, devido à aglomeração das mesmas, e a remoção de zinco foi elevada, ficando a concentração residual abaixo de 0,03mg.L⁻¹ na solução, enquanto as partículas de ZnS formadas apresentavam diâmetro médio (d₅₀) de 10µm. Os autores concluíram que além da nucleação e crescimento do cristal, a aglomeração aparece como uma importante característica durante a precipitação de sulfeto de zinco.

A precipitação de metais com sulfeto de sódio ou sulfeto biogênico como agentes precipitantes, como alternativa para tratamento de efluentes, é discutida na literatura

como sendo uma técnica de grande aplicação industrial, mas que requer conhecimento e controle do processo envolvido. Estudos da precipitação em sistemas em batelada e contínuo contribuem significativamente para o domínio do processo de precipitação por fornecerem dados que permitem avaliar, além da eficiência da remoção, os parâmetros cinéticos da precipitação dos sulfetos metálicos. Os resultados obtidos nesses estudos podem colaborar para a utilização mais eficiente desta tecnologia. A seguir, o procedimento experimental seguido neste trabalho será apresentado.

5. Materiais e métodos

Neste capítulo, são abordados os procedimentos experimentais utilizados para o estudo de precipitação de cobre e níquel com sulfeto, abrangendo desde os ensaios em batelada e contínuo, até as técnicas analíticas utilizadas.

5.1. Preparo de soluções

As soluções contendo cobre ou níquel foram preparadas, respectivamente, a partir dos sais $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ p.a. e $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ p.a., ambos da marca Synth. Para eliminar o oxigênio dissolvido nas soluções, foi borbulhado nitrogênio gasoso por 15 minutos nas soluções contendo metal. No caso da solução de sulfeto, foi borbulhado nitrogênio gasoso na água destilada, previamente fervida, a qual foi utilizada no preparo desta solução. A solução de sulfeto foi preparada a partir do sal $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ p.a., também da marca Synth.

Os ajustes de pH foram feitos com solução de ácido clorídrico a 10% (v/v) ou de hidróxido de sódio a 10% (v/v). Para realizar as medidas dos valores do pH, utilizou-se o pHmetro Handylab 1, fabricado pela Schott.

5.2. Ensaio de remoção de cobre e níquel em sistema em batelada

Os ensaios em batelada foram realizados para avaliar a influência dos valores do pH, da relação estequiométrica entre estes metais e o sulfeto (supersaturação) e do tempo de ensaio na remoção do cobre e do níquel. Como em todos os ensaios a agitação deveria ser alta suficiente para suspensão completa, utilizou-se a agitação de 750min^{-1} . O agitador magnético utilizado foi o RH Basic S1, fabricado por IKA Labortechnik.

No estudo da precipitação do cobre com íon sulfeto, partiu-se de soluções na concentração de 500mg.L^{-1} com os valores de pH de 1, 2 e 4. No estudo de precipitação de níquel, partiu-se de soluções na concentração 500mg.L^{-1} , mas com os valores de pH em 3, 5 e 7. Considerando-se a diluição de 1:1 dentro do reator, as soluções, tanto de cobre quanto de níquel, foram utilizadas na concentração de 250mg.L^{-1} para que houvesse massa suficiente do precipitado para a realização das análises físico-químicas.

Também, foram testadas as relações estequiométricas destes metais para sulfeto nos valores 1:1 e 1:1,5 para avaliar o efeito da supersaturação na cristalização. Após os ensaios, as amostras foram filtradas em unidade filtrante HV em polietileno com membrana Durapore® de 0,45µm. O filtrado foi analisado quantitativamente para avaliar a remoção do metal, pela técnica de ICP/OES, conforme descrito no item 5.6.1. O precipitado foi caracterizado para identificação das fases formadas por difração de raios-X, conforme item 5.6.2.

5.3. Ensaio de remoção de cobre e níquel em sistema contínuo

Para ajustes das variáveis do sistema contínuo, como tempo de residência, vazão e volume necessário das soluções de sulfeto e do metal, no caso cobre ou níquel, foi feito, inicialmente, uma avaliação da cinética de remoção dos metais em batelada. Para este estudo cinético, utilizou-se a solução de cobre ou de níquel preparadas na concentração de 500mg.L⁻¹ e concentração de sulfeto equimolar, dependendo do metal em estudo (com isso, a concentração do metal dentro do reator era de 250mg.L⁻¹). Foram utilizados 800mL da solução do metal e 800mL da solução de sulfeto. O tempo total de ensaio foi de 2 horas, sendo que para os 10 minutos iniciais, foi coletada uma amostra a cada 2 minutos. Até 60 minutos, coletou-se uma amostra a cada 5 minutos e a partir daí, uma amostra a cada 10 minutos. As amostras foram coletadas em seringa de 10mL, sendo este o volume de amostra retirada, e filtradas em unidade filtrante HV em polietileno com membrana Durapore® de 0,45µm, acopladas às seringas. Utilizou-se 1 gota de ácido nítrico p.a. para preservação das amostras filtradas para posterior análise quantitativa por ICP/OES.

Para os ensaios de remoção de cobre e níquel em sistema contínuo, utilizou-se um reator agitado, conforme esquematizado na figura 5.1, com volume útil de 325mL. As soluções contendo cobre ou níquel e a solução de sulfeto foram bombeadas para o reator com o auxílio de uma bomba dosadora peristáltica, de dois canais, modelo 626, fabricada pela Milan Produtos Científicos. As soluções de cobre foram utilizadas com os valores de pH de 1, 2 e 4 e as soluções de níquel, com os valores de pH de 3, 5 e 7. Além dos valores de pH, variou-se também a proporção estequiométrica de metal e de sulfeto de forma a variar-se a supersaturação do sistema, sendo que o pH da solução de

cobre foi mantido em 1 e, para o níquel, em 3. Todos os ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente ($22\pm 2^{\circ}\text{C}$).

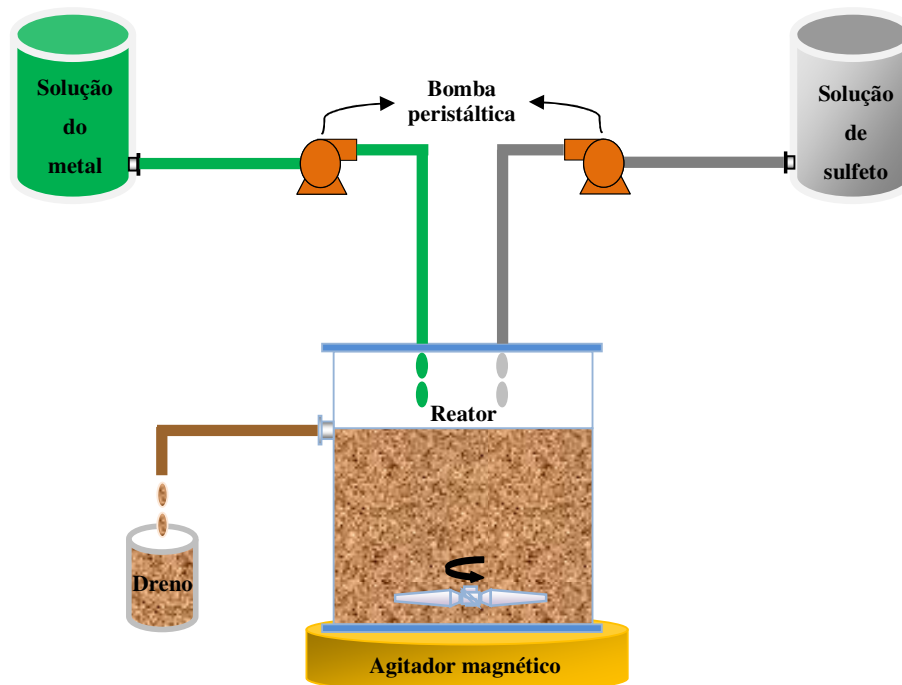


Figura 5.1: Esquema do sistema contínuo com reator de mistura perfeita

De acordo com os resultados do estudo cinético realizado para a remoção de cobre e de níquel, apresentados no item 6.1 deste trabalho, o tempo de residência utilizado nos ensaios em sistema contínuo para a remoção de cobre foi de 7 minutos e, para o níquel, de 10 minutos. Com isso, os ensaios de cobre foram conduzidos de forma permitir o recolhimento no dreno de uma amostra de 25mL a cada 7 minutos, totalizando-se 10 amostragens num período de 70 minutos. De forma correlata, nos ensaios de remoção de níquel, uma amostra de 25mL foi coletada no dreno a cada 10 minutos, em um intervalo de 100 minutos, o que permitiu a obtenção de 10 amostragens. Estas amostras foram filtradas em unidade filtrante HV em polietileno com membrana Durapore® de $0,45\mu\text{m}$ e a eficiência da remoção do metal foi determinada pela análise do teor de metal remanescente na solução após a precipitação com sulfeto por ICP/OES. O sulfeto também foi determinado pela técnica ICP/OES como enxofre, considerando-se que, para a solução em questão, a espécie que contém este elemento é o sulfeto. No precipitado, realizaram-se análises de difração de raios-X para identificação da fase formada; por microscopia óptica; distribuição do tamanho de partícula.

5.4. Aplicação do sulfeto biogênico para a remoção de cobre e níquel

A aplicação do sulfeto biogênico para a remoção dos metais cobre e níquel, ambos em solução sintética foi também estudada nesse trabalho. Neste ensaio, foram repetidas as condições do sistema contínuo, tanto para a remoção de cobre quanto para níquel, conforme item 5.3. A fonte de sulfeto biogênico utilizada foi gerada em dois reatores, um do tipo UASB e o outro, leito fluidizado, parte da tese de doutorado de Sueli Moura Bertolino.

Colocou-se o efluente do reator de redução de sulfato em contato com a solução monoelemento, contendo cobre ou níquel, em um reator agitado para avaliação do efeito do pH e da supersaturação na remoção dos metais.

O teor de sulfeto, neste caso, foi determinado por titulação com iodeto de potássio, e não pela técnica de ICP/OES uma vez que nem todo o enxofre estava na forma de sulfeto. Este método titulométrico consiste na precipitação do sulfeto presente na amostra com acetato de zinco na forma de sulfeto de zinco (ZnS), tal precipitado é lavado para retirar-se eventuais impurezas e transferido para um erlenmeyer onde é reduzido com uma solução em excesso de iodo em meio ácido; o iodo excedente será quantificado pela titulação com tiosulfato de sódio em presença de amido, constituindo-se uma retrotitulação (APHA, 2002).

5.5. Modelamento da cinética de precipitação

O modelamento cinético foi realizado para os ensaios em contínuo de precipitação dos sulfetos de cobre e de níquel, através do *software* Origin Lab®. Para conduzir o modelamento, após o sistema entrar em regime, um volume de 300mL da polpa que deixava o reator era filtrada e sua massa de sólidos determinada, para que a porcentagem de sólidos na polpa fosse conhecida. Em seguida, fez-se a distribuição de tamanho do sólido em granulômetro a laser e paralelamente, determinava-se o fator forma das partículas a partir de imagens dos cristais (microscopia ótica). O número de cristais foi calculado a partir do fator forma e da massa retida em cada faixa de tamanho, para então serem determinadas as taxas de crescimento e de nucleação. A

determinação do fator forma foi realizada pelo *software* Quantikov Image Analyzer ®, o qual considera a maior área projetada e o perímetro da partícula. É calculado à partir da área (A) e do perímetro (P) da projeção, de acordo com a equação (Bouwman *et al.*, 2004):

$$F_{forma} = \frac{4.\pi.A}{P^2} \quad (5.5.1)$$

5.6. Análises físico-químicas

5.6.1. Análises químicas

As análises quantitativas de cobre, níquel e sulfeto (determinado como enxofre) foram feitas por espectrometria de emissão por fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP/OES) no equipamento fabricado pela Varian Inc, modelo 725 – ES Series, do Laboratório de Bio&Hidrometalurgia, pertencente ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFOP.

5.6.2. Difração de raios-X

A identificação das fases mineralógicas presentes nos precipitados formados foram feitas por difração de raios-X, utilizando o equipamento produzido pela Shimadzu, modelo XRD6000, com monocromador de grafite, intervalo (10 - 70) 2 θ , step 0,01, voltagem 40 kV e 20mA. Este equipamento está localizado no Departamento de Química da UFOP.

5.6.3. Potencial Zeta

A análise do potencial zeta dos precipitados provenientes dos ensaios de remoção de cobre e de níquel em sistema em batelada foi realizada no equipamento Zetâmero modelo Zeta Sizer – Nano Series, marca Malvern Instrument, do departamento de Engenharia de Minas da UFOP.

5.6.4. Distribuição do Tamanho de Partícula

A distribuição granulométrica dos precipitados formados foi feita no analisador de tamanho de partícula fabricado pela CILAS, modelo 1064, para amostras líquidas e de tamanho de partícula na faixa de 0,04 a 500,00 μ m, localizado no Departamento de Engenharia de Minas da UFOP.

5.6.1. Microscopia Óptica

A morfologia dos precipitados formados foi avaliada em microscópio ótico quantitativo com aquisição e análise de imagens, da marca LEICA, modelo DMR. Este equipamento encontra-se no departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFOP.

6. Resultados e discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos e suas discussões, avaliando-se a precipitação dos sulfetos de cobre e de níquel em sistema contínuo e em batelada.

6.1. Ensaio em sistema em batelada para a remoção de metais

Nos ensaios de remoção de cobre e de níquel em batelada, a concentração inicial do metal na solução sintética estava em 262mg.L^{-1} e 275mg.L^{-1} , respectivamente. A figura 6.1. apresenta a cinética de remoção destes metais com sulfeto de sódio.

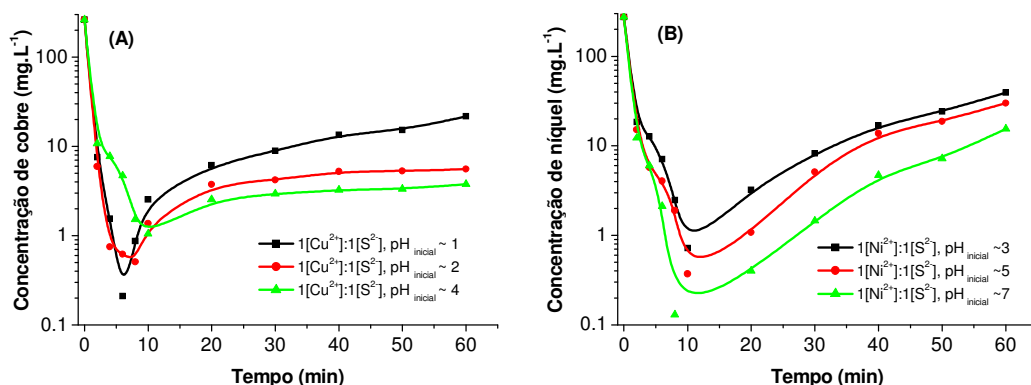


Figura 6.1. Cinética de remoção de cobre (A) e níquel (B) com sulfeto de sódio, para ensaios realizados com solução sintética, em diferentes valores de pH inicial, contendo 262mg.L^{-1} em íons cobre com (A); 275mg.L^{-1} em íons níquel (B); tempo total de ensaios de 60 minutos e temperatura de $22\pm 2^\circ\text{C}$.

Para todos os ensaios realizados, pode-se observar que existe uma tendência à redissolução dos precipitados formados, o que leva a um aumento gradativo da concentração de cobre e de níquel em solução, com o passar do tempo. Ao final do ensaio de precipitação de cobre, observou-se $21,63\text{mg.L}^{-1}$ de teor residual deste metal em solução para o pH inicial da solução em 1, contra $5,55\text{mg.L}^{-1}$ e $3,78\text{mg.L}^{-1}$ para os valores de pH em 2 e 4, respectivamente. Comportamento semelhante também foi observado no ensaio realizado para níquel que, após os 60 minutos de ensaio, apresentou teores residuais em solução de $39,96\text{mg.L}^{-1}$, $29,92\text{mg.L}^{-1}$ e $15,53\text{mg.L}^{-1}$ para os valores de pH inicial da solução em 3, 5 e 7, respectivamente. Com isso, foi possível

inferir que para os ensaios realizados com o pH inicial da solução sintética mais baixo, 1 no caso do cobre e 3 para níquel, este efeito de redissolução é mais acentuado. Este fato pode ser visualizado por meio da figura 6.2, a qual traz a eficiência de remoção dos referidos íons em função do tempo. De qualquer forma, para os dois metais, a concentração residual ficou abaixo de $0,5\text{mg.L}^{-1}$ para o tempo de ensaio inferior a 10 minutos, onde a extração é máxima.

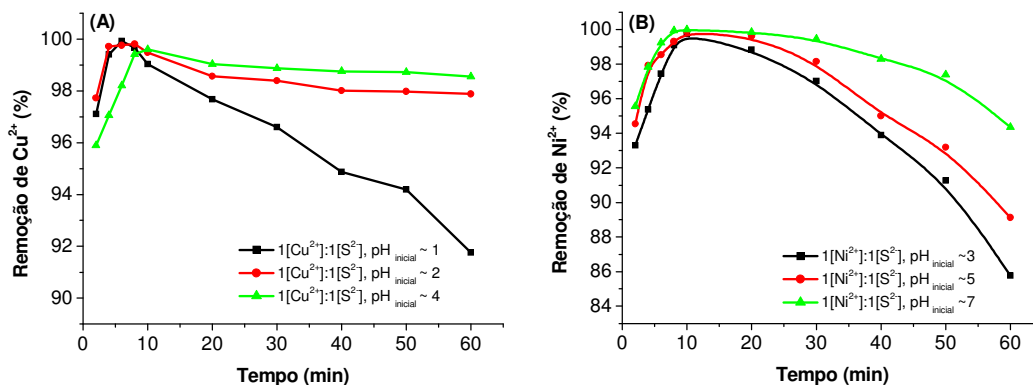


Figura 6.2. Eficiência de remoção de cobre (A) e níquel (B) com sulfeto de sódio, para ensaios realizados com solução sintética, em diferentes valores de pH inicial, contendo 262mg.L^{-1} em íons cobre com (A); 275mg.L^{-1} em íons níquel (B); tempo total de ensaios de 60 minutos e temperatura de $22\pm 2^\circ\text{C}$.

Nos resultados para o cobre, pode-se observar, também, que não se faz necessário um tempo de ensaio superior a 7 minutos, com o intuito de melhorar a remoção do metal através de sua precipitação com sulfeto de sódio. É possível notar, ainda, que para o ensaio realizado com a solução sintética de cobre com valor de pH próximo a 1, a eficiência de remoção fica em 91,8%, contra os 97,9% e 98,6% obtidos para as respectivas condições de pH 2 e 4, comparando-se com o mesmo tempo de ensaio de 60 minutos. Para a precipitação de níquel, com 10 minutos de ensaio, a eficiência de foi 100,0% para o pH inicial da solução próximo a 7, e de 99,9% e 99,7% para os valores de pH inicial da solução em 5 e 3, respectivamente. Karbanee *et al.* (2008) realizaram ensaios em batelada para precipitação de níquel a 200mg.L^{-1} em solução com sulfeto gasoso na proporção estequiométrica e obtiveram uma eficiência de remoção de 98,9%; para a razão estequiométrica entre o metal e sulfeto de 1:1,5, a remoção foi de 97%.

No presente estudo, foram utilizados os valores iniciais de pH da solução sintética de cobre em 1, 2 e 4 para reproduzir a faixa utilizada no trabalho de Luptakova e Kusnierova (2005), embora os autores tenham conduzido este estudo com sulfeto biogênico. Para os ensaios conduzidos para a precipitação de níquel, os valores do pH inicial das soluções sintéticas foram definidos com base nos trabalhos de Bijmans *et al.* (2009), que utilizaram o pH 5 e Tokuda *et al.* (2008), com valor de pH 7. O pH inicial da solução sintética do referido íon foi ajustado também para o valor 3, devido ao estudo de Karbanee *et al.* (2008) que observaram que a remoção de níquel ocorre para valores de pH maiores que 4. Então, para se avaliar o comportamento do sistema de precipitação de níquel, foram testadas as soluções sintéticas com estes valores de pH. A figura 6.3 apresenta o comportamento do pH durante os ensaios realizados em batelada para a precipitação de cobre e de níquel.

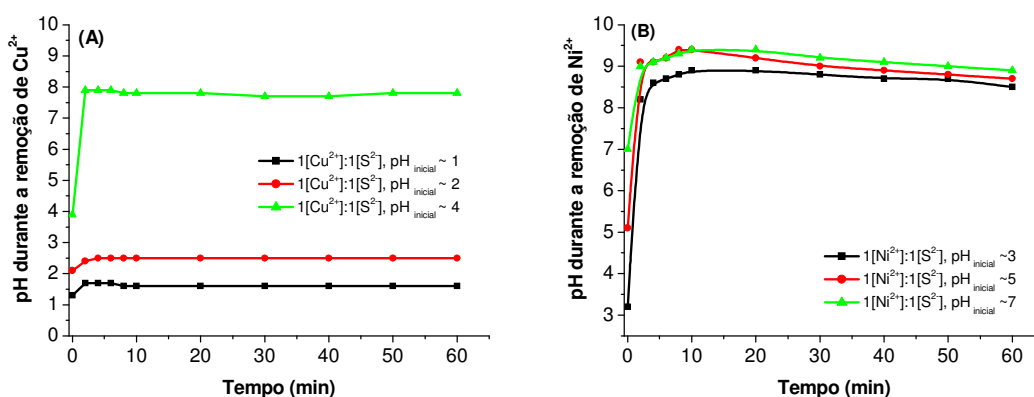
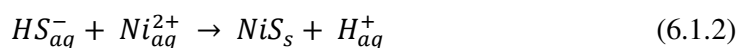
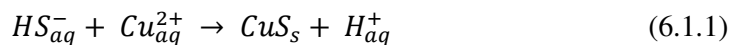


Figura 6.3. Comportamento do pH durante a precipitação de cobre (A) e níquel (B) com sulfeto de sódio, para ensaios realizados com solução sintética, em diferentes valores de pH inicial, contendo 262mg.L^{-1} em íons cobre com (A); 275mg.L^{-1} em íons níquel (B); tempo total de ensaios de 60 minutos e temperatura de $22\pm 2^\circ\text{C}$.

Avaliando-se os valores de pH do meio reacional durante a precipitação de cobre, foi possível observar que para todas as condições de pH inicial da solução sintética, o mesmo apresentou uma elevação e manteve-se estável durante o restante do tempo de ensaio. Considerando-se os 8 minutos iniciais do ensaio, para a condição de pH inicial da solução sintética em 4, este aumento do pH do meio reacional foi mais pronunciado, deslocando-se para valores em torno de 8 e a remoção de cobre para esta condição de ensaio alcançou níveis inferiores às demais (pH inicial em 1 e em 2). Porém, no que se refere à estabilidade da remoção, o ensaio realizado com valor inicial de pH da solução

sintética em 4 foi o que menos apresentou redissolução dos precipitados formados. De forma similar aos estudos realizados para o cobre, os valores de pH durante os ensaios em batelada para precipitação de níquel também apresentaram um acréscimo, porém, independente do valor inicial do pH da solução de níquel, os valores de pH do meio reacional mantiveram-se estáveis em torno de 9. Para os ensaios de precipitação de níquel com sulfeto de sódio em batelada, realizados no estudo de Karbanee *et al.* (2008), o pH do meio reacional também ficou em torno de 9 para concentração inicial do metal em 200mg.L⁻¹ e proporção estequiométrica entre os precipitantes; para a condição de excesso de sulfeto (1Ni²⁺:1,5S²⁻), o pH do meio reacional era 11,2.

O que contribuiu para este aumento do pH durante a precipitação, tanto nos estudos realizados para o cobre quanto para o níquel, foi o valor do pH da própria solução sintética de sulfeto de sódio. Nesse estudo foi utilizada uma solução com concentração em torno 125mg.L⁻¹ em íons sulfeto, a qual apresentou, de forma natural, pH 12. Considerando-se a figura 4.1, que apresenta o comportamento das espécies sulfídricas de acordo com os valores de pH, pode-se inferir que, para os ensaios realizados para a precipitação de cobre e de níquel, independente do valor do pH da solução sintética do metal, a espécie responsável pela precipitação dos metais em solução seria HS⁻ e a reação ocorre conforme as equações 6.1.1 e 6.1.2 (Cao *et al.*, 2009; Sahinkaya *et al.*, 2009).



A figura 6.4 apresenta a solubilidade de alguns sulfetos metálicos em função do pH.

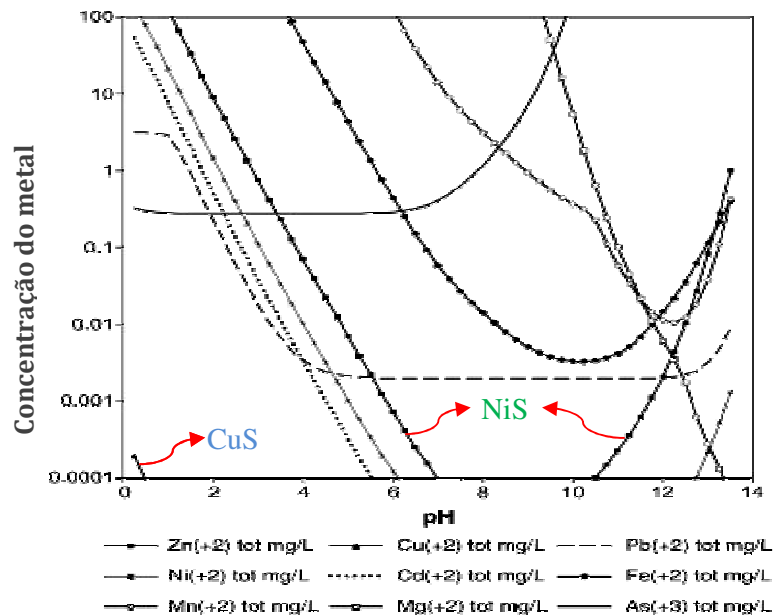


Figura 6.4. Solubilidade dos sulfetos metálicos em função do pH (Lewis, 2010).

Como mostra a figura 6.4, a solubilidade dos sulfetos metálicos aumenta gradualmente com a diminuição do pH (Lewis, 2010). Esse comportamento justifica a baixa eficiência de precipitação dos sulfetos de cobre e de níquel em valores de pH mais baixos (1 e 3), uma vez que nessas condições o teor residual do metal tende a ser maior.

Esta tendência à redissolução, observada tanto para o cobre quanto para o níquel, neste trabalho, são legitimadas pelas discussões apresentadas no trabalho de Lewis (2010) no que tange à formação de complexos com o próprio íon sulfeto. Outros autores também mencionam a formação de complexos para justificar a redissolução dos precipitados formados, bem como Karbanee *et al.* (2008), os quais também observaram que, à partir de 10 minutos de ensaio, o teor de níquel remanescente na solução aumentava de forma gradativa com o passar do tempo suportando o observado no presente trabalho.

Com os resultados obtidos nesse estudo em batelada para a precipitação de cobre e de níquel, foi possível observar que, para as condições de ensaio avaliadas, os respectivos tempos de ensaio de 8 e 10 minutos foram suficientes para a remoção destes metais a níveis inferiores a 1mg.L^{-1} para cobre e 2mg.L^{-1} para níquel, valores estabelecidos pela legislação pertinente (Brasil, 2005).

Outros resultados dos ensaios conduzidos em batelada para a avaliação da precipitação dos sulfetos de cobre e de níquel estão dispostos no Apêndice I e no Apêndice II, respectivamente.

6.2. Ensaios em sistema contínuo para remoção de metais

O comportamento cinético da precipitação em sistema contínuo de íons cobre com sulfeto de sódio pode ser observado na figura 6.5.

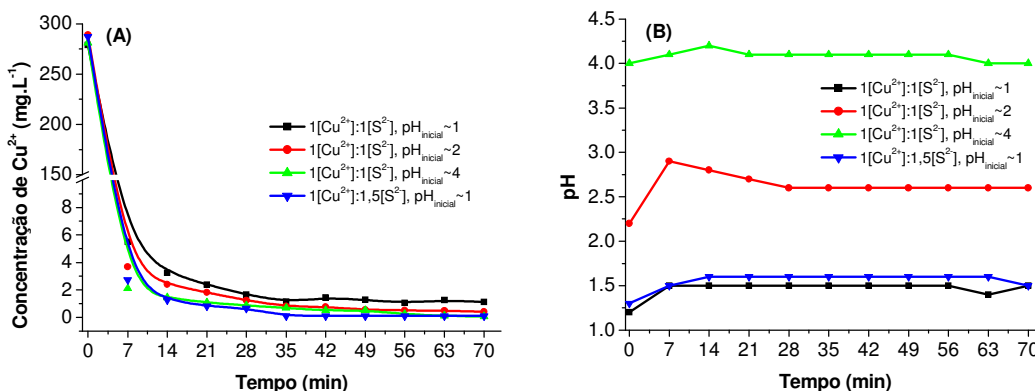


Figura 6.5. Cinética da precipitação de cobre com sulfeto de sódio (A) e comportamento do pH (B) em sistema contínuo, tempo de residência de 7 minutos e temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$.

Em relação à precipitação de cobre em sistema contínuo, observa-se que os ensaios realizados em condição equimolar de cobre e sulfeto, o pH do meio reacional em 4 apresentou resultados melhores, uma vez que o teor de metal remanescente na solução foi de $0,07\text{mg.L}^{-1}$ contra $0,41\text{mg.L}^{-1}$, para o pH em 2,5 e $1,12\text{mg.L}^{-1}$, para o pH em 1,5. Sampaio *et al.* (2009) obtiveram uma remoção de 100% de cobre, pela precipitação seletiva em pH controlado em 3 e uso de eletrodo de íon seletivo para dosar, de forma estequiométrica, a adição de sulfeto. No trabalho conduzido por Tokuda *et al.* (2008) com sulfeto gasoso para precipitar cobre em solução a 100mg.L^{-1} , em condições estequiométricas, a remoção de cobre foi de 96,6% em pH 1,5. Em contrapartida, no presente estudo, para esse mesmo valor de pH, alcançou-se uma remoção de 99,5% de cobre da solução com 500mg.L^{-1} . Ao contrário do que ocorreu nos ensaios em batelada, o pH do meio reacional manteve-se constante e próximo ao valor do pH inicial da

solução de cobre, mesmo para a condição de excesso de sulfeto, e manteve-se constante durante todo tempo de ensaio. Este comportamento permitiu inferir que o sistema entrou em regime. Observou-se que, das quatro condições de ensaio estudadas, o excesso de 50% de sulfeto contribuiu para um melhor desempenho, apresentando remoção de cobre de 99% já no primeiro tempo de residência e mantendo-se em 99,7% a partir de cinco tempos de residência. Este mesmo comportamento também foi observado no trabalho de Mokone *et al.* (2009), no qual foi alcançada uma remoção de cobre de 98% de uma solução sintética a 500mg.L^{-1} , proporção de metal para sulfeto de 1:1,5, em reator agitado e tempo de residência de 10 minutos. Os autores atribuíram este fenômeno à formação de um número maior de partículas de sulfeto de cobre nesta condição de ensaio. Porém, os autores obtiveram melhores resultados para o pH do meio reacional ajustado para 6.

