



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**ESTUDO DA ADAPTAÇÃO DE MICRORGANISMOS MESÓFILOS A PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESSO**

Igor Jurandir Ubaldo Viana Pereira

Ouro Preto, 14 de janeiro de 2022

Igor Jurandir Ubaldo Viana Pereira

**ESTUDO DA ADAPTAÇÃO DE MICRORGANISMOS MESÓFILOS A PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESSO**

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

Orientador: Prof. Dr. Versiane Albis Leão.

Coorientador: Me. Matheus Mello Pereira.

Ouro Preto, 14 de janeiro de 2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Igor Jurandir Ubaldo Viana Pereira

Estudo da adaptação de microrganismos mesófilos a placas de circuito impresso

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

Aprovada em 17 de janeiro de 2022

Membros da banca

Dr. Versiane Albis Leão - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. Matheus Mello Pereira - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Victor de Andrade Alvarenga Oliveira - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. Flávio Luiz Martins - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Versiane Albis Leão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/01/2022



Documento assinado eletronicamente por **Versiane Albis Leao, PROFESSOR**



DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 31/05/2022, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0335648** e o código CRC **A3896CAF**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.007010/2022-87

SEI nº
0335648

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591561 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por minha vida e por permitir que meus objetivos fossem alcançados durante todos os meus anos de estudos.

Ao meus pais Darcio e Neide, e minha irmã Laura por todo amor, incentivo e apoio incondicional.

À minha namorada Ana, por toda paciência, incentivo e carinho durante esta jornada.

Ao Professor Doutor Versiane Albis Leão, por todos os ensinamentos e por contribuir significativamente para meu crescimento profissional.

Ao Mestre Matheus Mello Pereira por todo apoio, incentivo e ensinamentos, contribuindo significativamente para meu crescimento profissional.

A todos os amigos do laboratório de Bio&Hidrometalurgia. Em especial ao Michael por todos os ensinamentos durante os projetos de iniciação científica.

A todos os professores que estiveram presentes durante minha jornada na UFOP, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

À Universidade Federal de Ouro Preto e todos os seus colaboradores.

E a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta graduação, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

O consumo de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) tem se tornado cada vez mais comum nos dias atuais. As Placas de Circuito Impresso (PCI) são facilmente encontradas na maioria dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), sendo constituídas por diversos elementos químicos, os quais apresentam elevado interesse econômico tais como ouro, prata, cobre, entre outros. Diante disso, a presente monografia visou investigar, em escala laboratorial, a adaptação de microrganismos mesófilos a PCI como etapa preliminar do estudo da biolixiviação de cobre. O procedimento experimental adotado consistiu em etapas de caracterização química, bem como ensaios de adaptação. As análises por ICP-OES e MEV-EDS foram aplicadas para caracterizar e quantificar os elementos químicos presentes nessas placas. Diante dessas análises, observou-se uma heterogeneidade em relação ao tamanho e a forma das partículas. As análises químicas via ICP-OES quantificaram majoritariamente os elementos químicos cobre ($25,91 \pm 2,05\%$), cálcio ($4,91 \pm 0,23\%$), chumbo ($2,00 \pm 0,71\%$) e alumínio ($1,85 \pm 0,08\%$). Dentre as três (3) amostras estudadas (PCI cominuídas, PCI fragmentadas e PCI fragmentadas pré-tratadas), as PCI fragmentadas pré-tratadas foram adaptadas com sucesso a 250g.L^{-1} , enquanto as PCI cominuídas e fragmentadas foram adaptadas a 30g.L^{-1} e 50g.L^{-1} , respectivamente. Em suma, os resultados de adaptação foram promissores, possibilitando o emprego da técnica de biolixiviação, em trabalhos futuros, para a recuperação do conteúdo metálico presente nas PCI.

Palavras-chave: Mineração urbana; Placas de Circuito Impresso (PCI); *At. ferrooxidans*; Biohidrometalurgia; Adaptação.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 -	Evolução do volume de geração de RSU por região no Brasil	14
Figura 3.2 -	Geração de RSU no ano de 2019 (t/ano)	14
Figura 3.3 -	Disposição final de RSU na região sudeste	15
Figura 4.1 -	Placas de circuito impresso fragmentadas	34
Figura 4.2 -	Placas de circuito impresso cominuídas	35
Figura 4.3 -	Placas de circuito impresso fragmentadas pré-tratadas mecanicamente	36
Figura 4.4 -	ICP-OES da marca <i>Varian</i> [®] , modelo 725/ES do Laboratório de Bio&Hidrometalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)	38
Figura 5.1 -	Imagem de Elétrons Retroespalhados (BSE) das placas de circuito impresso cominuídas obtida por MEV com magnificação de 53× e mapeamentos químicos obtidos por EDS	41
Figura 5.2 -	Imagem de Elétrons Retroespalhados (BSE) das placas de circuito impresso fragmentadas obtida por MEV com magnificação de 205× e mapeamentos químicos obtidos por EDS	42
Figura 5.3 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente ao primeiro repique dos microrganismos mesófilos do gênero <i>Acidithiobacillus</i> das amostras 1At e 2At. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente ao primeiro repique dos microrganismos mesófilos do gênero <i>Acidithiobacillus</i> das amostras 1At e 2At	43
Figura 5.4 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente ao segundo repique dos microrganismos mesófilos do gênero <i>Acidithiobacillus</i> das amostras 1At e 2At. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente ao segundo repique dos microrganismos mesófilos do gênero <i>Acidithiobacillus</i> das amostras 1At e 2At	44

Figura 5.5 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 1% p.v ⁻¹ das amostras 1Frag1, 1Frag2, 1FragPan1, 1FragPan2, 1Comino1 e 1Comino2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 1% p.v ⁻¹ das amostras 1Frag1, 1Frag2, 1FragPan1, 1FragPan2, 1Comino1 e 1Comino2	45
Figura 5.6 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v ⁻¹ das amostras 2Frag1 e 2Frag2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v ⁻¹ das amostras 2Frag1 e 2Frag2	47
Figura 5.7 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v ⁻¹ das amostras 2Comino1 e 2Comino2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v ⁻¹ das amostras 2Comino1 e 2Comino2	47
Figura 5.8 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v ⁻¹ das amostras 2FragPan1 e 2FragPan2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v ⁻¹ das amostras 2FragPan1 e 2FragPan2	48
Figura 5.9 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 3% p.v ⁻¹ das amostras 3Frag1 e 3Frag2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 3% p.v ⁻¹ das amostras 3Frag1 e 3Frag2	49
Figura 5.10 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 3% p.v ⁻¹ das amostras 3Comino1 e 3Comino2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 3% p.v ⁻¹ das amostras 3Comino1 e 3Comino2	50
Figura 5.11 -	(a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 4% p.v ⁻¹ das amostras 4Frag1 e 4Frag2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 4% p.v ⁻¹ das amostras 4Frag1 e 4Frag2	51

Figura 5.12 - (a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v ⁻¹ das amostras 5Frag1 e 5Frag2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v ⁻¹ das amostras 5Frag1 e 5Frag2	52
Figura 5.13 - (a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v ⁻¹ das amostras 5FragPan1 e 5FragPan2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v ⁻¹ das amostras 5FragPan1 e 5FragPan2	52
Figura 5.14 - (a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v ⁻¹ das amostras 5Comino1 e 5Comino2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v ⁻¹ das amostras 5Comino1 e 5Comino2	53
Figura 5.15 - (a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 10% p.v ⁻¹ das amostras 10FragPan1 e 10FragPan2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 10% p.v ⁻¹ das amostras 10FragPan1 e 10FragPan2	54
Figura 5.16 - (a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 15% p.v ⁻¹ das amostras 15FragPan1 e 15FragPan2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 15% p.v ⁻¹ das amostras 15FragPan1 e 15FragPan2	54
Figura 5.17 - (a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 20% p.v ⁻¹ das amostras 20FragPan1 e 20FragPan2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 20% p.v ⁻¹ das amostras 20FragPan1 e 20FragPan2	55
Figura 5.18 - (a) Gráfico de pH <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 25% p.v ⁻¹ das amostras 25FragPan1 e 25FragPan2. (b) Gráfico de Eh <i>versus</i> tempo referente aos ensaios de adaptação 25% p.v ⁻¹ das amostras 25FragPan1 e 25FragPan2	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Relação entre geração e coleta de RSU por região	15
Tabela 3.2 -	Faturamento da indústria eletroeletrônica brasileira (em milhões de reais)	17
Tabela 3.3 -	Geração de REEE por país	18
Tabela 3.4 -	Exemplos de estudos que empregaram etapas de pré-tratamento das PCI	22
Tabela 3.5 -	Exemplos de estudos que investigaram a biolixiviação de cobre presente em PCI utilizando o microrganismo <i>At. ferrooxidans</i>	28
Tabela 5.1 -	Análise química das placas de circuito impresso cominuídas obtida por meio da técnica analítica de Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Número de replicatas = 3	40

LISTA DE SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
<i>At. ferrooxidans</i>	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>
CE	Componentes Eletrônicos
DAM	Drenagem Ácida de Minas
DEMET	Departamento de Engenharia Metalúrgica
EDS	Detector de Energia Dispersiva de Raios-X
EEE	Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
Eh	Potencial de Oxirredução
GPS	Sistema de Posicionamento Global
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado
LED	Diodo Emissor de Luz
MEV-EDS	Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada ao sistema de Espectroscopia por Energia Dispersa
MPS	Matérias-Primas Secundárias
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
PCI	Placas de Circuito Impresso
pH	Potencial de Hidrogeniônico
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
RSU	Resíduos Sólidos Urbano
TI	Tecnologia da Informação
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REVISÃO DA LITERATURA	13
3.1	MINERAÇÃO URBANA	13
3.2	EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS E RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS	16
3.2.1	Faturamento da indústria elétrica e eletrônica	16
3.2.2	Placas de circuito impresso	19
3.3	MÉTODOS DE PROCESSAMENTO MECÂNICO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	19
3.3.1	Desmantelamento	20
3.3.2	Cominuição	20
3.3.3	Classificação granulométrica	20
3.3.4	Separação magnética	20
3.3.5	Separação eletrostática	20
3.4	PRÉ-TRATAMENTO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	21
3.5	BIOHIDROMETALURGIA	23
3.6	<i>ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS</i>	25
3.7	PRINCIPAIS PARÂMETROS DE ENSAIOS BIOHIDROMETALÚRGICOS	26
3.7.1	Tamanho de partícula	26
3.7.2	Nutrientes	26
3.7.3	Potencial hidrogeniônico	26
3.7.4	Potencial de oxirredução	27
3.7.5	Temperatura	27
3.7.6	Agitação	27
3.8	APLICAÇÃO DE <i>A. FERROOXIDANS</i> EM PROCESSOS BIOMETALÚRGICOS	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	34
4.1.1	Placas de circuito impresso fragmentadas	34

4.1.2	Placas de circuito impresso cominuídas	35
4.1.3	Placas de circuito impresso fragmentadas pré-tratadas	35
4.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	36
4.2.1	Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)	36
4.2.2	Microscopia eletrônica de varredura por energia dispersiva (MEV-EDS)	37
4.3	MICROORGANISMOS SELECIONADOS E PROCEDIMENTO DE ADAPTAÇÃO ÀS AMOSTRAS	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	40
5.1.1	Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)	40
5.1.2	Microscopia eletrônica de varredura por energia dispersiva (MEV-EDS)	41
5.2	ADAPTAÇÕES DOS MICROORGANISMOS ÀS PCI.....	43
5.2.1	Repique dos microrganismos <i>Acidithiobacillus</i>	43
5.2.2	Adaptações a 1% p.v ⁻¹	44
5.2.3	Adaptações a 2% p.v ⁻¹	46
5.2.4	Adaptações a 3% p.v ⁻¹	49
5.2.5	Adaptações a 4% p.v ⁻¹	50
5.2.6	Adaptações a 5% p.v ⁻¹	51
5.2.7	Adaptações a 10% p.v ⁻¹	53
5.2.8	Adaptações a 15% p.v ⁻¹	54
5.2.9	Adaptações a 20% p.v ⁻¹	55
5.2.10	Adaptações a 25% p.v ⁻¹	55
6	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

O avanço do processo de urbanização da população brasileira, resultou no aumento da geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), tornando necessário o desenvolvimento de tecnologias para reaproveitar estes materiais. A mineração urbana tem como objetivo reaproveitar, de maneira economicamente viável, elementos de interesse de resíduos pós-consumo, empregando algumas operações como coleta, análise, descaracterização e reciclagem (XAVIER *et al.*, 2017; XAVIER e OTTONI, 2019).

Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) são materiais classificados como RSU. As Placas de Circuito Impresso (PCI) são encontradas na maioria dos REEE, tendo em média 70% em massa de materiais não metálicos e, aproximadamente, 30% de metais e suas ligas (ROCCHETTI, AMATO e BEOLCHINI, 2018). A fração metálica das PCI pode possuir elementos como cobre (Cu), ouro (Au), níquel (Ni), prata (Ag), entre outros. Salienta-se que alternativas que visam o reaproveitamento destes metais têm sido amplamente estudadas, buscando técnicas economicamente viáveis e ambientalmente corretas (XAVIER e OTTONI, 2019).

O emprego da técnica de biolixiviação visando a extração de cobre presente nas PCI tem sido estudado por alguns pesquisadores como Adhapure *et al.* (2014), Rodrigues *et al.* (2015), dentre outros. A maioria dos estudos objetivaram trabalhar com as PCI cominuídas, sendo necessárias as etapas de desmantelamento, cominuição, classificação granulométrica, separação magnética e separação eletrostática dos constituintes das placas (PEREIRA, 2019; UTIMURA, 2020). Além disso, há na literatura relatos de alguns estudos que aplicaram etapas de pré-tratamento, principalmente, químicos, com o intuito de evitar a necessidade de cominuir as PCI (ADHAPURE *et al.*, 2014; BILESAN *et al.*, 2021; HENRIQUE JÚNIOR, *et al.*, (2013); RAELE, DE PRETTO e ZEZELL, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2013). Todavia, a utilização destas etapas de pré-tratamento, na maioria das vezes, resulta em um maior custo de processo, além de existir a preocupação com a parte ambiental (BILESAN *et al.*, 2021).

Diversos autores como Annamalai e Gurumurthy (2019), Arshadi e Mousavi (2014), Chen *et al.* (2015), Gu *et al.* (2014), entre outros, têm estudado fatores que influenciam nos ensaios de biolixiviação tais como (i) meio de cultivo, (ii) volume de inóculo, (iii) densidade de polpa, (iv) pH, (v) agitação, (vi) tamanho de partícula, (vii) composição das amostras, entre outros.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo estudar e investigar, em escala laboratorial, a adaptação de microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus* a PCI de computadores obsoletos, bem como selecionar, dentre as amostras avaliadas, a que possibilitou uma maior atividade microbiana dos microrganismos mesófilos na etapa de adaptação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar, em escala laboratorial, a adaptação de microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus* a PCI de computadores obsoletos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem em:

- i. Caracterizar quimicamente as amostras de PCI cominuídas, fragmentadas e fragmentadas pré-tratadas obtidas a partir de computadores obsoletos;
- ii. Avaliar a adaptação do microrganismo mesófilo do gênero *Acidithiobacillus* em contato com as amostras caracterizadas na etapa (i); e
- iii. Selecionar, dentre as amostras avaliadas, a que possibilitou uma maior atividade microbiana dos microrganismos mesófilos na etapa de adaptação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 MINERAÇÃO URBANA

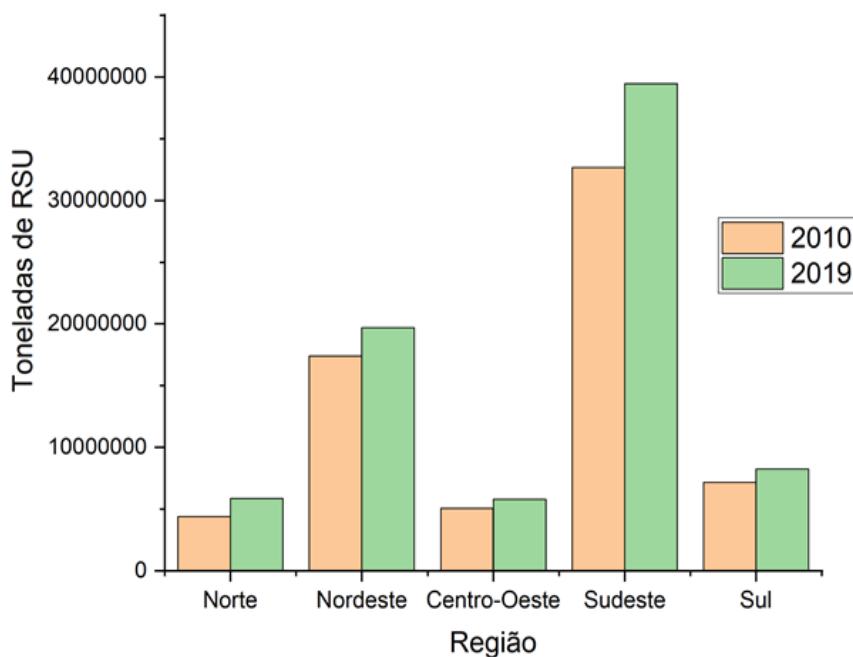
A partir da década de 1960, iniciou-se o processo de urbanização da população brasileira. O censo de 1970, revelou pela primeira vez que a população urbana brasileira era superior à população rural (BRITO e PINHO, 2012). Nos anos 1940, aproximadamente, 31% da população brasileira residia em áreas urbanas; entretanto, no ano de 2010, o grau de urbanização no Brasil era de aproximadamente 84% (BRITO e PINHO, 2012). O elevado crescimento do grau de urbanização, resultou no aumento da geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), tornando necessária ações e medidas para transformar os produtos já utilizados em novos produtos (XAVIER *et al.*, 2017).

