

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO RIO GRANDE DO NORTE

GABRIELLA CRISTINA DE FIGUEIREDO FREIRE

BIOLIXIVIAÇÃO: UMA ROTA BIOTECNOLÓGICA PARA EXTRAÇÃO DA  
SCHEELITA

NATAL-RN

2017

GABRIELLA CRISTINA DE FIGUEIREDO FREIRE

BIOLIXIVIAÇÃO: UMA ROTA BIOTECNOLÓGICA PARA EXTRAÇÃO DA  
SCHEELITA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPGUSRN), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais.

Orientador: D.r Julio Cesar de Pontes

Natal-RN  
2017

Freire, Gabriella Cristina de Figueiredo.  
F862b Biolixiviação: Uma rota biotecnológica para extração da Scheelita /  
Gabriella Cristina de Figueiredo Freire. – 2017.  
147 f: il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos  
Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio  
Grande do Norte, Natal, 2017.

Orientador(a): Prof. D.r Júlio Cesar de Pontes.

1. Tratamento de metais. 2. Biolixiviação. 3. Scheelita. 4.  
Microrganismos. I. Pontes, Júlio Cesar de. II. Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. III. Título.

CDU 622.7

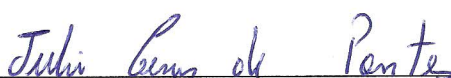
GABRIELLA CRISTINA DE FIGUEIREDO FREIRE

**BIOLIXIVIAÇÃO: UMA ROTA BIOTECNOLÓGICA PARA EXTRAÇÃO DA SCHEELITA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPGUSRN), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais.

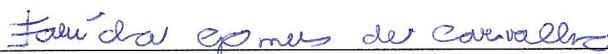
Dissertação apresentada e aprovada em 23/08/2017 pela seguinte Banca Examinadora:

BANCA EXAMINADORA:



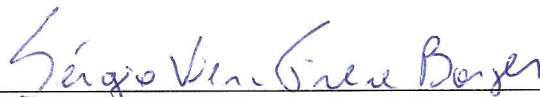
Júlio Cesar Pontes, D.r – Presidente

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Fabíola Gomes de Carvalho, Prof.<sup>a</sup> D.ra - Examinadora

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Sérgio Vieira Freire Borges, Prof. D.r - Examinador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Dedico esse trabalho a Deus,  
Aos meus pais, Patrícia e Eugênio,  
Às irmãs Bruna, Ana Beatriz e M<sup>a</sup> Valentina.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida, pela saúde, oportunidade, coragem e sabedoria que me concedeu para conseguir concluir mais essa etapa pessoal e profissional.

À minha querida mãe, Patrícia Amorim, por todo amor, dedicação, cuidado, incentivo, atenção, carinho e coragem que me transmitiu durante todos os dias de vida; o apoio para não desistir dos meus sonhos, e pelo lindo exemplo de mulher que é em minha vida.

Ao meu pai Eugênio Pacheli, por seu amor, carinho, dedicação, e incentivo em todas as minhas etapas de vida.

Às minhas irmãs Bruna, Ana Beatriz e Maria Valentina pela paciência, incentivo e carinho de sempre.

A todos os meus familiares, tias, tios, primas e primos que estão sempre comigo incentivando e me dando força.

Às minhas queridas Avó Ivoneide Amorim e a tia Veralice Amorim por pelo apoio carinho, amor e paciência.

Ao orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Julio Cesar Pontes pelo apoio durante a longa e dificultosa caminhada para concluir a dissertação.

Ao Prof<sup>o</sup> José Yvan Pereira Leite pela oportunidade de aprendizado e contribuições durante o desenvolvimento da pesquisa no Laboratório de Tecnologia Mineral do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN.

Aos companheiros bolsistas e ex-bolsistas do laboratório de Tecnologia Mineral do IFRN, Arthemis, Bruno, Vitória, Daniel, Matheus e Sidney, por toda ajuda e companheirismo durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu amigo e bolsista José Rodolpho por sua valiosíssima ajuda, amizade, incentivo e companheirismo, bem como, por todo carinho e atenção que me foram dados para conseguir concluir o meu trabalho no laboratório.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), especialmente, ao Programa de Pós-graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPGUSRN) e todos os professores e funcionários, pela oportunidade de aprendizado diário.

Ao Núcleo de Análises de Água e Esgoto (NAAE) por todo apoio laboratorial durante as análises da água da mina Brejuí e das lixívias microbiológicas.

Aos funcionários e técnicos de laboratório do Instituto Federal do Rio Grande do Norte – IFRN (Natal-Central), especialmente a Douglisnilson Morais (NAAE), Priscilla Azevedo (NAAE), Mirlene Neyce (NAAE), Andrezza Oliveira (NAAE), Maxssuel Pedro (Lab. Química) e Ângela Dias pelo apoio e aprendizado durante a execução das análises físico-química e microbiológicas realizadas na pesquisa.

Aos professores Doutores do programa de Pós-graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPGUSRN): Valdenildo Pedro (ex-coordenador), Mário Taváres, Leci Reis, André Calado, José Américo, Gerda Pinheiro, e Alexandre Magno da Rocha (externo), pelos conhecimentos repassados durante esses dois anos de curso.

À Diretoria Acadêmica de Recursos Naturais-DIAREN do IFRN, na pessoa do Prof<sup>o</sup>. Dr. João Batista, pelo apoio e presteza em solucionar entraves administrativos durante o andamento da pesquisa.

Aos amigos de graduação Danielle Maria, Luciene Keyla, Allane Freire, Milka Priscila, Rômulo Rodrigo que sempre estão ao meu lado me incentivando, apoiando com amizade sincera, verdadeira, amorosa, e por não me deixarem desistir dos meus sonhos.

À amiga Danielle Maria pela valiosa e importantíssima orientação durante a execução e conclusão dessa dissertação, sem ela não teria conseguido concluí-la. Muito obrigada pelo carinho, atenção, orações e incentivos a cada dia de trabalho na reta final.

Ao amigo Manoel Alexandre Diniz por todo estímulo, conselhos, carinho e orações.

À amiga Elayze Thayze pelo carinho, mensagens de incentivo, e por sempre torcer pela minha felicidade.

Aos colegas de curso, pelo companheirismo, contribuições, aprendizado e entusiasmo, dentro e fora da instituição de ensino, em especial, à Valiene, Sylbenia Alves, Ana Valéria de Medeiros, Andréia Nunes, Fausto Pereira e Robson Garcia.

Ao amigo Ozenildo Gil pelo importantíssimo incentivo durante o processo seletivo do mestrado, pois sem a sua persistência talvez não estivesse com meu título hoje.

A todos aqueles que, direta e indiretamente, contribuíram para conclusão desse trabalho e a obtenção desse título tão desejado e sonhado.

## RESUMO

A lixiviação bacteriana, também conhecida por biolixiviação, vem sendo muito aplicada pela indústria minero-metalúrgica para tratar diversos minérios, bem como para recuperar metais e rejeitos. Esta rota tecnológica pode ser uma alternativa ao processamento de rejeitos de scheelita. O estudo em questão, teve como objetivo analisar o comportamento da aplicação da biolixiviação da scheelita, a partir de amostras puras e de água proveniente de mina Brejuí, localizadas em Currais Novos-RN. As amostras de scheelita foram submetidas aos ensaios de biolixiviação em Erlenmeyer de 250 ml, submetidos a controle de tempo de contato e temperatura, em uma incubadora *Shaker*. A agitação de 120 rpm foi mantida constante em todos os ensaios, em 120 rpm. O comportamento da solubilização de scheelita foram analisadas em soluções de água de mina com pH iniciais entre 2-5. O pH foi corrigido com solução de ácido sulfúrico. As amostras foram filtradas, o material retido submetido a mufla em temperatura de 700°C durante 50 minutos, e das lixívias filtradas foram coletadas amostras para análise bacteriológica em placa de Petri, a fim de quantificar o crescimento bacteriano. Os resultados mostram que existe crescimento da solubilização para tempo de contato estudado (96 h) para todas as faixas de pH estudadas, bem como, o crescimento bacteriológico não foi estabilizado. Foi obtido resultado da ordem de 12% de extração, no entanto, como não se identificou o decréscimo dos microrganismos e as curvas de extração são crescentes é recomendável elevar o tempo de contato visando maximizar os resultados da biolixiviação.

Palavras-Chave: Biolixiviação. Scheelita. Solubilização. Microrganismos.



## **ABSTRACT**

Bacterial leaching, also known as bioleaching, has now been widely applied by the mineral-metallurgical industry to treat various ores as well as to recover metals and tailings. This technological route may be an alternative to the processing of scheelite tailings. The objective of this study was to evaluate the application of a biotechnological route for the solubilization of scheelite from pure samples and water from Brejuí mine located in Currais Novos-RN. The Scheelite samples were submitted to the 250 ml Erlenmeyer bioleaching tests, subjected to contact and temperature control in a Shaker incubator. Stirring was kept constant in all runs at 120 rpm. The behavior of the sheelite solubilization was analyzed in of mine water solution with initial pH ranging between 2-5. The pH was corrected with sulfuric acid solution. The leachates were filtered and the filter material subjected into a muffle at 700°C for 50 minutes. The leached samples were collected for bacteriological analysis in Petri dish, to verify the bacterial growth. The results show that there is a growth solubilization for the contact time studied (120 h) for all pH ranges studied, as well as the bacteriological growth was not stabilized. In this phase of the work, a 12% solubilization result was obtained. However, as the microorganisms were not identified and the extraction curves were increasing, it is advisable try to increase the contact time to maximize the leaching results.

**Keywords:** Biolixiviation. Scheelite. Solubilization. Microorganisms.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Mapa de localização geográfica do município de Currais Novos-RN.....	28
Figura 2 -	Mecanismos de ação entre microrganismos e minérios, durante o processo de biolixiviação de sulfetos minerais.....	54
Figura 3 -	Mapa de localização da área da Mina Brejuí.	63
Quadro 1 -	Classificação das indústrias consumidoras de Scheelita e suas respectivas aplicações.....	34
Quadro 2 -	Evolução histórica da hidrometalurgia no mundo.....	45
Quadro 3 -	Características dos principais microrganismos biolixiviantes e seus respectivos minérios de atuação.....	123
Quadro 4 -	Parâmetros e características influenciadoras da biolixiviação em pilhas, e na recuperação de metais.....	58
Quadro 5 -	Parâmetros e técnicas utilizadas para análise físico-química da água da mina.....	66
Quadro 6 -	Parâmetro e técnica utilizada para análise bacteriológica da água da mina....	66
Quadro 7 -	Lista da sequência de retirada das amostras da incubadora em função do tempo final de incubação.....	71
Quadro 8 -	Fórmula do cálculo de quantificação das Unidades Formadoras de Colônias (UFC/ml).....	79
Quadro 9 -	Resultados da análise físico-química da água da Mina Brejuí.....	81
Quadro 10 -	Resultado da análise bacteriológica da água da Mina Brejuí.....	83
Fotografia 1 -	Vista panorâmica da área da Mina Brejuí.....	35
Fotografia 2 -	Vista panorâmica da Mineração Tomaz Salustino, com detalhe para pilhas de rejeitos existentes na propriedade.....	35
Fotografia 3 -	Vista frontal da planta de beneficiamento da Mina Brejuí.....	36
Fotografia 4 -	Área de beneficiamento com detalhe para as mesas vibratórias (concentradoras) da Mina Brejuí.....	37
Fotografia 5 -	Visão frontal para mesa concentradora vibratória em operação.....	41
Fotografia 6 -	Detalhe para uma das pilhas de rejeitos existentes na área da Mineração Tomaz Salustino.....	42

Fotografia 7 -	Amostras da Scheelita pura antes (esquerda) e após o processo de cominuição (direita).....	64
Fotografia 8 -	Tanque de armazenamento de água da Mina Brejuí, com detalhe para tubulação de onde foi realizada a coleta da água.....	65
Fotografia 9 -	Amostra de Scheelita retida em peneira de 74 micrômetros.....	67
Fotografia 10 -	Erlenmeyers contendo as amostras no interior do da incubadora <i>Shaker</i> .....	72
Fotografia 11 -	Detalhe para os materiais utilizados durante a etapa de filtragem.....	74
Fotografia 12 -	Amostras armazenada na Mufla para etapa de queima à 700°C.....	75
Fotografia 13 -	Amostras de Scheelita depois de retiradas da Mufla.....	76
Fotografia 14 -	Equipamento “Colony Counter” utilizado na contagem das UFC/mL.....	106
Fluxograma 1 -	Planta simplificada de beneficiamento de Scheelita.....	38
Fluxograma 2 -	Planta de beneficiamento de Scheelita da Mineração Tomaz Salustino S/A.	40
Fluxograma 3 -	Fases do processo de tratamento hidrometalúrgico.....	47
Fluxograma 4 -	Descrição simplificada dos procedimentos metodológicos da pesquisa.....	61
Fluxograma 5 -	Etapas da metodologia experimental desenvolvida nessa pesquisa.....	80
Gráfico 1 -	Comportamento do pH do meio na biolixiviação de scheelita em função do tempo de contato, nas condições: da temperatura 25°C e agitação 120 rpm.	86
Gráfico 2 -	Percentual de extração de Scheelita em função do tempo de incubação, nas condições: Temp. 25°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.	87
Gráfico 3 -	Gráfico 3 - UFC/mL em função do tempo de incubação, nas condições: Temp. 25°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.....	89
Gráfico 4 -	Efeito da temperatura 30°C e do pH inicial em função do tempo (h), com agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.....	92
Gráfico 5 -	Percentual de extração de WO <sub>3</sub> em função do tempo (h) de incubação, nas condições: Temp. 30°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.....	93
Gráfico 6 -	UFC/mL em função do tempo de incubação, nas condições: Temp. 30°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.....	95
Gráfico 7 -	Efeito da temperatura 35°C sob o pH inicial (2, 3, 4 e 5) em função do tempo (h), com agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.....	97

Gráfico 8 - Percentual de extração de  $\text{CaWO}_4$  em função do tempo de incubação, nas condições: Temp. 35°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura..... 98

Gráfico 9 - UFC/mL em função do tempo de incubação, nas condições:Temp. 35°C e agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura..... 99

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Reservas e produções mundiais de tungstênio.....	24
---	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	JUSTIFICATIVA	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	18
<b>2.1</b>	<b>RECURSOS NATURAIS</b>	18
<b>2.1.1</b>	<b>Recursos Minerais</b>	19
2.2	TUNGSTÊNIO	20
<b>2.2.1</b>	<b>Aplicações do Tungstênio</b>	22
2.3	<b>Produção mundial do tungstênio</b>	23
<b>2.3.1</b>	<b>Aplicações do tungstênio</b>	22
<b>2.3.2</b>	<b>Produção brasileira de tungstênio</b>	24
<b>2.3.3</b>	<b>Consumo interno de tungstênio</b>	24
<b>2.3.4</b>	<b>Depósitos brasileiros de tungstênio</b>	25
<b>2.3.5</b>	<b>SCHEELITA</b>	27
<b>2.3.6</b>	<b>Reservas brasileiras de scheelita</b>	28
2.4	TRATAMENTO DE MINÉRIOS	29
2.4.1	MINA BREJUÍ	29
2.5	Planta de beneficiamento de scheelita	34
2.6	METALURGIA EXTRATIVA	40
2.7	HIDROMETALURGIA	41
2.8	LIXIVIAÇÃO	45
2.9	BIOLIXIVIAÇÃO	46
2.10	<b>Aplicações e vantagens da biolixiviação</b>	49
<b>2.10.1</b>	<b>Mecanismos de atuação dos microrganismos na biolixiviação</b>	50
<b>2.10.2</b>	<b>Biolixiviação da scheelita</b>	52
2.10.3	MICROBIOLOGIA E A INDÚSTRIA MINERAL	53

2.11	<b>Microrganismos biolixiviantes</b>	54
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	56
3.1	METODOLOGIA DE ABORDAGEM DA PESQUISA	56
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	57
3.3	DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS E MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	59
3.3.1	<b>Local de coleta das amostras de água e de scheelita</b>	59
3.3.2	<b>Coleta das amostras de Scheelita e água processada da mina</b>	60
3.3.3	<b>Análise físico-química e bacteriológica da água da Mina Brejuí</b>	62
3.3.4	<b>Classificação Granulométrica e peneiramento das amostras de Scheelita</b>	64
3.4	ENSAIOS DE BIOLIXIVIAÇÃO	64
3.4.1	<b>Minério – Scheelita</b>	65
3.4.2	<b>Meio de Cultura utilizado nos ensaios de biolixiviação</b>	65
3.4.3	<b>Ensaio em frascos agitados</b>	66
3.4.5	<b>Ajuste e padronização dos Ph's das amostras contendo Scheelita</b>	68
3.4.6	<b>Incubação das amostras</b>	68
3.4.7	<b>Medição do pH das amostras pós incubação</b>	69
3.4.8	<b>Filtragem das amostras pós agitação na incubadora <i>Shaker</i></b>	69
3.4.9	<b>Queima de material sólido retido das lixívias</b>	71
3.4.10	<b>Análise bacteriológica das amostras das lixívias</b>	72
3.4.10.1	<i>Meio de cultura para cultivo de amostras em placas de Petri</i>	73
3.4.10.2	<i>Cultivo em Placas de Petri</i>	74
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	76
4.1	ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA DA MINA BREJUÍ	78
4.1.1	<b>Avaliação dos parâmetros físico-químicos da água da Mina Brejuí</b>	78
4.1.2	<b>Avaliação dos parâmetros bacteriológicos da água da Mina Brejuí</b>	81
4.2	ENSAIOS DE BIOLIXIVIAÇÃO	83
4.2.1	<b>Análise do comportamento da biolixiviação da Scheelita sob efeito da temperatura de 25°C em relação as variáveis pH, percentual de extração e quantidade de UFC/mL versus tempo (h)</b>	84

4.2.2	<b>Análise do comportamento da biolixiviação da Scheelita sob efeito da temperatura de 30°C em relação as variáveis pH, percentual de extração e quantidade de UFC/mL versus tempo (h)</b>	89
4.2.3	<b>Análise do comportamento da biolixiviação da Scheelita sob efeito da temperatura de 35°C em relação as variáveis pH, percentual de extração e quantidade de UFC/mL versus tempo (h)</b>	94
4.3	<b>ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONDIÇÕES DE TEMPERATURA (25°C, 30°C E 35°C) EM RELAÇÃO AS VARIÁVEIS: TEMPO, PH E UFC/ML</b>	99
4.4	<b>ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DAS AMOSTRAS DAS LIXÍVIAS</b>	101
5	<b>SUGESTÕES</b>	107
6	<b>CONCLUSÃO</b>	107
	<b>REFERÊNCIAS</b>	111
	APÊNDICE A – Características dos principais microrganismos biolixiviantes e seus respectivos minérios de atuação.	123
	ANEXO A – Página de submissão do artigo à Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental	135
	ANEXO B – Versão do Artigo submetido à Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental	136



## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais metais extraídos no estado do Rio Grande do Norte é a Scheelita, especialmente da região do Seridó Potiguar. A extração desse minério teve início logo após o início da Segunda Guerra Mundial, em 1943. A partir daí começaram as primeiras explorações do tungstênio, o qual tinha como principal finalidade a indústria de armamento bélico, e a fabricação de equipamentos estratégicos para os países participantes da guerra. O município de Currais Novos foi o que mais recebeu investimentos do Estado, proporcionando desenvolvimento econômico, crescimento urbano e social para a população local (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO, 2015).

Apesar dos grandes avanços tecnológicos, as diversas minerações do Brasil e do mundo, incluindo a Mineração Tomaz Salustino ainda se utilizam técnicas muito rudimentares e equipamentos que trabalham com baixa eficiência durante os processos de extração e beneficiamento, causando desperdícios dos recursos naturais e diminuindo a vida útil da reserva.

Conforme apontou Santos (2013) as indústrias de beneficiamento de Scheelita apresentam baixa eficiência, gerando ao final do processo produtivo uma grande quantidade de rejeitos. E, esse material está sendo disposto em forma de pilhas, em contato direto com área superficial do solo, sem qualquer tipo de proteção ou tratamento.

Os processos hidrometalúrgicos são aqueles utilizados pela atividade de mineração para extrair metais em meio aquoso. Dentre estes destaca-se a biolixiviação, a qual teve seus primeiros testes industriais aplicados na mineração de cobre. A biolixiviação é compreendida como uma técnica hidrometalúrgica relacionada às áreas de microbiologia, biotecnologia e mineração. O princípio da biolixiviação é atuar na solubilização de metais em meio aquoso utilizando microrganismos, especialmente bactérias, os quais promoverão a dissolução de metais de baixo teor (BEVILAQUA, 2002).

Essa técnica tem sido muito utilizada pelo setor mineiro-metalúrgico, especialmente por empresas relacionadas ao setor de tratamento de minerais metálicos. O crescente avanço dessa técnica biotecnológica na atualidade justifica-se, principalmente, em razão da escassez dos minérios chamados ricos, como por exemplo: ouro e cobre.

A biolixiviação apresenta significativas vantagens quando comparadas aos outros tipos de tratamento de metais. A técnica poderá ser considerada uma rota tecnológica alternativa importante para recuperar Scheelita existente nas pilhas de rejeito da Mina Brejuí, a qual pertence a Mineração Tomaz Salustino, e está localizada no município de Currais Novos-RN.

A partir do exposto, o estudo em questão partiu da premissa de que o processo hidrometalúrgico conhecido por biolixiviação pode ser aplicado a solubilização da Scheelita presente na área da mina Brejuí. Com isto, surge a seguinte questão de partida: em que condições a biolixiviação é capaz de solubilizar a scheelita utilizando bactérias disponíveis em água da mina? Por fim, a pesquisa em tela buscou analisar o comportamento da solubilização do mineral scheelita, a partir da utilização da rota alternativa denominada de biolixiviação.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E PROBLEMÁTICA DE PESQUISA

A extração de recursos minerais é muito importante para o setor industrial brasileiro, bem como, para o desenvolvimento da sociedade e melhoria da qualidade de vida da população em geral. Ela tem sido considerada, ao longo dos anos, como um dos pilares que sustentam os poderes econômicos e políticos (PONTES, 2013).

O extrativismo mineral é considerado como uma das principais atividades econômicas da sociedade, pois atua como base de sustentação para a maior parte dos segmentos industriais, gera empregos e impostos, e também representa fator determinante ao desenvolvimento de um grande número de cidades e regiões (SANTOS, 2009).

Historicamente, um dos principais minérios que até o presente ainda é explorado no estado do Rio Grande do Norte é a Scheelita, especialmente na região do Seridó Potiguar. A extração desse minério iniciou-se a partir da Segunda Guerra Mundial, em 1943. A partir daí começaram as primeiras explorações do metal de tungstênio, o qual tinha como principal finalidade a indústria de armamento bélico, e na fabricação de equipamentos estratégicos para os países participantes da guerra. O município de Currais Novos foi o que mais recebeu investimentos do Estado, proporcionando desenvolvimento econômico, crescimento urbano e social para a população local.

O Tungstênio é um minério metálico que apresenta características especiais, uma vez possui elevada dureza, densidade e ponto de fusão. É na Província Scheelitífera do Seridó, situada entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, onde está localizada as principais mineralizações de Scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ), compondo-se na maior concentração de minério de tungstênio do Brasil (DANTAS, 2000).

As principais fases empregadas na obtenção de qualquer recurso mineral, compreendem a exploração, desenvolvimento, planejamento e beneficiamento. Em relação a exploração do minério de Scheelita no estado do Rio Grande do Norte, esta tem sido operada e desenvolvida

com uso de técnicas rudimentares e dificultosas para o aproveitamento racional do minério (SANTOS, 2013).

Observou-se que as indústrias de beneficiamento de scheelita apresentam baixa eficiência na lavra, gerando uma grande quantidade de rejeitos ao final dos processos de extração e beneficiamento. Além disso, os rejeitos ficam dispostos em forma pilhas, as quais têm contato direto com a área superficial do solo, sem qualquer tipo de proteção ou tratamento (SANTOS, 2013).

Recentemente, um estudo de caracterização desses rejeitos demonstrou que Tungstênio (W), Molibdênio (Mo), Cobre (Cu) e, de forma menos significativa, Zinco (Zn) são disponibilizados no ambiente a partir das pilhas de rejeito descobertas em minas de scheelita localizadas no semiárido tropical (PETTA et al., 2014).

A grande quantidade de estéreis e rejeitos produzidos juntamente com a água residuária tornam-se fonte de contaminação por metais pesados e de poluição quando sua disposição não atende às medidas de proteção sanitária e ambiental (PRATAS et al., 2005). Outro ponto de destaque é o de que nas áreas onde há disposição inadequada das pilhas de rejeitos, é comum a ocorrência da Drenagem Ácida de Mina (DAM) resultante da oxidação de sulfetos em presença de água (ROMERO et al., 2007).

A empresa Mineração Tomaz Salustino opera com extração e beneficiamento de scheelita no Estado do Rio Grande do Norte desde 1943. Contudo, desde o início de sua operação a planta de beneficiamento tem gerado, aproximadamente, rejeito com teor da ordem de 0,1% de  $WO_3$ . Trabalhos realizados nas pilhas de rejeitos apresentam um quantitativo de 6,7 milhões de toneladas, para os quais os métodos convencionais não apresentam recuperações atrativas. Os rejeitos são resultantes das etapas de moagem e beneficiamento do minério, principalmente dos jigues e mesas concentradoras (NESI, 2001).

Além disso, as técnicas e equipamentos utilizados pela mineradora são bastante rudimentares e apresentam baixa eficiência, quando comparadas as metodologias atuais apresentadas pelo mercado tecnológico (LEITE, 2007). Essa baixa eficiência tem contribuído, desde a década de 40, para a geração de grandes quantidades de rejeitos acumulados nos arredores da mina Brejuí sem perspectiva de destinação final, e contendo ainda um considerável teor de minerais comercializáveis.

Vários estudos apontam que há necessidade de investimentos e tecnologias inovadoras que busquem identificar, controlar, tratar e mitigar os impactos ambientais decorrentes da implantação e operação de atividades econômicas necessárias ao desenvolvimento da sociedade. Também deve-se levar em consideração a redução do consumo dos recursos naturais

não renováveis, uma vez que tais matérias-primas são fornecidas gratuitamente pela natureza à sociedade.

Entre os processos para tratamento de minérios aplicados na mineração, têm-se os hidrometalúrgicos os quais possuem importância acadêmica, e em especial aqueles com aplicação na biolixiviação, tendo os primeiros testes industriais aplicados na mineração de cobre.

Essa rota biotecnológica tem sido aplicada em diversas mineradoras do mundo e também por algumas no Brasil. Dentre os minerais mais estudados têm-se: Cobre, Zinco e Níquel, porém, para o caso do mineral Scheelita a literatura apresenta-se bastante escassa quando comparada a outros metais.

A utilização de técnica biohidrometalúrgica apresenta muitas vantagens quando comparada as técnicas convencionais, e contribui também com alguns benefícios para a empresa, tais como: economia com insumos (ácidos) utilizados pelo método tradicional, redução de gastos com energia elétrica, baixo custo de operacionalização, reduzida necessidade de mão de obra para operar e não emite gases poluentes para a atmosfera (CIMINELLI, 2007).

Os baixos teores de Tungstênio na Scheelita não viabilizam seu beneficiamento por técnicas gravimétricas, assim o desenvolvimento de rota para seu concentrado pode ser valorizado se comprovada a recuperação via técnicas de biolixiviação da scheelita disposta em grandes pilhas de rejeitos localizadas no município de Currais Novos.

Diante do contexto, o estudo em questão partiu da premissa de que o processo hidrometalúrgico conhecido por biolixiviação pode ser aplicado a solubilização da Scheelita presente na área da mina Brejuí.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é avaliar o potencial da biolixiviação como uma rota biotecnológica para extração de Scheelita, cujos os objetivos específicos são:

- a) qualificar e quantificar as características químicas e microbiológicas da água processada utilizada na planta de beneficiamento da mina da Mina Brejuí, localizada em Currais Novos/RN;
- b) avaliar a porcentagem de biolixiviação da Scheelita usando água de mina em função da temperatura, do pH do meio e do tempo de contato;
- c) analisar o crescimento de microrganismos em material de Scheelita solubilizado;
- d) identificar as condições mais favoráveis à solubilização da Scheelita.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O tungstênio é um metal não metálico que compõe características diferenciais como alto grau de temperatura de fusão e alta densidade. A extração de Scheelita no município de Currais Novos-RN proporciona desenvolvimento socioeconômico, e mais oferta desse minério para os mercados interno e externo. Além disso, apresenta uma importante fonte de insumos para as diversas indústrias de base da sociedade.

Para a região do Seridó potiguar a atividade de mineração apresenta uma grande importância socioeconômica, apesar dos mais diversos impactos ambientais gerados durante a operação dessa atividade.

A indústria mineral representa em torno de 4 % do PIB (Sumário Mineral, 2016). No Estado do Rio Grande do Norte a extração de Scheelita é uma importante atividade econômica que se encontra em operação desde 1943, contudo, as plantas de processamento dos minérios têm gerado grande quantidade de rejeitos com teores da ordem de 0,1% de  $WO_3$  (NESI, 2001).

Como resultado dessa atividade extrativista, e especificamente na área da Mineração Tomaz Salustino, podemos mencionar a grande geração de rejeitos, os quais estão sendo dispostos nos arredores da mina Brejuí sem qualquer tipo de tratamento. No local há cerca de 6 (seis) milhões de toneladas de rejeitos em pilhas que são produtos também do processo de beneficiamento da Scheelita.

A escassez das reservas de minerais com elevados teores, bem como as exigências com a preservação do meio ambiente, tem feito com que a indústria mínero-metalúrgica busque tecnologias e processos mais sustentáveis.

A hidrometalurgia é um método de extração de metais de interesse, o qual utiliza-se de uma solução aquosa. Ela pode ser classificada de acordo com sua aplicação, sendo aqui melhor destaca-se a biohidrometalúrgia, ou biolixiviação. Esta apresenta diversas vantagens quando comparada as técnicas convencionais, tais como: economia dos insumos utilizados pelo método tradicional de lixiviação, redução do consumo de energia elétrica, baixo custo de operacionalização, redução de mão de obra na operação, e não emite gases poluentes para a atmosfera (CIMINELLI, 2007; BEVILAQUA, 2002).

Ao longo dos anos as empresas de mineração têm desenvolvido suas atividades de tratamento mineral utilizando-se de métodos bastante rudimentares, como é o caso da Mineração Tomaz Salustino. Isso tem prejudicado de forma considerável o meio ambiente e a sociedade, uma vez que grande quantidade de rejeitos, poluentes tóxicos, contaminantes químicos estão sendo lançados no meio ambiente. Além de disso, percebe-se um grande

desperdício de recursos minerais e matéria-prima por parte das empresas, considerando o tipo de operação realizado. E, verifica-se um aumento da escassez desses recursos minerais ora considerados comercializáveis e de alto teor.

A pesquisa apresenta grande importância para o setor mineral, bem como, para a empresa, pois a aplicação da biolixiviação consistirá em uma inovação tecnológica para o setor mineral, especialmente, para o caso do beneficiamento da Scheelita. A biolixiviação é uma tecnologia que pode ser considerada sustentável e ao mesmo tempo nova, pois contribui para a melhoria dos processos produtivos, redução de gastos financeiros e da exploração dos recursos naturais, colaborando ainda para a sustentabilidade ambiental da região e do estado do Rio Grande do Norte.

Além disso, irá contribuir com novas informações a respeito da literatura específica, e com os resultados apresentados ao final da aplicação da técnica de biolixiviação no minério de scheelita. Vale salientar que a literatura específica ainda se mostra bastante incipiente, e com isso necessitando de que sejam realizados estudos e pesquisas voltadas à temática, na busca de preencher as possíveis lacunas que existam a diz respeito a aplicação da biolixiviação da Scheelita.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção irá destacar os temas relacionados ao estudo, por meio da elucidação de alguns autores, visando obter um auxílio indispensável à elaboração, aplicação e análise dos dados para suprir e justificar o problema proposto.

Na busca por um melhor entendimento a respeito da temática em questão, nessa seção são destacados e discutidos os conceitos que norteiam teoricamente a investigação desenvolvida. Assim, as definições aqui expostas contemplam informações sobre Recursos Minerais, Scheelita, Tunstênio, Hidrometalurgia, Biolixiviação e Microbiologia.

### 2.1 RECURSOS NATURAIS

A definição do termo Recurso Natural é conhecida pela sociedade como sendo os suprimentos de alimentos materiais para construção, vestuário, minerais, água e energia obtida da Terra, apresentando importância por manter a vida das civilizações (SKINNER, 1970).

De acordo com Miller Jr. (2007), recurso é qualquer coisa obtida do meio ambiente com objetivo de atender as necessidades e desejos dos seres humanos, dentre os quais: água, produtos, manufaturados, transporte e comunicação. Os recursos da natureza podem ser classificados em **Perenes** (luz do sol, vento e água corrente), **Renováveis** (ar e água limpos, solo, produtos florestais e grãos), ou **Não Renováveis** (combustíveis fósseis, metais e areia).

O recurso renovável é repostado muito rápido, por meio de processos naturais, desde que não seja usado mais rapidamente do que repostado. Os recursos renováveis, conforme Miller Jr. (2007), podem ser degradados ou exauridos. E, quando a taxa de reposição natural do recurso começa a diminuir, tal processo chama-se degradação ambiental (MILLER Jr., 2007).

Conforme classificação do referido autor, os recursos não renováveis possuem uma quantidade ou estoque finito na crosta terrestre. Os recursos denominados não renováveis são classificados ainda em: *Energéticos* (carvão, petróleo e gás natural), *Minerais Metálicos* (ferro, cobre e alumínio), e *Não Metálicos* (sal, argila, areia e fosfatos).

A base da civilização é composta por um complexo sistema de controle de saúde, distribuição de força, transporte e comunicação. Para a construção e manutenção desse sistema necessita-se de recursos minerais e combustíveis imprescindíveis à sua complexa tecnologia. Esses minerais depois de extraídos da natureza não podem ser repostos, pois diferentemente dos vegetais, não se formam por meio de rápidos processos cíclicos (SKINNER, 1970).



### 2.1.1 Recursos Minerais

A crosta terrestre é composta por elementos e componentes inorgânicos sólidos e massas de um ou vários minerais denominados de rochas. Essas são definidas como sendo uma combinação sólida de um ou mais minerais que fazem parte da crosta terrestre. Já o mineral é um componente inorgânico natural, presente no estado sólido e com estrutura cristalina interna regular (MILLER Jr, 2007).

Segundo Ferreira (2010), o mineral é um corpo inorgânico, sólido à temperatura ambiente, que constitui as rochas da crosta terrestre. Já o minério é o próprio mineral ou uma associação de minerais de onde se podem extrair metais ou substâncias não metálicas, que apresentam valor para ser comercializado. Estes recursos minerais podem ser encontrados no meio ambiente, em estado puro, como por exemplo o ouro, ou associados a outros minerais.

A partir dessas definições **entende-se que os recursos minerais são substâncias inorgânicas retiradas da Terra** e que são usadas como matéria prima. São considerados ainda elementos ou compostos químicos que fazem parte da própria formação da crosta terrestre, não havendo participação do ser humano no seu processo de concepção.

O Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2015) divulgou que os recursos minerais são significativos e envolvem uma produção de 72 substâncias minerais, dentre as quais: 23 são metálicas, 45 não metálicas e 4 energéticas. São 1.820 lavras garimpeiras; 830 complexos de água mineral; e 13.250 licenciamentos.

Na natureza pode ser encontrada uma grande diversidade de recursos minerais, os quais podem ser classificados como: *metálicos* (ferro, ouro, alumínio, manganês, magnésio, cobre, mercúrio, chumbo, estanho, prata e urânio); e *não metálicos* (areia, argila, cloreto de sódio, nitratos, fosfatos, enxofre, cascalho, amianto, água, petróleo e carvão mineral) (SILVA, 2007).

**Entende-se que os recursos minerais são substâncias inorgânicas retiradas da Terra** e que são usadas como matéria prima. São considerados ainda elementos ou compostos químicos que fazem parte da própria formação da crosta terrestre, não havendo participação do ser humano no seu processo de concepção.

Cada substância mineral possui um determinado tipo de uso e aplicação para a sociedade. Destaca-se dentre as aplicações, os materiais destinados ao mercado da construção civil, por exemplo: areia, argila, rochas calcárias, material de empréstimo, dentre outros (TANNO; SINTONI, 2003). A atividade de extração mineral provê à sociedade um elevado número de matérias primas e insumos importantes à manutenção da vida, ao conforto e progresso da civilização humana.

## 2.2 TUNGSTÊNIO

O tungstênio é um metal que possui características exclusivas, ou seja, elevada dureza, densidade e ponto de fusão, que são indispensáveis na composição de certas ligas de aços especiais. Ele apresenta grande resistência aos desgastes e a corrosão, além de ser bom condutor de calor e eletricidade (CANO, 2014).

Um ponto importante a destacar é que em função das particularidades desse metal, substituí-lo por outra matéria-prima é muito difícil, pois implicaria em aumento de custo de produção e/ou diminuição do desempenho do produto para as indústrias. Grande parte das jazidas de tungstênio é encontrada em depósitos de veios de quartzo e em granitoides (CANO, 2014).

O tungstênio é um elemento químico metálico de transição do grupo 6B da tabela periódica, sendo considerado um entre os elementos mais raros da crosta terrestre. Atualmente são conhecidos aproximadamente 20 minerais contendo tungstênio (CANO, 2014).

O metal tungstênio ocorre principalmente na forma de tungstatos: wolframita, scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ), ferberita ( $\text{FeWO}_4$ ) e hubnerita ( $\text{MnWO}_4$ ), com teores de  $\text{WO}_3$  da ordem de 75-80% em massa, a Scheelita e a wolframita são hoje a principal fonte do tungstênio produzido no mundo. As reservas mundiais totalizam cerca de 3 milhões de toneladas, sendo mais de 60% localizadas na China (VALVERDE JÚNIOR et al., 2008).

Os Tungstatos naturais são submetidos à fusão com carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a alta temperatura, resultando em tungstato de sódio ( $\text{Na}_2\text{WO}_4$ ), solúvel em água. O tungstênio metálico é obtido por meio da redução de  $\text{WO}_3$  sob fluxo de gás redutor ( $\text{H}_2$ ) ou em presença de carbono a alta temperatura. O metal pode ser obtido na forma de pó, filamentos ou barras maciças (VALVERDE JÚNIOR et al., 2008).

Os principais depósitos de minério de tungstênio mundiais estão localizados na Austrália, Argentina, Áustria, Bolívia, Brasil, Burma, Canadá, Cazaquistão, China, Coreia do Norte, Coreia do Sul, França, Espanha, Estados Unidos, Índia, Japão, Malásia, México, Mongólia, Nova Zelândia, Peru, Portugal, República Tcheca, Ruanda, Rússia, Suécia, Tailândia, Turquia, Uganda, Vietnã do Norte, Zaire e outros (CANO, 2014).

As jazidas de tungstênio no Brasil aparecem nos depósitos de scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ) que são formados em *skarns* situados no Nordeste, como também, em jazidas de veios de quartzo e depósitos secundários (aluvionares e eluvionares), localizados no Sul e ao Norte do país, onde a wolframita ( $\text{Fe,Mn}\text{WO}_4$ ) é encontrada associada à cassiterita (CANO, 2014).

No Brasil os principais depósitos estratiformes de minério de scheelita são encontrados exatamente na Província Scheelitífera do Seridó, localizada na região Seridó, que contempla os estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba, no nordeste brasileiro. Esta Província é considerada por Cano (2014) como a maior concentração de minério de tungstênio do país, possuindo a maior reserva nacional.

No semiárido brasileiro o tungstênio abrange os Estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba, especificamente localizada na Província Scheelitífera do Seridó, onde ocorre as principais mineralizações de scheelita ( $\text{CaWO}_3$ ), constituindo-se a maior concentração de tungstênio do país (DANTAS, 2000).

O tungstênio é o único metal da 3ª linha de transição da Tabela Periódica com função biológica comprovada (VALVERDE JÚNIOR et al., 2008). Esse metal pode aparecer em algumas bactérias e em enzimas chamadas oxirredutases, desempenhando papel similar ao molibdênio nas oxirredutases existentes no organismo humano.

Apresenta estados de oxidação variando de +2 a +6, sendo o mais comum e o mais estável o +6. O tungstênio solúvel está principalmente na forma de tungstato: o mais simples deles é  $\text{WO}_4^{2-}$ , análogo ao cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) e ao molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ). À medida que o pH diminui, o íon tungstato simples se transforma em várias espécies polimerizadas. Por isso, a química do tungstênio solúvel em meio aquoso é bastante complexa. Dentre os chamados politungstatos, destaca-se o ânion  $\text{W}_{12}\text{O}_{41}^{10-}$ , chamado paratungstato (dodecatungstato), cujos sais de sódio e de amônio são comercialmente disponíveis (VALVERDE JÚNIOR et al., 2008).

### **2.2.1 Aplicações do Tungstênio**

No ano de 1868 o tungstênio foi utilizado comercialmente como aditivo para endurecer o aço. Logo após, no início do século XX, houve uma grande diversificação das aplicações industriais (VALVERDE JÚNIOR et al., 2008). Do tungstênio os principais produtos utilizados são: carboneto de tungstênio, aços especiais e ligas não ferrosas, tungstênio metálico, compostos químicos e componentes para aplicações não metalúrgicas (CANO, 2014).

Atualmente, o tungstênio tem sido usado na fabricação de ligas metálicas, como exemplo: o ferrotungstênio que apresenta cerca de 80% em massa de W, com destaque para aços de alta velocidade, usados na fabricação de instrumentos de corte por serem resistentes à abrasão), e na preparação de carbeto ( $\text{W}_2\text{C}$ , WC), os quais devido à elevada dureza, revestem brocas de perfuração, as quais são bastante usadas nas indústrias de mineração, petróleo e

construção civil, bem como na fabricação de ferramentas de corte de alto desempenho (SANTANDREA et al., 2015).

O metal tungstênio também foi muito importante na área militar no período da Segunda Guerra Mundial, cuja principal participação consistiu na fabricação de mísseis, granadas, canhões e projéteis. Além disso, pode ser utilizado na fabricação de joias hipoalergênicas resistentes a riscos e arranhões e com brilho permanente (sua densidade é comparável à do ouro), de juntas e conexões para materiais de vidro pyrex (borossilicato) (face à similaridade de seus coeficientes de expansão térmica) e de instrumentos analíticos, como por exemplo: absorção atômica e espectrômetro de massas (VALVERDE JÚNIOR et al., 2008).