A figura 6.6 apresenta os resultados obtidos para o estudo cinético da precipitação de níquel em sistema contínuo.

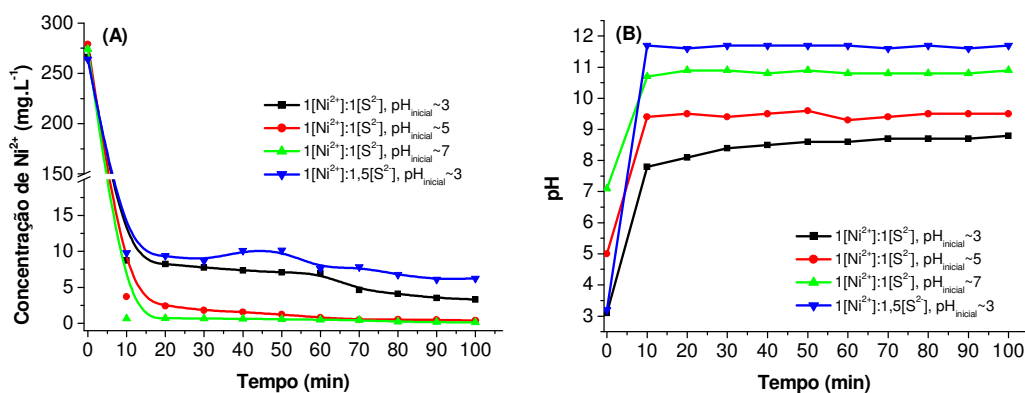
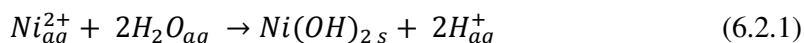


Figura 6.6. Cinética da precipitação de níquel com sulfeto de sódio (A) e comportamento do pH (B) em sistema contínuo, tempo de residência de 10 minutos e temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$.

Durante os ensaio de precipitação de níquel, os valores de pH do meio reacional poderiam propiciar a formação de hidróxidos de níquel, conforme a equação 6.2.1.



Porém, pela análise de difração de raios-X, não foi detectada a presença de $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (dados apresentados posteriormente), o que indica que a reação de precipitação de níquel ocorreu conforme a equação 6.1.2, apresentada posteriormente.

O ensaio de precipitação de níquel em sistema contínuo apresentou melhores resultados para a condição estequiométrica entre metal e sulfeto. Para os ensaios realizados com pH 9,5 e 10,5, respectivamente a partir de sete e seis tempos de residência, a remoção de níquel foi de 99,8%, o que equivale a $0,51\text{mg.L}^{-1}$ de Ni^{2+} residual.

Por outro lado, o ensaio realizado em pH com valor próximo de 8,5 não apresentou remoção de níquel para níveis inferiores ao prescrito na legislação vigente (Brasil, 2005). Nesta condição operacional, o teor de níquel residual manteve-se acima de 3mg.L^{-1} , durante todo ensaio. A condição de ensaio com teor de sulfeto superior ao estequiométrico também não favoreceu a remoção de níquel uma vez que o teor residual do metal apresentou-se sempre acima de 6mg.L^{-1} , durante todo ensaio, o que equivale à uma eficiência de remoção de níquel em torno de 97%. Este comportamento da precipitação de níquel em condição de excesso de sulfeto corrobora com os resultados obtidos no trabalho de Lewis e van Hille (2006), no qual foi avaliado o efeito do excesso de sulfeto na precipitação de níquel de uma solução sintética a 2000mg.L^{-1} . Nessas condições, o teor remanescente de níquel em solução foi de $65,7\text{mg.L}^{-1}$, o que equivale a uma remoção de 96,7%, e os autores atribuíram este fato à formação de complexos polisulfetos de níquel.

Karbanee *et al.* (2008) também estudaram a precipitação de sulfeto de níquel e observaram que a proporção estequiométrica entre o metal e o sulfeto proporciona melhores resultados, assim como observado nesta dissertação. Os autores realizaram este estudo em sistema contínuo, com solução sintética a 200mg.L^{-1} de íons níquel, a 25°C . Quando os ensaios foram conduzidos para a razão estequiométrica de 1:1 e de 1:1,05, os valores de pH eram, respectivamente, 8,5 e 9, e a remoção de níquel foi completa. Nas condições de excesso de sulfeto (razões de Ni:S iguais a 1:1,2 e 1:1,5), a remoção de níquel foi de apenas 70%, sendo que o pH do meio ficou em 11,5. Os pesquisadores concluíram que a presença de íons bisulfeto (HS^-) em solução provoca a redissolução dos sulfetos de níquel precipitados pela formação de complexos. Logo, os

resultados obtidos nessa dissertação para precipitação de níquel se aproximaram bastante do observado por estes pesquisadores.

A figura 6.7 apresenta o comportamento da remoção de cobre e de níquel para cada condição de ensaio em relação à supersaturação.

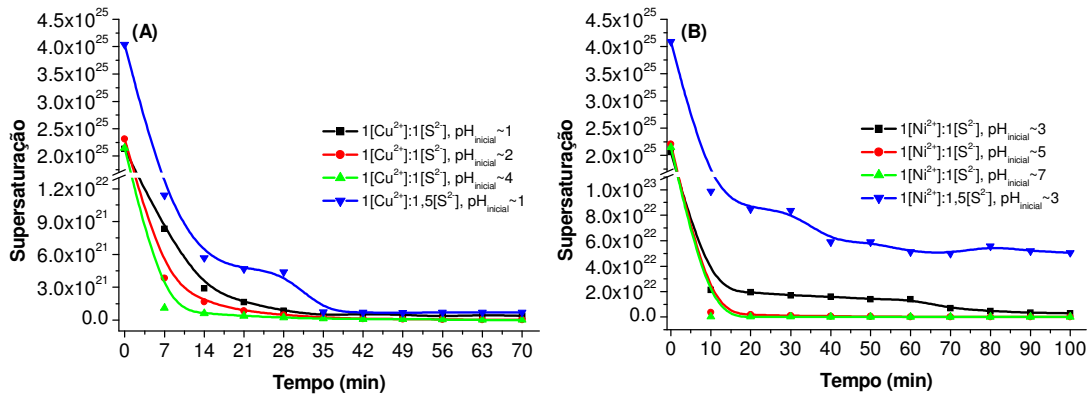


Figura 6.7. Comportamento da supersaturação durante os ensaios realizados em sistema contínuo, em diferentes valores de pH, para precipitação de cobre (A) e de níquel (B); tempo de residência de 7 minutos (A) e de 10 minutos (B).

A supersaturação calculada, considerando-se as concentrações iniciais com proporção estequiométrica entre metal e sulfeto, foi de $2,3 \times 10^{25}$ para os ensaios realizados para cobre e de $2,2 \times 10^{25}$, para níquel. Para os ensaios realizados com excesso de sulfeto, a supersaturação inicial estava em $4,0 \times 10^{25}$ tanto para os ensaios com cobre quanto para níquel. Através desta figura 6.7, observa-se que os sistema de precipitação de cobre entrou em regime à partir de 6 tempos de residência, o que equivale a 42 minutos de ensaio, mesmo em condição de excesso de sulfeto. Para a precipitação de níquel, com proporção estequiométrica entre o íons de níquel e de sulfeto e pH inicial em 5 e em 7, observa-se que o sistema de precipitação entrou em regime a partir do segundo tempo de residência.

Lewis e Swartbooi (2006), que investigaram a precipitação de níquel na concentração de 2000mg.L^{-1} e proporção estequiométrica de sulfeto, em reator de leito fluidizado, calcularam a supersaturação do sistema através da equação 6.2.2, na qual $C_{M^{2+}}$ é a

concentração do metal em solução, $a_{S^{2-}}$ é a concentração de íons sulfeto e K_{ps} é a constante de solubilidade do referido sulfeto metálico.

$$S = \sqrt{\frac{C_{M^{2+}} \cdot C_{S^{2-}}}{K_{ps}}} \quad (6.2.2)$$

Para efeitos de comparação com a literatura, aplicou-se esta equação 6.2.2 aos dados da presente dissertação.

Dessa forma, observa-se uma supersaturação inicial em $1,3 \times 10^{13}$ tanto para os ensaios com cobre quanto para níquel, similar à supersaturação de $1,9 \times 10^{13}$ do sistema estudado por Lewis e Swartbooi (2006). Estes autores expuseram que a concentração elevada de níquel é mais condizente com a realidade das concentrações industriais e que o reator utilizado por eles não foi adequado para este sistema, uma vez que a eficiência de remoção obtida foi de 85% para o níquel.

O trabalho realizado por van Hille *et al.* (2005) fez uma discussão a cerca da supersaturação em sistemas de precipitação. Os autores expuseram que elevados valores de supersaturação favorecem a nucleação homogênea e, conseqüentemente, mais precipitados finos são formados, podendo contribuir para a ineficiência da precipitação. Porém, eles observaram que a precipitação de sulfeto de cobre para elevada supersaturação não seguiu esta tendência e apresentou uma eficiência de remoção de 99,5%. Os autores sugeriram, então, que a química do sistema de sulfeto de cobre é mais complexa e a supersaturação não é um parâmetro conveniente para ser avaliado em conjunto com a eficiência de precipitação.

Os resultados da análise de distribuição de tamanho das partículas estão dispostos nas figuras 6.8.

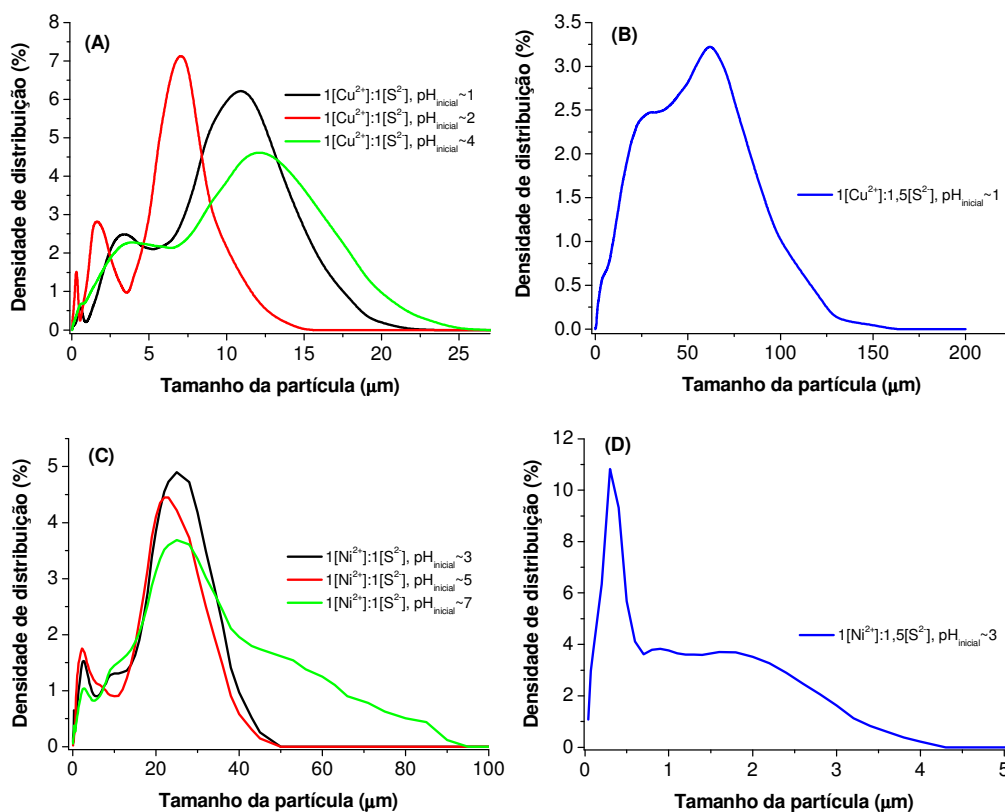


Figura 6.8. Distribuição do tamanho da partícula para os precipitados de cobre (A e B) e níquel (C e D) para os ensaios em sistema contínuo.

O ensaio realizado com razão estequiométrica de 1:1,5 de cobre:sulfeto apresentou o diâmetro médio de partícula de 34,08μm. As demais condições, ou seja, para a proporção estequiométrica entre o metal e sulfeto e valores iniciais de pH em 1, 2 e 4 apresentaram, respectivamente, 5,26μm, 6,70μm e 6,83μm de diâmetro médio das partículas formadas, cujos valores foram condizentes com a supersaturação. Sahinkaya *et al.* (2009) obtiveram um tamanho médio de partícula de 37μm quando precipitaram cobre, em sistema contínuo, com sulfeto biogênico em excesso (0,75Cu:1S), valor bem próximo ao obtido nessa dissertação para a condição de excesso de sulfeto. No trabalho de Sampaio *et al.* (2009), foi estudada a precipitação seletiva de cobre e zinco, ambos a 600mg.L⁻¹, proporção estequiométrica de sulfeto e pH mantido em 3, e obtiveram um tamanho médio de 36μm das partículas de sulfetos de cobre formadas; entretanto, eles consideraram que esse tamanho de partícula foi proporcionado pela aglomeração e não apenas pelo crescimento. Dessa forma, é possível que os precipitados formados no

presente trabalho, durante a precipitação de cobre com excesso de sulfeto também tenham sido aglomerados.

Na condição estequiométrica entre metal e sulfeto, a precipitação de níquel produziu partículas maiores que de cobre. Os tamanhos médios das partículas formadas foram de $8,63\mu\text{m}$, $9,35\mu\text{m}$ e $11,89\mu\text{m}$ para os respectivos valores iniciais de pH 3, 5 e 7. O ensaio realizado com valor inicial de pH 7 apresentou supersaturação mais baixa que as demais condições, $1,66 \times 10^9$ e levou à eficiência de remoção mais alta, de 99,95% aos 100 minutos de ensaio. Com excesso de sulfeto, o diâmetro médio foi de $5,31\mu\text{m}$. Com isso, observa-se que a precipitação de níquel apresentou ligação com a supersaturação e com a eficiência de remoção, ou seja, o ensaio com supersaturação mais elevada proporcionou a formação de partículas mais finas e com isso a eficiência de remoção foi mais baixa.

A figura 6.9 apresenta os difratogramas de raios-X obtidos para os precipitados de cobre formados durante os ensaios em sistema contínuo.

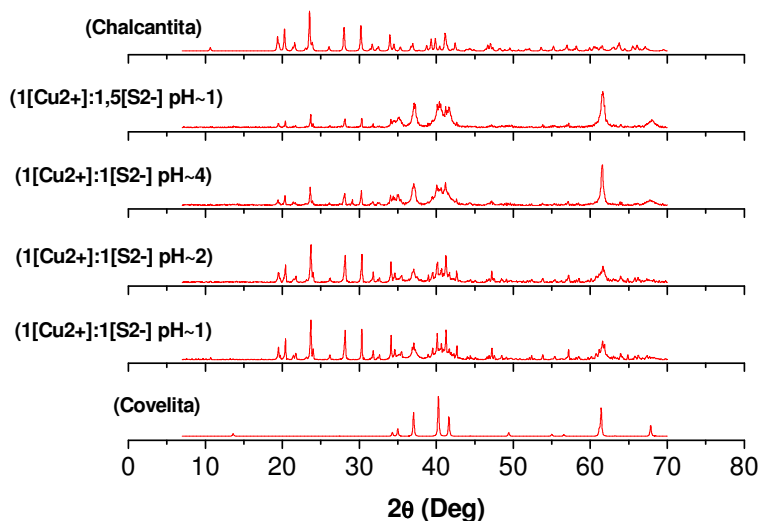


Figura 6.9. Difratogramas de raios-X dos precipitados de cobre formados durante os ensaios realizados em sistema contínuo e difratogramas padrões da covelita e da chalcantita.

Avaliando-se a figura 6.9, pode-se inferir que para todas as condições de ensaio em sistema contínuo, o cobre foi precipitado na forma de CuS (covelita), uma vez que os picos característicos dessa fase (A), em 37°, 40°, 41° e 62° estão todos presentes nos demais difratogramas. Os picos presentes até 35° são compatíveis com os picos da chalcantita (CuSO₄.5H₂O), para esta mesma região, o que indica que as amostras podem ter apresentado uma pequena oxidação. Sampaio *et al.* (2009), durante o estudo de precipitação de cobre com sulfeto de sódio em sistema contínuo, também identificaram os precipitados como covelita (CuS), através da análise de difração de raios-X.

Na figura 6.10, são apresentados os difratogramas de raios-X para os precipitados de níquel.

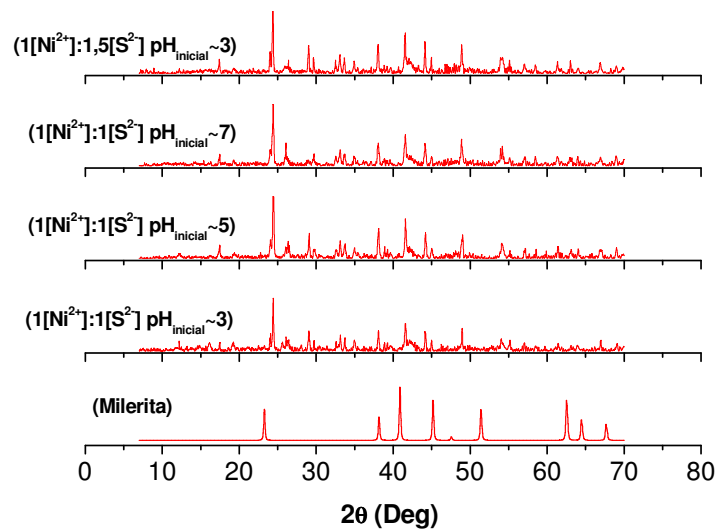


Figura 6.10. Difratogramas de raios-X dos precipitados de níquel formados durante os ensaios realizados em sistema contínuo e difratograma padrão da milerita.

Os difratogramas gerados para os precipitados de níquel permitem inferir que, embora os precipitados formados não tenham apresentado alto grau de cristalinidade, o que é evidenciado pela falta de linearidade da linha de base, a fase formada foi a NiS, milerita. Também pela análise de difração de raios-X, Sampaio *et al.* (2010) confirmaram que o níquel foi precipitado em sistema contínuo, na forma de milerita.

Outros resultados dos ensaios conduzidos em sistema contínuo para a avaliação da precipitação dos sulfetos de cobre e de níquel estão dispostos no Apêndice III e no Apêndice IV, respectivamente.

6.3. Modelamento da cinética de precipitação em sistema contínuo

A figura 6.11 apresenta a imagem dos precipitados dos sulfetos de cobre e níquel, obtida por microscopia óptica.

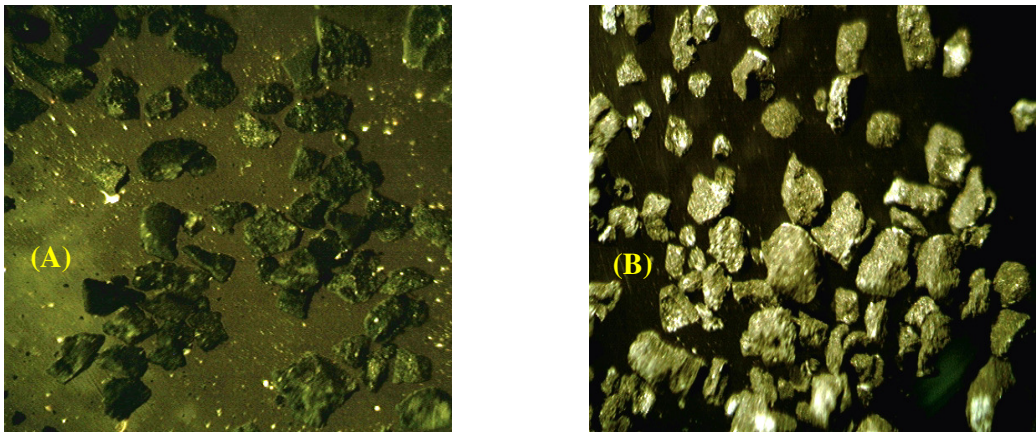


Figura 6.11. Imagem de microscopia óptica característica, com aumento de 25x, dos sulfetos de cobre (A) e de níquel (B) precipitados em sistema contínuo.

Como pode ser observado pela figura 6.11, os precipitados de sulfeto de cobre e de níquel apresentaram formas arredondadas, o que explica o valor de 0,9 do fator forma determinado pelo *software* Quantikov Image Analyzer ®.

As taxas de nucleação e de crescimento podem ser determinadas a partir da distribuição do tamanho dos cristais e são obtidas através de um balanço populacional aplicado ao reator MSMPR – *Mixed Suspension Mixer Precipitation Removal*, que é um reator de mistura perfeita.

A densidade populacional n , na faixa de tamanho ΔL , é definida através da relação:

$$\lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta L} = \frac{dN}{dL} = n \quad (6.3.1)$$

Assim, o número de cristais dN na faixa dL é, então, ndL , e o número de cristais presentes na distribuição entre os tamanhos L_1 e L_2 é dado por:

$$\Delta N = \int_{L_1}^{L_2} ndL \quad (6.3.2)$$

Em um cristalizador MSMPR, tem-se:

- Operação contínua: operação em regime estacionário em condições de supersaturação constante;
- Suspensão agitada: cristalizador idealmente agitado sem classificação interna;
- Remoção agitada do produto: remoção do produto sem classificação
- Volume constante do cristalizador.

Isso leva à seguinte expressão do balanço populacional para a faixa de tamanho L_1 e L_2 :

$$n_1 \cdot V \cdot G_1 \cdot \Delta t = n_2 \cdot V \cdot G_2 \cdot \Delta t + Q \cdot n \cdot \Delta L \cdot \Delta t \quad (6.3.3)$$

Onde Q é a taxa de alimentação ou descarga volumétrica ($m^3 \cdot s^{-1}$), n é a densidade média da população (número de partículas. $m^{-3} \cdot m^{-1}$), n_i é a densidade da população para tamanho i , V é o volume do reator (m^3), G_i é a taxa de crescimento linear ($m \cdot s^{-1}$) para o tamanho i , ΔL é o intervalo de tamanho L_1 e L_2 (m) e Δt o intervalo de tempo (s). O termo $n_i \cdot V \cdot G_i \cdot \Delta t$ representa o número de cristais crescendo e alcançando a faixa de tamanho L_1 a L_2 e $Q \cdot n \cdot \Delta L \cdot \Delta t$, o número de cristais na faixa de tamanho L_1 a L_2 removidos do cristalizador (Leão, 2003). Reescrevendo a equação 6.3.3, chega-se à seguinte expressão:

$$V \cdot (G_2 \cdot n_2 - G_1 \cdot n_1) + Q \cdot n \cdot \Delta L = 0 \quad (6.3.4)$$

Aplicando limite a esta equação 6.3.4, para $\Delta L \rightarrow 0$, tem-se:

$$V \cdot \left[\frac{d(n \cdot G)}{dL} \right] + n \cdot Q = 0 \quad (6.3.5)$$

Assumindo-se que:

- O tempo médio de residência τ seja igual a V/Q ;
- A taxa de crescimento seja independente do tamanho do cristal;
- Não há aglomeração nos cristais;
- Não há quebra dos cristais;
- Os núcleos surgem a $L_1 = 0$.

A equação 6.3.5 assume a forma:

$$G \cdot \frac{dn}{dL} + \frac{n}{\tau} = 0 \quad (6.3.6)$$

Integrando a equação e chamando n_0 à densidade populacional de partículas de tamanho zero (núcleos):

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = - \int_0^L \frac{dL}{G\tau} \quad (6.3.7)$$

Logo,

$$n(L) = n_0 \cdot e^{-L/G\tau} \quad (6.3.8)$$

Através do gráfico logaritmo da densidade populacional versus o tamanho dos cristais, considerando-se a equação 6.3.8, obtém-se uma reta de inclinação equivalente a $(-1/G\tau)$ e intercepto n_0 . Desta forma, determina-se a taxa de crescimento desde que se conheça o valor do tempo de residência τ .

A taxa de nucleação para os núcleos de tamanho 0 (zero) é determinada por:

$$B_0 = n_0 \cdot G \quad (6.3.9)$$

A expressão 6.3.9 permite a determinação da taxa de nucleação a partir da taxa de crescimento, obtida pela equação 6.3.8, determinada pela distribuição de tamanho dos cristais. A taxa de crescimento B_0 não é a verdadeira taxa de nucleação, pois os cristais surgem com vários tamanhos. Entretanto, seu valor é considerado uma boa aproximação da verdadeira taxa de nucleação (Leão, 1993).

Entretanto, as curvas de densidade populacional (n) versus o tamanho dos cristais (L) para os resultados obtidos nessa dissertação não foram lineares. Mydlarz e Jones (1994) expuseram que, quando o logaritmo neperiano de n não é função linear L , a taxa de crescimento do cristal não é independente do tamanho dos cristais. Assim, os autores reescreveram a equação 6.3.6 da seguinte forma:

$$\frac{d[n(L).G(L)]}{dL} + \frac{n(L)}{\tau} = 0 \quad (6.3.10)$$

Segundo Mydlarz e Jones (1994), a solução da equação 6.3.10 requer informações que descrevam a dependência da taxa de crescimento com o tamanho do cristal, tema considerado por vários pesquisadores (Hostomsky e Jones, 1991; Tanrikulo *et al.*, 2000, Zauner e Jones, 2000), os quais utilizaram diferentes modelos, sendo um deles o proposto por Abegg, Stevens e Larson:

$$G(L) = G_0 \cdot (1 + a \cdot L)^b \quad (6.3.11)$$

Combinado as equações 6.3.10 e 6.3.11 e integrando, obtém-se:

$$n(L) = n_0 \cdot (1 + a \cdot L)^{-b} \exp \left[\frac{1}{(1-b)} - \frac{(1+a \cdot L)^{(1-b)}}{(1-b)} \right] \quad (6.3.12)$$

Onde a e b são parâmetros do crescimento obtidos experimentalmente, e b é dado por:

$$b = a \cdot \tau \cdot G \quad (6.3.13)$$

Nessa dissertação, a taxa de crescimento foi obtida pelo modelo de Abegg, Stevens e Larson (modelo ASL), aplicado ao ajuste dos dados experimentais obtidos durante os ensaios de precipitação em sistema contínuo para precipitação de cobre e de níquel. A figura 6.12 mostra o ajuste da equação 6.3.12 aos dados experimentais. Em seguida, foi obtida a taxa de nucleação (B_0), através da equação 6.3.9.

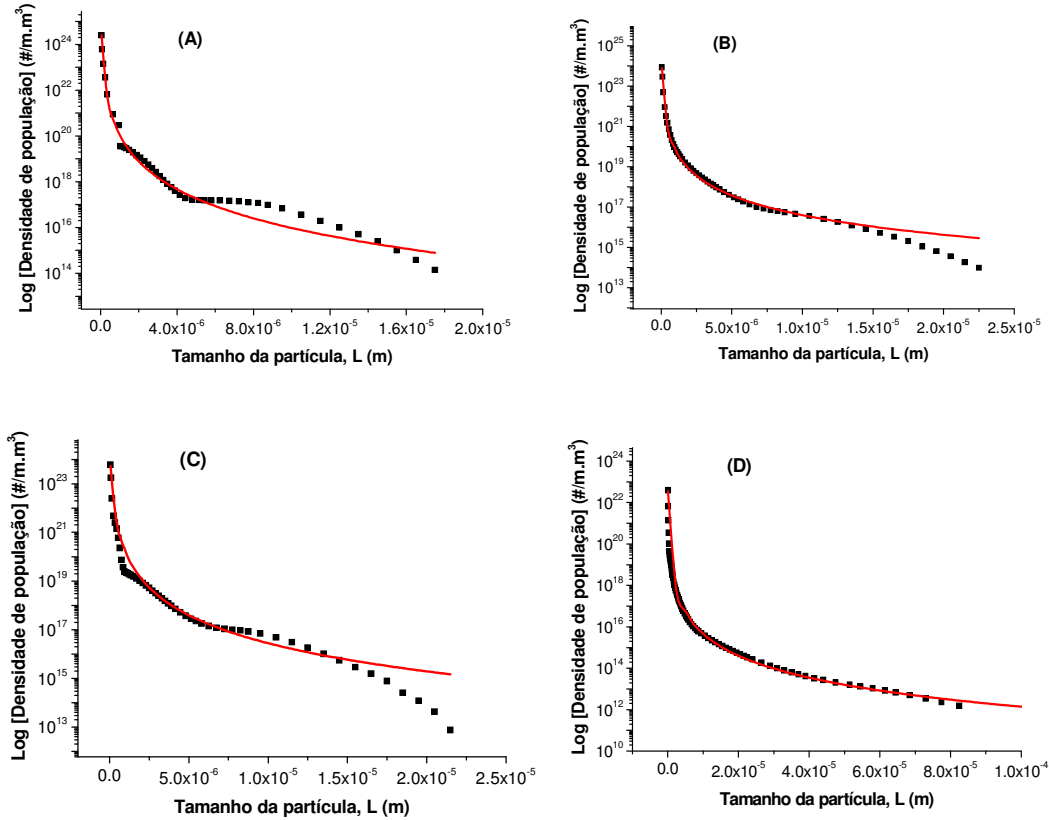


Figura 6.12. Aplicação do modelo ASL aos ensaios de precipitação do cobre em sistema contínuo para relação estequiométrica entre cobre e sulfeto e pH inicial 1 (A), 2 (B) e 4 (C); proporção entre cobre e sulfeto de 1:1,5 e pH inicial 1 (D).

Na tabela 6.1 estão dispostos os parâmetros gerados pelos modelos ASL n_0 , a , b e coeficientes de correlação (R^2), assim como as respectivas taxas calculadas de crescimento (G) e de nucleação (B_0), para a precipitação de cobre.

Tabela 6.1. Dados cinéticos da precipitação de cobre (Modelo ASL).