Ao contrário da mineração convencional, na qual a extração de minerais é feita a partir de seus respectivos minérios, a mineração urbana tem como objetivo reaproveitar de maneira economicamente viável elementos de interesse de resíduos pós-consumo, também conhecidos como Matérias-Primas Secundárias (MPS) (XAVIER e LINS, 2018). A mineração urbana compreende várias operações para recuperação de elementos de interesse a partir das MPS, dentre estes processos, destacam-se a coleta, a análise, a descaracterização e, por fim, a reciclagem (XAVIER e OTTONI, 2019). Vários elementos podem ser recuperados a partir da mineração urbana, tais como ouro (Au), prata (Ag), cobre (Cu), ferro (Fe), níquel (Ni), entre outros. A mineração urbana pode ser aplicada em vários tipos de resíduos, como resíduos da construção civil, agrícolas, radioativos, hospitalares, elétricos e eletrônicos, entre outros (ANTENOR e SZIGETHY, 2020).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o Brasil registrou um considerável aumento na geração dos RSU entre os anos de 2010 e 2019, atingindo 79 milhões de toneladas geradas de RSU em 2019 (ABRELPE, 2020). Ainda, segundo o relatório da ABRELPE (2020), a geração per capita em kg/hab./ano passou de 348,3kg/hab./ano em 2010 para 379,2kg/hab./ano em 2019.

Conforme apresentado na Figura 3.1, a região brasileira que mais gerou RSU foi a região sudeste, seguida pelas regiões nordeste, sul, centro-oeste e norte. Deve ressaltar que entre os períodos de 2010 a 2019, houve uma crescente geração de RSU em todas as regiões brasileiras.

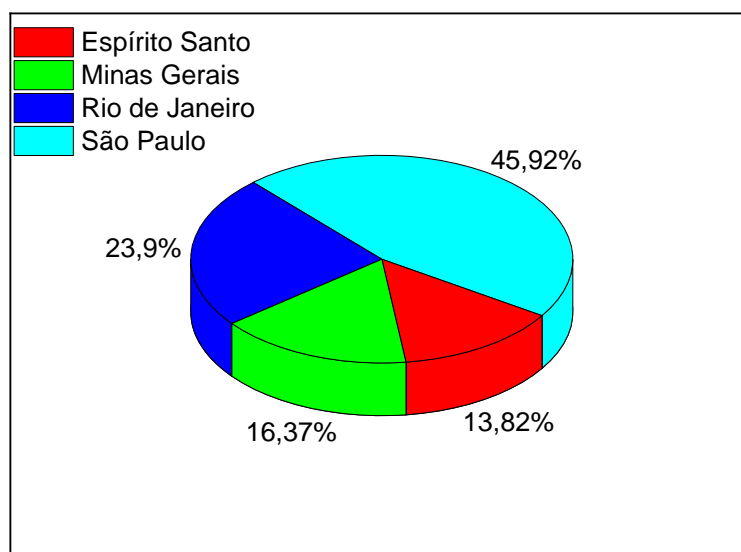
Figura 3.1 – Evolução do volume de geração de RSU por região no Brasil.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

A região sudeste obteve em 2019 uma geração de 29.442.995 de toneladas de RSU. O estado de São Paulo foi o maior gerador de RSU, seguido por Rio de Janeiro, Minas Gerais e Espírito Santo, conforme apresentado na Figura 3.2 (ABRELPE, 2020).

Figura 3.2 – Geração de RSU no ano de 2019 (t/ano).



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

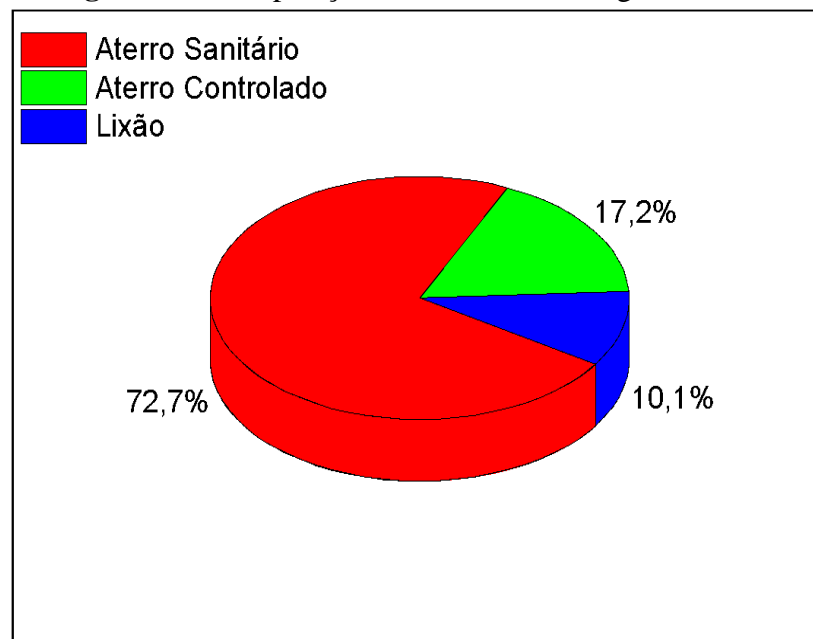
A Tabela 3.1 apresenta a relação entre a geração e a coleta de RSU por região brasileira. A região sudeste foi a que apresentou a maior coleta dos RSU, seguida pelas regiões sul, centro-oeste, norte e nordeste. A disposição final dos RSU é normalmente realizada em aterros sanitários, aterros controlados e lixão. A região sudeste destina 72,7% dos RSU em aterros sanitários, 17,2% em aterros controlados e 10,1% em lixões, conforme apresentado na Figura 3.3.

Tabela 3.1 – Relação entre geração e coleta de RSU por região.

Região	Geração (t)	Coleta (t)	Porcentagem de coleta (%)
Norte	5.866.645	4.770.185	81,31
Nordeste	19.700.875	15.973.495	81,08
Centro-Oeste	5.815.180	5.453.465	93,78
Sudeste	39.442.995	38.681.605	98,07
Sul	8.243.890	7.869.765	95,46

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

Figura 3.3 – Disposição final de RSU na região sudeste.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

A região Norte foi a região que mais depositou RSU em lixões, sendo aproximadamente 35% do volume de RSU coletados (ABRELPE, 2020). A disposição destes resíduos em lixões é considerada inadequada devido à possibilidade de promover poluições hídrica, do ar e do solo, além de poder ocasionar a propagação de doenças e contaminações para as populações próximas a essas áreas (BESEN, 2011).

3.2 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS E RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS

Segundo a STEP INITIATIVE (2014), os Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) podem ser definidos como qualquer dispositivo que possua circuitos ou Componentes Elétricos (CE) que necessitam de alguma fonte energética. Os EEE podem ser separados em 54 categorias diferentes, os quais são comumente agrupados em seis (6) categorias gerais, sendo elas (FORTI *et al.*, 2021):

- i. Equipamento de troca térmica: Equipamentos que têm como funções resfriamento, congelamento, aquecimento, entre outros. Neste grupo, podemos citar geladeiras, *freezers*, ar condicionado;
- ii. Telas e monitores: Corresponde a todos aqueles equipamentos que possuem telas ou monitores. Neste grupo, destacam-se os televisores, *notebooks*, *tablets*;
- iii. Lâmpadas: Corresponde as lâmpadas de tipos variados, tais como lâmpadas fluorescentes e Diodo Emissor de Luz (LED);
- iv. Equipamentos grandes: Equipamentos de maior porte, como geladeiras, máquinas de lavar roupas, entre outros;
- v. Equipamentos pequenos: Equipamentos residenciais ou industriais de menor porte, tais como calculadoras, barbeadores, rádios, entre outros; e
- vi. Pequenos equipamentos de Tecnologia da Informação (TI) e telecomunicações: Celulares, Sistema de Posicionamento Global (GPS), roteadores, telefones, entre outros.

3.2.1 Faturamento da indústria elétrica e eletrônica

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), o faturamento da indústria eletroeletrônica brasileira teve um aumento de R\$51.394.000 do ano de 2018 para o ano de 2021, o que correspondeu a um aumento em percentual de aproximadamente 26%,

conforme pode ser observado na Tabela 3.2 (ABINEE, 2021). O setor com maior faturamento da indústria elétrica e eletrônica foi o setor das telecomunicações, salientando-se a crescente no setor de informática no período entre 2018 e 2021.

Tabela 3.2 – Faturamento da indústria eletroeletrônica brasileira (em milhões de reais).

Setor Eletrônico	2018	2019	2020	2021*
	(M R\$)	(M R\$)	(M R\$)	(M R\$)
Automação industrial	5.099	5.480	5.766	7.226
Componentes elétricos e eletrônicos	10.906	10.736	11.067	13.423
Equipamentos industriais	25.446	26.828	29.567	33.467
Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica	17.130	15.825	17.716	19.557
Informática	25.485	26.622	34.838	41.419
Material elétrico de instalação	7.994	9.231	10.376	12.560
Telecomunicações	34.127	36.291	39.158	43.317
Utilidades domésticas	19.917	21.994	24.704	27.071
Total do setor eletrônico	146.104	153.007	173.192	198.038

*Projeção atualizada em maio de 2021.

Fonte: Adaptado de ABINEE (2021).

Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) são EEE descartados pelo proprietário sem a intenção de reutilização (STEP INITIATIVE, 2014). Conforme elucidado na Tabela 3.3, o Brasil foi o quinto maior gerador de REEE no mundo no ano de 2019, ficando atrás da China, Estados Unidos da América, Índia e Japão. No ano de 2019, a geração de REEE no território brasileiro foi de 2,1 milhões de toneladas, representando uma média de 10,2kg de REEE por habitante.

Tabela 3.3 – Geração de REEE por país.

País	Geração REEE (kt) (2019)
China	10.123
Estados Unidos da América	6.918
Índia	3.230
Japão	2.569
Brasil	2.143
Rússia	1.631
Indonésia	1.618
Alemanha	1.607
França	1.362
México	1.220
Itália	1.063

Fonte: Adaptado de Forti *et al.* (2021).

A ABINEE classifica os REEE em quatro (4) classes diferentes, denominadas: linhas branca, marrom, azul e verde. A linha branca indica eletrodomésticos de grande porte; a linha marrom diz respeito aos equipamentos de áudio e vídeo; a linha azul se refere às ferramentas e pequenos eletrodomésticos; e por fim, a linha verde corresponde aos equipamentos de TI e telecomunicações (XAVIER e OTTONI, 2019).

Xavier *et al.* (2017), propõem a seguinte classificação para os REEE:

- i. Eletrodomésticos;
- ii. Elétrico e eletrônicos;
- iii. Monitores;
- iv. Informática e telecomunicações;
- v. Fios e cabos;
- vi. Pilhas e baterias; e
- vii. Equipamentos de iluminação (lâmpadas).

Os REEE apresentam uma grande variedade de materiais e elementos químicos em sua composição. Em geral, os principais materiais encontrados nos REEE são: ferro, cobre, alumínio, fibras de vidro, materiais cerâmicos e poliméricos (NATUME e SANT'ANNA, 2011). Além disso, esses resíduos podem conter metais de alto valor econômico, como é o caso do ouro (Au), paládio (Pd), prata (Ag), entre outros (FRANCO e BARROS, 2016). Por outro lado, os REEE, também contêm elementos que podem causar danos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente, como os retardadores de chama bromados, cádmio, cromo, chumbo e outros (NATUME e SANT'ANNA, 2011).

3.2.2 Placas de circuito impresso

As Placas de Circuito Impresso (PCI), são facilmente encontradas na maioria dos REEE. Comumente, essas placas são compostas por uma placa isolante, normalmente, de resina epóxi e fibra de vidro, que tem como função servir como suporte mecânico. As PCI podem ser revestidas com uma fina camada de cobre em uma superfície, nas duas (2) superfícies, ou até mesmo em um padrão de multicamadas. Além disso, os CE que integram as PCI são soldados nas superfícies de cada placa (ROCCHETTI, AMATO e BEOLCHINI, 2018).

As PCI possuem em média 70% em massa de materiais não metálicos e, aproximadamente, 30% de materiais metálicos (MUNIYANDI, SOHAILI e HASSAN, 2013). Entre os materiais não metálicos, destacam-se os materiais polímeros e cerâmicos (FERREIRA, 2017). Em se tratando da fração metálica, ela possui uma grande quantidade de elementos químicos, como ouro (Au) e prata (Ag), que podem estar presentes nessas placas com concentrações até dez (10) vezes maiores do que seus respectivos minérios (ILYAS *et al.*, 2010).

3.3 MÉTODOS DE PROCESSAMENTO MECÂNICO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Os métodos de processamento mecânico de PCI podem ser divididos em desmantelamento, cominuição, classificação e separação (HENRIQUE JÚNIOR. *et al.*, 2013; VENTURA, 2014).

3.3.1 Desmantelamento

O desmantelamento é a primeira etapa do processamento mecânico a ser empregado em uma PCI. O processo de desmantelamento consiste na remoção dos CE que integram essas placas. Essa etapa pode ser realizada de maneira manual, inteligente ou semiautomatizada (DUAN *et al.*, 2011).

3.3.2 Cominuição

O processo de cominuição consiste em reduzir o tamanho das PCI com o auxílio de equipamentos de moagem. Dentre os principais equipamentos de moagem utilizados para cominuir as PCI, têm-se os moinhos de “martelo”, “bolas” ou “facas” (VEIT, 2001).

3.3.3 Classificação granulométrica

A etapa de classificação granulométrica tem como objetivo separar o material cominuído em diferentes frações granulométricas (VENTURA, 2014). Após a classificação granulométrica, faz-se necessário o estudo do grau de liberação do metal na amostra. De acordo com Pereira (2019), o grau de liberação dos materiais que constituem as PCI depende diretamente do tamanho da partícula.

3.3.4 Separação magnética

Segundo Veit (2001), todos os materiais que compõem as PCI são afetados de alguma maneira pela presença de um campo magnético. O emprego da etapa de separação magnética no processamento dessas placas é fundamental para concentrar o conteúdo metálico, uma vez que ocorrerá a separação de duas (2) frações, sendo elas: magnéticas e não magnéticas.

3.3.5 Separação eletrostática

A separação eletrostática é uma técnica de separação empregada no processamento de PCI que utiliza as forças que atuam sobre corpos carregados ou polarizados sob a ação de um campo magnético (SILVEIRA, 2016). A separação eletrostática tem como objetivo de funcionamento separar partículas condutoras de partículas não condutoras. No estudo realizado por Pereira

(2019), após realizar as etapas de desmantelamento, cominuição, classificação e separação magnética, encaminhou a fração não magnética de PCI para a etapa de separação eletrostática. Este experimento resultou em 28,57% de PCI não condutoras, 15,45% de PCI mistas(Condutoras e Não Condutoras) e 53,18% de PCI condutoras.

3.4 PRÉ-TRATAMENTO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

As camadas de resina empregadas sobre as PCI são prejudiciais para o tratamento biohidrometalúrgico, em virtude de impedir o contato direto entre os elementos metálicos de interesse presentes nas placas e os microrganismos utilizados. A Tabela 3.4 apresenta alguns estudos que realizaram etapas de pré-tratamento das PCI, com o objetivo de remover ou minimizar a camada de resina protetora.

Henrique Júnior *et al.* (2013) utilizaram-se uma solução contendo 6mol.L^{-1} de hidróxido de sódio (NaOH) para realizar o pré-tratamento de oito (8) tipos de PCI de telefones celulares. Inicialmente, a solução foi adicionada em um béquer sobre uma chapa aquecedora-agitadora. Essa solução foi aquecida a 60°C , sob agitação magnética (100min^{-1}) por um período de tempo de 1 a 4 horas. Os autores relataram que obtiveram êxito ao realizarem o pré-tratamento por pelo menos 2 horas.

Raele, De Pretto e Zezell (2017) utilizaram uma fonte de laser Nd-YAG, o qual foi operado em 1.064nm com energia máxima nominal por pulso de 350mJ e taxa de repetição de 20Hz para realizar a remoção da camada de resina presente nas PCI de computadores. Os autores utilizaram um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado a um detector de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) para avaliar a eficiência de remoção da resina. Os autores encontraram resultados satisfatórios para remoção da resina ao empregarem tal metodologia.

Rodrigues *et al.* (2013) utilizaram uma solução de dietilenoglicol (20% v.v⁻¹) e hidróxido de potássio (20% p.v⁻¹) sob agitação por 60 minutos em um banho a 90°C . Os autores obtiveram sucesso na exposição do cobre presente nas PCI de computadores obsoletos, após a remoção do solvente. Além disso, concluíram que melhores extrações foram obtidas ao utilizarem as amostras pré-tratadas, obtendo uma extração de 60% de cobre, enquanto que para as amostras sem pré-tratamento, alcançaram apenas 20% de extração de cobre.

Tabela 3.4 – Exemplos de estudos que empregaram etapas de pré-tratamento das PCI.

Referência	Tipo de pré-tratamento	Condição experimental
Henrique Júnior. <i>et al.</i> , (2013)	Químico	Amostra = 10mL.g ⁻¹ [NaOH] = 6mol.L ⁻¹ Temperatura = 60°C Agitação = 100min ⁻¹ Tempo = 2 horas
Raele, De Pretto e Zzell (2017)	Térmico	Nd:YAG laser (Brilliant,Quantel Laser, Les Ulis Cedex, France)
Rodrigues <i>et al.</i> (2015)	Químico	Amostra = 100g.L ⁻¹ [Dietilenoglicol] = 20% v.v ⁻¹ [Hidroxido de potássio] = 20% p.v ⁻¹ Temperatura: 90°C Agitação: Não mencionado Tempo = 1 hora
Adhapure <i>et al.</i> (2014)	Químico	Amostra = 100g.L ⁻¹ [NaOH] = 10mol.L ⁻¹ Temperatura: Não mencionado Agitação = 0min ⁻¹ Tempo = 12 horas
Bilesan <i>et al.</i> (2021)	Físico	Amostra: Não mencionado Hidrociclone Temperatura: 22°C Agitação = 500min ⁻¹ Tempo = 5min
Annamalai e Gurumurthy (2019)	Térmico	Amostra = 12g.L ⁻¹ Autoclave Temperatura: 121°C Pressão: 15psi Agitação = 160min ⁻¹ Tempo = 20 minutos
Arshadi e Mousavi (2014)	Químico	Amostra = 10g.L ⁻¹ [Solução salina] = 100g.L ⁻¹ (62%) Temperatura: Não mencionado Agitação: Não mencionado Tempo = 2 horas

Adhapure *et al.* (2014) empregaram uma solução de 10mol.L⁻¹ de hidróxido de sódio (NaOH). As PCI de computadores obsoletos foram imersas na solução dentro de um béquer por 12 horas. As placas tratadas pelos autores foram cortadas em diferentes tamanhos (12cm × 6cm e 4cm × 2,5cm) e trabalhadas em um processo biometalúrgicos.

