



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

Giovani Takeuchi

Otimização de processos na produção de cobre metálico: visando um ciclo de produção sustentável para a biosfera

Guaratinguetá
2023

GIOVANI TAKEUCHI

Otimização de processos na produção de cobre metálico: visando um ciclo de produção sustentável para a biosfera

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini

Guaratinguetá
2023

T136o	Takeuchi, Giovani Otimização de processos na produção de cobre metálico: visando um ciclo de produção sustentável para a biosfera. / Giovani Takeuchi. – Guaratinguetá, 2023. 36 f : il. Bibliografia: f. 34-36 Trabalho de Graduação em Engenharia de Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientadora: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini 1. Minérios de cobre. 2. Metalurgia extrativa. 3. Metais - Reaproveitamento. 4. Cobre - Indústria. I. Título. CDU 669.3
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Dr.^a CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador(a)

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador(a)/UNESP-FEG

Prof.^a Dr.^a MARIA GABRIELA GALVÃO CAMARINHA
UNESP-FEG

Eng.^a. MARÍLIA FERNANDES VIDILLE
UNESP-FEG

Fevereiro de 2023

DADOS CURRICULARES

GIOVANI TAKEUCHI

NASCIMENTO	06 de maio de 1997 – Itapira / SP
FILIAÇÃO	Ricardo Takeuchi Sandra Takeuchi
2017/2023	Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

Para o meu avô Benedito (in memoriam),
cujo empenho em me educar sempre veio em primeiro lugar.
Aqui estão os resultados dos seus esforços. Com muita gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador e a todos os professores do curso, por sua dedicação, paciência e conhecimento. Agradeço à minha namorada Camila por compreender os vários dias em que estive ausente por causa do desenvolvimento deste trabalho e aos meus amigos pelas discussões estimulantes, pelas noites sem dormir em que estudávamos e por toda a diversão que tivemos nos últimos anos.

Aos amigos da General Eletric de Taubaté, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos por tudo o que me ensinaram, em especial a minha gestora Cristiane Sielfeld, por ter acreditado no meu potencial e proporcionar a minha primeira oportunidade profissional.

Gratidão pela minha família, sua presença e amor incondicional na minha vida sempre. Este trabalho é a prova de que os esforços deles pela minha educação não foram em vão e valeram a pena.

Dedico este trabalho a Deus. Sem ele nada seria possível, pois a fé e razão são como as duas asas pelas quais o espírito humano se eleva para a contemplação da verdade.

“Eu sou eu e a minha circunstância,
e se não a salvo, não salvo a mim mesmo.”

Ortega y Gasset

RESUMO

Este estudo tem como motivação o entendimento sobre os processos de mineração, beneficiamento, metalurgia extrativa e a confecção dos materiais de cobre e comparar com o processo de reciclagem do mesmo material, com o objetivo de expor a importância econômica e social do processo de reciclagem, e ao mesmo tempo incentivar a produção de cobre primário de uma maneira mais sustentável para o meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Cobre. Mineração. Metalurgia. Reciclagem. Meio-ambiente. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study is motivated by the understanding of the processes of mining, processing, extractive metallurgy and the manufacture of copper materials and to compare with the recycling process of the same material, with the objective of exposing the economic and social importance of the recycling process, and at the same time encourage the production of primary copper in a more sustainable way for the environment.

KEYWORDS: Copper. Mining. Metallurgy. Recycling. Environment. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processo de tratamento de uma planta de descarga de líquido zero	211
Figura 2- Esquema do processo de biolixiviação	244
Figura 3- Processo de lixiviação seletiva usando refinado como agente de lixiviação	255
Figura 4 - Esquema da tecnologia Flash Smelting - Conversão Peirce-Smith.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação entre o teor de cobre e fatores energéticos e ambientais	277
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZLD.....	Descarga de Líquido Zero
ESG.....	Environmental, Security and Governance