Condição do ensaio	S^*	pH^{**}	n_0 ($m^{-1}.m^{-3}$)	a (m^{-1})	b	R^2	G ($m.s^{-1}$)	B_0 ($m^{-3}.s^{-1}$)
1[Cu ²⁺]:1[S ²⁻], pH _{inicial} ~ 1	1,97x10 ¹⁰	1,5	4,67x10 ³⁴	2,79x10 ¹¹	0,92	0,999	8,53x10 ⁻¹⁵	3,98x10 ²⁰
1[Cu ²⁺]:1[S ²⁻], pH _{inicial} ~ 2	5,32 x10 ⁹	2,5	3,20x10 ²⁹	8,40x10 ⁸	3,23	0,984	2,84x10 ⁻¹²	9,07x10 ¹⁷
1[Cu ²⁺]:1[S ²⁻], pH _{inicial} ~ 4	2,99 x10 ⁹	4,1	5,29x10 ²⁴	1,2 x10 ⁷	3,87	0,990	1,90x10 ⁻¹⁰	1,00x10 ¹⁵
1[Cu ²⁺]:1,5[S ²⁻], pH _{inicial} ~ 1	2,65 x10 ¹⁰	1,6	4,94x10 ²³	1,67x10 ⁷	3,53	0,994	1,42x10 ⁻¹⁰	7,03x10 ¹³

* Supersaturação calculada pela equação 6.2.2

** pH do meio reacional

Como pode ser observado pela figura 6.12 e pelos resultados dispostos na tabela 6.1, o modelo ASL representou a cinética de precipitação de sulfeto de cobre, especialmente para os menores tamanhos de partícula. Para a razão estequiométrica $1[\text{Cu}^{2+}]:1,5[\text{S}^{2-}]$, os precipitados formados apresentaram uma taxa de crescimento maior que para as demais condições com $1[\text{Cu}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$, de $1,42 \times 10^{-10} \text{m.s}^{-1}$ e, como esperado, uma taxa de nucleação mais baixa, de $7,03 \times 10^{13} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. A condição de precipitação em valor de pH mais baixo, foi a que formou mais finos, uma vez que a taxa de nucleação foi mais alta e a taxa de crescimento mais baixa que as demais, com os respectivos valores de $3,98 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ e $8,53 \times 10^{-15} \text{m.s}^{-1}$. Dessa forma, os resultados gerados pelo modelo ASL para as taxas de crescimento e nucleação estão coerentes com o comportamento apresentados pela cinética de precipitação em cada uma das condições estudadas. A maior taxa de crescimento para a condição de excesso de sulfeto é possível consequência da aglomeração, conforme discutido.

A figura 6.13 mostra o ajuste dos dados experimentais à equação 6.3.12, nos ensaios de precipitação de níquel. Na tabela 6.2 estão dispostos os parâmetros gerados pelos modelos ASL n_0 , a , b e coeficientes de correlação (R^2), assim como as respectivas taxas calculadas de crescimento (G) e de nucleação (B), para a precipitação de níquel.

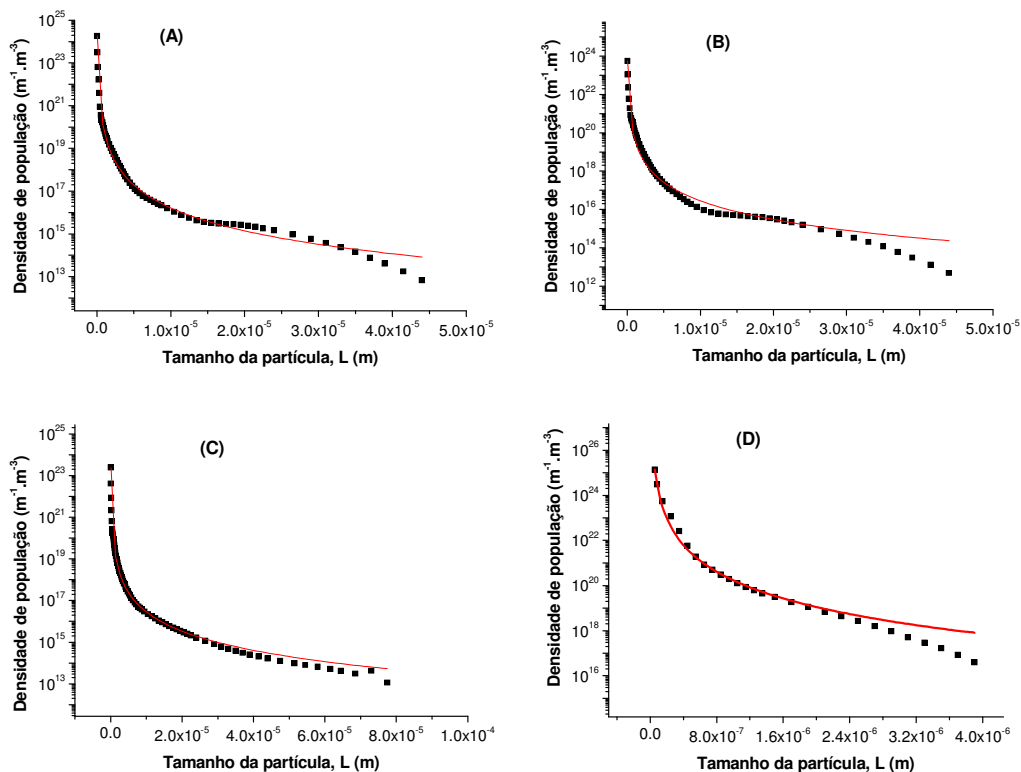


Figura 6.13. Modelo ASL, aplicado aos ensaios de precipitação em sistema contínuo para precipitação de níquel para condição estequiométrica entre níquel e sulfeto e pH inicial 3 (A), 5 (B) e 7 (C) e proporção entre níquel e sulfeto de 1:1,5 e pH inicial 3 (D).

Tabela 6.2. Dados cinéticos da precipitação de níquel (Modelo ASL).

Condição do ensaio	S^*	pH ^{**}	n_0 ($m^{-1} \cdot m^{-3}$)	a (m^{-1})	b	R^2	G (m/s)	B_0 ($m^{-3} \cdot s^{-1}$)
1[Ni ²⁺]:1[S ²⁻], pH _{inicial} ~ 3	$5,39 \times 10^{10}$	8,8	$6,07 \times 10^{33}$	$7,65 \times 10^9$	3,56	0,998	$2,18 \times 10^{-13}$	$1,32 \times 10^{21}$
1[Ni ²⁺]:1[S ²⁻], pH _{inicial} ~ 5	$4,92 \times 10^9$	9,5	$1,45 \times 10^{31}$	$3,10 \times 10^9$	3,23	0,997	$9,36 \times 10^{-13}$	$7,81 \times 10^{18}$
1[Ni ²⁺]:1[S ²⁻], pH _{inicial} ~ 7	$1,66 \times 10^9$	10,9	$1,33 \times 10^{29}$	$5,28 \times 10^8$	3,94	0,999	$3,16 \times 10^{-12}$	$4,69 \times 10^{17}$
1[Ni ²⁺]:1,5[S ²⁻], pH _{inicial} ~ 3	$2,25 \times 10^{11}$	11,7	$5,01 \times 10^{31}$	$1,78 \times 10^9$	3,07	0,998	$5,39 \times 10^{-13}$	$4,20 \times 10^{19}$

* Supersaturação calculada pela equação 6.2.2

** pH do meio reacional

De acordo com os dados modelados para a cinética de precipitação de níquel, para a taxa nucleação mais baixa, em $4,69 \times 10^{17} m^{-3} \cdot s^{-1}$ tem-se a maior taxa de crescimento dos precipitados de sulfeto de níquel, de $3,16 \times 10^{-12} m \cdot s^{-1}$, dados cinéticos que refletem a precipitação de níquel com o pH inicial da solução sintética em 7, melhor condição para precipitação deste metal com sulfeto de sódio.

Comparando-se dos resultados expostos nas tabelas 6.1 e 6.2, pode-se observar que os coeficientes de correlação (R^2) obtidos para cada modelo gerado, parâmetros que expressam a relação dos valores experimentais com os preditos pelo modelo, revelam que o modelo ASL apresentou ótimo ajuste aos dados da precipitação do sulfeto de níquel.

Al-Tarazi *et al.* (2004) estudaram a precipitação de sulfeto de zinco em reator MSMPR, com o intuito avaliar o efeito da supersaturação, do pH e da velocidade de agitação nas taxas de nucleação, de crescimento e aglomeração. A supersaturação variou de 1×10^8 a 5×10^{10} , o que proporcionou uma taxa de crescimento oscilando de 5×10^{-19} a $9 \times 10^{-18} \text{m.s}^{-1}$ e taxa de nucleação entre 1×10^9 a $1 \times 10^{15} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. Assim como observado nessa dissertação, os autores notaram que valores de supersaturação mais elevados contribuem para uma taxa de nucleação maior e, portanto, taxa de crescimento mais baixa. Os autores ainda observaram que além da supersaturação, a velocidade de agitação também influencia bastante na cinética de precipitação uma vez que um aumento na velocidade de agitação resulta na diminuição da supersaturação local o, que beneficia o crescimento do cristal pela diminuição da nucleação. Segundo os autores, o valor de pH que melhor contribui para a precipitação do metal está relacionado com o ponto iso-elétrico. Além disso, Mokone *et al* (2009) reportaram que a carga elétrica da superfície da partícula está relacionada com as reações físico-químicas na superfície, assim, as partículas de sulfeto de cobre produzidas em excesso de sulfeto estariam mais sujeitas a apresentar carga superficial mais elevada e, conseqüentemente, seriam estabilizadas em suspensão devido a repulsão elétrica. E ainda, esse fenômeno estaria relacionado com o tamanho de partícula, pois quanto menor o tamanho da partícula, maior a carga superficial. A figura 6.14 apresenta a relação entre pH e potencial zeta para os sulfetos de cobre e de níquel, respectivamente.

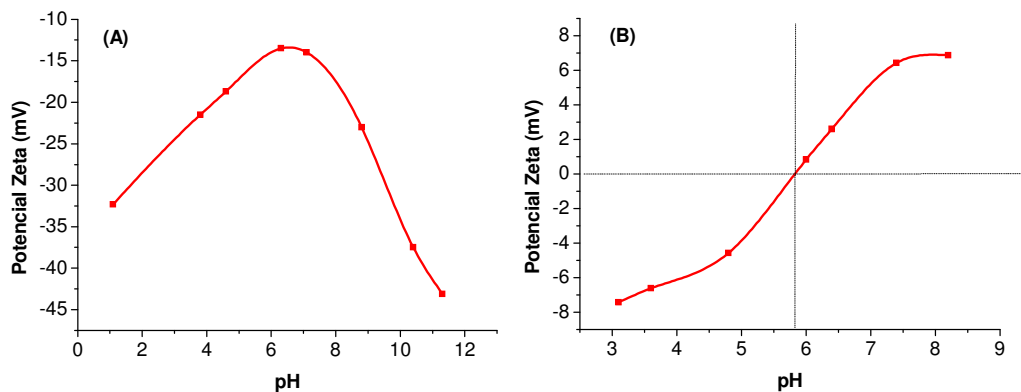


Figura 6.14. Comportamento do potencial zeta com o pH para o sulfeto de cobre (A) e o sulfeto de níquel (B) precipitados em sistema contínuo à temperatura ambiente $22\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Observa-se que o sulfeto de cobre apresentou carga superficial negativa para todos os valores de pH, sendo que para o valor de pH em torno de 1,5 (pH do meio reacional para a condição de ensaio com excesso de sulfeto) a carga superficial foi mais negativa, o que corrobora com as observações feitas por Mokone *et al* (2009). O sulfeto de níquel formado apresentou ponto iso-elétrico próximo de pH 6. Al-Tarazi *et al.* (2004) observaram que aumentando-se o pH acima do ponto iso-elétrico do sulfeto de zinco (pH5), a taxa de crescimento aumentou e a taxa de nucleação diminuiu, o que demonstra relação entre taxa de crescimento e carga elétrica na superfície da partícula. Com isso, pode-se inferir que, para a precipitação do sulfeto de níquel em condições estequiométricas entre metal e sulfeto, a taxa de crescimento aumentou para valores de pH do meio reacional maiores, os quais estão acima do potencial iso-elétrico, variando de $2,18 \times 10^{-13} \text{m.s}^{-1}$ até $9,36 \times 10^{-13} \text{m.s}^{-1}$.

Os dados utilizados para o modelamento da cinética de precipitação de cobre e de níquel estão dispostos no apêndice V e no apêndice VI, respectivamente.

6.4. Ensaios para a remoção de metais com sulfeto biogênico

Os ensaios realizados com sulfeto de sódio permitiram inferir que a proporção estequiométrica entre os íons do metal e do sulfeto proporcionam uma melhor eficiência de remoção. Como a solução contendo sulfeto biogênico, produzida em reator de redução de sulfato, apresentava teor de sulfeto de 98mg.L^{-1} , os ensaios de remoção de

cobre com sulfeto biogênico foram conduzidos com solução de cobre a uma concentração de 190mg.L^{-1} e valores de pH inicial em 1, 2 e 4, mesmos valores dos ensaios realizados com sulfeto de sódio. De forma análoga, nos ensaios realizados com níquel, utilizou-se uma solução a 175mg.L^{-1} do metal, para os valores de pH inicial em 3, 5 e 7. Tanto para o cobre quanto para o níquel, também foi testada a condição de 50% de excesso de sulfeto. Os ensaios foram conduzidos em batelada, por um tempo total de ensaio de 60 minutos. Os resultados obtidos para cada condição de ensaio estão dispostos na tabela 6.3.

Tabela 6.3. Resultados dos ensaios realizados com sulfeto biogênico para remoção de cobre e de níquel em solução.

Ensaio de remoção de cobre							
pH _{inicial}	[Cu ²⁺]:[S ²⁻]	pH _{final}	[Cu ²⁺] _{inicial} (mg.L ⁻¹)	[S ²⁻] _{inicial} (mg.L ⁻¹)	[Cu ²⁺] _{final} (mg.L ⁻¹)	[S ²⁻] _{final} (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)
1,2	1:1	5,5	186,8	98,0	31,76	13,44	83,00
2,0	1:1	6,3	186,8	98,0	0,28	0,00	99,85
4,1	1:1	7,4	186,8	98,0	1,43	4,32	99,23
1,3	1:1,5	8,9	90,1	98,0	5,66	57,31	93,72
Ensaio de remoção de níquel							
pH _{inicial}	[Ni ²⁺]:[S ²⁻]	pH _{final}	[Ni ²⁺] _{inicial} (mg.L ⁻¹)	[S ²⁻] _{inicial} (mg.L ⁻¹)	[Ni ²⁺] _{final} (mg.L ⁻¹)	[S ²⁻] _{final} (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)
3,1	1:1	7,3	172,1	98,0	46,50	15,96	72,98
5,3	1:1	9,4	172,1	98,0	0,09	0,00	99,95
6,8	1:1	10,7	172,1	98,0	0,23	85,66	99,87
3,2	1:1,5	5,2	90,7	98,0	3,26	43,82	96,41

Os resultados da remoção de cobre e de níquel com sulfeto biogênico indicam que, assim como aconteceu com o sulfeto de sódio, a remoção destes metais não foi beneficiada em valores de pH mais baixos (pH 1 para o cobre e 3 para o níquel), o que é devido a maior solubilidade do sulfeto metálico em pH mais baixo.

O comportamento da remoção de cobre com sulfeto de sódio mostrou-se semelhante ao observado com o sulfeto de sódio, onde as remoções em pH 2 e 4 foram semelhantes. Luptakova e Kusnierova (2005) também utilizaram sulfeto biogênico para remover cobre em solução e, de forma similar ao encontrado nesse trabalho, o valor mais

adequado de pH foi de 2,5. O comportamento da remoção de cobre com sulfeto biogênico foi similar ao reportado na literatura, uma vez que, em valores de pH próximos a 1 e para a condição de excesso de sulfeto, a remoção do referido metal não foi beneficiada devido a formação de complexos, conforme observado por Cao *et al.* (2009).

Os resultados obtidos para a remoção de níquel com sulfeto biogênico indicam que o valor de 5 para o pH inicial da solução do metal foi o mais apropriado, o que corrobora com o trabalho de Bijmans *et al.* (2009). Em pH inicial de 6,8, a concentração de níquel também atingiu níveis abaixo de 1mg.L^{-1} prescrito na legislação (Brasil, 2005), porém, a concentração de sulfeto residual não foi condizente com a relação estequiométrica, indicando que neste pH, o níquel foi removido por outra espécie presente na solução de sulfeto biogênico. Esposito *et al.* (2006) também observaram a interferência de outras espécies presentes na solução de sulfeto biogênico, como o fosfato e o carbonato, quando esses autores estudaram a precipitação de zinco com sulfeto biogênico.

A figura 6.15 apresenta os difratogramas de raios-X obtidos para os precipitados de cobre formados durante os ensaios realizados com sulfeto biogênico.

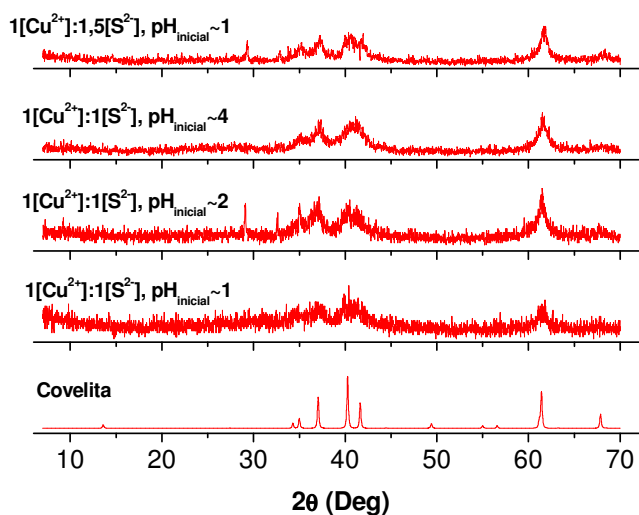


Figura 6.15. Difratogramas de raios-X dos precipitados de cobre formados durante os ensaios realizados com sulfeto biogênico, e difratograma padrão da covelita.

Pelos difratogramas de raios-X dispostos na figura 6.15, observa-se que, para todas as condições de ensaio, o cobre foi precipitado como covelita (CuS), apesar de ser evidente a falta de cristalinidade dos precipitados

Na figura 6.16, pode-se observar os difratogramas de raios-X dos precipitados de níquel formados durante os ensaios realizados com sulfeto biogênico.

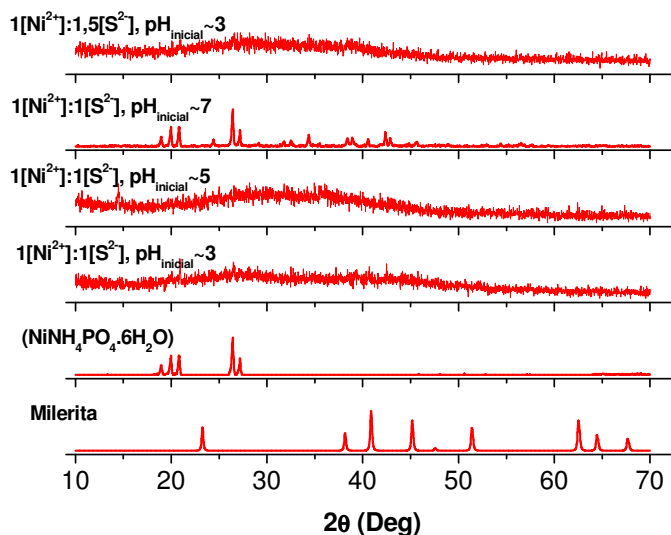


Figura 6.16. Difratogramas de raios-X dos precipitados de níquel formados durante os ensaios realizados com sulfeto biogênico e difratogramas padrões da milerita e do fosfato hexahidratado de amônio e níquel.

Comparando o difratograma para o precipitado $1[\text{Ni}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$, $\text{pH} \sim 7$ da figura 6.16 com os dados da tabela 6.3, observa-se que o níquel foi precipitado na forma de fosfato e não como sulfeto, o que justifica a concentração residual de sulfeto de $85,66\text{mg.L}^{-1}$ para uma eficiência de remoção de 99,87%, em condição de proporção estequiométrica entre os íons níquel e sulfeto. A presença de fosfato na solução do bioreator, contendo o sulfeto biogênico é oriunda dos nutrientes utilizados para o crescimento das BRS. Para as demais condições de ensaio para a precipitação de cobre e de níquel, a fase das partículas formadas apresentou-se como amorfa, não sendo possível sua identificação por difração de raios-X.

A cinética de precipitação de cobre com sulfeto biogênico, em sistema contínuo, pode ser observada na figura 6.17.

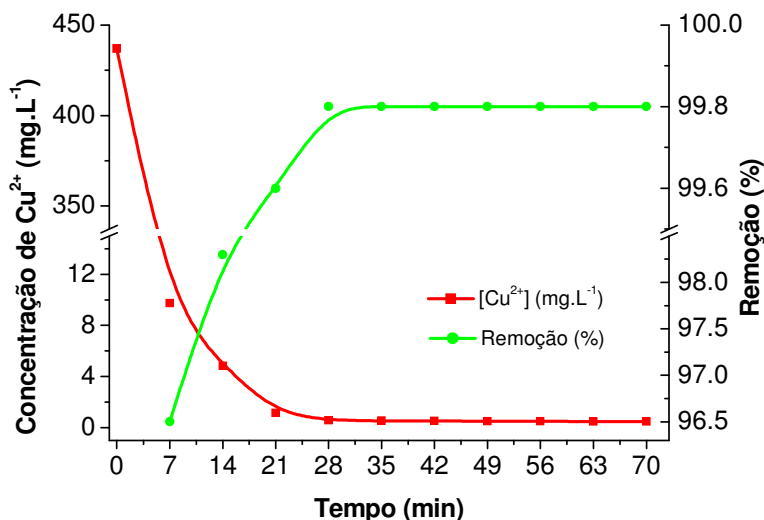


Figura 6.17. Cinética de precipitação de cobre em solução sintética a 437mg.L^{-1} com sulfeto biogênico em sistema contínuo para $1[\text{Ni}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$, pH inicial da solução em 2, tempo de residência de 7 minutos e temperatura de $22\pm 2^\circ\text{C}$.

Como pode ser observado pela figura 6.17, a partir de 28 minutos de ensaio, o que equivale a quatro tempos de residência, a eficiência de remoção de cobre permanece constante em 99,8%, o que corresponde a uma concentração residual deste metal em solução de $0,5\text{mg.L}^{-1}$. O pH do meio reacional era de 7,8 durante todo ensaio. No estudo feito por Bhagat *et al.* (2004) para a precipitação de cobre em solução sintética, na concentração de 1080mg.L^{-1} , com sulfeto biogênico e proporção estequiométrica entre o metal e sulfeto, o pH do meio reacional era de 7,6 e o teor residual de cobre em solução foi de $7,12\text{ mg/L}$ (99,3% de eficiência de remoção). Neste trabalho, para os ensaios de precipitação de cobre com sulfeto de sódio, na proporção estequiométrica entre os íons e pH do meio reacional em 4, o teor residual de cobre foi de $0,24\text{ mg.L}^{-1}$ e a eficiência de remoção foi de 99,9%, ou seja, a remoção de cobre com sulfeto de sódio apresentou-se mais eficiente. Porém, em ambos os casos, o teor residual de cobre em solução ficou abaixo do teor máximo de 1mg.L^{-1} estabelecido pela portaria nº357 do Conama (Brasil, 2005).

O difratograma de raios-X dos precipitados formados em sistema contínuo com sulfeto biogênico está disponível na figura 6.18.

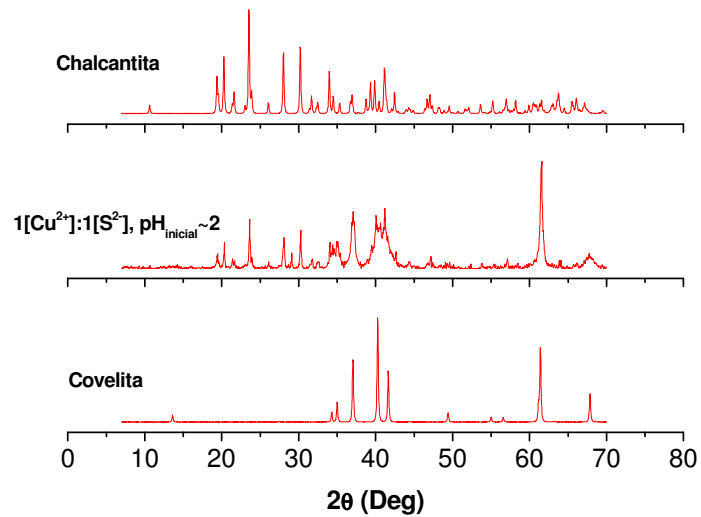


Figura 6.18. Difratograma de raios-X para o precipitado de cobre em sistema contínuo com sulfeto biogênico e difratogramas padrões da covelita e da chalcantita.

Através dos difratogramas de raios-x dispostos na figura 6.18, observa-se que o cobre foi precipitado com sulfeto biogênico na forma de covelita.

A cinética de precipitação de níquel em sistema contínuo, com sulfeto biogênico está disponível na figura 6.19.

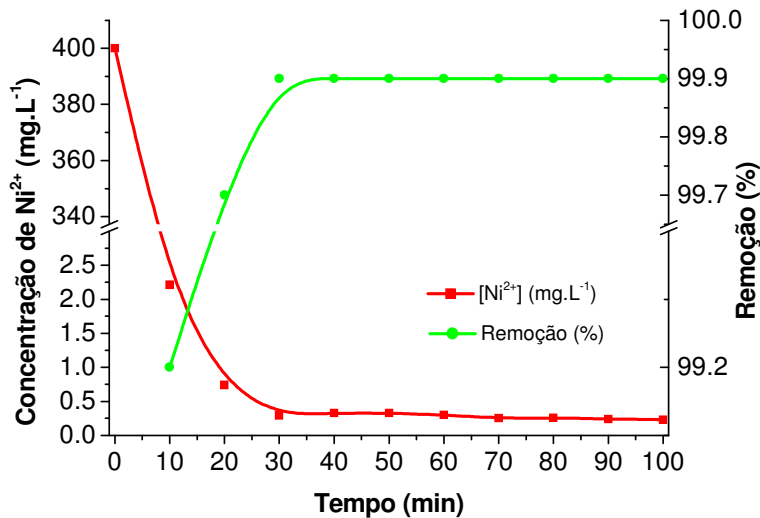


Figura 6.19. Cinética de precipitação de níquel em solução sintética a 400mg.L^{-1} com sulfeto biogênico em sistema contínuo; proporção estequiométrica entre níquel e sulfeto e valor inicial de pH da solução em 5, tempo de residência de 10 minutos e temperatura $22\pm 2^\circ\text{C}$.

Observa-se, pela figura 6.19, que a partir de 20 minutos de ensaio, o teor residual de níquel em solução já está inferior à concentração residual máxima estabelecida (Brasil, 2005), de 2mg.L^{-1} , sendo que a eficiência de remoção do metal permaneceu estável em 99,9% à partir de 40 minutos de ensaio (quatro tempos de residência), com teor residual de $0,25\text{mg.L}^{-1}$. Neste estudo, o pH do meio reacional manteve-se constante em 8,5 durante todo tempo de ensaio. Bijmans *et al.* (2009) também estudaram a precipitação de níquel, em sistema contínuo com sulfeto biogênico e obtiveram uma eficiência de remoção de 99,6%. Estes pesquisadores utilizaram uma solução sintética com concentração do metal de 1000mg.L^{-1} e pH ajustado para 5,5; dessa forma, o teor residual de níquel em solução de foi $0,4\text{mg.L}^{-1}$. A precipitação de níquel em sistema contínuo, com sulfeto biogênico, apresentou teor residual do metal inferior ao apresentado para cobre durante a precipitação com a mesma fonte de sulfeto.

Na figura 6.20, está apresentado o difratograma de raios-X do precipitado de níquel com sulfeto biogênico em sistema contínuo.

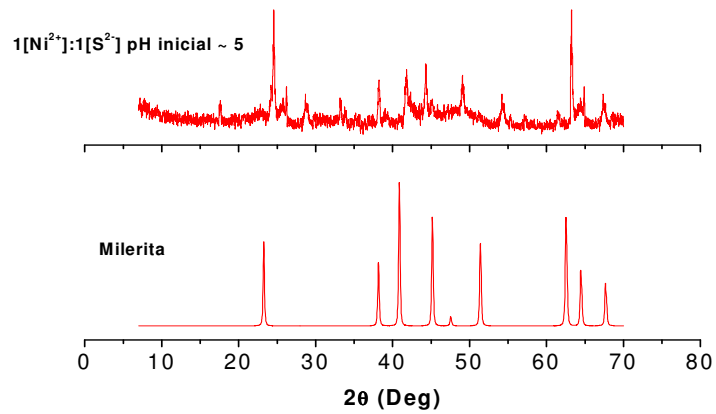


Figura 6.20. Difratoograma de raios-X do precipitado de níquel com sulfeto biogênico em sistema contínuo e difratoograma padrão da milerita.

Pela figura 6.20, observa-se que milerita (NiS) é a fase dos precipitados de níquel com sulfeto biogênico.

7. Conclusões

O Na_2S pode ser empregado para precipitação de cobre e de níquel em solução, na forma de sulfeto metálico uma vez que os teores residuais iguais a $0,07\text{mg.L}^{-1}$ e $0,13\text{mg.L}^{-1}$ foram obtidos, respectivamente, para os ensaios em sistema contínuo realizados com proporção estequiométrica entre o metal e o sulfeto e pH do meio reacional em 4 para cobre e em 10,5, para níquel. Essas foram as melhores condições para precipitação de cobre e de níquel. Esta tecnologia pode ser aplicada como tratamento de efluentes industriais, uma vez que os teores residuais destes metais ficam abaixo do estabelecido na legislação vigente.

O modelo de Abegg-Stevens-Larson aplicado à precipitação contínua de cobre e de níquel em reator agitado produz dados compatíveis com a realidade do sistema de precipitação. Para os ensaios realizados sob as melhores condições, as taxas de nucleação e de crescimento apresentaram, respectivamente, os valores de $1 \times 10^{15} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ e de $1,9 \times 10^{-10} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ para o cobre e de $4,7 \times 10^{17} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ e de $3,2 \times 10^{-12} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ para o níquel. Estes valores estão de acordo com a supersaturação e a distribuição do tamanho das partículas formadas.

O uso do sulfeto biogênico, em condição de proporção estequiométrica, possibilita a precipitação de cobre em pH 6,5 e de níquel em pH 5, também a níveis residuais abaixo do prescrito na legislação. Estas foram as melhores condições para a precipitação destes metais com sulfeto biogênico, porém a formação de sulfeto metálico está condicionada à composição da solução que contém o sulfeto biogênico e ao valor do pH do meio, sendo que a precipitação pode ocorrer na forma de outros compostos como fosfato, por exemplo.

8. Sugestões de trabalhos futuros

Sugere-se examinar outros modelos matemáticos para a predição das taxas de nucleação e crescimento, assim como a comparação dos resultados obtidos nestas condições. O estudo da formação de fosfato e de outras possíveis espécies formadas durante a precipitação dos metais com sulfeto biogênico também é recomendado.

9. Referências Bibliográficas

AL-TARAZI, M.; HEESINK, A.B.M.; AZZAM, M.O.J.; YAHYA, S.A. e VERSTEEG, G.F. Crystallization kinetics of ZnS precipitation; an experimental study using the mixed-suspension-mixed-product-removal (MSMPR) method. *Crystallization Research Technology*, v.39. 2004.