Por fim, destaca-se ainda que uns dos objetos mais importantes do nosso cotidiano são fabricados a partir do tungstênio: o filamento das lâmpadas fluorescentes e a esfera caneta esferográfica. Por estas razões deve-se considerar a grande importância do tungstênio para a manutenção e desenvolvimento das diversas tecnologias atuais de nossa sociedade, e das futuras gerações.

### 2.3.2 Produção mundial do tungstênio

A produção de tungstênio em 2014 (concentrados de Scheelita e Wolframita) somou 857 toneladas (equivalente a 510 t de W contido), e aumentou apenas 1,7% em relação ao concentrado produzido em 2013. De acordo com Cano (2014) foram produzidas 711 toneladas de concentrado de scheelita (399 toneladas de W contido), com teores variando entre 67% a 72% de  $WO_3$ , e 146 toneladas de concentrado de Wolframita (111 toneladas de W contido, com teor de 96,2% de  $WO_3$ ).

A China é a região onde se concentra a maior parte do minério de tungstênio no do mundo. É considerada a maior produtora, exportadora e consumidora de tungstênio. Está liderando o mercado e os preços por todo o mundo. Por isso, a China mantém a liderança nesse mercado e domina a formação dos preços praticados. Ciente disso, o Governo local tem limitado a oferta mundial do insumo para aumentar o valor agregado do produto vendido (CANO, 2014).

Tabela 1 - Reservas e produções mundiais de tungstênio.

PAÍS	RESERVAS		PRODUÇÃO <sup>1</sup> (t)	
	1, 2 (t)			
	2014	2013 <sup>r</sup>	2014 <sup>p</sup>	%
<b>BRASIL</b>	27.825	494	510	0,6
<b>CHINA</b>	1.900.000	68.000	68.000	82,5
<b>CANADÁ</b>	290.000	2.130	2.200	2,7

<b>RÚSSIA</b>	250.000	3.600	3.600	4,4
<b>AUSTRÁLIA</b>	160.000	320	600	0,7
<b>EUA</b>	140.000	Nd	Nd	Nd
<b>VIETNÃ</b>	87.000	1.660	2.000	2,4
<b>BOLÍVIA</b>	53.000	1.250	1.300	1,6
<b>ÁUSTRIA</b>	40.000	850	850	1,0
<b>PORTUGAL</b>	4.200	692	700	0,8
<b>OUTROS PAÍSES</b>	332.175	796	1.190	1,4
<b>TOTAL</b>	3.254.200	79.792	80.950	98,1

Fonte: Adaptado de Cano (2014).

### 2.3.3 Produção brasileira de tungstênio

A indústria do tungstênio compreende um conjunto de atividades interligadas e representadas pela produção de concentrado, produtos intermediários (metalurgia) e produtos finais, bem como, pela extração do minério (scheelita), fragmentação, peneiramento e concentração. Inicialmente, o minério é fragmentado, depois é britado, rebritado e moído. Posteriormente, é feito o peneiramento dos produtos segundo os tamanhos e, em seguida, a concentração mecânica, a partir de um sistema de gravidade (CANO, 2014).

A segunda atividade é fabricação dos produtos intermediários, uma vez que a metalurgia do tungstênio não é feita diretamente do minério, havendo necessidade de sua decomposição, e também passar por uma série de transformações antes do consumo final. Como produtos intermediários têm-se: tungstênio metálico em pó, carboneto de tungstênio em pó, ferro-tungstênio metálico em pó, carboneto de tungstênio em pó, ferro tungstênio, paratungstato de amônia (APT), óxido, ácido tungstico e tungstato de sódio (CANO, 2014).

Por fim, a terceira etapa compreende os produtos finais que foram oriundos dos intermediários. Estes sofreram um processo de purificação, tornando-se: carboneto de tungstênio sinterizado, denominado metal duro; tungstênio metálico; aços especiais e ligas não ferrosas; além dos resíduos e sucatas que também devem ser considerados.

### **2.3.4 Consumo interno de tungstênio**

Em valores adicionados a preços básicos o produto do setor mineral atingiu em 2014 R\$ 188.756,2 milhões (US\$ 80,2 bilhões), correspondendo a 4,0% do PIB (IBRAM, 2015).

O mercado brasileiro no ano de 2014 absorveu 35% dos concentrados de Scheelita e Wolframita produzidos pelo país. O estado de São Paulo foi o principal destino do insumo, cuja finalidade era a indústria metalúrgica dos não ferrosos designados às fundições e produção de ferro-ligas (CANO, 2014).

De acordo com dados publicados no Sumário Mineral do ano de 2014 não houve importação de minérios de tungstênio e de concentrados. Entretanto, a importação de produtos semimanufaturados de tungstênio aumentou 67% em relação ao ano de 2013. Tais produtos foram expedidos da China (34%), Vietnã (29%), Suécia (16%), Austrália (12%) e Alemanha (4%). Salienta-se que o total gasto pelo Brasil com as importações foi de US\$ 8,7 milhões no ano de 2014.

O Brasil em 2014 obteve um crescimento de 9% nas exportações de tungstênio e concentrados. Foram vendidas cerca de 770 toneladas de tungstênio, dos quais 439 eram de W contido, e calculou-se um faturamento de US\$ 12,8 milhões (CANO, 2015). Os destinos do minério de tungstênio e seus concentrados, com seus respectivos valores foram os seguintes: China 47%, Países Baixos 19%, Hong Kong 17%, EUA 12% e Vietnã 4%.

Os produtos semimanufaturados tiveram uma redução nas exportações em cerca de 84% em relação a 2013, e o faturamento de aproximadamente US\$ 938 mil. Os Países Baixos compraram 57% dos produtos semimanufaturados de tungstênio, a Bélgica ficou com 23%, a Espanha com 9%, os EUA com 5% e a Índia 3%.

### **2.3.6 Depósitos brasileiros de tungstênio**

Os principais depósitos estratiformes de minério de Scheelita estão localizados na Província Scheelitífera do Seridó do estado do Rio Grande do Norte e da Paraíba, no nordeste Brasileiro. Esta Província constitui a maior concentração de minério de tungstênio do País, detendo a maior concentração de minério de tungstênio do País com a maior reserva nacional. O tungstênio é comercializado sob três formas: concentrado, produtos intermediários (semielaborados) e finais (elaborados). Os principais produtos usados são: carboneto de tungstênio; aços especiais e ligas não ferrosas; tungstênio metálico; compostos químicos e

componentes para aplicações não metalúrgicas (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO NACIONAL, 2016).

O Brasil foi o primeiro da América do Sul a produzir e exportar concentrados de tungstênio em quantidades consideráveis. Dessa produção destaca-se a região do Rio Grande do Sul, na qual em 1903 iniciou-se a exploração de veios com a volframita. Em 1940, foram encontradas novas jazidas no sul do Brasil, especialmente no município de Jundiá (SP) e Nova Trento (SC). Porém, foi com o descobrimento das jazidas scheelitíferas no Nordeste brasileiro, em 1942, que o país manteve a produção, haja vista que entre 1942 e 1982 cerca de 95% da produção nacional originou-se dessa região (WILLIGI, 1986).

No final da década de 1970 foram encontradas novos jazimentos de Wolframita, agora na região Porto-Velho-Rondônia e no Pará, porém, ainda estão situadas no Nordeste cerca de 98% das reservas medidas brasileiras de tungstênio contido aceitas pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – (DNPM) (WILLIGI, 1986).

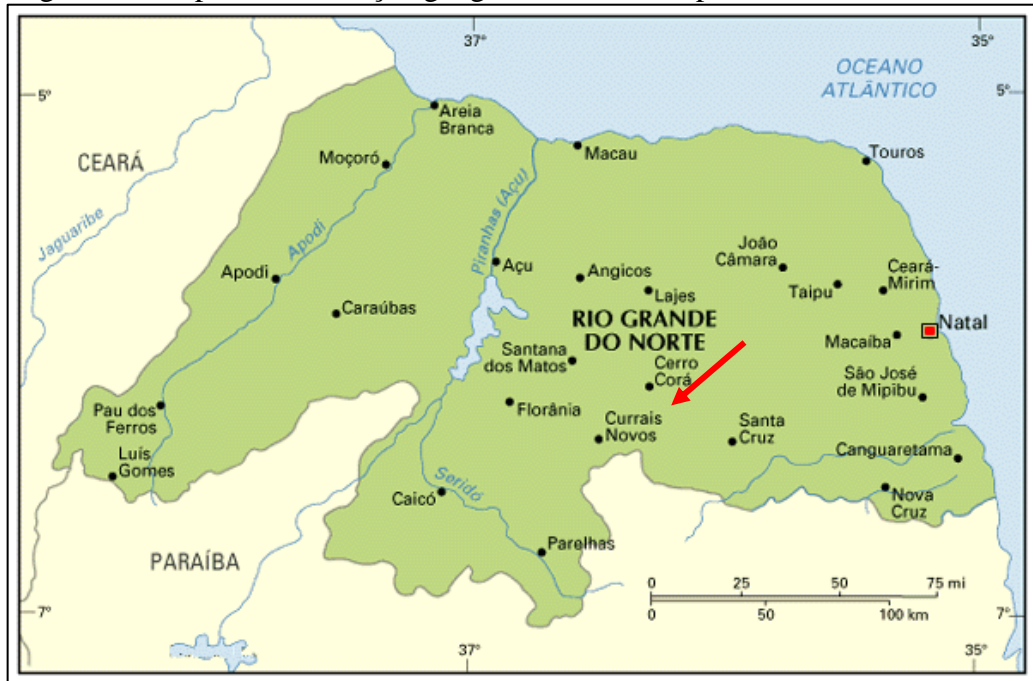
Praticamente em todos os estados no Nordeste são conhecidas ocorrências e/ou indícios de minerais de tungstênio, mas as mais importantes são as localizadas na Paraíba e no Rio Grande do Norte, em uma área com cerca de 20.000Km<sup>2</sup>, que é conhecida como Província Scheelitífera do Nordeste, Província Tungstenífera do Nordeste ou Província Scheelitífera do Seridó (WILLIGI, 1986).

De acordo com o referido autor, nessa Província Tungstenífera ou Scheelitífera do Nordeste, a Scheelita encontra-se, em sua maioria nas rochas calcissilicáticas (chamadas na região de tactitos e/ou escarnitos) associadas a níveis de calcário metamórfico, mas existem também indícios de Scheelita contida em anfibolitos, xistos, veios de quartzo, brechas de falha, diques de pegmatitos etc.

As minas Brejuí, Barra Verde, Boca de Lage e Zangarelhas, correspondem a um único depósito de Scheelita, localizado entre as cidades de Currais Novos e Acari – RN. Tal depósito corresponde a 91% das reservas de toda a província, com reservas totais avaliadas em  $11 \times 10^6$  t, e teor médio de 0,5% WO<sub>3</sub>, das quais aproximadamente  $5,5 \times 10^6$  toneladas (WILLIGI, 1986).

Essas áreas estão localizadas a 9 Km a SW da cidade de Currais Novos-RN, como verifica-se na figura 1, utilizando-se como via de acesso a BR-427, no sentido de Acari. Elas compõem o único depósito mineral, com as mesmas características geológicas e as separações correspondem a limites de propriedades superficiais, que foram requeridas por diferentes grupos ao DNPM.

Figura 1 – Mapa de localização geográfica do município de Currais Novos-RN.



Fonte: Google imagens (2017).

Conforme Willigi (1986), ao longo da faixa principal de mineralização, três minas estão em operação (Brejuí, Barra Verde e Boca de Lage) e uma quarta está em desenvolvimento, se (1986). Fora de tal faixa, e continuando NW da estrutura existe ainda uma pequena mina, denominada de Saco dos Veados, e garimpos desativados (Riacho Fechado e Quixabeira).

A produção de Scheelita na região Seridó teve início em princípios de 1942, com o descobrimento da mina Brejuí em terras do desembargador Tomaz Salustino. A Barra Verde, contígua a Brejuí, foi descoberta logo depois, tendo sido explorada por garimpagem de 1943 a 1954. Apenas no ano de 1955 foi instalada na região a lavra subterrânea sistemática (WILLIGI, 1986).

As reservas oficiais na Província Scheelitífera do Seridó totalizam 4.622.394t de minério com o teor médio de 0,47%  $WO_3$ , dos quais 4.248.578t estão situados no depósito Brejuí/Barra Verde/ Boca de Lage (91% da reserva total). Destaca-se uma jazida em especial, que se localiza no município de Bodó, onde já foram dimensionadas cerca de 250.000t de minério com teor de 0,5%  $WO_3$  e com uma grande potencialidade de exploração.

Destaca-se que a maior reserva de Scheelita do país encontra-se localizada no estado do Rio Grande do Norte, principalmente, nas minas Currais Novos, Bodó, Lajes e Santana do Matos. O Brasil apresenta uma reserva de aproximadamente 9.435 toneladas de tungstênio (IBRAM, 2015).



## 2.3 SCHEELITA

A Scheelita constitui uma importante fonte de Tungstênio (W), um mineral metálico não ferroso que possui elevada densidade e ponto de fusão. O mineral Scheelita é classificado como um tungstato de cálcio, cuja composição é  $\text{CaWO}_4$  (CaO 19,4 % e  $\text{WO}_3$  80,6 %), em que geralmente o molibdênio está presente substituindo o tungstênio. A denominação Scheelita surgiu a partir de uma homenagem feita ao a pessoa que descobriu o tungstênio, chamado por Karl Wilhelm Scheele (DANA, 1974).

Esse mineral é caracterizado pelas cores branca, amarela, verde ou castanha, brilho vítreo a adamantino, clivagem imperfeita e dureza intermediária. O estado físico deste metal em temperatura ambiente é o sólido. Possui o mais elevado ponto de fusão entre todos os metais da ordem de  $3.419^\circ\text{C}$ , seu peso específico é  $19,3 \text{ g/cm}^3$ , o e ponto de ebulição é  $5.927^\circ\text{C}$ . Suas principais características são: elevada dureza, resistência ao desgaste e a corrosão, bom condutor de calor e eletricidade (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2016).

### 2.2.1 Reservas brasileiras da Scheelita

No Brasil, os principais depósitos de Scheelita localizam-se na região de Seridó, entre os estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba. As reservas representam cerca de 1% do total mundial e o país responde por 0,3% da produção mundial do elemento, cerca de 61 mil toneladas em 2010. A China tanto é a maior produtora mundial (85%) como é considerada o país que mais utiliza o tungstênio no mundo (VALVERDE JÚNIOR et al., 2008).

Em torno de 15% das reservas brasileiras, tanto a medida quanto a indicada, de minério de tungstênio contido são derivadas dos depósitos da Província Scheelitífera do Seridó, principalmente no Rio Grande do Norte, nos municípios de Acari, Currais Novos, Bodó e Lages. Na mina Bodó estão concentradas 61% destas reservas, correspondendo em torno de 2.718 toneladas de  $\text{WO}_3$  contido. Já nas minas Brejuí, Barra Verde, Boca de Lage e Zangarelhas há apenas um único depósito mineral, cujo valor é 39% restantes equivalentes a 1.738 toneladas de  $\text{WO}_3$  contido, e a mina Brejuí representa a maior parte (CANO, 2014).

Foi constatado ainda que as reservas medidas e indicadas aprovadas pelo DNPM em 2007, totalizaram 29.756 t de  $\text{WO}_3$ , contido (17.125 toneladas de  $\text{WO}_3$  contido) apresentando teores variáveis entre 0,23% a 2,42% de  $\text{WO}_3$  no minério de scheelita entre 0,022% a 1,89% de  $\text{WO}_3$  no minério de Wolframita. A comparação entre os anos de 1995 a 2007 apresenta

acréscimo elevado de 228% do total destas reservas, que passaram de 9.078 toneladas de  $WO_3$  contido em 1995 para 29.756 de  $WO_3$  contido em 2007 (CANO, 2014).

Além dessas reservas deve-se considerar ainda as reservas remanescentes das operações de lavra e de beneficiamento do minério de Scheelita, denominada de rejeito ou tailings, que pode ser observado Brejuí, Barra Verde, Boca de Lage e Bodó (CANO, 2014).

A Mina Brejuí possui reserva de rejeito grosso avaliada em 2000 t de  $WO_3$  contido, com teor 0,05% de  $WO_3$ , e as de rejeito fino em 1.804 toneladas de  $WO_3$  contido, apresentando teores médios de 0,19% de  $WO_3$ . Já as minas Barra Verde e Boca de Lages possuem reserva de rejeito fino avaliadas em, 5.000 t de  $WO_3$  contido, com teor médio de 0,10% de  $WO_3$ . E a mina Bodó com 1.082 t de  $WO_3$  contido, e teor médio de 0,50% de  $WO_3$  (CANO, 2014).

É importante enfatizar que no ano 2014 as reservas lavráveis de scheelita, localizadas no Estado do Rio Grande do Norte, totalizaram 24,3 mil toneladas de W contido, com teores de  $WO_3$  variáveis entre 0,04% e 2,4% (CANO, 2014).

## 2.4 TRATAMENTO DE MINÉRIOS

O tratamento mineral é definido como o conjunto de procedimentos aplicados aos bens minerais com objetivo de alterar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes, ou a sua forma, porém sem modificar as propriedades químicas e físicas dos minerais (LUZ et al., 2004).

O mineral é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas encontrado na crosta terrestre. Já o minério é toda rocha composta de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais de valor, possíveis de serem aproveitados de forma econômica. E por fim, tudo que não pode ser aproveitado economicamente de um minério chama-se de ganga ou rejeito. (LUZ et al., 2004).

A indústria mineral precisa obter o minério de forma concentrada, para tanto é necessário que os minerais sejam fisicamente separados. Assim, os minérios precisam passar por processos de concentração cujo objetivo é a separação seletiva baseada nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério (LUZ et al., 2004).

O desenvolvimento industrial, bem como, o tecnológico da era moderna é totalmente dependente dos metais, tendo em vista serem os pilares essenciais de diversos segmentos produtivos: indústrias automotivas, máquinas de bens de capital, e outros (CAMPOS FILHO, 1981).

Para se extrair um metal são necessárias duas fases fundamentais: o beneficiamento do minério bruto e a redução ou quebra do composto que contém o metal desejado. Essa etapa pode ser completada pelo refino do metal extraído, ou seja, retirada de suas impurezas com objetivo de deixá-lo puro. De acordo com a natureza físico-química do metal desejado, esse processo de refino pode ser classificado em 4 (quatro) tipos: hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos, eletrometalúrgicos e siderúrgicos (CAMPOS FILHO, 1981).

## 2.5 MINA BREJUÍ

A área objeto de estudo é representada pela Mina Brejuí, a qual está inserida na cidade de Currais Novos, e está localizada à aproximadamente 172 Km da cidade de Natal, e possuindo extensão da ordem de 864,34 Km<sup>2</sup>. O município de Currais Novos apresenta as seguintes características ambientais: precipitação pluviométrica anual normal é 446,8mm, o período chuvoso segue de fevereiro a abril, e a temperatura média anual é de aproximadamente 27,5°C (IDEMA, 2008).

O clima da região é marcado por muito quente e semiárido, e a umidade relativa média anual é de 64%. Em currais novos pode-se encontrar vegetação da Caatinga hiperxerófila, bem como, da Caatinga subdesértica do Seridó (IDEMA, 2008). Em relação à pedologia, destacam-se os solos Litólicos Eutróficos, o qual apresenta fertilidade natural alta, textura argilo/arenosa, argilosa ou arenosa. Em relação ao relevo, a área do município está situada no Planalto da Borborema, que são terrenos antigos formados pelas rochas Pré-Cambrianas como o granito, que se estende pelo Estado, onde estão as serras e picos mais altos.

Tratando-se da Geologia e Geomorfologia, o município está inserido no Embasamento Cristalino, compreendendo rochas do Grupo Caicó de Idade do Pré-Cambriano Inferior, 1.000 a 2.500 milhões de anos, com migmatitos variados, gnaisses, anfibolitos, granitos e rochas do grupo Seridó de Idade Pré-Cambriana Inferior a Médio entre 570-1000 milhões de anos, com micaxistos aluminosos a feldspáticos, com ocorrência e percentagem variável de granada cordierita, estaurolita, silimanita andaluzita e raramente cianita (IDEMA, 2008).

Destacam-se ainda por apresentar migmatização em alguns setores, presença de mármore, cálcio-silicáticas, quartizitos, metaconglomerados polimictos e ortoanfíbólicos (metavulcânicas básicas de afinidade toleitica). Em relação a geomorfologia regional predominam formas tabulares de relevos, de topo plano, com diferentes ordens de grandeza e de aprofundamento de drenagem, separados geralmente por vales de fundo plano (IDEMA, 2008).

Os principais minerais ocorrentes na área do município são: berílio, que é um mineral silicatado que aparece nas formas de água-marinha e de esmeralda. Tem-se ainda calcário representante das rochas carbonáticas, sendo esta uma importante matéria-prima na indústria da construção civil. Também se destacam o enxofre, nióbio, tântalo, fluorita, moscovita, quartzo, feldspato, urânio, ouro e o principal com maior destaque o tungstênio (IDEMA, 2008).

O município encontra-se inserido na Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Açu, e tem como rios principais o Currais Novos e o Picuí.

No ano de 1943, época da Segunda Guerra Mundial, foi descoberto nas terras de propriedade do Desembargador Tomaz Salustino, um minério de grande importância bélica, denominado por Scheelita. A exploração desse bem mineral iniciou-se no mesmo ano que foi descoberto por um funcionário da propriedade Brejuí. Então, este mostrou ao proprietário do imóvel, o Sr. desembargador Tomaz Salustino Gomes de Melo, cristais de Scheelita, a qual foi imediatamente direcionada para análise em laboratórios especializados. Assim, foi verificado que a Scheelita apresentava um elevado teor, e que poderia ser explorada comercialmente (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO, 2015).

Somente em 1954, a Mina Brejuí foi constituída empresa com o nome de Mineração Tomaz Salustino S/A, tendo como concessionário o Desembargador Tomaz Salustino Gomes de Melo. A mineração em Currais Novos teve o seu apogeu em plena Segunda Guerra Mundial, fornecendo toneladas de minérios às indústrias do aço, especialmente aos Estados Unidos da América. Durante o período da Guerra o país necessitava de minério de tungstênio para suprir as suas necessidades bélicas. Nessa época haviam, aproximadamente 3 (três) mil homens trabalhando em regime de garimpeiros (FERNANDES, 2011).

Ao final da guerra o país voltou a se abastecer apenas dos antigos fornecedores, e com isso reduzindo consideravelmente a compra de Scheelita do Brasil. Posteriormente, no período de considerável retorno econômico o desembargador substituiu o trabalho humano por máquinas, havendo assim a mecanização da mineração, e uma melhora das condições de exploração mineral.

Nesse período novas minerações também apareceram, como a Barra Verde, a Bodó, a Acauã. Entretanto, estas não se preocuparam em mecanizar a exploração e acabaram sendo fechadas em função de crise. A mina Brejuí foi a única que conseguiu se estabilizar por um período de mais de 40 anos (FERNANDES, 2011).

Contudo, a partir dos anos 80 iniciou-se o declínio da mineração em consequência da oscilação dos preços internacionais da Scheelita e da utilização de outros minérios para a fabricação de artefatos industriais e tecnológicos, levando a Mina Brejuí a reduzir suas

atividades de extração mineral e busca por novas alternativas econômicas. Além disso, a falta de competitividade em relação ao mercado chinês, que com uma maior oferta no mercado internacional fechou o mercado de exportação. Apenas em 1990 as Minas Barra Verde e Boca de Laje paralisaram suas atividades, e a mina Brejuí reduziu bastante sua produção.

A Mina Brejuí é o local onde a Mineração Tomaz Salustino S.A. iniciou e dedicou toda a sua história à extração, beneficiamento e comercialização de Scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ). A empresa, que havia paralisado suas atividades minerais em 1997, retomou as atividades em 2005 e já é líder na produção regional. Isso também ocorreu em razão do preço do concentrado de minério de tungstênio no mercado internacional, pois o maior concorrente, a China, em tempo de crescimento financeiro, também se tornou um grande consumidor de produtos de tungstênio, e passou a controlar o mercado internacional de tungstênio (FERNANDES, 2011).

Desde a década de 1940 são realizadas explorações do minério de Scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ), incluindo sua extração, beneficiamento e comercialização. Dentre as principais temos as minas Brejuí, Barra Verde, Boca de Laje e Currais Novos. A cidade se desenvolveu com a extração deste mineral até o momento da queda dos preços internacionais do concentrado, provocou o fechamento progressivo das minas, iniciando por Saco dos Veados e em seguida a mina Barra Verde, passando para a Boca de Laje, e por fim já em 1997 a mina Brejuí.

Com a exploração das minas em Currais Novos, e o processamento mecânico do minério Scheelita foram sendo geradas elevadas quantidades de rejeito e estéril, os quais estão sendo acumulados em pilhas a céu aberto, sem nenhuma proteção, e suscetíveis aos processos de intemperismo (NASCIMENTO, 2015).

Além de Tungstênio e Scheelita, a mina tem potencial para explorar outras substâncias, tais como o Molibdênio e o Calcário. Há um registro oficial, segundo IBRAM (2010), de que existam 58 milhões de toneladas de calcário somente na parcela da Brejuí 1, e nos outros setores da mina existem estimativas não confirmadas de 100 milhões de toneladas

A Scheelita explorada na mina possui diversas finalidades industriais, assim como, para nossa sociedade em geral. No quadro abaixo encontra-se descritas alguns dos principais consumidores desse mineral.

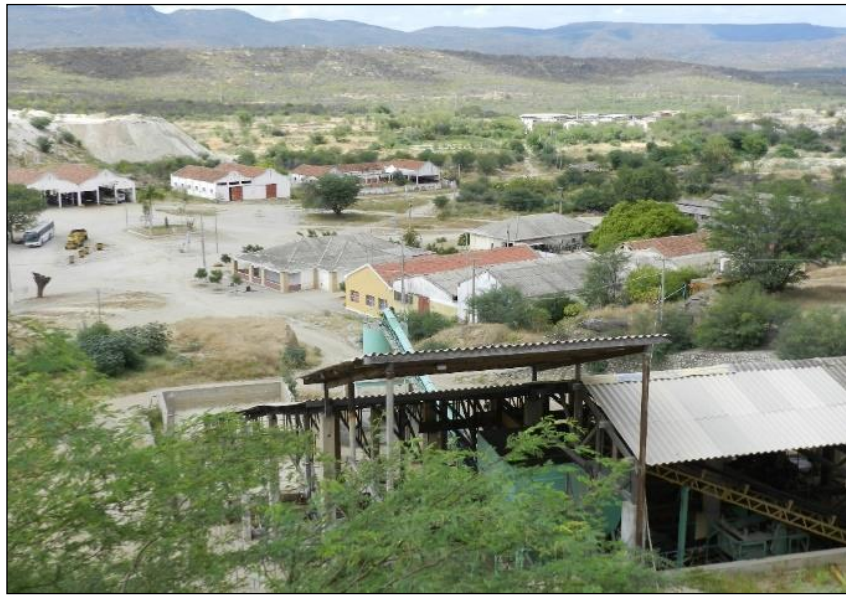
Quadro 1 – Classificação das indústrias consumidoras de Scheelita e suas respectivas aplicações.

INDÚSTRIAS	APLICAÇÃO
METALÚRGICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ligas metálicas</li> </ul>
ELÉTRICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filamentos de lâmpadas, contatos elétricos para fornos de altas temperaturas e equipamentos de raio-X;</li> </ul>
MECÂNICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produção de brocas, ferramentas de cortes e perfurações</li> </ul>
CANETA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pontas de canetas esferográficas</li> </ul>
AEROESPACIAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motores de foguetes, turbinas de aviões e revestimento de mísseis</li> </ul>
BÉLICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projéteis, canhões e metralhadoras</li> </ul>
PETROLÍFERA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramenta de perfuração de rocha</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Mineração Tomaz Salustino (2015).

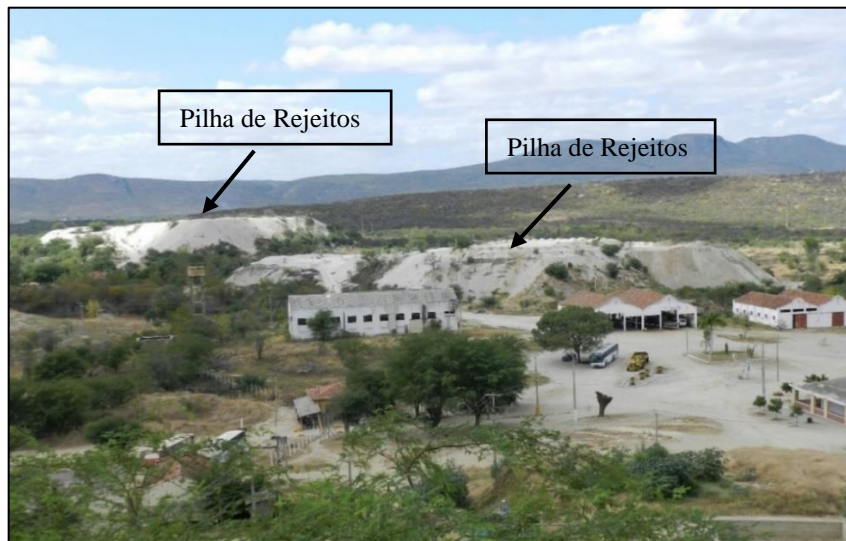
A empresa Mineração Tomaz Salustino possui um importante papel econômico, para a cidade de Currais Novos, como também para o estado do Rio Grande do Norte e Brasil. Vale destacar que a Mina Brejuí ainda apresenta, até os dias atuais, um importante potencial de exploração do tungstênio a partir da Scheelita, e também de calcário. Pois este encontra-se associado a Scheelita, com aproximadamente 88 milhões de toneladas e um teor médio de CaO 50,75%.

Fotografia 1 – Vista panorâmica da área da Mina Brejuí.



Fonte: Autoria própria (2016).

Fotografia 2 – Vista panorâmica da Mineração Tomaz Salustino, com detalhe para pilhas de rejeitos existentes na propriedade.



Fonte: Autoria própria (2016).

Nas fotografias 1 e 2 acima, pode-se observar uma vista panorâmica de uma parcela da área de circulação de caminhões da Mina Brejuí, e de duas pilhas de rejeitos grossos existentes no entorno da área de exploração e beneficiamento da empresa.

#### 2.4.1 Planta de beneficiamento de Scheelita

A Scheelita após passar pela etapa de extração segue para a planta de beneficiamento (figura 4 e 5), onde ocorrerá o seu tratamento para obtenção do tungstênio, que é produto final comercializável. Nessa fase de beneficiamento seguem-se os processos gravíticos, empregando principalmente o jigue e a mesa vibratória, onde o rejeito do jigue alimenta as mesas vibratórias gerando um concentrado final (LEITE et al., 2007).

Fotografia 3 – Vista frontal da planta de beneficiamento da Mina Brejuí.



Fonte: Autoria própria (2016).



Fotografia 4 – Área de beneficiamento com detalhe para as mesas vibratórias (concentradoras) da Mina Brejuí.



Fonte: Autoria própria (2016).

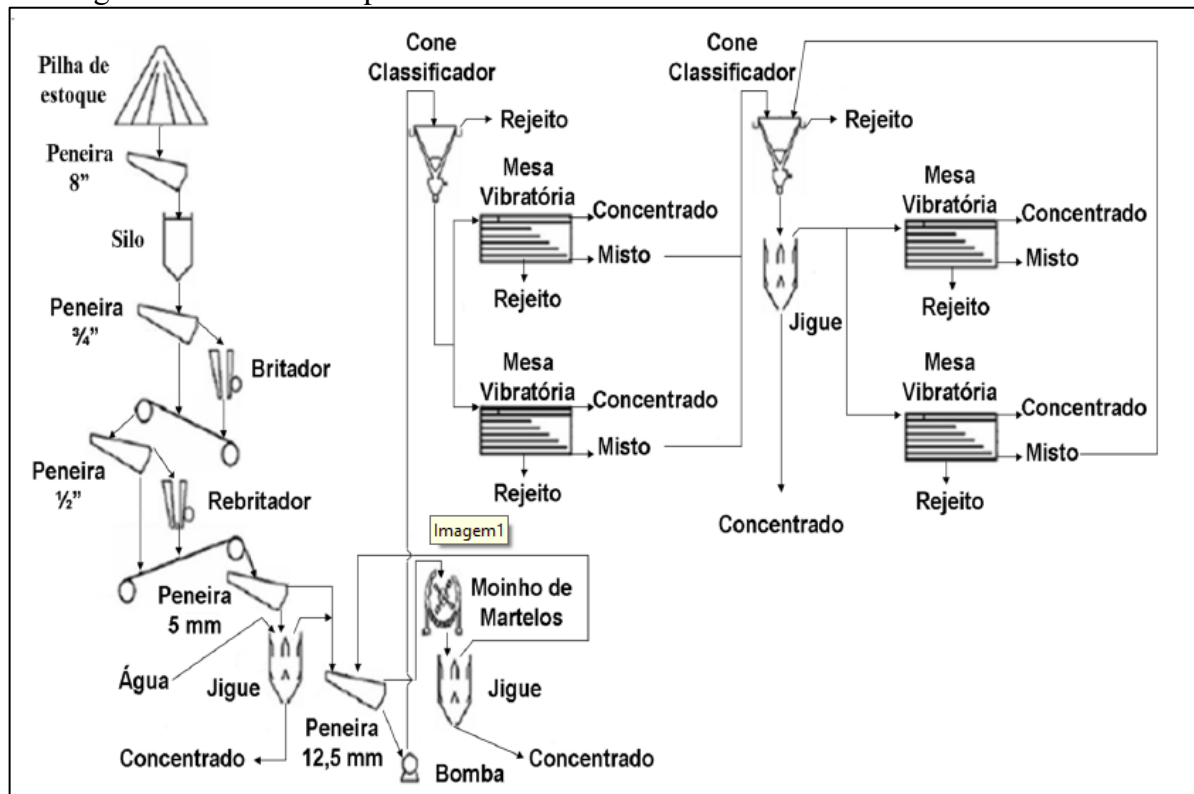
É no município de Currais Novos que se concentra a maior produção de Scheelita do Rio Grande do Norte. Até a década de 80 se caracterizou pelo beneficiamento em plantas como a da mineração Acauã apresentada pelo fluxograma nº 1.

A Scheelita explorada é considerada um mineral friável, e a falta de controle nas fases de britagem e moagem, ou seja, de cominuição do minério ocorre a produção de uma elevada quantidade de finos, prejudicando o processo de concentração gravítica. E, as etapas posteriores, jígues e mesas concentradoras (figura 9), não são consideradas eficientes na realização de tratamento dos finos, assim, estes terminam compondo o rejeito final (FERNANDES, 2011).

Tal fato já havia sido observado por Leite; Araújo e Santos (2007), os quais avaliaram as plantas de beneficiamento das minerações Brejuí, Bodó e Barra Verde. Com isso, os autores verificaram que os parâmetros operacionais dos equipamentos utilizados na área industrial dessas Minas não são otimizados ou pouco eficientes, de forma que há uma grande quantidade de Scheelita desperdiçada, e sendo direcionada para as pilhas de rejeitos.

O fluxograma abaixo representa o processo de beneficiamento de uma mineração localizada no município de Currais Novos do estado do Rio Grande do Norte.

Fluxograma 1 – Planta simplificada de beneficiamento de Scheelita.



Fonte: Leite (2007).

Inicialmente, antes do minério chegar na planta de beneficiamento é feita a etapa de extração no subsolo. Essa etapa acontece por meio de lavra subterrânea, na qual é utilizado o método de câmaras e pilares, com a posterior escavação e remoção do material até a superfície (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO, 2015).

Depois do processo de extração, o material bruto “Run of Mine ou ROM”) é transportado até a superfície, onde aguardará para ser direcionado por um caminhão basculante até a planta de beneficiamento para iniciar as etapas de britagem e moagem, seguidos da concentração gravimétrica (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO, 2015).

Inicialmente o minério segue para etapa de classificação granulométrica, na qual é utilizada uma peneira com dimensão de 20 x 25”. Depois o material bruto continua para fragmentação (britagem e moagem) e concentração gravimétrica (jigues e mesas vibratórias). O minério extraído de tamanho abaixo de 1” irá, por paleamento, alimentar um moinho de martelos de grelha de 30 x 50 cm acionado por um motor elétrico. O moinho de martelos, com abertura de grelha 2 mm, trabalhará a úmido e o seu produto alimentará um jiguge de 12” x 18”. Com isto, obteremos o 1º concentrado de Scheelita, grosseiro e geralmente de alto teor, em torno de 75% WO<sub>3</sub> (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO, 2015).

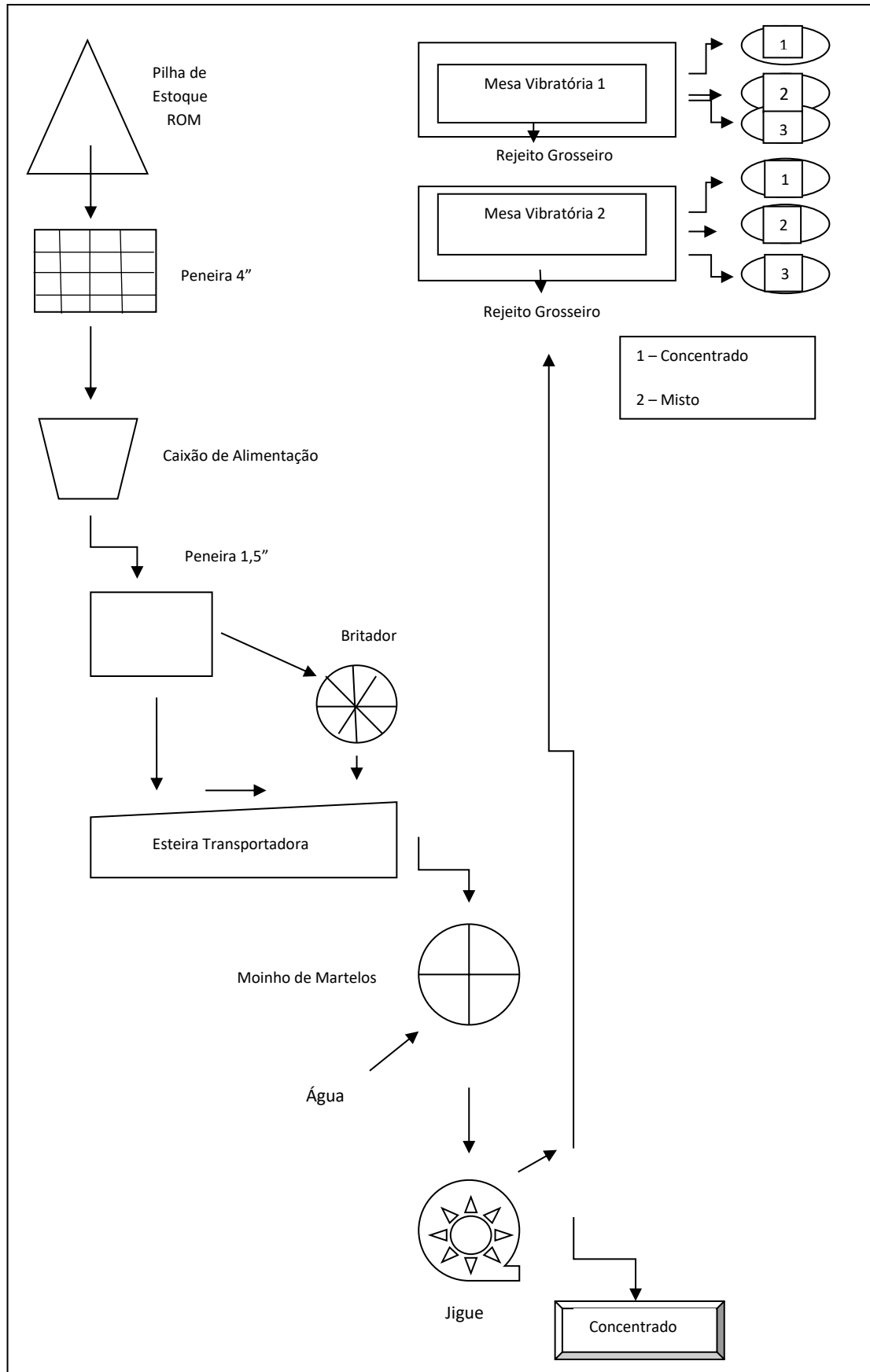
O rejeito do jigue irá alimentar as mesas concentradoras, de onde se obtém a Scheelita de granulometria fina. Após obter estes dois tipos de concentrados, eles serão levados a um forno rotativo de ustulação para queimá-los na faixa de 600°C. A fração da pirita fina aí existente é eliminada e a fração de partículas de tamanhos maiores torna-se magnética. Por fim, os concentrados são levados a um separador eletromagnético (eletroímã), de onde se obtém o concentrado final, com eliminação do ferro e pirita magnetizada.

É importante destacar que as mesas concentradoras operam com recuperação da ordem de 60%, podendo atingir níveis de até 85%. Porém, a baixa recuperação é decorrente de ajustes inadequados de determinadas variáveis, que são: amplitude, frequência e inclinação do tablado, parâmetros esses associados à granulometria da alimentação (LEITE et. al., 2007).

Com este processo pretende-se obter os concentrados com teor na faixa de 70% a 75%  $WO_3$ , como também uma recuperação na usina de 75%. Por fim, o rejeito produzido na planta de beneficiamento é transportado para a área de deposição final, em que são formadas enormes pilhas de rejeito no entorno das áreas de lavra e da usina de beneficiamento (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO, 2015).

No fluxograma observado abaixo encontra-se representado o layout da planta de beneficiamento de Scheelita da Mina Brejuí, de acordo com o modelo esquematizado por Leite et al., (2007).

Fluxograma 2 – Planta de beneficiamento de Scheelita da Mineração Tomaz Salustino S/A.



Fonte: Adaptado de Leite et al., (2007).

Na fotografia abaixo pode ser observada uma das mesas concentradoras existente na planta de beneficiamento da mina. Nessa verifica-se com detalhe as suas respectivas faixas de concentrações sob a mesa, a primeira linha à direita (esbranquiçada) representa a Scheelita concentrada (Faixa 1), a faixa 2 do meio (alaranjada) que é o misto, e a da esquerda (faixa 3) compreende o rejeito fino.

Fotografia 5 – Visão frontal para mesa concentradora vibratória em operação.



Fonte: Autoria própria (2016).

Ressalta-se que a Scheelita é um mineral friável, e a falta de controle na etapa de cominuição (britagem e moagem) do minério acarreta uma geração enorme de finos, e com isso atrapalha o processo de concentração gravítica. Assim, os jigues e mesas não são eficientes para tratar os finos, de tal forma que os finos não concentrados compõem o rejeito final (FERNANDES, 2011).