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	13
2	INDÚSTRIA DO COBRE.....	15
2.1	EXTRAÇÃO.....	15
2.2	METALURGIA EXTRATIVA.....	16
2.2.1	Hidrometalurgia.....	16
2.2.2	Pirometalurgia.....	17
2.3	REFINO.....	18
3	IMPACTOS AMBIENTAIS E MEDIDAS PARA OTIMIZAR O CICLO DE VIDA DO COBRE PRIMÁRIO.....	20
4	INDÚSTRIA DO COBRE SECUNDÁRIO.....	22
4.1	IMPACTOS AMBIENTAIS.....	23
4.2	NOVAS TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM.....	23
4.2.1	Biolixiviação.....	24
4.2.2	Lixiviação com uso de refinado.....	25
5	FUNDIÇÃO INSTANTÂNEA (FSF)-CONVERSÃO PEIRCE-SMITH.....	26
5.1	FUNCIONAMENTO DO PROCESSO.....	27
6	METAS DE MEIO AMBIENTE, SOCIAL E GOVERNANÇA NA INDÚSTRIA DE COBRE.....	29
6.1	PACTO GLOBAL DA ONU – BANCO MUNDIAL.....	29
6.2	A AGENDA ESG E AS ZONAS DE SACRIFÍCIO.....	30
6.3	SOLUÇÕES.....	30
7	DISCUSSÕES.....	32
	REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

O cobre tem se mostrado um metal indispensável para as aplicações dos mais diversos equipamentos que visam um meio de produção mais limpo, eficiente e ecologicamente sustentável. Reconhecido por suas propriedades de bom condutor, o cobre é amplamente aplicado em manufaturas de materiais eletrônicos, fios e cabos de condução de energia, tubos para gás e água quente e a confecção de ligas metálicas importantes como o bronze e o latão.

A China tem se consolidado desde o ano de 2002 como a maior consumidora do metal, tendo um salto de representatividade do consumo global de 17% (2.6 milhões de toneladas) para 46% (8.4 milhões de toneladas) em 2016 (DONG *et al.*, 2020). Com o avanço das tecnologias verdes como o carro elétrico, painéis solares e turbinas eólicas, somado ao plano Green Fence do governo chinês para conter o fluxo de sucata de cobre contaminada e de baixa qualidade oriunda dos Estados Unidos e Europa para alimentar a colossal indústria chinesa, podem ser desencadeados uma série de problemas de abastecimento e de questões ambientais relacionadas com a produção de cobre (WANG *et al.*, 2017).

Para suprir a alta demanda do metal ao redor do planeta, países como o Chile e o Peru são chamados de “zonas de sacrifício”, pois a exploração massiva e desordenada do mineral de cobre gera consequências negativas no meio ambiente e na população que vive nas proximidades da área de exploração, porém geram benefícios ambientais para os países desenvolvidos que consomem o cobre como produto final (ZOGRAFOS; ROBBINS, 2020).

1.1 OBJETIVOS

Em vista deste cenário apresentado, o presente trabalho tem como objetivo a apresentação de tecnologias que visam a otimização do processo de mineração, beneficiamento, descarte e reciclagem do cobre, mantendo um alinhamento com as metas de governança ambiental, social e corporativa, para que os diferentes setores da sociedade sejam sensibilizados para a importância do metal e de sua exploração inteligente, gerando uma economia circular mais

rentável e benéfica aos exploradores do minério e da indústria consumidora do mesmo, além de aliviar as tensões ambientais que as plantas, animais e a população nativa dessas regiões mineradoras sofrem diariamente com a atividade.

2 INDÚSTRIA DO COBRE

Antes de se tornar um produto final como fios, cabos e outras tecnologias modernas, a indústria de cobre se divide em diferentes etapas de processamento: a extração, a metalurgia e o refino. Estas etapas são atreladas ao desenvolvimento de cobre primário dentro de uma cadeia de produção do metal e necessitam dos minerais de cobre, como a calcopirita, bornita, calcocita e covelita, para iniciarem a atividade industrial (LOTTER; BRADSHAW; BARNES, 2016). Em relação ao cobre secundário, este é fruto de dois tipos de sucatas, o primeiro tipo necessita de um refino, pois é proveniente de outras aplicações e não possui um alto grau de pureza, sendo uma sucata comprada de terceiros no mercado. Já a outra categoria de sucata é aquela com altíssimos graus de pureza e dispensa o processo de refino, sendo encontrada principalmente em transformadores, fios, cabos elétricos e outros materiais usados na distribuição de energia elétrica (LIU *et al.*, 2020).

2.1 EXTRAÇÃO

Os processos que envolvem a extração de cobre podem ser realizadas a céu aberto, subterrâneas ou mista, e a decisão pelo local de realização do procedimento depende de fatores como a topografia do terreno, teor do minério, a profundidade de onde ele se encontra, a extensão do capeamento, características das rochas ao redor do depósito e por fim, a distribuição e forma do corpo do minério de cobre a ser extraído (GERMANI, 2002).