ANDREASSEN, J. P. e HOUNSLOW, M.J. Growth and aggregation of vaterite in seeded-batch experiments. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, v.50, p.2772-2782. 2004.

APHA, Standard methods for examination of water and wastewater, 20^a Edição: Washington, 2002.

BHAGAT, M.; BURGESS, J. E.; ANTUNES, A. P. M.; WHITELEY, C. G e DUNCAN, J. R. Precipitation of mixed metal residues from wastewater utilizing biogenic sulphide. *Minerals Engineering*, v.17, p.925-932. 2004.

BIJMANS, M.F.M.; VAN HELVOORT, P.J; DAR, S.A.; DOPSON, M.; LENS, P.N.L. e BUISMAN, C.J.N. Selective recovery of nickel over iron from a nickel-iron solution using microbial sulfate reduction in a gas-lift bioreactor. *Water Research*, v.43, p.853-861. 2009.

BIOTEQ. Disponível em <http://bioteq.ca/water-treatment>, acessado em novembro de 2010.

BOONSTRA, J.; VAN LIER, JANSSEN, G.; DIJMAN, H. e BUISMAN, C.J.N. Biological treatment of acid mine drainage. *In: Biohydrometallurgy and the Environment Toward the mining of the 21st Century - Proceedings of the International BioHydrometallurgy Symposium*; 559-567 p. 1999.

BOUWMAN, A.M., BOSMA, J.C., VONK, P., WESSELINGH, J.A., FRIJLINK, H.K. Which shape factor(s) best describe granules?. *Power Technology*, v.146, p.66-72.

BRAMLEY, A.S.; HOUNSLOW, M.J. e RYALL, R.L. Aggregation during precipitation from solution: A method for extracting rates from experimental data. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.183, p.155-165. 1996.

BRASIL. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento e estabelecimento de condições e padrões de efluentes. CONAMA. Portaria 357: 23 p. 2005.

BRIERLEY, C.L. Biohydrometallurgical prospects. *Hydrometallurgy*, v.104, p.324-328. 2010.

BUTLER, J.N.; COGLEY, D.R. Ionic equilibrium: Solubility and pH calculations. Canadá: Wiley Inter-Science. 1ª Edição. 1998. 559p.

CAO, J.; ZHANG, G.; MAO, Z.; FANG, Z. e YANG, C. Precipitation of valuable metals from bioleaching solution by biogenic sulfides. *Minerals Engineering*, v.22, p.289-295. 2009.

DEMOPOULOS, G.P. Aqueous precipitation and crystallization for the production of particulate with desired properties. *Hydrometallurgy*, v.96, p.199-214. 2009.

ESPOSITO, G.; VEEKEN, A.; WEIJMA, J.; LENS, P.N.L. Use of biogenic sulfide for ZnS precipitation. *Separation and Purification Technology*, v.51, p. 31-39. 2006

DJEDIDI, Z.; MÉDARD, B.; CHEIKH, R.B.; MERCIES, G.; TYAGI, R.D. e BLAIS, J.R. Comparative study of dewatering characteristics of metal precipitates generated during treatment synthetic polymetallic and AMD solutions. *Hydrometallurgy*, v.98, p.247-256. 2009.

GARSIDE, J.; MERMANN, A. e NYVLT, J. Measurement of crystal growth and nucleation rates. Rugby: Institution of Chemical Engineers (AIChE). 2ª Edição. 2002. 202 p.

GIANNOPOULOU, I. e PANIAS, D. Differential precipitation of copper and nickel from acidic polymetallic solutions. *Hydrometallurgy*, v.90, p.137-146. 2008.

GRIGORYAN, A. A.; CORNISH, S. L.; BUZIAK, B.; LIN, S.; CAVALLARO, A.; ARENSDORF, J. J. e VOORDOUW, G. Competitive oxidation of volatile fatty acids by sulfate- and nitrate-reducing bacteria from an oil field in Argentina. *Applied Environmental Microbiology*, v.74, p.4324-4335. 2008.

HAKSONEN, A.H.; VANHANEN-RIEKKOLA, M.L. e PUHAKKA, J.A. Optimization of metal sulphide precipitation in fluidized-bed treatment of acidic wastewater. *Water Research*, v.37, p.255-266. 2003.

HARMANDAS, N.G.; KOUTSOUKOS, P.G. The formation of iron (II) sulfides in aqueous solutions. *Journal of Crystal Growth*, v. 167, p.719-724. 1996.

HARVEY, A. *Modern Analytical Chemistry*. USA: McGraw-Hill. 1ª Edição.2000. 816 p.

HOSTOMSKY, J. e JONES, A.G. Calcium carbonate crystallization, agglomeration and form during continuous precipitation from solution. *Journal of Physics D.: Applied Physics*, v.24, p.165-170. 1991.

HUANG, S.; CAPEL, E.L.; MANNING, D.A.C. e RICKARD, D. The composition of nanoparticulate nickel sulfide. *Chemical Geology*, v.277, p.207-213. 2020.

HUISMAN, J.L.; SCHOUTEN, G. e SCHULTZ, C. Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry. *Hydrometallurgy*, v.83, p.106-113. 2006.

JIMÉNES-RODRÍGUES, A.M.; DURÁN-ARRANTES, M.M.; BORJA, R.; SANCHEZ, E.; COLMENAREJO, M.F. e RAPOSO, F. Heavy metal removal from acid mine drainage water using biogenic hydrogen sulphide and effluent from anaerobic treatment: Effect of pH. *Journal of Hazardous Materials*, v.165, p.759-765. 2009.

KARBANEE, N.; VAN HILLE, R.P. e LEWIS, A.E. Controlled nickel sulfide precipitation using gaseous hydrogen sulfide. *Industrial Engineering and Chemical Research*, v.47, p.1596-1602. 2008.

LEÃO, V.A. Efeito de impurezas na precipitação de gesso. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, UFMG, Belo Horizonte, 182 p. 1993.

LEWIS, A. e SWARTBOOI, A. Factories affecting metal removal in mixed sulphide precipitation. *Chemical Engineering Technology*, v.29, p.277-280. 2006.

LEWIS, A. e VAN HILLE, R. An exploration into the sulphide precipitation method and its effect on metal sulphide removal. *Hydrometallurgy*, v.81, p.197-204. 2006.

LEWIS, A.E. Review of metal sulphide precipitation. *Hydrometallurgy*, v.104, p.222-234. 2010.

LUPTAKOVA, A. e KUSNIEROVA, M. Bioremediation of acid mine drainage contaminated by SRB. *Hydrometallurgy*. 77: 97-102 p. 2005.

MERSMANN, A. Crystallization and precipitation. *Chemical Engineering and Processing*, v.38, p.345-353. 1999.

MOKONE, T.P.; VAN HILLE, R.P. e LEWIS, A.E. Mechanisms responsible for particle formation during metal sulphide precipitation processes. *In: Water Institute of Southern Africa & International Mine Association: Proceedings of International Mine Water Conference*, p.343-350; Pretoria. 2009.

MOKONE, T.P.; VAN HILLE, R.P. e LEWIS, A.E. Effect of solution chemistry on particle characteristics during metal sulfide precipitation. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.351, p.10-18. 2010.

OLIVAS, A.; REYES-CRUZ, J.; AVALOS, M.; PETRANOVSKII, V. e FUENTES, S. Influence of preparation conditions on formation of crystalline phases of nickel sulfide. *Materials Letters*, v.38, p.141-144. 1999.

RITCEY, G.M. Tailings management in gold plant. *Hydrometallurgy*, v.78, p.3-20. 2005.

SAHINKAYA, E.; GUNGOR, M.; BAYRAKDAR, A.; YUCESAY, Z. e UYANIK, S. Separation recovery of copper and zinc from acid mine drainage using biogenic sulfide. *Journal of Hazardous Materials*, v.171, p.901-906. 2009.

SAMPAIO, R.M.M; TIMMERS, R.A.; KOCKS, N.; ANDRÉ, V.; DUARTE, M.T.; VAN HULLEBUSH, E.D.; FARGES, F. e LENS, P.N.L. Zn-Ni sulfide selective precipitation: The role of supersaturation. *Separation and Purification Technology*, v.74, p.108-118. 2010.

SAMPAIO, R.M.M; TIMMERS, R.A.; XU, Y.; KEESMAN, K.J. e LENS, P.N.L. Selective precipitation of Cu from Zn in a pH controlled continuously stirred tank reactor. *Journal of Hazardous Materials*, v.165, p.256-265. 2009.

SHEORAN, A.S. e SHEORAN, V. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, v.19, p.105-116. 2006.

SKOOG, D.A.; WEST, D.M.; HOLLER, F.J.; CROUCH, S.R. *Fundamentos de Química Analítica*. São Paulo: Thomson. 8^a Edição. 2006. 1124 p.

TANRIKULU, S.U.; EROGLU, I.; BULUTCU, A.N.; OZKAR, S. Crystallization kinetics of ammonium perchlorate in MSMPR crystallizer. *Journal of Crystal Growth*, V.208, p. 533-540. 2000

TOKUDA, H.; KUCHAR, D.; MIHARA, N.; MATSUDA, H. e FUKUTA, T. Study on reaction kinetics and selective precipitation of Cu, Zn, Ni, Sn with H₂S in single-metal and multi-metal systems. *Chemosphere*, v.73, p.1448-1452. 2008.

VAN HILLE, R.P.; PETERSON, K.A. e LEWIS, A.E. Copper sulphide precipitation in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Science*, v.60, p.2571-2578. 2005.

VEEKEN, A.H.M.; AKOTO, L.; POL, L.W.H. e WEIJMA, J. Control of the sulfide (S^{2-}) concentration form optimal zinc removal by sulfide precipitation in a continuously stirred tank reactor. *Water Research*, v.37, p.3709-3717. 2003.

ZAUNER, R. e JONES, A.G. Determination of nucleation, growth, agglomeration and disruption kinetics from experimental precipitation data: the calcium oxalate system. *Chemical Engineering Science*, v.55, p.4219-4232. 2000.

10. Apêndice

Apêndice I.

Resultados dos ensaios em batelada para remoção de cobre em solução sintética com sulfeto de sódio.

Tabela 10.1. Resultados da cinética de precipitação de sulfeto de cobre

Tempo (min)	[Cu²⁺] (mg.L⁻¹)	Remoção (%)	pH_{inicial} ~1	[Cu²⁺] (mg.L⁻¹)	Remoção (%)	pH_{inicial} ~ 2	[Cu²⁺] (mg.L⁻¹)	Remoção (%)	pH_{inicial} ~4
0	262	-	1,3	262	-	2,1	262	-	3,9
2	7,59	97,11	1,7	5,95	97,73	2,4	10,76	95,90	7,9
4	1,55	99,41	1,7	0,75	99,71	2,5	7,71	97,06	7,9
6	0,21	99,92	1,7	0,62	99,76	2,5	4,69	98,21	7,9
8	0,87	99,67	1,6	0,51	99,81	2,5	1,53	99,42	7,8
10	2,53	99,04	1,6	1,37	99,48	2,5	1,05	99,60	7,8
20	6,11	97,67	1,6	3,75	98,57	2,5	2,53	99,04	7,8
30	8,91	96,60	1,6	4,20	98,40	2,5	2,94	98,88	7,7
40	13,46	94,87	1,6	5,23	98,01	2,5	3,26	98,76	7,7
50	15,24	94,19	1,6	5,30	97,98	2,5	3,34	98,73	7,8
60	21,63	91,76	1,6	5,55	97,88	2,5	3,78	98,56	7,8

Apêndice II

Resultados dos ensaios em batelada para remoção de níquel em solução sintética com sulfeto de sódio.

Tabela 10.2. Resultados da cinética de precipitação de sulfeto de níquel.

Tempo (min)	[Ni ²⁺] (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)	pH _{inicial} ~3	[Ni ²⁺] (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)	pH _{inicial} ~ 5	[Ni ²⁺] (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)	pH _{inicial} ~7
0	225	-	3,2	225	-	5,1	225	-	7,0
2	18,42	93,31	8,2	15,04	94,54	9,1	12,25	95,55	9,0
4	12,73	95,38	8,6	5,72	97,92	9,1	5,98	97,83	9,1
6	7,06	97,44	8,7	4,03	98,54	9,2	2,10	99,24	9,2
8	2,48	99,10	8,8	1,89	99,31	9,4	0,13	99,95	9,3
10	0,72	99,74	8,9	0,37	99,87	9,4	0,00	100,00	9,4
20	3,23	98,83	8,9	1,08	99,61	9,2	0,40	99,85	9,4
30	8,19	97,02	8,8	5,09	98,15	9,0	1,45	99,47	9,2
40	16,83	93,89	8,7	13,73	95,01	8,9	4,68	98,30	9,1
50	24,06	91,26	8,7	18,74	93,19	8,8	7,18	97,39	9,0
60	39,16	85,77	8,5	29,92	89,13	8,7	15,53	94,36	8,9

Apêndice III

Resultados dos ensaios em sistema contínuo para precipitação de cobre em solução sintética com sulfeto de sódio.

Tabela 10.3. Resultados dos ensaios de remoção de cobre com sulfeto de sódio, em sistema contínuo.

Tempo (min)	[Cu ²⁺]:[S ²⁻] = 1:1															[Cu ²⁺]:[S ²⁻] = 1:1,5				
	pH-1					pH-2					pH-4					pH-1				
	pH	[Cu ²⁺] (mg,L ⁻¹)	[S ²⁻] (mg,L ⁻¹)	Remoção (%)	S	pH	[Cu ²⁺] (mg,L ⁻¹)	[S ²⁻] (mg,L ⁻¹)	Remoção (%)	S	pH	[Cu ²⁺] (mg,L ⁻¹)	[S ²⁻] (mg,L ⁻¹)	Remoção (%)	S	pH	[Cu ²⁺] (mg,L ⁻¹)	[S ²⁻] (mg,L ⁻¹)	Remoção (%)	S
0	1,2	279	144	-	9,23 x 10 ¹²	2,2	288	150	-	9,61 x 10 ¹²	4,0	281	145	-	9,28 x 10 ¹²	1,3	287	265	-	1,27 x 10 ¹³
7	1,5	5,49	2,85	98,03	9,12 x 10 ¹⁰	2,9	3,68	1,95	98,72	6,18 x 10 ¹⁰	4,1	2,10	1,00	99,25	3,34 x 10 ¹⁰	1,5	2,73	7,83	99,05	1,07 x 10 ¹¹
14	1,5	3,24	1,68	98,84	5,38 x 10 ¹⁰	2,8	2,40	1,30	99,17	4,07 x 10 ¹⁰	4,2	1,43	0,79	99,49	2,45 x 10 ¹⁰	1,6	1,26	8,50	99,56	7,55 x 10 ¹⁰
21	1,5	2,38	1,29	99,15	4,04 x 10 ¹⁰	2,7	1,81	0,87	99,37	2,89 x 10 ¹⁰	4,1	1,07	0,67	99,62	1,95 x 10 ¹⁰	1,6	0,82	10,73	99,71	6,84 x 10 ¹⁰
28	1,5	1,65	0,96	99,41	2,90 x 10 ¹⁰	2,6	1,24	0,72	99,57	2,18 x 10 ¹⁰	4,1	0,86	0,50	99,69	1,51 x 10 ¹⁰	1,6	0,66	12,48	99,77	6,62 x 10 ¹⁰
35	1,5	1,13	0,67	99,59	2,01 x 10 ¹⁰	2,6	0,80	0,57	99,72	1,56 x 10 ¹⁰	4,1	0,68	0,38	99,76	1,17 x 10 ¹⁰	1,6	0,10	13,81	99,97	2,71 x 10 ¹⁰
42	1,5	1,43	0,78	99,49	2,44 x 10 ¹⁰	2,6	0,76	0,32	99,74	1,14 x 10 ¹⁰	4,1	0,50	0,31	99,82	9,08 x 10 ⁰⁹	1,6	0,10	13,26	99,97	2,66 x 10 ¹⁰
49	1,5	1,27	0,71	99,54	2,19 x 10 ¹⁰	2,6	0,55	0,28	99,81	9,05 x 10 ⁰⁹	4,1	0,51	0,35	99,82	9,74 x 10 ⁰⁹	1,6	0,10	12,64	99,97	2,59 x 10 ¹⁰
56	1,5	1,05	0,59	99,62	1,81 x 10 ¹⁰	2,6	0,51	0,20	99,82	7,36 x 10 ⁰⁹	4,1	0,23	0,40	99,92	6,99 x 10 ⁰⁹	1,6	0,10	13,63	99,97	2,69 x 10 ¹⁰
63	1,4	1,25	0,74	99,55	2,22 x 10 ¹⁰	2,6	0,48	0,17	99,84	6,59 x 10 ⁰⁹	4,0	0,11	0,21	99,96	3,50 x 10 ⁰⁹	1,6	0,10	13,03	99,97	2,63 x 10 ¹⁰
70	1,5	1,12	0,65	99,60	1,97 x 10 ¹⁰	2,6	0,41	0,13	99,86	5,32 x 10 ⁰⁹	4,0	0,07	0,24	99,98	2,99 x 10 ⁰⁹	1,5	0,10	13,18	99,97	2,65 x 10 ¹⁰

Apêndice IV

Resultados dos ensaios em sistema contínuo para precipitação de níquel em solução sintética com sulfeto de sódio.

Tabela 10.4. Resultados dos ensaios realizados em sistema contínuo para remoção de níquel com sulfeto de sódio

Tempo (min)	[Ni ²⁺]:[S ²⁻] = 1:1										[Ni ²⁺]:[S ²⁻] = 1:1,5									
	pH-3					pH-5					pH-7				pH-3					
	pH	[Ni ²⁺] (mg.L ⁻¹)	[S ²⁻] (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)	S	pH	[Ni ²⁺] (mg.L ⁻¹)	[S ²⁻] (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)	S	pH	[Ni ²⁺] (mg.L ⁻¹)	[S ²⁻] (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)	S	pH	[Ni ²⁺] (mg.L ⁻¹)	[S ²⁻] (mg.L ⁻¹)	Remoção (%)	S
0	3,1	266	146	-	9,09 x 10 ¹²	5,0	279	149	-	9,41 x 10 ¹²	7,1	274	148	-	9,28 x 10 ¹²	3,2	264	292	-	1,28 x 10 ¹³
10	7,8	8,74	4,57	96,71	1,46 x 10 ¹¹	9,4	3,68	1,90	98,68	6,10 x 10 ¹⁰	10,7	0,69	0,41	99,75	1,23 x 10 ¹⁰	11,7	9,80	18,96	96,29	3,14 x 10 ¹¹
20	8,1	8,23	4,45	96,91	1,40 x 10 ¹¹	9,5	2,40	1,38	99,14	4,20 x 10 ¹⁰	10,9	0,71	0,40	99,74	1,23 x 10 ¹⁰	11,6	9,39	16,98	96,44	2,91 x 10 ¹¹
30	8,4	7,75	4,13	97,09	1,30 x 10 ¹¹	9,4	1,81	1,04	99,35	3,16 x 10 ¹⁰	10,9	0,68	0,49	99,75	1,33 x 10 ¹⁰	11,7	8,68	18,14	96,71	2,89 x 10 ¹¹
40	8,5	7,35	4,10	97,24	1,27 x 10 ¹¹	9,5	1,57	0,75	99,44	2,50 x 10 ¹⁰	10,8	0,61	0,30	99,78	9,86 x 10 ⁰⁹	11,7	10,11	10,98	96,17	2,43 x 10 ¹¹
50	8,6	7,09	3,71	97,33	1,18 x 10 ¹¹	9,6	1,24	0,65	99,55	2,07 x 10 ¹⁰	10,9	0,59	0,31	99,78	9,86 x 10 ⁰⁹	11,7	10,15	10,92	96,16	2,43 x 10 ¹¹
60	8,6	6,95	3,76	97,39	1,18 x 10 ¹¹	9,3	0,80	0,37	99,71	1,25 x 10 ¹⁰	10,8	0,51	0,24	99,81	8,07 x 10 ⁰⁹	11,7	7,60	12,66	97,12	2,26 x 10 ¹¹
70	8,7	4,65	2,74	98,25	8,23 x 10 ¹⁰	9,4	0,51	0,21	99,82	7,55 x 10 ⁰⁹	10,8	0,43	0,21	99,84	6,93 x 10 ⁰⁹	11,6	7,84	11,96	97,03	2,23 x 10 ¹¹
80	8,7	4,10	2,14	98,46	6,83 x 10 ¹⁰	9,5	0,52	0,23	99,81	7,97 x 10 ⁰⁹	10,8	0,23	0,10	99,92	3,50 x 10 ⁰⁹	11,7	6,75	15,56	97,44	2,36 x 10 ¹¹
90	8,7	3,51	1,81	98,68	5,81 x 10 ¹⁰	9,5	0,49	0,17	99,82	6,65 x 10 ⁰⁹	10,8	0,17	0,06	99,94	2,33 x 10 ⁰⁹	11,6	6,09	16,04	97,69	2,28 x 10 ¹¹
100	8,8	3,31	1,65	98,76	5,39 x 10 ¹⁰	9,5	0,38	0,12	99,86	4,92 x 10 ⁰⁹	10,9	0,13	0,04	99,95	1,66 x 10 ⁰⁹	11,7	6,25	15,22	97,63	2,25 x 10 ¹¹

Apêndice V

Dados utilizados para o modelamento da cinética de precipitação do sulfeto de cobre.

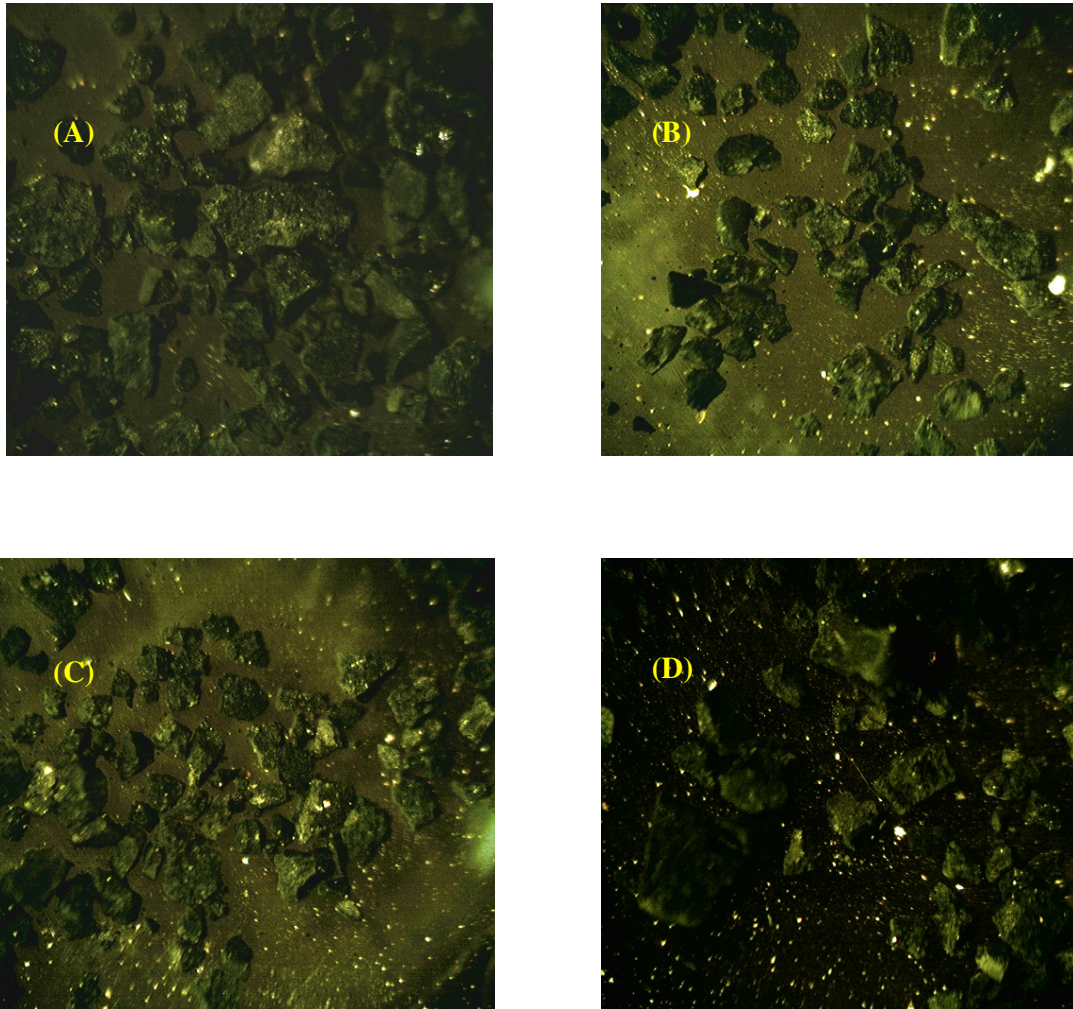


Figura 10.1. Imagens de microscopia óptica dos sulfetos de cobre precipitados em sistema contínuo e $1[\text{Cu}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 1 (A), 2 (B) e 4 (C); $1[\text{Cu}^{2+}]:1,5[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 1 (D).

Tabela 10.5 Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.1 (A).

ELEMENTO NR.	largura (mm)	perimetro (mm)	area (mm2)	diametro (mm)	F.forma
1	2.78E+05	8.73E+05	6.06E+04	2.78E+05	1,00
2	1.51E+05	4.76E+05	1.79E+04	1.51E+05	0,99
3	2.10E+05	6.61E+05	3.47E+04	2.10E+05	1,00
4	1.83E+05	5.75E+05	2.63E+04	1.83E+05	1,00
5	3.45E+05	1.08E+06	9.35E+04	3.45E+05	1,00
6	3.65E+05	1.14E+06	1.04E+05	3.65E+05	1,00
7	3.00E+05	9.46E+05	7.08E+04	3.00E+05	0,99
8	3.19E+05	1.01E+06	8.00E+04	3.19E+05	0,99
9	4.00E+05	1.26E+06	1.26E+05	4.00E+05	1,00
10	3.24E+05	1.02E+06	8.26E+04	3.24E+05	1,00
11	2.79E+05	8.73E+05	6.09E+04	2.79E+05	1,00
12	2.53E+05	7.94E+05	5.02E+04	2.53E+05	1,00
13	2.75E+05	8.67E+05	5.95E+04	2.75E+05	1,00
14	1.69E+05	5.29E+05	2.25E+04	1.69E+05	1,00
15	3.22E+05	1.01E+06	8.15E+04	3.22E+05	1,00
16	2.86E+05	9.00E+05	6.41E+04	2.86E+05	1,00
17	3.37E+05	1.06E+06	8.94E+04	3.37E+05	1,00
18	2.18E+05	6.88E+05	3.74E+04	2.18E+05	0,99
19	2.31E+05	7.28E+05	4.18E+04	2.31E+05	0,99
20	1.95E+05	6.15E+05	3.00E+04	1.95E+05	1,00
21	1.36E+05	4.30E+05	1.46E+04	1.36E+05	0,99
22	1.50E+05	4.70E+05	1.77E+04	1.50E+05	1,00
23	1.59E+05	5.03E+05	2.00E+04	1.59E+05	0,99
24	1.39E+05	4.37E+05	1.51E+04	1.39E+05	1,00
25	3.12E+05	9.79E+05	7.65E+04	3.12E+05	1,00
26	2.22E+05	6.95E+05	3.87E+04	2.22E+05	1,00
27	2.05E+05	6.48E+05	3.31E+04	2.05E+05	0,99
28	9.00E+04	2.84E+05	6.34E+03	8.99E+04	0,99
29	2.22E+05	6.95E+05	3.86E+04	2.22E+05	1,00
30	2.04E+05	6.42E+05	3.27E+04	2.04E+05	1,00
31	2.01E+05	6.35E+05	3.18E+04	2.01E+05	0,99
32	1.49E+05	4.70E+05	1.74E+04	1.49E+05	0,99
33	2.54E+05	8.00E+05	5.07E+04	2.54E+05	0,99
34	7.97E+04	2.51E+05	4.99E+03	7.97E+04	0,99
35	1.22E+05	3.84E+05	1.16E+04	1.22E+05	0,99
36	1.14E+05	3.57E+05	1.02E+04	1.14E+05	1,00
37	1.22E+05	3.84E+05	1.17E+04	1.22E+05	1,00
38	1.38E+05	4.37E+05	1.50E+04	1.38E+05	0,99
39	1.46E+05	4.56E+05	1.66E+04	1.45E+05	1,00
40	1.00E+05	3.18E+05	7.88E+03	1.00E+05	0,98
41	1.47E+05	4.63E+05	1.69E+04	1.47E+05	0,99
42	1.23E+05	3.84E+05	1.19E+04	1.23E+05	1,00
43	1.91E+05	6.02E+05	2.86E+04	1.91E+05	0,99
44	8.07E+04	2.51E+05	5.12E+03	8.07E+04	1,00
45	1.35E+05	4.23E+05	1.43E+04	1.35E+05	1,00
46	6.65E+04	2.12E+05	3.46E+03	6.63E+04	0,97
47	1.59E+05	4.96E+05	1.98E+04	1.59E+05	1,00
48	1.57E+05	4.96E+05	1.94E+04	1.57E+05	0,99
49	1.09E+05	3.44E+05	9.36E+03	1.09E+05	0,99
50	8.70E+04	2.71E+05	5.95E+03	8.70E+04	1,00
51	7.12E+04	2.25E+05	3.98E+03	7.12E+04	0,99
52	1.09E+05	3.44E+05	9.41E+03	1.09E+05	1,00
53	2.18E+05	6.88E+05	3.74E+04	2.18E+05	0,99
54	1.22E+05	3.84E+05	1.17E+04	1.22E+05	1,00
55	1.86E+05	5.82E+05	2.71E+04	1.86E+05	1,00
56	1.05E+05	3.31E+05	8.58E+03	1.04E+05	0,99
57	2.89E+05	9.06E+05	6.57E+04	2.89E+05	1,00
58	1.39E+05	4.37E+05	1.51E+04	1.39E+05	1,00
59	1.36E+05	4.30E+05	1.46E+04	1.36E+05	0,99
60	1.10E+05	3.44E+05	9.54E+03	1.10E+05	1,00
61	2.36E+05	7.41E+05	4.39E+04	2.36E+05	1,00
62	9.21E+04	2.91E+05	6.65E+03	9.20E+04	0,99

Tabela 10.6. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.1 (B).