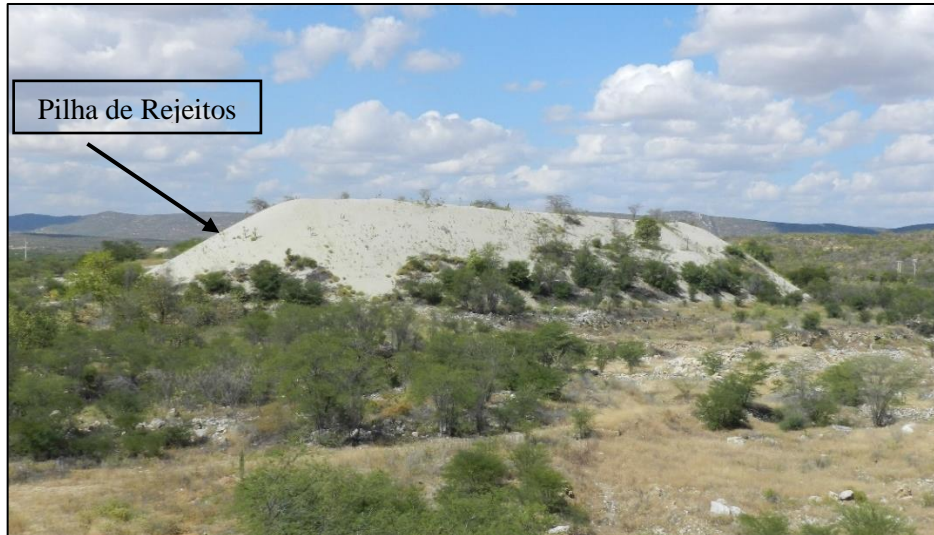
De forma geral os jigues e as mesas vibratórias são os equipamentos mais utilizados em plantas de processamento de Scheelita para realizar a concentração do minério. Ressalta-se que as recuperações nessas plantas chegam a atingir entre 60 e 70% (FERNANDES 2011).

A mina Brejuí possui duas pilhas de rejeitos que cobrem, aproximadamente, uma área de 121.500 m<sup>2</sup>, e volume de 1.943.200 m<sup>3</sup>, totalizando 3.110.400 toneladas (PETTA et al., 2014).

Existem aproximadamente 6,4 milhões de toneladas de rejeitos (fino e grosso) acumulados em forma de enormes pilhas (dunas) na área da mina (Fotografia 6), de acordo com informações coletadas do Geólogo responsável pela Mina (Fabriciano). Esses rejeitos são

considerados pela empresa como material não comercializável, e são provenientes dos processos de extração e beneficiamento da Scheelita (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO, 2015).

Fotografia 6 – Detalhe para uma das pilhas de rejeitos existentes na área da Mineração Tomaz Salustino.



Fonte: Autoria própria (2016).

De acordo com IBRAM (2015), as pilhas de rejeitos estão dispostas a céu aberto e em contato direto com superfície do solo da área da empresa de mineração Tomaz Salustino S/A. Sabe-se que esses materiais podem apresentar valor econômico para determinado segmento da indústria. Contudo, há que se investir em novas tecnologias para que seja feita a separação mineral de forma mais eficiente.

## 2.6 METALURGIA EXTRATIVA

A palavra metalurgia denomina um conjunto de processos e técnicas de extração, fabricação, fundição e tratamento dos metais e suas ligas. O uso dos metais representou um papel muito importante na vida das populações em função da necessidade que o ser humano tem de produzir ferramentas, máquinas e equipamentos, os quais tornem a sua vida mais fácil e de qualidade (NUNES; KREISCHER, 2010).

A metalurgia é classificada em pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia. De forma geral, na pirometalurgia são aplicadas elevadas temperaturas para extrair metal livre; já na hidrometalurgia a separação é feita por meio de reações químicas em meio predominantemente aquoso, e utilizando baixas ou médias temperaturas. E, a eletrometalurgia é o processo químico de extração que utiliza a energia elétrica, especialmente a eletrólise, para extrair e refinar os metais (BARBOSA et al., 1979).

O desenvolvimento industrial e tecnológico da era moderna é totalmente dependente dos metais, tendo em vista serem os pilares essenciais de diversos segmentos produtivos da sociedade. São considerados matérias-primas essenciais à sociedade, pois mesmo com o surgimento dos polímeros e dos produtos cerâmicos, os metais e suas ligas continuam sendo insubstituíveis em grande parte das aplicações (CAMPOS FILHO, 1981).

Esses elementos apresentam características consideradas excepcionais, dentre as quais: resiliência, condutibilidade elétrica e térmica, ferromagnetismo, elasticidade e plasticidade. Outro destaque para os metais é a sua capacidade de formar ligas, possibilitando variadas aplicações tecnológicas (CAMPOS FILHO, 1981).

Há uma grande dependência da sociedade pelos metais, deixando evidente que numa possível escassez ou elevação de custos haverá reflexos negativos em vários setores básicos da economia. Excluindo-se os metais nativos como: ouro, platina e prata, todos os outros são obtidos por meio da quebra de compostos, como os óxidos e sulfetos (CAMPOS FILHO, 1981).

Ainda conforme o autor mencionado, os metais são extraídos de minérios à base de óxidos, como é o caso do metal tungstênio, o qual é extraído a partir dos minérios: Wolframita e Scheelita, cujos compostos são: Trióxido de Tungstênio ( $WO_3$ ), Óxido de Ferro (FeO) e Óxido de Cálcio (CaO).

Para extrair um metal existem duas fases fundamentais: o beneficiamento do minério bruto e a redução ou quebra do composto que contém o metal desejado. Essa etapa pode ser completada pelo refino do metal extraído, ou seja, retirada de suas impurezas com objetivo de se obter o metal puro. E, de acordo com sua natureza físico-química, esses processos podem ser

classificados em: hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos, eletrometalúrgicos e siderúrgicos (CAMPOS FILHO, 1997).

## 2.7 HIDROMETALURGIA

A hidrometalurgia é uma técnica de extração metalúrgica líquido-líquido, ou também compreendida como extração por solvente de uma determinada mistura contendo um reagente, que extrai as espécies de interesse seletivamente (BARBOSA et al., 1979). É um método no qual uma fase aquosa contendo uma ou mais espécies metálicas a serem extraídas é colocada em contato com uma fase orgânica imiscível, em que um reagente irá extrair as espécies de interesse de forma seletiva.

A técnica também pode ser entendida como extração metalúrgica por meio da dissolução de um minério desejado a partir de algum tipo de solvente, para tratar ou extrair dele o metal desejado (CAMPOS FILHO, 1981).

Foi definida ainda como o conjunto de processos de extração de metais, em que a principal etapa de separação metal-rejeito compreende reações de dissolução do mineral-minério em meio aquoso. A literatura destaca que as principais aplicações dessa metodologia têm sido para os minérios de ouro, urânio, zinco, níquel, cobre, titânio e terras-raras (CIMINELLI, 2007). Ainda se destaca a hidrometalurgia como procedimento de lixiviação seletiva com dissolução dos integrantes valiosos dos minérios e sua posterior recuperação na solução por diferentes métodos (FERNANDES et al. 2009).

Diante das definições expostas, compreende-se que a hidrometalurgia é um processo de extração de substâncias, principalmente metais, em que se busca separar o mineral-minério por meio de reações químicas ou também conhecidas por reações de solubilização. Esse processo irá ocorrer com auxílio de um solvente em um meio aquoso.

Esse método surgiu na época dos antigos alquimistas, quando analisaram a conversão de metais-base em ouro. Um fato que marcou o surgimento da hidrometalurgia foi a descoberta da água-régia pelo pesquisador Jabir Ibn Hayyan. É considerada uma água real composta por Ácido Clorídrico (HCl) e Ácido Nítrico (HNO<sub>3</sub>), cuja a função é solubilizar ouro a partir do processo de dissolução (HABASHI, 2005).

Por volta do século XVI já se fazia extração de cobre por métodos à úmido, a qual ocorria nas regiões montanhosas de Harz (Alemanha) e também no rio Tinto Espanha. Alguns séculos depois, especificamente, no século XX, diversos processos de lixiviação e recuperação de minérios foram postos em prática. No início desse período os processos realizados com o



cobre tiveram destaque, bem como os minérios de óxido, que foram lixiviados em grande quantidade por meio de substâncias ácidas (ácido sulfúrico) no Chile (HABASHI, 2005).

Apenas no ano de 1887 surge a hidrometalurgia moderna com a invenção dos tratamentos de minérios de ouro, e o aparecimento de um processo denominado de Bayer, que era utilizado para produção de alumina (HABASHI, 2005).

Foi em meados da Primeira e Segunda Guerras Mundiais que se iniciou a busca por metais obtidos por meio da técnica hidrometalúrgica. Com relação ao Brasil, os processos hidrometalúrgicos foram iniciados pela empresa Abib Engenharia na década de 80, através do método de lixiviação em pilhas de minério de ouro oxidado e primário (LEITE, et al., 2007).

O método hidrometalúrgico é caracterizado pelas etapas de preparação, decomposição, purificação e recuperação. A primeira é acontece o tratamento dos minérios através de cominuição, classificação, concentração e separação sólido-líquido. A decomposição ou lixiviação representa a dissolução seletiva dos minerais contendo o metal ou metais de interesse. A purificação corresponde ao ato de purificar a solução contendo o metal usando-se de técnicas de extração por solventes, precipitação, cementação, adsorção em carvão ativado e adsorção em resinas de troca iônica. E, a recuperação do metal a partir de processos de eletrorecuperação, redução por hidrogênio, cristalização e outros (FERNANDES et al., 2009).

Conforme descrito por Ciminelli (2007), uma tendência futura da necessidade do tratamento mineral cada vez mais complexo e para obtenção de metais com baixos teores. E, esses fatores caracterizam exatamente o rol de aplicação da referida técnica hidrometalúrgica.

No quadro abaixo foram destacados os principais acontecimentos relacionados a evolução histórica da hidrometalurgia no mundo.

Quadro 2 – Evolução histórica da hidrometalurgia no mundo.

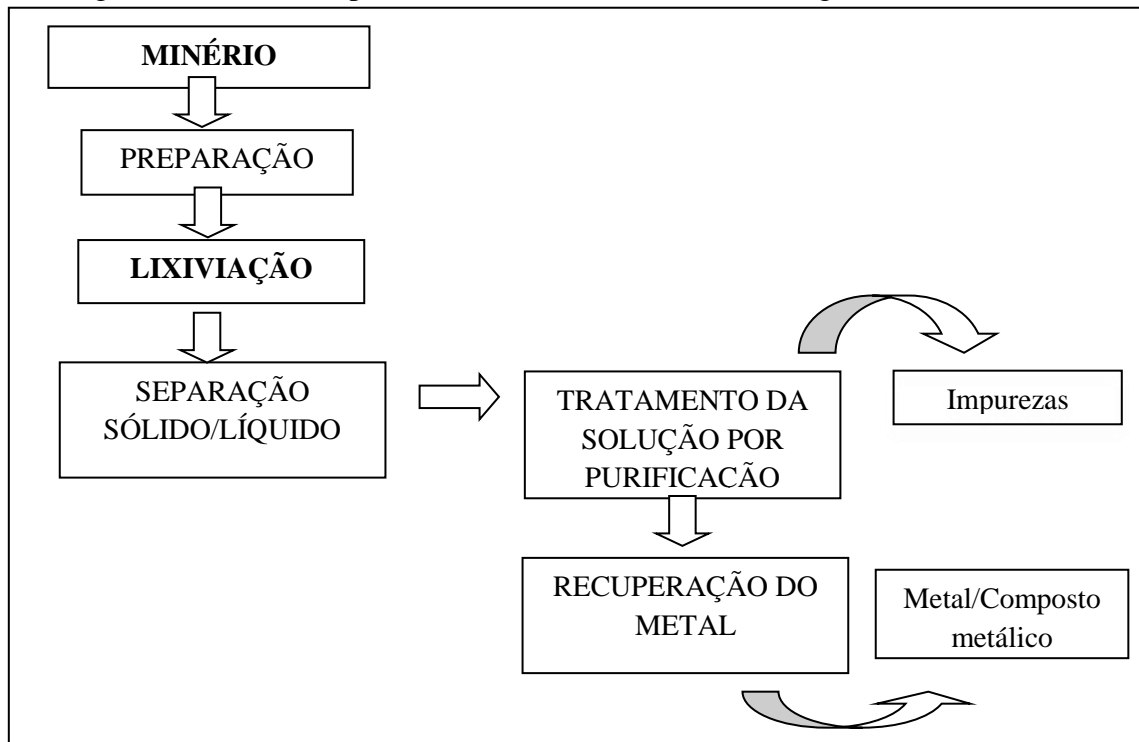
Período	Evento Histórico
Século VII	Conversão do cobre em ferro pelos alquimistas ( $\text{Cu}^{2++}\text{Fe} \text{-----} \text{Cu}^+\text{Fe}^{2+}$ )
Século VIII	Descoberta da água régia por Jabir Ibn Hayyan.
Século XVI	Primeira lixiviação em pilhas de pirita contendo cobre na Harz na Alemanha e em Rio Tinto em Espanha, e a precipitação de cobre do Soluções de ferro.
Era Moderna	
1887	Surgimento do processo de cianetação (Solução de cianeto e a precipitação de ouro), e lixiviação por pressão de Bauxita por solução de NaOH.

Cont.	
1912	Recuperação de cobre do processo de lixiviação no Chile, por meio da eletrólise.
1916	Uso de hidróxido de amônio para lixiviar cobre nativo no Distrito do Lago Superior, e para o minério de malaquita-azurita no Alasca.
1924	Lixiviação de Níquel utilizando amônia.
1927	Lixiviação por pressão de ZnS na presença de oxigênio com temperatura elevada.
1930	Lixiviação de sulfetos de cobre utilizando solução de cloreto férrico.
1940	Introdução de carbonato de sódio como agente de lixiviação para urânio.
1950	Aplicação da hidrometalurgia por pressão para lixiviar sulfeto de níquel.
1960	Descoberta do uso de microrganismos em processos de lixiviação em pilhas para extrair cobre a partir de minério de baixo teor. Pode ser aplicada em vários materiais, dentre os quais minérios de tungstênio e Urânio.
1970	Descoberta da ação galvânica na lixiviação de minerais sulfetados. Recuperação de urânio desperdiçado nas soluções lixiviadas após precipitação do cobre e sucata de ferro.
1980	Processo hidrometalúrgico do ouro: Tecnologia e oxidação aquosa de ouro.

Fonte: Habashi, (2005).

Diante disto, pode-se compreender que esse método de extração metalúrgica apresenta papel importante para a separar minerais de um material que não apresenta valor econômico. Esse material não aproveitado também chamado de estéril (rejeito) será separado dos minérios e, posteriormente direcionado às pilhas de rejeitos.

Fluxograma 3 – Fases do processo de tratamento hidrometalúrgico.



Fonte: Adaptado de Ciminelli, (2007).

A empresa Vale desenvolve um projeto com o cobre utilizando rotas hidrometalúrgicas, cuja pretensão é transformar o Brasil em um dos maiores produtores de metais do mundo. O mesmo autor explica ainda que as características complexas dos minérios e a opção por rotas hidrometalúrgicas são desafiadoras, e terminam gerando oportunidades e, conseqüentemente condições reais para uma mudança de nível na hidrometalurgia do Brasil (CIMINELLI, 2007).

Ainda segundo o autor citado, o Brasil desenvolve vários projetos nessa área em laboratórios do exterior, e recebe consultorias provenientes tanto do Canadá como Austrália. E, ao invés de buscar investir nessa nova e promissora tecnologia de tratamento mineral para extrair metais (Hidrometalurgia), prefere contribuir para o seu crescimento apenas fazendo a sua exportação.

## 2.8 LIXIVIAÇÃO

A lixiviação é uma etapa do processo hidrometalúrgico que é utilizada por algumas empresas para extração de metais a partir de um solvente. A principal função deste é atuar separando, seletivamente, a matéria-prima dos minerais solúveis presentes em uma mistura. A decomposição ou a lixiviação ocorre com adição de um solvente, ou solução aquosa, que é

composta por reagentes adequados ao desenvolvimento das suas atividades (BARBOSA et al., 1979).

Outra definição de destaque é a lixiviação como um processo de dissolução de uma substância a partir da separação dos componentes de uma determinada mistura. É um método baseado no contato do solvente sobre a substância que se deseja separar de forma bastante seletiva. Uma das principais vantagens da utilização da lixiviação é a sua capacidade de fazer tratamento dos minérios de baixo teor existentes na natureza (LEITE, et al., 2007).

Existem diversos tipos de agentes lixiviantes para o processo de separação da mistura, contudo deve-se destacar que a água é considerada um lixivante ideal, em razão de apresentar custos baixos e não ser corrosiva. Entretanto, a água não atua com todos os minerais, pois apresenta certas limitações para determinados minerais (HABASHI, 1993).

No estado do Rio Grande do Norte existem empresas de mineração que utilizam essa técnica de separação metal-rejeito. A primeira aplicação da lixiviação ácida foi desenvolvida na Fazenda São Francisco, localizada no município de Currais Novos. A mineração realizava extração de ouro utilizando ácido (agente lixivante) em pilhas de minérios. Outro caso de destaque é o da empresa Mineração Nossa Senhora do Bonfim, situada no município de Lajes, que opera desde 1992 fazendo também extração de ouro e scheelita utilizando o método de lixiviação nas pilhas de rejeitos, a fim de solubilizar o ouro fino que ainda é descartado pelos processos gravimétricos (LEITE et al., 2007).

## 2.10 BIOLIXIVIAÇÃO

A biohidrometalurgia é uma técnica que surgiu nas últimas décadas e deu origem ao método atualmente conhecido por biolixiviação ou lixiviação bacteriana. De acordo com Garcia e Bevilaqua (2008), esta consiste na utilização de microrganismos capazes de promover a solubilização de componentes minerais presentes em uma amostra mineral.

A biolixiviação também é considerada um processo de dissolução, ou seja, de solubilização de metais por ação microbiana, que acontece por meio da separação seletiva do mineral indesejado dos minérios que possuem valor econômico (EHRlich, 1991). Corroborando com tais compreensões, Oliveira (2009) também apontou em seus estudos que a lixiviação bacteriana é uma forma economicamente viável de extrair metais da natureza.

Além disso, um dos grandes desafios da área de biohidrometalurgia, conforme Ciminelli (2007) é a biolixiviação da calcopirita, além disso não foi estabelecida como processo industrial. Como exemplo dessa aplicação podemos citar o projeto BHP – Billiton – Codelco

usando o processo BioCop, que utiliza microrganismos termófilos em reatores com agitação, haja vista já ter sido testado em escala piloto para concentrados de cobre na usina de Chuquicamata, localizada no Chile.

Pode-se mencionar países como Canadá e Austrália que são considerados grandes produtores de metais, principalmente, pelo uso da biohidrometalurgia. Além disso, apresentam elevadas taxas de exportação dessa tecnologia, em razão de possuírem programas de investimento de longo prazo envolvendo indústrias, governo e instituições de ensino e pesquisa.

Algumas pesquisas têm demonstrando a existência de metais de interesse econômico que podem ser solubilizados pela ação da lixiviação bacteriana, principalmente: ouro, prata, zinco, níquel, cobre e urânio (GARCIA JÚNIOR, 1989). Isso também foi evidenciado por Choi et al., (2004); Ilyas et al., (2007); Yang et al., (2009) uma vez que também descrevem a biolixiviação como um método alternativo para extração tanto metais-base ou metais preciosos (CHOI et al., 2004; ILYAS et al., 2007; YANG et al., 2009).

Então, os microrganismos apresentam função de promover a solubilização de metais apresenta-se como uma alternativa na recuperação de metais de interesse econômico (BRANDL, 2011).

No entanto, destaca-se ainda o conceito mais específico para biolixiviação, delineado pelo pesquisador Pradhnet (2008), que é dissolução de sulfetos minerais que ocorre por ação de um grupo de microrganismos. Essa definição deixa claro que podem haver vários tipos de seres microscópicos atuando nesse processo, inclusive espécies de bactérias atuando em conjunto com organismos do grupo dos fungos.

Diante das definições expostas podemos compreender que essa rota biotecnológica pode ser uma alternativa ao importante e diferenciada para tratamento de minérios, haja vista que é operacionalizada por microrganismos com a finalidade de recuperar metais de minérios oxidados e sulfetados.

É válido mencionar que esses seres microscópicos são capazes de usar compostos inorgânicos presentes nos minerais como fonte energética para seu metabolismo. (ARAÚJO et al., 2014). É mister informar que essas reações químicas ou metabólicas ocorrem dentro das condições particulares do potencial redox, pH, temperatura, concentração de oxigênio e nutrientes desses microrganismos lixiviadores (CIMINELLI, 2007).

Além da larga utilização dos microrganismos para extrair metais, observa-se que a aplicação da lixiviação bacteriana também desempenha outras funções importantes para o meio ambiente, como por exemplo: a descontaminação de emissões gasosas contendo Ácido Sulfúrico ( $H_2S$ ) (JORDAN et al., 1996); e também na reciclagem de resíduos de equipamentos

eletroeletrônicos para recuperação de metais presentes em circuitos impressos (ARAÚJO et al., 2014).

A biolixiviação representa interesse extraordinário aos mineradores, pois apresentam vantagens significativas em relação aos processos tradicionais de extração, por se utilizar apenas de bactérias para solubilizar metais de interesse em minérios de baixo teor (BEVILAQUA, 2002). Também foi enfatizado por outros autores que o método tem sido mais aplicado atualmente em função da elevada exaustão de minérios mais ricos (BEVILAQUA et al., 2002; GARCIA JUNIOR, 1995).

Historicamente o uso da biolixiviação foi mencionada a cerca de 2000 anos a.C., como uma das mais antigas utilizações biotecnológicas no mundo. Além disso, 1000 anos a.C., na região do Mediterrâneo deu-se início o desenvolvimento da técnica de recuperação natural do cobre, que era lixiviado nos efluentes das minas. Esse trabalho era desempenhado pelos povos fenícios, romanos e espanhóis (MURR, 1980; BRIERLEY 1982).

No final do século XV foi iniciada no norte da Hungria o uso sistemático do processo natural de lixiviação do cobre. Apenas em 1700, no rio Tinto na Espanha, foi iniciada a metodologia de lixiviação natural do cobre em pilhas. A partir de então, o processo de lixiviação de minérios de baixo teor propagou-se pelos países do mundo, dentre os quais: Peru, África, Austrália, Bulgária, Áustria e URSS (GARCIA, 1989).

A biolixiviação é um método hidrometalúrgico utilizado para extrair metais de baixo teor, que foi descoberto em meados da década de 60, porém, apenas na década de 80 passou a ser mais aplicada pela indústria mineral. Pode ser considerada uma rota biotecnológica para a recuperação de metais presentes em minérios oxidados e sulfetados na fase de solubilização, ou no pré-tratamento de minérios e concentrados. Essa rota é muito utilizada na Austrália, na África do Sul, e no Canadá (ARAÚJO et al., 2014).

No Brasil durante o final da década de 80, as pesquisas na área da biohidrometalurgia ainda estavam em processo de formação, porém, já apresentava indícios de ser muito promissora. Contudo, pouco havia sido feito a respeito dessa temática em Brasil. Então, indicava-se que deveria haver iniciativas para o aprimoramento da biometalurgia, em especial a lixiviação de metais por bactérias, uma vez que essa área é bastante promissora para os países em desenvolvimento (GARCIA, 1989).

A lixiviação bacteriana tem sido aplicada em escala industrial para recuperação de cobre, urânio e, mais recentemente, de ouro, em vários países, destacando-se os Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Rússia, Espanha, Chile, México, Bulgária e Austrália (GARCIA JÚNIOR; URENHA, 2001).

A utilização de microrganismos na hidrometalurgia com objetivo de solubilizar metais a partir de minérios de baixos teores (biolixiviação) ou como pré-tratamento de sulfetos na extração de ouro e prata (biooxidação) é conhecido há muito tempo, além disso já vem sendo aplicado em escala piloto e comercial em todo o mundo. Essa técnica apresenta três diferentes desenhos ou sistemas: biolixiviação em montes para rejeitos minerais conhecidos como “dump leaching”, biolixiviação/biooxidação em pilhas “heap leaching” e em tanques agitados para concentrados (BLANDÓN, 2010).

Portanto, é considerada uma importante alternativa na recuperação de minérios de baixo teor, uma vez que apresenta vantagens em relação aos outros processos convencionais (BEVILAQUA, 2002). Os métodos de lixiviação microbiana estão sendo cada vez mais aplicados para a recuperação de metais a partir de minérios de baixo teor e concentrados que não podem ser processados economicamente por métodos convencionais.

### **2.10.1 Aplicações e vantagens da biolixiviação**

Foi verificado que desde 2001 haviam preocupações futuras com a aplicação comercial, e a longo prazo, dos processos biológicos com fins de extração de metais. No entanto, evidenciava-se que as pesquisas atuais iriam conduzir o método de biolixiviação à processos inovadores, e de aplicações comerciais e industriais (BRIERLEY; BRIERLEY, 2001).

A aplicação da biohidrometalurgia tem aumentado consideravelmente, principalmente, em países como Chile, Peru, Austrália, EUA, China, Canadá, os quais aplicam a biolixiviação para a extração de metais como o cobre (FRANCISCO JÚNIOR. et al., 2007).

O tratamento hidrometalúrgico de concentrados a partir da lixiviação bacteriana apresenta diversas vantagens quando comparados a outros tratamentos. Pode-se destacar dentre os benefícios da técnica: não eliminar poluentes na atmosfera; utilizar temperatura ambiente; a obtenção de uma lixívia ácida contendo o cobre e grande parte das impurezas metálicas na forma de sulfato, sendo assim, ponto de partida para a recuperação do cobre contido, quer por cementação quer pela purificação/concentração, por extração por solvente, seguida da eletrorecuperação desse metal (SOBRAL et al., 2005).

A biolixiviação já é considerada uma alternativa vantajosa na recuperação de cobre, pois trabalha com economia de insumos (ácidos e agentes oxidantes), uma vez que a própria bactéria produz matéria-prima a partir de substratos presentes no minério. Apresenta baixos custos de investimentos iniciais na operação e simplicidade nas instalações; reduzida necessidade de mão

de obra especializada; e o principal, evita a poluição atmosférica, como o SO<sub>2</sub> originado do processo pirometalúrgico (GARCIA (1989); LYNN (1997)).

Conforme Garcia (1989) para um melhor aproveitamento dos rejeitos minerais (minérios de baixos teores), a lixiviação de metais feita com auxílio de bactérias é indicada como alternativa para ser aplicada em jazidas de porte pequeno, e/ou que estejam em locais de difícil acesso, distante dos centros urbanos.

Os métodos de lixiviação microbiana estão sendo cada vez mais aplicados para recuperar metais a partir de minérios de baixo teor e concentrados, que não são economicamente exploráveis por métodos convencionais. Muitos casos de muitos processos biotecnológicos, que começaram a serem usados desde tempos pré-históricos e, provavelmente, os gregos e romanos extraíram cobre da água da mina há mais de 2000 anos (BOSECKER, 1997).

De acordo com Yamane (2012), outra aplicação de destaque para a lixiviação bacteriana é a recuperação de metais do rejeito de equipamentos eletroeletrônicos, cujas vantagens já foram descritas anteriormente por Garcia (1989) e Lynn (1997). A lixiviação bacteriana pode ser usada em processos de recuperação de depósitos de rejeitos quando os métodos usuais não são econômicos; aumento da recuperação dos metais de baixo teor ou de difícil extração, metais de minérios refratários e minimização da poluição ambiental (CASSA; ANDRADE, 1985)

Diante do exposto, verifica-se que a biolixiviação apresenta mais vantagens para o meio ambiente, do que os outros métodos que são utilizados pelas empresas de mineração para extrair minérios de baixo teor. Pode-se dizer que o método de extração por meio de microrganismos contribui para o meio ambiente, para empresa e sociedade. Salientam-se as principais vantagens da biolixiviação: economia de insumos (matéria-prima) utilizados em processos hidrometalúrgicos (ácido e agente oxidantes); baixo consumo energético; custo de capital para implantação dessa tecnologia; custos operacionais reduzidos para as empresas e não emite gases que são prejudiciais.

Entretanto, apesar das vantagens já mencionadas a rota tecnológica da biolixiviação apresenta uma desvantagem quando comparado aos processos tradicionais, que é a questão da duração da lixiviação, ou seja, do tempo de extração do metal que é mais elevado do que os processos mais comuns. Isto é verificado em função das características intrínseca do processo e do metabolismo microbiano que requer mais atenção, tempo e cuidado. Pois, caso não haja as condições satisfatórias e favoráveis para o crescimento dos microrganismos a lixiviação por ação delas não poderá ser realizada.

Por fim, os microrganismos necessitam de fatores físicos e químicos favoráveis para que possam crescer. Dentre estes pode-se citar temperatura, pH e pressão osmótica; já os fatores



químicos têm-se: fontes de carbono, nitrogênio, enxofre, fósforo, elementos traço e fatores orgânicos de crescimento (TORTORA et al., 2017).

### **2.10.2 Mecanismos de atuação dos microrganismos na biolixiviação**

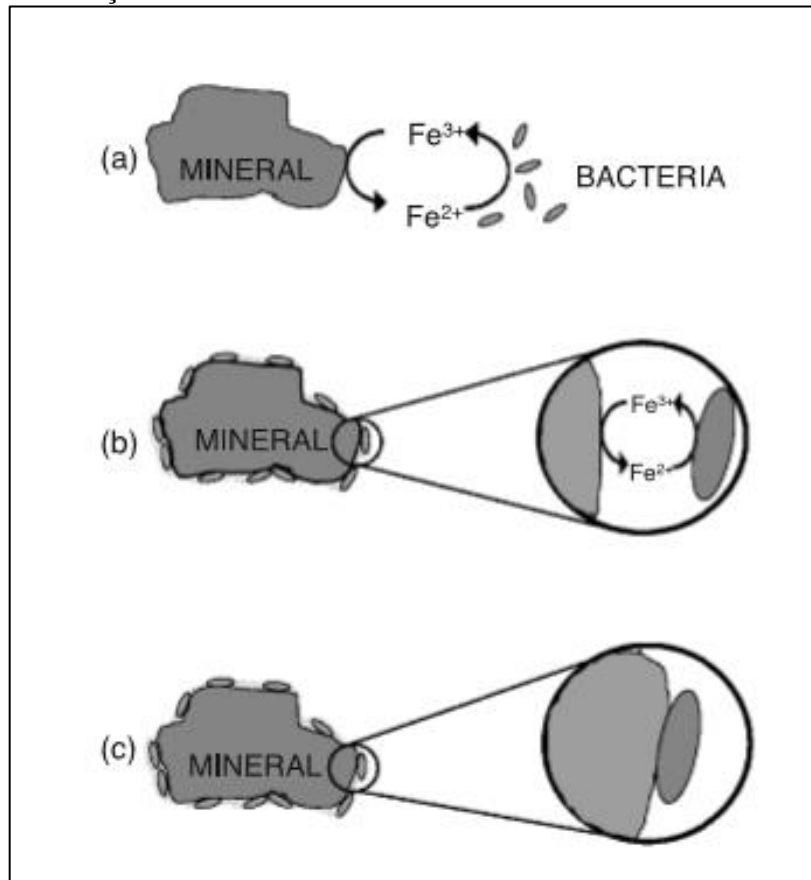
Existem diferentes mecanismos para atuação dos microrganismos nos sistemas de biolixiviação em superfícies minerais. A literatura específica diz que a técnica de lixiviação bacteriana para extração de metais pode ser aplicada por três diferentes mecanismos, que são: contato direto, contato indireto e indireto (CRUNDWELL, 2003).

Ressalta-se que estes mecanismos foram estudados e descritos por vários pesquisadores, porém apenas para os sulfetos minerais. Na figura 2 pode-se observar os tipos de mecanismos de contato entre a bactéria *T. ferroxidans* e o mineral sulfetado, conforme descrito por Crundwell (2003) e Oliveira et al., (2010).

Segundo os autores supramencionados a primeira interação (a) demonstra o mecanismo indireto, no qual a bactéria oxida íons de ferro na solução em íons férricos do mineral lixiviado. O mecanismo de contato indireto (b) ocorre a partir do ataque da bactéria oxidando íons ferrosos em férricos dentro de uma camada de exopolimérica (substância polimérica extracelular), de origem microbiana, a qual ajuda na adesão e consequente dissolução do mineral. E, conforme Sand e Gehrke (2006), este mineral irá se complexar ao material polimérico, conferindo carga positiva à célula. Então, haverá uma atração eletrostática entre a célula microbiana e a superfície negativamente carregada de alguns minerais.

Por fim, o mecanismo de contato direto (c) acontece através da interação da célula microbiana com a superfície do sulfeto mineral de forma direta, seguindo-se um ataque enzimático aos componentes do mineral, que apresentem susceptibilidade a oxidação do ferro- $\text{Fe}^{2+}$  (CRUNDWELL, 2003; OLIVEIRA, 2010).

Figura 2 – Mecanismos de ação entre microrganismos e minérios, durante o processo de biolixiviação de sulfetos minerais.



Fonte: Crundwell (2003), Oliveira et al., (2010).

Vale destacar que existem fatores determinantes para a uma eficiente interação entre o microrganismo e mineral, que podem interferir consideravelmente no sistema. São destacados por Oliveira et al., (2010) os seguintes fatores: a **característica mineral**, ou seja, a natureza dos minerais, sua composição química e a origem do minério; a **disponibilidade de dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>)**, que é utilizado como fonte de carbono, pois, a carência de carbono poderá reduzir o crescimento bacteriano.

Há que se destacar que o fator disponibilidade de oxigênio (O<sub>2</sub>), é um dos principais atores do processo de biolixiviação, pois fornece energia para o metabolismo microbiano. A alteração de temperatura poderá ocasionar modificações no processo de lixiviação bacteriana. A presença de nutrientes (nitrogênio, fósforo, magnésio, cálcio e outros), que fornecerão também energia; a concentração celular, isto é, a complexidade do sistema enzimático para uma melhor atuação dessas bactérias lixiviantes (OLIVEIRA et al., 2010).

O tamanho da partícula também é considerado importante, haja vista que quanto maior a área de contato superficial, aumentasse a disponibilidade de substrato energético ao ataque químico e microbiano. O pH também é um parâmetro importante para a solubilização de

compostos metálicos; e por fim, o potencial de oxirredução e concentração de espécies iônicas, também conhecido por Eh indica a tendência de algum elemento doar ou receber elétrons (OLIVEIRA et al., 2010).

Vale mencionar que a técnica de biolixiviação pode ser desenvolvida de várias formas, porém, observando o tipo de metal que se deseja extrair de um determinado minério. Na literatura são descritos, aproximadamente, três diferentes formas de operação para extração de minérios por biolixiviação: em montes para rejeitos minerais, que é um método conhecido como “*Dump leaching*”; a biolixiviação ou bioxidação em pilhas “*Heap Leaching*” e em Tanques agitados para concentrados (BLANDÓN, 2010).

### 2.10.3 Biolixiviação da Scheelita

A Scheelita pode ser extraída da rocha a partir de processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos. Existem dois tipos de técnicas que podem ser utilizadas para solubilizar quimicamente os minérios, a lixiviação e volatilização (CARVALHO, 1984).

O processo de lixiviação do tungstênio pode ser classificado em: lixiviação cáustica, lixiviação ácida, lixiviação com soda em autoclave, lixiviação com fluoretos, lixiviação ajudada por complexantes e a lixiviação microbiológica. Esta pode ser considerada como pouco dispendiosa para as empresas e já tem sido aplicada para diversos minérios, tais como urânio, cobre, níquel e molibdênio (CARVALHO, 1984).

As pesquisas relacionadas a hidrometalurgia do tungstênio ( $WO_3$ ) tem sido objeto de estudo de pequenos grupos de pesquisa da Universidade do Porto. Foram identificados na lixiviação de rejeitos de Scheelita a presença de agentes complexantes de cálcio e tungstênio, os quais demonstraram aumentos significativos na dissolução do tungstênio (CARVALHO et al., 1990).

Ainda foi descrito por Carvalho et al., (1990), que há possibilidade da lixiviação microbiológica da scheelita, uma vez que podem ser utilizados os grupos policarboxílico e polihidrocarboxílico, tais como: ácido tartárico, cítrico e glucônico, os quais apresentaram ótimos resultados, tanto para meios alcalinos como para meios ácidos. A lixiviação microbiológica da Scheelita pode ser realizada por meio dos fungos e bactérias decompositoras de silicato (CARVALHO et al., 1990).

Tais microrganismos apresentam uma importante função incomum, que é a separação de ácidos orgânicos (lático, oxálico, cítrico e glucônico) como produtos metabólicos, que dissolvem vários metais por formação de sais e quelatos. Como exemplo de microrganismos

capazes de atuar nessas condições, destacam-se: *Bacillus circulans*, *Pseudomonas sp.*, *Aspergillus niger* e *Penicillium simplicissimum*. A aplicação destes microrganismos é amplamente sugerida para a lixiviação de minérios silicatados que sejam compostos por metais valiosos, dentre os quais: alumínio, cobre, titânio e níquel (CARVALHO et al., 1990).

## 2.12 MICROBIOLOGIA E A INDÚSTRIA MINERAL

A extração de diversos metais tem sido considerada um problema para a indústria de mineração, de acordo com Peczar et al., (1997), uma vez que depósitos mais ricos em minerais estão se tornando raros. Com isso, as atividades de beneficiamento dos minerais têm apresentado baixa qualidade. E isso, fez com que os pesquisadores e empresários começassem a utilizar técnicas mais eficientes para a extração dos metais em minérios.

Os microrganismos podem ser utilizados pela indústria para diversas finalidades, tais como: transformação de uma matéria-prima em substâncias novas, bem como, transformar resíduos poluentes em substâncias que não causem danos ao meio ambiente. Como destaque temos a extração de diversos metais, a qual tem sido considerada um problema para a indústria de mineração, uma vez que depósitos mais ricos em minerais estão se tornando raros (PECZAR et al., (1997).

De acordo com o autor destacado, as bactérias têm a capacidade de aumentar a recuperação de metais a partir de minérios de baixa qualidade. Além disso, os microrganismos podem produzir diversos produtos comercialmente importantes para a sociedade, tais como: síntese de enzimas, uso como suplemento alimentar, produção de substâncias farmacêuticas, produção de bebidas alcoólicas, produção de vacinas, produção de biocidas (inseticidas), aplicação na mineração e indústria do petróleo.

Os minérios não se encontram suficientemente puros ou adequados para a sua aplicação em processos industriais e precisam passar por etapas de lavra e processamento. Como a média de minérios econômicos está diminuindo, as quantidades de resíduos geradas para produzir uma determinada quantidade de metal aumentarão, resultando em quantidades elevadas de resíduos. A melhor alternativa seria produzir pouco ou nenhum desperdício (DUNBAR, 2017).

O autor Johnson (2013) realizou trabalho de revisão para as aplicações do bioprocessamento bacteriano aplicado à mineração, onde esta apresentou vários tipos diferentes de biotecnologia, e sugere que as biotecnologias têm o potencial de redefinir completamente a atual sequência de extração de metal.

### 2.12.1 Microrganismos biolixiviantes

Os microrganismos são seres capazes de desenvolver diferentes funções durante o desenvolvimento da biolixiviação. A atuação desses organismos irá depender da espécie viva que esteja presente na solução lixiviante. Como exemplo, as bactérias podem desempenhar funções catalisadoras durante a dissolução, ou produzindo metabólitos que provocarão a dissolução química dos minérios. Contudo, os fungos podem apresentar a função apenas de geradores de produtos metabólicos que causam a dissolução química do metal (EHRlich, 1991).

Ao compreender que os microrganismos eram os responsáveis por esse processo, o mundo começou a observar uma grande diversidade desses seres vivos úteis para a biolixiviação (HOLMES; DEBUS, 1991). É fato que existem fatores de ordem orgânica que contribuem para o desenvolvimento efetivo da biolixiviação de diversos tipos de metais, como por exemplo o cobre (GARCIA JUNIOR, 1989; LYNN, 1997).

Um dos fatores de grande relevância é a adaptação bacteriana ao meio lixiviante, uma vez que são bactérias que irão trabalhar em conjunto com os minérios. Ainda não existe um protocolo ou condições pré-definidas para o tempo de adaptação desses microrganismos (BEVILAQUA et al., 2002; HAGSHENAS et al., 2009).

Os estudos a respeito da biolixiviação tem se tornado fonte de interesse para vários pesquisadores. Dentre as espécies bacterianas mais citadas, quanto a atividade de solubilização de metais de seus minerais, tem-se o *Thiobacillus ferrooxidans*, o qual atua diretamente na solubilização de ferro (GARCIA JÚNIOR, 1989).

Essa bactéria apresenta uma considerável importância para o desenvolvimento de processos hidrometalúrgicos, uma vez que ela tem capacidade de crescer em condições ambientais adversas, apresenta elevada acidez e altas concentrações de metais, consegue fixar o CO<sub>2</sub> atmosférico por ser um organismo autotrófico, possui elevada resistência a concentrações elevadas de metais potencialmente tóxicos, e também solubiliza metais de interesse econômico devido ao seu metabolismo oxidativo (GARCIA JÚNIOR, 1989).

Na natureza existem diversas espécies que já foram identificadas por vários pesquisadores, bem como, estudos sendo desenvolvidos a fim de entender o mecanismo de interação entre os microrganismos e seus respectivos minérios de atuação ou interação na natureza. Isso apresenta grande importância para os processos de tratamento mineral, principalmente quando se utiliza a técnica de biolixiviação. Nesse caso há interação direta ou

indireta entre determinada espécie de microrganismo, e um minério específico que deseja explorar comercialmente.

Os microrganismos podem ser classificados quanto aos parâmetros pH, temperatura e fonte energética. Para o primeiro parâmetro, têm-se organismos que sobrevivem em ambientes ácidos, sendo, portanto, considerados acidófilos. (JONHNSON; ROBERTO, 1997).

Ressalta-se que no apêndice A consta o quadro 3 no qual foram relacionadas espécies de microrganismos identificados e estudados anteriormente, os quais apresentam grande importância para o processo de biolixiviação de diversos minérios (BRANDL, 2001).

Como discutido anteriormente, existem fatores físicos e químicos que podem influenciar diretamente no crescimento microbiano, bem como, no desempenho das suas atividades metabólicas. Além desses fatores, foi observado por Brandl (2001), que há também parâmetros biológicos, e características do minério que devem ser consideradas durante o processo de biolixiviação, para que este possa ocorrer de forma satisfatória e eficiente. No quadro 4 estão destacados os principais parâmetros e fatores relacionados ao meio e aos microrganismos, os quais afetam a biolixiviação em pilhas e também na recuperação de metais.

Quadro 4 – Parâmetros e características influenciadoras da biolixiviação em pilhas, e na recuperação de metais.