Para um processo de lavra (extração) realizado a céu aberto faz-se a retirada de terra depositada sob a rocha para a exposição do minério, sendo essa etapa denominada de decapeamento. Inicia-se a perfuração com o objetivo de furar o minério, podendo ser realizado de forma pneumática ou hidráulica, ambos previamente calculados, e com os furos obtidos, estes são preenchidos com explosivos e são realizadas detonações para fragmentar o minério de cobre. Feito essa etapa, o minério é colocado em caminhões ou vagonetas para ser transportado para as instalações de tratamento do minério (GERMANI, 2002).

O processo de lavra em um local subterrâneo envolve mais explosivos, lubrificantes, energia elétrica e combustíveis, sendo divididos nas galerias, câmaras, poços e os dispositivos de contenção de estéril. O procedimento é bastante similar ao conduzido em céu aberto, sendo empregado perfuratrizes, elevadores, sistemas de ventilação, conjunto de drenagem, caminhões e carregadeiras especiais. Um dos métodos mais utilizados nesse tipo de ambiente são o de realce auto-portantes onde é comumente usado quando há uma homogeneidade e continuidade da qualidade do minério de cobre que está sendo explorado, fazendo uso de câmaras, pilares, subníveis e recuo por crateras verticais (Vertical Crater Retreat), gerando uma operação simples e altamente produtiva (GERMANI, 2002).

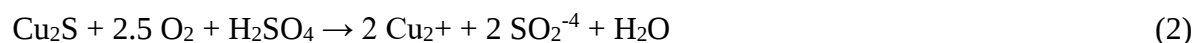
2.2 METALURGIA EXTRATIVA

2.2.1 Hidrometalurgia

Na hidrometalurgia, o processo mais amplamente empregado é o de lixiviação em pilhas, realizado com uma solução de ácido sulfúrico aspergida no topo das pilhas (SCHLESINGER, 2011), dessa maneira o ácido filtra os elementos solúveis da mistura e causa uma reação com os minerais oxidados segundo a equação (1):



Se usarmos um mineral sulfetado de cobre como a calcocita, a reação demonstrada pela equação (2) será acelerada devido a presença de bactérias que fazem a função de catalisador da reação abaixo:



A alimentação da fase de extração por solventes é feita por uma solução rica em cobre, ácido sulfúrico e outras impurezas que são armazenadas em bacias denominadas ponds, é feito o uso de um extratante específico para extrair o cobre dissolvido.

Em seguida, acontecerá a separação da fase orgânica da fase aquosa através da diferença de densidades entre os envolvidos. Por fim, uma solução de eletrólitos concentrada em ácido sulfúrico será incumbida de recuperar o cobre dissolvido da fase orgânica como mostra a equação (3), onde é perceptível o influxo da concentração de ácido no carregamento do cobre pelo reagente orgânico.



EH faz referência ao extratante específico e E_2Cu ao composto orgânico carregado

Após essa etapa descrita pela equação acima, é realizado o procedimento de eletrorrecuperação com o intuito de deposição do cobre metálico nos catodos de aço inox e paralelamente acontece a formação de oxigênio no ânodo como mostram as equações (4) e (5). A solução que se exauriu é enviada novamente ao processo de extração por solventes e o cobre metálico nos catodos são extraídos e endereçados aos processos de conformação para a produção de itens semi acabados.



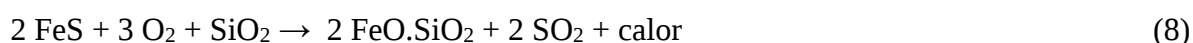
2.2.2 Pirometalurgia

Os processos pirometalúrgicos envolvem diversas etapas com transformações químicas, iniciando com a oxidação do enxofre e ferro presentes no minério com a finalidade de formar

um fase rica fundida de cobre denominada mate e outra fase pobre fundida de cobre chamada de escória, além da produção de dióxido de enxofre, este último é geralmente reaproveitado para a produção de ácido sulfúrico (SCHLESINGER, 2011). O nome que engloba toda essa etapa inicial da pirometalurgia é redução, e esta acontece em fornos específicos com a inserção de ar altamente concentrado com oxigênio, estes procedimentos podem ser visualizados por meio das equações (6) e (7). Após as reações, o mate é encaminhado para a fase de conversão e a escória passa por tratamentos para recuperar o cobre contido, sendo posteriormente aproveitada ou descartada.