ELEMENTO NR.	largura (mm)	perimetro (mm)	area (mm2)	diametro (mm)	F.forma
1	5.63E+05	1.77E+06	2.49E+05	5.63E+05	1,00
2	5.27E+05	1.65E+06	2.18E+05	5.27E+05	1,00
3	7.08E+05	2.22E+06	3.93E+05	7.08E+05	1,00
4	4.99E+05	1.57E+06	1.95E+05	4.99E+05	1,00
5	4.12E+05	1.29E+06	1.33E+05	4.12E+05	1,00
6	2.32E+05	7.30E+05	4.25E+04	2.32E+05	1,00
7	3.56E+05	1.12E+06	9.94E+04	3.56E+05	0,99
8	2.99E+05	9.42E+05	7.01E+04	2.99E+05	0,99
9	2.99E+05	9.42E+05	7.03E+04	2.99E+05	1,00
10	3.64E+05	1.14E+06	1.04E+05	3.64E+05	1,00
11	2.52E+05	7.94E+05	4.97E+04	2.52E+05	0,99
12	3.62E+05	1.14E+06	1.03E+05	3.62E+05	0,99
13	2.62E+05	8.26E+05	5.39E+04	2.62E+05	0,99
14	1.99E+05	6.24E+05	3.10E+04	1.99E+05	1,00
15	5.56E+05	1.75E+06	2.43E+05	5.56E+05	1,00
16	2.86E+05	9.00E+05	6.42E+04	2.86E+05	1,00
17	3.10E+05	9.74E+05	7.54E+04	3.10E+05	1,00
18	2.65E+05	8.36E+05	5.50E+04	2.65E+05	0,99
19	6.04E+05	1.89E+06	2.87E+05	6.04E+05	1,00
20	4.03E+05	1.27E+06	1.28E+05	4.03E+05	1,00
21	6.00E+05	1.88E+06	2.82E+05	5.99E+05	1,00
22	3.88E+05	1.22E+06	1.18E+05	3.88E+05	1,00
23	4.59E+05	1.44E+06	1.66E+05	4.59E+05	1,00
24	3.25E+05	1.02E+06	8.28E+04	3.25E+05	1,00
25	4.93E+05	1.55E+06	1.91E+05	4.93E+05	1,00
26	3.85E+05	1.21E+06	1.17E+05	3.85E+05	1,00
27	3.93E+05	1.24E+06	1.21E+05	3.93E+05	0,99
28	3.08E+05	9.63E+05	7.44E+04	3.08E+05	1,00
29	6.63E+05	2.08E+06	3.45E+05	6.63E+05	1,00
30	4.09E+05	1.28E+06	1.31E+05	4.09E+05	1,00
31	3.52E+05	1.10E+06	9.72E+04	3.52E+05	1,00
32	2.68E+05	8.47E+05	5.63E+04	2.68E+05	0,99
33	3.70E+05	1.16E+06	1.08E+05	3.70E+05	1,00
34	2.35E+05	7.41E+05	4.33E+04	2.35E+05	0,99
35	3.82E+05	1.20E+06	1.14E+05	3.82E+05	1,00
36	2.56E+05	8.04E+05	5.14E+04	2.56E+05	1,00
37	4.28E+05	1.34E+06	1.44E+05	4.28E+05	1,00
38	2.44E+05	7.73E+05	4.69E+04	2.44E+05	0,99
39	3.61E+05	1.13E+06	1.02E+05	3.61E+05	1,00
40	2.65E+05	8.36E+05	5.53E+04	2.65E+05	0,99
41	4.21E+05	1.32E+06	1.39E+05	4.21E+05	1,00
42	2.26E+05	7.09E+05	4.03E+04	2.27E+05	1,00
43	3.62E+05	1.14E+06	1.03E+05	3.62E+05	0,99
44	3.42E+05	1.07E+06	9.16E+04	3.42E+05	1,00
45	2.52E+05	7.94E+05	4.97E+04	2.52E+05	0,99
46	3.13E+05	9.84E+05	7.67E+04	3.13E+05	1,00
47	2.08E+05	6.56E+05	3.39E+04	2.08E+05	0,99
48	3.05E+05	9.63E+05	7.33E+04	3.05E+05	0,99
49	4.61E+05	1.45E+06	1.67E+05	4.61E+05	1,00
50	3.28E+05	1.03E+06	8.47E+04	3.28E+05	1,00
51	2.22E+05	6.99E+05	3.88E+04	2.22E+05	1,00
52	2.89E+05	9.10E+05	6.56E+04	2.89E+05	1,00
53	3.32E+05	1.05E+06	8.67E+04	3.32E+05	0,99
54	2.96E+05	9.31E+05	6.90E+04	2.96E+05	1,00
55	2.32E+05	7.30E+05	4.23E+04	2.32E+05	1,00
56	1.65E+05	5.19E+05	2.15E+04	1.65E+05	1,00
57	2.61E+05	8.26E+05	5.37E+04	2.61E+05	0,99
58	1.66E+05	5.19E+05	2.15E+04	1.65E+05	1,00
59	2.65E+05	8.36E+05	5.53E+04	2.65E+05	0,99
60	2.65E+05	8.36E+05	5.50E+04	2.65E+05	0,99
61	3.41E+05	1.07E+06	9.12E+04	3.41E+05	1,00
62	4.19E+05	1.31E+06	1.38E+05	4.19E+05	1,00
63	2.61E+05	8.26E+05	5.37E+04	2.61E+05	0,99
64	1.85E+05	5.82E+05	2.69E+04	1.85E+05	1,00
65	6.92E+05	2.17E+06	3.76E+05	6.92E+05	1,00
66	1.03E+06	3.23E+06	8.31E+05	1.03E+06	1,00
67	3.93E+05	1.24E+06	1.21E+05	3.93E+05	0,99
68	3.28E+05	1.03E+06	8.47E+04	3.28E+05	1,00
69	2.13E+05	6.67E+05	3.55E+04	2.13E+05	1,00
70	4.13E+05	1.30E+06	1.34E+05	4.13E+05	1,00
71	3.60E+05	1.13E+06	1.01E+05	3.59E+05	0,99
72	3.01E+05	9.42E+05	7.11E+04	3.01E+05	1,00
73	4.03E+05	1.27E+06	1.28E+05	4.03E+05	0,99
74	3.01E+05	9.42E+05	7.12E+04	3.01E+05	1,00
75	3.18E+05	9.95E+05	7.93E+04	3.18E+05	1,00
76	2.12E+05	6.67E+05	3.53E+04	2.12E+05	1,00
77	3.18E+05	9.95E+05	7.92E+04	3.18E+05	1,00
78	2.55E+05	8.04E+05	5.11E+04	2.55E+05	0,99
79	4.75E+05	1.49E+06	1.78E+05	4.75E+05	1,00
80	2.76E+05	8.68E+05	5.98E+04	2.76E+05	1,00

Tabela 10.7. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.1 (C).

ELEMENTO NR.	largura (mm)	perimetro (mm)	area (mm ²)	diametro (mm)	F.forma
1	3.79E+05	1.19E+06	1.13E+05	3.79E+05	1,00
2	5.13E+05	1.61E+06	2.07E+05	5.13E+05	1,00
3	7.11E+05	2.23E+06	3.97E+05	7.11E+05	1,00
4	5.31E+05	1.67E+06	2.21E+05	5.31E+05	0,99
5	6.29E+05	1.98E+06	3.11E+05	6.29E+05	1,00
6	5.12E+05	1.61E+06	2.06E+05	5.12E+05	1,00
7	5.29E+05	1.66E+06	2.20E+05	5.29E+05	1,00
8	4.36E+05	1.38E+06	1.50E+05	4.36E+05	0,99
9	6.46E+05	2.03E+06	3.28E+05	6.46E+05	1,00
10	6.89E+05	2.17E+06	3.73E+05	6.89E+05	1,00
11	8.90E+05	2.79E+06	6.22E+05	8.90E+05	1,00
12	8.70E+05	2.73E+06	5.95E+05	8.70E+05	1,00
13	4.55E+05	1.43E+06	1.63E+05	4.55E+05	1,00
14	3.98E+05	1.25E+06	1.25E+05	3.98E+05	1,00
15	4.72E+05	1.48E+06	1.75E+05	4.72E+05	1,00
16	4.07E+05	1.28E+06	1.30E+05	4.07E+05	1,00
17	5.30E+05	1.66E+06	2.21E+05	5.30E+05	1,00
18	5.87E+05	1.84E+06	2.71E+05	5.87E+05	1,00
19	5.14E+05	1.62E+06	2.08E+05	5.14E+05	1,00
20	3.60E+05	1.13E+06	1.02E+05	3.60E+05	1,00
21	3.89E+05	1.23E+06	1.19E+05	3.89E+05	0,99
22	4.64E+05	1.46E+06	1.69E+05	4.64E+05	1,00
23	3.97E+05	1.25E+06	1.24E+05	3.97E+05	1,00
24	3.18E+05	9.95E+05	7.92E+04	3.18E+05	1,00
25	6.21E+05	1.95E+06	3.03E+05	6.21E+05	1,00
26	5.52E+05	1.74E+06	2.40E+05	5.52E+05	1,00
27	8.31E+05	2.61E+06	5.42E+05	8.31E+05	1,00
28	6.12E+05	1.93E+06	2.95E+05	6.12E+05	1,00
29	3.99E+05	1.26E+06	1.25E+05	3.99E+05	0,99
30	3.75E+05	1.17E+06	1.11E+05	3.75E+05	1,00
31	3.85E+05	1.21E+06	1.16E+05	3.85E+05	1,00
32	4.55E+05	1.43E+06	1.62E+05	4.55E+05	1,00
33	7.90E+05	2.49E+06	4.90E+05	7.90E+05	1,00
34	6.01E+05	1.88E+06	2.84E+05	6.01E+05	1,00
35	6.35E+05	2.00E+06	3.17E+05	6.35E+05	1,00
36	3.76E+05	1.19E+06	1.11E+05	3.76E+05	0,99
37	6.49E+05	2.04E+06	3.31E+05	6.49E+05	1,00
38	5.33E+05	1.67E+06	2.23E+05	5.33E+05	1,00
39	7.81E+05	2.46E+06	4.79E+05	7.81E+05	1,00
40	7.00E+05	2.20E+06	3.85E+05	7.00E+05	1,00
41	6.53E+05	2.05E+06	3.34E+05	6.53E+05	1,00
42	5.46E+05	1.71E+06	2.34E+05	5.46E+05	1,00
43	5.45E+05	1.71E+06	2.33E+05	5.45E+05	1,00
44	3.43E+05	1.08E+06	9.23E+04	3.43E+05	1,00
45	6.15E+05	1.94E+06	2.97E+05	6.15E+05	1,00
46	4.93E+05	1.55E+06	1.91E+05	4.93E+05	1,00
47	4.13E+05	1.30E+06	1.34E+05	4.13E+05	0,99
48	3.99E+05	1.25E+06	1.25E+05	3.99E+05	1,00
49	4.23E+05	1.33E+06	1.41E+05	4.23E+05	0,99
50	3.18E+05	9.95E+05	7.92E+04	3.18E+05	1,00
51	7.60E+05	2.39E+06	4.54E+05	7.60E+05	1,00
52	4.09E+05	1.28E+06	1.31E+05	4.08E+05	1,00
53	4.02E+05	1.26E+06	1.27E+05	4.02E+05	1,00
54	3.74E+05	1.17E+06	1.10E+05	3.74E+05	1,00
55	2.59E+05	8.15E+05	5.29E+04	2.59E+05	1,00
56	4.19E+05	1.31E+06	1.38E+05	4.19E+05	1,00
57	3.01E+05	9.42E+05	7.12E+04	3.01E+05	1,00
58	2.62E+05	8.26E+05	5.39E+04	2.62E+05	0,99
59	5.84E+05	1.84E+06	2.68E+05	5.84E+05	0,99
60	4.72E+05	1.48E+06	1.75E+05	4.72E+05	1,00
61	3.65E+05	1.14E+06	1.05E+05	3.65E+05	1,00
62	3.85E+05	1.21E+06	1.16E+05	3.85E+05	1,00
63	3.18E+05	9.95E+05	7.92E+04	3.18E+05	1,00
64	2.98E+05	9.31E+05	6.98E+04	2.98E+05	1,00
65	3.36E+05	1.06E+06	8.88E+04	3.36E+05	1,00
66	4.15E+05	1.30E+06	1.35E+05	4.15E+05	1,00
67	3.88E+05	1.22E+06	1.18E+05	3.88E+05	1,00
68	2.08E+05	6.56E+05	3.39E+04	2.08E+05	0,99
69	5.71E+05	1.79E+06	2.56E+05	5.71E+05	1,00
70	2.70E+05	8.47E+05	5.72E+04	2.70E+05	1,00
71	6.93E+05	2.18E+06	3.77E+05	6.93E+05	1,00
72	4.52E+05	1.42E+06	1.61E+05	4.52E+05	1,00
73	6.35E+05	1.99E+06	3.17E+05	6.35E+05	1,00
74	5.90E+05	1.85E+06	2.74E+05	5.90E+05	1,00
75	6.46E+05	2.03E+06	3.27E+05	6.46E+05	1,00
76	7.43E+05	2.34E+06	4.34E+05	7.43E+05	1,00
77	4.37E+05	1.38E+06	1.50E+05	4.37E+05	1,00
78	3.39E+05	1.07E+06	9.01E+04	3.39E+05	0,99
79	3.49E+05	1.10E+06	9.58E+04	3.49E+05	0,99
80	3.95E+05	1.24E+06	1.23E+05	3.95E+05	1,00
81	4.34E+05	1.37E+06	1.48E+05	4.34E+05	1,00
82	5.20E+05	1.63E+06	2.12E+05	5.20E+05	1,00
83	3.50E+05	1.10E+06	9.64E+04	3.50E+05	1,00
84	3.29E+05	1.04E+06	8.49E+04	3.29E+05	0,99

Tabela 10.8. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.1 (D).

ELEMENTO NR.	largura (mm)	perimetro (mm)	area (mm2)	diametro (mm)	F.forma
1	3.79E+05	1.19E+06	1.13E+05	3.79E+05	1,00
2	5.13E+05	1.61E+06	2.07E+05	5.13E+05	1,00
3	7.11E+05	2.23E+06	3.97E+05	7.11E+05	1,00
4	5.31E+05	1.67E+06	2.21E+05	5.31E+05	0,99
5	6.29E+05	1.98E+06	3.11E+05	6.29E+05	1,00
6	5.12E+05	1.61E+06	2.06E+05	5.12E+05	1,00
7	5.29E+05	1.66E+06	2.20E+05	5.29E+05	1,00
8	4.36E+05	1.38E+06	1.50E+05	4.36E+05	0,99
9	6.46E+05	2.03E+06	3.28E+05	6.46E+05	1,00
10	6.89E+05	2.17E+06	3.73E+05	6.89E+05	1,00
11	8.90E+05	2.79E+06	6.22E+05	8.90E+05	1,00
12	8.70E+05	2.73E+06	5.95E+05	8.70E+05	1,00
13	4.55E+05	1.43E+06	1.63E+05	4.55E+05	1,00
14	3.98E+05	1.25E+06	1.25E+05	3.98E+05	1,00
15	4.72E+05	1.48E+06	1.75E+05	4.72E+05	1,00
16	4.07E+05	1.28E+06	1.30E+05	4.07E+05	1,00
17	5.30E+05	1.66E+06	2.21E+05	5.30E+05	1,00
18	5.87E+05	1.84E+06	2.71E+05	5.87E+05	1,00
19	5.14E+05	1.62E+06	2.08E+05	5.14E+05	1,00
20	3.60E+05	1.13E+06	1.02E+05	3.60E+05	1,00
21	3.89E+05	1.23E+06	1.19E+05	3.89E+05	0,99
22	4.64E+05	1.46E+06	1.69E+05	4.64E+05	1,00
23	3.97E+05	1.25E+06	1.24E+05	3.97E+05	1,00
24	3.18E+05	9.95E+05	7.92E+04	3.18E+05	1,00
25	6.21E+05	1.95E+06	3.03E+05	6.21E+05	1,00
26	5.52E+05	1.74E+06	2.40E+05	5.52E+05	1,00
27	8.31E+05	2.61E+06	5.42E+05	8.31E+05	1,00
28	6.12E+05	1.93E+06	2.95E+05	6.12E+05	1,00
29	3.99E+05	1.26E+06	1.25E+05	3.99E+05	0,99
30	3.75E+05	1.17E+06	1.11E+05	3.75E+05	1,00
31	3.85E+05	1.21E+06	1.16E+05	3.85E+05	1,00
32	4.55E+05	1.43E+06	1.62E+05	4.55E+05	1,00
33	7.90E+05	2.49E+06	4.90E+05	7.90E+05	1,00
34	6.01E+05	1.88E+06	2.84E+05	6.01E+05	1,00
35	6.35E+05	2.00E+06	3.17E+05	6.35E+05	1,00
36	3.76E+05	1.19E+06	1.11E+05	3.76E+05	0,99
37	6.49E+05	2.04E+06	3.31E+05	6.49E+05	1,00
38	5.33E+05	1.67E+06	2.23E+05	5.33E+05	1,00
39	7.81E+05	2.46E+06	4.79E+05	7.81E+05	1,00
40	7.00E+05	2.20E+06	3.85E+05	7.00E+05	1,00
41	6.53E+05	2.05E+06	3.34E+05	6.53E+05	1,00
42	5.46E+05	1.71E+06	2.34E+05	5.46E+05	1,00
43	5.45E+05	1.71E+06	2.33E+05	5.45E+05	1,00
44	3.43E+05	1.08E+06	9.23E+04	3.43E+05	1,00
45	6.15E+05	1.94E+06	2.97E+05	6.15E+05	1,00
46	4.93E+05	1.55E+06	1.91E+05	4.93E+05	1,00
47	4.13E+05	1.30E+06	1.34E+05	4.13E+05	0,99
48	3.99E+05	1.25E+06	1.25E+05	3.99E+05	1,00
49	4.23E+05	1.33E+06	1.41E+05	4.23E+05	0,99
50	3.18E+05	9.95E+05	7.92E+04	3.18E+05	1,00
51	7.60E+05	2.39E+06	4.54E+05	7.60E+05	1,00
52	4.09E+05	1.28E+06	1.31E+05	4.08E+05	1,00
53	4.02E+05	1.26E+06	1.27E+05	4.02E+05	1,00
54	3.74E+05	1.17E+06	1.10E+05	3.74E+05	1,00
55	2.59E+05	8.15E+05	5.29E+04	2.59E+05	1,00
56	4.19E+05	1.31E+06	1.38E+05	4.19E+05	1,00
57	3.01E+05	9.42E+05	7.12E+04	3.01E+05	1,00
58	2.62E+05	8.26E+05	5.39E+04	2.62E+05	0,99
59	5.84E+05	1.84E+06	2.68E+05	5.84E+05	0,99
60	4.72E+05	1.48E+06	1.75E+05	4.72E+05	1,00
61	3.65E+05	1.14E+06	1.05E+05	3.65E+05	1,00
62	3.85E+05	1.21E+06	1.16E+05	3.85E+05	1,00
63	3.18E+05	9.95E+05	7.92E+04	3.18E+05	1,00
64	2.98E+05	9.31E+05	6.98E+04	2.98E+05	1,00
65	3.36E+05	1.06E+06	8.88E+04	3.36E+05	1,00
66	4.15E+05	1.30E+06	1.35E+05	4.15E+05	1,00
67	3.88E+05	1.22E+06	1.18E+05	3.88E+05	1,00
68	2.08E+05	6.56E+05	3.39E+04	2.08E+05	0,99
69	5.71E+05	1.79E+06	2.56E+05	5.71E+05	1,00
70	2.70E+05	8.47E+05	5.72E+04	2.70E+05	1,00
71	6.93E+05	2.18E+06	3.77E+05	6.93E+05	1,00
72	4.52E+05	1.42E+06	1.61E+05	4.52E+05	1,00

Tabela 10.9. Dados para modelamento cinético do sulfeto de cobre precipitado a $1[\text{Cu}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 1.

Massa (kg)	0.0009350								
volume de polpa (m ³)	0.0003000								
Densidade (kg/m ³)	4250								
Fator forma	0.99								
Diametro (um)	Valor Cumulativo (%)	Densidade de Distribuição	massa retida acumulada (kg)	massa retida na fração (kg)	L _{medio} (m)	L ³ (m ³)	ΔL (m)	massa de um cristal (kg)	nº de cristais retidos - n (#m m ³)
0.04	0.5	0.08	0.000004675						
0.07	2.18	0.28	0.000020383	0.000015708	5.500E-08	1.66375E-22	3.000E-08	7.00023E-19	2.49325E+24
0.1	3.67	0.39	3.43145E-05	1.39315E-05	8.500E-08	6.14125E-22	3.000E-08	2.58393E-18	5.99066E+23
0.2	10.09	0.87	9.43415E-05	0.00060027	1.500E-07	3.375E-21	1.000E-07	1.42003E-17	1.40905E+23
0.3	17.61	1.74	0.000164654	0.000070312	2.500E-07	1.5625E-20	1.000E-07	6.57422E-17	3.56504E+22
0.4	21.28	1.2	0.000198968	3.43145E-05	3.500E-07	4.2875E-20	1.000E-07	1.80397E-16	6.34057E+21
0.9	21.44	0.13	0.000200464	0.000001496	6.500E-07	2.74625E-19	5.000E-07	1.15548E-15	8.6313E+18
1	21.78	0.3	0.000203643	3.179E-06	9.500E-07	8.57375E-19	1.000E-07	3.60741E-15	2.93748E+19
1.1	22.33	0.54	0.000208786	5.1425E-06	1.050E-06	1.15763E-18	1.000E-07	4.87071E-15	3.51934E+19
1.2	23.04	0.77	0.000215424	6.6385E-06	1.150E-06	1.52088E-18	1.000E-07	6.39908E-15	3.45805E+19
1.3	23.89	1	0.000223372	7.9475E-06	1.250E-06	1.95313E-18	1.000E-07	8.21777E-15	3.2237E+19
1.4	24.85	1.22	0.000232348	8.976E-06	1.350E-06	2.46038E-18	1.000E-07	1.0352E-14	2.89025E+19
1.6	27.1	1.58	0.000253385	2.10375E-05	1.500E-06	3.375E-18	2.000E-07	1.42003E-14	2.46914E+19
1.8	29.64	2.03	0.000277134	0.000023749	1.700E-06	4.913E-18	2.000E-07	2.08164E-14	1.9148E+19
2	32.31	2.38	0.000302099	2.49645E-05	1.900E-06	6.859E-18	2.000E-07	2.88592E-14	1.44174E+19
2.2	35.08	2.73	0.000327998	2.58995E-05	2.100E-06	9.261E-18	2.000E-07	3.89657E-14	1.10779E+19
2.4	37.71	2.84	0.000352589	2.45905E-05	2.300E-06	1.2167E-17	2.000E-07	5.11927E-14	8.00587E+18
2.6	40.09	2.79	0.000374842	2.2253E-05	2.500E-06	1.5625E-17	2.000E-07	6.57422E-14	5.64148E+18
2.8	42.18	2.65	0.000394383	1.95415E-05	2.700E-06	1.9683E-17	2.000E-07	8.28162E-14	3.9327E+18
3	43.94	2.4	0.000410839	1.6456E-05	2.900E-06	2.4389E-17	2.000E-07	1.02617E-13	2.67273E+18
3.2	45.34	2.04	0.000423929	1.309E-05	3.100E-06	2.9791E-17	2.000E-07	1.25346E-13	1.74052E+18
3.4	46.48	1.77	0.000434588	1.0659E-05	3.300E-06	3.5937E-17	2.000E-07	1.51205E-13	1.1749E+18
3.6	47.42	1.54	0.000443377	8.789E-06	3.500E-06	4.2875E-17	2.000E-07	1.80397E-13	8.12007E+17
3.8	48.18	1.32	0.000450483	0.000007106	3.700E-06	5.0653E-17	2.000E-07	2.13122E-13	5.55705E+17
4	48.82	1.17	0.000456467	0.000005984	3.900E-06	5.9319E-17	2.000E-07	2.49585E-13	3.99597E+17
4.3	49.58	0.99	0.000463573	0.000007106	4.150E-06	7.14734E-17	3.000E-07	3.00724E-13	2.62551E+17
4.6	50.26	0.95	0.000469931	6.358E-06	4.450E-06	8.8121E-17	3.000E-07	3.7077E-13	1.90535E+17
5	51.21	1.07	0.000478814	8.8825E-06	4.800E-06	1.10592E-16	4.000E-07	4.65316E-13	1.59077E+17
5.3	52.07	1.39	0.000486855	8.041E-06	5.150E-06	1.36591E-16	3.000E-07	5.74706E-13	1.55461E+17
5.6	53.07	1.71	0.000496205	9.35E-06	5.450E-06	1.61879E-16	3.000E-07	6.81104E-13	1.5253E+17
6	54.66	2.16	0.000511071	1.48665E-05	5.800E-06	1.95112E-16	4.000E-07	8.20934E-13	1.5091E+17
6.5	57.12	2.89	0.000534072	0.000023001	6.250E-06	2.44141E-16	5.000E-07	1.02722E-12	1.49276E+17
7	60.13	3.82	0.000562216	2.81435E-05	6.750E-06	3.07547E-16	5.000E-07	1.294E-12	1.44994E+17
7.5	63.67	4.82	0.000595315	0.000033099	7.250E-06	3.81078E-16	5.000E-07	1.60339E-12	1.37621E+17
8	67.65	5.79	0.000632528	0.000037213	7.750E-06	4.65484E-16	5.000E-07	1.95853E-12	1.2667E+17
8.5	72.06	6.83	0.000673761	4.12335E-05	8.250E-06	5.61516E-16	5.000E-07	2.36258E-12	1.16352E+17
9	76.46	7.23	0.000714901	4.114E-05	8.750E-06	6.69922E-16	5.000E-07	2.8187E-12	9.73027E+16
10	84.29	6.98	0.000788112	7.32105E-05	9.500E-06	8.57375E-16	1.000E-06	3.60741E-12	6.76483E+16
11	89.95	5.58	0.000841033	5.2921E-05	1.050E-05	1.15763E-15	1.000E-06	4.87071E-12	3.62172E+16
12	93.89	4.25	0.000877872	0.000036839	1.150E-05	1.52088E-15	1.000E-06	6.39908E-12	1.91897E+16
13	96.5	3.06	0.000902275	2.44035E-05	1.250E-05	1.95313E-15	1.000E-06	8.21777E-12	9.89867E+15
14	98.17	2.12	0.00091789	1.56145E-05	1.350E-05	2.46038E-15	1.000E-06	1.0352E-11	5.02784E+15
15	99.17	1.36	0.00092724	9.35E-06	1.450E-05	3.04863E-15	1.000E-06	1.28271E-11	2.42975E+15
16	99.67	0.73	0.000931915	4.675E-06	1.550E-05	3.72388E-15	1.000E-06	1.56682E-11	9.94583E+14
17	99.9	0.36	0.000934065	2.1505E-06	1.650E-05	4.49213E-15	1.000E-06	1.89006E-11	3.79265E+14
18	100	0.16	0.000935	9.35E-07	1.750E-05	5.35938E-15	1.000E-06	2.25496E-11	1.38214E+14

Tabela 10.10. Dados para modelamento cinético do sulfeto de cobre precipitado a $1[\text{Cu}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 2.