<u>FATOR</u>	
Parâmetros físicos e químicos	Temperatura, pH, Potencial redox, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , disponibilidade de oxigênio, concentração de Fe (III), inibidores de concentração
Parâmetros biológicos	Diversidade microbiana, densidade populacional, atividades microbianas, tolerância a metal, distribuição espacial dos microrganismos, ligação das partículas minerais, capacidade de adaptação dos microrganismos.
Características dos minérios	Composição, tipo do minério, composição ácida, tamanho do grão, área superficial, interações hidrofóbicas galvânicas, porosidade, disseminação mineral e formação de minerais secundários.

Fonte: Adaptado de Brandl (2001).

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a estrutura metodológica da investigação do estudo em tela, iniciando com a descrição do objeto de pesquisa, e logo após, estão descritos os procedimentos metodológicos que foram desenvolvidos no decorrer da pesquisa.

#### 3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM DA PESQUISA

O método de abordagem do estudo é compreendido a partir de um conjunto de procedimentos escolhidos de forma a se atingir todos os objetivos determinados e com isso conseguir alcançar os respectivos resultados esperados. Tudo isto a fim de solucionar a problemática da pesquisa, que está ligada a falta de equipamentos e técnicas avançadas para recuperar Scheelita de baixo teor presente, principalmente, nas pilhas de rejeitos oriundas de plantas de beneficiamento, e que ainda contêm elementos considerados comercializáveis.

A pesquisa desenvolvida pode ser classificada como aplicada, tendo em vista que se realizou ensaio de bancada em laboratório, com intuito de avaliar uma técnica já existente, para melhorar o processo de beneficiamento de uma empresa, e a recuperação de recursos naturais não renováveis ainda existente em pilhas de rejeito. Também irá contribuir para geração de conhecimentos e procedimentos aplicados com finalidade de solucionar problemas da realidade da área estudada.

A originalidade desse estudo fica evidente em função de que, durante as pesquisas bibliográficas, foi verificada a existência de apenas 1 (um) trabalho científico a respeito do assunto estudado nessa pesquisa, e que foi desenvolvido por Carvalho et al., 1990, e divulgado em revista internacional da área específica.

Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa é classificada como exploratória e explicativa, sendo assim considerada por realizar o levantamento de informações e experiências anteriores sobre o uso dessa biotecnologia, tanto em outros países quanto com outros minerais. Também pôde-se ter acesso a alguns estudos realizados na área do estudo, os quais apontaram a baixa eficiência dos equipamentos e o uso de técnicas rudimentares no beneficiamento da Scheelita.

### 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente foi desenvolvida uma pesquisa bibliográfica a fim de dar suporte ao referencial teórico do estudo, mostrando a conceituação de termos como: Scheelita, tratamento mineral, hidrometalurgia, biotecnologia, microbiologia e biolixiviação. Para tanto, utilizou-se livros, publicações em periódicos, artigos científicos, bem como dissertações e teses. Ainda quanto aos procedimentos técnicos, o estudo realizou pesquisa documental, a partir de fontes primárias (relatórios da empresa sem tratamento analítico) e secundárias (relatórios de instituições de pesquisa, tabelas e fluxogramas já tratados analiticamente).

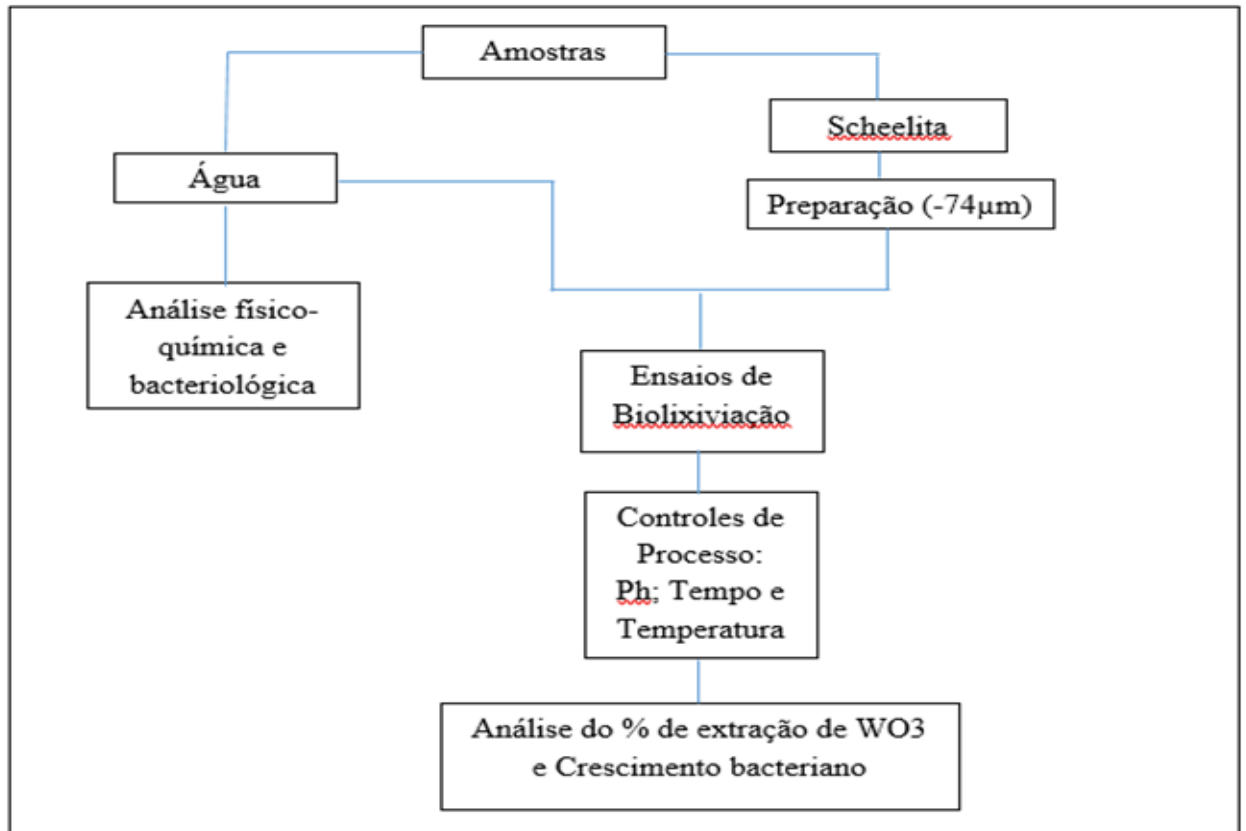
Além disso, foi feita pesquisa experimental buscando-se aplicar a técnica de biolixiviação para o mineral Scheelita, cuja finalidade foi identificar a melhor condição do meio de cultura para recuperar Scheelita de baixo teor existente na mina.

Quanto a forma de abordagem do problema, a pesquisa é classificada em quantitativa e qualitativa, assim, sendo considerada por analisar as variáveis que influenciavam na solubilização do minério usando a técnica biolixiviação. Por fim, tal pesquisa buscou quantificar as informações obtidas sobre as condições que influenciavam no comportamento da Scheelita, e o seu percentual de extração após o tratamento aplicado.

No fluxograma abaixo estão representadas, simplificadaamente, as etapas de desenvolvimento dos procedimentos metodológicos realizadas durante a pesquisa.



Fluxograma 4 – Descrição simplificada dos procedimentos metodológicos da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2017).

De forma simplificada os ensaios de biolixiviação foram iniciados a partir da coleta das amostras de água de processo da mina e da scheelita concentrada existente na planta de beneficiamento. As amostras da água foram submetidas, primeiramente, às análises físico-químicas e bacteriológica. E a Scheelita concentrada foi fragmentada e classificada na granulometria 74 micrômetros ( $\mu\text{m}$ ) com auxílio do almofariz e peneira.

Para a realização dos ensaios de lixiviação bacteriana fez-se a preparação de 1000 ml de solução lixiviante, composta por: extrato de malte, glicose, 1 g de peptona, e 1L de água da mina. Depois de homogeneizada foi feita distribuição de 50 ml de solução em 20 frascos erlenmeyers de 250 ml), sendo acrescentado-se 1 g de scheelita concentrada.

Isto posto, foi realizada a leitura do pH de cada amostra para padronização de 4 (quatro) tipos de pH's 2, 3, 4 e 5, utilizando ácido sulfúrico diluído. As amostras foram direcionadas à incubadora *Shaker*, para iniciar a fase de biolixiviação.

Foram desenvolvidos 3 (três) ensaios de biolixiviação, os quais ocorreram com a mesma quantidade de amostras (20), oscilação da incubadora (120 rpm), e concentração do meio de

cultura para todas as amostras. Houve a variação de temperaturas (25°C, 30°C e 35°C), pH do meio de cultura e o percentual de extração, em função do tempo.

As amostras foram retiradas da incubadora em horários previamente determinados (período de 24h), direcionadas a verificação dos pHs, e filtradas para análise das lixívias. Destas retirou-se uma alíquota para inocular em placas de Petri, a fim de avaliar o potencial de crescimento de microrganismos.

O sólido retido na membrana filtrante submetido à queima em forno Mufla, onde permaneceu por 50 minutos sob temperatura constante e máxima de 700°C. Depois disso, o material restante foi quantificado em balança analítica, com intuito de verificar a quantidade de minério solubilizado a partir da ação microbiológica. Por fim, concluído o período de cultivo das bactérias heterotróficas, retirou-se as placas de Petri da estufa para contagem final das Unidades Formadoras de Colônias (UFC/mL).

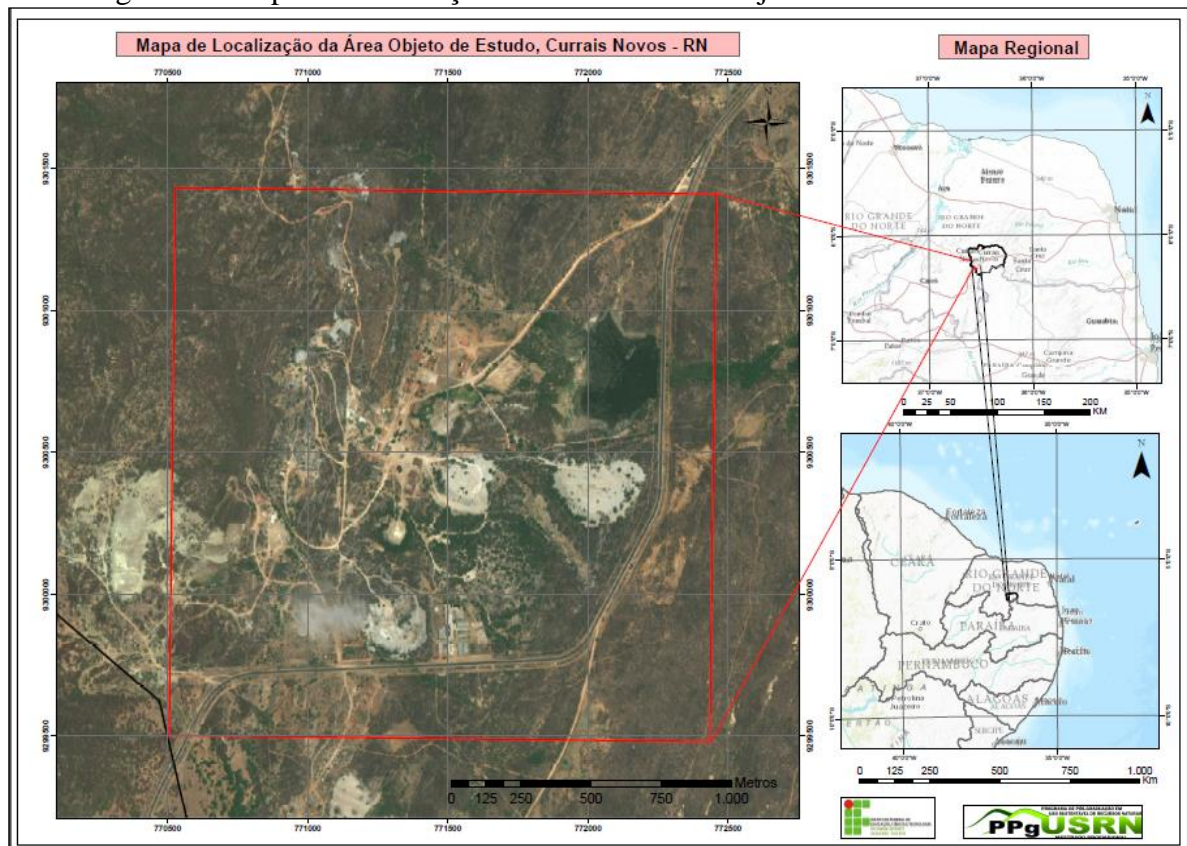
### 3.3 DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

Nesta subseção estão descritas as metodologias, materiais e métodos que foram aplicados para o desenvolvimento pesquisa em tela, cuja finalidade era o completo atendimento dos objetivos elencados inicialmente nesse documento.

#### 3.3.1 Local de coleta das amostras de água e de scheelita

As amostras de água e Scheelita utilizadas na pesquisa foram coletadas nas instalações da Mineração Tomaz Salustino (Mina Brejuí), a qual foi considerada a maior Mina de Scheelita da América do Sul. A mineração está localizada no município de Currais Novos, situado na microrregião Seridó Oriental do estado do Rio Grande do Norte, com coordenadas geográficas 6° 15' 39" Sul e 36° 31' 04" Oeste. Na figura abaixo observa-se o Mapa de Localização da área objeto de pesquisa.

Figura 3 – Mapa de localização da área da Mina Brejuí.



Fonte: Autoria própria (2016).

### 3.3.2 Coleta das amostras de Scheelita e água processada da mina

A Scheelita utilizada na pesquisa foi coletada na usina de tratamento de minérios da Mineração Tomaz Salustino, sendo ela totalmente livre de impurezas, ou seja, concentrada. A amostra de Scheelita (Fotografia 7) concentrada totalizou, aproximadamente 200g, cuja coloração figurava entre branco a cinza escuro. Na fotografia 8 evidencia-se uma parcela da amostra mineral usada nos ensaios de lixiviação bacteriana. Na cápsula de porcelana da esquerda verifica-se o material antes de ser fragmentado, e na cápsula da esquerda observa-se a scheelita após a classificação granulométrica, que foi realizada no Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN.

Fotografia 7 – Amostras da Scheelita pura antes (esquerda) e após o processo de cominuição (direita).



Fonte: Autoria própria (2017).

A coleta das amostras de água para os ensaios de biolixiviação foi realizada no mês de janeiro de 2017. Para este procedimento foram utilizados frascos de plástico, os quais foram depositados em isopor refrigerado com gelo, e seguindo os critérios pré-estabelecidos pelo Laboratório de Análise de Água e Esgoto – NAAE-IFRN (Campus Natal/Central). Este foi escolhido para fazer as análises físico-química e bacteriológica da água.

A amostra de água da Mina foi coletada junto a um tanque de armazenamento localizado nas instalações da Mina Brejuí, especificamente, nas proximidades da usina de tratamento mineral da empresa. Pode-se destacar que a água utilizada pela empresa é captada do Rio Currais Novos por meio de uma tubulação, a qual está ligada diretamente a um poço raso existente no rio. Na fotografia 8 foi apresentada a imagem do local onde foi realizada a coleta da água utilizada durante os ensaios.

Coletou-se aproximadamente 30 (trinta) litros de água, que foram armazenados em um galão para ser encaminhado ao laboratório, e uso posterior nos ensaios. Destaca-se que uma porção da água foi destinada à análise físico-química e bacteriológica.

Fotografia 8 – Tanque de armazenamento de água da Mina Brejuí, com detalhe para tubulação de onde foi realizada a coleta da água.



Fonte: Autoria própria (2017).

### 3.3.3 Análise físico-química e bacteriológica da água da Mina Brejuí

A coleta da amostra de água atendeu aos critérios pré-estabelecidos pelo Laboratório de Análise de Água e Esgoto – NAAE-IFRN (Campus Natal/Central), o qual foi escolhido para realizar as análises físico-química e bacteriológica da água.

Destaca-se que, os frascos utilizados na coleta foram fornecidos pelo referido laboratório. Durante a coleta procurou-se seguir os procedimentos descritos no “Guia de Orientação de Coleta” (nº 2 - Set/2015), que foi entregue juntamente com os frascos das amostras.

Vale salientar que as análises dos parâmetros da água foram realizadas pelos próprios técnicos do respectivo laboratório, e seguindo as normas e padrões da metodologia APHA et al., (2012). Na análise físico-química foram considerados os parâmetros e técnicas descritos no quadro 4 abaixo:

Quadro 5 - Parâmetros e técnicas adotados para análise físico-química da água da mina.

<b>PARÂMETROS</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>TÉCNICA UTILIZADA *</b>
<b>Condutividade elétrica</b>	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Potenciometria
<b>Cor aparente</b>	Mg/L Pt-Co/L	Colorimetria
<b>Turbidez</b>	NTU	Turbidimetria
<b>Ph</b>	ND	Potenciometria
<b>Sólidos Totais</b>	mg/L	Gravimetria
<b>Alcalinidade total</b>	mg/L $\text{CaCO}_3$	Titulometria
<b>Dureza total</b>	mg/L $\text{CaCO}_3$	Titulometria
<b>Cálcio</b>	mg/L $\text{Ca}^{+2}$	Titulometria
<b>Magnésio</b>	mg/L $\text{Mg}^{+2}$	Titulometria
<b>Sódio</b>	mg/L $\text{Na}^{+}$	Fotometria de Chama
<b>Potássio</b>	mg/L $\text{K}^{+}$	Fotometria de Chama
<b>Ferro</b>	mg/L $\text{Fe}^{+3}$	Colorimetria
<b>Carbonato</b>	mg/L $\text{CO}_3^{-2}$	Titulometria
<b>Sulfato</b>	mg/L $\text{SO}_4$	Turbidimetria
<b>Cloreto</b>	mg/L $\text{Cl}^{-}$	Titulometria

\***Metodologia Utilizada:** APHA et al. (2012). Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 22<sup>th</sup> Washington D C: American Public Health Associations, 2012.

Fonte: Autoria própria (2017).

No quadro abaixo está descrito o parâmetro microbiológico, e a técnica adotada para a realização da caracterização bacteriológica da água processada da Mina Brejuí.

Quadro 6 – Parâmetro e técnica adotados para análise bacteriológica da água da mina.

<b>PARÂMETRO</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>TÉCNICA UTILIZADA *</b>
Bactérias Heterotróficas	UFC/ml	Pour Plate

\***Metodologia Utilizada:** APHA et al. (2012). Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 22<sup>th</sup> Washington D C: American Public Health Associations, 2012. Fonte: Autoria própria (2017).

### 3.3.3 Classificação granulométrica e peneiramento das amostras de Scheelita

A Scheelita foi primeiramente fragmentada em almofariz visando atingir a granulometria 74 micrometros. Esse tamanho adotado para classificação do mineral foi adotado em razão de obter uma maior superfície de contato do grão de Scheelita com os possíveis microrganismos existentes, durante o processo de biolixiviação.

Fotografia 9 – Amostra de Scheelita retida em peneira de 74 micrômetros.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na fotografia 9 observa-se uma parcela da amostra de Scheelita que foi utilizada na etapa de biolixiviação ao final da classificação granulométrica, a qual passou pela cominuição na peneira de 74 micrômetros.

### 3.4 ENSAIOS DE BIOLIXIVIAÇÃO

Os ensaios de biolixiviação foram desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia Mineral – (IFRN) (Campus Natal-Central), cujos materiais utilizados encontram-se listados nos subitens que seguem abaixo. Destaca-se que parte da metodologia utilizada na pesquisa, especialmente a que foi utilizada no desenvolvimento dos ensaios em frascos agitados, baseou-se no trabalho realizado por Carvalho et al., em 1990.

É importante salientar que os materiais e métodos adotados nos ensaios de biolixiviação foram referenciados a partir do único trabalho de biolixiviação de scheelita já desenvolvido até o presente momentos, que foi do autor Carvalho et al., em 1990, em Portugal.

#### 3.4.1 Minério

O mineral utilizado nos ensaios de biolixiviação foi a Scheelita pura, que foi coletada na área da Planta de beneficiamento da Mina Brejuí, especificamente, retirada do equipamento chamado jigüe. A Mina Brejuí encontra-se localizada na região do semiárido potiguar, especificamente, no município de Currais Novos-RN.

#### 3.4.2 Meio de cultura utilizado nos ensaios de biolixiviação

O meio de cultura irá fornecer nutrientes e condições físico-químicas necessárias para o crescimento dos microrganismos, pois estes precisam de um ambiente apropriado para o seu crescimento *in vitro*. Contudo, além dos nutrientes presentes no meio, existem outros fatores externos que podem influenciar no desenvolvimento das colônias, tais como a temperatura e oxigênio (RIBEIRO; STELATO, 2011).

Nos ensaios de biolixiviação da pesquisa, foi utilizado um meio de cultura para incentivar o crescimento dos microrganismos. O objetivo principal da utilização deste meio era a solubilização do mineral Scheelita por meio dos microrganismos que estivessem presentes na água de mina. Para tanto, preparou-se uma solução composta pelos seguintes reagentes: extrato de Malte – 20 g/L; Peptona – 1 g/L; Glicose – 20g/L; e Água processada da Mina Brejuí – 1L.

Para realizar homogeneização da respectiva solução aquosa, os reagentes foram adicionados a um Becker (1000 ml) com a água, e misturados com auxílio de um bastão de vidro. Nas figuras 20 e 21 estão representados os materiais utilizados na preparação do meio de



cultura: reagentes e água da mina. Já na figura 17 pode-se observar a aparência final do meio de cultura utilizado na pesquisa.

Os meios de cultura destinam-se ao cultivo artificial dos microrganismos, onde irão fornecer os nutrientes e as condições físico-químicas indispensáveis ao seu crescimento. Cada microrganismo possui um tipo de exigência nutritiva, que está relacionada a sua fonte energética, que podem ser três: energia luminosa ou compostos químicos inorgânicos ou orgânicos. Além disso, os microrganismos necessitam de material plástico, como carbono, nitrogênio e íons inorgânicos essenciais (RIBEIRO; STELATO, 2011).

Vale destacar a existência de outros microrganismos, que além da fonte energética, precisam de fatores de crescimento, tais como: vitaminas e aminoácidos. Outro componente essencial para o crescimento dos microrganismos é a água, tendo em vista a sua importância nas atividades biológica dos seres vivos (RIBEIRO; STELATO, 2011). As condições físicas e químicas, pH e pressão osmótica, intrínsecas ao meio de cultura são necessários ao desenvolvimento dos microrganismos.

Destaca-se que os meios de cultura são classificados em função da composição, consistência, forma de preparação e função, de acordo com a ISO/TS 11133-1 (2009). Na pesquisa em tela foi utilizado um meio de **cultura complexo**, pois contém ingredientes complexos (peptona e extrato de malte). A sua consistência é **líquida**, por ter seus nutrientes dissolvidos em solução aquosa. Em relação a forma de preparação é considerado um meio **formulado**, haja vista ter sido totalmente preparado no laboratório. Por fim, tratando-se da sua funcionalidade, o meio em questão é de **enriquecimento não seletivo**, pois aceita o crescimento de microrganismos exigentes, e não contém substâncias inibitórias (RIBEIRO; STELATO, 2011).

### 3.4.3 Ensaios em frascos agitados

Para realização dos ensaios foram utilizados frascos Erlenmeyers com capacidade para 250 ml. Ressalta-se que estes frascos foram autoclavados antes de serem utilizados no processo de biolixiviação das amostras compostas por 50 ml de meio de cultura + 1 g de scheelita (74 $\mu$ m).

A metodologia do estudo foi desenvolvida a partir de 3 (três) temperaturas: 25°C, 30°C e 35°C. Segundo Johnson (2006), quanto a temperatura os microrganismos acidófilos podem ser classificados em mesófilos (20-40°C), por isso adotou-se nos ensaios as temperaturas (25°C, 30°C e 35°C).

Conforme o mesmo autor, Johnson (1995), as bactérias mais importantes são descritas como mesófilas, e apresentam temperatura ótima para crescimento em torno de 30°C. Também são aplicadas biotecnologicamente na recuperação de metais. Além disso, vários microrganismos já foram estudados e isolados de ambientes ácidos e, posteriormente utilizados em operações biohidrometalúrgicas.

Para cada ensaio foram preparadas 20 amostras denominadas 2A, 2B, 2C, 2D, 2E, 3A, 3B, 3C, 3D, 3E, 4A, 4B, 4C, 4D, 4E, 5A, 5B, 5C, 5D e 5E. Além destas, foi adicionada a cada ensaio a amostra “Branco”, a qual é composta apenas pelo meio de cultura, sem o minério Scheelita. Essa amostra foi utilizada como parâmetro para o pH do meio, e também para testar a eficiência da queima dos sólidos na Mufla, bem como, para fazer análise microbiológica.

Ressalta-se que para o ajuste do pH inicial das amostras utilizou-se o Ácido Sulfúrico, o qual devidamente diluído com água destilada, e posteriormente, foi sendo acrescentado nestas com auxílio de uma pipeta graduada.

As condições para realização dos ensaios de biolixiviação na incubadora *Shaker* foram as seguintes:

- 1º ensaio – temperatura de 25°C, com 120 rpm de agitação, por um período de 5 (cinco) dias;
- 2º ensaio – temperatura de 30°C, com 120 rpm de agitação, por um período de 5 (cinco) dias;
- 3º ensaio – temperatura de 35°C, com 120 rpm de agitação, por um período de 5 (cinco) dias.

Salienta-se que a nomeação das amostras foi realizada de acordo com as características abaixo citadas:

- a) números: **2, 3, 4 e 5** = valor do pH ajustado inicialmente;
- b) letras: **A, B, C, D e E** = tempo de acondicionamento na incubadora *Shaker*;
- c) branco.

Posteriormente, os frascos foram vedados e encaminhadas à incubadora, onde permaneceram por 120 horas (5 dias), sob temperatura e agitação de 120 rpm. A cada 24 horas eram retiradas 4 (quatro) amostras, e assim sucessivamente conclusão do tempo de incubação. As amostras foram sendo retiradas do equipamento conforme a ordem listada no quadro 6. Destaca-se que a amostra denominada como Branco foi retirada da incubadora apenas no último de ensaio.

Quadro 7 - Lista da sequência de retirada das amostras da incubadora em função do tempo final de incubação.

<b>AMOSTRAS</b>	<b>TEMPO (h)</b>
2 A, 3 A, 4 A e 5 A	24 horas
2 B, 3 B, 4 B e 5 B	48 horas
2 C, 3 C, 4 C e 5 C	72 horas
2 D, 3 D, 4 D e 5 D	96 horas
2 E, 3 E, 4 E e 5 E	120 horas
Branco	120 horas

Fonte: A autoria própria (2017).

### 3.4.3 Ajuste e padronização dos pHs das amostras contendo Scheelita

O ajustamento dos pH's por padrão de amostra foi realizado durante a pesquisa com intuito de observar as variações de acidez de cada amostra possivelmente solubilizada em relação ao tempo de contato (h), ao crescimento de microrganismos (UFC/mL) e por temperatura (25°C, 30°C e 35°C).

Nos frascos contendo meio de cultura e Scheelita, era adicionado o ácido sulfúrico diluído com objetivo de obter o padrão de pH de cada amostra. O ajustamento dos pH's foi feito com finalidade de padronizar cada batelada de amostras em: 2, 3, 4 e 5. Destes padrões foram preparadas 5 (cinco) amostras, totalizando 20 (vinte) frascos para serem biolixiviados. Esse procedimento de ajustamento foi realizado para cada condição de temperatura (25°C, 30°C e 35°C) objeto de pesquisa.

O ácido sulfúrico (diluído) era adicionado nas amostras pelo método de gotejamento e utilizando um contador de gotas. Então, fazia-se a leitura do pH da amostra, e caso fosse necessário adicionava-se mais ácido até que cada padrão fosse determinado e marcado.

Informa-se ainda que para amostra Branco foi feita apenas a leitura do pH, e não houve ajustamento de pH com ácido sulfúrico.

### 3.4.4 Incubação das amostras

Realizada a etapa de ajustamento dos padrões de pH's 2, 3, 4 e 5, as amostras foram direcionadas à incubadora *Shaker*, onde permaneceram sob agitação constante (120 rpm) e temperatura constante, de acordo o tempo estabelecido para cada batelada de ensaio. Ressalta-se que a cada 24 h de agitação eram retiradas uma amostra de cada padrão de pH. As sequências de retirada das amostras na incubadora foram: 24 h, 48 h, 72 h, 96 h e 120 h, respectivamente.

Fotografia 10 – Erlenmeyers contendo as amostras no interior do da incubadora *Shaker*.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na fotografia 10 observam-se as amostras do primeiro ensaio realizado, que foi para a condição de temperatura 25°C. A fotografia foi feita no dia (24h) de retirada do primeiro bloco de amostras, que foram: 2 A, 3 A, 4 A e 5 A.

### 3.4.5 Medição dos pHs das amostras após a incubação

As amostras foram retiradas da incubadora a cada período de 24 h, então, fazia-se o direcionamento destas à nova leitura de pH. A segunda verificação da variável em questão fez-se necessário para que pudéssemos avaliar as alterações ocorridas entre o meio de cultura e o mineral Scheelita. Assim, concluída a análise e quantificadas as alterações ocorridas, as

amostras permaneceram à temperatura ambiente no Laboratório de Tratamento de Minério – IFRN.

#### **3.4.6 Filtragem das amostras pós agitação na incubadora *Shaker***

A filtragem foi um dos procedimentos utilizados no ensaio de biolixiviação para separar da solução os sólidos (scheelita + matéria orgânica) da fase líquida (lixívia), após o processo a etapa de agitação na incubadora. Para este procedimento foram utilizados os seguintes materiais: Filtro de porcelana (Funil de Büchner); Disco de papel filtro quantitativo; Kitassatu; Trompa de vácuo; Compressor de ar de bancada; Espátula de alumínio; Balões volumétricos – 100 ml; Cápsulas de porcelana; e Piceta com água destilada.

O disco de papel filtro quantitativo utilizado nos ensaios apresentava as seguintes especificações: Faixa Branca – JP40; 80 g/m<sup>2</sup>; cor: cinza 0,00005 g; e poros com 25µm. O filtro ou funil de porcelana, também conhecido por Funil de Büchner, foi utilizado em conjunto com a trompa de vácuo e o Kitassatu, para atuarem na sucção do líquido passante (Fotografia 11).

A filtragem das amostras era feita de forma simples e rápida, em que todo líquido existente nos frascos era despejado no filtro de porcelana, onde estava o papel filtrante, e com auxílio do compressor de ar a lixívia era sugada passando para a trompa e o kitassatu. Já o sólido, ficava retido no papel filtro, que era a Scheelita não solubilizada, bem como, a matéria orgânica presente, que se desenvolveu durante a etapa de incubação. Destaca-se que durante a filtragem fazia-se uma lavagem nos frascos erlenmayeres com água destilada, de forma a liberar as partículas presentes no fundo daqueles.

Ao final da filtragem retirava-se o papel filtrante com ajuda da espátula de alumínio, e transferia-o para uma cápsula de porcelana. Logo após, o sólido retido no papel filtrante foi direcionado ao forno Mufla sob temperatura de 700°C. Acrescenta-se ainda que a amostra Branco também foi filtrada e direcionada ao forno Mufla, conforme realizado para todas as outras amostras.

Fotografia 11 – Detalhe para os materiais utilizados durante a etapa de filtração.



Fonte: Autoria própria (2017).

Por fim, as lixívias (líquido filtrado) de cada amostra foram transferidas do Kitassatu para balões volumétricos de 100ml, e encaminhadas ao Laboratório de Balneabilidade do IFRN, onde desenvolveu-se a etapa de preparação e análise microbiológica das amostras lixiviadas.

### 3.4.7 Queima de material sólido retido das lixívias

Os sólidos retidos no papel filtro de cada amostra, proveniente da etapa de filtração, foram depositados em cápsula de porcelana, e encaminhados à queima no forno Mufla. Todas as amostras foram devidamente queimadas sob temperatura constante de 700° C por 50 minutos na Mufla, até a oxidação total da matéria orgânica.

Após terminar o tempo de queima na Mufla os sólidos retidos nas cápsulas foram direcionados à pesagem em balança analítica. Este procedimento foi realizado com objetivo de quantificar os valores da extração da scheelita para cada amostra analisada durante a pesquisa. Para tanto, foi realizado o seguinte cálculo de balanço de massa:

Para tanto foi feito o seguinte calculo balanço de massa: 1g de scheelita = Sheelita retida no filtro – Sheelita solubilizada.

A Mufla é considerada uma estufa para altas temperaturas, utilizado principalmente quando há necessidade de calcinação de determinadas substâncias. Ele consiste em uma câmara metálica com revestimento interno feito de material refratário, e equipada com resistências capazes de elevar a temperatura interior a valores acima de 1000°C (PROLAB, 2014).

É importante mencionar que as cápsulas de porcelana e os papéis filtrantes foram devidamente tarados antes de serem utilizados nas etapas de filtragem e queima.

Foi realizado teste de queima com amostra Branco (reagentes e água de mina) a fim de verificar a eficiência da queima dos sólidos na Mufla, e identificar se após esse procedimento ainda haveria presença de cinzas do papel filtro nas cápsulas de porcelana. E, destaca-se ainda que a amostra “branco” foi submetida às mesmas condições de queima (temperatura 700°C e tempo de 50 min).

Fotografia 12 – Amostras armazenada na Mufla para etapa de queima à 700°C.



Fonte: Autoria própria (2017).

A fotografia 12 acima exhibe as amostras do ensaio de condição de temperatura 25°C, as quais foram filtradas e armazenadas na Mufla para realização da etapa de queima dos sólidos e liberação da matéria orgânica. Acrescenta-se ainda que todas permaneceram na Mufla sob as condições de 700°C em 50 minutos.

Fotografia 13 – Amostras de Scheelita depois de retiradas da Mufla.



Fonte: Autoria própria (2017).

Logo acima, na fotografia 13, pode-se observar a situação das amostras de Scheelita biolixivadas após a etapa de queima na Mufla. Posteriormente, tais amostras foram destinadas a etapa de pesagem realizada na balança analítica, para a quantificação final de minério extraído através do método de biolixiviação.

### 3.2.10 Análise bacteriológica das amostras de lixívias

Para a realização da análise bacteriológica foram realizados os seguintes procedimentos: autoclavagem dos materiais (vidraria), preparação do meio de cultura, inoculação de alíquotas das amostras de cada ensaio desenvolvido, e por fim, a contagem das Unidades Formadoras de Colônias (UFC/ml) em meio de cultura específico denominado “Plate Count Ágar”.

No caso dessa pesquisa destaca-se que para inoculação das amostras adotou-se a técnica de análise microbiológica denominada de “*Pour Plate*”, a qual tem como objetivo a obtenção de colônias isoladas em estudos qualitativos ou para realizar a contagem de colônias em placas nos estudos quantitativos (RIBEIRO; STELATO, 2011).

A técnica de *Pour Plate* foi adotada em razão dos resultados obtidos durante a etapa inicial de análise da água da mina, em que se quantificou níveis elevados de bactérias heterotróficas.



#### 3.4.10.1 Meio de cultura para cultivo de amostras em placas de Petri

Para manutenção periódica das linhagens bacterianas e obtenção de inóculo para realização dos experimentos, foi utilizado o meio de cultura Plate Count Ágar, o qual normalmente é usado para crescimento de bactérias heterotróficas (TORTORA, et al., 2017).

Destaca-se que o meio de cultura é um material utilizado para crescimento dos microrganismos (bactérias e leveduras) em laboratório. No caso da pesquisa aqui descrita foi utilizado o meio de cultura para crescimento de bactérias heterotróficas. Os microrganismos que são introduzidos em um meio de cultura para dar início ao crescimento são chamados de inóculos. E, aqueles que crescem e se multiplicam no interior do meio de cultura são chamados de cultura (TORTORA, et al., 2017).

Foi preparado o meio de cultura Plate Count Ágar (figura 36), o qual também passou pelo processo de autoclavagem, a fim de inativar qualquer tipo de forma de vida presente, ou seja, deixando-o totalmente estéril. Sua composição e modo de preparo estão descritos a seguir:

##### a. Reagentes: Plate Count Ágar

- Peptona de caseína..... 5g/litro;
- Extrato de Levedura..... 2,5g/litro;
- D-Glucose..... 1g/litro;
- Ágar-agar..... 14g/litro.

##### b. Preparação:

Para preparar o meio de cultura utilizado nas placas de Petri, utilizou-se 22,5 g de Plate count ágar (em pó), que foi dissolvido em 1 litro de água deionizada. A quantidade de meio utilizado seguiu o padrão estabelecido pelo próprio fabricante. Então, utilizando-se um Becker (1000ml) e bastão de vidro fez-se a solução. Depois de serem rapidamente homogêneos, o meio de cultura foi direcionado ao aquecimento. O Becker contendo o meio foi colocado em cima de um tripé com tela de amianto, e aquecido pela chama do Bico de Bunsen, por aproximadamente 30 minutos. Por fim, com auxílio de uma pipeta graduada colocou-se 12 ml do meio nos tubos de ensaio, os quais seguiram para o processo de autoclavagem.

### 3.4.10.2 Cultivo em placas de Petri

No cultivo das amostras biolixiviadas foram utilizados os seguintes materiais:

- a) placas de Petri;
- b) pipeta graduada (2 ml e 5 ml);
- c) pipetador;
- d) tubos de ensaio;
- e) estante para tubos de ensaio;
- f) bico de Busen;
- g) meio de Cultura – Plate Count Ágar;
- h) água de diluição; e
- i) amostras de lixívias.

Para a realização do estudo quantitativo das lixívias foi retirada uma alíquota de 1 ml de cada amostra com auxílio da pipeta graduada, e transferidos para tubos de ensaio contendo água de diluição tamponada ( $10^{-1}$ ). Posteriormente, transferiu-se mais 1 ml da primeira diluição para outros tubos contendo mais 9 ml de água de diluição ( $10^{-2}$ ).

Das amostras diluídas e depositadas em tubos de ensaio retirou-se mais 1 ml para ser inoculado. Preparou-se as placas de Petri para plaqueamento, e agitando-se novamente os tubos e retirando 1 ml da diluição  $10^{-2}$  transferiu-se as alíquotas para às placas de Petri estéreis com auxílio de uma pipeta graduada já nomeadas. Em seguida foram inseridos nas placas 12 ml do meio de cultura Plate Count Ágar. As placas foram suavemente submetidas a movimentos rotatórios, visando a perfeita mistura da cultura com o meio Plate Count Ágar. Logo após, esperou-se alguns minutos até a solidificação total do meio de cultura na placa de Petri, e tampou-as, seguindo os critérios para incubação das mesmas na estufa sob temperatura de 35°C por 48 horas.

Por fim, as placas foram incubadas invertidas em bandeja umedecida com papel toalha para evitar desidratação por um período de 48 horas, sob temperatura constante em estufa microbiológica a 35°C. A quantificação das bactérias foi obtida a partir da contagem em aparelho específico (Contador de Colônias) o qual tem aumento de 10 a 15 vezes.

Posteriormente, foi feito o cálculo do número de unidades formadoras de colônias (RIBEIRO; STELATO, 2011).

Na figura 21 pode-se observar o modelo do cálculo que é feito para quantificar o número de colônias de bactérias que cresceram nas placas de Petri, após serem incubadas à temperatura de 36°C.

Quadro 8 – Fórmula do cálculo de quantificação das Unidades Formadoras de Colônias (UFC/ml).

$$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ de col\^onias contadas na placa}}{\text{Dilui\c{c}\~ao da amostra}} = \text{UFC/mL}$$

Fonte: Adaptado de Ribeiro e Stelato (2011).

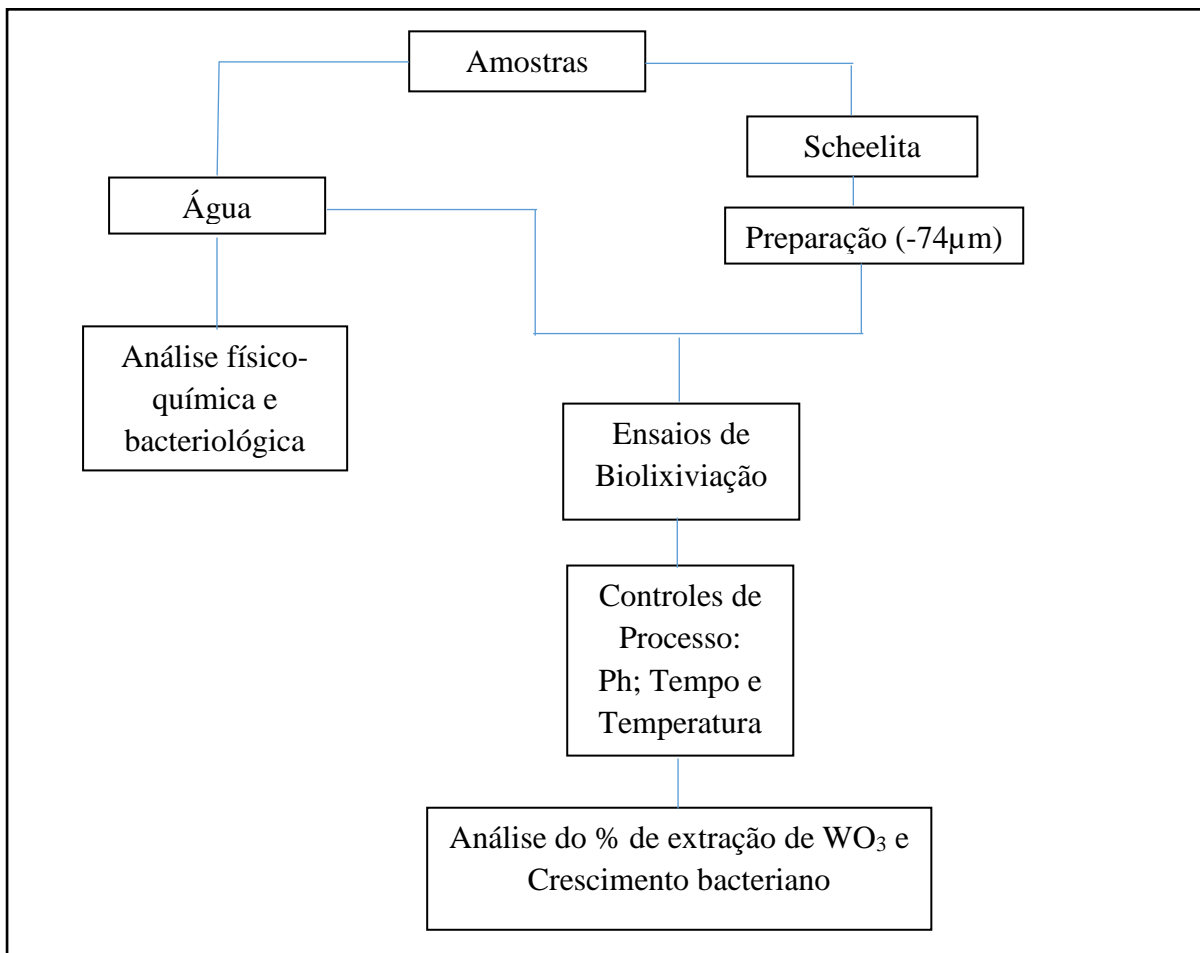
Vale salientar que os resultados expressos devem ser por Unidade Formadora de Col\^onia/ml em fun\c{c}\~ao de que cada c\^elula de bact\^erias forma uma col\^onia, pois, existem alguns tipos de bact\^erias que tendem a formar agregados, e assim, as contagens resultantes ser\~ao mais baixas do que o n\~umero de c\^elulas individuais, considerando que cada um dos agregados gera apenas uma col\^onia (RIBEIRO; STELATO, 2011).