Bilesan *et al.* (2021) utilizaram cerca de 120g de PCI cominuídas, cuja granulometria das partículas foi inferior a 75µm, dispersas em 10L de água destilada. A mistura foi submetida a agitação de 1.000min⁻¹, com o objetivo de minimizar o efeito da aglomeração das partículas.

Os experimentos foram realizados por 15 minutos com pressão desejada pelos autores entre 1 e 3bar. Após a operação, retirou-se as amostras de *overflow* e *underflow*, atingindo uma eficiência de recuperação de 75% do ouro contido nas amostras, 64% de prata e 78% de paládio.

Annamalai e Gurumurthy (2019) realizaram uma etapa de lavagem das PCI de computadores obsoletos, para isso os autores adicionaram 10g de PCI em 100mL de solução de cloreto de sódio (NaCl), sob agitação, por um período de 10 minutos. As partículas que afundaram foram coletadas e encaminhadas a uma autoclave, a qual foi operada a uma temperatura de 121°C e pressão de 15psi durante 20 minutos, promovendo a esterilização das PCI.

Visando a remoção da camada polimérica presente nas PCI de computadores, Arshadi e Mousavi (2014) utilizou-se cerca de 100mL de uma solução de água salina (100g.L^{-1}) em contato com 61,5g de PCI. As PCI foram deixadas imersas na solução por 2 horas e após este período, o material removido foi descartado. Por fim, as placas foram encaminhadas para a etapa de secagem, em um forno a 70°C por 24 horas.

3.5 BIOHIDROMETALURGIA

A metalurgia extrativa é a área da metalurgia que estuda métodos de obtenção do metal puro a partir dos seus minérios ou subprodutos (GOUVEA, 2007). A metalurgia extrativa inicialmente era dividida em três (3) grandes ramos: Pirometalurgia; Hidrometalurgia; e Eletrometalurgia (FRANCISCO, 2006). A biohidrometalurgia é uma quarta ramificação da metalurgia extrativa que está em evolução nas últimas décadas (UTIMURA, 2020).

A pirometalurgia é área da metalurgia, na qual aplica-se elevadas temperaturas para auxiliar nas reações de extração. A hidrometalurgia é o ramo da metalurgia, em que solventes aquosos são utilizados para lixiviar metais. A eletrometalurgia é a área da metalurgia, em que energia elétrica é utilizada para auxiliar na dissociação de metais em soluções aquosas (FRANCISCO, 2006). A biohidrometalurgia por outro lado, é o ramo da metalurgia que estuda o processo de solubilização de componentes de uma amostra que pode ser proveniente de vários tipos de materiais, como minério, rejeitos de processos metalúrgicos, RSU, dentre outros, a partir da atuação de diferentes culturas de microrganismos (HENNEBEL *et al.*, 2015).

De acordo com Borém e Santos (2001), a utilização da biotecnologia vem sendo realizada pelo homem desde a antiguidade em processos de fabricação de pães e de vinho. Segundo Schmidell *et al.* (2001), o tratado História Natural de Plínio (23 a 79 d.C.) relata a utilização de microrganismos na produção de cobre em algumas regiões da Espanha. Os autores ainda relatam o emprego de técnicas de lixiviação bacteriana em pilhas em vários países, tais como Alemanha, Hungria e Itália durante a Idade Média. O processo empregado nas minas de Rio Tinto na Espanha por volta de 1752, é um dos principais marcos da utilização da biolixiviação na humanidade. O minério de cobre das minas era cominuído e dispostos em pilhas sobre o solo previamente impermeabilizado. As camadas de minérios eram alternadas com camadas de madeira que eram levadas a combustão, sendo responsáveis por promover a oxidação dos sulfetos de cobre e de ferro presentes em sulfatos e óxidos. Após a combustão, as pilhas eram lavadas com água que dissolviam os sulfatos produzindo uma lixiviação ácida com sulfatos de ferro, sulfatos de cobre e ácido sulfúrico a partir do minério calcinado. A operação no Rio Tinto foi interrompida em 1888 por Leis ambientais, porém, a lixiviação ácida continuava acontecendo. Estudos na região comprovaram a ação de microrganismos *Thiobacillus ferrooxidans* como responsáveis pela produção desta lixiviação (SCHMIDELL *et al.*, 2001).

A biohidrometalurgia é uma técnica ecologicamente correta quando comparada a maioria dos outros processos de obtenção de metais já que os níveis de poluição, riscos ambientais e sanitários são inferiores à maioria dos processos metalúrgicos. Além disso, tem-se uma menor geração de resíduos e consumo de energia se comparada aos processos eletrometalúrgicos e pirometalúrgicos, tornando a biohidrometalurgia uma tecnologia verde, com grande potencial de utilização com base nas necessidades ambientais, causando menores índices de poluição e degradação (GIESE, 2020).

A utilização dos microrganismos em processos metalúrgicos é favorecida por quatro (4) pilares. O primeiro pilar é referente à economia de insumos utilizados nos processos quando comparados a outros processos como os hidrometalúrgico clássicos, já que os microrganismos são capazes de produzir os próprios insumos a partir de substratos presentes no próprio minério. O segundo pilar é referente ao baixo consumo energético. O baixo custo operacional e de capital de investimento são responsáveis por sustentar o terceiro pilar, devido à grande simplicidade das instalações. Por fim, a questão ambiental sustenta o quarto pilar da biohidrometalurgia, a título de exemplo, tem-se a não emissão do dióxido de enxofre (SO₂), como é comumente visto em processos pirometalúrgicos (SCHMIDELL *et al.*, 2001).

Existem vários grupos de microrganismos capazes de serem empregados em processos biohidrometalúrgicos. Dentre os microrganismos do tipo acidófilos, isto é, microrganismos que crescem em ambientes altamente ácidos, sendo capazes de interagir com sulfetos, incluem as *At. ferrooxidans*, *At. thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, e alguns microrganismos heterotróficos como *Sulfolobus sp* (GIESE, 2020).

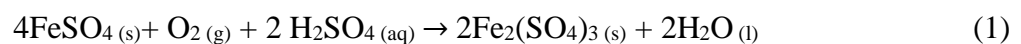
3.6 ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS

As bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* (*At. ferrooxidans*) são as mais estudadas para processos biohidrometalúrgicos. As *At. ferrooxidans* são bactérias acidófilas, normalmente encontrada em ambientes naturais de baixo pH, principalmente, em ambientes antropogênicos, tais como ambientes associados com corpos de pirita, depósitos de carvão e ambientes de Drenagem Ácida de Minas (DAM) (QUATRINI e JOHNSON, 2019; VALDÉS *et al.*, 2008).

As *At. ferrooxidans* são quimiolitótróficas autótrofas, que utilizam como fonte de energia a oxidação de íons Fe^{2+} e alguns compostos de enxofre. Existem relatos da utilização desta bactéria para oxidar minerais como arsenopirita ($AsFeS$), bornita (Cu_5FeS_4), calcocita (Cu_2S), calcopirita ($CuFeS_2$), galena (PbS), pirita (FeS), entre outros (SCHIPPERS, 2007).

Segundo Schippers (2007), a *At. ferrooxidans* é um microrganismo capaz de sobreviver na faixa de temperatura entre 10°C e 47°C. Além disso, o autor classifica a faixa de pH em que a bactéria pode sobreviver entre 1,3 e 4,5.

Borém e Santos (2001), definem as reações necessárias para o crescimento bacteriano como:



Em geral, podem ocorrer três (3) mecanismos de contato entre os microrganismos *At. ferrooxidans* e um substrato, neste caso uma PCI, de acordo com o proposto por Crundwell (2003).

3.7 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE ENSAIOS BIOHIDROMETALÚRGICOS

Diante da revisão da literatura, pode-se inferir que os principais parâmetros que afetam os ensaios biohidrometalúrgicos são: tamanho da partícula; nutrientes; pH; Eh; temperatura e agitação. O controle correto destes parâmetros são cruciais para a correta execução dos ensaios biohidrometalúrgicos, aumentando a eficiência do processo.

3.7.1 Tamanho de partícula

O tamanho de partícula em ensaios de biolixiviação impactam diretamente na cinética de extração do metal (EDUARDO e SOBRAL, 2013). Em geral, quanto menor for a granulometria do material estudado, maior será a área exposta ao processo de biolixiviação, facilitando a interação entre a bactéria e o substrato (SCHMIDELL *et al.*, 2001). Alguns autores realizaram ensaios de biolixiviação de PCI com as placas fragmentadas, isto é, em pedaços (ADHAPURE *et al.*, 2014; RODRIGUES *et al.*, 2015). Por outro lado, a grande maioria dos ensaios de biolixiviação foram realizados empregando as PCI cominuídas (ANNAMALAI e GURUMURTHY, 2019; ARSHADI e MOUSAVI, 2014; CHOI *et al.*, 2004; GU *et al.*, 2014; RODRIGUES *et al.*, 2013; RODRIGUES *et al.*, 2015; UTIMURA *et al.*, 2018; UTIMURA, 2020; YANG *et al.*, 2009).

3.7.2 Nutrientes

Os nutrientes envolvidos no processo são de extrema importância para o sucesso da operação de biolixiviação. Os nutrientes do processo podem ser classificados entre macronutrientes e micronutrientes. Os macronutrientes são os utilizados em grande escala no metabolismo das bactérias, tais como nitrogênio, magnésio, sódio, potássio, fósforo, entre outros. Por outro lado, os micronutrientes são aqueles utilizados em pequenas proporções, como é o caso do ferro, iodo, cobre, zinco e cobalto (SCHMIDELL *et al.*, 2001).

3.7.3 Potencial hidrogeniônico

O controle restrito do Potencial Hidrogeniônico (pH) é crucial para a correta execução dos ensaios de biolixiviação. As *At. ferrooxidans* são bactérias acidófilas, que têm crescimento

facilitado em soluções ácidas (valores baixos de pH) (VALDÉS *et al.*, 2008). O pH ideal para ensaios de biolixiviação, auxilia na prevenção da precipitação de jarosita no sistema (DAOUD e KARAMANEV, 2006). De acordo com Yang *et al.* (2009), o pH ideal para os ensaios de biolixiviação em PCI está compreendido entre 1,5 e 2,0.

3.7.4 Potencial de oxirredução

O valor do Potencial de Oxirredução (Eh) é de extrema importância para o acompanhamento da atividade microbiana, permitindo verificar a oxidação dos íons ferrosos por meio da ação dos microrganismos *At. ferrooxidans*.

3.7.5 Temperatura

A temperatura do processo influencia diretamente na eficiência de extração da *At. ferrooxidans*. O valor de temperatura ótimo para o crescimento das bactérias *At. ferrooxidans* é de 33°C (MOUSAVI *et al.*, 2006).

3.7.6 Agitação

A disponibilidade de oxigênio molecular (O₂) e dióxido de carbono (CO₂) é crucial para o processo de biolixiviação. O oxigênio é o oxidante da reação, enquanto que o gás carbônico é a fonte de carbono para as bactérias (SCHMIDELL *et al.*, 2001). A agitação dos ensaios de oxidação é responsável por introduzir oxigênio e gás carbônico ao meio lixiviante (YAMANE, ESPINOSA E TENÓRIO, 2013). Estudos realizados por Yamane, Espinosa e Tenório (2013), demonstraram que a agitação ideal para processos de biolixiviação de sucata eletrônica é de 170min⁻¹.

3.8 APLICAÇÃO DE *At. FERROOXIDANS* EM PROCESSOS BIO&HIDROMETALÚRGICOS

A aplicação de *At. ferrooxidans* em PCI tem sido estudada por diversos pesquisadores. A Tabela 3.5 apresenta uma visão geral de alguns estudos envolvendo a lixiviação de cobre, contido em diferentes tipos de PCI, bem como o tipo de pré-tratamento feito na amostra, as condições experimentais empregadas, o reator de estudo e as extrações obtidas.

Tabela 3.5 – Exemplos de estudos que investigaram a biolixiviação de cobre presente em PCI utilizando o microrganismo *At. ferrooxidans* (**continua**).

Referência	Amostra	Condição experimental	Extração (%)
Annamalai e Gurumurthy (2019)	PCI de computador	Tamanho de partícula: 1mm Densidade de polpa: 10g.L ⁻¹ Pré-tratamento: Autoclave pH: 2,25 Tempo: 7 dias Agitação: 160min ⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 40% p.v ⁻¹	Cobre: 26%
Gu <i>et al.</i> (2014)	PCI de computador	Tamanho de partícula: 0,42 - 0,84mm Densidade de polpa: 10g.L ⁻¹ Pré-tratamento: n.m ¹ pH: 2,5 Tempo: 5 dias Agitação: 125min ⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 28°C Concentração de inóculo: 5% p.v ⁻¹	Cobre: 90,10%
Arshadi e Mousavi (2014)	PCI de computador	Tamanho de partícula: 93µm Densidade de polpa: 20g.L ⁻¹ Pré-tratamento: Químico pH: 3 Tempo: 4 dias Agitação: 170min ⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 10% p.v ⁻¹	Cobre: 100% Níquel: 100%
Rodrigues <i>et al.</i> (2015)	PCI de computador	Tamanho de partícula: 20mm Densidade de polpa: 10g.L ⁻¹ Pré-tratamento: Químico pH: 1,75 ± 0,05 Tempo: 7 dias Agitação: 170min ⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 10% p.v ⁻¹	Cobre: 94%

¹n.m: não mencionado.

Tabela 3.5 – Exemplos de estudos que investigaram a biolixiviação de cobre presente em PCI utilizando o microrganismo *At. ferrooxidans* (**continuação**).

Referência	Amostra	Condição experimental	Extração (%)
Adhapure <i>et al.</i> (2014)	PCI de computador	Tamanho de partícula: 12cm × 6cm e 4cm × 2,5cm Densidade de polpa: n.m ¹ Pré-tratamento: Químico pH: 2,42 Tempo: 10 dias	Cobre: n.m ¹ Níquel: n.m ¹ Zinco: n.m ¹

		<p>Agitação: 50min⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 15% p.v⁻¹</p>	
Yamane, Espinosa e Tenório (2011)	PCI de computador	<p>Tamanho de partícula: n.m¹ Densidade de polpa: 15g.L⁻¹ Pré-tratamento: n.m¹ pH: 1,8 - 2,0 Tempo: 30 dias Agitação: 185min⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 5% p.v⁻¹</p>	Cobre: 56%
Rodrigues <i>et al.</i> (2013)	PCI de computador	<p>Tamanho de partícula: < 420µm Densidade de polpa: 5g.L⁻¹ Pré-tratamento: n.m¹ pH: 1,7 ± 0,1 Tempo: 7 dias Agitação: 150min⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 34°C Inóculo: membrana de celulose</p>	Cobre: 100%
Chen <i>et al.</i> (2015)	n.m ¹	<p>Tamanho de partícula: 4mm – 10mm Densidade de polpa: 50g.L⁻¹ Pré-tratamento: Químico pH: 2,25 Tempo: 28 dias Vazão: 40mL.min⁻¹ Reator: Coluna Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 1% p.v⁻¹</p>	Cobre: 94,8%
Choi <i>et al.</i> (2004)	n.m ¹	<p>Tamanho de partícula: -14/+20# Tyler Densidade de polpa: 50g.L⁻¹ Pré-tratamento: n.m¹ pH: 2,00 Tempo: 7 dias Agitação: 180min⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 30mg.L⁻¹</p>	Cobre: 37%

¹n.m: não mencionado.

Tabela 3.5 – Exemplos de estudos que investigaram a biolixiviação de cobre presente em PCI utilizando o microrganismo *At. ferrooxidans* (**continuação**).

Referência	Amostra	Condição experimental	Extração (%)
Yang <i>et al.</i> (2009)	n.m ¹	<p>Tamanho de partícula: < 0,5mm Densidade de polpa: 25g.L⁻¹ Pré-tratamento: n.m¹ pH: 1,5 – 2,0 Tempo: 4 dias Agitação: 165min⁻¹</p>	Cobre: 99,06%

		Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 10% p.v ⁻¹	
Utamura <i>et al.</i> (2018)	n.m ¹	Tamanho de partícula: < 1mm Densidade de polpa: 30g.L ⁻¹ Pré-tratamento: n.m ¹ pH: 1,8 Tempo: 8 dias Agitação: 170min ⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 10% p.v ⁻¹	Cobre: 100%
Utamura (2020)	PCI de computador	Tamanho de partícula: 0,5mm - 1mm Densidade de polpa: 35g.L ⁻¹ Pré-tratamento: n.m ¹ pH: 2,0 Tempo: 4 dias Agitação: 170min ⁻¹ Reator: <i>Erlenmeyer</i> Temperatura: 30°C Concentração de inóculo: 10% p.v ⁻¹	Cobre: 96%

¹n.m: não mencionado.

Annamalai e Gurumurthy (2019) realizaram experimentos de biolixiviação com bactérias do gênero *At. ferrooxidans* em *Erlenmeyers* de 250mL utilizando 100mL de meio 9K e porcentagens variáveis de inóculo (10% p.v⁻¹, 20% p.v⁻¹, 30% p.v⁻¹ e 40% p.v⁻¹), devidamente, adaptado e ativado por um período de sete (7) dias. Os experimentos foram conduzidos em temperatura de 30°C a 160min⁻¹ por um período de 5 a 7 dias. Os autores realizaram ensaios com pH de 1,6, 1,8, 2,0, 2,2 e 2,4, os quais foram ajustados com ácido sulfúrico (H₂SO₄) 2mol.L⁻¹ e com proporções de sólido em solução de 10g.L⁻¹, 20g.L⁻¹, 30g.L⁻¹, e 40g.L⁻¹. Além disso, variou-se a granulometria das PCI de computador em 1mm, 2mm, maior que 2mm e maior que 10mm. Nos ensaios com 10g.L⁻¹ de PCI, granulometria de 1mm e concentração de inóculo 10% p.v⁻¹, os autores obtiveram a melhor extração de cobre em pH igual a 2,2, alcançando uma extração de 24,47%. Nos ensaios em pH igual a 2,0, o melhor valor de extração de cobre foi obtido nas partículas de 1mm, atingindo 32,44%. Em se tratando da variável densidade de polpa, a melhor extração de cobre foi obtida ao utilizar 10g.L⁻¹, fixando o pH igual a 2,0 e a concentração de inóculo em 10% p.v⁻¹. A concentração de inóculo que apresentou uma maior extração de cobre foi de 40% p.v⁻¹, chegando a extrair aproximadamente 33% de cobre.