Diâmetro (um)	Valor Cumulativo (%)	Densidade de Distribuição	massa retida acumulada (kg)	massa retida na fração (kg)	$L_{\text{méd}} \text{ (m)}$	$L^3 \text{ (m}^3\text{)}$	$\Delta L \text{ (m)}$	massa de um cristal (kg)	nº de cristais retidos - n (#m m ³)
0.04	0.02	0	0.00000198						
0.07	0.55	0.08	0.00005445	0.00005247	5.500E-08	1.66375E-22	3.000E-08	7.00023E-19	8.3283E+23
0.1	1.22	0.15	0.000012078	0.000006633	8.500E-08	6.14125E-22	3.000E-08	2.58393E-18	2.85224E+23
0.2	3.31	0.25	0.000032769	0.000020691	1.500E-07	3.375E-21	1.000E-07	1.42003E-17	4.85694E+22
0.3	5.1	0.36	0.00005049	0.000017721	2.500E-07	1.5625E-20	1.000E-07	6.57422E-17	8.9851E+21
0.4	6.85	0.5	0.000067815	0.000017325	3.500E-07	4.2875E-20	1.000E-07	1.80397E-16	3.20128E+21
0.5	8.56	0.63	0.000084744	0.000016929	4.500E-07	9.1125E-20	1.000E-07	3.83408E-16	1.4718E+21
0.6	10.08	0.68	0.000099792	0.000015048	5.500E-07	1.66375E-19	1.000E-07	7.00023E-16	7.16548E+20
0.7	11.38	0.69	0.000112662	0.00001287	6.500E-07	2.74625E-19	1.000E-07	1.15548E-15	3.71273E+20
0.8	12.49	0.68	0.000123651	0.000010989	7.500E-07	4.21875E-19	1.000E-07	1.77504E-15	2.06362E+20
0.9	13.53	0.72	0.000133947	0.000010296	8.500E-07	6.14125E-19	1.000E-07	2.58393E-15	1.32821E+20
1	14.55	0.79	0.000144045	0.000010098	9.500E-07	8.57375E-19	1.000E-07	3.60741E-15	9.33081E+19
1.1	15.56	0.87	0.000154044	9.999E-06	1.050E-06	1.15763E-18	1.000E-07	4.87071E-15	6.84295E+19
1.2	16.58	0.96	0.000164142	0.000010098	1.150E-06	1.52088E-18	1.000E-07	6.39908E-15	5.26013E+19
1.3	17.6	1.04	0.00017424	1.0098E-05	1.250E-06	1.95313E-18	1.000E-07	8.21777E-15	4.096E+19
1.4	18.61	1.11	0.000184239	9.999E-06	1.350E-06	2.46038E-18	1.000E-07	1.0352E-14	3.21966E+19
1.6	20.64	1.24	0.000204336	0.00020097	1.500E-06	3.375E-18	2.000E-07	1.42003E-14	2.35875E+19
1.8	22.66	1.4	0.000224334	0.00019998	1.700E-06	4.913E-18	2.000E-07	2.06714E-14	1.61237E+19
2	24.65	1.54	0.000244035	0.00019701	1.900E-06	6.859E-18	2.000E-07	2.88592E-14	1.13776E+19
2.2	26.61	1.68	0.000263439	0.000019404	2.100E-06	9.261E-18	2.000E-07	3.89657E-14	8.29962E+18
2.4	28.54	1.81	0.000282546	0.000019107	2.300E-06	1.2167E-17	2.000E-07	5.11927E-14	6.22062E+18
2.6	30.43	1.93	0.000301257	0.000018711	2.500E-06	1.5625E-17	2.000E-07	6.57422E-14	4.74353E+18
2.8	32.26	2.02	0.000319374	0.000018117	2.700E-06	1.9683E-17	2.000E-07	8.28162E-14	3.64602E+18
3	34.04	2.11	0.000336996	0.000017622	2.900E-06	2.4389E-17	2.000E-07	1.02617E-13	2.86211E+18
3.2	35.77	2.19	0.000354123	1.7127E-05	3.100E-06	2.9791E-17	2.000E-07	1.25346E-13	2.2773E+18
3.4	37.42	2.23	0.000370458	0.000016335	3.300E-06	3.5937E-17	2.000E-07	1.51205E-13	1.80054E+18
3.6	39	2.26	0.0003861	0.000015642	3.500E-06	4.2875E-17	2.000E-07	1.80397E-13	1.44515E+18
3.8	40.51	2.28	0.000401049	0.000014949	3.700E-06	5.0653E-17	2.000E-07	2.13122E-13	1.16905E+18
4	41.94	2.28	0.000415206	0.000014157	3.900E-06	5.9319E-17	2.000E-07	2.49585E-13	9.4537E+17
4.3	43.94	2.26	0.000435006	0.0000198	4.150E-06	7.14734E-17	3.000E-07	3.00724E-13	7.31567E+17
4.6	45.79	2.24	0.000453321	0.000018315	4.450E-06	8.81211E-17	3.000E-07	3.7077E-13	5.48858E+17
5	48.05	2.22	0.000475695	2.2374E-05	4.800E-06	1.10592E-16	4.000E-07	4.65316E-13	4.00696E+17
5.3	49.61	2.19	0.000491139	1.5444E-05	5.150E-06	1.36591E-16	3.000E-07	5.74706E-13	2.98587E+17
5.6	51.08	2.18	0.000505692	1.4553E-05	5.450E-06	1.61879E-16	3.000E-07	6.81104E-13	2.37409E+17
6	52.9	2.16	0.00052371	1.8018E-05	5.800E-06	1.95112E-16	4.000E-07	8.20934E-13	1.82901E+17
6.5	54.97	2.11	0.000544203	2.0493E-05	6.250E-06	2.44141E-16	5.000E-07	1.02722E-12	1.33E+17
7	56.97	2.21	0.000564003	0.0000198	6.750E-06	3.07547E-16	5.000E-07	1.294E-12	1.02009E+17
7.5	58.98	2.38	0.000583902	0.000019899	7.250E-06	3.81078E-16	5.000E-07	1.60339E-12	8.27374E+16
8	61.06	2.64	0.000604494	0.000020592	7.750E-06	4.65484E-16	5.000E-07	1.95853E-12	7.00935E+16
8.5	63.27	2.98	0.000626373	0.000021879	8.250E-06	5.61516E-16	5.000E-07	2.36258E-12	6.17377E+16
9	65.6	3.33	0.00064944	2.3067E-05	8.750E-06	6.69922E-16	5.000E-07	2.8187E-12	5.45571E+16
10	70.55	3.84	0.000698445	4.9005E-05	9.500E-06	8.57375E-16	1.000E-06	3.60741E-12	4.52819E+16
11	75.76	4.47	0.000750024	5.1579E-05	1.050E-05	1.15763E-15	1.000E-06	4.87071E-12	3.52988E+16
12	80.72	4.66	0.000799128	4.9104E-05	1.150E-05	1.52088E-15	1.000E-06	6.39908E-12	2.55787E+16
13	85.16	4.54	0.000843084	4.3956E-05	1.250E-05	1.95313E-15	1.000E-06	8.21777E-12	1.78296E+16
14	88.93	4.16	0.000880407	3.7323E-05	1.350E-05	2.46038E-15	1.000E-06	1.0352E-11	1.20179E+16
15	92.03	3.67	0.000911097	0.00003069	1.450E-05	3.04863E-15	1.000E-06	1.28271E-11	7.97531E+15
16	94.48	3.1	0.000935352	2.4255E-05	1.550E-05	3.72388E-15	1.000E-06	1.56682E-11	5.16013E+15
17	96.36	2.54	0.000953964	0.000018612	1.650E-05	4.49213E-15	1.000E-06	1.89006E-11	3.28243E+15
18	97.75	1.99	0.000967725	0.000013761	1.750E-05	5.35938E-15	1.000E-06	2.25496E-11	2.03419E+15
19	98.64	1.35	0.000976536	8.811E-06	1.850E-05	6.33163E-15	1.000E-06	2.66403E-11	1.10246E+15
20	99.24	0.96	0.000982476	5.94E-06	1.950E-05	7.41488E-15	1.000E-06	3.11981E-11	6.34654E+14
21	99.63	0.65	0.000986337	3.861E-06	2.050E-05	8.61513E-15	1.000E-06	3.62481E-11	3.55053E+14
22	99.86	0.4	0.000988614	2.277E-06	2.150E-05	9.93838E-15	1.000E-06	4.18157E-11	1.81511E+14
23	100	0.26	0.00099	1.386E-06	2.250E-05	1.13906E-14	1.000E-06	4.79261E-11	9.63985E+13

Tabela 10.11. Dados para modelamento cinético do sulfeto de cobre precipitado a $1[\text{Cu}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 4.

Massa (kg)		0.0012250							
volume de polpa (m ³)		0.0003000							
Densidade (kg/m ³)		4250							
Fator forma		0.99							
Diametro (um)	Valor Cumulativo (%)	Densidade de Distribuição	massa retida acumulada (kg)	massa retida na fração (kg)	L _{médio} (m)	L ³ (m ³)	ΔL (m)	massa de um cristal (kg)	nº de cristais retidos - n (#m m ³)
0.04	0.08	0.01	0.0000098						
0.07	0.48	0.06	0.0000588	0.0000049	5.500E-08	1.66375E-22	3.000E-08	7.00023E-19	7.77752E+23
0.1	0.91	0.1	1.11475E-05	5.2675E-06	8.500E-08	6.14125E-22	3.000E-08	2.58393E-18	2.26507E+23
0.2	2.02	0.13	0.000024745	1.35975E-05	1.500E-07	3.375E-21	1.000E-07	1.42003E-17	3.19183E+22
0.3	3.02	0.2	0.000036995	0.00001225	2.500E-07	1.5625E-20	1.000E-07	6.57422E-17	6.21113E+21
0.4	4.45	0.4	5.45125E-05	1.75175E-05	3.500E-07	4.2875E-20	1.000E-07	1.80397E-16	3.23685E+21
0.5	6.16	0.61	0.00007546	2.09475E-05	4.500E-07	9.1125E-20	1.000E-07	3.83408E-16	1.82116E+21
0.6	7.5	0.59	0.000091875	0.000016415	5.500E-07	1.66375E-19	1.000E-07	7.00023E-16	7.81641E+20
0.7	8.35	0.44	0.000102288	1.04125E-05	6.500E-07	2.74625E-19	1.000E-07	1.15548E-15	3.00379E+20
0.8	8.77	0.25	0.000107433	5.145E-06	7.500E-07	4.21875E-19	1.000E-07	1.77504E-15	9.66176E+19
0.9	9.07	0.2	0.000111108	3.675E-06	8.500E-07	6.14125E-19	1.000E-07	2.58393E-15	4.74084E+19
1	9.35	0.21	0.000114538	3.43E-06	9.500E-07	8.57375E-19	1.000E-07	3.60741E-15	3.16941E+19
1.1	9.7	0.29	0.000118825	4.2875E-06	1.050E-06	1.15763E-18	1.000E-07	4.87071E-15	2.93421E+19
1.2	10.12	0.39	0.00012397	5.145E-06	1.150E-06	1.52088E-18	1.000E-07	6.39908E-15	2.68007E+19
1.3	10.62	0.5	0.000130095	0.000006125	1.250E-06	1.95313E-18	1.000E-07	8.21777E-15	2.48445E+19
1.4	11.2	0.63	0.0001372	7.105E-06	1.350E-06	2.46038E-18	1.000E-07	1.0352E-14	2.2878E+19
1.6	12.6	0.84	0.00015435	0.00001715	1.500E-06	3.375E-18	2.000E-07	1.42003E-14	2.01287E+19
1.8	14.28	1.14	0.00017493	0.00002058	1.700E-06	4.913E-18	2.000E-07	2.06714E-14	1.65929E+19
2	16.17	1.44	0.000198083	2.31525E-05	1.900E-06	6.859E-18	2.000E-07	2.88592E-14	1.33709E+19
2.2	18.24	1.74	0.00022344	2.53575E-05	2.100E-06	9.261E-18	2.000E-07	3.89657E-14	1.08461E+19
2.4	20.4	1.99	0.0002499	0.00002646	2.300E-06	1.2167E-17	2.000E-07	5.11927E-14	8.61452E+18
2.6	22.57	2.17	0.000276483	2.65825E-05	2.500E-06	1.5625E-17	2.000E-07	6.57422E-14	6.73908E+18
2.8	24.72	2.33	0.00030282	2.63375E-05	2.700E-06	1.9683E-17	2.000E-07	8.28162E-14	5.30039E+18
3	26.8	2.42	0.0003283	0.00002548	2.900E-06	2.4389E-17	2.000E-07	1.02617E-13	4.13838E+18
3.2	28.8	2.48	0.0003528	0.0000245	3.100E-06	2.9791E-17	2.000E-07	1.25346E-13	3.25766E+18
3.4	30.68	2.49	0.00037583	0.00002303	3.300E-06	3.5937E-17	2.000E-07	1.51205E-13	2.5385E+18
3.6	32.45	2.48	0.000397513	2.16825E-05	3.500E-06	4.2875E-17	2.000E-07	1.80397E-13	2.00323E+18
3.8	34.09	2.43	0.000417603	0.00002009	3.700E-06	5.0653E-17	2.000E-07	2.13122E-13	1.57108E+18
4	35.61	2.38	0.000436223	0.00001862	3.900E-06	5.9319E-17	2.000E-07	2.49585E-13	1.2434E+18
4.3	37.64	2.25	0.00046109	2.48675E-05	4.150E-06	7.14734E-17	3.000E-07	3.00724E-13	9.188E+17
4.6	39.46	2.16	0.000483385	0.000022295	4.450E-06	8.81211E-17	3.000E-07	3.7077E-13	6.6813E+17
5	41.67	2.12	0.000510458	2.70725E-05	4.800E-06	1.10592E-16	4.000E-07	4.65316E-13	4.84841E+17
5.3	43.19	2.09	0.000529078	0.00001862	5.150E-06	1.36591E-16	3.000E-07	5.74706E-13	3.59991E+17
5.6	44.66	2.14	0.000547085	1.80075E-05	5.450E-06	1.61879E-16	3.000E-07	6.81104E-13	2.93763E+17
6	46.55	2.2	0.000570238	2.31525E-05	5.800E-06	1.95112E-16	4.000E-07	8.20934E-13	2.35022E+17
6.5	48.87	2.32	0.000598658	2.842E-05	6.250E-06	2.44141E-16	5.000E-07	1.02722E-12	1.84446E+17
7	51.35	2.68	0.000629038	3.038E-05	6.750E-06	3.07547E-16	5.000E-07	1.294E-12	1.56517E+17
7.5	54.11	3.21	0.000662848	3.381E-05	7.250E-06	3.81078E-16	5.000E-07	1.60339E-12	1.40577E+17
8	57.21	3.85	0.000700823	3.7975E-05	7.750E-06	4.65484E-16	5.000E-07	1.95853E-12	1.29264E+17
8.5	60.77	4.71	0.000744433	0.00004361	8.250E-06	5.61516E-16	5.000E-07	2.36258E-12	1.23058E+17
9	64.56	5.32	0.00079086	4.64275E-05	8.750E-06	6.69922E-16	5.000E-07	2.8187E-12	1.09808E+17
10	72.44	6	0.00088739	9.653E-05	9.500E-06	8.57375E-16	1.000E-06	3.60741E-12	8.91962E+16
11	79.99	6.35	0.000979878	9.24875E-05	1.050E-05	1.15763E-15	1.000E-06	4.87071E-12	6.32951E+16
12	86.35	5.86	0.01057788	0.00007791	1.150E-05	1.52088E-15	1.000E-06	6.39908E-12	4.05839E+16
13	91.05	4.71	0.01115363	0.000057575	1.250E-05	1.95313E-15	1.000E-06	8.21777E-12	2.33539E+16
14	94.38	3.6	0.01156155	4.07925E-05	1.350E-05	2.46038E-15	1.000E-06	1.0352E-11	1.31351E+16
15	96.65	2.64	0.01183963	2.78075E-05	1.450E-05	3.04863E-15	1.000E-06	1.28271E-11	7.22624E+15
16	98.11	1.81	0.01201848	0.000017885	1.550E-05	3.72388E-15	1.000E-06	1.56682E-11	3.80495E+15
17	99.04	1.23	0.01212324	1.13925E-05	1.650E-05	4.49213E-15	1.000E-06	1.89006E-11	2.00919E+15
18	99.6	0.79	0.012201	6.86E-06	1.750E-05	5.35938E-15	1.000E-06	2.25496E-11	1.01406E+15
19	99.82	0.33	0.01222795	2.695E-06	1.850E-05	6.33163E-15	1.000E-06	2.66403E-11	3.37208E+14
20	99.94	0.19	0.01224265	1.47E-06	1.950E-05	7.41488E-15	1.000E-06	3.11981E-11	1.57061E+14
21	99.99	0.08	0.01224878	6.125E-07	2.050E-05	8.61513E-15	1.000E-06	3.62481E-11	5.63247E+13
22	100	0.02	0.01225	1.225E-07	2.150E-05	9.93838E-15	1.000E-06	4.18157E-11	9.76507E+12

Tabela 10.12. Dados para modelamento cinético do sulfeto de cobre precipitado a $1[\text{Cu}^{2+}]:1,5[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 4.

Massa (kg)		0.0001510							
volume de polpa (m ³)		0.0003000							
Densidade (kg/m ³)		4250							
Fator forma		0.48							
Diametro (um)	Valor Cumulativo (%)	Densidade de Distribuição	massa retida acumulada (kg)	massa retida na fração (kg)	L _{medio} (m)	L ³ (m ³)	ΔL (m)	massa de um cristal (kg)	nº de cristais retidos - n (4m m ²)
0.04	0.03	0	4.53E-08						
0.07	0.11	0.01	1.661E-07	1.208E-07	5.500E-08	1.66375E-22	3.000E-08	3.39405E-19	3.95463E+22
0.1	0.16	0.01	2.416E-07	7.55E-08	8.500E-08	6.14125E-22	3.000E-08	1.25282E-18	6.69603E+21
0.2	0.35	0.02	5.285E-07	2.869E-07	1.500E-07	3.375E-21	1.000E-07	6.885E-18	1.38901E+21
0.3	0.57	0.04	8.607E-07	3.322E-07	2.500E-07	1.5625E-20	1.000E-07	3.1875E-17	3.47399E+20
0.4	0.75	0.04	1.1325E-06	2.718E-07	3.500E-07	4.2875E-20	1.000E-07	8.7465E-17	1.03584E+20
0.5	0.91	0.05	1.3741E-06	2.416E-07	4.500E-07	9.1125E-20	1.000E-07	1.85895E-16	4.33219E+19
0.6	1.11	0.07	1.6761E-06	0.00000302	5.500E-07	1.66375E-19	1.000E-07	3.39405E-16	2.96597E+19
0.7	1.37	0.11	2.0687E-06	3.926E-07	6.500E-07	2.74625E-19	1.000E-07	5.60235E-16	2.33592E+19
0.8	1.7	0.16	0.00002567	4.983E-07	7.500E-07	4.21875E-19	1.000E-07	8.60625E-16	1.92999E+19
0.9	2.05	0.2	3.0955E-06	5.285E-07	8.500E-07	6.14125E-19	1.000E-07	1.25282E-15	1.40617E+19
1	2.39	0.21	3.6089E-06	5.134E-07	9.500E-07	8.57375E-19	1.000E-07	1.74905E-15	9.78439E+18
1.1	2.73	0.24	4.1223E-06	5.134E-07	1.050E-06	1.15763E-18	1.000E-07	2.36156E-15	7.24664E+18
1.2	3.06	0.25	4.6206E-06	4.983E-07	1.150E-06	1.52088E-18	1.000E-07	3.10259E-15	5.3536E+18
1.3	3.38	0.27	5.1038E-06	4.832E-07	1.250E-06	1.95313E-18	1.000E-07	3.98438E-15	4.04246E+18
1.4	3.7	0.29	0.00000587	4.832E-07	1.350E-06	2.46038E-18	1.000E-07	5.01917E-15	3.20903E+18
1.6	4.33	0.31	6.5383E-06	9.513E-07	1.500E-06	3.375E-18	2.000E-07	6.885E-15	2.30283E+18
1.8	4.94	0.34	7.4594E-06	9.211E-07	1.700E-06	4.913E-18	2.000E-07	1.00225E-14	1.53117E+18
2	5.53	0.37	8.3503E-06	8.909E-07	1.900E-06	6.859E-18	2.000E-07	1.39924E-14	1.06117E+18
2.2	6.11	0.4	9.2261E-06	8.758E-07	2.100E-06	9.261E-18	2.000E-07	1.88924E-14	7.72619E+17
2.4	6.67	0.43	1.00717E-05	8.456E-07	2.300E-06	1.2167E-17	2.000E-07	2.48207E-14	5.67806E+17
2.6	7.22	0.46	1.09022E-05	8.305E-07	2.500E-06	1.5625E-17	2.000E-07	3.1875E-14	4.34248E+17
2.8	7.76	0.48	1.17176E-05	8.154E-07	2.700E-06	1.9683E-17	2.000E-07	4.01533E-14	3.38453E+17
3	8.28	0.5	1.25028E-05	7.852E-07	2.900E-06	2.4389E-17	2.000E-07	4.97536E-14	2.6303E+17
3.2	8.79	0.53	1.32729E-05	7.701E-07	3.100E-06	2.9791E-17	2.000E-07	6.07736E-14	2.11194E+17
3.4	9.29	0.55	1.40279E-05	0.00000755	3.300E-06	3.5937E-17	2.000E-07	7.33115E-14	1.71642E+17
3.6	9.77	0.56	1.47527E-05	7.248E-07	3.500E-06	4.2875E-17	2.000E-07	8.7465E-14	1.38112E+17
3.8	10.24	0.58	1.54624E-05	7.097E-07	3.700E-06	5.0653E-17	2.000E-07	1.03332E-13	1.14469E+17
4	10.7	0.6	0.000016157	6.946E-07	3.900E-06	5.9319E-17	2.000E-07	1.21011E-13	9.56664E+16
4.3	11.35	0.6	1.71385E-05	9.815E-07	4.150E-06	7.14734E-17	3.000E-07	1.45806E-13	7.47951E+16
4.6	11.98	0.62	1.80898E-05	9.513E-07	4.450E-06	8.81211E-17	3.000E-07	1.79767E-13	5.87983E+16
5	12.77	0.63	1.92827E-05	1.1929E-06	4.800E-06	1.10592E-16	4.000E-07	2.25608E-13	4.40625E+16
5.3	13.34	0.65	2.01434E-05	8.607E-07	5.150E-06	1.36591E-16	3.000E-07	2.78645E-13	3.43208E+16
5.6	13.89	0.66	2.09739E-05	8.305E-07	5.450E-06	1.61879E-16	3.000E-07	3.30232E-13	2.79433E+16
6	14.59	0.67	2.20309E-05	0.00001057	5.800E-06	1.95112E-16	4.000E-07	3.98028E-13	2.21299E+16
6.5	15.43	0.7	2.32993E-05	1.2684E-06	6.250E-06	2.44141E-16	5.000E-07	4.98047E-13	1.69783E+16
7	16.24	0.73	2.45224E-05	1.2231E-06	6.750E-06	3.07547E-16	5.000E-07	6.27396E-13	1.29966E+16
7.5	17.04	0.77	2.57304E-05	0.000001208	7.250E-06	3.81078E-16	5.000E-07	7.77399E-13	1.03593E+16
8	17.83	0.81	2.69233E-05	1.1929E-06	7.750E-06	4.65484E-16	5.000E-07	9.49588E-13	8.37486E+15
8.5	18.63	0.88	2.81313E-05	0.000001208	8.250E-06	5.61516E-16	5.000E-07	1.14549E-12	7.03046E+15
9	19.44	0.94	2.93544E-05	1.2231E-06	8.750E-06	6.69922E-16	5.000E-07	1.36664E-12	5.96646E+15
10	21.09	1.04	3.18459E-05	2.4915E-06	9.500E-06	8.57375E-16	1.000E-06	1.74905E-12	4.74831E+15
11	22.79	1.19	3.44129E-05	0.000002567	1.050E-05	1.15763E-15	1.000E-06	2.36156E-12	3.62332E+15
12	24.52	1.32	3.70252E-05	2.6123E-06	1.150E-05	1.52088E-15	1.000E-06	3.10259E-12	2.80568E+15
13	26.27	1.45	3.96677E-05	2.6425E-06	1.250E-05	1.95313E-15	1.000E-06	3.98438E-12	2.21072E+15
14	28.04	1.59	4.23404E-05	2.6727E-06	1.350E-05	2.46038E-15	1.000E-06	5.01917E-12	1.775E+15
15	29.8	1.7	0.000044998	2.6576E-06	1.450E-05	3.04863E-15	1.000E-06	6.2192E-12	1.42441E+15
16	31.56	1.81	4.76556E-05	2.6576E-06	1.550E-05	3.72388E-15	1.000E-06	7.59671E-12	1.16612E+15
17	33.3	1.91	0.000050283	2.6274E-06	1.650E-05	4.49213E-15	1.000E-06	9.16934E-12	9.55703E+14
18	35.02	2	5.28802E-05	2.5972E-06	1.750E-05	5.35938E-15	1.000E-06	1.09331E-11	7.91844E+14
19	36.73	2.1	5.54623E-05	2.5821E-06	1.850E-05	6.33163E-15	1.000E-06	1.29165E-11	6.66356E+14
20	38.41	2.18	5.79991E-05	2.5368E-06	1.950E-05	7.41488E-15	1.000E-06	1.51263E-11	5.59025E+14
21	40.05	2.23	6.04755E-05	2.4764E-06	2.050E-05	8.61513E-15	1.000E-06	1.75749E-11	4.69686E+14
22	41.66	2.3	6.29066E-05	2.4311E-06	2.150E-05	9.93838E-15	1.000E-06	2.02743E-11	3.99702E+14
23	43.23	2.35	6.52773E-05	2.3707E-06	2.250E-05	1.13906E-14	1.000E-06	2.32369E-11	3.40077E+14
25	46.25	2.41	6.98375E-05	4.5602E-06	2.400E-05	1.3824E-14	2.000E-06	2.8201E-11	2.69506E+14
28	50.45	2.46	7.61795E-05	0.000006342	2.650E-05	1.86096E-14	3.000E-06	3.79636E-11	1.85616E+14
30	53.02	2.48	8.00602E-05	3.8807E-06	2.900E-05	2.4389E-14	2.000E-06	4.97536E-11	1.29997E+14
32	55.42	2.47	8.36842E-05	0.000003624	3.100E-05	2.9791E-14	2.000E-06	6.07736E-11	9.93852E+13
34	57.68	2.48	8.70968E-05	3.4126E-06	3.300E-05	3.5937E-14	2.000E-06	7.33115E-11	7.75822E+13
36	59.82	2.49	9.03282E-05	3.2314E-06	3.500E-05	4.2875E-14	2.000E-06	8.7465E-11	6.15751E+13
38	61.86	2.51	9.34086E-05	3.0804E-06	3.700E-05	5.0653E-14	2.000E-06	1.03332E-10	4.96845E+13
40	63.83	2.55	9.63833E-05	2.9747E-06	3.900E-05	5.9319E-14	2.000E-06	1.21011E-10	4.09702E+13
43	66.67	2.61	0.000100672	4.2884E-06	4.150E-05	7.14734E-14	3.000E-06	1.45806E-10	3.26797E+13
45	68.5	2.68	0.000103435	2.7633E-06	4.400E-05	8.5184E-14	2.000E-06	1.73775E-10	2.65026E+13
50	72.93	2.8	0.000110124	6.6893E-06	4.750E-05	1.07172E-13	5.000E-06	2.18631E-10	2.03976E+13
53	75.52	2.95	0.000114035	3.9109E-06	5.150E-05	1.36591E-13	3.000E-06	2.78645E-10	1.55949E+13
56	78.06	3.07	0.000117871	3.8354E-06	5.450E-05	1.61879E-13	3.000E-06	3.30232E-10	1.29047E+13
60	81.4	3.22	0.000122914	5.0434E-06	5.800E-05	1.95112E-13	4.000E-06	3.98028E-10	1.05591E+13
63	83.77	3.23	0.000126493	3.5787E-06	6.150E-05	2.32608E-13	3.000E-06	4.74521E-10	8.37968E+12
66	85.97	3.14	0.000129815	3.322E-06	6.450E-05	2.68336E-13	3.000E-06	5.47406E-10	6.74292E+12
71	89.19	2.93	0.000134677	4.8622E-06	6.850E-05	3.21419E-13	5.000E-06	6.55695E-10	4.94356E+12
75	91.33	2.6	0.000137908	3.2314E-06	7.300E-05	3.89017E-13	4.000E-06	7.93595E-10	3.39321E+12
80	93.52	2.26	0.000141215	3.3069E-06	7.750E-05	4.65484E-13	5.000E-06	9.49588E-10	2.32164E+12
85	95.25	1.9	0.000143828	2.6123E-06	8.250E-05	5.61516E-13	5.000E-06	1.14549E-09	1.52034E+12
90	96.6	1.57	0.000145866	2.0385E-06	8.750E-05	6.69922E-13	5.000E-06	1.36664E-09	9.94409E+11
95	97.62	1.25	0.000147406	1.5402E-06	9.250E-05	7.91453E-13	5.000E-06	1.61456E-09	6.35961E+11
100	98.39	1	0.000148569	1.1627E-06	9.750E-05	9.26859E-13	5.000E-06	1.89079E-09	4.09951E+11
112	99.47	0.63	0.0001502	1.6308E-06	1.060E-04	1.19102E-12	1.200E-05	2.42967E-09	1.86445E+11
125	99.88	0.25	0.000150819	6.191E-07	1.185E-04	1.66401E-12	1.300E-05	3.39457E-09	46763927498
130	99.94	0.1	0.000150909	9.06E-08	1.275E-04	2.07267E-12	5.000E-06	4.22825E-09	14284867515
140	100	0.05	0.000151	9.06E-08	1.350E-04	2.46038E-12	1.000E-05	5.01917E-09	6016937080

Apêndice VI

Dados utilizados para o modelamento da cinética de precipitação do sulfeto de níquel

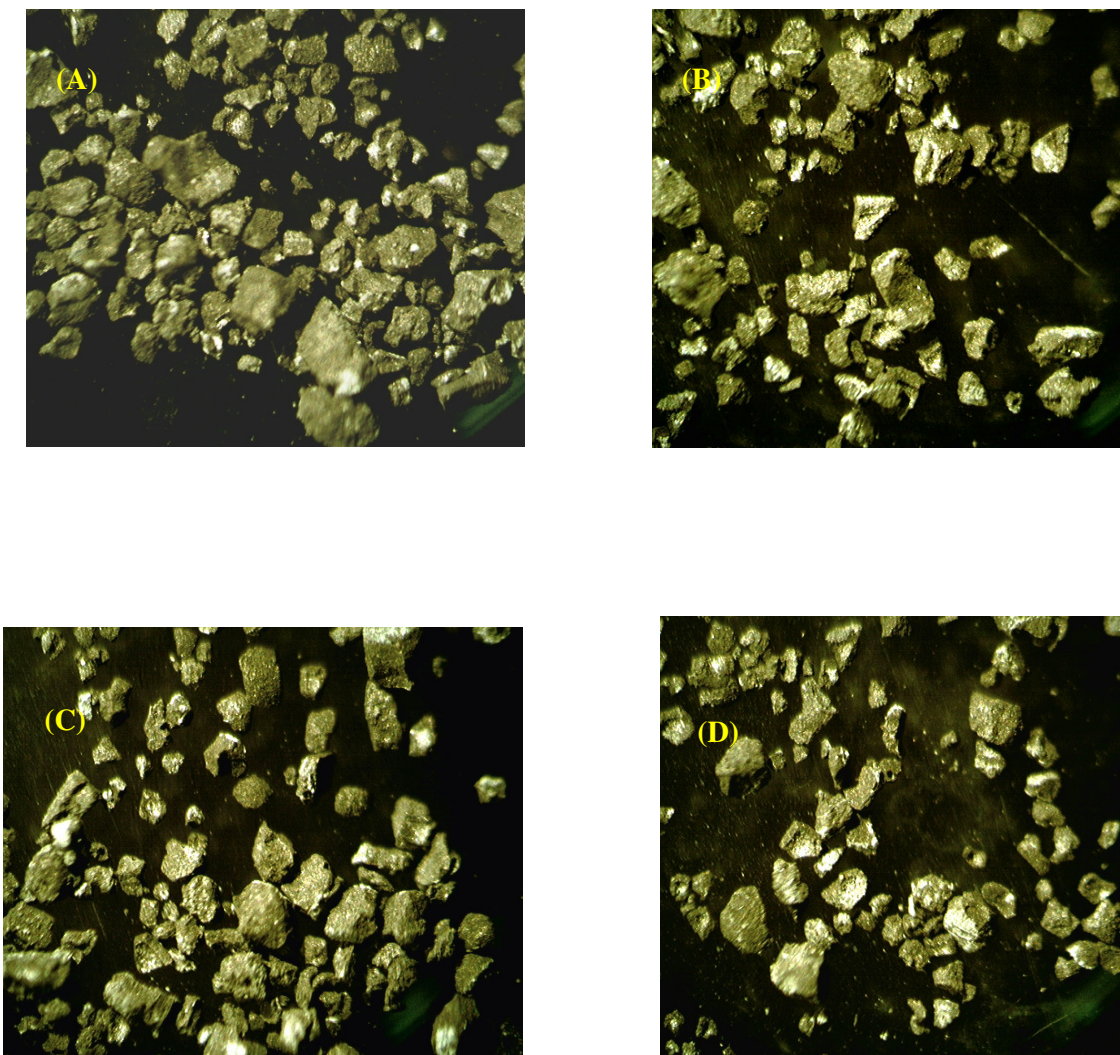


Figura 10.2. Imagens de microscopia óptica dos sulfetos de cobre precipitados em sistema contínuo e proporção $1[\text{Ni}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de níquel com pH inicial de 3 (A), 5 (B) e 7 (C); proporção $1[\text{Ni}^{2+}]:1,5[\text{S}^{2-}]$ e solução de cobre com pH inicial de 3 (D).

Tabela 10.13. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.2 (A).