Ap\^os as placas de Petri terem sido incubadas na estufa por um per\^odo de 48 horas, estas foram retiradas e direcionadas \~a etapa de contagem das Unidades Formadoras de Col\^onias/mL. Para tanto, foi utilizado um equipamento denominado de *Contador de Col\^onias* (digital), por meio do qual fez-se a contagem das col\^onias de bact\^erias heterotr\^oficas visualizadas na placa. Ao final soma-se o valor das UFC/mL que aparecessem por cada placa de Petri, as quais continham a al\^iquota de lix\^ivia.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse item encontram-se descritos os resultados, com as respectivas discussões a respeito dos dados primários e secundários coletados durante o desenvolvimento da pesquisa, bem como, dos ensaios experimentais de biolixiviação desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia Mineral do Instituto Federal do Rio Grande do Norte – IFRN (Campus Natal-Central). Informa-se, ainda, que os resultados obtidos durante a pesquisa serão apresentados nos itens subsequentes, de acordo com as etapas metodológicas executadas, e que foram esquematizadas no fluxograma abaixo.

Fluxograma 5 – Etapas da metodologia experimental desenvolvida nessa pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2017).

#### 4.1 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA DA MINA BREJUI

##### 4.1.1 Avaliação dos parâmetros físico-químicos da água processada da Mina Brejuí

Os resultados das análises físico-química da água do processo de beneficiamento da mina Brejuí estão apresentados no quadro abaixo.

Quadro 9 – Resultados da análise físico-química da água da Mina Brejuí.

PARÂMETROS	TÉCNICA UTILIZADA *	RESULTADOS
Condutividade elétrica (µS/cm)	Potenciometria	856,00
Cor aparente (mg/L Pt-Col/L)	Colorimetria	302,08
Turbidez (NTU)	Turbidimetria	41,00
pH (ND)	Potenciometria	6,65
Sólidos Totais (mg/L)	Gravimetria	474,00
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	Gravimetria Potenciometria	421,00
Alcalinidade Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Titulometria	17,56
Dureza total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Titulometria	273,00
Cálcio (mg/L Ca <sup>+2</sup> )	Titulometria	49,27
Magnésio (mg/L mg <sup>+2</sup> )	Titulometria	36,69
Sódio (mg/L Na <sup>+</sup> )	Fotometria de Chama	57,00
Ferro (mg Fe <sup>+2</sup> )	Colorimetria	<0,05
Sulfato (mg/L SO <sub>4</sub> <sup>+2</sup> )	Titulometria	218,85
Cloreto mg/L Cl-	Titulometria	108,33
Carbonato mg/L CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Titulometria	<0,01

Fonte: Autoria própria (2017).

A metodologia utilizada pelo laboratório responsável pela análise foi APHA et al. (2012), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22th Washington D C: American Public Health Associations, 2012. E, os padrões de referência adotados foram da Portaria Ministério da Saúde n° 2.914, de 12 de dezembro de 2011 (Federal) - Padrão de Potabilidade.

Como pode ser observado no quadro 8, a água da mina apresentou valores significativos para todos os parâmetros, principalmente, para a condutividade elétrica que foi da ordem de 856,00 µS/cm. A elevada condutividade deve-se a dissolução de eletrólitos em água, e dependerá da concentração de eletrólitos totais dissolvidos. Esse parâmetro demonstra a elevada disponibilidade iônica na solução, como pode ser verificada com as elevadas

concentrações de cálcio e magnésio. Estes também contribuem para a elevada dureza da água e são deletérios nos processos de flotação (PINHEIRO, BALTAR, LEITE, 2012).

Conforme estudos realizados por Pinheiro e Leite (2009) foi possível identificar que há altos teores de bicarbonatos, o que caracteriza uma condição de dureza temporária (carbonatada) nas águas da região. O parâmetro cloreto obteve-se valor abaixo do limite estabelecido na Portaria do Ministério da Saúde, que é de 250 mg/L Cl<sup>-</sup>. E, como verificado no Quadro 9, o nível de cloro na água da mina está relativamente baixo, pois totalizou apenas 108,33 mg/L Cl<sup>-</sup>.

Para o parâmetro cor aparente da água o valor obtido nas análises foi da ordem de 302,08 (mg/L Pt-Col/L). A turbidez apresentou valor significativo, da ordem de 41,00 NTU, o que representa níveis de partículas em suspensão elevados, podendo assim prejudicar a condição estética da água.

Em relação ao pH, a água apresenta valor próximo da neutralidade, da ordem de 6,65. Este parâmetro representa a concentração de íons presentes em uma solução. É um parâmetro significativo pois está relacionado à fenômenos de incrustação e corrosão em instalações hidráulicas e sistemas de distribuição.

Tal fato pode estar relacionado ao parâmetro alcalinidade total, cujo valor foi 17,56 mg/L CaCO<sub>3</sub>. A alcalinidade corresponde a medida da capacidade em reagir com ácidos fortes para atingir determinado valor de pH. Esse parâmetro, quando presente na água, contribui para inibir a corrosão de equipamento, industriais, porém, quando apresenta valores elevados poderá impossibilitar seu uso para irrigação. Quando a alcalinidade está alta também pode indicar a contaminação por efluentes industriais.

Já a quantidade de Cálcio presente na água foi de 50 mg/L Ca<sup>+2</sup>. Os níveis elevados de cálcio, bem como, de carbonato (na água da mina) podem ser em razão do tipo das rochas encontradas na região da mineração. Na área, destaca-se a ocorrência de rochas calciossilicatadas, que podem estar influenciando o pH neutro da água de processo da mina. Além disso, destaca-se que o cálcio junto com o magnésio também contribui para o parâmetro agregado da dureza da água.

Este parâmetro apresentou valor da ordem de 273,00 mg/L, demonstrando que a água da mina é dura, e supõe-se ainda que pode estar sendo influenciada pelos elevados níveis de cálcio e magnésio verificados na amostra analisada. Estes obtiveram valores da ordem da ordem de 49,27 mg/L Ca<sup>+2</sup> e 36,69 mg/L mg<sup>+2</sup>, respectivamente.

Para o parâmetro cloreto obteve-se valor abaixo do limite estabelecido na Portaria do Ministério da Saúde, que é de 250 mg/L Cl<sup>-</sup>, e está diretamente correlacionada com a dureza da

água. O cloreto é muito corrosivo para a maioria dos metais em sistemas de alta pressão e temperatura, tais como caldeiras e equipamentos de extração de petróleo. Concentrações de cloretos em águas potáveis podem indicar a presença de efluentes industriais. Altas concentrações de cloretos podem causar corrosão em concreto, ferro e argamassas. Esta propriedade está diretamente correlacionada com a dureza da água, pode-se esperar este tipo de corrosão em águas com dureza menor que 200 ppm de CaCO<sub>3</sub> e mais de 200 ppm de Cloretos.

Nota-se no Quadro 9 que o nível de cloro na água da mina totalizou apenas 108,33 m/L Cl. Esse parâmetro é considerado um produto químico tóxico utilizado na remoção de resíduos de graxa e óleos, fungos, mofos e lodos, e também para a eliminação de bactérias, vírus e germes. Além disso, suaviza os efeitos adversos do ferro, manganês, amônia e sulfetos.

Na amostra da água também foi analisada a presença do elemento ferro, cujo valor da ordem de 0,01 mg/l. O ferro é encontrado na natureza na forma de óxido e em minerais onde ele aparece combinado com silício e enxofre. Destaca-se que a concentração de ferro interfere na turbidez e cor da água, e os níveis elevados desse fator indicam a contaminação por efluentes industriais ou por outras minerações que estejam instalados nas proximidades da mina

Outro parâmetro importante é o sulfato, o qual apresentou valor de 218,85 mg/L SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; é um ânion muito comum na natureza, ele pode estar presente em águas naturais em concentrações muito variáveis. É importante destacar que a presença de íons sulfato e ferro na água são favoráveis ao crescimento de bactérias, uma vez que tais elementos são fonte energética para esses organismos.

#### 4.1.2 Avaliação dos parâmetros bacteriológicos da água processada da Mina Brejuí

O resultado da análise bacteriológica da água do processo de beneficiamento da mina Brejuí estão apresentados no quadro 10.

Quadro 10 – Resultado da análise bacteriológica da água da Mina Brejuí.

PARÂMETROS	TÉCNICA UTILIZADA *	RESULTADOS
Bactérias Heterotróficas (UFC/ml)	<i>Pour Plate</i>	496

Fonte: Autoria própria (2017).

Ao analisar o quadro acima e considerando a Portaria nº 2.914, de 12-12-2011 verifica-se que o parâmetro analisado apresentou valor elevado, e está no limite do que é estabelecido pela respectiva legislação, que é de 500 UFC/mL. Por outro lado, o resultado mostrou-se

favorável para a pesquisa, pois esses microrganismos são frequentemente usados em processos industriais e também minerais, como por exemplo na biolixiviação.

A água utilizada na planta de beneficiamento tem uso exclusivo no processo, sendo continuamente reaproveitada na planta através de um sistema fechado de circulação pela utilização de espessadores. Salienta-se que a presença de microrganismos heterotróficos em concentração da ordem de 496 UFC/mL na água de mina pode ser considerada como um fator favorável a aplicação do processo de biolixiviação.

Corroborando com essa afirmação, Fernandes (2009), aponta que esses tipos de microrganismos heterotróficos estão presentes nos ambientes de lixiviação e são importantes no momento de determinar os fatores que condicionam a solubilidade dos metais. Esse tipo de microrganismos é considerado ainda como imprescindíveis em aplicações biotecnológicas para recuperação de metais (MARGESIN; SCHEIMER, 2001).

Outro importante destaque feito por Fernandes (2009), é que os microrganismos heterotróficos quimiossintéticos constituem a grande maioria de bactérias tratadas habitualmente na microbiologia geral ou aplicada. Conforme observado por Batista (2009), tais microrganismos são responsáveis pela biolixiviação de alguns metais, porém, também geradores da drenagem ácida de mina.

Conforme descrito por Fernandes (2009), os fungos e bactérias heterotróficas colaboram significativamente para a degradação direta de rochas e minerais. Além disso, mencionou que os microrganismos heterotróficos podem realizar a alteração e degradação de minérios alumino-silicatados. Esses microrganismos são importantes no processo de biolixiviação, uma vez que realizam a dissolução dos minérios, para extrair posteriormente os metais que possuam interesse econômico para a indústria mineira.

É importante destacar que tais microrganismos utilizam os minerais como combustível, haja vista que absorvem elétrons necessários à sua sobrevivência. Além disso, atuam liberando calor e metais, sem que seja necessária uma fonte externa ao processo de biolixiviação. Este poderá acontecer de forma direta ou indireta por ação de microrganismos heterotróficos (FERNANDES, 2009).

Também foram apresentados nos estudos realizados por Carvalho et al., (1990) a presença de fungos heterotróficos decompositores de minerais silicatados, que supostamente atuaram na solubilização de scheelita.

É importante destacar que as bactérias heterotróficas necessitam de compostos orgânicos complexos como fonte principal de carbono, apesar de algumas delas usarem Dióxido



de Carbono (CO<sub>2</sub>) em pequenas quantidades. A fonte de energia pode ser fotossintética ou quimiossintética (FERNANDES, 2009).

Conforme observado por Johnson e Roberto (1997), as bactérias heterotróficas podem ser encontradas em ambientes ácidos, e por isso chamadas de acidófilas. Também podem ser classificadas no grupo das bactérias mesófilas, ou seja, possuem faixa de crescimento ótimo com temperaturas de 30°C, mas podem viver em ambiente que tenham entre 20 e 40°C (JOHNSON, 2006).

Ainda conforme os autores Johnson e Roberto (1997), uma grande diversidade de microrganismos heterotróficos está envolvida na geração de drenagem ácida de mina e são aplicados em operações biohidrometalúrgicas (JOHNSON, 2006). Do ponto de vista ambiental mais generalizado, os microrganismos que são responsáveis pela biolixiviação também ocasionam a drenagem ácida de mina (BATISTA, 2009).

Desta forma, supõe-se que a água da mina é favorável ao desenvolvimento de bactérias heterotróficas, bem como, para uso em processos futuros de biolixiviação. Vale destacar Johnson (1995), o qual diz que as bactérias mais importantes na oxidação de ferro e enxofre são descritas como mesófilas e acidófilas. Além de serem imprescindíveis em aplicações biotecnológicas para recuperação de metais como cobre, níquel e zinco (MARGESIN; SCHEIMER, 2001).

O resultado encontrado é considerado relevante, pois conforme Batista (2009), esses microrganismos são responsáveis pela biolixiviação de alguns metais, mas também causadores da drenagem ácida de mina. Segundo Fernandes (2009), os microrganismos heterotróficos estão presentes nos ambientes de lixiviação, além de serem importantes no momento de determinar os fatores que condicionam a solubilidade dos metais.

Vale salientar que a água coletada e analisada no desenvolvimento desta pesquisa não é utilizada para consumo humano pela empresa. A água é aplicada apenas na planta de beneficiamento de Scheelita existente na área da mineração, e que é continuamente circulada no processo industrial em um sistema fechado. Por fim, a presença dos microrganismos heterotróficos quantificados na amostra de água da mina durante a análise bacteriológica, não apresenta nenhum problema aos objetivos dos ensaios de biolixiviação, e sim apresentam influência positiva para o desenvolvimento dos experimentos. Contudo, estes microrganismos podem trazer prejuízo apenas para a saúde humana.

## 4.2 ENSAIOS DE BIOLIXIVIAÇÃO

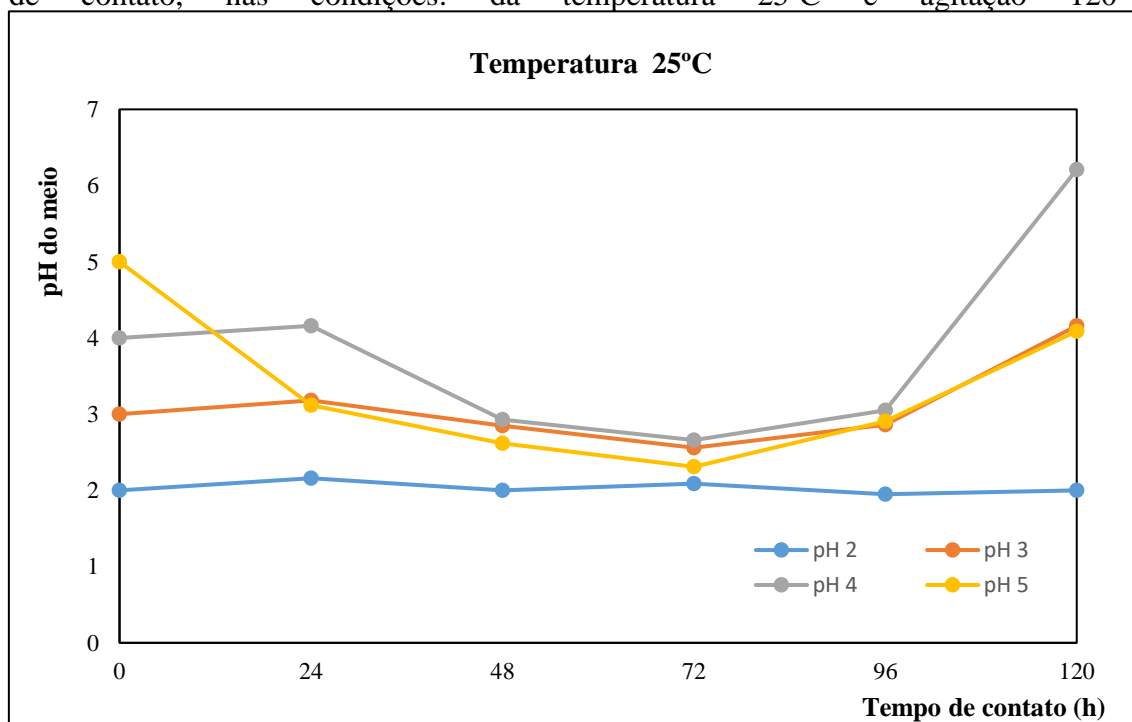
Nos ensaios experimentais realizados durante a pesquisa objetivou-se avaliar o potencial da técnica hidrometalúrgica de biolixiviação para extração de Scheelita. Para tanto, determinou-se três variáveis, que são: temperatura, pH do meio e tempo em horas de agitação.

Então, a partir dos dados coletados foram elaborados os gráficos representativos demonstrando os resultados para cada condição analisada, ou seja, de temperatura 25°C, 30°C e 35°C em função do pH, tempo, % de extração de Scheelita, bem como, a quantidade de Unidades Formadoras de Colônias – UFC/ml.

### 4.2.1 Análise do comportamento da biolixiviação da Scheelita sob efeito da temperatura de 25°C em relação as variáveis pH, percentual de extração e quantidade de UFC/mL versus tempo (h)

Abaixo observa-se o gráfico 1 que foi elaborado a partir dos resultados do ensaio para condição de temperatura 25°C, considerando a variação do potencial hidrogeniônico – pH do meio e o tempo (horas) de contato da solução com o minério Scheelita.

Gráfico 1 - comportamento do pH do meio na biolixiviação de scheelita em função do tempo de contato, nas condições: da temperatura 25°C e agitação 120 rpm.

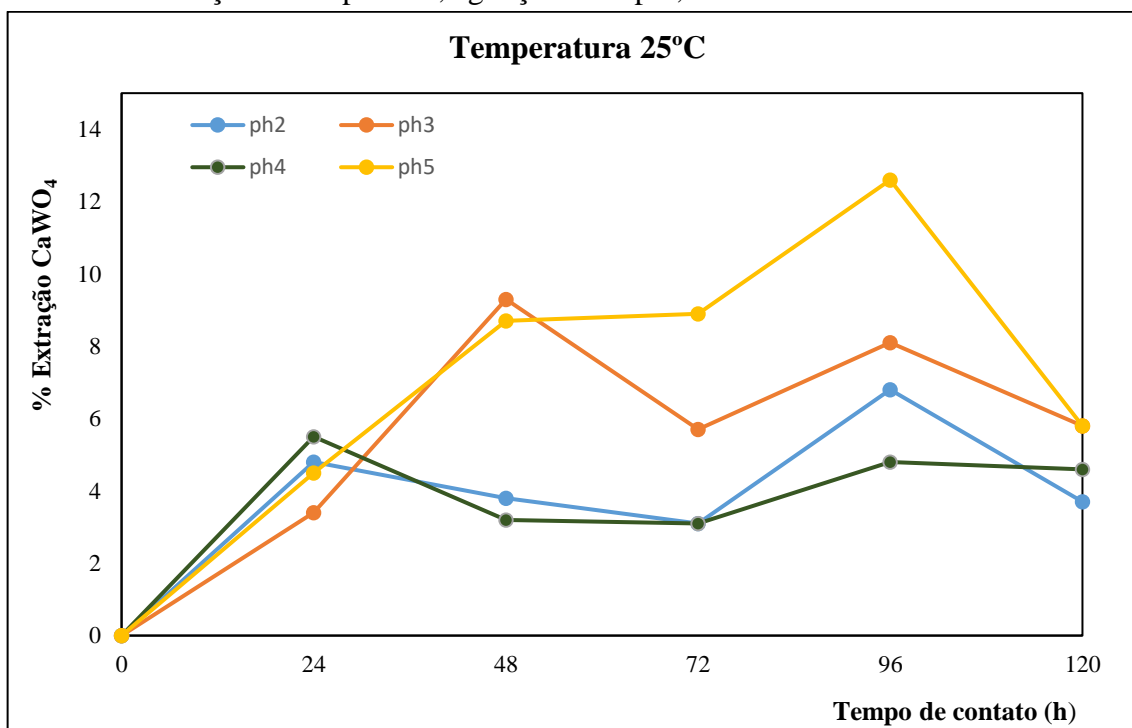


Fonte: Autoria própria (2017).

A partir da figura acima verifica-se que nas primeiras 24h de ensaio em frasco agitado não houveram alterações significativas para as amostras de pHs 2, 3 e 4, pois mantiveram-se constantes. Diferentemente do que ocorreu com a amostra pH 5, em que apresentou um decréscimo significativo, atingindo valor da ordem de 3,12. Evidencia-se com isto que a solução da amostra em questão tornou-se mais ácida em menor tempo, quando comparada às outras que já tinham valores iniciais mais baixos.

Após 72 h de ensaio, o valor do pH 5 continuou a decrescer até 2,62. Entretanto, ao completar 120h de incubação, esta amostra apresentou um crescimento significativo no valor, atingindo cerca de 4,09. Ainda pôde-se verificar que o pH do meio para os pH's 4 e 5 até 96 h tenderam ao decréscimo, enquanto os de pH 2 e 3 se mantêm constante até este tempo de contato. A partir das 96 h o pH's 3, 4 e 5 passam a apresentar trajetória crescente, enquanto o pH 2 se mantêm constante. Ao atingirem 100h de tempo de contato os pHs 3, 4 e 5 começaram a apresentar um crescimento contínuo até completarem as 120h de ensaio, com valores da ordem 4,16, 6,21 e 4,09 respectivamente.

Gráfico 2 - Percentual de extração de Scheelita em função do tempo de incubação, nas condições: Temp. 25°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Verifica-se no gráfico 2 que a amostra de pH 5 obteve o maior percentual de extração da Scheelita, da ordem de 12,6% durante 96 h de incubação. Percebe-se ainda que com o

decorrer do tempo de ensaio, essa curva do pH 5 tende a uma redução significativa do percentual de extração. E, ao encerrar o ensaio em 120 h, essa mesma amostra reduz o seu valor para a metade, em que há extração de apenas 5,8% de Scheelita.

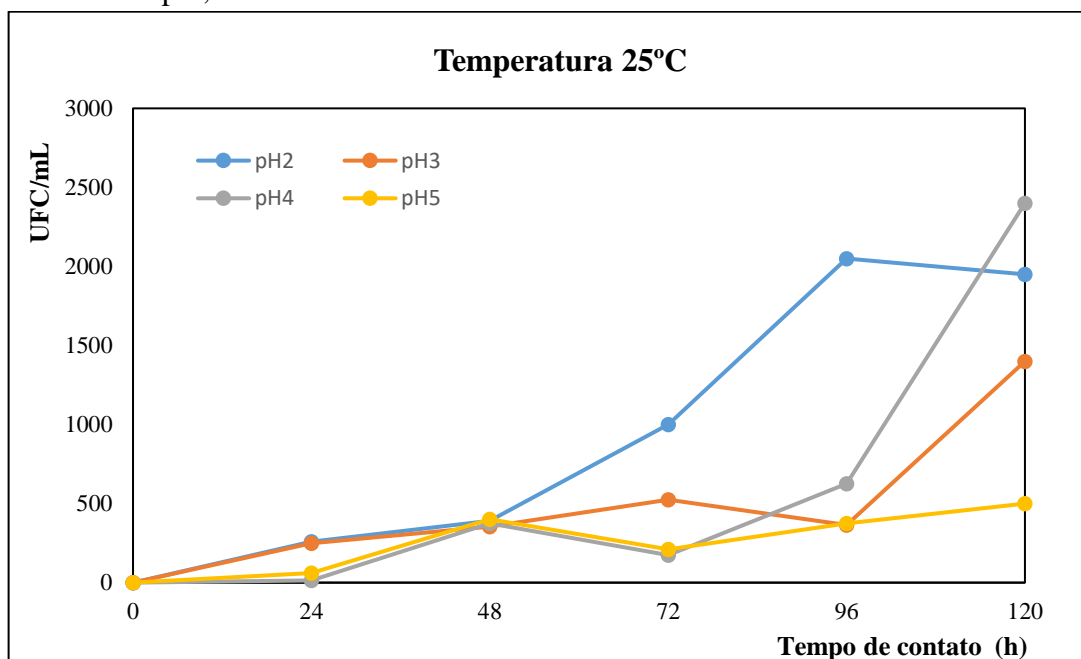
Ressalta-se que o menor percentual de minério extraído foi da amostra pH 4, a qual durante 72h apresentou apenas 3,1% de minério extraído. Já amostra representante do pH 3 em tempo de 48 h, obteve 9,3% de extração, sendo este considerado um valor expressivo, uma vez que essa amostra conseguiu atingir, em menor tempo de ensaio, o maior valor de extração.

Evidenciou-se ainda que a partir das 72h de agitação na incubadora, os pHs 2, 3, e 4 apresentaram um aumento na extração da Scheelita. De forma geral, observou-se que a amostra de pH 5 apresentou o maior percentual extrativo de minério durante o ensaio, com valor da ordem de 12,6% em 96 h de agitação.

Salienta-se ainda que todas as amostras analisadas ao atingirem o tempo de 96h apresentaram decréscimo nos seus percentuais de extração da Scheelita até completar o tempo final do ensaio (120h).

Por fim, ao observar o gráfico 2, verifica-se que a biolixiviação da scheelita apresenta o melhor resultado em pH inicial de 5, tendo curva ascendente até 96h no tempo de contato, para uma biolixiviação de 12,6 % de scheelita. Nas 24h seguintes a solubilização sofre uma inflexção da curva apresentando uma biolixiviação de 5,8%.

Gráfico 3 - UFC/mL em função do tempo de incubação, nas condições: Temp. 25°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Em análise ao gráfico 3 observa-se que o crescimento microbiano para todas as amostras foi pouco expressivo nas primeiras 24h ensaio. Para os pH's iniciais 2 e 3, os valores foram da ordem de 260 e 250 UFC/mL, respectivamente. Já o pH inicial 4 apresentou 15 UFC/mL, sendo esta a menor quantidade, para o referido tempo.

Considerando as 48h de incubação das amostras, verificou-se um aumento da quantidade de colônias para os pH 2 e 3, que foi da ordem 390 e 355 UFC/mL, respectivamente; e para os pH 4 e 5, os valores foram bastante expressivos, atingindo cerca de 375 e 400 UFC/mL, com apenas 48h.

Vale destacar que, o padrão de pH 2 em 72h de incubação apresentou valor da ordem de 1.000 UFC/mL. Ademais, a amostra do pH 3 também demonstrou um crescimento significativo, totalizando cerca de 525 UFC/mL. Os pH's 4 e 5 apresentaram valores em decaimento quando atingiram 72h, com total de apenas 175 e 210 UFC/mL, respectivamente. Para o mesmo tempo, o pH 2 foi o que apresentou maior quantidade de unidades formadoras de colônias, com valor da ordem de 1.000 UFC/mL.

Levando-se em consideração o aumento do tempo de incubação para 96h, evidenciou-se que o padrão pH 2 apresentou uma curva em crescimento, encerrando com a quantidade de colônias bacterianas para 2.050 UFC/mL. Por fim, a amostra do pH 4 apresentou a curva de crescimento com maior evolução em função do tempo (96h), totalizando 600 UFC/mL. E, esta encerrou o tempo de incubação às 120 h, com o maior valor de UFC/mL, em torno de 2.400 UFC/mL.

Observa-se ainda que o pH 5 demonstrou melhor comportamento em meio de cultura específico, pois a curva de crescimento tem formato ascendente para o valor de UFC/mL. Acrescenta-se, ainda, que em 96 h de incubação foram atingidas taxas da ordem de 500 UFC/mL para o mesmo pH 5.

Salienta-se que o padrão pH 4 obteve a maior quantidade de unidades formadoras de colônias, totalizando 2.400 UFC/mL no tempo de 120h. Além disso, em todas as condições de pHs (2, 3, 4 e 5) está ocorrendo aumento da quantidade de colônias durante o ensaio, porém mais intensamente para os pH iniciais 2, 3 e 4.

Vale destacar o trabalho realizado com scheelita e água de mina proveniente de uma mina portuguesa, a qual apresentou 5%  $WO_3$  como melhor resultado de extração para 240h de tempo de contato (CARVALHO et al., 1990).

Assim, os resultados encontrados para a condição de temperatura 25°C corroboraram com dados apresentados por Carvalho et. al., (1990), pois tal estudo também identificou uma diminuição do pH da solução durante os 3º e 4º dias de ensaio. E também foi observado que

houve um aumento de tungstênio dissolvido na lixívia das amostras, segundo Carvalho et al., (1999).

É importante destacar que mesmo em locais com elevado nível de acidez existem organismos que sobrevivem a tais condições, como é o caso dos microrganismos heterotróficos classificados como acidófilos, sendo os mais utilizados em processos de biolixiviação de minérios.

Vale salientar que o processo de biolixiviação ocorre com finalidade de obtenção de metais existentes em minérios na forma de compostos insolúveis, que são solubilizados pela ação direta ou indireta de uma comunidade de microrganismos. Como produto dessa atuação microbiana, ou seja, da oxidação dos minerais ocorre a liberação dos metais e a geração de um líquido ácido conhecido por Drenagem Ácida de Mina (RAWLINGS; JOHNSON, 2007).

Com a redução do pH, segundo Carvalho et al., (1990) há redução da concentração de Scheelita, e assim formação de produtos ácidos na solução. Supõe-se que a redução da concentração do minério na solução pode ser em razão da adsorção da Scheelita ao minério pela grande quantidade de biomassa desenvolvida nas amostras.

Diante dos resultados apresentados verifica-se que o ambiente analisado é favorável ao crescimento microbiano, e que para o ensaio realizado ainda não se atingiu a fase estacionária. Assim, verifica-se a necessidade realização de novos ensaios buscando a elevação do tempo de contato, para que se possa averiguar a aplicação da biolixiviação da scheelita.

Além disso, pode-se supor que o meio está fornecendo condições adequadas para o crescimento desses microrganismos, inclusive a temperatura de incubação, pois de acordo com Fernandes (2009), a temperatura influencia diretamente nesse desenvolvimento, especialmente quanto a velocidade de crescimento e a produção de biomassa no meio de cultivo. Qualquer variação de temperatura pode afetar diretamente o metabolismo bacteriano, e até mesmo provocar a morte desta célula procariótica.

Vale destacar que todos os seres vivos precisam de nutrientes para o seu crescimento e para manter suas funções vitais. Tais nutrientes são absorvidos pelas células para uso na construção do seu material celular e na obtenção de energia. Também é importante considerar que esses nutrientes estejam na concentração adequada e não tóxica, além de estar em quantidades que a carência de algum deles não impossibilite a utilização dos outros (FERNANDES, 2009).

Ao comparar os resultados expostos no gráfico 3, com uma curva típica de crescimento microbiano utilizada em estudos bacteriológicos, verifica-se que os microrganismos das amostras lixivadas podem estar em crescimento exponencial, isto é, na fase chamada “Log”,

em que há aumento do número de células acarretando o aumento da atividade metabólica bacteriana, e consequente solubilização da scheelita no meio aquoso.

Conforme Fernandes (2009), a concentração de íons de hidrogênio é uma variável considerada muito importante para o crescimento microbiano. Com isto, supõe-se que no meio de cultura utilizado durante a biolixiviação está sendo disponibilizado tais íons em quantidades suficientes, uma vez que há crescimento acentuado ao longo do tempo de contato avaliado.

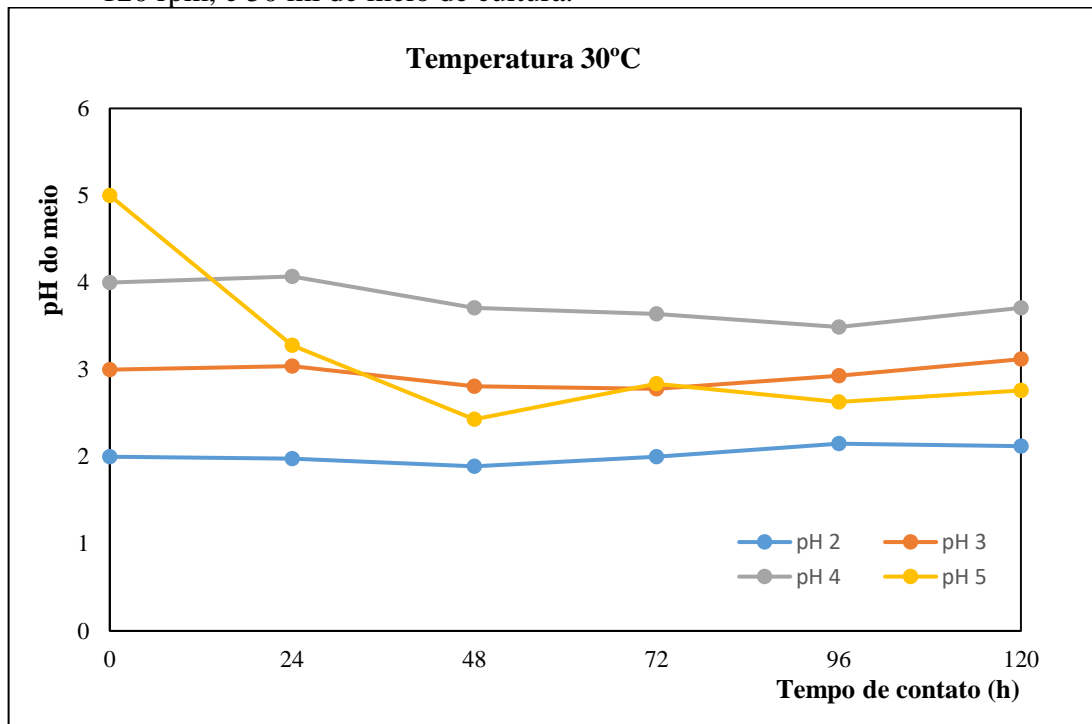
Ao considerar o descrito por Johnson e Roberto (1997), os microrganismos podem ser classificados quanto aos parâmetros pH, temperatura e fonte energética. Para o primeiro parâmetro, têm-se organismos que sobrevivem à ambientes ácidos, sendo, portanto, considerados acidófilos. Por este motivo procurou-se adotar na pesquisa a faixa de pH de 2-5, além do que é a recomendada por outros autores para o processo de biolixiviação.

Segundo Johnson (2006), quanto a temperatura, os microrganismos acidófilos podem ser classificados em mesófilos (20-40°C), por isso escolheu-se nos ensaios as temperaturas (25°C, 30°C e 35°C). Conforme o mesmo autor, Johnson (1995), as bactérias mais importantes são descritas como mesófilas, e apresentam temperatura ótima para crescimento em torno de 30°C. Também são aplicadas biotecnologicamente na recuperação de metais. Além disso, vários microrganismos já foram estudados e isolados de ambientes ácidos e, posteriormente utilizados em operações biohidrometalúrgicas.

#### **4.2.2 Análise do comportamento da biolixiviação da Scheelita sob efeito da temperatura de 30°C em relação as variáveis pH, percentual de extração e quantidade de UFC/mL versus tempo (h)**

O gráfico 4 abaixo, foi baseado nos resultados do ensaio para condição de temperatura 30°C, considerando a variação do potencial hidrogeniônico – pH do meio e o tempo (horas) de contato da solução com o minério Scheelita.

Gráfico 4 – Efeito da temperatura 30°C e do pH inicial em função do tempo (h), com agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Conforme verificado no gráfico acima, no ensaio realizado para temperatura 30°C as amostras de pHs 2, 3 e 4 não sofreram alterações significativas, ou seja, mantiveram-se constante até completar as 120h de ensaio. Já a amostra de pH 5, nas primeiras 24h de incubação, apresentou uma inflexão significativa, atingindo valor da ordem de 3,28. A amostra continuou a reduzir o valor do pH ao completar 48h de ensaio, para o mínimo de pH 2,43, e depois apresentou um reduzido acréscimo para pH 2,84. Já em 72h de agitação na incubadora. E, encerrou as 120h de ensaio com o pH 2,76.

Destaca-se que na condição de temperatura 30°C, a amostra de pH 2 apresentou a maior faixa de acidez que foi pH 1,89 em apenas 48h de ensaio. Entretanto, o valor mais próximo da neutralidade foi da ordem de 4,07 em apenas 24h de ensaio pela amostra de pH 4. A amostra de pH 3 apresentou nas 48h o seu menor valor de acidez, da ordem de 2,81, e encerrou as 120h de incubação com valor mais elevado do que o inicial, totalizando 3,12.

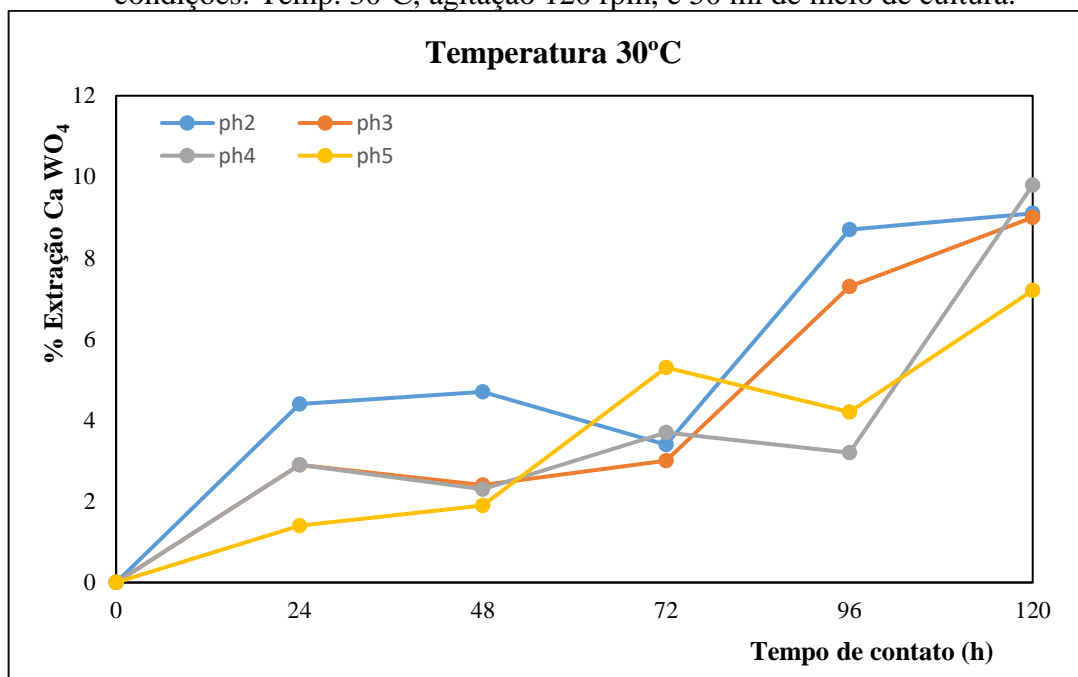
Evidencia-se que todas as faixas de pHs (2, 3, 4 e 5) mantiveram-se constantes a partir das 72h de incubação, uma vez que não se verifica inclinações representativas nas curvas do gráfico, bem como, nos seus valores de potencial hidrogeniônico (pH) até as 120h de agitação na incubadora. Então, para essa significativa variação de pH das amostras, supõe-se que esteja



havendo desenvolvimento de microrganismos heterotróficos na solução estudada, uma vez que estes liberam substâncias ácidas como produto de seu metabolismo.

No gráfico 5 (abaixo) estão representados os resultados do ensaio para condição de temperatura 30°C, considerando a variação do percentual de extração da Scheelita ( $WO_3$ ) em relação ao tempo (horas) de contato da solução.

Gráfico 5 - Percentual de extração de  $WO_3$  em função do tempo (h) de incubação, nas condições: Temp. 30°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Considerando ainda o gráfico 5, afirma-se que o melhor comportamento para a lixiviação bacteriana da Scheelita foi sob condição de pH inicial 4, durante 120h de incubação, onde obteve-se aproximadamente 9,8% de extração da Scheelita ( $WO_3$ ).

Para o pH inicial 2 notou-se um aumento significativo do valor e do percentual de extração de Scheelita nas primeiras 24h têm-se 4,4% e, ao encerrar o ensaio com 120h de incubação os valores de extração passam para 9,1%.

Já em relação ao pH 3 evidenciou-se nas primeiras 24h de ensaio uma extração em torno de 3%, e atingindo 9% em 120h de teste em frasco agitado. A amostra representante do pH 4 inicia as primeiras 24h com 3 % de extração, e encerra os ensaios com percentual de extração com valor aproximado de 9,8%. Este mesmo valor também foi encontrado para o pH 2 nas últimas 120h de incubação.

Para amostra de pH 5, nas primeiras 24h foram obtidos apenas 1,4% de extração de  $WO_3$ . A mesma amostra encerrou as 120h com valor total de 7,8 %. Com isto, pode-se dizer que essa amostra se mostrou menos favorável à lixiviação bacteriana, nas condições já destacadas, quando comparado as outras amostras de pH.

A partir da avaliação dos percentuais de extração de Scheelita na condição de temperatura 30°C, nota-se que os maiores níveis de solubilização foram das amostras pH's 2 e 4, da ordem de 9,8 e 9,1%, respectivamente, em 120h.