Gu *et al.* (2014) realizaram ensaios de biolixiviação de cobre de PCI com tamanhos de partículas variando entre 0,25mm a 0,42mm, 0,42mm a 0,84mm e superiores a 0,84mm. Os ensaios foram realizados sob as seguintes condições experimentais: temperatura de 28°C,

agitação de 125min^{-1} , tempo de 5 dias, densidade de polpa de 5g.L^{-1} , 10g.L^{-1} e 15g.L^{-1} e pH igual a 1,5, 2,0 e 2,5. A melhor condição alcançada foi obtida ao realizar o ensaio de biolixiviação empregando tamanhos de partículas variando entre 0,42mm a 0,848mm, densidade de polpa de 10g.L^{-1} de PCI e pH inicial igual a 2,5 durante 5 dias, alcançando uma extração de cobre de 90,10%.

Arshadi e Mousavi (2014) realizaram experimentos de biolixiviação empregando a abordagem multivariada de modelo polinomial, determinando como variáveis independentes os parâmetros pH, densidade de polpa, concentração de íons Fe^{3+} e tamanho de partícula. Os autores concluíram que sob a seguinte condição experimental: pH inicial igual a 2,0, concentração de íons Fe^{3+} igual a 5g.L^{-1} , densidade de polpa igual a 4g.L^{-1} e tamanho de partícula igual a $93\mu\text{m}$ foi possível alcançar 100% de extrações de cobre e níquel presentes em PCI.

Rodrigues *et al.* (2015) realizaram ensaios de biolixiviação de PCI cominuídas de computadores. Os autores empregaram uma densidade de polpa de 10g.L^{-1} de PCI cominuídas, cuja granulometria variava entre $147\mu\text{m}$ a $208\mu\text{m}$. As amostras foram adicionadas a 100mL em meio de crescimento, juntamente a 10% de inóculo e 10% de sulfato ferroso em concentração pré-determinada. O pH foi mantido em 1,75 utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sódio (NaOH) para realizar os ajustes necessários. Os autores ao realizarem os ensaios de biolixiviação a 30°C , sob uma agitação de 150min^{-1} , por um período de 6 dias obtiveram uma extração de cobre de 94%.

Adhapure *et al.* (2014) utilizaram um consórcio de microrganismos de *Acidiphilum sp.*, *Leptospirillum spp.*, *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus caldus* e *Sulfobacillus*, para realizar os ensaios de biolixiviação de PCI fragmentadas com as seguintes dimensões: $12\text{cm} \times 6\text{cm}$ e $4\text{cm} \times 2,5\text{cm}$. Os melhores resultados foram obtidos nas PCI fragmentadas ($4\text{cm} \times 2,5\text{cm}$) atingindo, aproximadamente, 100% de extração de cobre. Esse experimento foi realizado em *Erlenmeyer* disposto em *shaker* de agitação orbital a 120min^{-1} a 30°C . A quantidade de cobre extraída foi de 940mg.L^{-1} , observou-se ainda a extração de zinco e de níquel.

Yamane, Espinosa e Tenório (2011) estudaram o efeito da suplementação de ferro e da adaptação bacteriana sobre a biolixiviação de PCI de computadores obsoletos. As PCI foram desmanteladas, cortadas em guilhotina manual, cominuídas em moinho de martelos e, por fim, separadas por um separador magnético. Os ensaios foram realizados em *Erlenmeyer* em um

shaker, o qual foi operado a 30°C, sob agitação de 185min⁻¹. Na etapa de adaptação bacteriana, os ensaios iniciaram com densidade de polpa de fração não magnética de 2,5g.L⁻¹, adquirindo resistência e sendo repicadas sequencialmente com acréscimos de 0,5g.L⁻¹ até chegar a 8,325g.L⁻¹. Os experimentos de biolixiviação foram inoculados com 5% (p.v⁻¹) da solução de *At. ferrooxidans*, com pH mantido na faixa de 1,8 a 2,0. Os autores concluíram que a adaptação bacteriana aumentou a taxa de extração de cobre e obtiveram uma extração de 56% em um período de 30 dias.

Rodrigues *et al.* (2013) investigaram a biolixiviação de PCI de computadores obsoletos em *Erlenmeyer* sob agitação de 150min⁻¹ em diferentes concentrações iniciais de íons Fe²⁺ (0,0g.L⁻¹, 0,5g.L⁻¹, 1,5g.L⁻¹, 2,5g.L⁻¹) e na presença de pirita (50g.L⁻¹) como fonte de ferro. Os ensaios foram realizados a 34°C, com tamanho de partículas inferiores a 420µm e 0,5% de sólidos (p.v⁻¹), mantido em valores de pH igual a 1,7. A extração de cobre foi de cerca de 100%, sendo a extração nas primeiras 48 horas sem a adição de pirita e em 24 horas com a adição de pirita.

Chen *et al.* (2015) estudaram a biolixiviação de PCI em colunas. Os experimentos foram realizados por 28 dias obtendo uma extração de cobre de 94,8%, com pH mantido em 2,25 com densidade de polpa de 50g.L⁻¹ e proporção de inóculo correspondente a 1%. As amostras das PCI foram cortadas em pedaços variando de 4mm a 10mm e, em seguida, lavadas em solução 5mol.L⁻¹ de ácido sulfúrico (H₂SO₄). Nos ensaios em colunas, 250g das amostras lavadas, foram utilizadas em 4,95L de meio de crescimento e 0,05L de cultura *At. ferrooxidans*.

Choi *et al.* (2004) realizaram os ensaios com pH inicial mantido em torno de 2,0. Os ensaios foram realizados em meio 9K a 30°C por um período de 30 dias. Além disso, empregaram nos ensaios 50g.L⁻¹ de PCI fragmentadas. Com o intuito de aumentar a dissolução de cobre e, consequentemente, melhorar a eficiência do processo de biolixiviação, os autores adicionaram 1g.L⁻¹ de ácido cítrico na solução de lixiviação. Os autores obtiveram 37% de extração de cobre sem adição de ácido cítrico e 80% quando adicionado ácido cítrico.

Yang *et al.* (2009) estudaram os fatores que influenciam a biolixiviação de cobre de PCI. As PCI fragmentadas utilizadas nos ensaios apresentavam granulometrias inferiores a 0,5mm. Os experimentos de biolixiviação ocorreram na presença de 10mL de inóculo de *At. ferrooxidans* e 90mL de meio 9K. Para o estudo da oxidação do Fe²⁺ para Fe³⁺, o pH foi mantido a 2,0 e

concentrações de íons Fe^{2+} pré-determinadas em 3g.L^{-1} , 5g.L^{-1} , 7g.L^{-1} e 9g.L^{-1} . Os ensaios foram realizados em *shaker* rotativo a 165min^{-1} e 30°C por cerca de 3 a 4 dias, as concentrações de Fe^{3+} encontradas para cada valor inicial de Fe^{2+} foram $2,63\text{g.L}^{-1}$, $3,48\text{g.L}^{-1}$, $4,72\text{g.L}^{-1}$, $6,66\text{g.L}^{-1}$, respectivamente. Para determinar a influência do pH na lixiviação das PCI, 1,5g de placas foram adicionados em uma solução de 100 mL de meio de crescimento, com 20% da solução constituída em inóculo de *At. ferrooxidans* e o pH pré-determinado a 1,5, 1,7 e 2,0. Os autores observaram em seus experimentos que quanto maior a concentração dos íons Fe^{3+} , mais rápida a extração de cobre. Além disso, constataram que quanto menor o pH (1,5), mais rápida foi a lixiviação de cobre. Em pH 1,5 a extração chegou a 99,06 % em 48 horas, enquanto em pH 2,0, após 48 horas, a extração foi de aproximadamente 17%.

Utamura *et al.* (2018) utilizaram PCI cominuídas, as quais foram quarteadas e separadas em amostras de 5g. Os ensaios de biolixiviação ocorreram na presença de bactérias *At. ferrooxidans* pré-adaptadas até 30g.L^{-1} . Os ensaios utilizaram 10% de inóculo em solução de 270mL de meio de crescimento. Os ensaios foram realizados em *shakers* agitados em 170min^{-1} a 30°C por um período de 15 dias, com o pH em 1,8. Os autores obtiveram uma extração de 100% em 8 dias.

Utamura (2020) realizou ensaios de biolixiviação com a fração não magnética obtida após as etapas de cominuição e separação magnética. A autora utilizou-se de 10% p.v⁻¹ de inóculo pré-adaptado, densidade de polpa de 35g.L^{-1} e 30g.L^{-1} de PCI de computadores e de impressoras obsoletos, respectivamente. Os experimentos foram realizados em *shaker* termostatizado a 30°C , com agitação constante de 170min^{-1} e pH inicial igual a 1,8, por um período de 15 dias. Diante do emprego das *At. ferrooxidans*, foi possível obter uma extração de cobre de 90% entre o terceiro e o quarto dia. No décimo quinto dia de ensaio, a extração de cobre foi de 100%.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Para a realização do presente estudo, foram utilizadas as PCI coletadas em trabalho anterior (PEREIRA, 2019).

Nesta monografia, foi avaliado e estudado o comportamento de três (3) amostras: (i) Placas de circuito impresso fragmentadas; (ii) Placas de circuito impresso cominuídas; e (iii) Placas de circuito impresso fragmentadas pré-tratadas. A seguir, encontra-se descrita, detalhadamente, o procedimento adotado para a obtenção de cada uma das amostras.

4.1.1 Placas de circuito impresso fragmentadas

A Figura 4.1 apresenta a amostra de PCI fragmentadas, obtidas ao final da etapa de fragmentação realizada por Pereira (2019).

Figura 4.1 – Placas de circuito impresso fragmentadas.



4.1.2 Placas de circuito impresso cominuídas

As PCI cominuídas (Figura 4.2) também foram processadas e obtidas por Pereira (2019) e apresentaram tamanho de partícula menor que 1,68mm.

Figura 4.2 – Placas de circuito impresso cominuídas.



4.1.3 Placas de circuito impresso fragmentadas pré-tratadas

As PCI fragmentadas, citadas no tópico 4.1.1, foram encaminhadas para a etapa de moagem, a qual também foi realizada utilizando um moinho pulverizador de panela orbital da marca *Fritsch*, modelo *Pulverisette 9*. Todavia, para a obtenção das PCI fragmentadas pré-tratadas mecanicamente (Figura 4.3), o moinho foi operado na velocidade de rotação média, durante um período de 20 a 30 segundos. Após esse período, interrompeu-se a moagem e notou-se um desgaste da matriz polimérica que envolvia a superfície das PCI, bem como uma maior exposição do conteúdo metálico. A etapa de pré-tratamento mecânico foi realizada no Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN), localizado na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Figura 4.3 – Placas de circuito impresso fragmentadas pré-tratadas mecanicamente.



4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Nesta etapa, as amostras de PCI cominuídas, devidamente homogeneizadas e quarteadas, foram caracterizadas quimicamente, de forma a determinar qualitativamente e quantitativamente os elementos químicos. Para isso, utilizaram-se as técnicas de Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) da marca *Varian*[®], modelo 725/ES e Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada ao sistema de Espectroscopia por Energia Dispersa (MEV-EDS) da marca *Tescan*[®], modelo VEGA 3. Estas etapas foram realizadas no Laboratório de Bio&Hidrometalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica (DEMET), localizado na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

4.2.1 Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

As PCI cominuídas, como descrito no tópico 4.1.2, foram inicialmente quarteadas e conduzidas à etapa de abertura química. As aberturas químicas das PCI foram realizadas pesando-se $1,0000 \pm 0,0001$ g de amostra em uma balança analítica da marca *Shimadzu*[®], modelo AUY220. Em seguida, as amostras foram dispostas em béqueres de *teflon*, juntamente com 80mL de água-régia invertida (20mL de ácido clorídrico 37% e 60mL de ácido nítrico, 65%; ambos da marca

Synth[®]). O conjunto foi transferido para chapa de aquecimento da marca *Ethik Technology*[®] com temperatura constante (85°C). Lavagens periódicas com a solução de água-régia invertida foram feitas até a dissolução completa dos sólidos das amostras. Após a digestão, filtraram-se as soluções em filtros de faixa azul e as mesmas foram transferidas para balões volumétricos de 250mL. As aferições necessárias foram realizadas com água destilada. Após a etapa de digestão, as soluções foram submetidas a análise química via técnica de ICP-OES (Figura 4.4). Vale ressaltar que as aberturas químicas foram realizadas em triplicatas.

Figura 4.4 – ICP-OES da marca *Varian*[®], modelo 725/ES do Laboratório de Bio&Hidrometalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).



4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura por energia dispersiva (MEV-EDS)

Para realizar a análise pela técnica de MEV-EDS, primeiramente, pesou-se $1,0000 \pm 0,0001$ g das PCI cominuídas, citadas no tópico 4.1.2, em uma balança analítica da marca *Shimadzu*[®], modelo *AUY220*. Em seguida, transferiram-se as amostras para moldes de silicone, em que foram adicionados resina poliéster da marca *Gol* e 12 gotas de auto-polimerizante da marca *Arotec*[®]. Após a realização do embutimento, as amostras secaram a temperatura ambiente e foram encaminhadas para as etapas de lixamento e polimento. As pastilhas foram metalizadas manualmente com um filme de carbono e posicionadas adequadamente no porta-amostras do microscópio, o qual foi operado em aceleração de voltagem de 20kV.

4.3 MICRORGANISMOS SELECIONADOS E PROCEDIMENTO DE ADAPTAÇÃO ÀS AMOSTRAS

Os microrganismos mesófilos utilizados no presente estudo foram isolados de uma mina de sulfeto brasileira, para os quais estudos de diversidade microbiana revelaram a predominância de *At. ferrooxidans*, a qual foi cultivada em meio seletivo e vem sendo mantida no laboratório por cerca de 15 anos, a uma temperatura de 32°C e sob agitação de 130min⁻¹, em *shaker* termostaticado da marca *New Brunswick Scientific* (RODRIGUES *et al.*, 2016).

Inicialmente, foi selecionado um inóculo de microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus* com Eh igual a 638mV para início dos repiques. Foram realizados repiques das culturas puras sem a presença das três (3) amostras (PCI cominuídas, PCI fragmentadas e PCI fragmentadas pré-tratadas) e, posteriormente, ensaios de adaptação das amostras em diferentes porcentagens de sólidos. O inóculo inicial possuía Eh de 638mV.

As culturas puras sem a presença das amostras foram denominadas neste trabalho de “At” e o numeral que antecede esta sigla corresponde ao número do ensaio. Tendo em vista que todas as amostras foram estudadas em duplicata, neste caso, tem-se 1At e 2At, as quais correspondem às culturas puras, isto é, sem adição das placas.

As adaptações das amostras sólidas foram realizadas em *Erlenmeyers* de 250mL por meio de repicagens sequenciais. Todas as adaptações foram realizadas a partir de uma solução de 10% p.v⁻¹ (15mL) de inóculo de *At. ferrooxidans*; 10% p.v⁻¹ (15mL) de meio de crescimento Norris (0,4g.L⁻¹ de (NH₄)₂SO₄; 0,8g.L⁻¹ de MgSO₄.7H₂O e 0,4g.L⁻¹ de K₂HPO₄); 10% p.v⁻¹ (15mL) de solução de 50g.L⁻¹ de íons Fe²⁺; e 70% (105mL) de água destilada. Os ensaios foram conduzidos em *shaker* termostaticado da marca *New Brunswick Scientific* a 32 ± 1°C e sob agitação de 130min⁻¹. O pH e o Eh das soluções foram monitorados diariamente, mantendo o pH em torno de 1,8, sendo ajustado com solução de 1,0mol.L⁻¹ de H₂SO₄ ou 5,0mol.L⁻¹ de NaOH. Os instrumentos utilizados para medição do pH e do Eh foram um pHmetro da marca *Digimed*, modelo *DM-22* e pHmetro da marca *Digimed*, modelo *DM-20*, respectivamente. Salienta-se que os pHmetros foram calibrados diariamente, e para tal utilizaram-se soluções tampão de pH iguais a 4,00 e 7,00 da marca *Cinética* e solução redox de 475mV – DMs7A – da marca *Digimed*.

Previamente ao início das adaptações das culturas às PCI, foram realizados dois (2) repiques das culturas puras sem a presença de PCI. A porcentagem inicial de sólidos para todas as amostras foi de 1% p.v⁻¹, sendo aumentada a partir do momento em que o Eh da solução de adaptação ultrapasse o valor de 600mV. As porcentagens de sólidos de PCI cominuídas partiram inicialmente de 1% p.v⁻¹ chegando até 5% p.v⁻¹, sendo aumentado gradualmente 1% p.v⁻¹ a cada repique sequencial. Em se tratando das PCI fragmentadas, realizaram-se adaptações com porcentagem de sólidos de 1% p.v⁻¹, 2% p.v⁻¹, 3% p.v⁻¹, 4% p.v⁻¹, e 5% p.v⁻¹. Por fim, as adaptação das PCI fragmentadas pré-tratadas foram realizadas a 1% p.v⁻¹, 2% p.v⁻¹, 5% p.v⁻¹, 10% p.v⁻¹, 15% p.v⁻¹, 20% p.v⁻¹ e 25% p.v⁻¹. Todos os ensaios de adaptação foram realizados em duplicatas e no Laboratório de Bio&Hidrometalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica (DEMET), localizado na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

5.1.1 Espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

Após devida preparação e digestão em água-régia invertida das amostras de PCI cominuídas, os resultados de análise química, obtidos por meio da técnica analítica de ICP-OES encontram-se apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Análise química das placas de circuito impresso cominuídas obtida por meio da técnica analítica de Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Número de replicatas = 3.