ELEMENTO NR.	largura (mm)	perimetro (mm)	area (mm ²)	diametro (mm)	F.forma
1	3.81E+03	4.06E+03	3.42E+00	2.09E+03	1,00
2	1.30E+04	1.55E+04	2.33E+01	5.45E+03	1,00
3	1.55E+04	3.89E+04	7.26E+01	9.61E+03	1,00
4	1.27E+03	1.52E+03	3.87E-01	7.02E+02	1,00
5	1.60E+04	3.84E+04	7.71E+01	9.91E+03	1,00
6	1.19E+04	2.06E+04	4.00E+01	7.14E+03	1,00
7	1.40E+04	3.05E+04	4.68E+01	7.72E+03	1,00
8	9.40E+03	1.91E+04	2.48E+01	5.62E+03	1,00
9	1.57E+04	4.06E+04	6.52E+01	9.11E+03	1,00
10	7.87E+03	1.78E+04	1.73E+01	4.69E+03	1,00
11	3.05E+04	1.45E+05	2.28E+02	1.70E+04	1,00
12	5.84E+03	1.32E+04	1.17E+01	3.87E+03	1,00
13	8.89E+03	1.60E+04	2.10E+01	5.17E+03	1,00
14	1.78E+03	3.05E+03	4.52E-01	7.58E+02	1,00
15	1.24E+04	2.84E+04	4.25E+01	7.35E+03	1,00
16	5.33E+03	9.91E+03	6.58E+00	2.89E+03	1,00
17	3.30E+03	6.10E+03	2.26E+00	1.70E+03	1,00
18	5.84E+03	1.12E+04	6.97E+00	2.98E+03	1,00
19	8.89E+03	1.98E+04	2.30E+01	5.42E+03	1,00
20	1.52E+03	2.79E+03	4.52E-01	7.58E+02	1,00
21	1.45E+04	4.37E+04	5.21E+01	8.15E+03	1,00
22	5.08E+03	1.14E+04	6.26E+00	2.82E+03	1,00
23	1.78E+03	3.05E+03	1.03E+00	1.15E+03	1,00
24	7.37E+03	1.68E+04	1.71E+01	4.67E+03	1,00
25	1.57E+04	3.94E+04	5.61E+01	8.45E+03	1,00
26	1.17E+04	1.88E+04	4.09E+01	7.22E+03	1,00
27	6.35E+03	1.32E+04	9.55E+00	3.49E+03	1,00
28	4.32E+03	7.11E+03	3.42E+00	2.09E+03	1,00
29	1.73E+04	4.50E+04	7.80E+01	9.97E+03	1,00
30	1.19E+04	2.54E+04	3.86E+01	7.01E+03	1,00
31	3.81E+03	7.62E+03	4.13E+00	2.29E+03	1,00
32	8.38E+03	1.88E+04	1.81E+01	4.80E+03	1,00
33	1.19E+04	3.02E+04	3.17E+01	6.35E+03	1,00
34	1.91E+04	6.40E+04	8.87E+01	1.06E+04	1,00
35	5.08E+03	1.07E+04	6.19E+00	2.81E+03	1,00
36	2.54E+03	4.57E+03	1.03E+00	1.15E+03	1,00
37	8.89E+03	1.73E+04	1.80E+01	4.79E+03	1,00
38	1.35E+04	4.01E+04	4.55E+01	7.61E+03	1,00
39	6.86E+03	1.24E+04	1.46E+01	4.32E+03	1,00
40	6.10E+03	1.09E+04	8.84E+00	3.35E+03	1,00
41	1.88E+04	6.73E+04	9.94E+01	1.12E+04	1,00
42	7.37E+03	8.64E+03	7.61E+00	3.11E+03	1,00
43	1.78E+04	7.19E+04	8.10E+01	1.02E+04	1,00
44	7.37E+03	1.80E+04	1.50E+01	4.37E+03	1,00
45	4.57E+03	1.02E+04	5.81E+00	2.72E+03	1,00
46	8.38E+03	1.91E+04	1.48E+01	4.34E+03	1,00
47	2.97E+04	1.02E+05	2.57E+02	1.81E+04	1,00
48	6.35E+03	1.14E+04	8.13E+00	3.22E+03	1,00
49	1.32E+04	4.55E+04	4.12E+01	7.24E+03	1,00
50	1.09E+04	2.90E+04	3.72E+01	6.88E+03	1,00
51	1.37E+04	2.34E+04	6.16E+01	8.86E+03	1,00
52	2.79E+03	5.84E+03	2.00E+00	1.60E+03	1,00
53	6.60E+03	1.80E+04	1.13E+01	3.79E+03	1,00
54	7.87E+03	1.70E+04	1.21E+01	3.93E+03	1,00
55	7.37E+03	1.42E+04	1.55E+01	4.45E+03	1,00
56	4.32E+03	8.89E+03	3.55E+00	2.13E+03	1,00
57	4.06E+03	7.37E+03	3.42E+00	2.09E+03	1,00
58	1.04E+04	2.51E+04	2.99E+01	6.17E+03	1,00
59	1.12E+04	2.90E+04	2.89E+01	6.07E+03	1,00
60	1.32E+04	3.84E+04	5.54E+01	8.40E+03	1,00
61	7.11E+03	1.42E+04	1.48E+01	4.35E+03	1,00
62	1.30E+04	2.82E+04	3.97E+01	7.11E+03	1,00
63	1.47E+04	3.66E+04	5.72E+01	8.54E+03	1,00
64	2.54E+03	4.57E+03	1.42E+00	1.34E+03	1,00
65	6.10E+03	1.24E+04	1.16E+01	3.85E+03	1,00
66	2.79E+03	5.84E+03	2.58E+00	1.81E+03	1,00
67	4.57E+03	8.89E+03	4.71E+00	2.45E+03	1,00
68	8.89E+03	1.04E+04	1.56E+01	4.46E+03	1,00
69	5.33E+03	5.59E+03	3.61E+00	2.14E+03	1,00
70	2.03E+03	3.56E+03	7.74E-01	9.93E+02	1,00
71	1.17E+04	3.18E+04	3.74E+01	6.90E+03	1,00
72	7.87E+03	1.73E+04	1.35E+01	4.14E+03	1,00
73	1.78E+03	3.05E+03	6.45E+06	2.87E+06	1,00
74	4.83E+03	8.89E+03	5.10E+00	2.55E+03	1,00

Tabela 10.14. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.2 (B).

ELEMENTO NR.	largura (mm)	perimetro (mm)	area (mm2)	diametro (mm)	F.forma
1	7.03E+05	2.21E+06	3.88E+05	7.03E+05	1,00
2	6.53E+05	2.05E+06	3.35E+05	6.53E+05	1,00
3	7.00E+05	2.20E+06	3.85E+05	7.00E+05	1,00
4	6.84E+05	2.15E+06	3.67E+05	6.84E+05	1,00
5	7.01E+05	2.20E+06	3.86E+05	7.01E+05	1,00
6	6.46E+05	2.03E+06	3.28E+05	6.46E+05	1,00
7	5.08E+05	1.60E+06	2.03E+05	5.08E+05	1,00
8	3.71E+05	1.16E+06	1.08E+05	3.71E+05	1,00
9	6.58E+05	2.06E+06	3.40E+05	6.58E+05	1,00
10	5.75E+05	1.81E+06	2.60E+05	5.75E+05	1,00
11	3.03E+05	9.53E+05	7.21E+04	3.03E+05	1,00
12	3.82E+05	1.20E+06	1.14E+05	3.82E+05	1,00
13	3.69E+05	1.16E+06	1.07E+05	3.69E+05	0,99
14	3.43E+05	1.08E+06	9.26E+04	3.43E+05	1,00
15	4.66E+05	1.46E+06	1.70E+05	4.66E+05	1,00
16	4.86E+05	1.52E+06	1.85E+05	4.86E+05	1,00
17	4.35E+05	1.37E+06	1.49E+05	4.35E+05	1,00
18	4.34E+05	1.37E+06	1.48E+05	4.34E+05	1,00
19	4.22E+05	1.32E+06	1.40E+05	4.22E+05	1,00
20	2.65E+05	8.36E+05	5.50E+04	2.65E+05	0,99
21	4.21E+05	1.32E+06	1.40E+05	4.22E+05	1,00
22	3.29E+05	1.04E+06	8.51E+04	3.29E+05	0,99
23	6.68E+05	2.10E+06	3.51E+05	6.68E+05	1,00
24	4.77E+05	1.50E+06	1.79E+05	4.77E+05	1,00
25	3.81E+05	1.20E+06	1.14E+05	3.81E+05	1,00
26	4.19E+05	1.31E+06	1.38E+05	4.19E+05	1,00
27	4.55E+05	1.43E+06	1.63E+05	4.55E+05	1,00
28	3.60E+05	1.13E+06	1.02E+05	3.60E+05	1,00
29	6.49E+05	2.04E+06	3.31E+05	6.49E+05	1,00
30	3.95E+05	1.24E+06	1.23E+05	3.95E+05	1,00
31	4.85E+05	1.52E+06	1.84E+05	4.85E+05	1,00
32	4.49E+05	1.41E+06	1.58E+05	4.49E+05	1,00
33	6.39E+05	2.01E+06	3.21E+05	6.39E+05	1,00
34	6.46E+05	2.03E+06	3.28E+05	6.46E+05	1,00
35	5.05E+05	1.59E+06	2.00E+05	5.05E+05	1,00
36	3.09E+05	9.74E+05	7.48E+04	3.09E+05	0,99
37	3.94E+05	1.24E+06	1.22E+05	3.94E+05	1,00
38	4.13E+05	1.30E+06	1.34E+05	4.13E+05	1,00
39	5.46E+05	1.71E+06	2.34E+05	5.46E+05	1,00
40	4.88E+05	1.53E+06	1.87E+05	4.88E+05	1,00
41	4.56E+05	1.43E+06	1.63E+05	4.56E+05	1,00
42	3.83E+05	1.21E+06	1.15E+05	3.83E+05	1,00
43	4.85E+05	1.52E+06	1.84E+05	4.85E+05	1,00
44	4.77E+05	1.50E+06	1.79E+05	4.77E+05	0,99
45	4.62E+05	1.45E+06	1.68E+05	4.62E+05	1,00
46	4.94E+05	1.56E+06	1.92E+05	4.94E+05	1,00
47	4.20E+05	1.32E+06	1.38E+05	4.20E+05	0,99
48	4.07E+05	1.28E+06	1.30E+05	4.07E+05	0,99
49	3.64E+05	1.14E+06	1.04E+05	3.64E+05	1,00
50	3.08E+05	9.63E+05	7.44E+04	3.08E+05	1,00
51	4.76E+05	1.49E+06	1.78E+05	4.76E+05	1,00
52	3.16E+05	9.95E+05	7.83E+04	3.16E+05	0,99
53	4.40E+05	1.39E+06	1.52E+05	4.40E+05	1,00
54	4.70E+05	1.48E+06	1.74E+05	4.70E+05	0,99
55	4.27E+05	1.34E+06	1.43E+05	4.27E+05	0,99
56	4.49E+05	1.41E+06	1.58E+05	4.49E+05	1,00
57	3.98E+05	1.25E+06	1.24E+05	3.98E+05	1,00
58	3.89E+05	1.22E+06	1.19E+05	3.89E+05	1,00
59	3.38E+05	1.06E+06	8.96E+04	3.38E+05	1,00
60	2.86E+05	9.00E+05	6.42E+04	2.86E+05	1,00
61	3.42E+05	1.08E+06	9.18E+04	3.42E+05	0,99
62	3.41E+05	1.07E+06	9.15E+04	3.41E+05	1,00
63	4.29E+05	1.34E+06	1.44E+05	4.29E+05	1,00
64	3.59E+05	1.13E+06	1.01E+05	3.59E+05	0,99
65	3.71E+05	1.16E+06	1.08E+05	3.71E+05	1,00
66	3.52E+05	1.10E+06	9.72E+04	3.52E+05	1,00
67	3.14E+05	9.84E+05	7.76E+04	3.14E+05	1,00
68	3.07E+05	9.63E+05	7.40E+04	3.07E+05	1,00
69	4.15E+05	1.30E+06	1.35E+05	4.15E+05	1,00
70	4.79E+05	1.50E+06	1.80E+05	4.79E+05	1,00
71	4.06E+05	1.27E+06	1.29E+05	4.06E+05	1,00
72	3.62E+05	1.13E+06	1.03E+05	3.62E+05	1,00
73	5.30E+05	1.66E+06	2.21E+05	5.30E+05	1,00
74	4.13E+05	1.30E+06	1.34E+05	4.13E+05	1,00
75	4.04E+05	1.27E+06	1.28E+05	4.04E+05	1,00
76	4.12E+05	1.29E+06	1.33E+05	4.12E+05	1,00

Tabela 10.15. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 6.2 (C).

ELEMENTO NR.	largura (mm)	perimetro (mm)	area (mm ²)	diametro (mm)	F.forma
1	4.70E+05	1.48E+06	1.73E+05	4.70E+05	1,00
2	2.95E+05	9.26E+05	6.82E+04	2.95E+05	1,00
3	3.03E+05	9.53E+05	7.21E+04	3.03E+05	1,00
4	3.59E+05	1.12E+06	1.01E+05	3.59E+05	1,00
5	2.66E+05	8.33E+05	5.57E+04	2.66E+05	1,00
6	2.74E+05	8.60E+05	5.90E+04	2.74E+05	1,00
7	3.52E+05	1.10E+06	9.73E+04	3.52E+05	1,00
8	3.00E+05	9.39E+05	7.07E+04	3.00E+05	1,00
9	2.85E+05	8.93E+05	6.36E+04	2.85E+05	1,00
10	2.87E+05	9.00E+05	6.48E+04	2.87E+05	1,00
11	3.43E+05	1.08E+06	9.24E+04	3.43E+05	1,00
12	3.28E+05	1.03E+06	8.47E+04	3.28E+05	1,00
13	3.05E+05	9.59E+05	7.30E+04	3.05E+05	1,00
14	2.13E+05	6.68E+05	3.55E+04	2.13E+05	1,00
15	2.89E+05	9.06E+05	6.56E+04	2.89E+05	1,00
16	2.59E+05	8.14E+05	5.26E+04	2.59E+05	1,00
17	3.24E+05	1.02E+06	8.25E+04	3.24E+05	1,00
18	3.23E+05	1.01E+06	8.17E+04	3.23E+05	1,00
19	5.10E+05	1.60E+06	2.04E+05	5.10E+05	1,00
20	3.97E+05	1.25E+06	1.24E+05	3.97E+05	0,99
21	3.98E+05	1.25E+06	1.25E+05	3.98E+05	1,00
22	3.91E+05	1.23E+06	1.20E+05	3.91E+05	1,00
23	4.64E+05	1.46E+06	1.69E+05	4.64E+05	1,00
24	4.63E+05	1.46E+06	1.68E+05	4.63E+05	1,00
25	3.32E+05	1.04E+06	8.63E+04	3.32E+05	1,00
26	4.54E+05	1.43E+06	1.62E+05	4.54E+05	1,00
27	2.39E+05	7.54E+05	4.49E+04	2.39E+05	0,99
28	2.16E+05	6.81E+05	3.68E+04	2.16E+05	0,99
29	2.28E+05	7.14E+05	4.10E+04	2.28E+05	1,00
30	2.98E+05	9.33E+05	6.96E+04	2.98E+05	1,00
31	3.99E+05	1.25E+06	1.25E+05	3.99E+05	1,00
32	2.40E+05	7.54E+05	4.51E+04	2.40E+05	1,00
33	2.76E+05	8.67E+05	6.00E+04	2.76E+05	1,00
34	3.01E+05	9.46E+05	7.13E+04	3.01E+05	1,00
35	2.69E+05	8.47E+05	5.69E+04	2.69E+05	1,00
36	2.54E+05	8.00E+05	5.07E+04	2.54E+05	0,99
37	4.23E+05	1.33E+06	1.40E+05	4.23E+05	1,00
38	2.41E+05	7.61E+05	4.58E+04	2.41E+05	0,99
39	2.83E+05	8.86E+05	6.30E+04	2.83E+05	1,00
40	2.91E+05	9.13E+05	6.63E+04	2.91E+05	1,00
41	2.62E+05	8.20E+05	5.39E+04	2.62E+05	1,00
42	2.19E+05	6.88E+05	3.77E+04	2.19E+05	1,00
43	2.14E+05	6.75E+05	3.61E+04	2.14E+05	1,00
44	1.99E+05	6.28E+05	3.12E+04	1.99E+05	0,99
45	2.03E+05	6.35E+05	3.23E+04	2.03E+05	1,00
46	2.34E+05	7.34E+05	4.30E+04	2.34E+05	1,00
47	2.85E+05	8.93E+05	6.36E+04	2.85E+05	1,00
48	1.93E+05	6.09E+05	2.92E+04	1.93E+05	0,99
49	2.18E+05	6.88E+05	3.74E+04	2.18E+05	0,99
50	2.52E+05	7.94E+05	4.98E+04	2.52E+05	0,99
51	2.30E+05	7.21E+05	4.14E+04	2.30E+05	1,00
52	1.93E+05	6.02E+05	2.91E+04	1.93E+05	1,00
53	3.14E+05	9.86E+05	7.73E+04	3.14E+05	1,00
54	2.69E+05	8.47E+05	5.69E+04	2.69E+05	1,00
55	2.72E+05	8.53E+05	5.82E+04	2.72E+05	1,00
56	2.81E+05	8.86E+05	6.22E+04	2.81E+05	1,00
57	2.50E+05	7.87E+05	4.92E+04	2.50E+05	1,00
58	2.45E+05	7.67E+05	4.70E+04	2.45E+05	1,00
59	2.20E+05	6.88E+05	3.80E+04	2.20E+05	1,00
60	1.13E+05	3.57E+05	1.00E+04	1.13E+05	0,99
61	2.88E+05	9.06E+05	6.52E+04	2.88E+05	1,00
62	2.90E+05	9.13E+05	6.60E+04	2.90E+05	1,00
63	1.88E+05	5.89E+05	2.78E+04	1.88E+05	1,00
64	2.74E+05	8.60E+05	5.90E+04	2.74E+05	1,00
65	2.08E+05	6.55E+05	3.39E+04	2.08E+05	0,99
66	2.05E+05	6.48E+05	3.32E+04	2.05E+05	0,99
67	2.43E+05	7.67E+05	4.65E+04	2.43E+05	0,99
68	2.81E+05	8.86E+05	6.21E+04	2.81E+05	0,99
69	2.05E+05	6.42E+05	3.30E+04	2.05E+05	1,00
70	3.87E+05	1.22E+06	1.18E+05	3.87E+05	1,00
71	4.04E+05	1.27E+06	1.28E+05	4.04E+05	1,00
72	2.20E+05	6.88E+05	3.80E+04	2.20E+05	1,00
73	1.65E+05	5.23E+05	2.15E+04	1.66E+05	0,99
74	1.74E+05	5.42E+05	2.37E+04	1.74E+05	1,00
75	2.05E+05	6.48E+05	3.32E+04	2.05E+05	0,99
76	2.32E+05	7.28E+05	4.22E+04	2.32E+05	1,00

Tabela 10.16. Resultados obtidos pelo Quantikov Image Analyzer ® para a figura 10.2 (D).

ELEMENTO NR.	largura (mm)	perimetro (mm)	area (mm2)	diâmetro (mm)	F.forma
1	3.66E+05	1.15E+06	1.05E+05	3.66E+05	1,00
2	3.28E+05	1.03E+06	8.45E+04	3.28E+05	1,00
3	2.98E+05	9.39E+05	6.97E+04	2.98E+05	0,99
4	2.87E+05	9.00E+05	6.45E+04	2.87E+05	1,00
5	2.26E+05	7.08E+05	4.02E+04	2.26E+05	1,00
6	2.02E+05	6.35E+05	3.22E+04	2.02E+05	1,00
7	3.43E+05	1.08E+06	9.21E+04	3.43E+05	1,00
8	2.34E+05	7.34E+05	4.29E+04	2.34E+05	1,00
9	1.53E+05	4.83E+05	1.83E+04	1.53E+05	0,99
10	3.05E+05	9.59E+05	7.28E+04	3.05E+05	1,00
11	3.31E+05	1.04E+06	8.59E+04	3.31E+05	1,00
12	1.93E+05	6.09E+05	2.92E+04	1.93E+05	0,99
13	3.18E+05	9.99E+05	7.93E+04	3.18E+05	1,00
14	2.34E+05	7.34E+05	4.31E+04	2.34E+05	1,00
15	1.58E+05	4.96E+05	1.96E+04	1.58E+05	1,00
16	2.15E+05	6.75E+05	3.64E+04	2.15E+05	1,00
17	1.72E+05	5.42E+05	2.32E+04	1.72E+05	0,99
18	2.53E+05	7.94E+05	5.04E+04	2.53E+05	1,00
19	1.80E+05	5.62E+05	2.54E+04	1.80E+05	1,00
20	2.83E+05	8.86E+05	6.27E+04	2.83E+05	1,00
21	1.59E+05	4.96E+05	1.98E+04	1.59E+05	1,00
22	1.49E+05	4.70E+05	1.75E+04	1.49E+05	1,00
23	1.51E+05	4.76E+05	1.79E+04	1.51E+05	0,99
24	1.49E+05	4.70E+05	1.74E+04	1.49E+05	0,99
25	1.98E+05	6.22E+05	3.09E+04	1.98E+05	1,00
26	4.11E+05	1.29E+06	1.33E+05	4.11E+05	1,00
27	1.17E+05	3.70E+05	1.08E+04	1.17E+05	0,99
28	2.72E+05	8.53E+05	5.83E+04	2.73E+05	1,00
29	1.64E+05	5.16E+05	2.10E+04	1.64E+05	0,99
30	1.63E+05	5.09E+05	2.08E+04	1.63E+05	1,00
31	3.27E+05	1.03E+06	8.42E+04	3.27E+05	0,99
32	2.27E+05	7.14E+05	4.06E+04	2.27E+05	1,00
33	2.19E+05	6.88E+05	3.77E+04	2.19E+05	1,00
34	1.52E+05	4.76E+05	1.82E+04	1.52E+05	1,00
35	3.42E+05	1.07E+06	9.17E+04	3.42E+05	1,00
36	1.95E+05	6.15E+05	3.00E+04	1.95E+05	1,00
37	4.88E+05	1.53E+06	1.87E+05	4.88E+05	1,00
38	2.25E+05	7.08E+05	3.96E+04	2.25E+05	0,99
39	3.42E+05	1.07E+06	9.17E+04	3.42E+05	1,00
40	1.19E+05	3.77E+05	1.11E+04	1.19E+05	0,98
41	2.26E+05	7.08E+05	4.02E+04	2.26E+05	1,00
42	2.36E+05	7.41E+05	4.38E+04	2.36E+05	1,00
43	2.51E+05	7.87E+05	4.97E+04	2.51E+05	1,00
44	1.66E+05	5.23E+05	2.16E+04	1.66E+05	0,99
45	2.89E+05	9.06E+05	6.57E+04	2.89E+05	1,00
46	2.34E+05	7.34E+05	4.29E+04	2.34E+05	1,00
47	2.90E+05	9.13E+05	6.62E+04	2.90E+05	1,00
48	1.74E+05	5.42E+05	2.37E+04	1.74E+05	1,00
49	2.11E+05	6.61E+05	3.50E+04	2.11E+05	1,00
50	1.40E+05	4.37E+05	1.53E+04	1.40E+05	1,00
51	1.85E+05	5.82E+05	2.70E+04	1.85E+05	1,00
52	2.11E+05	6.61E+05	3.50E+04	2.11E+05	1,00
53	2.46E+05	7.74E+05	4.73E+04	2.46E+05	0,99
54	1.84E+05	5.82E+05	2.67E+04	1.84E+05	0,99
55	1.80E+05	5.62E+05	2.54E+04	1.80E+05	1,00
56	2.06E+05	6.48E+05	3.33E+04	2.06E+05	1,00
57	1.59E+05	5.03E+05	2.00E+04	1.59E+05	0,99
58	2.54E+05	7.94E+05	5.05E+04	2.54E+05	1,00
59	4.32E+05	1.36E+06	1.47E+05	4.32E+05	1,00
60	1.57E+05	4.96E+05	1.94E+04	1.57E+05	0,99
61	1.98E+05	6.22E+05	3.08E+04	1.98E+05	1,00
62	1.65E+05	5.23E+05	2.15E+04	1.65E+05	0,99
63	2.70E+05	8.47E+05	5.72E+04	2.70E+05	1,00
64	1.95E+05	6.09E+05	2.97E+04	1.94E+05	1,00
65	1.90E+05	5.95E+05	2.85E+04	1.90E+05	1,00
66	2.39E+05	7.47E+05	4.48E+04	2.39E+05	1,00
67	2.28E+05	7.14E+05	4.07E+04	2.28E+05	1,00
68	1.76E+05	5.56E+05	2.45E+04	1.76E+05	1,00
69	1.87E+05	5.89E+05	2.75E+04	1.87E+05	1,00
70	1.13E+05	3.51E+05	9.98E+03	1.13E+05	1,00
71	2.25E+05	7.08E+05	3.97E+04	2.25E+05	1,00
72	1.59E+05	4.96E+05	1.98E+04	1.59E+05	1,00
73	2.15E+05	6.75E+05	3.64E+04	2.15E+05	1,00
74	1.59E+05	4.96E+05	1.98E+04	1.59E+05	1,00
75	1.98E+05	6.22E+05	3.09E+04	1.98E+05	1,00
76	1.22E+05	3.84E+05	1.17E+04	1.22E+05	1,00

Tabela 10.17. Dados para modelamento cinético do sulfeto de níquel precipitado a $1[\text{Ni}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de níquel com pH inicial de 3.

Diâmetro (um)	Valor Cumulativo (%)	Densidade de Distribuição	massa retida acumulada (kg)	massa retida na fração (kg)	$L_{\text{médio}}$ (m)	L^3 (m ³)	ΔL (m)	massa de um cristal (kg)	nº de cristais retidos - n (#m m ³)
0.04	0.58	0.08	5.7188E-06						
0.07	1.74	0.16	1.71564E-05	1.14376E-05	5.500E-08	1.66375E-22	3.000E-08	7.00023E-19	1.81543E+24
0.1	2.47	0.16	2.43542E-05	7.1978E-06	8.500E-08	6.14125E-22	3.000E-08	2.58393E-18	3.09511E+23
0.2	5.17	0.31	5.09762E-05	0.000026622	1.500E-07	3.375E-21	1.000E-07	1.42003E-17	6.24916E+22
0.3	8.54	0.65	8.42044E-05	3.32282E-05	2.500E-07	1.5625E-20	1.000E-07	6.57422E-17	1.68477E+22
0.4	10.66	0.58	0.000105108	2.09032E-05	3.500E-07	4.2875E-20	1.000E-07	1.80397E-16	3.86245E+21
0.5	11.69	0.36	0.000115263	1.01558E-05	4.500E-07	9.1125E-20	1.000E-07	3.83408E-16	8.8294E+20
0.6	12.46	0.33	0.000122856	7.5922E-06	5.500E-07	1.66375E-19	1.000E-07	7.00023E-16	3.61522E+20
0.7	13.21	0.38	0.000130251	7.395E-06	6.500E-07	2.74625E-19	1.000E-07	1.15548E-15	2.1333E+20
0.8	14.1	0.52	0.000139026	8.7754E-06	7.500E-07	4.21875E-19	1.000E-07	1.77504E-15	1.64793E+20
0.9	15.03	0.62	0.000148196	9.1698E-06	8.500E-07	6.14125E-19	1.000E-07	2.58393E-15	1.18293E+20
1	15.98	0.71	0.000157563	9.367E-06	9.500E-07	8.57375E-19	1.000E-07	3.60741E-15	8.65534E+19
1.1	16.92	0.78	0.000166831	9.2684E-06	1.050E-06	1.15763E-18	1.000E-07	4.87071E-15	6.34295E+19
1.2	17.86	0.85	0.0001761	9.2684E-06	1.150E-06	1.52088E-18	1.000E-07	6.39908E-15	4.82798E+19
1.3	18.81	0.93	0.000185467	9.367E-06	1.250E-06	1.95313E-18	1.000E-07	8.21777E-15	3.79949E+19
1.4	19.75	1	0.000194735	9.2684E-06	1.350E-06	2.46038E-18	1.000E-07	1.0352E-14	2.98441E+19
1.6	21.65	1.12	0.000213469	0.000018734	1.500E-06	3.375E-18	2.000E-07	1.42003E-14	2.19878E+19
1.8	23.53	1.26	0.000232006	1.85368E-05	1.700E-06	4.913E-18	2.000E-07	2.06714E-14	1.49456E+19
2	25.36	1.37	0.00025005	1.80438E-05	1.900E-06	6.859E-18	2.000E-07	2.88592E-14	1.04206E+19
2.2	27.14	1.47	0.0002676	1.75508E-05	2.100E-06	9.261E-18	2.000E-07	3.89657E-14	7.50695E+18
2.4	28.82	1.52	0.000284165	1.65648E-05	2.300E-06	1.2167E-17	2.000E-07	5.11927E-14	5.39296E+18
2.6	30.38	1.53	0.000299547	1.53816E-05	2.500E-06	1.5625E-17	2.000E-07	6.57422E-14	3.89947E+18
2.8	31.81	1.52	0.000313647	1.40998E-05	2.700E-06	1.9683E-17	2.000E-07	8.28162E-14	2.83757E+18
3	33.1	1.47	0.000326366	1.27194E-05	2.900E-06	2.4389E-17	2.000E-07	1.02617E-13	2.06584E+18
3.2	34.25	1.4	0.000337705	0.000011339	3.100E-06	2.9791E-17	2.000E-07	1.25346E-13	1.5077E+18
3.4	35.29	1.35	0.000347959	1.02544E-05	3.300E-06	3.5937E-17	2.000E-07	1.51205E-13	1.1303E+18
3.6	36.22	1.28	0.000357129	9.1698E-06	3.500E-06	4.2875E-17	2.000E-07	1.80397E-13	8.47189E+17
3.8	37.05	1.21	0.000365313	8.1838E-06	3.700E-06	5.0653E-17	2.000E-07	2.13122E-13	6.39992E+17
4	37.79	1.14	0.000372609	7.2964E-06	3.900E-06	5.9319E-17	2.000E-07	2.49585E-13	4.87236E+17
4.3	38.77	1.07	0.000382272	9.6628E-06	4.150E-06	7.14734E-17	3.000E-07	3.00724E-13	3.5702E+17
4.6	39.62	0.99	0.000390653	8.381E-06	4.450E-06	8.81211E-17	3.000E-07	3.7077E-13	2.51159E+17
5	40.61	0.93	0.000400415	9.7614E-06	4.800E-06	1.10592E-16	4.000E-07	4.65316E-13	1.74817E+17
5.3	41.28	0.91	0.000407021	6.6062E-06	5.150E-06	1.36591E-16	3.000E-07	5.74706E-13	1.27721E+17
5.6	41.91	0.9	0.000413233	6.2118E-06	5.450E-06	1.61879E-16	3.000E-07	6.81104E-13	1.01335E+17
6	42.7	0.9	0.000421022	7.7894E-06	5.800E-06	1.95112E-16	4.000E-07	8.20934E-13	7.90705E+16
6.5	43.66	0.94	0.000430488	9.4656E-06	6.250E-06	2.44141E-16	5.000E-07	1.02722E-12	6.14317E+16
7	44.6	1	0.000439756	9.2684E-06	6.750E-06	3.07547E-16	5.000E-07	1.294E-12	4.77505E+16
7.5	45.54	1.07	0.000449024	9.2684E-06	7.250E-06	3.81078E-16	5.000E-07	1.60339E-12	3.85368E+16
8	46.47	1.13	0.000458194	9.1698E-06	7.750E-06	4.65484E-16	5.000E-07	1.95853E-12	3.12133E+16
8.5	47.41	1.22	0.000467463	9.2684E-06	8.250E-06	5.61516E-16	5.000E-07	2.36258E-12	2.61534E+16
9	48.34	1.28	0.000476632	9.1698E-06	8.750E-06	6.69922E-16	5.000E-07	2.8187E-12	2.1688E+16
10	50.09	1.31	0.000493887	0.000017255	9.500E-06	8.57375E-16	1.000E-06	3.60741E-12	1.59441E+16
11	51.68	1.31	0.000509565	1.56774E-05	1.050E-05	1.15763E-15	1.000E-06	4.87071E-12	1.0729E+16
12	53.15	1.33	0.000524059	1.44942E-05	1.150E-05	1.52088E-15	1.000E-06	6.39908E-12	7.55015E+15
13	54.53	1.36	0.000537666	1.36068E-05	1.250E-05	1.95313E-15	1.000E-06	8.21777E-12	5.51926E+15
14	55.9	1.46	0.000551174	1.35082E-05	1.350E-05	2.46038E-15	1.000E-06	1.0352E-11	4.34961E+15
15	57.33	1.63	0.000565274	1.40998E-05	1.450E-05	3.04863E-15	1.000E-06	1.28271E-11	3.66407E+15
16	58.89	1.9	0.000580655	1.53816E-05	1.550E-05	3.72388E-15	1.000E-06	1.56682E-11	3.27236E+15
17	60.65	2.29	0.000598009	1.73536E-05	1.650E-05	4.49213E-15	1.000E-06	1.89006E-11	3.0605E+15
18	62.65	2.75	0.000617729	0.00001972	1.750E-05	5.35938E-15	1.000E-06	2.25496E-11	2.91506E+15
19	64.97	3.38	0.000640604	2.28752E-05	1.850E-05	6.33163E-15	1.000E-06	2.66403E-11	2.86223E+15
20	67.48	3.85	0.000665353	2.47486E-05	1.950E-05	7.41488E-15	1.000E-06	3.11981E-11	2.64424E+15
21	70.11	4.24	0.000691285	2.59318E-05	2.050E-05	8.61513E-15	1.000E-06	3.62481E-11	2.38466E+15
22	72.8	4.55	0.000717808	2.65234E-05	2.150E-05	9.93838E-15	1.000E-06	4.18157E-11	2.11431E+15
23	75.47	4.73	0.000744134	2.63262E-05	2.250E-05	1.13906E-14	1.000E-06	4.79261E-11	1.83103E+15
25	80.66	4.9	0.000795308	5.11734E-05	2.400E-05	1.3824E-14	2.000E-06	5.81645E-11	1.46634E+15
28	87.46	4.72	0.000862356	6.7048E-05	2.650E-05	1.86096E-14	3.000E-06	7.83E-11	9.5144E+14
30	91.12	4.18	0.000898443	3.60876E-05	2.900E-05	2.4389E-14	2.000E-06	1.02617E-10	5.86123E+14
32	93.98	3.49	0.000926643	2.81996E-05	3.100E-05	2.9791E-14	2.000E-06	1.25346E-10	3.74958E+14
34	96.18	2.86	0.000948335	0.000021692	3.300E-05	3.5937E-14	2.000E-06	1.51205E-10	2.39102E+14
36	97.77	2.19	0.000964012	1.56774E-05	3.500E-05	4.2875E-14	2.000E-06	1.80397E-10	1.44842E+14
38	98.74	1.41	0.000973576	9.5642E-06	3.700E-05	5.0653E-14	2.000E-06	2.13122E-10	7.47942E+13
40	99.37	0.97	0.000979788	6.2118E-06	3.900E-05	5.9319E-14	2.000E-06	2.49585E-10	4.14809E+13
43	99.85	0.52	0.000984521	4.7328E-06	4.150E-05	7.14734E-14	3.000E-06	3.00724E-10	1.74867E+13

Tabela 10.18. Dados para modelamento cinético do sulfeto de níquel precipitado a $1[\text{Ni}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de níquel com pH inicial de 5.