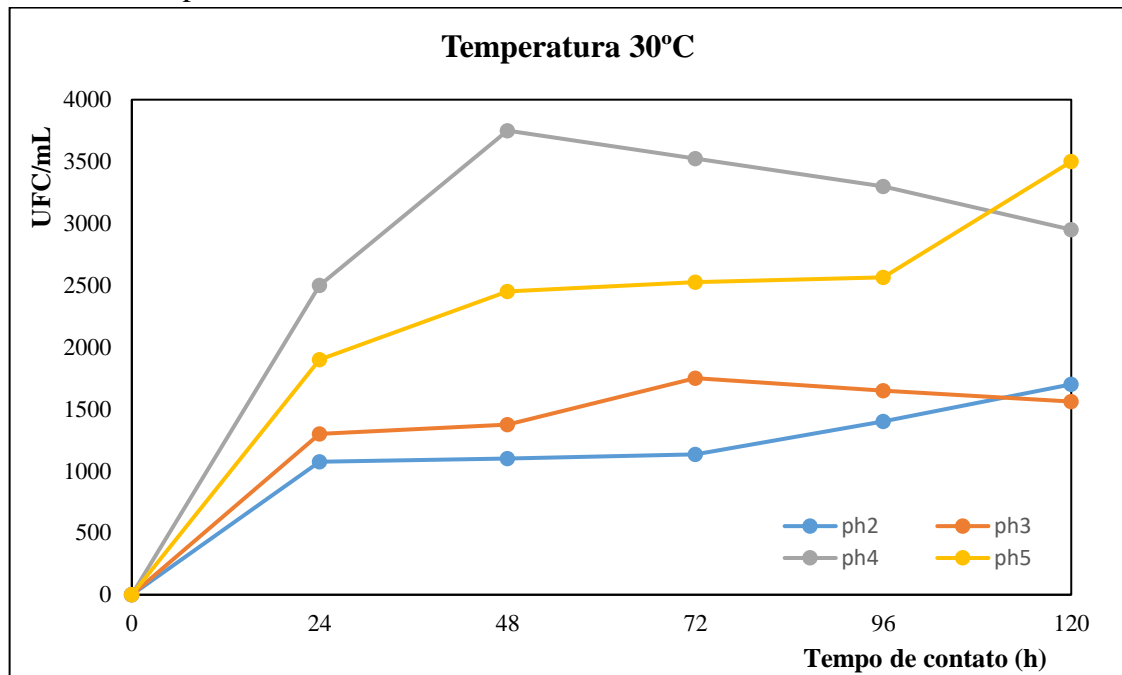
Os resultados encontrados nesse ensaio de temperatura 30°C, não corroboraram com os encontrados por Carvalho et al., (1990), pois este obteve o percentual de extração mais elevado da ordem de 5%, para um tempo de 8 a 10 dias de ensaio, sob agitação de 120 rpm e na temperatura de 25°C. Torna-se importante destacar que o autor citado não realizou ensaios sob a temperatura em questão (30°C).

Um ponto importante a ser enfatizado é que os elevados níveis de extração alcançados nos ensaios da pesquisa (aproximadamente 10%), em relação aos que foram obtidos por Carvalho et al., (1999), da ordem de 5%, podem ter sido influenciados pela granulometria utilizada. Pois, esse autor realizou os seus experimentos com tamanho granulométrico maior do minério do que o utilizado na pesquisa em tela.

Tal fato também foi evidenciado por outros autores, como Oliveira et al., (2010), o qual descreveu que a extração de metais é mais eficiente quanto mais finamente estiver dividida a amostra mineral, uma vez que um número maior de sítios de reação estará exposto para uma mesma massa total de partículas.

Já o gráfico 6 apresenta os dados do ensaio para condição de temperatura 30°C, considerando a variação da quantidade de Unidades Formadoras de Colônias presentes na solução lixiviada contra o tempo (horas) de contato desta com o minério Scheelita.

Gráfico 6 - UFC/mL em função do tempo de incubação, nas condições: Temp. 30°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Conforme gráfico 6, para a temperatura de 30°C o maior valor de colônias bacterianas provenientes das lixívias das amostras foi da ordem de 3.750 UFC/mL, para padrão de pH 4 durante 48h de ensaio em frasco agitado. A condição de pH 2 quantificou-se apenas 1.075 UFC/mL em 24h de ensaio, e 1700 UFC/mL no tempo total de 120h.

Todavia, para os pHs 4 e 5, evidencia-se um decréscimo da quantidade de colônias a partir das 96h de experimentos. E, nos pHs 2 e 5 observa-se que o crescimento das heterotróficas começa a permanecer constante a partir das 48 horas de incubação, e seguindo até as 120h. Para o pH 5 os valores são da ordem de 3500 UFC/mL, e para curva do pH 2 também há uma significativa constância na curva de crescimento, durante a mesma referência de tempo do pH 5.

Constatou-se que houve uma quantidade mais expressiva de Unidades Formadoras de Colônias para as amostras das lixívias dos pHs 4 e 5. Verificou-se com isso, que há uma tendência de crescimento significativo de UFC/ml a medida que prolonga-se o tempo de agitação das amostras na incubadora.

Evidencia-se que o meio de cultura utilizado no processo de lixiviação bacteriana favorece ao crescimento das bactérias heterotróficas, quando são submetidos as condições de temperatura 30°C, principalmente. Ainda, pode se supor que as quantidades mais expressivas de UFC/mL foram vistas nas amostras que iniciaram com pH padrão 4 e 5 respectivamente.

Essa suposição corrobora com as ideias propostas por Johnson (2006), quando afirmou que os microrganismos podem promover a mobilização ou imobilização dos metais nos ecossistemas, causando direta ou indiretamente sua dissolução ou precipitação. Além disso, a modificação no pH do microambiente é provocada por microrganismos, tendo em vista que a grande maioria dos metais são solúveis em pH ácido do que nos alcalinos. Também foi destacado pelo respectivo autor que os processos metabólicos microbianos como a fermentação, nitrificação e oxidação geram acidez.

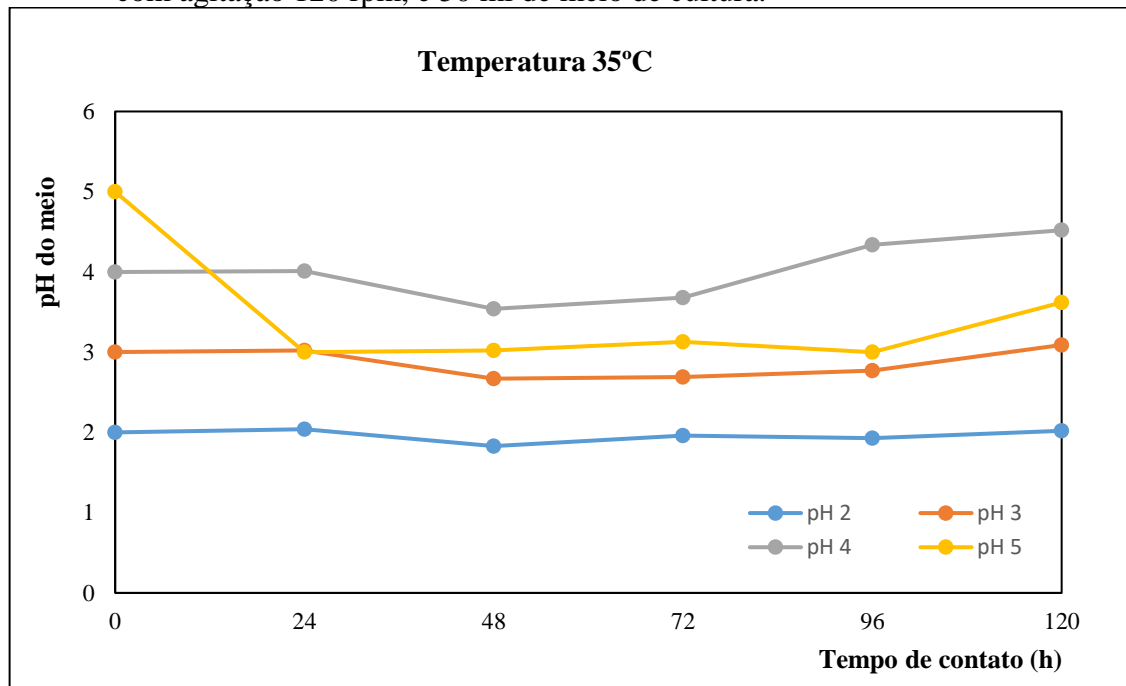
A estabilização dos pHs iniciais (2, 3, 4 e 5) ao longo do tempo pode ter sido em razão da atividade metabólica dos microrganismos, pois provavelmente houve redução da quantidade de nutrientes disponíveis no meio. E, considerando-se a curva de crescimento referenciada por Tortora et al., (2017), essa população microbiana pode ter atingido sua fase estacionária de crescimento.

É importante mencionar ainda que a biolixiviação é um processo em que metais presentes em minérios na forma insolúveis são solubilizados pela ação direta ou indireta de uma comunidade de microrganismos. Como produto da ação microbiana na oxidação dos minerais acontece a liberação metais e a geração da drenagem ácida, que se não controlados geram efluentes prejudiciais ao meio ambiente (RAWLINGS; JOHNSON (2007).

#### **4.2.3 Análise do comportamento da biolixiviação da Scheelita sob efeito da temperatura de 35°C em relação as variáveis pH, percentual de extração e quantidade de UFC/mL versus tempo (h)**

No gráfico 7 foram expostos os resultados do ensaio para condição de temperatura 35°C, no qual foi considerada a variação do potencial hidrogeniônico – pH da solução em relação ao tempo (horas) de contato com o minério Scheelita.

Gráfico 7 – Efeito da temperatura 35°C sob o pH inicial (2, 3, 4 e 5) em função do tempo (h), com agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Analisando o gráfico 7 pode-se constatar que para a temperatura de 35°C o pH 2 permaneceu constante durante o tempo de ensaio, sem alterações significativas para acidez do meio. Para esta amostra o menor valor atingido foi pH 1,83 em 48h, porém encerrou o tempo de incubação (120h) com o mesmo valor inicial.

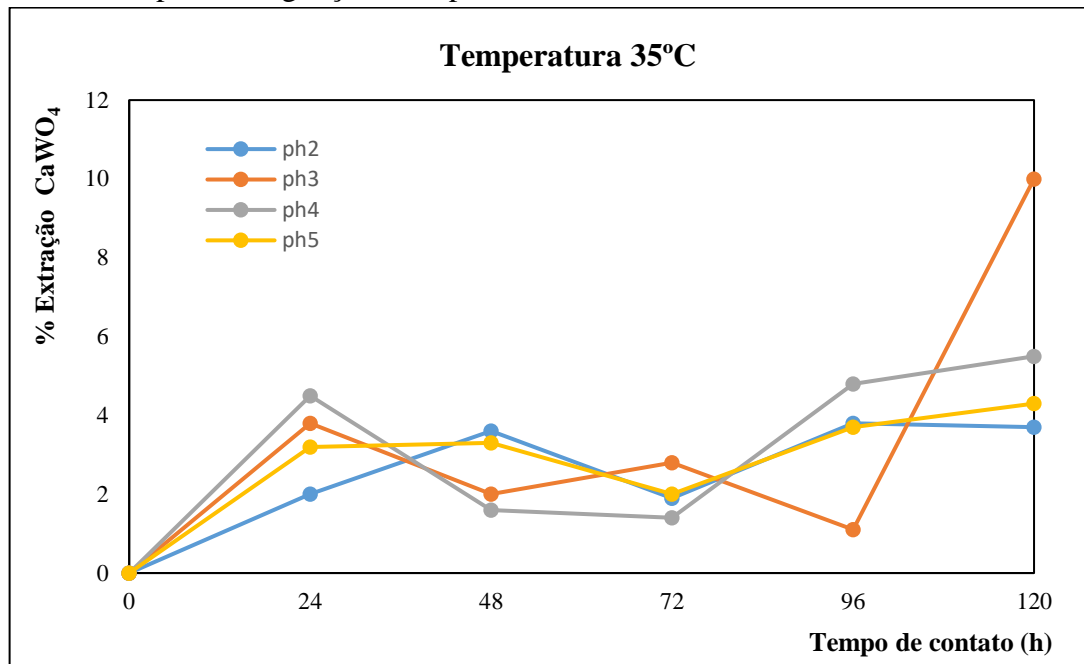
Ao observar as amostras de pH's 3 e 4 evidencia-se que houve um pequeno decréscimo dos seus valores para 2,67 e 3,54, respectivamente, durante o mesmo tempo de agitação na incubadora (48h). Salienta-se que as amostras permaneceram estabilizadas até as 96h. Destaca-se que estes mantiveram-se estabilizados até o final do período de incubação.

No entanto, a amostra de pH 5 nas primeiras 24h de incubação a solubilização sofre uma inflexão da curva apresentando um pH da ordem de 3.

Então, ao atingir esse valor em 24 horas, ou seja, passando para um meio mais ácido do que o inicial, a amostra manteve-se estabilizada até o tempo de 96h. Por fim, ao completar as 120h de incubação, o valor de pH 5 alcança 3,62. Então, considerando todas as amostras, afirma-se que a curva para pH 4 obteve nas 120h finais de ensaio o maior valor de pH, em torno de 4,52.

A amostra correspondente ao pH inicial 2, para a temperatura 35°C, apresentou o meio mais ácido para todas as condições de pH do ensaio, que foi da ordem de 1,83. Contudo, não se pode afirmar que por ter o menor pH será inversamente proporcional ao fator de solubilização.

Gráfico 8 - Percentual de extração de  $\text{CaWO}_4$  em função do tempo de incubação, nas condições: Temp. 35°C, agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Já o gráfico 8 demonstra os resultados do ensaio para condição de temperatura 35°C, sendo considerada a variação do percentual de extração (solubilização) em função do tempo (horas) de contato com o minério Scheelita.

A partir desse gráfico pode-se afirmar que o maior percentual de extração da Scheelita foi da ordem de 10%, para amostra do pH 3, após ter sido submetida a 120h de ensaio em frasco agitado. Já o menor valor de extração foi para o pH 2, com valor da ordem de 3,8%, para o tempo 96 h de incubação e agitação.

Foi evidenciado ainda que para as 24h de ensaio todas as amostras (pH 2, 3, 4 e 5) tiveram crescimento na variável de solubilização de Scheelita, para valores da ordem de 2%, 3,8%, 4,5% e 3,2%, respectivamente. A partir do tempo 48h as amostras apresentaram uma curva de extração em decréscimo até complementar as 72h.

Verificou-se ainda para pH 4, que em torno de 48 h de agitação, houve uma redução do percentual de extração para aproximadamente 1,6%. Essa condição de decréscimo da solubilização foi observada até as 72h de incubação, quando a amostra apresentou apenas 1,4% de extração de Scheelita.

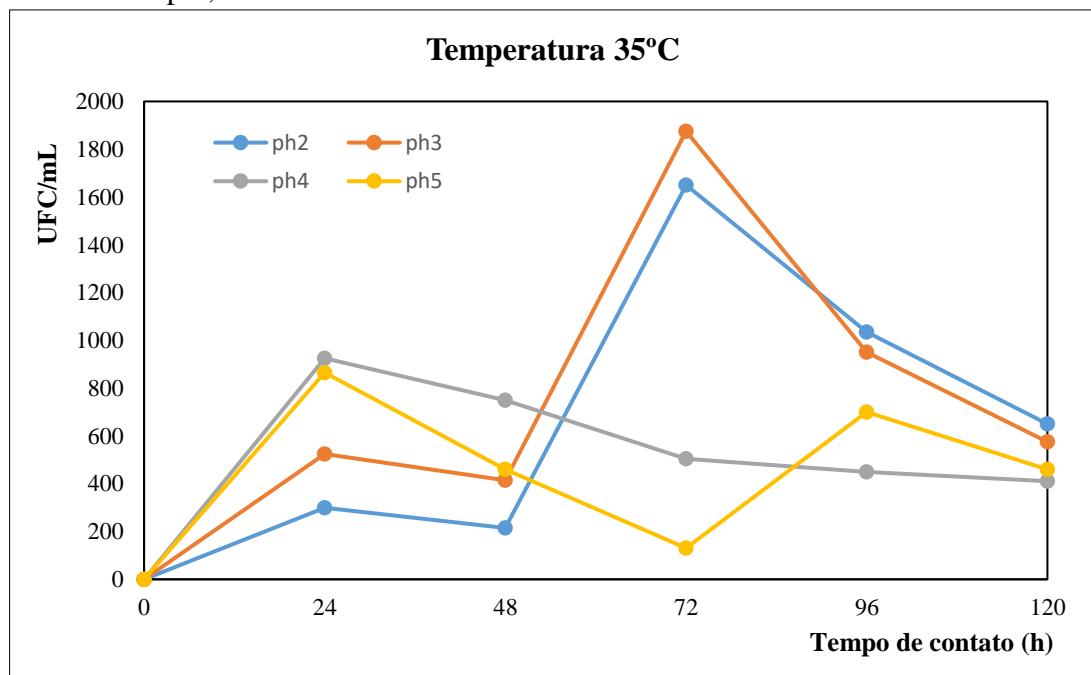
Para o pH 5 verificou-se que o percentual de extração apresentou curva em ascendência nas primeiras 24h, e manteve-se estabilizada até completar as 48h, com valores da ordem de 3%. Logo após, ocorreu um declínio em sua curva totalizando 2% apenas de extração do

minério. Em fim, ao completar as 120 h de ensaio, o percentual de extração retornou a crescer até quantificar pouco mais de 4%.

Em relação aos pHs 2, 4 e 5 analisados sob condição de temperatura de 35°C, nota-se uma tendência de permanecerem constantes para valores de solubilização da scheelita, a medida que aumenta o tempo de contato do mineral com o meio de cultura. Portanto, sob a mesma condição de temperatura e agitação, o pH 3 foi o que mostrou-se mais favorável a solubilização da scheelita, totalizando 12 % em 120h de incubação.

Tratando-se do gráfico 9, informa-se que estão descritos os dados coletados a partir de análises microbiológicas das lixívias das amostras de todos os pH's (2, 3, 4 e 5), em relação a quantidade de Unidades Formadoras de Colônias/mL para tempo de incubação.

Gráfico 9 - UFC/mL em função do tempo de incubação, nas condições:Temp. 35°C e agitação 120 rpm, e 50 ml de meio de cultura.



Fonte: Autoria própria (2017).

O padrão pH 2 apresentou um crescimento bacteriano da ordem de 300 UFC/mL com tempo de 24h de incubação. Já para o pH 3 foram quantificadas em torno de 525 UFC/mL. Observou-se que o mais expressivo crescimento de colônias foi o pH 4, com 925 UFC/mL, nas primeiras horas de ensaio. O pH 5 apresentou valor aproximado do pH 4, com 865 UFC/mL nas 24h.

É interessante notar que após 24h de ensaio, as linhas representativas dos padrões de pH 2, 3, 4 e 5 exibiram no gráfico curvas em decrescimento para a quantidade de unidades

formadoras de colônias – UFC. Para os padrões de pH 2, 3, 4 e 5, ao atingir as 48h de agitação foram obtidos os seguintes valores de UFC/mL: 390, 355, 375 e 400 respectivamente.

No entanto, no período decorrido entre às 48 h e 72 h de incubação, as amostras de pH 2 e 3 apresentaram uma evolução significativa no número de colônias, cujos valores foram 1650 e 1875 UFC/mL respectivamente. Logo após, as curvas iniciaram um decréscimo para valores de colônias. Ademais, no ponto representante do tempo 96h obtiveram-se apenas 1035 e 950 UFC/mL respectivamente. Por fim, ao atingir as últimas 120 h de ensaio na incubadora, essas quantidades tenderam a reduzir ainda mais para 650 UFC/mL para o pH 2 e 575 UFC/mL para pH 3.

Logo após as 24h de ensaio, as curvas de crescimento dos padrões pH 4 e 5 demonstraram comportamentos diferenciados, quando comparados aos pH 2 e 3. Observou-se que decorridas 24h de ensaio, as curvas apresentaram decréscimo, ou seja, o número de unidades formadoras de colônias diminuiu até atingir o tempo de 48h. Neste tempo, os valores obtidos foram da ordem de apenas 750 UFC/mL para pH 4 e 460 UFC/mL no pH 5. Considerando 72h de incubação dessas amostras, os valores de colônias continuaram em decréscimo, totalizando 505 UFC/mL para pH 4, e apenas 130 UFC/mL para pH 5.

No entanto, a amostra de pH 5 demonstrou um comportamento particular em relação ao de pH 4, uma vez que retornou ao crescimento após 72h de ensaio em frasco agitado, quantificando aproximadamente, 700 UFC/mL. E, logo após as 96h de agitação na incubadora, o número de colônias voltou a decrescer, apresentando valores da ordem de 460 UFC/mL até as o tempo final de 120h.

Em relação ao pH 4, evidenciou-se um decréscimo gradual da quantidade de colônias a partir das 24h de incubação, cujo valor era de 925 UFC/mL, e ao atingir 48h de ensaio a amostra apresentou apenas 750 UFC/mL. Notou-se que ao aumentar o tempo de incubação até 72h, a quantidade de colônias reduziu ainda mais para valores da ordem de 505 UFC/mL. E, ao encerrar o período de incubação após 120h, a amostra apresentou apenas 410 UFC/mL.

De forma geral, para temperatura analisada nesse momento, concluiu-se que a amostra representante do pH 3 foi a que apresentou maior número de colônias bacterianas em 72 h, com valor da ordem de 1875 UFC/mL. Ademais, o pH 5 destacou-se dentre os demais por apresentar apenas 130 UFC/mL, durante as 72h de incubação.

Com isto, fica evidenciado que para essa condição de temperatura os resultados são significativos, principalmente, para as amostras de pH's 2 e 3. Provavelmente foi sob essas condições de temperatura, tempo (72h) e pH's mais ácidos que as bactérias heterotróficas



conseguiram se adaptar, e conseqüentemente desenvolver melhor, do que em relação as outras condições de temperaturas (25°C e 30°C).

Então, considerando os dados apresentados nos gráficos anteriores evidencia-se que, nas condições de temperaturas 25°C, 30°C e 35°C, os pH's das amostras começam a reduzir a partir das primeiras 24h de agitação da incubador, ou seja, o meio lixiviante passa a ficar mais ácido a partir das primeiras 24h de ensaios em frasco agitados. Contudo, ao completar 48h de incubação, os pHs apresentam pouca variação, e se estabilizam até completar as 120h de incubação.

Portanto, com base nas avaliações dos dados apresentados, e levando-se em consideração a variável de temperatura e tempo de acondicionamento na incubadora *Shaker*, verificou-se que a extração da scheelita no meio de cultura testado é mais favorável quando ocorre na condição da temperatura 30°C.

#### 4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONDIÇÕES DE TEMPERATURA (25°C, 30°C E 35°C) EM RELAÇÃO AS VARIÁVEIS: TEMPO, PH E UFC/ML

Foram investigadas as condições de temperatura 25°C, 30°C e 35°C a partir das variáveis: tempo, pH (2, 3, 4, 5) e UFC/ml. Ressalta-se que a agitação da incubadora *Shaker*, permaneceu constante (120rpm) para todas as situações estudadas. Outro fator que não sofreu variação ao longo dos experimentos foi o volume de meio de cultura(50ml).

O efeito da temperatura sobre a extração mostrou-se similar nas condições 25°C e 35°C, divergindo na condição de 30°C, a qual apresentou um crescimento ascendente dos valores de extração de scheelita a partir das 24h de agitação na incubadora até encerrar o ensaio nas 120h. A partir dos gráficos apresentados anteriormente, observa-se que Scheelita é solubilizada em maior percentual sob temperatura 30°C, uma vez que obteve valor da ordem de 12%.

Tratando-se da solubilização da Scheelita para condição 25° C foi evidenciado que a amostra pH 5 obteve o maior percentual de extração, aproximadamente 12,6% em 96 horas. O pH 3 totalizou 9,8 % em 48 h. Com 120 h de ensaio a solubilização sofre uma inflexão da curva apresentando uma biolixiviação de 5,8%.

Na condição de temperatura 30°C, os pH's 2 e 3 totalizaram 9 % de solubilização no tempo de 120 h. A amostra pH 4 foi a que demonstrou melhor extração por lixiviação bacteriana para essa temperatura, com valor da ordem de 9,8%. Entretanto, o pH 5 obteve apenas 7% de extração em 120 h de ensaios. Já para temperatura de 35°C, o pH 3 obteve o maior valor de

solubilização da scheelita, em torno de 10% em 120 h de agitação. Entretanto, ao considerar a menor quantidade de extração tem-se o pH 2, com apenas 3,7% em 120h.

Considerando a temperatura 25°C, o pH 5 apresentou o maior percentual de extração de WO<sub>3</sub>, da ordem de 12,6% em 96 horas de agitação na incubadora. Ao analisar a amostra de pH 2, o valor de solubilização foi apenas 6,8% para o mesmo tempo (96 h). Já na condição de temperatura 30°C, o pH 2 obteve valores mais significativos, da ordem de 9,1%, durante 120 h. Em contrapartida, para o ensaio de temperatura maior (35°C) o valor de extração dessa amostra reduziu para 3,8% de solubilização durante 96 h na incubadora.

Para o padrão de pH 3, sob temperatura 25°C, a Scheelita foi solubilizada em aproximadamente 9,3% após 48 h de ensaio na incubadora *Shaker*. A mesma amostra sob temperatura de 30°C obteve valor de extração da ordem de 9%, porém no período de 120 h. Em relação à condição de temperatura 35°C, o pH 3 apresentou o maior valor de solubilização, da ordem de 12%, após 120 h de incubação.

Na pesquisa em tela também pode-se demonstrar que a biolixiviação da scheelita é melhor observada em meios acidófilos, ou seja, em pH's abaixo de 7. Pois os maiores percentuais de solubilização foram obtidos em pH's da ordem de: 3,09, 2,76 e 2,91, que correspondem exatamente aos pH's iniciais 3, 4 e 5, respectivamente.

As temperaturas analisadas na pesquisa (25-35°C) foram favoráveis à extração da scheelita, especialmente para as de temperatura 25°C (pH 5) e 35°C (pH3), com valor aproximado de 12,6 % e 10%. Além disso, esses ambientes também favoreceram ao crescimento das bactérias mesófilas, como por exemplo as heterotróficas, as quais se desenvolvem melhor em sistemas de biolixiviação.

Em relação ao padrão de pH 4, quando condicionado as temperaturas de 25°C e 35°C verificou-se percentuais de extração da ordem de 5,5%. Porém, para o primeiro caso esse valor foi obtido nas primeiras 24h e, no segundo caso apenas após as 120h, respectivamente. No entanto, para a condição de temperatura de 30°C obteve-se um percentual de extração de Scheelita da ordem de 10%, quando decorridas as 120h de incubação.

Para o pH 5 sob temperatura de 25°C, obteve um percentual de extração da Scheelita da ordem de 12,6 %, com tempo de incubação em 96h. Na temperatura de 30°C essa amostra obteve um percentual de extração da ordem de 7,2% após 120 h de ensaio na incubadora. Ademais, ao elevar a temperatura para 35°C no último ensaio, evidenciou-se uma extração de 4,3% em 120 horas.

Desta forma, o ensaio da condição de temperatura 25°C para pH 5 é considerado o mais favorável à biolixiviação da Scheelita, pois, totalizou 12,6 % de extração em apenas 96 h de

ensaio. Entretanto, para temperaturas mais altas (30°C e 35°C) essa amostra apresentou curva com inflexão decrescente, ou seja, a solubilização do minério reduzia à medida que se aumentava o tempo e a temperatura do equipamento.

Pode-se afirmar que o meio de cultura forneceu condições adequadas para o desenvolvimento de microrganismos heterotróficos nas condições que foram realizadas o processo (temperatura (25°C, 30°C e 35°C) e agitação de 120 rpm). De acordo com Fernandes (2009), a temperatura influencia diretamente nesse desenvolvimento, especialmente, quanto a velocidade de crescimento e a produção de biomassa no meio de cultivo. Qualquer variação de temperatura pode afetar diretamente o metabolismo bacteriano, e até mesmo provocar a morte da célula.

Em relação as taxas de extrações de scheelita, foram apresentados valores maiores (12,6%) do que as obtidas por Carvalho et al., (1990) provavelmente estes resultados estão associadas também a granulometria do minério. Enquanto neste trabalho utilizou-se partículas inferiores a 74 µm, Carvalho (1990) utilizou as granulometrias (-300 µm), (-600+ 425 µm) e (-212+ 150 µm). A elevação da área superficial favorece o processo de biolixiviação.

#### 4.4 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DAS AMOSTRAS DAS LIXÍVIAS

Após a realização dos ensaios de biolixiviação foi realizada a análise bacteriológica das alíquotas de cada amostra estudada na pesquisa. Para tanto, avaliou-se o crescimento bacteriológico das lixívias para cada amostra representante das variáveis: pH's do meio lixivante (2, 3, 4, 5), temperatura (25°C, 30°C e 35°C) e tempo de contato.

É importante destacar que a análise bacteriológica das lixívias foi realizada a fim quantificar a presença de colônias de bactérias heterotróficas por ml de solução lixivante. Os valores foram quantificados por Unidades Formadoras de Colônias, seguindo a metodologia supramencionada. Na fotografia 14, logo abaixo, pode-se observar o equipamento que foi utilizado na contagem dos microrganismos, bem como uma placa de Petri que foi cultivada com uma amostra.

Salienta-se que durante os procedimentos metodológicos da pesquisa, feita realizada uma pesquisa bibliográfica, em que foram consultados os principais sites de revistas internacionais e bases científicas (Web of Science, Scielo, Pubmed, etc), e constatou-se que havia sido publicado apenas um artigo relacionado a biolixiviação de Scheelita. Com isto evidencia-se a importância da pesquisa em questão, além estar sendo considerada como de fundamento para os próximos trabalhos sobre biolixiviação de scheelita.

O autor responsável pela publicação foi Carvalho et al., (1990), o qual utilizou-se como parâmetro para o desenvolvimento dos experimentos aqui descritos. Acrescenta-se, ainda, que os resultados obtidos nesse trabalho contribuirão para futuras pesquisas sobre a biolixiviação de scheelita.

As análises microbiológicas das alíquotas das lixívias provenientes dos ensaios de biolixiviação não foram considerados como parâmetro de avaliação por parte dos estudos de Carvalho et al., (1990). Com isso, os resultados e discussões apresentados para a análise microbiológica das amostras da biolixiviação da scheelita podem ser considerados pioneiros, uma vez que não há trabalhos descritos para o caso específico na literatura.

O referido autor observou apenas que em suas amostras havia formação de biomassa, porém, não realizou a identificação das espécies biológicas atuantes no processo de biolixiviação do minério de scheelita. Ademais, foi suposto por Carvalho et al., (1990) que essas espécies microbianas poderiam ser originárias do próprio minério utilizado nos ensaios.

Também deve ser enfatizado que a análise microbiológica das amostras das lixívias não foi feita pelo citado autor, sendo essa etapa de quantificação dos microrganismos pioneira para trabalhos relativos à biolixiviação do minério Scheelita.

Ainda durante a etapa de contagem das colônias bacterianas foi notada a presença significativa de colônias de fungos. Este grupo pôde ser visualizado praticamente em todas as placas de Petri preparadas com as lixívias, e posteriormente analisadas em laboratório. Na preparação das placas, foram utilizadas amostras de lixívias provenientes dos três ensaios realizados, ou seja, nas condições de temperatura (25°C, 30°C e 35°C).

No entanto, evidenciou-se que para as amostras da temperatura de 25°C a presença dos fungos (leveduras ou filamentosos) foi muito superior, quando comparada as amostras das temperaturas de 30°C e 35°C. Vale salientar que, a pesquisa em tela objetivou apenas analisar e quantificar organismos do grupo das bactérias heterotróficas.

Supõe-se que esse elevado crescimento de fungos nas amostras submetidas à temperatura de 25°C tenha ocorrido em razão das condições ambientais mais favoráveis para o crescimento dos fungos. De acordo com Ribeiro e Stelato (2011), os fungos apresentam exigências nutritivas semelhantes as bactérias quimiorganotróficas, ou seja, necessitam de fontes de carbono, nitrogênio, água, sais minerais e fatores de crescimento.

A maioria dos fungos são aeróbios e alguns anaeróbios facultativos. Em relação a variável temperatura, a maioria das espécies de fungos é mesófila, isto é, prefere temperaturas entre 25°C e 30°C. Além disso, o teor de umidade do ambiente influencia no desenvolvimento

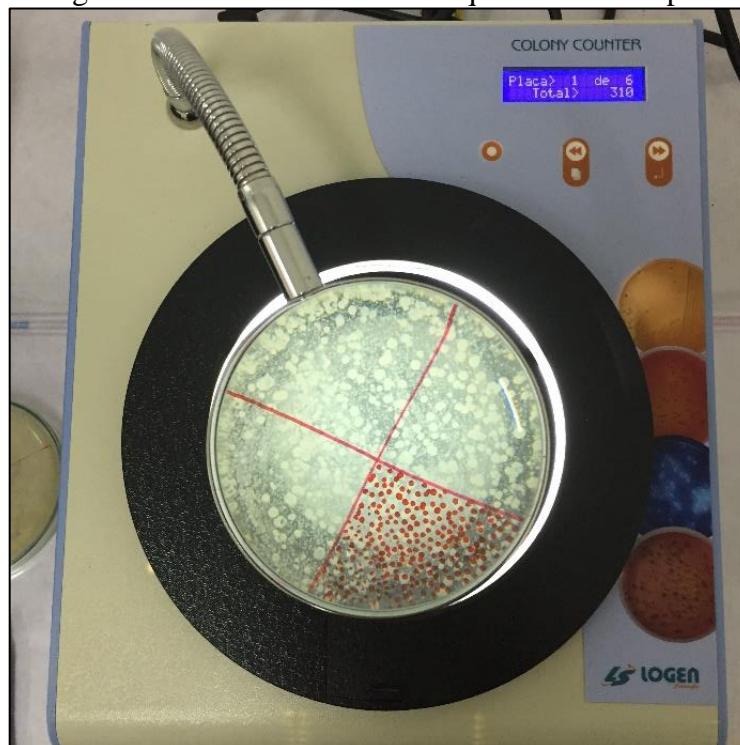
dos fungos em um determinado ambiente, e também, em meios de culturas específicos que podem favorecer o seu crescimento.

A presença de fungos nas placas pôde ser evidenciada durante a etapa de contagem das bactérias heterotróficas (UFC/ml). Os fungos observados não foram quantificados e/ou qualificados como resultado da pesquisa por não ter sido objeto da pesquisa. Vale salientar que a presença significativa de colônias de fungos nas placas cultivadas dificultou um pouco a visualização e contagem das colônias de bactérias heterotróficas, contudo, as placas cultivadas foram devidamente contabilizadas de forma satisfatória.

Além disso, evidenciou-se a presença de fungos nas soluções biolixiviadas, que estavam sendo retiradas da incubadora Shaker. Também pôde ser verificado no fundo dos frascos a formação de biomassa. Tal fato corrobora com os resultados apresentados por Carvalho et al., (1999). Na etapa de filtração das soluções, e ao verter os frascos erlenmayeres no filtro de porcelana, a biomassa presente ficava retida no papel filtrante. Os microrganismos retidos na membrana não foram identificados especificamente, porém supõe-se que sejam fungos do tipo bolores ou leveduras. Essa biomassa foi direcionada juntamente com o papel filtrante para a etapa de queima na Mufla.

Conforme Ribeiro e Stelato (2011), os fungos possuem dois tipos de morfologia: as leveduras, que são unicelulares e os bolores ou fungos filamentosos, os quais são considerados multicelulares. Estes são compostos por hifas, que podem ser septadas ou não septadas. Um conjunto de hifas irá formar o micélio, que pode ser vegetativo ou reprodutor. As leveduras apresentam forma e tamanho de 2-5 a 15-60  $\mu\text{m}$ , com presença ou ausência de capsula e pseudo-hifas.

Fotografia 14 – Equipamento chamado “Colony Counter”, que foi utilizado para fazer a contagem das colônias de bactérias que cresceram após incubação de 48h.



Fonte: Autoria própria (2017).

Corroborando com os resultados da pesquisa, Carvalho et al., (1990), também observou a presença de espécies biológicas nas amostras, especialmente bactérias e fungos. Contudo, esses microrganismos não foram identificados, especificamente. Foi suposto pelo mesmo autor, que esses microrganismos eram provavelmente fungos decompositores de minerais silico-aluminato.

Ainda em análise, enfatiza-se que na condição de temperatura 25°C a amostra do pH 4 apresentou o maior número de colônias de bactérias heterotróficas, com 2.400 UFC/mL após 120 h de incubação. No entanto, para essa mesma amostra observou-se o menor percentual de extração (5,5%) da Scheelita no tempo de 24 h. Acrescenta-se que o maior percentual de minério extraído foi na amostra pH 5, com valor da ordem de 12%, em 96h de ensaio em frasco agitado.

Tais resultados corroboram com o observado por Carvalho et al., (1990), pois houve uma redução da concentração do minério em função da quantidade de microrganismos. Segundo o autor, essa diminuição da concentração do minério ocorreu em razão da adsorção da espécie de tungstênio em decorrência da elevada quantidade de biomassa desenvolvida na amostra.

Além disso, Carvalho et al., (1990) obteve apenas 5% de extração de scheelita, durante um período de 10 a 15 dias sob temperatura de 25°C. Ele obteve, aproximadamente, 45,3 mg/L<sup>1</sup> de tungstênio dissolvido na lixívia em 8 dias de incubação. Entretanto, os resultados obtidos nessa pesquisa, sob a mesma condição de temperatura, corresponderam a 12% de extração de scheelita em 96 h, ou seja, durante 4 dias de ensaio.

Considerando a condição da temperatura de 30°C, evidenciou-se que o maior percentual de Scheelita solubilizado na lixívia foi da ordem de 9,8%, para a amostra de pH 4, em função do tempo de incubação de 120h. Em relação a quantidade de bactérias heterotróficas presentes na amostra, a amostra pH 4 obteve o maior valor, totalizando cerca de 3.750 UFC/mL, com apenas 48h de ensaio em frasco agitado. Nessa condição de temperatura, o menor valor de extração foi de 7,2% para a amostra de pH 5, após 120 h de agitação na incubadora.

No entanto, a menor quantidade de colônias de bactérias heterotróficas obtidas foi para a amostra de pH 2 totalizando apenas 1.700 UFC/mL, durante 120 h de ensaio. Torna-se importante observar que mesmo sendo valores considerados baixos, ainda sim foram mais representativos do que os obtidos por Carvalho et al., 1990, que totalizou no máximo 6% de extração para um tempo aproximado de 15 dias.

Por fim, para temperatura de 35°C, foram obtidos do pH 3 os maiores valores de extração e quantidade de bactérias heterotróficas presentes na lixívia. Os valores foram da ordem de 12% em 120h, e 1.875 UFC/mL. Todavia, a amostra de pH 2 apresentou o menor valor de extração, 3,8% durante o período de 96h de incubação. Ademais, a amostra de pH 5 apresentou o menor crescimento bacteriano para o meio de cultura analisado, totalizando apenas 865 UFC/mL.

É importante mencionar que durante os ensaios não foram realizadas a identificação dos microrganismos que atuaram diretamente no processo de solubilização da scheelita, no entanto observa-se que o meio de cultura favorece o crescimento de colônias de bactérias heterotróficas e de fungos que propiciaram a solubilização da scheelita.

Finalmente, em estudo realizado por Carvalho et al., (1990), também não foi realizada a identificação das espécies biológicas que apareceram nas amostras. Entretanto, afirmou-se que tais microrganismos eram provenientes do ambiente mineiro. Verificou ainda uma redução na concentração de tungstênio, que supostamente ocorreu em função da adsorção do minério pela grande biomassa desenvolvida nas amostras.

De acordo com objetivos elencados para essa pesquisa e os resultados obtidos ao final da pesquisa, pode-se afirmar que o meio de cultura preparado com água da mina favoreceu ao

crescimento de microrganismos, tanto de bactérias heterotróficas como de fungos nas amostras submetidas ao processo de biolixiviação.

Estes resultados demonstram que este processo é promissor por apresentar resultados considerados positivos quando comparados aos estudos anteriores. Porém, verifica-se a necessidade de aumentar o tempo de incubação das amostras, com finalidade de averiguar condições adequadas para aumentar o percentual de solubilização da Scheelita.

Além disso, observa-se a necessidade de avaliar a técnica de biolixiviação para Scheelita de baixo teor presente nas pilhas de rejeitos existentes na área da Mina Brejuí. E também com a finalidade de inserir a lixiviação bacteriana como rota alternativa aos processos de beneficiamento de Scheelita convencionais já existentes nas mineradoras.

É importante destacar as vantagens da biolixiviação frente aos outros métodos utilizados pelas indústrias de beneficiamento de Scheelita e outros metais: economia de insumos usados por processos hidrometalúrgicos (ex: ácidos e agentes oxidantes), baixo consumo energético; custo de capital para implantação da técnica; custos operacionais reduzidos; e também não emite gases poluentes e prejudiciais ao meio ambiente, de forma a contribuir para a sustentabilidade da região.

Em estudo realizado por Carvalho et al., (1990), também não foi realizada a identificação das espécies biológicas que apareceram nas amostras, contudo verificou-se redução na concentração de tungstênio, que supostamente ocorreu em função da adsorção do minério pela grande biomassa desenvolvida nas amostras.

É importante mencionar que durante os ensaios não foram realizadas a identificação dos microrganismos que atuaram diretamente no processo de solubilização da scheelita, no entanto observa-se que o meio de cultura favorece o crescimento de colônias de bactérias heterotróficas e de fungos que propiciaram a solubilização da scheelita.



## 5 SUGESTÕES

Baseando-se nos resultados obtidos, sugere-se para estudos posteriores:

- a) fazer a caracterização química e mineralógica da Scheelita utilizada nos ensaios de biolixiviação da Mina Brejuí;
- b) isolamento e identificação dos microrganismos presentes na água da mina e no minério;
- c) realizar novos experimentos controlando o pH inicial das amostras com solução ácida durante todo o processo de incubação;
- d) aplicar diferentes condições de agitação da incubadora e concentração da solução lixiviante, visando fazer comparações quanto ao efeito das melhores condições identificadas na pesquisa em tela;
- e) fazer novos ensaios com as mesmas condições utilizando período de tempo de incubação maior com as mesmas condições de análise para observar a solubilização da scheelita e o crescimento microbiano nas amostras lixiviadas;
- f) realizar experimento em coluna, utilizando granulometrias maiores visando reproduzir o que ocorre em escala industrial.