Elemento	Teor (%)
Cobre (Cu)	25,91 ± 2,05
Cálcio (Ca)	4,91 ± 0,23
Chumbo (Pb)	2,00 ± 0,71
Alumínio (Al)	1,85 ± 0,08
Enxofre (S)	0,42 ± 0,04
Ferro (Fe)	0,13 ± 0,03
Níquel (Ni)	0,16 ± 0,07
Magnésio (Mg)	0,11 ± 0,01
Zinco (Zn)	0,05 ± 0,01
Potássio (K)	0,049 ± 0,002

A seleção de elementos analisados partiu do princípio da busca dos elementos majoritários contidos nas PCI, conforme apresentado pelos autores Pereira (2019) e Gomes (2021). Os elementos químicos majoritários nas PCI cominuídas foram cobre, cálcio, chumbo e alumínio. O alto teor de cobre presente nas amostras (25,91 ± 2,05%) é proveniente das camadas de cobre, as quais encontram-se dispostas em um padrão de multicamadas, nas superfícies das PCI (ROCCHETTI, AMATO e BEOLCHINI, 2018). Os teores de cálcio (4,91 ± 0,23%) e alumínio (1,85 ± 0,08%) podem ser justificados pela presença de fibras de vidro. O teor de chumbo

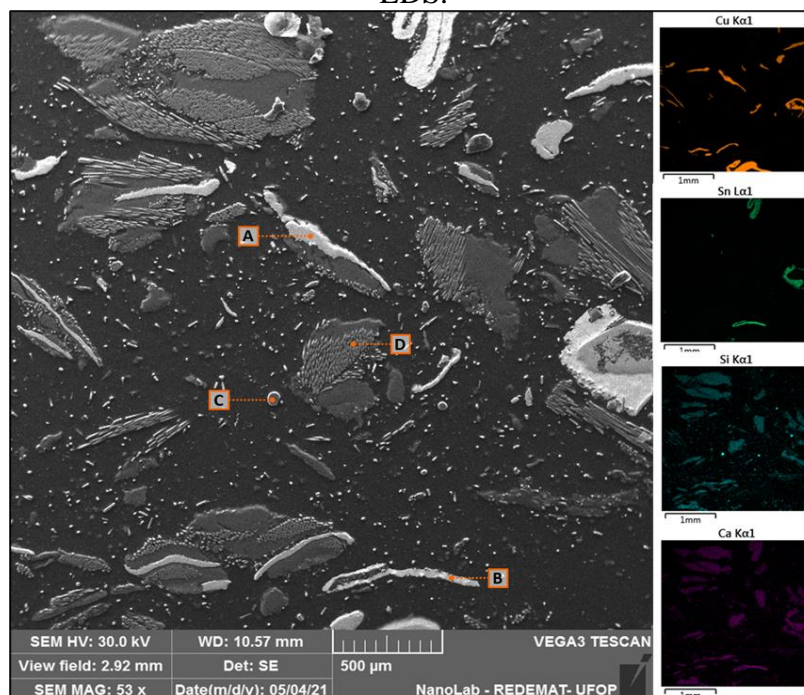
relatado ($2,00 \pm 0,71\%$) deve ser proveniente da presença de solda residual (ligas metálicas de estanho-chumbo). Em se tratando dos elementos químicos minoritários, tais como enxofre, ferro, níquel, magnésio, zinco e potássio, estes apresentaram teores inferiores a 1%. Ademais, ressalta-se que os resultados obtidos foram compatíveis com os relatados em trabalhos de Pereira (2019) e Gomes (2021).

5.1.2 Microscopia eletrônica de varredura por energia dispersiva (MEV-EDS)

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura por Energia Dispersiva (MEV-EDS) foi empregada como análise complementar aos resultados obtidos por meio da técnica analítica de ICP-OES, com o intuito de examinar a morfologia das partículas de PCI cominuídas, além de avaliar a exposição do conteúdo metálico presente na amostra. A Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) foi conjuntamente utilizada, visando à realização de análises químicas semiquantitativas a partir de mapeamentos químicos e análises pontuais.

Os resultados obtidos a partir da imagem de Elétrons Retroespalhados (BSE) das PCI cominuídas estão apresentados na Figura 5.1. Os resultados corroboram com os apresentados na Tabela 5.1, com destaque para o alto teor de cobre presente nas PCI.

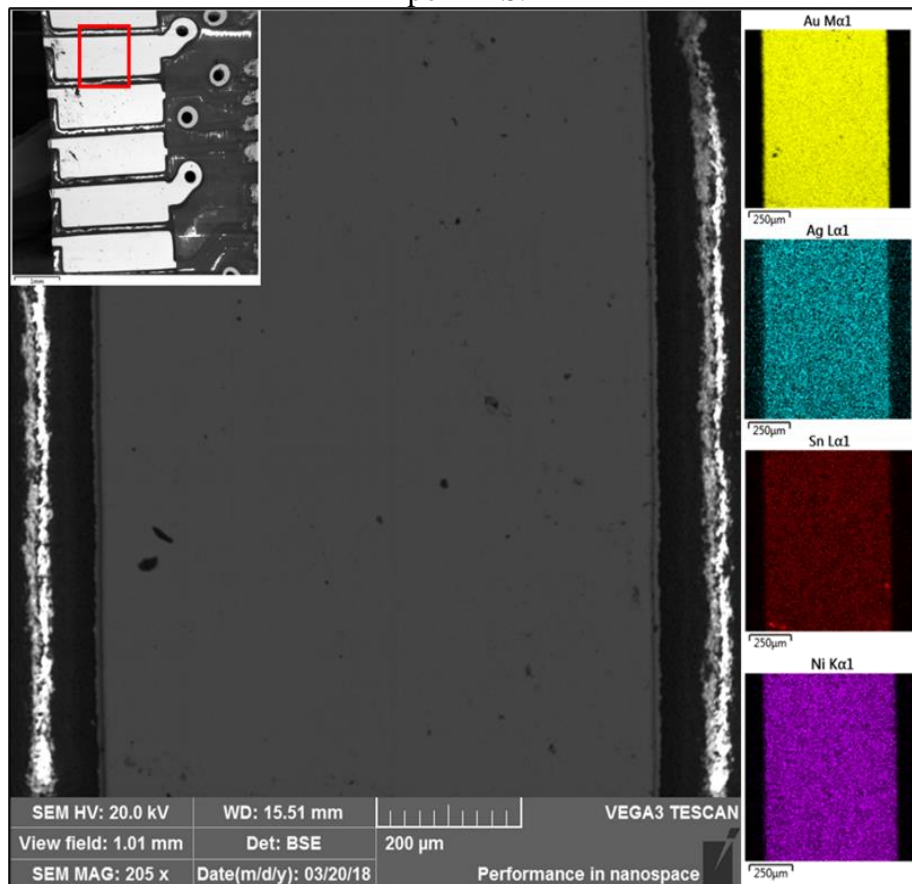
Figura 5.1 – Imagem de Elétrons Retroespalhados (BSE) das placas de circuito impresso cominuídas obtida por MEV com magnificação de $53\times$ e mapeamentos químicos obtidos por EDS.



Diante da Figura 5.1, foi possível observar uma grande heterogeneidade das PCI cominuídas, tanto em relação ao tamanho quanto ao formato das partículas. A heterogeneidade encontrada confirma os resultados encontrados por Pereira (2019) e Gomes (2021). Além disso, os autores comprovaram esta heterogeneidade por meio da classificação granulométrica. A partir do mapeamento químico obtidos por EDS, foi possível observar a presença de cobre, estanho, silício e cálcio. O silício encontrado pode ser proveniente da fibra de vidro, presente nas PCI, que normalmente possui óxidos de silício em sua composição.

A Figura 5.2 apresenta os resultados obtidos a partir da imagem de Elétrons Retroespalhados (BSE) das PCI fragmentadas. A partir do mapeamento químico obtidos por EDS, notou-se a presença de ouro, prata, estanho e níquel. A presença de metais nobres como ouro e prata também foram relatados por Pereira (2019).

Figura 5.2 – Imagem de Elétrons Retroespalhados (BSE) das placas de circuito impresso fragmentadas obtida por MEV com magnificação de 205× e mapeamentos químicos obtidos por EDS.

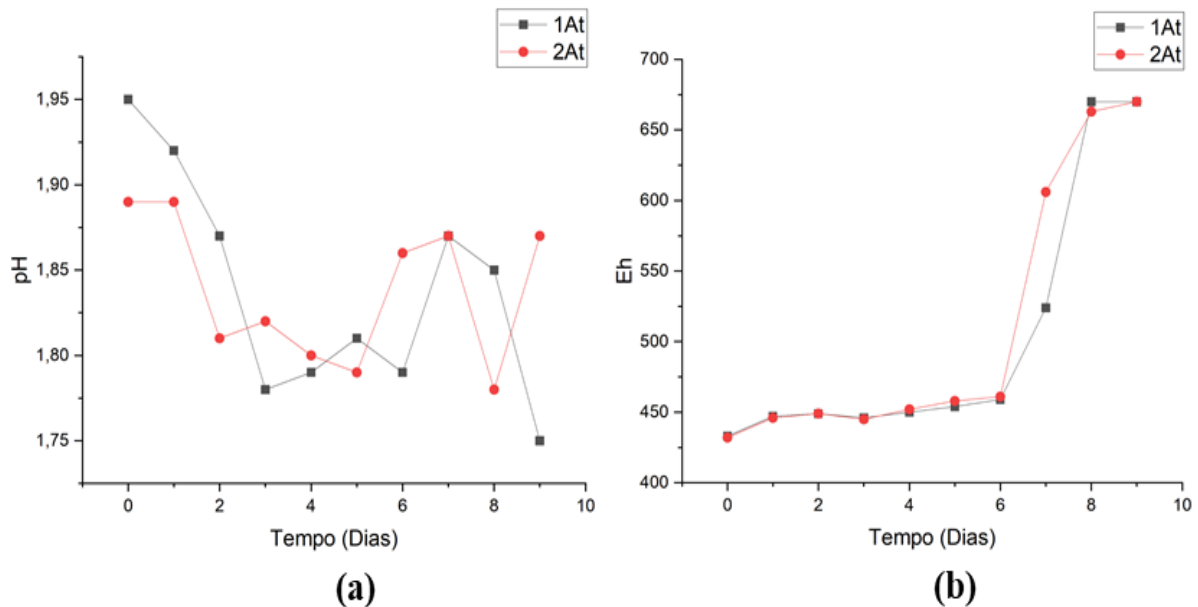


5.2 ADAPTAÇÕES DOS MICRORGANISMOS ÀS PCI

5.2.1 Repique dos microrganismos *Acidithiobacillus*

O primeiro repique foi conduzido com as culturas puras dos microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus*, o qual foi realizado durante um período de nove (9) dias, sendo feito diariamente o controle do pH e leitura do Eh (Figura 5.3).

Figura 5.3 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente ao primeiro repique dos microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus* das amostras 1At e 2At. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente ao primeiro repique dos microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus* das amostras 1At e 2At.

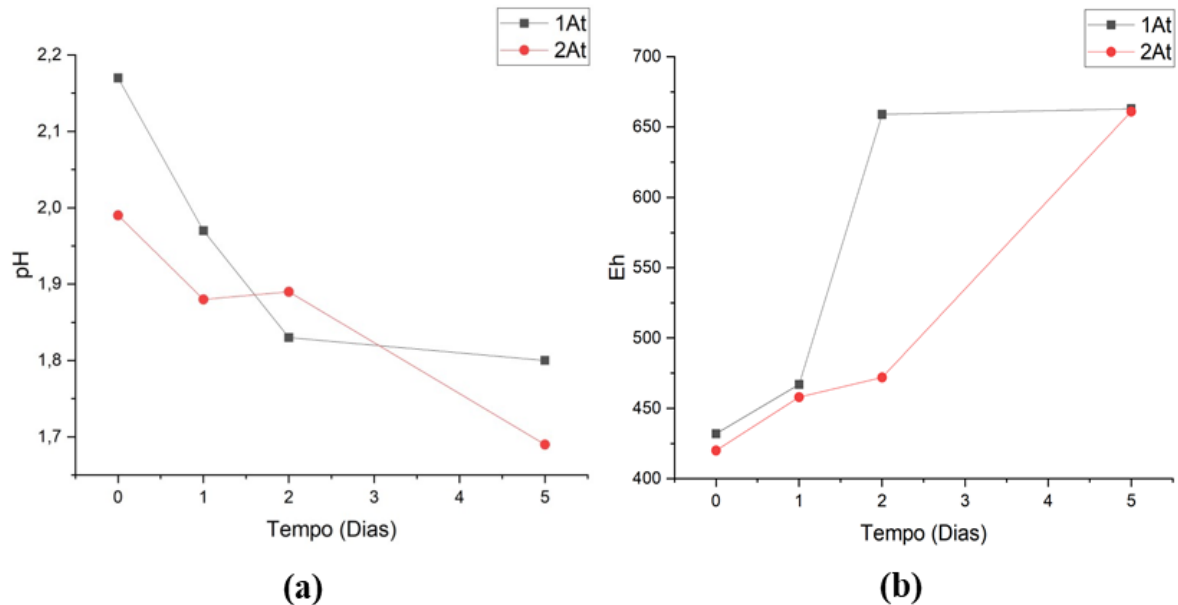


A partir da Figura 5.3-a, notou-se uma variação dos valores de pH, sendo que para a amostra 1At variou entre 1,95 e 1,75, enquanto da amostra 2At variou entre os valores de 1,87 a 1,78. Todavia, ao final de todas as medições, o pH foi ajustado para o valor de $1,80 \pm 0,05$. Ademais, o comportamento nos dois primeiros dias de ambas as amostras foi similar, apresentando um decaimento dos valores de pH. Diante da Figura 5.3-b, observou-se que a amostra 2At atingiu valores de Eh superiores a 600mV a partir do sétimo dia. Vale ressaltar que a contar do oitavo dia, ambas as amostras apresentaram valores de Eh superiores a 650mV.

Após atingir uma média de Eh igual a 650mV, a amostra 1At do primeiro repique foi utilizada para a realização do segundo repique. Salienta-se que a amostra utilizada gerou duas (2) novas

amostras, as quais foram novamente nomeadas 1At e 2At. Os resultados do segundo repique estão apresentados na Figura 5.4.

Figura 5.4 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente ao segundo repique dos microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus* das amostras 1At e 2At. **(b)** Gráfico de Eh *versus* tempo referente ao segundo repique dos microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus* das amostras 1At e 2At.



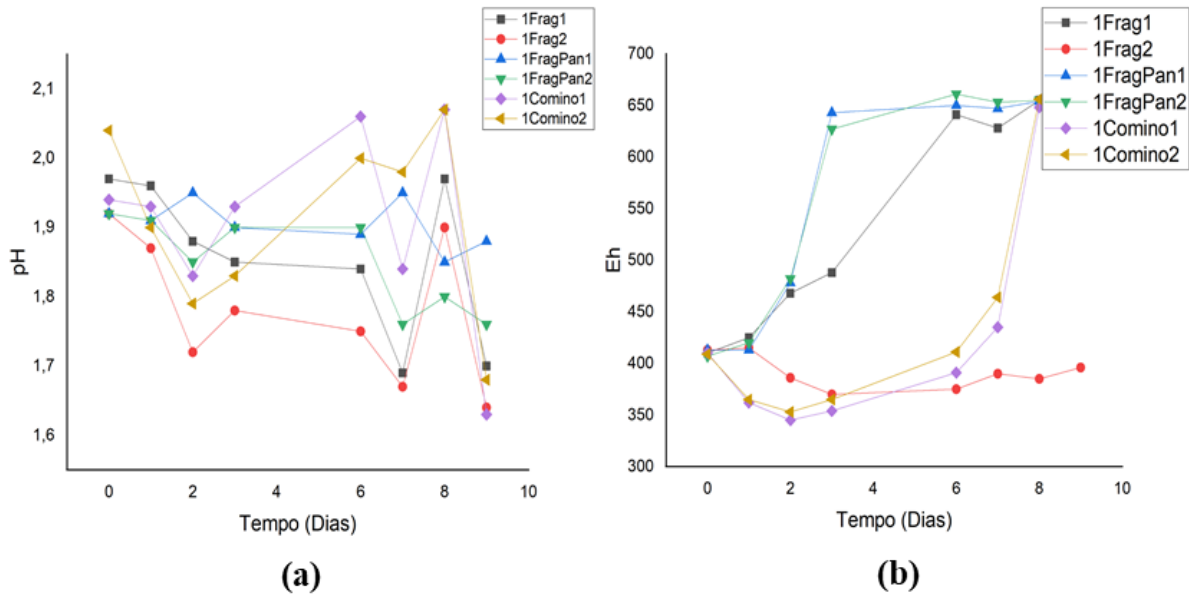
A partir da Figura 5.4-b, pôde-se observar que em um período de cinco (5) dias, a amostra 2At atingiu valores de Eh próximos a 650mV, enquanto a amostra 1At alcançou valores de Eh superiores a 650mV, a partir do segundo dia de ensaio. O alto valor de Eh obtido demonstra o crescimento dos microrganismos, uma vez que foi possível oxidar os íons Fe^{2+} a Fe^{3+} . Em suma, os Eh obtidos foram considerados satisfatórios, sendo selecionada a amostra 1At para a realização dos ensaios de adaptação a 1% p.v⁻¹ das amostras de PCI. No que se refere aos valores de pH (Figura 5.4-a), estes para a amostra 1At variaram entre 2,17 e 1,80, enquanto para a amostra 2At, variaram entre 2,00 e 1,70. Vale ressaltar que em ambas as amostras foram feitos ajustes diários dos valores de pH para $1,80 \pm 0,05$.

5.2.2 Adaptações a 1% p.v⁻¹

Após os repiques das culturas puras, uma alíquota de inóculo foi retirada para a realização dos ensaios de adaptação. Diante disso, foram estudadas as adaptações de 1% p.v⁻¹ das amostras de

PCI cominuídas, fragmentadas e fragmentadas pré-tratadas. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.5.

Figura 5.5 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 1% p.v⁻¹ das amostras 1Frag1, 1Frag2, 1FragPan1, 1FragPan2, 1Comino1 e 1Comino2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 1% p.v⁻¹ das amostras 1Frag1, 1Frag2, 1FragPan1, 1FragPan2, 1Comino1 e 1Comino2.



Em se tratando das amostras de PCI fragmentadas, intituladas 1Frag1 e 1Frag2, notou-se que os valores de pH variaram entre 1,97 e 1,70 para a amostra 1Frag1 e entre 1,92 e 1,68 para a amostra 1Frag2. Ao se avaliar o estudo de Eh, a amostra 1Frag1 atingiu valor próximo a 650mV no sexto dia, enquanto a amostra 1Frag2 alcançou, ao longo de todo o ensaio, valores próximos a 400mV.