Diâmetro (um)	Valor Cumulativo (%)	Densidade de Distribuição	massa retida acumulada (kg)	massa retida na fração (kg)	$L_{\text{médio}}$ (m)	L^3 (m ³)	ΔL (m)	massa de um cristal (kg)	nº de cristais retidos - n (#m m ³)
0.04	0.12	0.02	1.38264E-06						
0.07	0.42	0.04	4.83924E-06	3.4566E-06	5.500E-08	1.66375E-22	3.000E-08	7.00023E-19	5.48649E+23
0.1	0.64	0.05	7.37408E-06	2.53484E-06	8.500E-08	6.14125E-22	3.000E-08	2.58393E-18	1.09E+23
0.2	1.48	0.09	1.70526E-05	9.67848E-06	1.500E-07	3.375E-21	1.000E-07	1.42003E-17	2.27189E+22
0.3	2.5	0.19	0.00028805	1.17524E-05	2.500E-07	1.5625E-20	1.000E-07	6.57422E-17	5.95885E+21
0.4	3.39	0.23	3.90596E-05	1.02546E-05	3.500E-07	4.2875E-20	1.000E-07	1.80397E-16	1.89482E+21
0.5	4.23	0.28	4.87381E-05	9.67848E-06	4.500E-07	9.1125E-20	1.000E-07	3.83408E-16	8.41442E+20
0.6	5.27	0.43	6.07209E-05	1.19829E-05	5.500E-07	1.66375E-19	1.000E-07	7.00023E-16	5.70595E+20
0.7	6.55	0.62	7.54691E-05	1.47482E-05	6.500E-07	2.74625E-19	1.000E-07	1.15548E-15	4.25454E+20
0.8	8.12	0.88	9.35586E-05	1.80895E-05	7.500E-07	4.21875E-19	1.000E-07	1.77504E-15	3.39702E+20
0.9	9.76	1.04	0.000112455	1.88961E-05	8.500E-07	6.14125E-19	1.000E-07	2.58393E-15	2.43764E+20
1	11.41	1.17	0.000131466	1.90113E-05	9.500E-07	8.57375E-19	1.000E-07	3.60741E-15	1.75669E+20
1.1	13.02	1.27	0.000150016	1.85504E-05	1.050E-06	1.15763E-18	1.000E-07	4.87071E-15	1.26952E+20
1.2	14.58	1.34	0.000167991	1.79743E-05	1.150E-06	1.52088E-18	1.000E-07	6.39908E-15	9.36297E+19
1.3	16.1	1.42	0.000185504	1.75134E-05	1.250E-06	1.95313E-18	1.000E-07	8.21777E-15	7.10389E+19
1.4	17.57	1.49	0.000202442	1.69373E-05	1.350E-06	2.46038E-18	1.000E-07	1.0352E-14	5.45379E+19
1.6	20.35	1.56	0.000234473	3.20312E-05	1.500E-06	3.375E-18	2.000E-07	1.42003E-14	3.75944E+19
1.8	22.94	1.65	0.000264315	2.9842E-05	1.700E-06	4.913E-18	2.000E-07	2.06714E-14	2.40605E+19
2	25.33	1.7	0.000291852	2.75376E-05	1.900E-06	6.859E-18	2.000E-07	2.88592E-14	1.59034E+19
2.2	27.55	1.75	0.000317431	2.55788E-05	2.100E-06	9.261E-18	2.000E-07	3.89657E-14	1.09408E+19
2.4	29.57	1.74	0.000340706	2.32744E-05	2.300E-06	1.2167E-17	2.000E-07	5.11927E-14	7.5774E+18
2.6	31.4	1.71	0.000361791	2.10853E-05	2.500E-06	1.5625E-17	2.000E-07	6.57422E-14	5.34544E+18
2.8	33.06	1.68	0.000380917	1.91265E-05	2.700E-06	1.9683E-17	2.000E-07	8.28162E-14	3.84919E+18
3	34.56	1.63	0.0003982	0.000017283	2.900E-06	2.4389E-17	2.000E-07	1.02617E-13	2.80705E+18
3.2	35.91	1.57	0.000413755	1.55547E-05	3.100E-06	2.9791E-17	2.000E-07	1.25346E-13	2.06824E+18
3.4	37.12	1.5	0.000427697	1.39416E-05	3.300E-06	3.5937E-17	2.000E-07	1.51205E-13	1.53672E+18
3.6	38.23	1.46	0.000440486	1.27894E-05	3.500E-06	4.2875E-17	2.000E-07	1.80397E-13	1.1816E+18
3.8	39.24	1.4	0.000452123	1.16372E-05	3.700E-06	5.0653E-17	2.000E-07	2.13122E-13	9.10057E+17
4	40.17	1.36	0.000462839	1.07155E-05	3.900E-06	5.9319E-17	2.000E-07	2.49585E-13	7.15553E+17
4.3	41.43	1.31	0.000477356	1.45177E-05	4.150E-06	7.14734E-17	3.000E-07	3.00724E-13	5.36398E+17
4.6	42.56	1.26	0.000490376	1.30199E-05	4.450E-06	8.81211E-17	3.000E-07	3.7077E-13	3.90175E+17
5	43.9	1.2	0.000505816	1.54395E-05	4.800E-06	1.10592E-16	4.000E-07	4.65316E-13	2.76505E+17
5.3	44.81	1.17	0.000516301	1.0485E-05	5.150E-06	1.36591E-16	3.000E-07	5.17406E-13	2.02713E+17
5.6	45.65	1.14	0.000525979	9.67848E-06	5.450E-06	1.61879E-16	3.000E-07	6.81104E-13	1.57889E+17
6	46.68	1.12	0.000537847	1.18677E-05	5.800E-06	1.95112E-16	4.000E-07	8.20934E-13	1.20469E+17
6.5	47.85	1.1	0.000551328	1.34807E-05	6.250E-06	2.44141E-16	5.000E-07	1.02722E-12	8.749E+16
7	48.91	1.07	0.000563541	1.22133E-05	6.750E-06	3.07547E-16	5.000E-07	1.294E-12	6.29227E+16
7.5	49.87	1.04	0.000574602	1.10611E-05	7.250E-06	3.81078E-16	5.000E-07	1.60339E-12	4.59907E+16
8	50.73	1	0.000584511	9.90892E-06	7.750E-06	4.65484E-16	5.000E-07	1.95853E-12	3.37292E+16
8.5	51.5	0.95	0.000593383	8.87194E-06	8.250E-06	5.61516E-16	5.000E-07	2.36258E-12	2.50346E+16
9	52.2	0.92	0.000601448	8.0654E-06	8.750E-06	6.69922E-16	5.000E-07	2.8187E-12	1.9076E+16
10	53.47	0.9	0.000616081	1.46329E-05	9.500E-06	8.57375E-16	1.000E-06	3.60741E-12	1.35212E+16
11	54.63	0.91	0.000629447	1.33655E-05	1.050E-05	1.15763E-15	1.000E-06	4.87071E-12	9.14687E+15
12	55.82	1.02	0.000643158	1.37112E-05	1.150E-05	1.52088E-15	1.000E-06	6.39908E-12	7.14226E+15
13	57.12	1.22	0.000658137	1.49786E-05	1.250E-05	1.95313E-15	1.000E-06	8.21777E-12	6.07569E+15
14	58.58	1.48	0.000674959	1.68221E-05	1.350E-05	2.46038E-15	1.000E-06	1.0352E-11	5.41669E+15
15	60.25	1.81	0.000694201	1.92417E-05	1.450E-05	3.04863E-15	1.000E-06	1.28271E-11	5.00029E+15
16	62.19	2.25	0.000716553	2.23527E-05	1.550E-05	3.72388E-15	1.000E-06	1.56682E-11	4.75542E+15
17	64.36	2.68	0.000741556	2.50027E-05	1.650E-05	4.49213E-15	1.000E-06	1.89006E-11	4.40951E+15
18	66.78	3.17	0.000769439	2.78832E-05	1.750E-05	5.35938E-15	1.000E-06	2.25496E-11	4.12177E+15
19	69.48	3.74	0.000800549	3.11094E-05	1.850E-05	6.33163E-15	1.000E-06	2.66403E-11	3.89252E+15
20	72.29	4.11	0.000832925	3.23768E-05	1.950E-05	7.41488E-15	1.000E-06	3.11981E-11	3.45927E+15
21	75.12	4.35	0.000865533	3.26073E-05	2.050E-05	8.61531E-15	1.000E-06	3.62481E-11	2.99852E+15
22	77.88	4.45	0.000897333	3.18007E-05	2.150E-05	9.93838E-15	1.000E-06	4.18157E-11	2.53499E+15
23	80.52	4.45	0.000927751	3.04181E-05	2.250E-05	1.13906E-14	1.000E-06	4.79261E-11	2.11563E+15
25	85.22	4.22	0.000981905	5.41534E-05	2.400E-05	1.3824E-14	2.000E-06	5.81645E-11	1.55173E+15
28	90.86	3.73	0.001046889	6.49841E-05	2.650E-05	1.86096E-14	3.000E-06	7.83E-11	9.22152E+14
30	93.7	3.09	0.001079611	3.27225E-05	2.900E-05	2.4389E-14	2.000E-06	1.02617E-10	5.31468E+14
32	95.85	2.5	0.001104384	2.47723E-05	3.100E-05	2.9791E-14	2.000E-06	1.25346E-10	3.29387E+14
34	97.44	1.97	0.001122704	1.832E-05	3.300E-05	3.5937E-14	2.000E-06	1.51205E-10	2.01933E+14
36	98.55	1.46	0.001135493	1.27894E-05	3.500E-05	4.2875E-14	2.000E-06	1.80397E-10	1.1816E+14
38	99.21	0.91	0.001143098	7.60452E-06	3.700E-05	5.0653E-14	2.000E-06	2.13122E-10	5.94691E+13
40	99.61	0.58	0.001147706	4.6088E-06	3.900E-05	5.9319E-14	2.000E-06	2.49585E-10	3.07765E+13
43	99.91	0.31	0.001151163	3.4566E-06	4.150E-05	7.14734E-14	3.000E-06	3.00724E-10	1.27714E+13
45	100	0.15	0.0011522	1.03698E-06	4.400E-05	8.5184E-14	2.000E-06	3.58412E-10	4.82211E+12

Tabela 10.19. Dados para modelamento cinético do sulfeto de níquel precipitado a $1[\text{Ni}^{2+}]:1[\text{S}^{2-}]$ e solução de níquel com pH inicial de 7.

Diâmetro (um)	Valor Cumulativo (%)	Densidade de Distribuição	massa retida acumulada (kg)	massa retida na fração (kg)	$L_{\text{médio}}$ (m)	L^3 (m ³)	ΔL (m)	massa de um cristal (kg)	nº de cristais retidos - n (#m m ³)
0.04	0.03	0.06	5.745E-07						
0.07	0.11	0.1	2.1065E-06	0.000001532	5.500E-08	1.66375E-22	3.000E-08	7.00023E-19	2.43167E+23
0.1	0.16	0.11	0.000003064	9.575E-07	8.500E-08	6.14125E-22	3.000E-08	2.58393E-18	4.11733E+22
0.2	0.35	0.19	6.7025E-06	3.6385E-06	1.500E-07	3.375E-21	1.000E-07	1.42003E-17	8.54089E+21
0.3	0.57	0.38	1.09155E-05	0.000004213	2.500E-07	1.5625E-20	1.000E-07	6.57422E-17	2.13612E+21
0.4	0.75	0.37	1.43625E-05	0.000003447	3.500E-07	4.2875E-20	1.000E-07	1.80397E-16	6.3693E+20
0.5	0.91	0.28	1.74265E-05	0.000003064	4.500E-07	9.1125E-20	1.000E-07	3.83408E-16	2.66383E+20
0.6	1.11	0.27	2.12565E-05	0.00000383	5.500E-07	1.66375E-19	1.000E-07	7.00023E-16	1.82375E+20
0.7	1.37	0.31	2.62355E-05	0.000004979	6.500E-07	2.74625E-19	1.000E-07	1.15548E-15	1.43634E+20
0.8	1.7	0.39	0.000003255	6.3195E-06	7.500E-07	4.21875E-19	1.000E-07	1.77504E-15	1.18673E+20
0.9	2.05	0.45	3.92575E-05	6.7025E-06	8.500E-07	6.14125E-19	1.000E-07	2.58393E-15	8.64639E+19
1	2.39	0.5	4.57685E-05	6.511E-06	9.500E-07	8.57375E-19	1.000E-07	3.60741E-15	6.01633E+19
1.1	2.73	0.55	5.22795E-05	0.000006511	1.050E-06	1.15763E-18	1.000E-07	4.87071E-15	4.45589E+19
1.2	3.06	0.6	0.000058599	6.3195E-06	1.150E-06	1.52088E-18	1.000E-07	6.39908E-15	3.29188E+19
1.3	3.38	0.65	0.000064727	6.128E-06	1.250E-06	1.95313E-18	1.000E-07	8.21777E-15	2.48567E+19
1.4	3.7	0.7	0.000070855	6.128E-06	1.350E-06	2.46038E-18	1.000E-07	1.0352E-14	1.9732E+19
1.6	4.33	0.78	8.29195E-05	1.20645E-05	1.500E-06	3.375E-18	2.000E-07	1.42003E-14	1.41599E+19
1.8	4.94	0.86	0.000094601	1.16815E-05	1.700E-06	4.913E-18	2.000E-07	2.06714E-14	9.41839E+18
2	5.53	0.93	0.0001059	1.12985E-05	1.900E-06	6.859E-18	2.000E-07	2.88592E-14	6.52506E+18
2.2	6.11	0.99	0.000117007	0.000011107	2.100E-06	9.261E-18	2.000E-07	3.89657E-14	4.75076E+18
2.4	6.67	1.03	0.000127731	0.000010724	2.300E-06	1.2167E-17	2.000E-07	5.11927E-14	3.49139E+18
2.6	7.22	1.04	0.000138263	1.05325E-05	2.500E-06	1.5625E-17	2.000E-07	6.57422E-14	2.67015E+18
2.8	7.76	1.04	0.000148604	0.000010341	2.700E-06	1.9683E-17	2.000E-07	8.28162E-14	2.08111E+18
3	8.28	1.03	0.000158562	9.958E-06	2.900E-06	2.4389E-17	2.000E-07	1.02617E-13	1.61735E+18
3.2	8.79	1	0.000168329	9.7665E-06	3.100E-06	2.9791E-17	2.000E-07	1.25346E-13	1.29861E+18
3.4	9.29	0.98	0.000177904	0.000009575	3.300E-06	3.5937E-17	2.000E-07	1.51205E-13	1.05541E+18
3.6	9.77	0.95	0.000187096	9.192E-06	3.500E-06	4.2875E-17	2.000E-07	1.80397E-13	8.4924E+17
3.8	10.24	0.92	0.000196096	9.0005E-06	3.700E-06	5.0653E-17	2.000E-07	2.13122E-13	7.0386E+17
4	10.7	0.9	0.000204905	8.809E-06	3.900E-06	5.9319E-17	2.000E-07	2.49585E-13	5.88244E+17
4.3	11.35	0.87	0.000217353	1.24475E-05	4.150E-06	7.14734E-17	3.000E-07	3.00724E-13	4.59908E+17
4.6	11.98	0.83	0.000229417	1.20645E-05	4.450E-06	8.81211E-17	3.000E-07	3.7077E-13	3.61545E+17
5	12.77	0.82	0.000244546	1.51285E-05	4.800E-06	1.10592E-16	4.000E-07	4.65316E-13	2.70936E+17
5.3	13.34	0.82	0.000255461	1.09155E-05	5.150E-06	1.36591E-16	3.000E-07	5.74706E-13	2.11035E+17
5.6	13.89	0.84	0.000265994	1.05325E-05	5.450E-06	1.61879E-16	3.000E-07	6.81104E-13	1.71821E+17
6	14.59	0.86	0.000279399	0.000013405	5.800E-06	1.95112E-16	4.000E-07	8.20934E-13	1.36075E+17
6.5	15.43	0.91	0.000295485	0.000016086	6.250E-06	2.44141E-16	5.000E-07	1.02722E-12	1.04398E+17
7	16.24	0.97	0.000310996	1.55115E-05	6.750E-06	3.07547E-16	5.000E-07	1.294E-12	7.99148E+16
7.5	17.04	1.06	0.000326316	0.00001532	7.250E-06	3.81078E-16	5.000E-07	1.60339E-12	6.36985E+16
8	17.83	1.16	0.000341445	1.51285E-05	7.750E-06	4.65484E-16	5.000E-07	1.95853E-12	5.14962E+16
8.5	18.63	1.27	0.000356765	0.00001532	8.250E-06	5.61516E-16	5.000E-07	2.36258E-12	4.32296E+16
9	19.44	1.37	0.000372276	1.55115E-05	8.750E-06	6.69922E-16	5.000E-07	2.8187E-12	3.66872E+16
10	21.09	1.45	0.000403874	3.15975E-05	9.500E-06	8.57375E-16	1.000E-06	3.60741E-12	2.91969E+16
11	22.79	1.51	0.000436429	3.2555E-05	1.050E-05	1.15763E-15	1.000E-06	4.87071E-12	2.22794E+16
12	24.52	1.57	0.000469558	3.31295E-05	1.150E-05	1.52088E-15	1.000E-06	6.39908E-12	1.72574E+16
13	26.27	1.64	0.000503071	3.35125E-05	1.250E-05	1.95313E-15	1.000E-06	8.21777E-12	1.35935E+16
14	28.04	1.73	0.000536966	3.38955E-05	1.350E-05	2.46038E-15	1.000E-06	1.0352E-11	1.09143E+16
15	29.8	1.87	0.00057067	3.3704E-05	1.450E-05	3.04863E-15	1.000E-06	1.28271E-11	8.75855E+15
16	31.56	2.04	0.000604374	0.000033704	1.550E-05	3.72388E-15	1.000E-06	1.56682E-11	7.17036E+15
17	33.3	2.26	0.000637695	0.000033321	1.650E-05	4.49213E-15	1.000E-06	1.98006E-11	5.87653E+15
18	35.02	2.53	0.000670633	0.000032938	1.750E-05	5.35938E-15	1.000E-06	2.25496E-11	4.86898E+15
19	36.73	2.87	0.00070338	3.27465E-05	1.850E-05	6.33163E-15	1.000E-06	2.66403E-11	4.09736E+15
20	38.41	3.13	0.00073552	3.2172E-05	1.950E-05	7.41488E-15	1.000E-06	3.11981E-11	3.43739E+15
21	40.05	3.35	0.000766958	3.1406E-05	2.050E-05	8.61513E-15	1.000E-06	3.62481E-11	2.88806E+15
22	41.66	3.52	0.000797789	3.08315E-05	2.150E-05	9.93838E-15	1.000E-06	4.18157E-11	2.45773E+15
23	43.23	3.6	0.000827855	3.00655E-05	2.250E-05	1.13906E-14	1.000E-06	4.79261E-11	2.0911E+15
25	46.25	3.69	0.000885688	0.000057833	2.400E-05	1.3824E-14	2.000E-06	5.81645E-11	1.65717E+15
28	50.45	3.61	0.000966118	8.043E-05	2.650E-05	1.86096E-14	3.000E-06	7.83E-11	1.14134E+15
30	53.02	3.35	0.001015333	4.92155E-05	2.900E-05	2.4389E-14	2.000E-06	1.02617E-10	7.99342E+14
32	55.42	3.02	0.001061293	4.596E-05	3.100E-05	2.9791E-14	2.000E-06	1.25346E-10	6.1111E+14
34	57.68	2.74	0.001104572	0.000043279	3.300E-05	3.5937E-14	2.000E-06	1.51205E-10	4.77046E+14
36	59.82	2.44	0.001145553	4.0981E-05	3.500E-05	4.2875E-14	2.000E-06	1.80397E-10	3.7862E+14
38	61.86	2.11	0.001184619	3.9066E-05	3.700E-05	5.0653E-14	2.000E-06	2.13122E-10	3.05505E+14
40	63.83	1.96	0.001222345	3.77255E-05	3.900E-05	5.9319E-14	2.000E-06	2.49585E-10	2.51922E+14
43	66.67	1.8	0.001276731	5.4386E-05	4.150E-05	7.14734E-14	3.000E-06	3.00724E-10	2.00945E+14
45	68.5	1.74	0.001311775	5.50445E-05	4.400E-05	8.5184E-14	2.000E-06	3.58412E-10	1.62962E+14
50	72.93	1.62	0.00139661	8.48345E-05	4.750E-05	1.07172E-13	5.000E-06	4.50926E-10	1.25423E+14
53	75.52	1.54	0.001446208	4.95985E-05	5.150E-05	1.36591E-13	3.000E-06	5.74706E-10	9.58915E+13
56	78.06	1.38	0.001494849	4.8641E-05	5.450E-05	1.61879E-13	3.000E-06	6.81104E-10	7.93499E+13
60	81.4	1.25	0.00155881	0.000063961	5.800E-05	1.95112E-13	4.000E-06	8.20934E-10	6.49271E+13
63	83.77	1.1	0.001604196	4.53855E-05	6.150E-05	2.32608E-13	3.000E-06	9.787E-10	5.15258E+13
66	85.97	0.9	0.001646326	0.00004213	6.450E-05	2.68336E-13	3.000E-06	1.12902E-09	4.14616E+13
71	89.19	0.78	0.001707989	6.1663E-05	6.850E-05	3.21419E-13	5.000E-06	1.35237E-09	3.03975E+13
75	93.52	0.63	0.001790908	8.29195E-05	7.300E-05	3.89017E-13	4.000E-06	1.63679E-09	4.22165E+13
80	95.25	0.51	0.001824038	3.31295E-05	7.750E-05	4.65484E-13	5.000E-06	1.95853E-09	1.1277E+13
85	99.94	0.44	0.001913851	8.98135E-05	8.250E-05	5.61516E-13	5.000E-06	2.36258E-09	2.53434E+13

Tabela 10.20. Dados para modelamento cinético do sulfeto de níquel precipitado a $1[\text{Ni}^{2+}]:1,5[\text{S}^{2-}]$ e solução de níquel com pH inicial de 3.

Massa (kg)	0.0011915									
volume de polpa (m ³)	0.0003000									
Densidade (kg/m ³)	4250									
Fator forma	0.99									
Diametro (um)	Valor Cumulativo (%)	Densidade de Distribuição	massa retida acumulada (kg)	massa retida na fração (kg)	L _{medio} (m)	L ³ (m ³)	ΔL (m)	massa de um cristal (kg)	nº de cristais retidos - n (#m m ³)	
0.04	2.72	1.08	3.24088E-05							
0.07	10.03	2.97	0.000119507	8.70987E-05	5.500E-08	1.66375E-22	3.000E-08	7.00023E-19	1.38247E+25	
0.1	15.97	3.79	0.000190283	7.07751E-05	8.500E-08	6.14125E-22	3.000E-08	2.58393E-18	3.04339E+24	
0.2	35.26	6.34	0.000420123	0.00022984	1.500E-07	3.375E-21	1.000E-07	1.42003E-17	5.39519E+23	
0.3	54.55	10.83	0.000649963	0.00022984	2.500E-07	1.5625E-20	1.000E-07	6.57422E-17	1.16536E+23	
0.4	66.33	9.32	0.000790322	0.000140359	3.500E-07	4.2875E-20	1.000E-07	1.80397E-16	2.59352E+22	
0.5	71.9	5.68	0.000856689	6.63666E-05	4.500E-07	9.1125E-20	1.000E-07	3.83408E-16	5.76987E+21	
0.6	75.2	4.12	0.000896008	3.93195E-05	5.500E-07	1.66375E-19	1.000E-07	7.00023E-16	1.8723E+21	
0.7	77.65	3.62	0.0009252	2.91918E-05	6.500E-07	2.74625E-19	1.000E-07	1.15548E-15	8.42121E+20	
0.8	79.88	3.8	0.00095177	2.65704E-05	7.500E-07	4.21875E-19	1.000E-07	1.77504E-15	4.98965E+20	
0.9	81.86	3.83	0.000975362	2.35917E-05	8.500E-07	6.14125E-19	1.000E-07	2.58393E-15	3.04339E+20	
1	83.6	3.76	0.000996094	2.07321E-05	9.500E-07	8.57375E-19	1.000E-07	3.60741E-15	1.9157E+20	
1.1	85.13	3.65	0.001014324	1.82299E-05	1.050E-06	1.15763E-18	1.000E-07	4.87071E-15	1.24759E+20	
1.2	86.51	3.61	0.001030767	1.64427E-05	1.150E-06	1.52088E-18	1.000E-07	6.39908E-15	8.56514E+19	
1.3	87.78	3.61	0.001045899	1.51321E-05	1.250E-06	1.95313E-18	1.000E-07	8.21777E-15	6.13794E+19	
1.4	88.95	3.59	0.001059839	1.39406E-05	1.350E-06	2.46038E-18	1.000E-07	1.0352E-14	4.48883E+19	
1.6	91.12	3.7	0.001085695	2.58556E-05	1.500E-06	3.375E-18	2.000E-07	1.42003E-14	3.03462E+19	
1.8	93.03	3.69	0.001108452	2.27577E-05	1.700E-06	4.913E-18	2.000E-07	2.06714E-14	1.83487E+19	
2	94.66	3.52	0.001127874	1.94214E-05	1.900E-06	6.859E-18	2.000E-07	2.88592E-14	1.12162E+19	
2.2	96.03	3.27	0.001144197	1.63235E-05	2.100E-06	9.261E-18	2.000E-07	3.89657E-14	6.98202E+18	
2.4	97.14	2.9	0.001157423	1.32257E-05	2.300E-06	1.2167E-17	2.000E-07	5.11927E-14	4.30584E+18	
2.6	98.01	2.47	0.001167789	1.03661E-05	2.500E-06	1.5625E-17	2.000E-07	6.57422E-14	2.62795E+18	
2.8	98.68	2.06	0.001175772	7.98305E-06	2.700E-06	1.9683E-17	2.000E-07	8.28162E-14	1.60658E+18	
3	99.17	1.62	0.001181611	5.83835E-06	2.900E-06	2.4389E-17	2.000E-07	1.02617E-13	9.48245E+17	
3.2	99.49	1.13	0.001185423	3.8128E-06	3.100E-06	2.9791E-17	2.000E-07	1.25346E-13	5.06972E+17	
3.4	99.71	0.83	0.001188045	2.6213E-06	3.300E-06	3.5937E-17	2.000E-07	1.51205E-13	2.88935E+17	
3.6	99.86	0.6	0.001189832	1.78725E-06	3.500E-06	4.2875E-17	2.000E-07	1.80397E-13	1.65122E+17	
3.8	99.95	0.38	0.001190904	1.07235E-06	3.700E-06	5.0653E-17	2.000E-07	2.13122E-13	8.38602E+16	
4	100	0.22	0.0011915	5.9575E-07	3.900E-06	5.9319E-17	2.000E-07	2.49585E-13	3.97828E+16	