## 6 CONCLUSÃO

A partir dos objetivos elencados na inicialmente na pesquisa, bem como, das análises dos resultados dos ensaios, pode-se concluir que:

- a) a amostra da água da Mina Brejuí é caracterizada por apresentar alta condutividade elétrica, turbidez, dureza e por ser alcalina, o que implica na necessidade de controle constante do pH na etapa inicial da biolixiviação pela adição de ácido a fim de garantir a atividade microbiana;
- b) a caracterização bacteriológica apontou que a água da mina é rica em bactérias heterotróficas, o que favoreceu o desenvolvimento dos ensaios de biolixiviação com a scheelita da Mina Brejuí;
- c) o meio de cultura utilizado como solução lixiviante nos ensaios de biolixiviação mostrou-se favorável ao crescimento de microrganismos nas amostras, principalmente nas condições de temperatura de 30°C;
- d) os microrganismos cultivados nas amostras demonstraram capacidade para promover a dissolução da Scheelita presente na área da mina Brejuí;
- e) as condições mais favoráveis para solubilização da Scheelita foram: temperatura 25°C para pH 5 durante 96 horas (12,6%); temperatura de 30°C para um pH 4 após 120 horas de incubação (9,8%); e temperatura de 35°C para o pH 3 em 120 horas de ensaio, obteve-se 10% de solubilização.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Eudocia Carla Oliveira et al. Biomineração: extração sustentável e silenciosa de minério. biomineração: extração sustentável e silenciosa de minério. **Revista Saúde e Ciência On line**, 2014; 3(3): 253-265, set-dez, 2014.
- ANDRADE, Maurício Gomes et al. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: I – fitoextração. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n. 6, p.1879-1888, 2009.
- ASSIS, Heline Fernandes Silva de.; BARBOSA, José Aécio Alves.; MOTA, Tercio de Souza. Avaliação dos impactos ambientais provocados pela atividade mineradora no município de Pedra Lavrada-PB. **Âmbito Jurídico**, Rio Grande, vol.14, n. 90, jul. 2011. Disponível em: <[http://www.ambitojuridico.com.br/site/?n\\_link=revista\\_artigos\\_leitura&artigo\\_id=9925&revista\\_caderno=5](http://www.ambitojuridico.com.br/site/?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=9925&revista_caderno=5)>. Acesso em: 25 out. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6023**: informação e documentação: Referências - apresentação. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15287**: informação e documentação: Projeto de Pesquisa: apresentação. Rio de Janeiro, 2006.
- AZEVEDO, Denisy Silva de; SANTANA, Renata Laís Ferreira; KETTRIN, Farias Bem Maracajá. Educação Ambiental e o Turismo em comunidades mineradoras – o caso da Mina Brejuí. **Revista Querubim**, v.2, nº 16: p.50-58, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://www.uff.br/feuffrevistaquerubim/images/arquivos/publicacoes/zquerubim\\_16\\_v\\_2.pdf](http://www.uff.br/feuffrevistaquerubim/images/arquivos/publicacoes/zquerubim_16_v_2.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2015.
- BARBOSA, Juliano Peres; EL-NAGAR, Mohamed Momdouh; VILLAS BÔAS, Roberto C.; FERREIRA, Rui Carnide Hasse. **Hidrometalurgia**. São Paulo: Édile, 1979.
- BATISTA, Luciene Alves. Análise das comunidades microbianas presentes em depósitos de minerais sulfetados com ocorrência de drenagens ácidas de minas e em sistemas de Biolixiviação. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3105>>. Acesso em: 03 abr. 2017.
- BLANDÓN, Nury Alexandra Muñoz. Recuperação de níquel e outros metais a partir de diferentes fontes (rejeitos de processo industrial e pentlandita (Ni,Fe)9S8) por lixiviação bacteriana e ácida. 2010. 125 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Araraquara, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/100745>>. Acesso em: 30 nov. 2016.
- BEVILAQUA, Denise. et al. Oxidation of chalcopyrite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* in shake flasks. **Process Biochemistry**, v. 38, n. 4, p. 587–592,

Dec. 2002. Disponível em:<[http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00169-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00169-3)> Acesso em: 24 nov. 2016.

BRANDL, Helmut; BOSSHARD, Roman; WEGMANN, Martin. Computer-munching microbes: Metal Leaching from Eletronica Scrap by Bacteria and Fungi. **Hydrometallurgy**. V. 59. P. 319-326, 2001.

BOSECKER, Klaus. Bioleaching solubilization by microorganisms. **FEMS, Microbiology Reviews**. v.20. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources-BGR, Elsevier: Germany, 1997. P. 591-604. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168644597000363>>. Acesso em: 05. Jan. 2017.

BRIERLEY, J. A; BRIERLEY, C. L. Present and future commercial applications of biohydrometallurgy. **Hydrometallurgy**, Elsevier 59, 2001. 233-239. Disponível em: <[www.elsevier.nl/locate/hydromet](http://www.elsevier.nl/locate/hydromet)> Acesso em: 12 mai. 2017.

CAMPOS FILHO, Maurício Prates. Introdução a Metalurgia Extrativa e Siderúrgica. Livros Técnicos e Científicos. Fundação de Desenvolvimento da UNICAMP. Rio de Janeiro, 1981.

CABRAL, Laíse do Nascimento; PEREIRA, Suellen Silva; ALVES, Telma Lúcia Bezerra. Degradação Ambiental e Implicações para a Saúde Humana decorrentes da Mineração: o caso dos trabalhadores de uma pedreira no município de Campina Grande/PB. **Revista Brasileira de Geografia Médica e Saúde**, v.8, n. 15: p. 104-118, Campina Grande, 2012. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/hygeia>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

CANO, Telma Monreal. Tungstênio. In: LIMA, Thiers Muniz; NEVES, Carlos Augusto Ramos. **Sumário Mineral**, v. 30, n. 1, dez. 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 7 maio 2016.

CARVALHO, R. A. Guedes. Hidrometalurgia do Tungstênio. In: ENCONTRO ANUAL DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE QUÍMICA, 7., 1984, Porto Codex. Porto: Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, 1984. Disponível em: <<http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/544/article/3000219/pdf>>. Acesso em: 2 abri. 2017.

CARVALHO, R. A. Guedes; CRUZ, M. Celeste; GONÇALVES, M. Ceu; MOURA, M. Manuela; NEVES, O. Bioleaching of Tungsten Ores. **Elsevier Science Publishers**. **Hydrometallurgy**, Portugal, n. 24, p. 263- 267, jun 1990. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304386X9090092G>>. Acesso em: 01 set. 2016.

CASSA, J. C. S; ANDRADE, T. R. Lixiviação Bacteriana de Minérios de Ouro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 11., 1985, Natal-RN. Disponível em:<[http://searchentmme.yang.art.br/download/1985/volume\\_2/381%20-20Jos%C3%A9%20Clodoaldo%20Silva%20Cassa\\_Teresinha%20Rodrigues%20de%20Andrade%20-20Lixivia%C3%A7%C3%A3o%20Bacteriana%20de%20Min%C3%A9rios%20de%20Ouro.pdf](http://searchentmme.yang.art.br/download/1985/volume_2/381%20-20Jos%C3%A9%20Clodoaldo%20Silva%20Cassa_Teresinha%20Rodrigues%20de%20Andrade%20-20Lixivia%C3%A7%C3%A3o%20Bacteriana%20de%20Min%C3%A9rios%20de%20Ouro.pdf)>. Acesso em: 10 mai. 2017.

CAVALCANTE NETO, Mario Tavares de Oliveira. A estratigrafia da região entre as minas Brejuí e Malhada Limpa, Currais Novos/RN. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., 2009, Belém. **Anais Eletrônicos...** Belém: IFPA, 2009. Disponível em: <[http://connepi2009.ifpa.edu.br/connepi-anais/artigos/225\\_1232\\_894.pdf](http://connepi2009.ifpa.edu.br/connepi-anais/artigos/225_1232_894.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2015.

CIMINELLI, Virgínia Sampaio Teixeira. Hidrometalurgia. **Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p.158-174, 2007. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/ten\\_tecno\\_brasil.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/ten_tecno_brasil.pdf)>. Acesso em: 03 jan. 2017.

CHIZZOTTI, A. **Pesquisa em ciências humanas e sociais**. 5. ed. São Paulo: Cortez, 2001.

CHOI, M-S., CHO, K-S., KIM, D-S., KIM, D-J. Microbial recovery of copper from printed circuit boards of waste computer by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **J. Environ. Sci. Health, Part A, Environ. Sci. Eng. Toxic. Hazard**, v. A39, n.11, p. 1-10, 2004.

CRUNDWELL F. K. How do bacteria interact with minerals? **Hydrometallurgy**. África do Sul: Elsevier, v. 71, p.75-81, 2003. Disponível em: <[www.elsevier.com/located/hydromet.com](http://www.elsevier.com/located/hydromet.com)> Acesso em: 12 mar. 2017.

DANA, James Dwight. **Manual de Mineralogia**. Livros técnicos e científicos editora, v. 2, Rio de Janeiro, 1974.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Sumário Mineral - 2015**. Brasília, 2016. v. 35. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015.>> Acesso em: 20 dez. 2016.

DOMIC E. M. A review of the development and current status of copper bioleaching operations in Chile: 25 years of successful comercial implementation. In: Rawlings DE, Johnson DB, editors. *Biomining*. Berlin: Springer-Verlag; 2007. p. 81-95.

\_\_\_\_\_. **A System of mineralogy: Descriptive Mineralogy**. 5. ed. Jonh Wiley & Son Publishers. New York, 1869, p. 603 a 606. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=4clIVh2GzvQC&oi=fnd&pg=PR1&dq=DANA,+J.+D&ots=SzyhhPIXsA&sig=zjdC0saAYdK8VUkLlbyRHAvxnsQ#v=onepage&q=DANA%2C%20J.%20D&f=false.>> Acesso em: 24 abr. 2017.

DUNBAR, W. Scott, *Biotechnology and the Mine of Tomorrow*, Trends in Biotechnology, v. 35, Issue 1, 2017, p. 79-89, ISSN 0167-7799. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.07.004>>. Acesso em: 13 mai. 2017.

EHRlich, Henry Lutz. Microbes for biohydrometallurgy. In: SMITH, R. W.; MISRA, M. (Org). **Mineral Bioprocessing**. Nevada: The Minerals, Metals & Materials Society, 1991, p-27-41.

FARIAS, Carlos Eugenio Gomes. **Mineração e meio ambiente no Brasil**. Disponível em: <[http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011\\_02.pdf](http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2015.

FERNADES, B. B.; MACHADO, Á. O.; LEITE, J. Y. P. Lixiviação da scheelita: uma revisão do estado da arte. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE E NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., 2009, Belém: IFPA, 2009. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/profile/Jose\\_Yvan\\_Leite/publication/275463019\\_LIXIVIACA\\_O\\_DE\\_SCHEELITA\\_-UMA\\_REVISAO\\_DO\\_ESTADO\\_DA\\_ARTE/links/553cef550cf2c415bb0c9324.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jose_Yvan_Leite/publication/275463019_LIXIVIACA_O_DE_SCHEELITA_-UMA_REVISAO_DO_ESTADO_DA_ARTE/links/553cef550cf2c415bb0c9324.pdf)>  
Acesso em: 24 out. 2016.

FERNANDES, Márcia Cristina da Fonseca. Estudo comparativo da ação dos microrganismos mesófilos e termófilos na biolixiviação de um minério de Cobre sulfuretado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente) – Universidade do Porto – FEUP, Porto, 2009. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/61478>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

FERNANDES, Bruno Rodrigo Borges. Aproveitamento dos finos de scheelita utilizando concentração centrífuga e lixiviação ácida. Recife, PE, 2011. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Disponível em: <[https://www.ufpe.br/ppgeminas/images/word/2011/bruno\\_rodrigo.pdf](https://www.ufpe.br/ppgeminas/images/word/2011/bruno_rodrigo.pdf)>. Acesso em: 03 fev. 2017.

FONSECA, Martha Reis Marques. **Completamente química: Química Geral**. São Paulo: FTD, 2001.

FIGUEIREDO, Bernadino Ribeiro. **Minérios e ambiente**. Campinas, SP: UNICAMP, 2000.

FONTENELE, R. E. S. et al. Sustainable Environment Practices as a Competitive Factor of Industrial Organizations On international trade. INTERNATIONAL CONFERENCE, 3, 2003, São Paulo.

FRANCISCO JR, W.E.; BEVILAQUA, D. & O. GARCIA JR. 2007. Estudo da dissolução oxidativa microbiológica de uma complexa amostra mineral contendo pirita (FeS<sub>2</sub>), Pirrotita (Fe<sub>1-x</sub>S) e Molibdenita (MoS<sub>2</sub>). **Química Nova**, 30(5): p. 1095-1099. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v30n5/a08v30n5>> Acesso em 07 abr. 2017.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo, Ed. Atlas, 2002.

GARCIA, Oswaldo Júnior. Utilização de microorganismos em processos bio-hidrometalúrgicos. In: ENCONTROS DE METALURGIA, MINERAÇÃO E MATERIAIS DA UFMG, 1. 2., 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 1995. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/317/1/sta-53.pdf>> Acesso em 10 mai. 2017.

\_\_\_\_\_. Estudos da biolixiviação de minérios de urânio por *Thiobacillus ferrooxidans*. 1989. 261 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.

GARCIA, Oswaldo Júnior; BEVILAQUA D. Microbiologia ambiental: micro-organismos, minerais e metais. Jaguariúna: Embrapa. 2008.

GODEIRO, Maria Luíza Silva et al. Caracterização de pré-concentrado do rejeito de scheelita da mina brejuí em concentrador centrífugo. *Holos*, v. 5, ano 26. Natal, 2010. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/275407723\\_CHARACTERIZACAO\\_DE\\_PRE-CONCENTRADO\\_DO\\_REJEITO\\_DE\\_SCHEELITA\\_DA\\_MINA\\_BREJUI\\_EM\\_CONCENTRADOR\\_CENTRIFUGO](https://www.researchgate.net/publication/275407723_CHARACTERIZACAO_DE_PRE-CONCENTRADO_DO_REJEITO_DE_SCHEELITA_DA_MINA_BREJUI_EM_CONCENTRADOR_CENTRIFUGO)> Acesso em: 26 fev. 2017.

HAWKES R.B; FRANZMANN P.D.; O'HARA G.; PLUMB J.J. **Ferroplasma cupricumulans sp. nov., a novel moderately thermophilic, acidophilic archaeon isolated from an industrial-scale chalcocite bioleach heap** *Extremophiles*. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00792-006-0527-y>>. Acesso em 06 mai. 2017.

HABASHI, Fathi. **A textbook of hydrometallurgy**. Métallurgie extractive Québec, Enr. Canadá, 1993.

\_\_\_\_\_. **A Short History of Hydrometallurgy**. *Hidrometallurgy* 79. 2005.

HECK, Nestor Cezar. **Lixiviação**. Disponível em:<<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06631/Lixiviacao.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2016.

HORTA, D. G., ACCIARI, H. A., BEVILAQUA, D., BENEDETTI, A. V., GARCIA Jr., O. The effect of choride ions and A. ferrooxidans on the oxidative dissolution of the halcopyrite evaluated by electrochemical noise analysis (ENA). In: **Abstracts Book of 18th International Biohydrometallurgy Symposium**, Bariloche, 85 f, 2009.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE. **Perfil do seu município** Currais Novos, 2008. Disponível em: <<http://www.idema.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=PASTAC&TARG=875&ACT=&PAGE=4&PARM=&LBL=>>>. Acesso em 24 abr. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Informações da Economia Mineral Brasileira**, 2015. Disponível em:<<http://www.ibram.org.br>>. Acesso em: 24 out. 2016.

ILYAS, S., ANWAR, M. A., NIAZI, S. B., GHOURI, M. A. Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria. **Hidrometallurgy**, v. 88, n.1-4, p.180-188, 2007.

JORDAN, M. A.; MCGINNESS, S.; PHILLIPS, C. V. Acidophilic bacteria - their potential mining and environmental applications. **Minerals Engineering**, v. 9, n. 2, p. 169-181, 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0892687596000027>>. Acesso em 14 abr. 2017.

JOHNSON, D. B. e ROBERTO, J. J. Heterotrophic acidophiles and their roles in the bioleaching of sulfide minerals. *Biomining*, p. 259-279, 1997.

JOHNSON, D. B. **Biohydrometallurgy and the environment: Intimate and important**

interplay. *Hydrometallurgy*, 83, 2006.

\_\_\_\_\_. D. B., Development and application of biotechnologies in the metal mining industry. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20 (2013), pp. 7768-7776. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-013-1482-7>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

LOPES, Marcos. **Hidrometalurgia**. Disponível em: <<http://tecnicoemineracao.com.br/hidrometalurgia-na-mineracao/>> Acesso em: 06 set. 2016.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003. 310 f.

LEITE, José Yvan Pereira. LYSM: um equipamento de laboratório para simulação de lixiviação em pilas de minérios. **Revista da ETFRN**, Natal, 1985. Projeto de Equipamento de laboratório para lixiviação em pilhas – LYSM. EXPOTEC–ETFRN. Natal, 1994.

\_\_\_\_\_. José Yvan Pereira. Relatório Preliminar. Cooperação CEFET-RN e Mineração Tomaz Salustino. Natal, 2007.

\_\_\_\_\_. José Yvan Pereira. **Aglomerção e lixiviação ácida**. Programa de Capacitação-UHC. Natal, 2007.

LEWIS, G. et al. Bio hydrometallurgical recovery of metals from fine shredder residues. *Minerals Engineering*, v. 24, n. 11. 2011.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas, SP: Átomo, 2010.

LIMA, Alexandre Herculano de Souza; SILVA, Paulo Emanuel Duarte; MUSSE, Narla Sathler. **A situação atual do setor mineral no Rio Grande do Norte e suas perspectivas de futuro**. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012, Palmas. ISBN 978- 85- 62830- 10- 5. Disponível em: <<http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/view/2957>>. Acesso em: 4 ago. 2015.

LIMA, Renata Barros. Biolixiviação de concentrado de flotação de sulfetos de cobre, em coluna, utilizando consórcios de micro-organismos mesófilos e termófilos. 2011. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://186.202.79.107/download/biolixiviacao-de-concentrado-de-flotacao.pdf>> Acesso em: 10 mai. 2017.

LUZ, Adão Benvindo; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA. Salvador Luiz Matos. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT, 2004.

LYNN, Nicholas S. The bioleaching and processing of refractory gold ore: overview. **Journal of Minerals, Metals and Materials**, v. 49, n. 4, p. 24–26, Apr. 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02914870> .> Acesso em 4 jan. 2017.



MACEDO, Alexandre José Buril de; BAZANTE, Arlindo José; BONATES, Eduardo Jorge Lira. Seleção do método de lavra: arte e ciência. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 3, set. 2001. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672001000300010&script=sci\\_arttext&tlng=es](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672001000300010&script=sci_arttext&tlng=es)>. Acesso em: 12 out. 2015.

MAGALHÃES, Vivian Maria de Arruda. Remoção de Carbonatos para otimizar a biolixiviação de rejeito calcopirítico empregando consórcio de microrganismos. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/21049>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

MARGESIN, R.; F. SCHEINNER. Potencial of halotolerant and halophilic microorganisms for biotechnology. *Extremophiles*, 5, 73-78, 2001. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s007920100184>> Acesso em: 05 mai. 2017.

MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S.A.  
Disponível em: <<http://www.minabrejuí.com.br/index.html>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

MILLER, G. Tyller. **Ciência Ambiental**. São Paulo: Thomson. 2007, 501p.

NASCIMENTO, Marcos Antonio Leite; ROCHA, Antonio José Dourado; NOLASCO, Marjorie Cseko. Patrimônio geológico e mineiro no nordeste do Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, Paraná, v.70, 2013. p. 103-119. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/geociencias/article/view/31446/21554>>. Acesso em: 31 out. 2015.

NASCIMENTO, Alana Rayza Vidal Jerônimo do. **Atributos físicos e químicos de áreas degradadas pela mineração de scheelita na região tropical semiárida**. 2015. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <<https://sigaa.ufrn.br/sigaa/public/programa/defesas.jsf?lc=pt&id=107>>. Acesso em: 30 set. 2015.

NEMATLI, M. Biological oxidation of ferrous iron by Thiobacillus ferrooxidans: a review on the kinetic aspects. **Biochemical engineering journal**, v. 1, p. 171-190. 1998. Disponível em: <[https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/biological-oxidation-of-ferrous-sulphate-by-thiobacillus-ferrooxidans-a-review-on-the-kinetic-aspects\(e891298c-57b3-4d80-90fe-60d3287676c4\).html](https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/biological-oxidation-of-ferrous-sulphate-by-thiobacillus-ferrooxidans-a-review-on-the-kinetic-aspects(e891298c-57b3-4d80-90fe-60d3287676c4).html)>. Acesso em: 12 mar. 2017

NEME, Milton Brigolini et al. Mineração: Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto v. 64, n. 4: 519-524, dez. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v64n4/a19v64n4.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

NOBRE FILHO, Pedro Aguiar et al. Impactos ambientais da extração de areia no canal ativo do Rio Canindé, Paramoti, Ceará. **Revista de Geologia**, v. 24, n. 2, 126-135, Fortaleza, mar. 2011. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufc.br/index.php/geologia/issue/view/191>>. Acesso em: 26 set. 2015.

NUNES, Paulo Henrique Faria. **Meio ambiente & mineração: O desenvolvimento Sustentável**. Curitiba: Ed. Juruá, 2011.

NUNES, L. P; KREISCHER, A. T. Introdução à Metalurgia e aos materiais Metálicos. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 376p.

OLIVEIRA, Luiz Eduardo Lacerda. **Identificação e Isolamento da Bactérias envolvidas na formação de drenagem ácida na mineira na região de Jacobina (Bahia) e o seu uso na Biolixiviação de cobre**. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Instituto de Ciências da Saúde, Universidade Federal da Bahia, 2015. Disponível em: <[https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/16455/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_ICS\\_%20Lui%20Eduardo%20Lacerda%20de%20Oliveira.pdf](https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/16455/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_ICS_%20Lui%20Eduardo%20Lacerda%20de%20Oliveira.pdf)>. Acesso em: 27 fev. 2017.

OLIVEIRA, Débora Monteiro et al. Biolixiviação: Utilização de Micro-organismos na Extração de Metais. **Série de Tecnologia Ambiental**. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2010.

OLIVEIRA, J.F; HORTA, R. M.; SAMPAIO, J.A. **Flotação de Rejeitos finos de scheelita em planta piloto**. Centro de Tecnologia Mineral-CETEM/CPRM. V.21, Brasília, 1982. Disponível em:< <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/216>> Acesso em: 20 ago. 2017.

\_\_\_\_\_. Débora Monteiro. **Potencialidade do tensoativo (ramnolipídio) comercial na biolixiviação de minério primário de cobre**. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Minas, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009; 94. Disponível em: <http://tpqb.eq.ufrj.br/download/biolixiviacao-de-minerio-primario-de-cobre.pdf>.> Acesso em: 2 jun. 2017.

PELCZAR, Michael Joseph et al. **Microbiologia: Conceitos e aplicações**. 2. ed. v. I. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1997.

PETTA, Ronaldo Antonio et al. **Caracterização de rejeitos provenientes da usina de beneficiamento do minério da Mina Brejuí/RN**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 19., 2002, Recife. v. 1, p.75. Disponível em: <[http://searchentmme.yang.art.br/download/2002/caracteriza%C3%A7%C3%A3o\\_de\\_min%C3%A9rios/1201%20-%20Carvalho,E.B.\\_Lima,R.F.S.\\_Petta,%20R.A.\\_Paulo,J.B.A.\\_Souza,L.C%20-%20CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20DE%20REJEITOS%20PROVENIENTES%20DA%20USINA%20DE%20BENEFICIAMENTO%20DO%20MIN%C3%89RIO%20DA%20MINA%20BREJU%C3%8DRN.pdf](http://searchentmme.yang.art.br/download/2002/caracteriza%C3%A7%C3%A3o_de_min%C3%A9rios/1201%20-%20Carvalho,E.B._Lima,R.F.S._Petta,%20R.A._Paulo,J.B.A._Souza,L.C%20-%20CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20DE%20REJEITOS%20PROVENIENTES%20DA%20USINA%20DE%20BENEFICIAMENTO%20DO%20MIN%C3%89RIO%20DA%20MINA%20BREJU%C3%8DRN.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2017.

\_\_\_\_\_. Influence of mining activity on the downstream sediments of scheelite mines in Currais Novos (NE Brazil). **Environmental Earth Sciences**, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-014-3093-0>>. Acesso em: 2 nov. 2015.

PHILIPPI JR, Arlindo; ROMERO, Marcelo de Andrade; BRUNA, Gilda. Collet. **Política e gestão ambiental**. In: Curso de Gestão Ambiental – São Paulo: MANOLE, 2004.

PINHEIRO, Viviane da Silva; BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães; LEITE, José Yvan Pereira. Influência da qualidade da água na flotação de quartzo com amina. Holos, Natal, RN,

ano 26, vol.3, 2010. Disponível em:

<<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/448>> Acesso em: 12 jun. 2016.

PINHEIRO, V. S.; LEITE, J. Y. P. Qualidade da água de processo usada em mineração – Estudo de Caso da Mina Brejuí. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE E NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., 2009, Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, 2009. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/275462962\\_QUALIDADE\\_DA\\_AGUA\\_DE\\_PROCESSO\\_USADA\\_EM\\_MINERACAO\\_-\\_ESTUDO\\_DE\\_CASO\\_DA\\_MINA\\_BREJUI](https://www.researchgate.net/publication/275462962_QUALIDADE_DA_AGUA_DE_PROCESSO_USADA_EM_MINERACAO_-_ESTUDO_DE_CASO_DA_MINA_BREJUI)> Acesso em: 10 jun. 2017.

\_\_\_\_\_. Flotação com amina: a importância da qualidade da água. **Rem: Revista Escola Minas**, Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 549-552, dez. 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672012000400017&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672012000400017&lng=en&nrm=iso)> Acesso em: 18 Ago. 2017.

PRATAS, J et al. Plants growing in abandoned mines of Portugal are useful for biogeochemical exploration of arsenic, antimony, tungsten and mine reclamation. **Journal of Geochemical Exploration**, v.85, p.99-107, 2005.

PRADHAN N, NATHSARMA kcs, RAO K, SUKLA LB, MISHRA BK. Heap bioleaching of chalcopyrite: A review. **Minerals Engineering**. 2008; 21: 355-365. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/223414415Heap\\_bioleaching\\_of\\_chalcopyrite:A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/223414415Heap_bioleaching_of_chalcopyrite:A_review)>. Acesso em: 02 jun. 2017.

PONTES, Julio César.; FARIAS, Maria Salidelândia. Sobral; LIMA, Vera Lúcia Antunes. Mineração e seus reflexos socioambientais: estudo de impactos de vizinhança (EIV) causados pelo desmonte de rochas com uso de explosivos. **Revista Polêm!ca**, v. 12, n. 1, Rio de Janeiro, jan./mar. 2013. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/polemica/article/view/5277>>. Acesso em: dez. 2015.

RIBEIRO, M. C.; STELATO, M. M. **Microbiologia prática**: Aplicações de aprendizagem de microbiologia básica – bactérias, fungos e vírus. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2011.

RIBEIRO NETO, Fatima Sueli et. al. (Coord). **O mapa da exposição à sílica no Brasil**. Rio de Janeiro: UERJ, Ministério da Saúde, 2010. 94 f. Disponível em: <[http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/mapa\\_exposicao\\_silica\\_brasil.pdf](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/mapa_exposicao_silica_brasil.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2016.

RIO GRANDE DO NORTE. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte – IDEMA (2008). **Perfil do seu município**. Disponível em: <<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/idema/DOC/DOC000000000016632.PDF>>. Acesso em: 30 out. 2015.

RIEKKOLA, Vanhanen M. Talvivaara, Sotkamo. Minedbioleaching of a polymetallic nickel ore in subarctic climate. **Nova Biotechnol.** v. 10, p.7-14, 2010. Disponível em: <[http://www.nbc-journal.fpv.ucm.sk/archive/revue\\_nova\\_biotechnologica\\_10\\_1/Riekkola-Vanhanen\\_2010\\_NB1.pdf](http://www.nbc-journal.fpv.ucm.sk/archive/revue_nova_biotechnologica_10_1/Riekkola-Vanhanen_2010_NB1.pdf)> Acesso em: 16 jun. 2017.

ROMERO, F. M.; ARMIENTA, M. A.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, G. Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. **Applied Geochemistry**, v.22, p.109–127, 2007. Disponível em:

SAND, W.; GEHRKE, T., Extracellular polymeric substances mediate bioleaching/biocorrosion via interfacial processes involving iron(III) ions and acidophilic bacteria. **Research in Microbiology**, v. 157, 49–56, 2006. Disponível em: <<http://sci-hub.cc/10.1016/j.resmic.2005.07.012#>>. Acesso em 10 jun. 2017.

SANTOS, Jeane Karla Leoncio; DANTAS, Eduardo Janser de Azevedo. **Contribuição da Exploração da Scheelita para o desenvolvimento de Currais Novos-RN**. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFRN – CONGIC, 9., 2013, Currais Novos: IFRN, 2013. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ocs/index.php/congic/ix/paper/viewFile/1218/133>>. Acesso em: 01 dez. 2015.

SANTOS, Marcus Tullius L. Fernandes dos. **Direito Ambiental e Minerário: Impactos provocados pela mineração de calcário potiguar**. Mossoró: UERN, 2009.

SÁNCHEZ, Luíz Enrique. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. 2 ed. São Paulo: Ed. Oficina de Texto, 2013.

\_\_\_\_\_. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo. Oficina de Textos, 2008.

SANTANDREA, T.C.S; COUTO, H.J.B; CORREIA, J.C.G; LEANDRO, A.P; SOUZA, O.O. **Caracterização e concentração por flotação de scheelita proveniente de um rejeito**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 26, 2015, Poços de Caldas-MG, 2015. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2015/CAC00140015.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2017.

SHINZATO, Edgar. Solos Tropicais. In: SILVA, C. R. (Org.). **Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado para entender o presente e prever o futuro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 122-133. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade\\_brasil.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade_brasil.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2015.

SHIERS, D.W.; COLLINSON, D.M. Life in heaps: a review of microbial responses to variable acidity in sulfide mineral bioleaching heaps for metal extraction. **Research in Microbiology**, 167. Jun, 2016. 576-586. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092325081630047X>>. Acesso em: 24 jun. 2017.

SILVA, Edna Lúcia.; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 2ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2005. 120p. Disponível em:

<[https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia\\_de\\_pesquisa\\_e\\_elaboracao\\_de\\_teses\\_e\\_dissertacoes\\_4ed.pdf](https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes_4ed.pdf)> Acesso em: 29 jun. 2016.

SILVEIRA, Missifany; ARAUJO NETO, Mário Diniz de. Licenciamento ambiental de grandes empreendimentos: conexão possível entre saúde e meio ambiente. **Revista Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19 n. 9, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-81232014000903829](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232014000903829)>. Acesso em: 1 maio 2016.

SILVA, João Paulo. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista Espaço da Sophia**, São Paulo, n.8, 2007. Disponível em: <<http://www.registro.unesp.br/sites/museu/basededados/arquivos/00000429.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2015.

SKINNER, B. J. **Recursos minerais da Terra**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 140 p.

SOBRAL, Luiz Gonzaga Santos et al. **Biolixiviação de Concentrado de Flotação de Sulfeto de Cobre**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIO E MINERAÇÃO, 21., 2005, Natal. Disponível em: <[www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/557/38](http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/557/38)>. Acesso em: 14. Jan 2017.

SOBRAL, Luiz Gonzaga Santos; OLIVEIRA, Débora Monteiro; SOUZA, Carlos Eduardo Gomes. **Biohydrometallurgical processes: a practical approach** - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011., 306 f. Disponível em: <<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/biohidro/Publicaciones%20del%20Grupo/Biohydro%20metallurgical%20Processes%20Brasil%202011.pdf>> Acesso em: 15 mar. 2017.

TANNO, Luiz Carlos, SINTONI Ayrtton. **Mineração e município: Bases para planejamento e gestão dos recursos minerais**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2003, 163p. Disponível em: <[www.redeaplmineral.org.br/.../mineracao-municipio-bases-para-planejamento-e-gesta](http://www.redeaplmineral.org.br/.../mineracao-municipio-bases-para-planejamento-e-gesta)>. Acesso em: 5 dez. 2016.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 12. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017, 935 f.

TUNGSTÊNIO. In: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília, 2015. Disponível em: <[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3977](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3977)>. Acesso em: 30 out. 2015.

VALVERDE JÚNIOR, Ivam Macedo; PAULINO, Jéssica Frontino; AFONSO, Júlio Carlos. Rota hidrometalúrgica de recuperação de molibdênio, cobalto, níquel e alumínio de catalisadores gastos de hidrotreatamento em meio ácido. **Revista Química Nova**, v. 31 n. 3, São Paulo, 2008. ISSN 1678-7064. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422008000300036](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422008000300036)>. Acesso em: 12 jan. 2017.

VILLAR, Luciene Dias. Estudo da lixiviação bacteriana de metais presentes em lodo de esgoto sanitário. 2003. 126 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de química, Araraquara, 2003. Disponível em:

<[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100756/villar\\_ld\\_dr\\_araiq.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100756/villar_ld_dr_araiq.pdf?sequence=1&isAllowed=y)> Acesso em: 10 dez. 2016.

YAMANE, Luciana Harue; H.; ESPINOSA, Denise Croce Romano.; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. Lixiviação Bacteriana de Sucata Eletrônica: Influência dos Parâmetros de Processo. **Revista Tecnologia Metalurgia e Materiais**. Mineração, São Paulo, v.10, n. 1, p.50-56, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2013.007>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

\_\_\_\_\_. Luciana Harue. Recuperação de Metais de Placas de Circuito Impresso de Computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico. 2012. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde.../TESELucianaREVISADA.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde.../TESELucianaREVISADA.pdf)> Acesso em: 10 fev. 2017.

YANG, T., XU, Z., WEN, J., YANG, L. Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Hydrometallurgy**, v. 97, n.1-2, p. 29-32, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X08003824>> Acesso em: 04 mai. 2017.

WATLING H.R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides e a review. **Hydrometallurgy**. Austrália: Junho, v. 84, n. 1-2, out. 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X06001125>> Acesso em: 12 jun. 2017.

WILLIG, Cesar D. Geologia do Tungstênio. In: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília. **Principais Depósitos Minerais do Brasil**. Brasília: Companhia Vale do Rio Doce, 1986. v. 2.

APÊNDICE A – Características dos principais microrganismos biolixiviantes e seus respectivos minérios de atuação.

Quadro 3 – Características dos principais microrganismos biolixiviantes e seus respectivos minérios de atuação.

DOMÍNIO	MICROORGANISMO	NUTRIÇÃO	TEMPERATURA	FAIXA DE pH	pH ÓTIMO	AGENTE LIXIVIANTE	MINÉRIO DE ATUAÇÃO	REFERÊNCIA
ARCHAEA	<i>Acidianus ambivalens</i>	Heterotrófico Facultativo				Ácido sulfúrico	Enxofre	JOHNSON (1998)
	<i>Acidianus brierleyi</i>	Heterotrófico Facultativo	45–75	Acidofílico	1.5-3.0	Ácido sulfúrico	Enxofre	MUÑOZ et al. (1995)
	<i>Acidianus infernus</i>	Heterotrófico Facultativo				Ácido sulfúrico	Enxofre	JOHNSON (1998)
	<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	Quimilitoautotrófico	15– 45	1.3-2.2	1.7	Ferro férrico	Ferro	GOLYSHINA et al. (2000)
	<i>Metallosphaera prunae</i>	Quimilitoautotrófico	Termofílico Extremo			Ferro férrico	Enxofre	JOHNSON (1998)
	<i>Metallosphaera sedula</i>	Quimilitoautotrófico	Termofílico Extremo	Acidofílico		Ferro férrico	Enxofre	JOHNSON (1998)
	<i>Picrophilus oshimae</i>							JOHNSON (1998)
	<i>Picrophilus torridus</i>							JOHNSON (1998)
	<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>	Quimilitoautotrófico	55–85	0.9-5.8	2.0-3.0	Ferro Férrico, Ácido Sulfúrico	Enxofre e Ferro	AMARO et al. (1992)
	<i>Sulfolobus ambivalens</i>	Quimilitoautotrófico	Termofílico Extremo			Ferro Férrico, Ácido Sulfúrico	Enxofre e Ferro	ROSSI (1990)
	<i>Sulfolobus brierleyi</i>	Quimilitoautotrófico	Termofílico Extremo			Ferro Férrico, Ácido Sulfúrico	Enxofre e Ferro	BRIERLEY (1977)
	<i>Sulfolobus hakonensis</i>	Quimilitoautotrófico					Enxofre e Ferro	ROSSI (1990)
	<i>Sulfolobus metallicus</i>	Quimilitoautotrófico					Enxofre e Ferro	ROSSI (1990)

	<i>Sulfolobus solfataricus</i>	Quimilitoautotrófico	Termofílico Extremo			Ferro Férrico, Ácido Sulfúrico	Enxofre e Ferro	JOHNSON (1998)
	<i>Sulfolobus thermosulfidooxidans</i>	Quimilitoautotrófico	Termofílico Extremo			Ferro Férrico, Ácido Sulfúrico	Enxofre e Ferro	JOHNSON (1998)
	<i>Sulfurococcus mirabilis</i>	Mixotrófico	Termofílico Extremo	Acidofílico		Ferro Férrico, Ácido Sulfúrico		BARRETT et al. (1993), JOHNSON (1998)
	<i>Sulfurococcus yellowstonii</i>	Mixotrófico				Ferro Férrico, Ácido Sulfúrico		JOHNSON (1998)
	<i>Thermoplasma acidophilum</i>						Enxofre	JOHNSON (1998)
	<i>Thermoplasma volcanicum</i>						Enxofre	JOHNSON (1998)
<b>BACTERIA</b>	<i>Acetobacter methanolicus</i>	Heterotrófico		Acidofílico		Gluconato		GLOMBITZA et al. (1988)
	<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>	Heterotrófico					Ferro	JOHNSON (1998), EDWARDS et al. (1999)
	<i>Acidiphilium angustum</i>							EDWARDS et al. (1999)
	<i>Acidiphilium cryptum</i>	Heterotrófico	Mesofílico	2.0-6.0		Ácidos orgânicos		GOEBEL and STACKEBRANDT (1994)
	<i>Acidiphilium symbioticum</i>	Heterotrófico	Mesofílico		3.0	Ácidos orgânicos		BHATTACHARYA et al. (1991)
	<i>Acidobacterium capsulatum</i>	Quimiorganotrófico	Mesofílico	3.0-6.0				KISHIMOTO et al. (1991)
	<i>Acidocella sp.</i>							JOHNSON (1998)
	<i>Acidomonas methanolica</i>	Heterotrófico						JOHNSON (1998)



	<i>Arthrobacter sp</i>	Heterotrófico						JOHNSON (1998)
	<i>Aureobacterium liquifaciens</i>	Heterotrófico						EDWARDS et al. (1999)
	<i>Bacillus sp</i>	Heterotrófico					Cobre	CERDÁ et al. (1993), GROUDEV and GROUDEVA (1993)
	<i>Bacillus coagulans</i>	Heterotrófico	22	5.4-6.0			Cobre	BAGLIN et al. (1992)
	<i>Bacillus licheniformis</i>	Heterotrófico	37				Cobre	MOHANTY and MISHRA (1993)
	<i>Bacillus megaterium</i>	Heterotrófico				Citrato	Cobre	KREBS et al. (1997)
	<i>Chromobacterium violaceum</i>	Heterotrófico				Cianeto		LAWSON et al. (1999)
	<i>Comamonas testosteroni</i>	Heterotrófico						EDWARDS et al. (1999)
	<i>Crenothrix sp</i>	Autotrófico Facultativo	18-24	5.5-6.2		Ferro férrico		ROSSI (1990)
	<i>Enterobacter agglomerans</i>	Heterotrófico	22	5.4-6.0				BAGLIN et al. (1992)
	<i>Enterobacter cloacae</i>	Heterotrófico	22					BAGLIN et al. (1992)
	<i>Gallionella sp</i>	Autotrófico	6-25	6.4-6.8		Ferro férrico	Ferro	ROSSI (1990)
	<i>Kingella kingae</i>							EDWARDS et al. (1999)
	<i>Lactobacillus acidophilus</i>	Heterotrófico	37				Cobre	ACHARYA et al. (1998)
	<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	Quimilitoautotrófico	30		1.7-1.9	Ferro férrico	Ferro	SAND (1992), RAWLINGS et al. (1999)
	<i>Leptospirillum thermoferrooxidans</i>	Quimilitoautotrófico	45-50	5.8-7.8		Ferro férrico	Ferro	BARRETT et al. (1993)

	<i>Leptothrix discophora</i>	Autotrófico Facultativo	5- 40			Ferro férrico, Ácido Sulfúrico	Ferro	EDWARDS et al. (1999)
	<i>Metallogenium sp</i>	Heterotrófico		3.5-6.8	4.1	Ferro férrico	Manganês	ROSSI (1990)
	<i>Ochrobacterium anthropi</i>	Heterotrófico						EDWARDS et al. (1999)
	<i>Propionibacterium acnes</i>	Heterotrófico	37					ACHARYA et al. (1998)
	<i>Pseudomonas cepacia</i>	Heterotrófico	22	5.4-6.0			Cobre	BAGLIN et al. (1992)
	<i>Pseudomonas putida</i>	Heterotrófico				Citrato, Gluconato	Cobre	KREBS et al. (1997)
	<i>Psychrobacter glacincola</i>	Heterotrófico						EDWARDS et al. (1999)
	<i>Serratia ficaria</i>	Heterotrófico						EDWARDS et al. (1999)
	<i>Siderocapsa sp</i>	Heterotrófico				Ferro férrico		ROSSI (1990)
	<i>Staphylococcus lactis</i>	Heterotrófico	37					ACHARYA et al. (1998)
	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	Heterotrófico						EDWARDS et al. (1999)
	<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	Quimiolitototrófico	50	Acidofílico Extremo		Ferro férrico, Ácido Sulfúrico	Enxofre e Ferro	JOHNSON (1998)
	<i>Thermothrix thiopara</i>	Quimiolitototrófico	60-75	Neutro		Ácido Sulfúrico		BRIERLEY (1977)
	<i>Thiobacillus acidophilus</i>	Mixotrófico	25-30	1.5-6.0	3.0	Ácido Sulfúrico		CERDÁ et al. (1993), JOHNSON (1998)
	<i>Thiobacillus albertis</i>	Mixotrófico	28-30	2.0-4.5	3.5-4.0	Ácido Sulfúrico		JOHNSON (1998)

	<i>Thiobacillus caldus</i>	Quimiolitoautotrófico	45			Ácido Sulfúrico		AMARO et al. (1992), DOPSON and LINDSTROM (1999)
	<i>Thiobacillus capsulatus</i>	Quimiolitoautotrófico				Ácido Sulfúrico		EWART and HUGHES (1991)
	<i>Thiobacillus concretivorus</i>	Quimiolitoautotrófico		0.5-6.0		Ácido Sulfúrico		ROSSI (1990)
	<i>Thiobacillus delicatus</i>	Mixotrófico	25-30		5.0-7.0	Ácido Sulfúrico		ROSSI (1990)
	<i>Thiobacillus denitrificans</i>	Quimiolitoautotrófico	30	5.0-7.0		Ácido Sulfúrico	Ferro	GROUDEV and GROUDEVA (1993)
	<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Quimiolitoautotrófico	28-35	1.4-6.0	2.4	Ferro férrico, Ácido Sulfúrico	Enxofre Cobre Ferro	SAND (1992)
	<i>Thiobacillus intermedius</i>	Heterotrófico Facultativo	30	1.9-7.0	6.8	Ácido Sulfúrico		ROSSI (1990)
	<i>Thiobacillus kabobis</i>	Mixotrófico	28	1.8-6.0	3.0	Ácido Sulfúrico		ROSSI (1990)
	<i>Thiobacillus neapolitanus</i>	Quimiolitoautotrófico	28	3.0-8.5	6.2-7.0	Ácido Sulfúrico		GROUDEV and GROUDEVA (1993)
	<i>Thiobacillus novellus</i>	Quimiolitoautotrófico	30	5.0-9.0	7.8-9.0	Ácido Sulfúrico		ROSSI (1990)
	<i>Thiobacillus organoparus</i>	Mixotrófico	27-30	1.5-5.0	2.5-3.0	Ácido Sulfúrico		ROSSI (1990)
	<i>Thiobacillus perometabolis</i>	Quimiolitoheterotrófico	30	2.6-6.8	6.9	Ácido Sulfúrico		ROSSI (1990)
	<i>Thiobacillus prosperus</i>	Quimiolitoautotrófico	23-41	1.0-4.5		Ácido Sulfúrico		HUBER and STETTER (1989)
	<i>Thiobacillus pumbophilus</i>	Quimiolitoautotrófico	27	4.0-6.5		Ácido Sulfúrico		DROBNER et al. (1992)

	<i>Thiobacillus rubellus</i>	Quimiolitoautotrófico	25-30		5.0-7.0	Ácido Sulfúrico		BARRETT et al. (1993)
	<i>Thiobacillus tepidarius</i>	Quimiolitoautotrófico				Ácido Sulfúrico		HUGHES and POOLE (1989)
	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	Quimiolitoautotrófico	10-37	0.5-6.0	2.0-3.5	Ácido Sulfúrico	Enxofre	SAND (1992)
	<i>Thiobacillus thioparus</i>	Quimiolitoautotrófico	11-25	4.5-10.0	6.6-7.2	Ácido Sulfúrico	Tiosulfato de sódio	BLOWES et al. (1998)
	<i>Thiobacillus versutus</i>	Quimiolitoautotrófico			8.0-9.0	Ácido Sulfúrico		ROSSI (1990)
	<i>Thiomonas cuprinus</i>	Heterotrófico Facultativo	30-36		3.0-4.0	Ácido Sulfúrico		HUBER and STETTER (1990)
<b>EUKARYA</b>	<i>Actinomucor sp.</i>	Heterotrófico	27			Succinato		MÜLLER and FÖRSTER (1964)
<b>FUNGI</b>	<i>Alternaria sp.</i>	Heterotrófico	32			Citrato, Oxalato		KOVALENKO and MALAKHOVA (1990)
	<i>Aspergillus awamori</i>	Heterotrófico	28					OGURTSOVA et al. (1989)
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Heterotrófico						BOSECKER (1989)
	<i>Aspergillus niger</i>	Heterotrófico	30			Oxalato, Gluconato, Malato, Tartarato, Succinato		DAVE et al. (1981), citrate, BOSECKER (1987)
	<i>Aspergillus ochraceus</i>	Heterotrófico	28			Citrato		OGURTSOVA et al. (1989)
	<i>Aspergillus sp</i>	Heterotrófico	30			Citrato, Oxalato		TZEFERIS (1994)

	<i>Cladosporium resinae</i>	Heterotrófico	28				Cobre	OGURTSOVA et al. (1989)
	<i>Cladosporium sp</i>	Heterotrófico					Cobre	KOVALENKO and MALAKHOVA (1990)
	<i>Coriolus versicolor</i>	Heterotrófico				Oxalato		SAYER et al. (1999)
	<i>Fusarium sp.</i>	Heterotrófico				Oxalato, Malato, Piruvato, Oxalacetato		BOSECKER (1989)
	<i>Mucor racemosus</i>	Heterotrófico	27			Citrato, Succinato		MÜLLER and FÖRSTER (1964)
	<i>Paecilomyces variotii</i>	Heterotrófico				Citrato, Oxalato		DAVE et al. (1981)
	<i>Penicillium sp</i>	Heterotrófico	25				Cobre	GUPTA and EHRlich (1989)
	<i>Penicillium chrysogenum</i>	Heterotrófico	28				Cobre	OGURTSOVA et al. (1989)
	<i>Penicillium funiculosum</i>	Heterotrófico				Citrato	Cobre	BOSECKER (1989)
	<i>Penicillium notatum</i>	Heterotrófico	26				Cobre	KARAVAIKO et al. (1980)
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	Heterotrófico	22-30			Citrato, Oxalato, Gluconato	Cobre	TARASOVA et al. (1993), SILVERMAN and MUNOZ (1971)
	<i>Rhizopus japonicus</i>	Heterotrófico						OGURTSOVA et al. (1989)
	<i>Trichoderma lignorum</i>	Heterotrófico	24-26					AVAKYAN et al. (1981)
	<i>Trichoderma viride</i>	Heterotrófico	32					BOROVEC (1990)

<b>FERMETADO RES</b>	<i>Candida lipolytica</i>	Heterotrófico	30					GROUDEV (1987)
	<i>Rhodotorula sp.</i>	Heterotrófico						EHRlich (1963), CERDÁ et al. (1993)
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Heterotrófico	28					OGURTSOVA et al. (1989)
	<i>Torulopsis sp.</i>	Heterotrófico						CERDÁ et al. (1993)
	<i>Trichosporon</i>	Heterotrófico						EHRlich (1963)
<b>ALGAS</b>	Não identificado							GROUDEV and GROUDEVA (1993)
<b>PROTOZOÁRIOS</b>	Não identificado							GROUDEV and GROUDEVA (1993)
<b>AMOEBAS</b>	Não identificado							EHRlich (1963)

Fonte: Adaptado de Brandl (2001).