Dentre todas as amostras estudadas, as amostras de PCI fragmentadas pré-tratadas, 1FragPan1 e 1FragPan2, foram as que apresentaram melhor desempenho na etapa de adaptação, isto é, alcançaram valores de Eh superiores a 600mV no menor tempo de ensaio. A amostra 1FragPan1 variou o pH entre 1,97 e 1,85 durante a adaptação, enquanto a amostra 1FragPan2 variou entre 1,93 e 1,77 durante a adaptação. Com relação ao Eh, as amostras 1FragPan1 e 1FragPan2 atingiram o valor de aproximadamente 650mV em apenas três (3) dias.

As amostras de PCI cominuídas foram as que demandaram maior número de dias para a adaptação (ou seja, atingiram valores de Eh superiores a 600mV). No que diz respeito a amostra

1Comino1, os valores de pH variaram entre 2,05 e 1,75, enquanto a amostra 1Comino2 teve variação deste parâmetro entre 1,93 e 1,77. Em se tratando do parâmetro Eh, ambas as amostras demandaram oito (8) dias para que Eh atingisse valores superiores a 600mV.

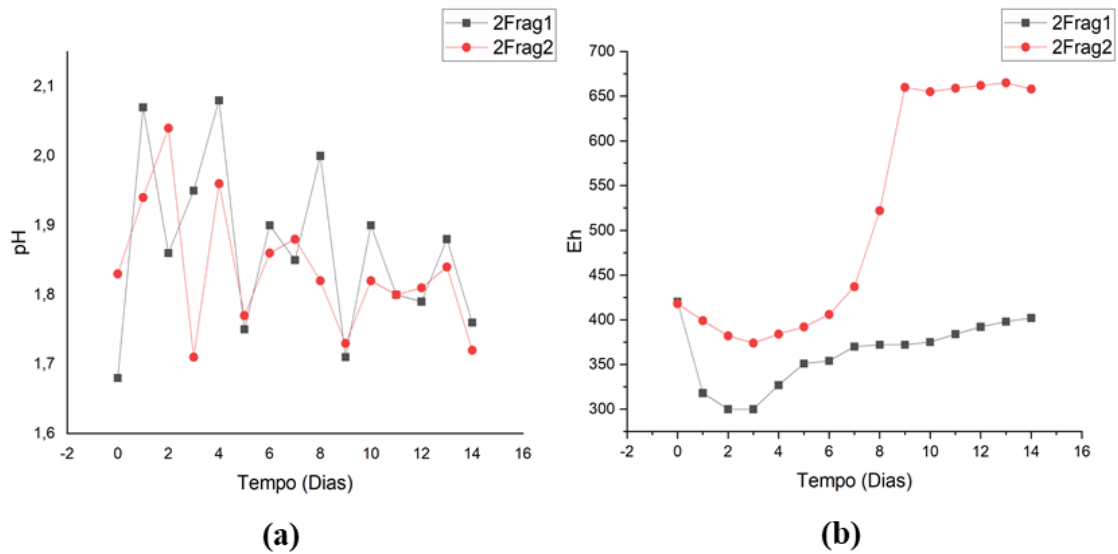
Utamura (2020) relatou um período de 12 dias para adaptar as amostras de PCI até 10g.L⁻¹ de densidade de polpa. Vale destacar que o autor utilizou um repique sequencial de 5g.L⁻¹ de porcentagem de sólidos. Arshadi e Mousavi (2014) necessitaram de um período de 55 dias para a adaptação até 10g.L⁻¹ de PCI. Para as amostras com densidade de polpas equivalentes a 10g.L⁻¹, no presente trabalho, foram necessários seis (6) dias para adaptação das PCI fragmentadas; três (3) dias para as PCI fragmentadas pré-tratadas; e oito (8) dias para as PCI cominuídas.

5.2.3 Adaptações a 2% p.v⁻¹

Após a adaptação das culturas à 1% de porcentagem de sólidos, retirou-se uma alíquota de 15mL dos microrganismos do meio adaptado e, em seguida, foi adicionada em meio com 2% p.v⁻¹ de sólidos. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.6.

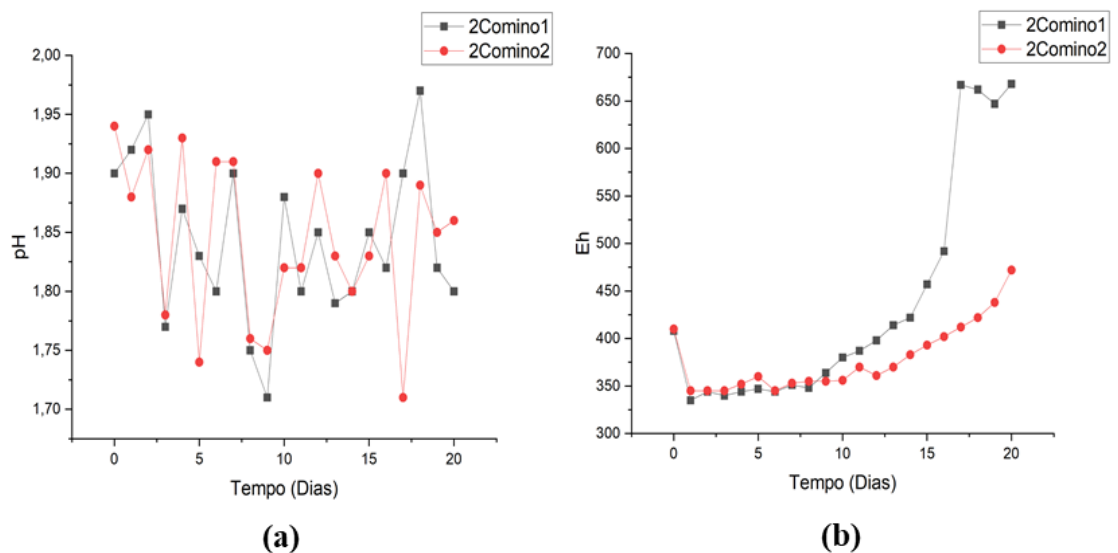
Diante da Figura 5.6-a, observou-se que o pH da amostra 2Frag1 variou entre 1,68 e 2,08, enquanto a amostra 2Frag2 teve variação de pH entre 1,71 e 2,04. A Figura 5.6-b revelou que a amostra 2Frag1 atingiu Eh máximo de 420mV durante os 17 dias de ensaios de adaptação. Em contrapartida, a amostra 2Frag2 alcançou um Eh máximo de 665mV, sendo requeridos nove (9) dias para atingir Eh superior a 600mV. Em suma, pôde-se notar que nas adaptações das PCI fragmentadas, apenas o ensaio referente a amostra 2Frag2 atingiu sucesso na etapa de adaptação, uma vez que atingiu Eh superior a 600mV.

Figura 5.6 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v⁻¹ das amostras 2Frag1 e 2Frag2. **(b)** Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v⁻¹ das amostras 2Frag1 e 2Frag2.



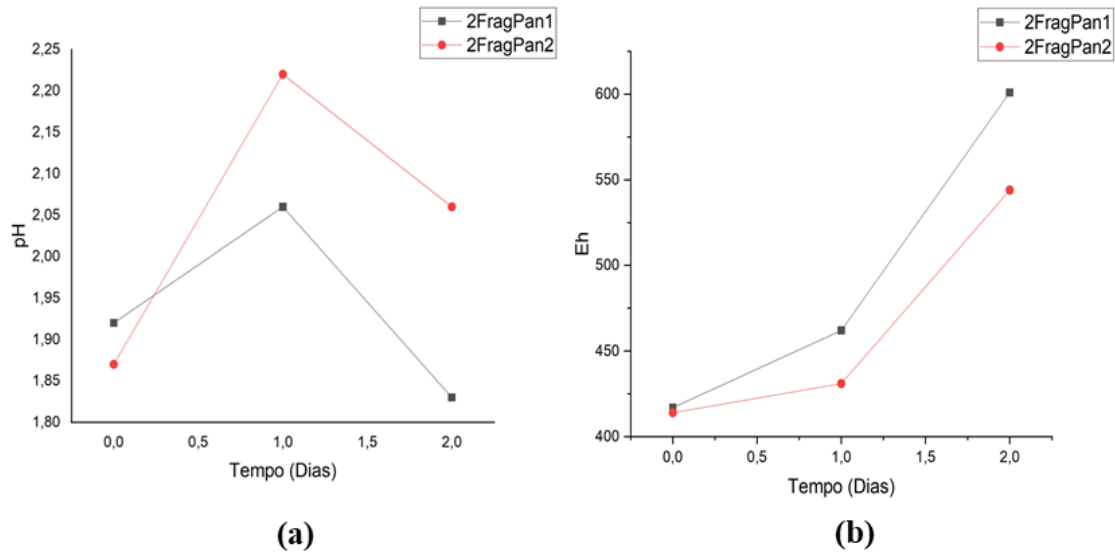
A partir da análise da Figura 5.7, notou-se que o pH da amostra 2Comino1 variou entre 1,71 e 2,04, enquanto que para a amostra 2Comino2, variou entre 1,71 e 1,94. Ao analisar em conjunto as Figuras 5.7-a e 5.7-b, observou-se uma tendência de aumento do pH no ensaio com a amostra 2Comino1 no dia 17, o qual apresentou valores de Eh superiores a 600mV. Diante da Figura 5.7-b, tem-se que o ensaio 2Comino1 atingiu Eh máximo de 668mV e para a amostra 2Comino2 o Eh máximo foi de 472mV.

Figura 5.7 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v⁻¹ das amostras 2Comino1 e 2Comino2. **(b)** Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v⁻¹ das amostras 2Comino1 e 2Comino2.



As PCI fragmentadas pré-tratadas se comparadas as demais amostras foram as que demandaram menor tempo para a adaptação. A partir da Figura 5.8-b, observou-se que foram necessários dois (2) dias para que o ensaio com a amostra 2FragPan1 atingisse Eh superior a 600mV.

Figura 5.8 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v⁻¹ das amostras 2FragPan1 e 2FragPan2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 2% p.v⁻¹ das amostras 2FragPan1 e 2FragPan2.



Todas as amostras adaptadas a 2% de sólidos, ou seja, a 20g.L⁻¹, apresentaram densidades de polpa superiores às empregadas por Annamalai e Gurumurthy (2019), Gu *et al.* (2014), Rodrigues *et al.* (2015), Yamane, Espinosa e Tenório (2011), Rodrigues *et al.* (2013) e semelhante a densidade de polpa trabalhada por Arshadi e Mousavi (2014). Segundo Utimura (2020), um período de 32 dias foi necessário para adaptar as porcentagens de sólidos de 10g.L⁻¹ a 20g.L⁻¹. Vale destacar que o autor utilizou um repique sequencial de 5g.L⁻¹ de densidade de polpa. Arshadi e Mousavi (2014) necessitaram de um período de 24 dias para alcançar a adaptação de 20g.L⁻¹ de sólidos. No total, Utimura (2020) demandou 44 dias para adaptar as bactérias a 20g.L⁻¹ e Arshadi e Mousavi (2014) demandaram 79 dias para adaptar as amostras a 20g.L⁻¹ de sólidos.

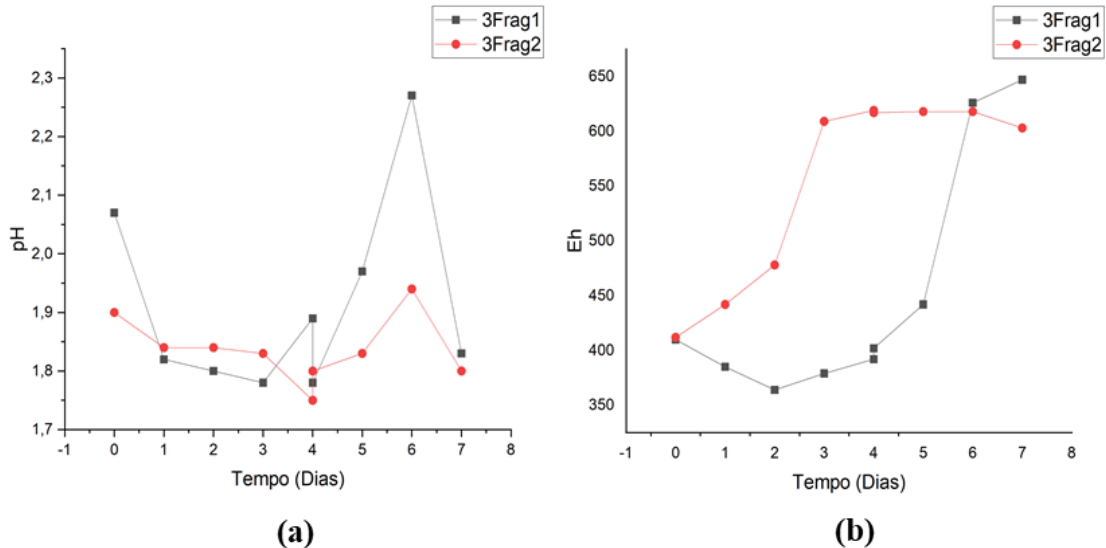
Para os ensaios com densidade de polpas equivalentes a 20g.L⁻¹, no presente trabalho foram requeridos nove (9) dias para adaptação das PCI fragmentadas aos *At. ferrooxidans*, dois (2) dias para as PCI fragmentadas pré-tratadas e 17 dias para as PCI cominuídas. No acumulado, para adaptação até 20g.L⁻¹ foram necessários 15 dias para adaptação das PCI fragmentadas, enquanto para adaptação das PCI pré-tratadas foram requeridos cinco (5) dias e para as PCI

cominuídas, 25 dias. Diante do exposto, dentre as três (3) amostras estudadas referentes aos ensaios de 2% p.v⁻¹ de porcentagem de sólidos, as PCI fragmentadas pré-tratadas foram as que demandaram menor tempo para a adaptação.

5.2.4 Adaptações a 3% p.v⁻¹

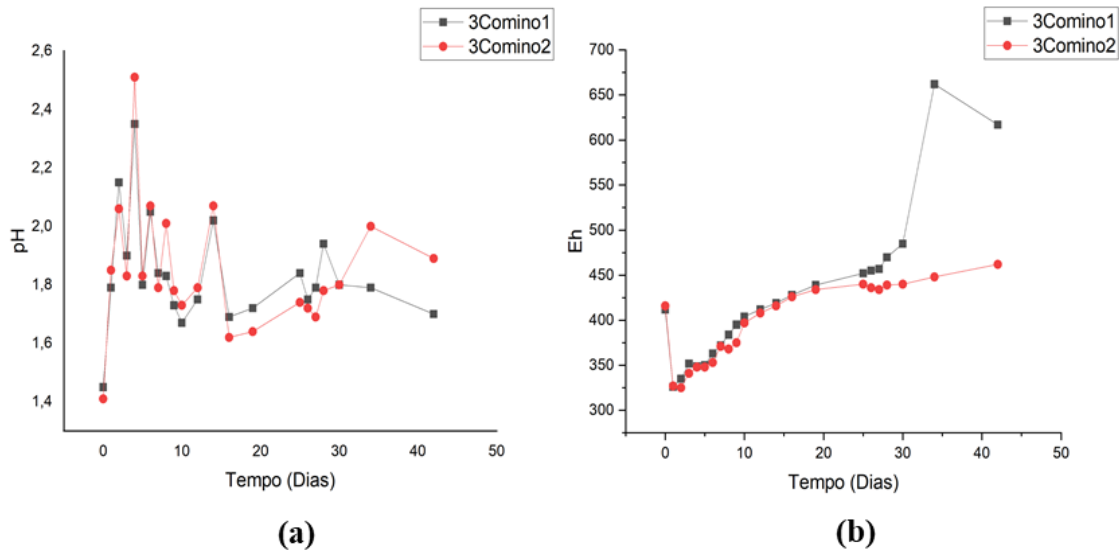
Devido às rápidas adaptações das PCI fragmentadas pré-tratadas mecanicamente, optou-se por seguir a adaptação destas amostras diretamente a 5% de sólidos, sem realizar as adaptações a 3% e 4%. Os ensaios com as PCI fragmentadas apresentaram variação de pH entre 1,78 e 2,27 para a amostra 3Frag1 e de 1,75 e 1,94 para a amostra 3Frag2, conforme apresentado na Figura 5.9-a. A Figura 5.9-b permitiu observar que a amostra 3Frag1 atingiu um Eh máximo de 647mV, enquanto a amostra 3Frag2 atingiu 619mV, sendo necessários seis (6) e três (3) dias de ensaio para que o Eh atingisse 600mV, nos dois casos.

Figura 5.9 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 3% p.v⁻¹ das amostras 3Frag1 e 3Frag2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 3% p.v⁻¹ das amostras 3Frag1 e 3Frag2.



A partir da análise da Figura 5.10-a, pôde-se observar que o ensaio com a amostra 3Comino1 variou o pH entre 1,45 e 2,35, enquanto para a amostra 3Comino2 o pH teve variação entre 1,41 e 2,35. A Figura 5.10-b, mostrou que a amostra 3Comino1 demandou 34 dias de ensaio para atingir um Eh máximo de 662mV, enquanto o ensaio 3Comino2 atingiu um Eh máximo de 462mV.

Figura 5.10 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 3% p.v⁻¹ das amostras 3Comino1 e 3Comino2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 3% p.v⁻¹ das amostras 3Comino1 e 3Comino2.



No presente trabalho foi possível obter Eh superiores a 600mV trabalhando com densidades de polpa iguais ou superiores a 30g.L⁻¹, tais condições não foram alcançadas nos estudos realizados por Yang *et al.* (2009) e Arshadi e Mousavi (2014). Utimura (2020) demandou um período de 35 dias para adaptar as porcentagens de sólidos de 20g.L⁻¹ a 30g.L⁻¹. Para as amostras com densidade de polpas equivalentes a 30g.L⁻¹, o presente trabalho demandou três (3) dias para adaptação das PCI fragmentadas e 34 dias para as PCI cominuídas. No acumulado, para adaptação até 30g.L⁻¹, demandou-se 18 e 59 dias para a adaptação das PCI fragmentadas e PCI cominuídas, respectivamente.

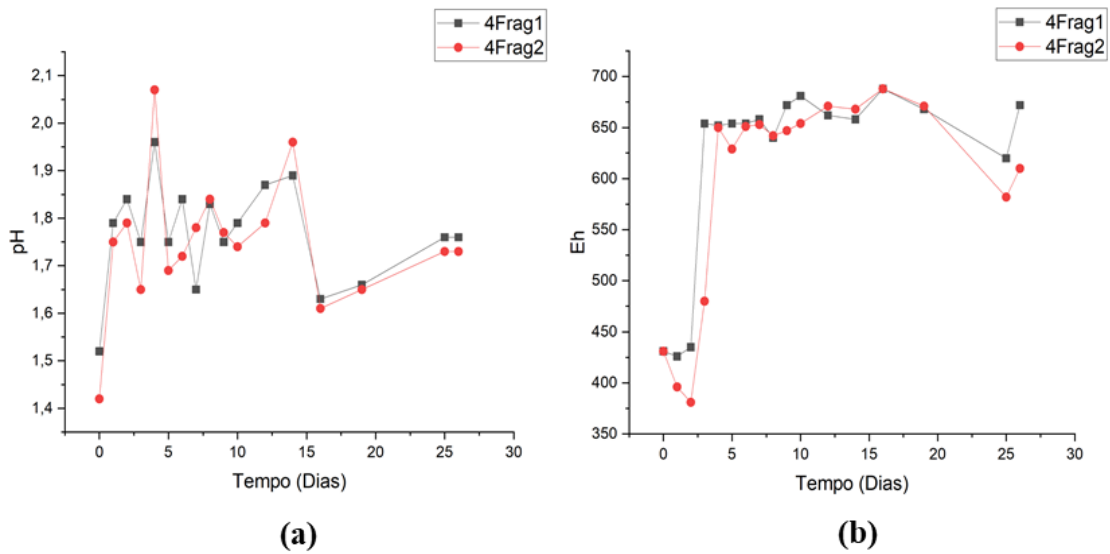
5.2.5 Adaptações a 4% p.v⁻¹

Ao analisar a Figura 5.11 foi possível observar que o ensaio 4Frag1 teve variação de pH entre 1,52 e 1,96, enquanto para o ensaio 4Frag2, variou entre 1,42 e 2,07. Além disso, o ensaio 4Frag1 atingiu Eh máximo de 688mV e três (3) dias foram necessários para atingir Eh superior a 600mV. De maneira análoga, o ensaio 4Frag2 atingiu Eh máximo de 688mV, necessitando um período de quatro (4) dias para atingir Eh superior a 600mV.

No estudo de Utimura (2020), foi necessário um período de 18 dias para adaptar as densidades de polpa de 30g.L⁻¹ a 35g.L⁻¹. O autor empregou um total de 72 e 90 dias para a adaptação até 30g.L⁻¹ e 35g.L⁻¹, respectivamente. Para as amostras com densidade de polpas equivalentes a

40g.L⁻¹, o presente trabalho demandou três (3) dias para adaptação das amostras PCI fragmentadas. No acumulado, isto é, somatório de todos os ensaios, para adaptação até 40g.L⁻¹, demandou-se 21 dias para adaptação das PCI fragmentadas.

Figura 5.11 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 4% p.v⁻¹ das amostras 4Frag1 e 4Frag2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 4% p.v⁻¹ das amostras 4Frag1 e 4Frag2.



5.2.6 Adaptações a 5% p.v⁻¹

O pH do ensaio com a amostra 5Frag1 variou entre 1,6 e 2,28, enquanto para a amostra 5Frag2 teve variação entre 1,65 e 2,26, como é possível observar na Figura 5.12-a. Diante da Figura 5.12-b, pode-se inferir que ambas as amostras foram adaptadas ao *At. ferrooxidans*, uma vez que o Eh atingiu 685mV e 680mV para as amostras 5Frag1 e 5Frag2, respectivamente. Ademais, a 5Frag1 atingiu Eh superior a 600mV em 11 dias. Por outro lado, o ensaio com a amostra 5Frag2 demandou um período de 10 dias para atingir Eh superior a 600mV.

A partir da Figura 5.13-a, tem-se que no ensaio com a amostra 5FragPan1 variou o pH entre 1,65 e 2,01, enquanto o ensaio com a amostra 5FragPan2 variou pH entre 1,74 e 2,2. Com base na Figura 5.13-b, notou-se que o Eh máximo atingido pela amostra 5FragPan1 foi de 676mV, enquanto a amostra 5FragPan2 atingiu um Eh máximo de 673mV.

Figura 5.12 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v⁻¹ das amostras 5Frag1 e 5Frag2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v⁻¹ das amostras 5Frag1 e 5Frag2.

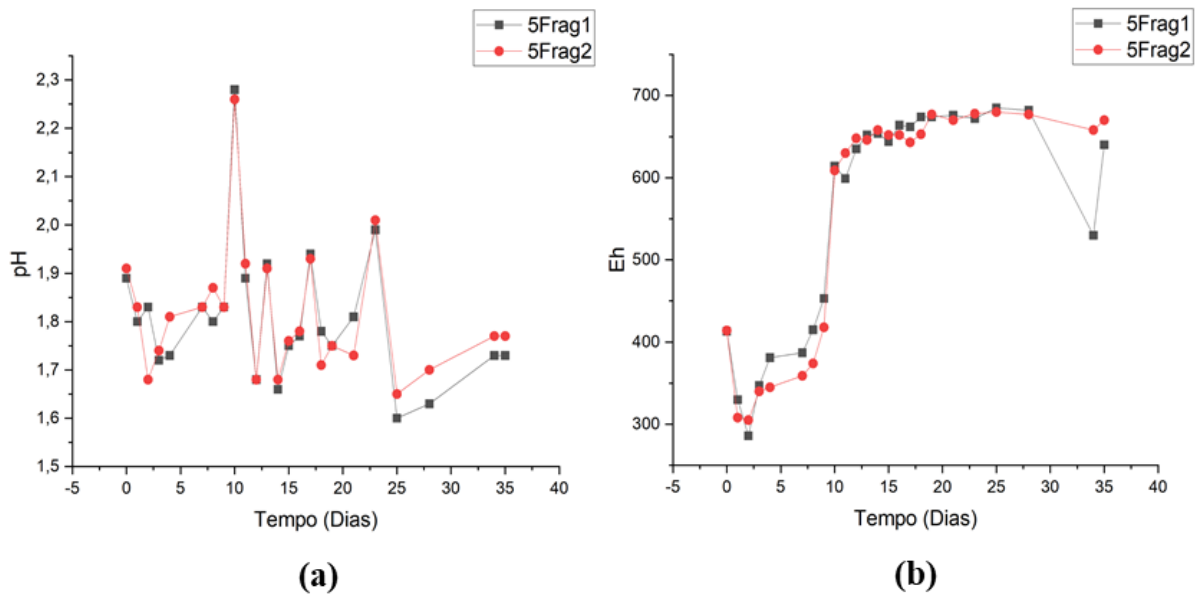
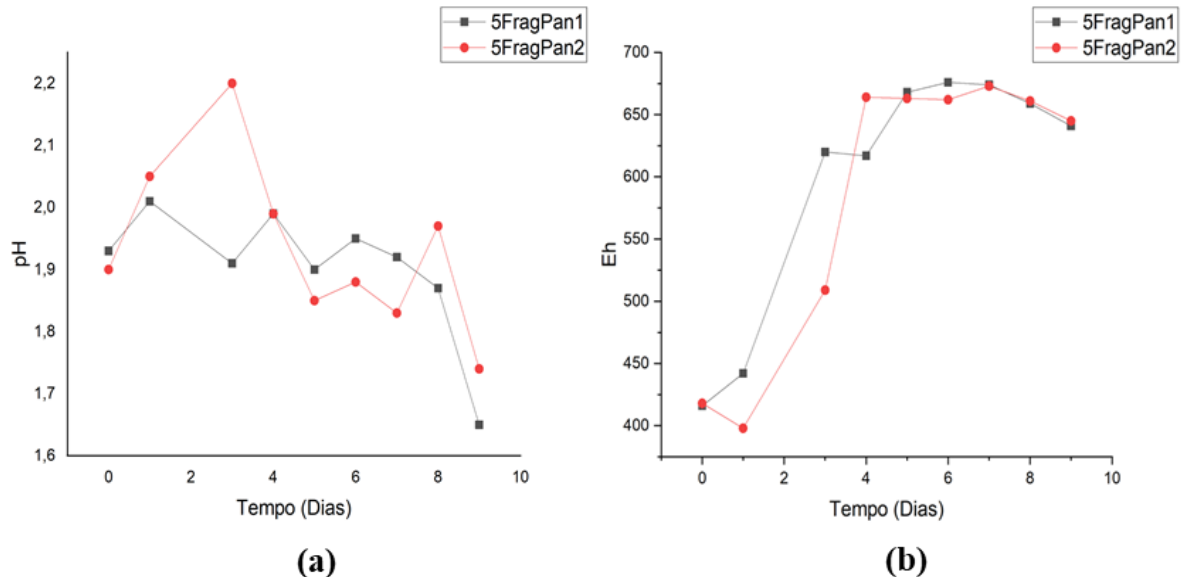


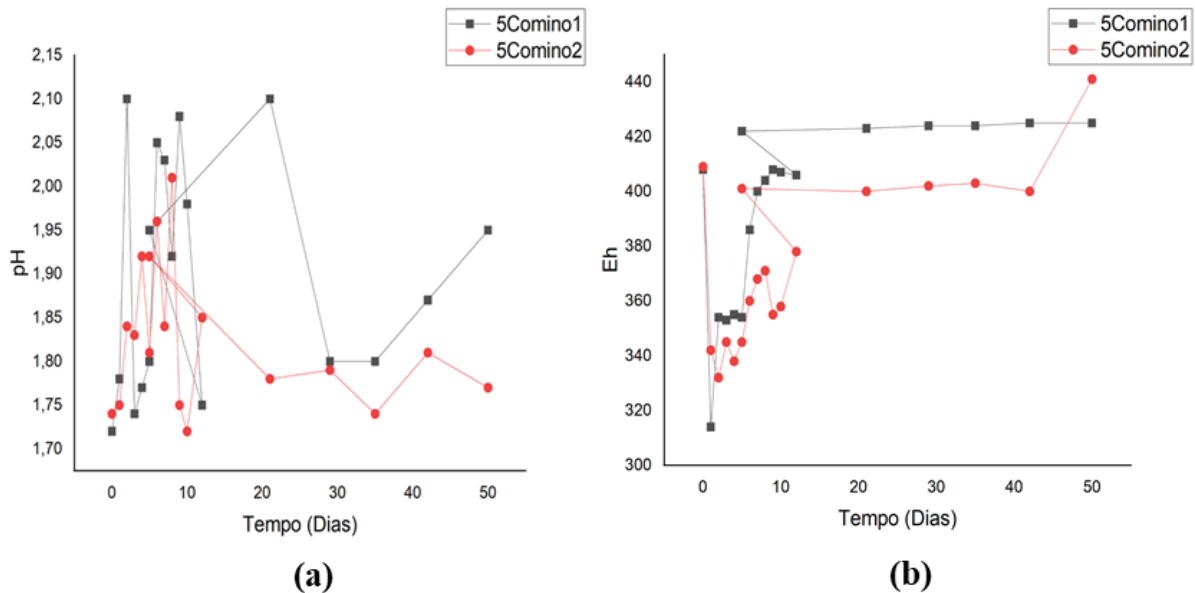
Figura 5.13 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v⁻¹ das amostras 5FragPan1 e 5FragPan2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v⁻¹ das amostras 5FragPan1 e 5FragPan2.



Com base na Figura 5.14, pôde-se observar que o Eh máximo atingido no ensaio 5Comino1 foi de 425mV, enquanto no ensaio 5Comino2 atingiu o Eh máximo de 441mV. Além disso, os ensaios foram realizados durante um período de 50 dias. Tendo em vista que os ensaios não alcançaram valores de Eh próximos ou superiores a 600mV, a adaptação das PCI cominuídas foi interrompida em 5% p.v⁻¹.

Ao comparar os resultados obtidos com as PCI fragmentadas e as PCI fragmentadas pré-tratadas, notou-se que o pré-tratamento mecânico se mostrou eficiente, uma vez que gerou um desgaste da matriz polimérica e, conseqüentemente, uma maior exposição do conteúdo metálico, o que refletiu em uma rápida adaptação. Diante do exposto, para a amostra 5FragPan1 três (3) dias foram necessários para atingir E_h superior a 600mV, enquanto para a amostra 5Frag2 requereu-se um período de dez (10) dias. Em virtude dos dados apresentados, selecionou-se apenas as PCI fragmentadas pré-tratadas para dar continuidade aos ensaios de adaptação empregando maiores porcentagens de sólidos.

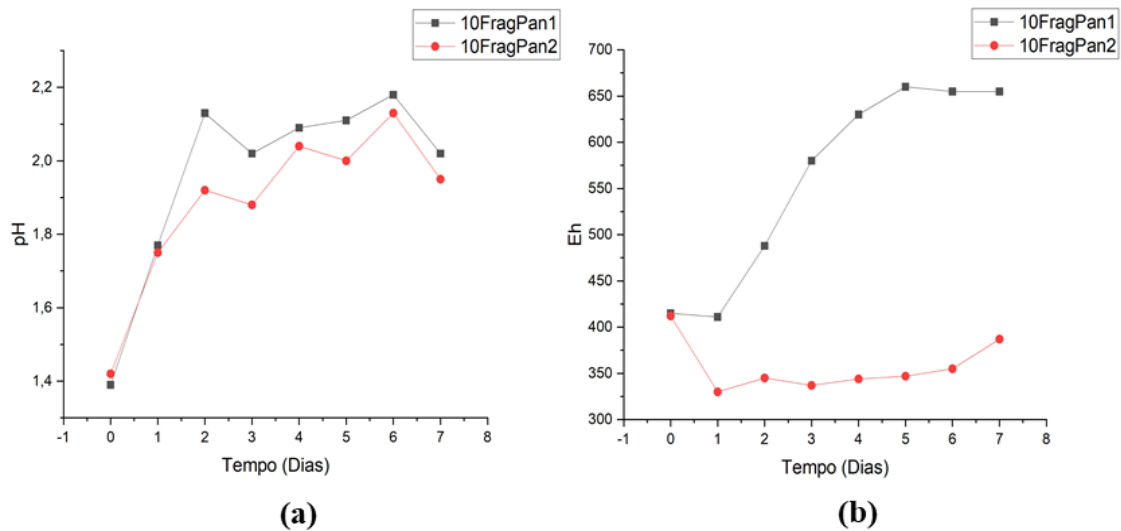
Figura 5.14 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v⁻¹ das amostras 5Comino1 e 5Comino2. (b) Gráfico de E_h *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 5% p.v⁻¹ das amostras 5Comino1 e 5Comino2.



5.2.7 Adaptações a 10% p.v⁻¹

A única amostra adaptada a valores superiores à de 5% p.v⁻¹ de porcentagem de sólidos foi a amostra de PCI fragmentadas pré-tratadas. Para a 10FragPan1 o pH variou entre 1,39 e 2,18, enquanto com a amostra 10FragPan2 o mesmo variou entre 1,42 e 2,13, conforme observado na Figura 5.15. Além disso, o ensaio com a amostra 10FragPan1 atingiu E_h máximo de 660mV, demandando quatro (4) dias para se atingir E_h superiores a 600mV. Todavia, a duplicata correspondente apresentou valores de E_h inferiores a 600mV, ou seja, 412mV.

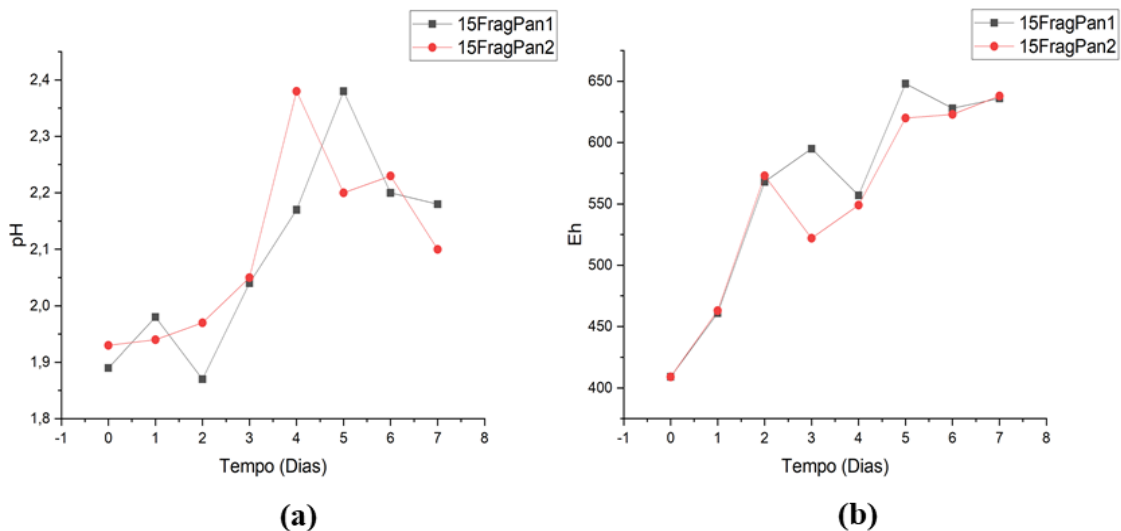
Figura 5.15 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 10% p.v⁻¹ das amostras 10FragPan1 e 10FragPan2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 10% p.v⁻¹ das amostras 10FragPan1 e 10FragPan2.



5.2.8 Adaptações a 15% p.v⁻¹

A partir da Figura 5.16-a, foi possível observar que para a amostra 15FragPan1 o pH situou-se entre 1,87 e 2,38, enquanto no caso da amostra 15FragPan2 variou o pH entre 1,93 e 2,38. Ao analisar a Figura 5.16-b, notou-se que ambos os ensaios atingiram Eh superiores a 600mV, em um período de cinco (5) dias. Para a amostra 15FragPan1, atingiu-se um Eh máximo de 648mV, enquanto com a amostra 15FragPan2 o Eh máximo foi de 638mV.