## ANEXO A – Artigo submetido à Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental

[www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao\\_ambiental/author](http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/author)



**Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**



www.portaldeperiodicos.unisul.br  
ISSN 2238 8753

---

CAPA
SOBRE
PÁGINA DO USUÁRIO
PESQUISA
ATUAL
ANTERIORES
NOTÍCIAS

---

PORTAL DE PERIÓDICOS UNISUL
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO AMBIENTAL

---

Capa > Usuário > Autor > **Submissões Ativas**

## Submissões Ativas

**ATIVO** | ARQUIVO

ID	MM-DD ENVIADO	SEÇÃO	AUTORES	TÍTULO	SITUAÇÃO
5270	08-22	ART	Freire, Leite, Teixeira, Pontes	BIOLIXIVIAÇÃO DE SCHEELITA UTILIZANDO ÁGUA DE MINA	EM AVALIAÇÃO

**Iniciar nova submissão**  
CLIQUE AQUI para iniciar os cinco passos do processo de submissão.

R. gest. sust. ambient., Florianópolis. Universidade do Sul de Santa Catarina, Santa Catarina, ISSN 2238-8753  
Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional.



**Ajuda**

**Usuário**  
Logado como **gabifreire**

- Me
- Perfil
- Sair

**Autor**

Submissões

- Ativas
- Arquivadas
- Novas

**Conteúdo**

Pesquisar

Escopo

Todos

Procurar

- Por
- Por
- Por
- Outros

## BIOLIXIVIAÇÃO DE SCHEELITA UTILIZANDO ÁGUA DE MINA

### RESUMO

O processo de biolixiviação amplia sua inserção no setor mineral. A extração de scheelita opera desde 1943, com destaque para a mina Brejuí, localizada em Currais Novos/RN, que acumula rejeitos com 6,7 milhões de toneladas e teor de 0,1% de  $WO_3$ . Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento das bactérias presentes na água da mina Brejuí com vistas a solubilizar a scheelita. O estudo foi realizado com amostras de água e de scheelita coletadas na mina Brejuí. A água foi submetida a análise físico-química e bacteriológica que apresentou resultados para dureza (273 mg/l), e pela presença de bactérias heterotróficas (296 UFC/ml). As amostras de scheelita foram submetidas a estágio de comunicação e classificadas em peneiras de 74  $\mu m$ . A biolixiviação foi realizada em incubadora Shaker, com controle de agitação (120 rpm), temperatura (25 C) e variado o tempo de incubação. Os ensaios foram realizados com 1 g de scheelita em meio composto por água de mina, extrato de malte, glicose e peptona. A solubilização foi analisada em soluções com água da mina e pH iniciais entre 2-5, corrigidos com solução de ácido sulfúrico. As lixívias foram filtradas, sendo o retido no filtro submetido a mufla em temperatura de 700 °C durante 50 minutos. O filtrado foi submetido a análise bacteriológica em placa de Petri. Foi observado que a extração de scheelita e crescimento bacteriológico são crescentes para as condições estudadas, assim é necessário ampliar o tempo de contato para maximizar a biolixiviação.

**Palavras-chave:** Biolixiviação. Microrganismos. Scheelita.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria mineral representa em torno de 4 % do PIB (Sumário Mineral, 2016). No Estado do Rio Grande do Norte a extração de scheelita é uma importante atividade econômica que se encontra em operação desde 1943, contudo, as plantas de processamento dos minérios têm gerado grande quantidade de rejeitos com teores da ordem de 0,1% de  $WO_3$  (NESI, 2001).

Em 2007 foi realizado trabalho nas plantas de processamento de scheelita das minas Brejuí, Bodó e Barra Verde, sendo verificado que os parâmetros operacionais dos equipamentos de concentração não estão otimizados, onde isso eleva a geração de rejeitos de scheelita (Leite, Araújo, Santos, 2007)

Os rejeitos de scheelita foram objeto de trabalhos de pesquisa nas áreas de concentração gravítica (LEITE et al, 2007), que avaliou o processamento das minas de scheelita do município de Currais Novos-RN, e identificou que a Mina Brejuí consegue recuperar scheelita com valores de 60%. Couto et al. (2016) usou o método de flotação e obteve-se uma recuperação de scheelita da ordem de 65% para um teor de 4,3%  $WO_3$ . Em contrapartida, Oliveira et al (1982), usando a flotação para



recuperar scheelita, obteve apenas 61,5% de recuperação de scheelita. Santandrea et al., (2015) também obteve uma recuperação de scheelita da ordem de 60% usando flotação por coluna. Fernandes (2009), utilizou o método de lixiviação ácida para concentrar o minério, obtendo uma recuperação de scheelita com valor da ordem de 90,18 %.

A biolixiviação de scheelita é pouco explorada, tendo na literatura apenas um trabalho com resultado de extração de scheelita de 5 %  $WO_3$  (CARVALHO, 1990).

A biolixiviação consiste na utilização de microrganismos capazes de promover a solubilização de componentes minerais presentes em uma amostra mineral (HORTA, 2008). A solubilização de metais apresenta-se como uma alternativa na recuperação de metais de interesse econômico (BRANDL et al., 2011). O processo acontece por ação de microrganismos que fazem a solubilização do mineral em meio aquoso, a fim de extrair metais de valor econômico.

A hidrometalurgia é uma técnica surgida no período dos antigos alquimistas, quando analisaram a conversão de metais-base em ouro. No ano de 1960 a biolixiviação foi descoberta, porém, apenas recentemente passou a ser mais aplicada pela indústria mineral. Encontrar-se fundamentada no uso de microrganismos, bactérias e fungos, para promover a dissolução de metais de baixo teor (HABASHI, 2005).

Essa técnica tem sido muito utilizada pelo setor mineiro, especialmente por empresas relacionadas ao setor de tratamento de minerais metálicos. É considerada uma importante alternativa na recuperação de minérios de baixo teor, uma vez que apresenta vantagens em relação aos outros processos convencionais (BEVILAQUA, 2002).

No Brasil, as usinas de beneficiamento de scheelita apresentam uma baixa eficiência na recuperação dos finos, acarretando em uma grande quantidade de scheelita desperdiçada no rejeito (FERNANDES, 2009). O autor acrescenta ainda que no município de Currais Novos/RN concentra-se a produção de concentrados de scheelita no Brasil, onde há uma quantidade muito grande de rejeitos do beneficiamento de scheelita resultando em um grande passivo ambiental.

O crescente avanço dessa rota biotecnológica na atualidade justifica-se, principalmente, em razão da escassez dos minérios chamados ricos, como por exemplo: ouro e cobre (BEVILAQUA, 2002). Desta forma, a biohidrometalurgia pode ser considerada uma rota tecnológica alternativa importante para extrair scheelita.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da biolixiviação de scheelita a partir de bactérias disponíveis em ambiente de água de mina.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MINERAÇÃO DE SCHEELITA

A mina Brejuí é considerada a maior mina de scheelita da América do Sul. Apresenta um potencial de produção de mais 20 (vinte) anos, sendo uma das mais importantes da história da mineração brasileira (IBRAM, 2010).

O complexo mineiro de scheelita de Currais Novos tem potencial para explorar outras substâncias, tais como o molibdênio e o calcário. Há um registro oficial, segundo IBRAM (2010), de que existam 58 milhões de toneladas de calcário somente na parcela da Brejuí 1, e nos outros setores da mina existem estimativas não confirmadas de 100 milhões de toneladas. A figura 1 apresenta pilha típica de disposição rejeito.



Figura 01 – Pilha de rejeito existente na área da Mina Brejuí.  
Fonte: Dos autores (2016).

Os minérios não se encontram suficientemente puros ou adequados para a sua aplicação em processos industriais e precisam passar por etapas de lavra e processamento. Como a média de minérios econômicos está diminuindo, as quantidades de resíduos geradas para produzir uma determinada quantidade de metal aumentarão, resultando em quantidades elevadas de resíduos. A melhor alternativa seria produzir pouco ou nenhum desperdício (Dunbar, 2017).

Johnson (2013) realizou trabalho de revisão para as aplicações do bioprocessamento bacteriano aplicado à mineração, onde esta apresentou vários tipos diferentes de biotecnologia, e sugere que as biotecnologias têm o potencial de redefinir completamente a atual sequência de extração de metal.

## 2.2 BIOLIXIVIAÇÃO

A biolixiviação é um método hidrometalúrgico utilizado para extrair metais de baixo teor. Foi descoberta em meados da década de 60, porém, apenas na década de 80 passou a ser mais aplicada pela indústria mineral. Pode ser considerada uma rota biotecnológica para a recuperação de metais presentes em minérios oxidados e sulfetados na fase de solubilização, ou no pré-tratamento de minérios e concentrados. Essa rota é muito utilizada na Austrália, na África do Sul, e no Canadá (ARAÚJO et al., 2014).

A lixiviação bacteriana tem sido aplicada em escala industrial para recuperação de cobre, urânio e, mais recentemente, de ouro, em vários países, destacando-se os Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Rússia, Espanha, Chile, México, Bulgária e Austrália (GARCIA JÚNIOR e URENHA, 2001).

É considerada uma importante alternativa na recuperação de minérios de baixo teor, uma vez que apresenta vantagens em relação aos outros processos convencionais (BEVILAQUA, 2002). Os métodos de lixiviação microbiana estão sendo cada vez mais aplicados para a recuperação de metais a partir de minérios de baixo teor e concentrados que não podem ser processados economicamente por métodos convencionais.

A utilização de microrganismos na hidrometalurgia com objetivo de solubilizar metais a partir de minérios de baixos teores (biolixiviação) ou como pré-tratamento de sulfetos na extração de ouro e prata (bioxidação) é conhecido há muito tempo, além disso já vem sendo aplicado em escala piloto e comercial em todo o mundo. Essa técnica apresenta três diferentes desenhos ou sistemas: biolixiviação em montes para rejeitos minerais conhecidos como “dump leaching”, biolixiviação/bioxidação em pilhas “heap leaching” e em tanques agitados para concentrados (BLANDÓN, 2010).

## 2.3 ÁGUA NA MINERAÇÃO

Na produção de metais, principalmente, na extração por hidrometalurgia, a água é considerada um insumo de grande relevância, em função das reações de separação mineral ocorrerem em meio aquoso (CIMINELLI, et al., 2006).

É importante enfatizar o que disse a autora em destaque, que a água usada nos processos hidrometalúrgicos pode ser tratada e reciclada minimizando o consumo de água nova e de reagentes. Entretanto, mesmo com o processo de reciclagem da água na hidrometalurgia, pode haver geração de soluções aquosas contendo uma grande variedade de íons metálicos e reagentes, que podem ser tóxicos ao ambiente (CIMINELLI et al, 2006).

Na indústria mineral a água pode ser utilizada em várias etapas, que podem ir desde a lavra até os processos metalúrgicos, especialmente, na fase de separação mineral e classificação de finos (PINHEIRO; LEITE, 2009).

Durante as atividades minerais que são realizadas para produção de metais, podem ser gerados tanto resíduos sólidos quanto efluentes líquidos, e dependendo das suas composições, bem como, da sua forma de disposição, podem ocasionar diversos impactos negativos para meio ambiente.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A pesquisa foi desenvolvida a partir de coleta de amostras de scheelita e água da Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos/RN. O minério foi coletado da planta de processamento mineral diretamente do equipamento conhecido por jig. A amostra da água foi coletada do tanque de armazenamento, que abastece toda a planta da área industrial. A água foi submetida a análise físico-química e bacteriológica, a fim de caracterizá-la qualitativamente, levando-se em consideração as condições locais.

A análise físico-química utilizou a metodologia da APHA et al. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22th Washington D C: American Public Health Associations, 2012. E, os padrões de referência adotados foram da Portaria Ministério da Saúde nº 2914, de 12 de dezembro de 2011 (Federal) - Padrão de Potabilidade. Em relação à análise bacteriológica da água da mina Brejuí, estabeleceu-se os seguintes parâmetros de análise: coliformes totais, coliformes termotolerantes e bactérias heterotróficas.

A amostra de scheelita foi submetida a fragmentação em almofariz e, posteriormente classificada em peneira até atingir a granulometria menor do que 74  $\mu\text{m}$ . Os produtos foram divididos em alíquotas de 1 g para o ensaio de biolixiviação.

Os ensaios de biolixiviação foram desenvolvidos utilizando 20 erlenmayeres, nos quais foram inseridos 50 ml de água da mina e reagentes (extrato de malte, peptona e glicose) e 1 g de scheelita (-74  $\mu\text{m}$ ). Em seguida foram acondicionados na incubadora *Shaker*, sob as seguintes condições: agitação de 120 rpm, temperatura de 25°C e tempo de contato máximo de 120 h.

Os pHs iniciais das polpas foram controladas e ajustados em 2, 3, 4 e 5, utilizando-se uma solução de ácido sulfúrico. A cada 24 horas foram aferidos o pH e extração de scheelita, tendo em vista avaliar o comportamento da biolixiviação.

Após retiradas da incubadora, conforme o tempo pré-determinado, as amostras foram submetidas a etapa de filtração. A solução filtrada coletou-se uma alíquota para análise microbiológica, tendo em vista avaliar o potencial de microrganismos em placas de Petri, seguindo a técnica *Pour Plate*, para determinar a quantidade de Unidades Formadoras de Colônias (UFC/mL). O sólido retido na membrana filtrante é depositado em cápsulas de porcelanas e submetido à queima em forno Mufla, por 50 minutos a 700°C. E o sólido restante, não-oxidado, do processo de queima é quantificado em balança analítica, a fim de avaliar quanto de scheelita foi solubilizado no processo de biolixiviação.

A metodologia simplificada esta apresenta no fluxograma da figura 02.

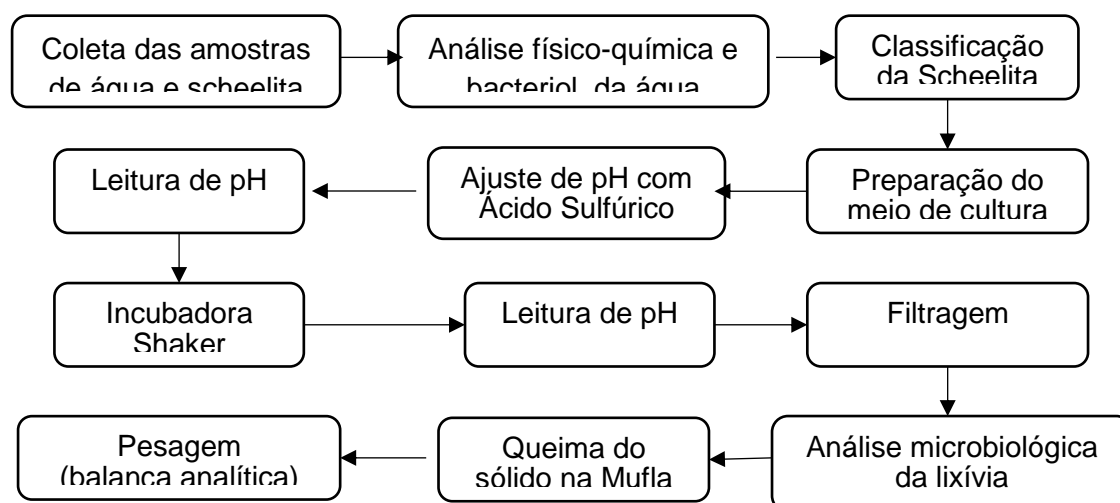


Figura 02 - Fluxograma simplificado dos procedimentos metodológicos da pesquisa para realização dos ensaios de biolixiviação.

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise físico-química e bacteriológica da água da mina Brejuí estão apresentados na tabela 1 e 2, respectivamente.

PARÂMETRO	TÉCNICA UTILIZADA *	RESULTADO
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S/cm}$ )	Potenciometria	856,00
Turbidez (NTU)	Turbidimetria	41,00
pH (ND)	Potenciometria	6,65
Sólidos Totais (mg/L)	Gravimetria	474,00
Alcalinidade Total (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	Titulometria	17,56
Dureza total (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	Titulometria	273,00
Cálcio (mg/L $\text{Ca}^{+2}$ )	Titulometria	49,27
Sulfato (mg/L $\text{SO}_4^{+2}$ )	Titulometria	218,85
Cloreto (mg/L $\text{Cl}^-$ )	Titulometria	108,33

Tabela 01 – Resultado da análise físico-química da água utilizada no processo de beneficiamento da Mina Brejuí-RN.

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

PARÂMETRO	TÉCNICA	RESULTADO
<b>Bactérias Heterotróficas</b> (UFC/mL)	Pour Plate	496

Tabela 02 – Análise bacteriológica da água da Mina Brejuí.

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Como pode ser observado a água da mina apresentou valores elevados para todos os parâmetros, principalmente, para a condutividade elétrica, que foi da ordem de 856,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  que mostra a elevada disponibilidade iônica na solução, como mostrado nas elevadas concentrações de cálcio e magnésio. Estes também contribuem para a elevada dureza da água e são deletérios nos processos de flotação (PINHEIRO, BALTAR, LEITE, 2012).

Conforme estudos realizados por Pinheiro e Leite (2009) foi possível identificar que há altos teores de bicarbonatos, o que caracteriza uma condição de dureza temporária (carbonatada) nas águas da região. A relação da dureza com as concentrações de íons cálcio e magnésio pode ser mais bem.

O parâmetro cloreto obteve-se valor abaixo do limite estabelecido na Portaria do Ministério da Saúde, que é de 250 mg/L  $\text{Cl}^-$ . E, como verificado na tabela abaixo, o nível de cloro na água da mina está relativamente baixo, pois totalizou apenas 108,33 mg/L  $\text{Cl}^-$ .

Analisando a tabela 02, e considerando a Portaria nº 2.914, de 12-12-2011 verifica-se que o parâmetro analisado apresentou um valor considerado elevado, e que está no limite do estabelecido pela respectiva legislação, que é de 500 UFC/mL. Por outro lado, o resultado mostrou-se favorável para a pesquisa, pois esses microrganismos são frequentemente usados em processos industriais e também minerais, como por exemplo na biolixiviação.

Os microrganismos heterotróficos quimiossintéticos constituem a grande maioria de bactérias tratadas habitualmente na microbiologia geral ou aplicada (FERNANDES, 2009). Conforme observado por Batista (2009), tais microrganismos são responsáveis pela biolixiviação de alguns metais, porém, também geradores da drenagem ácida de mina.

Os microrganismos heterotróficos estão presentes nos ambientes de lixiviação e são importantes no momento de determinar os fatores que condicionam a solubilidade dos metais (FERNANDES, 2009). Esse tipo de microrganismos é considerado ainda como imprescindíveis em aplicações biotecnológicas para recuperação de metais (MARGESIN; SCHEIMER, 2001).

A presença de microrganismos heterotróficos em concentração da ordem de 496 UFC/mL na água de mina pode ser um ambiente favorável a aplicação do processo de biolixiviação.

A água utilizada na planta de beneficiamento tem uso exclusivo no processo, sendo continuamente reaproveitada na planta através de um sistema fechado de circulação pela utilização de espessadores.

Fernandes (2009) afirma que os fungos e bactérias heterotróficos contribuem significativamente para a degradação direta de rochas e minerais. Além disso, mencionou que os microrganismos heterotróficos realizam alteração e a degradação de alumino-silicatados.

É importante destacar que tais microrganismos utilizam o mineral como combustível, pois absorvem elétrons necessários à sua sobrevivência. Além disso, atuam liberando calor e metais, sem que seja necessária uma fonte externa ao processo de biolixiviação. Este poderá acontecer de forma direta ou indireta por ação de microrganismos heterotróficos (FERNANDES, 2009).

Também foram apresentados nos estudos realizados por Carvalho et al., (1990) a presença de fungos heterotróficos decompositores de minerais silicatados, que supostamente atuaram na solubilização de scheelita.

A figura 3 apresenta resultados do comportamento do pH do meio na biolixiviação de scheelita em função do tempo para pH's iniciais de 2, 3, 4 e 5.

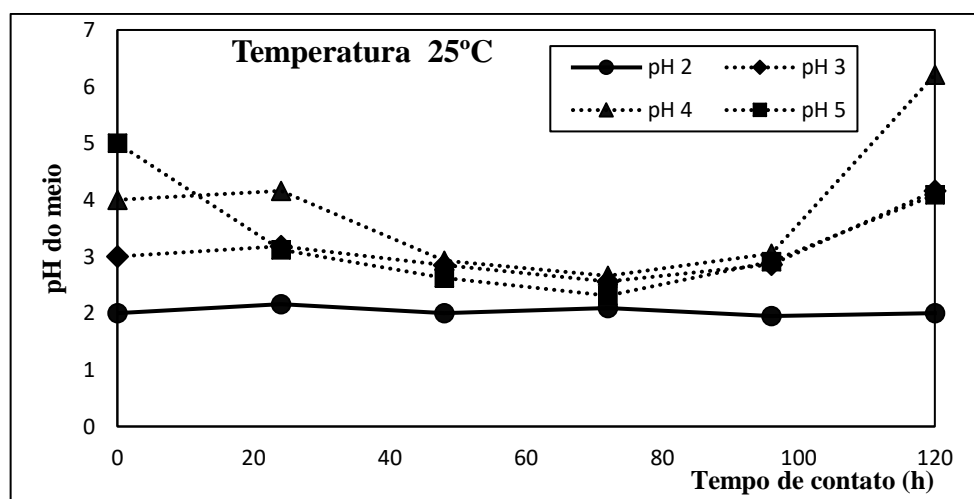


Figura 03 – Comportamento do pH do meio na biolixiviação de scheelita em função do tempo de contato, nas condições: Temp. 25°C e agitação 120 rpm.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Analisando a figura 03 observa-se que o pH do meio em 25 °C decresce para os pH's 4 e 5 até 96 h e, enquanto os de pH 2 e 3 se mantém constante até este



tempo de contato. A partir das 96 h o pH's 3, 4 e 5 passam a apresentar trajetória crescente, enquanto o pH 2 se mantém constante.

A figura 4 apresenta resultados do comportamento biolixiviação de scheelita em função do tempo para pH iniciais de 2, 3, 4 e 5.

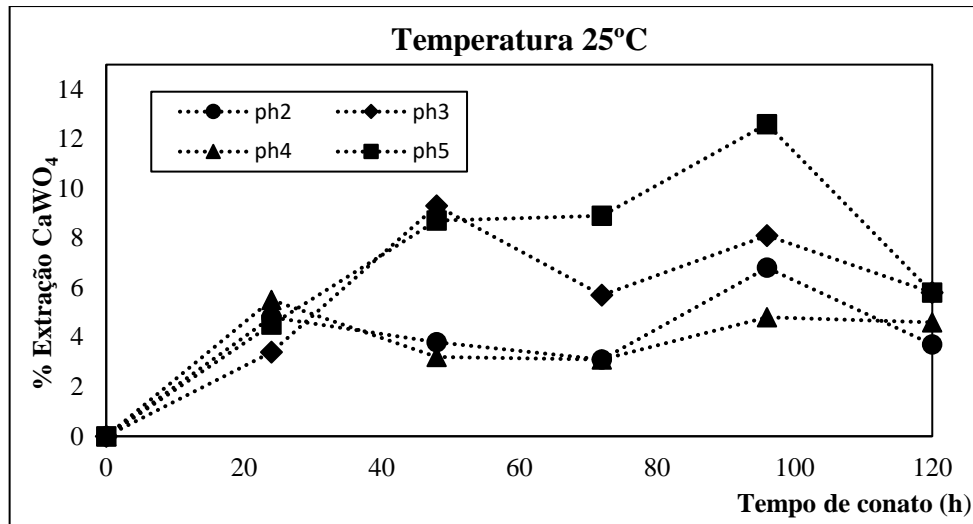


Figura 04 – Comportamento da extração de  $\text{CaWO}_4$  em função do tempo de contato, nas condições: Temp. 25°C e agitação 120 rpm.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Observa-se na figura 4 que a biolixiviação da scheelita apresenta o melhor resultado em pH inicial de 5, tendo curva ascendente até de 96 h no tempo de contato para uma biolixiviação de 12,6 % de scheelita. Nas 24 h seguintes a solubilização sofre uma inflecção da curva apresentando uma biolixiviação de 5,8%.

A figura 5 apresenta a evolução das bacteriais no meio em função do tempo para as condições estudadas.

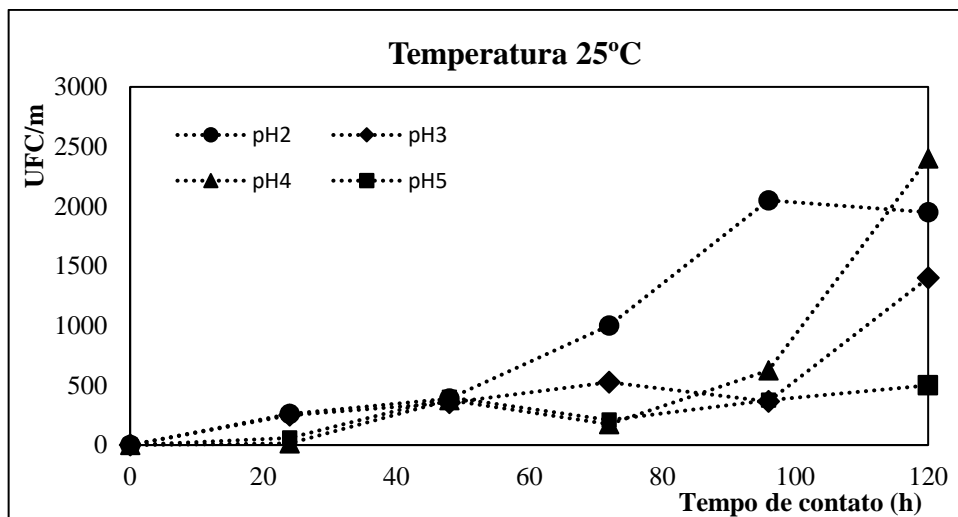


Figura 05 – Comportamento da concentração de bactérias em função do tempo, nas condições: Temp. 25°C e agitação 120 rpm.

Fonte: Dos autores (2017).

A figura 5 mostra que o crescimento bacteriológico em função do tempo para ocorre para todos os pH, no entanto mais intensamente para os pH's 2, 3 e 4. Este resultado mostra que este ambiente é favorável ao crescimento microbiano e ainda não se atingiu a fase estacionária, assim ainda a elevação do tempo de contato deverá ampliar a biolixiviação da scheelita.

Trabalho realizado com scheelita e água de mina proveniente de uma mina portuguesa, apresentou 5%  $WO_3$  como melhor resultado de extração para 240 h de tempo de contato (Carvalho, 1990). As curvas de crescimento microbiológico se assemelham aquelas obtidas neste trabalho.

Então, pode-se afirmar que o meio de cultura forneceu condições adequadas para o desenvolvimento de microrganismos heterotróficos nas condições que foram realizadas o processo (temperatura (25°C) e agitação de 120 rpm). De acordo com Fernandes (2009), a temperatura influencia diretamente nesse desenvolvimento, especialmente, quanto a velocidade de crescimento e a produção de biomassa no meio de cultivo. Qualquer variação de temperatura pode afetar diretamente o metabolismo bacteriano, e até mesmo provocar a morte da célula.

Em relação as taxas de extrações de scheelita apresentarem valores menores do que as obtidas neste trabalho (12,6%), provavelmente estes resultados estão associadas a granulometria. Enquanto neste trabalho utilizou-se partículas inferiores

a 74  $\mu\text{m}$ , Carvalho (1990) utilizou as granulometrias (-300  $\mu\text{m}$ ), (-600+ 425  $\mu\text{m}$ ) e (-212+ 150  $\mu\text{m}$ ). A elevação da área superficial favorece o processo de biolixiviação.

É importante mencionar que durante os ensaios não foram realizadas a identificação dos microrganismos que atuaram diretamente no processo de solubilização da scheelita, no entanto observa-se que o meio de cultura favorece o crescimento de colônias de bactérias heterotróficas e de fungos que propiciaram a solubilização da scheelita.

Em estudo realizado por Carvalho et al., (1990), também não foi realizada a identificação das espécies biológicas que apareceram nas amostras. Entretanto, afirmou-se que tais microrganismos eram provenientes do ambiente mineiro. Verificou ainda uma redução na concentração de tungstênio, que supostamente ocorreu em função da adsorção do minério pela grande biomassa desenvolvida nas amostras.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude dos resultados obtidos e apresentados de acordo com os ensaios realizados durante a pesquisa, constatou-se que:

- O estudo de lixiviação bacteriana sob as condições de pH (2-5), agitação da incubadora (120 rpm), temperatura (25°C), tempo (120 h) e concentração da solução lixiviante, mostrou-se favorável a solubilização da scheelita com uso da água da Mina Brejuí;
- A água da Mina Brejuí apresenta quantidade significativa de microrganismos heterotróficos, os quais são importantes para o processo de lixiviação bacteriana de metais;
- As melhores condições para a solubilização de scheelita foram para o pH inicial 5 que apresentou solubilização da ordem de 10 % de  $\text{WO}_3$  que é o dobro do resultado obtido no trabalho de Carvalho (1990) scheelita;
- O processo de biolixiviação apresentou crescimento significativo de unidades formadoras de colônias de bactérias heterotróficas da ordem de 500 UFC/mL;

- Ampliar os experimentos com o objetivo de analisar o comportamento do tempo de contato e da agitação, tendo em vista otimizar o processo de biolixiviação;
- Identificar os microrganismos presentes nas lixívias e àqueles que atuam no processo de biolixiviação da scheelita.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Mineração Tomaz Salustino pelo fornecimento das amostras de água e scheelita utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

## BIOLEACHING OF THE SCHEELITE USING MINE WATER

### ABSTRACT

The bioleaching process increases its insertion in the mining. The tungsten ore extraction has been operating since 1943, especially in the Brejui mine, located in Currais Novos/RN, which accumulates tailings with 6.7 million tons and a 0.1% content of WO<sub>3</sub>. This work aims to evaluate the behavior of the bacteria present in the water of the Brejui mine with an objective to solubilize the Scheelite. The study was carried out with water and tungsten ore samples collected at the Brejui mine. The water was submitted to physical-chemical and bacteriological analysis, which presented results for hardness (273 mg/l), and the presence of heterotrophic bacteria (296 CFU / ml). The Scheelite samples were submitted to a communion stage and classified in 74 micrometers sieves. The bioleaching was performed in a Shaker incubator, with agitation control (120 rpm), temperature (25°C) and varied the time of incubating. The tests were accomplished with 1 g of scheelite in a medium composed of mine water, malt extract, glucose, and peptone. The solubilization was analyzed in solutions with water of the mine and initial pH between 2-5, corrected with a solution of sulfuric acid. The leachate was filtered and its residue in the filter was submitted in the Mufra at a temperature of 700 °C for 50 minutes. The filtrate was submitted to bacteriological analysis in Petri dish. It was observed that the extraction of Scheelite and bacteriological growth are increasing for the studied conditions, so it is necessary to increase the time of contact to maximize the bioleaching.

**Keywords:** Bioleaching. Microorganisms. Scheelite.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E. C. O.; SILVA, I. R.; FERREIRA, J. S.; CORDEIRO, M. L. S.; COELHO, G. D. Biomineração: extração sustentável e silenciosa de minério. biomineração: extração sustentável e silenciosa de minério. **Revista saúde e ciência *On line***, 2014; 3(3): 253-265, set-dez, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 6023**: informação e documentação: Referências - apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 15525**: informação e documentação: Projeto de Pesquisa: apresentação. Rio de Janeiro, 2006.

BATISTA, Luciene Alves. **Análise das comunidades microbianas presentes em depósitos de minerais sulfetados com ocorrência de drenagens ácidas de minas e em sistemas de Biolixiviação**. Dissertação (Mestrado Engenharia Ambiental) –Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG: 2009. Disponível em: < <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3105>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

BLANDÓN, N. A. M. **Recuperação de níquel e outros metais a partir de diferentes fontes (rejeitos de processo industrial e pentlandita (Ni,Fe)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>) por lixiviação bacteriana e ácida**. Originalmente apresentada como Tese de doutorado, ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Araraquara, SP: 2010. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/100745>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

BEVILAQUA, D. et al. Oxidation of chalcopyrite by Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans in shake flasks. **Process Biochemistry**, v. 38, n. 4, p. 587–592, Dec. 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00169-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00169-3)

CARVALHO, R. A. Guedes et al. Bioleaching of Tungsten Ores. **Elsevier Science Publishers**. Hydrometallurgy, Portugal, n. 24, p. 263- 267, jun 1990. Disponível em: <.> Acesso em: 01 set. 2016.

COUTO, H. J. B.; ANDRADE, V. O.; SOUZA, O.O.; ANDRÉ, T. C. S. S. **Flotação em coluna aplicado à concentração de scheelita a partir de rejeito**. IV SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE, 2016, João Pessoa-PB. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2016/ORAL25.pdf>> Acesso em: 24 jun. 2017.

DUNBAR, W. Scott, Biotechnology and the Mine of Tomorrow, Trends in Biotechnology, Volume 35, Issue 1, 2017, Pages 79-89, ISSN 0167-7799, Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.07.004>> Acesso em:13 mai. 2017.

FERNANDES, B. R. B. **Aproveitamento dos finos de scheelita utilizando concentração centrífuga e lixiviação ácida**. Recife, PE, 2011. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Disponível em: < [https://www.ufpe.br/ppgeminas/images/word/2011/bruno\\_rodrigo.pdf](https://www.ufpe.br/ppgeminas/images/word/2011/bruno_rodrigo.pdf)>. Acesso em: 03 fev. 2017.

FERNANDES, Bruno Borges; MACHADO, Áureo Octávio; LEITE, José Yvan Pereira. Lixiviação da scheelita: uma revisão do estado da arte. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE E NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., 2009, Belém: IFPA, 2009. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Jose\\_Yvan\\_Leite/publication/275463019\\_LIXI\\_VIACAO\\_DE\\_SCHEELITA\\_-UMA\\_REVISAO\\_DO\\_ESTADO\\_DA\\_ARTE/links/553cef550cf2c415bb0c9324.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jose_Yvan_Leite/publication/275463019_LIXI_VIACAO_DE_SCHEELITA_-UMA_REVISAO_DO_ESTADO_DA_ARTE/links/553cef550cf2c415bb0c9324.pdf)>. Acesso em: 24 out. 2016.

FERNANDES, M. C. F. **Estudo comparativo da ação dos microrganismos mesófilos e termófilos na biolixiviação de um minério de Cobre sulfetado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente)–Universidade do Porto – FEUP, Porto, Portugal: 2009. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/61478>>. Acesso em 25 mar. 2017.

HABASHI, F. A Short History of Hidrometallurgy. **Hidrometallurgy** 79. 2005, p. 15 – 22. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X05001623>> Acesso em: 10 abr. 2017.

JEREZ, Carlos A., Bioleaching and Biomining for the Industrial Recovery of Metals☆, In Reference Module in Life Sciences, Elsevier, 2017, ISBN 9780128096338. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.09185-8>> Acesso em: 16 abri. 2017.

JOHNSON, D. B., Development and application of biotechnologies in the metal mining industry. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20 (2013), pp. 7768-7776.

LEITE, J. Y. P., ARAUJO, F. S. D., SANTOS, E. P., Análise das Plantas de Concentração de Scheelita do Estado do RN, II Jornada Nacional da Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica, 2007, SETEC/MEC.

MARGESIN, R.; F. SCHEINNER. Potencial of halotolerant and halophilic microorganisms for biotechnology. *Extremophiles*, 5, 73-78, 2001. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11354458>> Acesso em: 30 mai. 2017.

MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S.A. Disponível em: <<http://www.minabrejui.com.br/index.html>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

NESI, Júlio Rezende. **Programa de Reativação do Setor Mineral da região Seridó-RN.** Recife-PE: CPRM-UFRN, 84p, 2001.

OLIVEIRA, J.F; HORTA, R. M.; SAMPAIO, J.A. **Flotação de Rejeitos finos de scheelita em planta piloto.** Centro de Tecnologia Mineral-CETEM/CPRM. V.21, Brasília, 1982. Disponível em:< <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/216>> Acesso em: 20 16 ago. 2017.

PINHEIRO, V. S; LEITE, J. Y. P. Qualidade da água de processo usada em mineração – Estudo de Caso da Mina Brejuí. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE E NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., 2009, Belém: IFPA, 2009. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/275462962\\_QUALIDADE\\_DA\\_AGUA\\_DE\\_PROCESSO\\_USADA\\_EM\\_MINERACAO\\_-\\_ESTUDO\\_DE\\_CASO\\_DA\\_MINA\\_BREJUI](https://www.researchgate.net/publication/275462962_QUALIDADE_DA_AGUA_DE_PROCESSO_USADA_EM_MINERACAO_-_ESTUDO_DE_CASO_DA_MINA_BREJUI)> Acesso em:

PINHEIRO, V. S.; BALTAR, C. A. M.; LEITE, J. Y.P. Influência da qualidade da água na flotação de quartzo com amina. **Holos**, Natal, RN, ano 26, vol.3, 2010. Disponível

em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/448>.> Acesso em: 12 jun. 2016.

PINHEIRO, Viviane da Silva; BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães; LEITE, José Yvan Pereira. Flotação com amina: a importância da qualidade da água. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 549-552, Dec. 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672012000400017&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672012000400017&lng=en&nrm=iso).>. Acesso em: 18 Ago. 2017.

SANTANDREA, T.C.S; COUTO, H.J.B; CORREIA, J.C.G; LEANDRO, A.P; SOUZA, O.O. **Caracterização e concentração por flotação de scheelita proveniente de um rejeito**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 26, 2015, Poços de Caldas-MG, 2015. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2015/CAC00140015.pdf>.>. Acesso em: 20 jul. 2017.