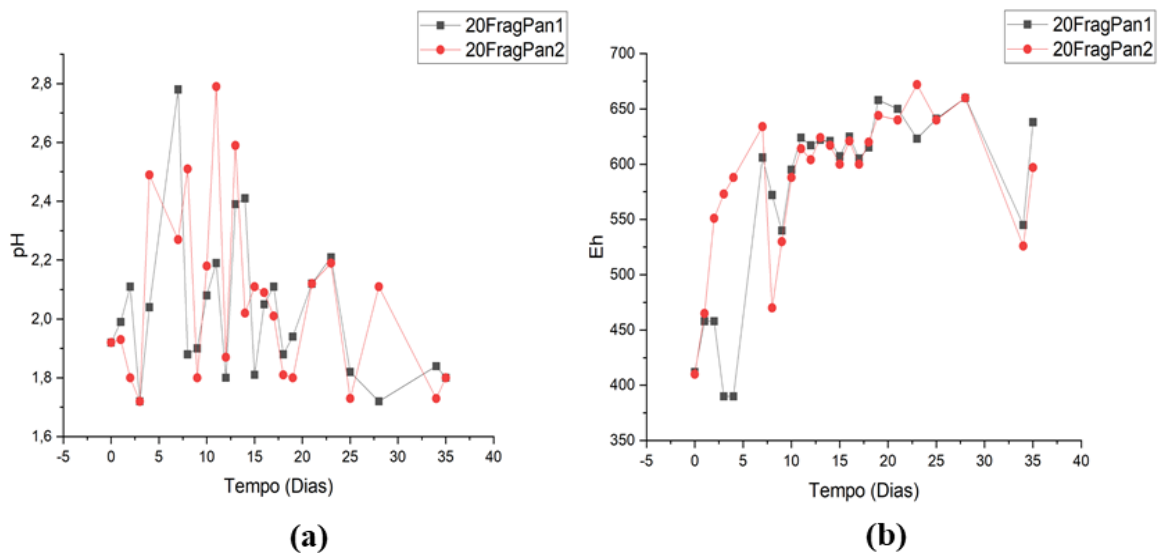
Figura 5.16 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 15% p.v⁻¹ das amostras 15FragPan1 e 15FragPan2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 15% p.v⁻¹ das amostras 15FragPan1 e 15FragPan2.



5.2.9 Adaptações a 20% p.v⁻¹

Por meio da Figura 5.17-a, notou-se uma variação de pH entre 1,72 e 2,78 para a amostra 20FragPan1 e entre 1,72 e 2,79 para a amostra 20FragPan2. De maneira similar aos resultados apresentados para as PCI fragmentadas pré-tratadas a 15% p.v⁻¹ de porcentagem de sólidos, as amostras 20FragPan1 e 20FragPan2 demandaram o mesmo tempo para serem consideradas adaptadas (7 dias). O ensaio com a amostra 20FragPan1 atingiu Eh máximo de 660mV, enquanto para a amostra 20FragPan2, o Eh máximo foi de 672mV, conforme observado na Figura 5.17-b.

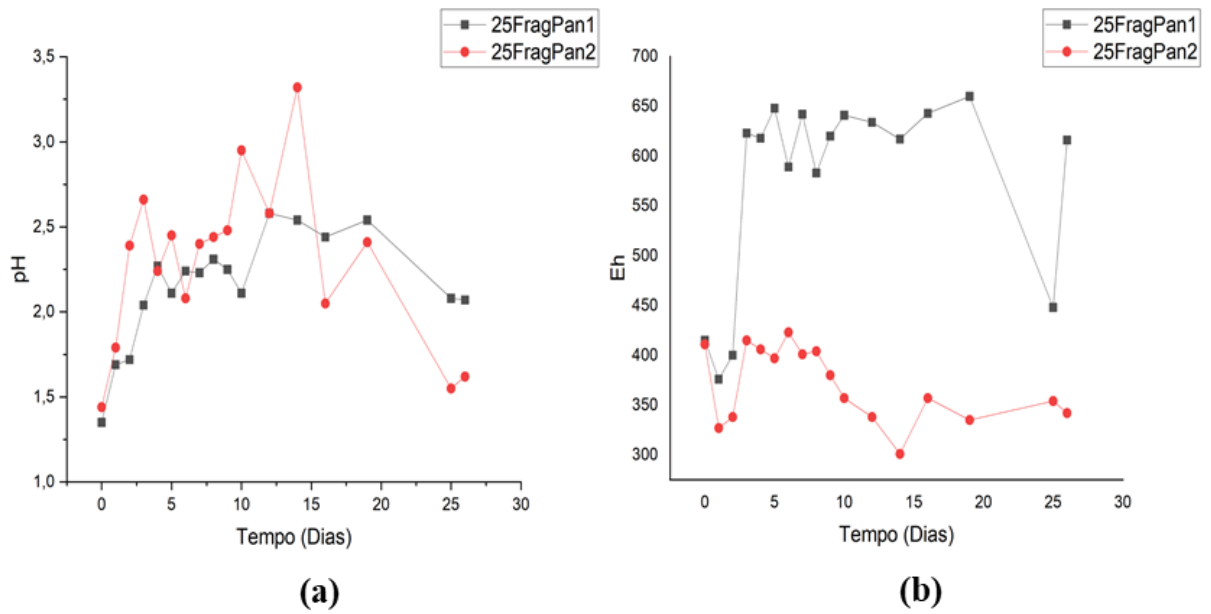
Figura 5.17 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 20% p.v⁻¹ das amostras 20FragPan1 e 20FragPan2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 20% p.v⁻¹ das amostras 20FragPan1 e 20FragPan2.



5.2.10 Adaptações a 25% p.v⁻¹

O último ensaio de adaptação das amostras de PCI fragmentadas pré-tratadas foi realizado a 25% p.v⁻¹ de porcentagem de sólidos. Para a amostra 25FragPan1, o pH variou entre 1,35 e 2,58, enquanto para a amostra 25FragPan2, o mesmo variou entre 1,44 e 3,32, conforme observado na Figura 5.18-a. Ao analisar a Figura 5.18-b, notou-se que o valor de Eh máximo atingido no ensaio 25FragPan1 foi de 660mV, demandando-se três (3) dias para atingir um valor superior a 600mV e, portanto, a adaptação das PCI ao *At. ferrooxidans* deve ser considerada satisfatória. Por outro lado, o ensaio 25FragPan2 revela um Eh máximo de 423mV, não sendo considerada adaptada no período de tempo apresentado na Figura 5.18-b.

Figura 5.18 – (a) Gráfico de pH *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 25% p.v⁻¹ das amostras 25FragPan1 e 25FragPan2. (b) Gráfico de Eh *versus* tempo referente aos ensaios de adaptação 25% p.v⁻¹ das amostras 25FragPan1 e 25FragPan2.



6 CONCLUSÕES

A presente monografia estudou, em escala laboratorial, a etapa de adaptação de microrganismos mesófilos do gênero *Acidithiobacillus* visando a PCI de computadores obsoletos. Os resultados dos ensaios de adaptação foram promissores, possibilitando o emprego da técnica de biolixiviação em trabalhos futuros, para o reaproveitamento do conteúdo metálico presente nas PCI.

A partir dos resultados de caracterização química das PCI cominuídas, notou-se a presença de fibras de vidro, partículas de cobre metálico, ligas de estanho-chumbo e retardadores de chama. Ademais, observou-se uma heterogeneidade em relação ao tamanho e a forma das partículas.

Dentre as três (3) amostras estudadas, as PCI fragmentadas pré-tratadas mecanicamente foram as que apresentaram melhores resultados na etapa de adaptação, permitindo que as culturas de *Acidithiobacillus ferrooxidans* se adaptassem a maiores porcentagens de sólidos, ou seja, foi realizado com sucesso a adaptação de PCI fragmentadas pré-tratadas a 250g.L^{-1} , enquanto as PCI cominuídas e fragmentadas foram adaptadas até 30g.L^{-1} e 50g.L^{-1} , respectivamente. Além disso, com o emprego do pré-tratamento, verificou-se uma menor demanda de tempo para que os ensaios de adaptação alcancem valores de Eh superiores a 600mV. Outra constatação, foi que com o aumento da porcentagem de sólidos, maior foi a variação do pH ao longo dos ensaios de adaptação, sendo necessário um controle mais rigoroso do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHAPURE, N.; DHAKEPHALKAR, P.; DHAKEPHALKAR, A.; TEMBHURKAR, V.; RAJGURE, A. e DESHMUKH, A. Use of large pieces of printed circuit boards for bioleaching to avoid “precipitate contamination problem” and to simplify overall metal recovery. **MethodsX**, v. 1, p. 181–186, 2014.

ANNAMALAI, M. e GURUMURTHY, K. Enhanced bioleaching of copper from circuit boards of computer waste by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Environmental Chemistry Letters**, v. 17, n. 4, p. 1873–1879, 2019.

ANTENOR, S. e SZIGETHY, L. Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA**. 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/en/topics/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em: 23 ago. 2021.

ARSHADI, M. e MOUSAVI, S. Simultaneous recovery of Ni and Cu from computer-printed circuit boards using bioleaching: Statistical evaluation and optimization. **Bioresource Technology**, v. 174, p. 233–242, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA - ABINEE. **Indicadores ABINEE - Cenário para a Indústria eletroeletrônica**. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. São Paulo: 2021. 1p. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/dados/cesetora.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo: 2020. 52p. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 23 mai. 2021.

BESEN, G. **Coleta seletiva com inclusão de catadores: construção participativa de indicadores e índices de sustentabilidade**. 2011. 274f. Tese. Doutorado em Saúde Pública - Faculdade de Saúde Pública da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2011.

BORÉM, A. e SANTOS, F. **Biotecnologia Simplificada**. 1. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa (UFV), v. 1, 2001. 302p.

BRITO, F. e PINHO, B. **A Dinâmica do Processo de Urbanização no Brasil, 1940-2010**. UFMG/CEDEPLAR. BELO HORIZONTE, 2012. 19p. Disponível em: <http://cedeplar.ufmg.br/pesquisas/td/TD%20464.pdf>. Acesso em 16 jul. 2021.

CHEN, S; YANG, Y; LIU, C; DONG, F. e LIU, B. Column bioleaching copper and its kinetics of waste printed circuit boards (WPCBs) by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Chemosphere**, v. 141, p. 162–168, 2015.

CHOI, M.; CHO K.; KIM D. e KIM, D. Microbial recovery of copper from printed circuit boards of waste computer by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 39, n. 11–12, p. 2973–2982, 2004.

CRUNDWELL, F. How do bacteria interact with minerals?. **Hydrometallurgy**, v. 71, n. 1–2, p. 75–81, 2003.

DAOUD, J. e KARAMANEV, D. Formation of jarosite during Fe^{2+} oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Minerals Engineering**, v. 19, n. 9, p. 960–967, 2006.

DUAN, H.; HOU, K.; LI, J. e ZHU X. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 3, p. 392–399, 2011.

FERREIRA, M. **Reciclagem de placas de circuito impresso: uma alternativa de desmantelamento**. 2017. 87f. Dissertação. Mestrado em Engenharia do Ambiente. Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.

FORTI, V.; BALDE, C.; KUEHR, R. e BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020 - Quantities, flows, and the circular economy potential**. United Nations University, Bonn: 2020. 120p. Disponível em: <https://collections.unu.edu/view/UNU:7737>. Acesso em: 23 ago. 2021.

FRANCISCO, B. Fontes alternativas para a obtenção de níquel, cobalto e cobre. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2006. p. 1-7.

FRANCO, R. e BARROS, R. Revisão das técnicas utilizadas na recuperação de metais em resíduos de placas de circuito impresso (RPCI). In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: IBEAS, 2016. p. 1-8.

GOMES, R. F. **Estudo multivariado da lixiviação ácida de ítrio presente em placas de circuito impresso**. 2021. 104 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

HENRIQUE JÚNIOR, S.; MOURA, F.; CORREA, R.; AFONSO, J.; VIANNA, C. e MANTOVANO, J. Processamento de placas de circuito impresso de equipamentos eletroeletrônicos de pequeno porte. **Química Nova**, v. 36, n. 4, p. 570-576, 2013.

ILYAS, S.; RUAN, C.; BHATTI, H.; GHOURI, M. e ANWAR, M. Column bioleaching of metals from electronic scrap. **Hydrometallurgy**, v. 101, n. 3, p. 135-140, 2010.

MOUSAVI, S.; YAGHMAEI, S.; SALIMI, F. e JAFARI, A. Influence of process variables on biooxidation of ferrous sulfate by an indigenous *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Part I: Flask experiments. **Fuel**, v. 85, n. 17–18, p. 2555–2560, 2006.

MUNIYANDI, S.; SOHAILI, J. e HASSAN, A. Mechanical, thermal, morphological and leaching properties of nonmetallic printed circuit board waste in recycled HDPE composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 327–334, 2013.

NATUME, R. e SANT'ANNA, F. Resíduos Eletroeletrônicos: Um desafio para o desenvolvimento sustentável e a nova lei da política nacional de resíduos sólidos. In: 3rd INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 2011, São Paulo. **Proceedings [...]**, 2011, p. 1-9.

PEREIRA, M. **Desenvolvimento de uma rota tecnológica envolvendo processamentos mecânico e hidrometalúrgico para a extração de prata presente em placas de circuito impresso**. 2019. 98f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Ambiental - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2019.

QUATRINI, R. e JOHNSON, D. *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Trends in Microbiology**, v. 27, n. 3, p. 282–283, 2019.

EDUARDO, C. e SOBRAL L.G.S. **Estudo de biolixiviação de um concentrado gravítico de rejeito de carvão nas escalas semi-piloto e piloto**. (CETEM/MCTI, Ed.) III Jornada do Programa de Capacitação Interna. **Anais...**Rio de Janeiro: 2013

ROCCHETTI, L.; AMATO, A. e BEOLCHINI, F. Printed circuit board recycling: A patent review. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 814-832, 2018.

RODRIGUES, M.; GAYDARDZHIEV, S.; LOPES, K. e LEÃO, V. Biolixiviação De Cobre Contido Em Placas De Circuito Impresso (PCI) Com Micro-Organismos Mesófilos. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, 2013, Goiânia. **Anais [...]**. Goiás: Gráfica e Editora Pires do Rio Ltda-ME, 2013. p. 97–104.

RODRIGUES, M.; LEÃO, V.; GOMES, O.; LAMBERT, F.; BASTIN, D. e GAYDARDZHIEV, S. Copper extraction from coarsely ground printed circuit boards using moderate thermophilic bacteria in a rotating-drum reactor. **Waste Management**, v. 41, p. 148–158, 2015.

RODRIGUES, M.; LOPES, K.; LEONCIO, H.; SILVA, L. e LEÃO, V. Bioleaching of fluoride-bearing secondary copper sulphides: Column experiments with *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Chemical Engineering Journal**, v. 284, p. 1279–1286, 2016.

SCHIPPERS, A. Microorganisms involved in bioleaching and nucleic acid-based molecular methods for their identification and quantification. In: Donati E.R. e Sand W. (Eds). **Microbial Processing of Metal Sulfides**, 2007, p. 3–33.

SCHMIDELL, W.; LIMA, U.; AQUARONE, E. e BORZANI, W. **Biotecnologia industrial: Processos fermentativos e enzimáticos**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA. v. 3, 2001. 616p.

SILVEIRA, A. **Aplicação da separação eletrostática na reciclagem de resíduos poliméricos e baterias de íon de lítio**. 2016. 137f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Química - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, Brasil, 2016.

SOUZA, C. e SOBRAL, L. Estudo de biolixiviação de um concentrado gravítico de rejeito de carvão nas escalas semi-piloto e piloto. In: Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM, 3., Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. p. 1-7.

STEP INITIATIVE. **One Global Definition of E-Waste**. United Nations University, Bonn: 2014. 13p. Disponível em: http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6120/step_on_e_global_definition_amended.pdf. Acesso em 23 ago. 2021

TEÓFILO, R. e FERREIRA, M. Quimiometria II: Planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, v. 29, p. 338-350, 2006.

UTIMURA, S.; BOTELHO JÚNIOR, A.; TENÓRIO, J. e ESPINOSA, D. Biohidrometalurgia: Recuperação De Cobre Proveniente De REEE Através Da Lixiviação Bacteriana. In: 73º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2018, São Paulo. **Proceedings [...]**. São Paulo: ABM, 2018, p. 1429–1437.

UTIMURA, S. **Uso da biolixiviação no processo de reciclagem de cobre proveniente dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE)**. 2020. 150f. Tese. Doutorado em Engenharia Química - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

VALDÉS, J.; PEDROSO, I.; QUATRINI, R.; DODSON, R.; TETTELIN, H.; BLAKE, R.; EISEN, J. e HOLMES, D. *Acidithiobacillus ferrooxidans* metabolism: From genome sequence to industrial applications. **BMC Genomics**, v. 9, p. 1–24, 2008.

VEIT, H. **Emprego de Processamento Mecânico na Reciclagem de Sucatas de Placas de**

Circuito Impresso. 2001. 110f. Dissertação. Mestrado em Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

VENTURA, E. **Estudo de Processos Físicos para Recuperação de Metais de Placas de Circuito Impresso**. 2014. 115f. Dissertação. Mestrado em Engenharia do Ambiente - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

XAVIER, L.; LINS, F.; NASCIMENTO, H.; BELLAN, I.; RIBEIRO, F.; CALDAS, M.; SILVA, L.; ZOMER, B.; ARAUJO, R.; FILHO, O.; REINOL, P.; FAGUNDES, R. e GUSMÃO, A. **Manual para a destinação de resíduos eletroeletrônicos: orientação ao cidadão sobre como dispor adequadamente os resíduos eletroeletrônicos na cidade do Rio de Janeiro**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2017. 20p.

XAVIER, L. e LINS, F. Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. **Brasil Mineral**, v. 379, n. 1, p. 22-26, 2018.

XAVIER, L. e OTTONI, M. **Economia Circular e Mineração Urbana: Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos**. 1 ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2019. 20p.

YAMANE, L.; ESPINOSA, D. e TENÓRIO, J. Lixiviação Bacteriana De Sucata Eletrônica: **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 10, p. 50–56, 2013.

YAMANE, L.; ESPINOSA, D. e TENÓRIO, J. Biolixiviação de cobre de sucata eletrônica. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 3, p. 327–333, 2011.

YANG, T.; XU, Z.; WEM, J. e YANG, L. Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Hydrometallurgy**, v. 97, n. 1–2, p. 29–32, 2009.

ZHU, N.; XIANG, Y.; ZHANG, T.; WU, P.; DANG, Z.; LI, P. e WU, J. Bioleaching of metal concentrates of waste printed circuit boards by mixed culture of acidophilic bacteria. **Journal of Hazardous Materials**, v. 192, n. 2, p. 614–619, 2011.