As equações (8) e (9) demonstram as reações que acontecem na fase de conversão, onde em um vaso específico é adicionado oxigênio e fundente (SiO_2) com o intuito de capturar o ferro presente nessa fase, tendo como resultado um blister com 99% de cobre. A recuperação da escória pode ser feita por meio de sedimentação e esta também poderá ser solidificada, então a recuperação do metal será feita através do processo de flotação.



2.3 REFINO

Obtendo o cobre metálico, é chegada a etapa de refino a fogo que consiste na remoção de impurezas por meio de volatilização e mantendo os metais interessantes ao processo inteiramente dissolvidos na fase metálica, além de diminuir a porcentagem no enxofre e oxigênio no composto. Em seguida, é realizado um refino eletrolítico para proporcionar a

purificação do cobre impuro depositado no anodo, este acaba por sofrer corrosão e o cobre migra para o catodo, que tem o elemento puro. Dessa forma, as impurezas oriundas do anodo acabam por formar a chamada lama anódica que se depositará no fundo da cuba eletrolítica (SCHLESINGER, 2011).

Por fim, o cobre segue para as etapas de conformação para a produção dos semi acabados, esta etapa é bem genérica e varia de aplicação para aplicação final. O metal poderá ser laminado, forjado, trefilado, sofre extrusão, conformação para chapas e entre outros destinos (SCHLESINGER, 2011).

3 IMPACTOS AMBIENTAIS E MEDIDAS PARA OTIMIZAR O CICLO DE VIDA DO COBRE PRIMÁRIO

A produção de cobre primário é bastante prejudicial ao meio ambiente pois emite gases causadores do efeito estufa e consome uma quantidade bastante significativa de recursos hídricos e energéticos para esse processo. A qualidade ao redor da área de fundição contém partículas finas capazes de penetrar profundamente nos pulmões e no sistema cardiovascular das pessoas, desencadeando doenças como o câncer de pulmão, pneumonite e doenças cardíacas (PÉREZ *et al.*, 2021). Além disso, a cadeia de produção de cobre é altamente dependente da combustão de carvão, gasolina e óleo para o seu funcionamento, e essas substâncias são grandes emissoras de dióxido de enxofre, outro agente nocivo à saúde do ser humano e do bem estar do meio ambiente.

Dentro deste contexto, a emissão de dióxido de carbono é uma das consequências mais preocupantes do processo de obtenção de cobre primário, para alcançar uma tonelada de cobre extraído de minas foram necessários em uma média global de 2.6 toneladas de dióxido de carbono equivalentes emitidos, sendo que em algumas minas do mundo, esse valor atingiu 9 toneladas (MOREAU *et al.*, 2021), e este valor de equivalência em dióxido de carbono remete a uma massa medida de todas as emissões de gases de efeito estufa expressa como a massa de CO₂ com o mesmo potencial de aquecimento global.

O futuro ambiental das operações de mina e de fundição do minério de cobre são fortemente atrelados com uma resposta tecnológica por parte da indústria, com a garantia de melhores condições para os trabalhadores desta cadeia produtiva e por fim, pelas mudanças climáticas (MOREAU *et al.*, 2021). A automação em minas subterrâneas através da implementação de aparatos de monitoramento em tempo real dos caminhões de transporte (ALLA; HALL; APEL, 2020) e das áreas subterrâneas de exploração (ÅSTRAND *et al.*, 2020) são fundamentais para o aumento de produtividade e de segurança em suas operações. Isto resultaria em uma mina com menor potencial de impacto ambiental em seu funcionamento e após o seu fechamento, pois reduzirá substancialmente a degradação da água e do solo nas proximidades da mina (MOREAU *et al.*, 2021).

Os recursos hídricos também são bastante afetados com a atividade intensiva de mineração e fundição de cobre primário, pois necessitam de um grande volume de água para suas operações de beneficiamento do minério e pela grande quantidade de efluentes transferidos

para lagoas de rejeitos ou barragens, que são uma fonte potencial de contaminação e efeitos ecológicos adversos para a fauna, a flora e a população ao redor (PÉREZ *et al.*, 2021), através da contaminação dos lençóis freáticos e do solo, e o armazenamento dos mesmos em uma barragem pode gerar um risco de rompimento da estrutura e ser um desperdício de terra (PÉREZ *et al.*, 2021). Em vista deste cenário, se faz necessário o emprego de táticas para conter a nocividade desse processo e buscar alternativas para que o mesmo seja atenuado.

Visto isso, tecnologias como a Descarga de Líquido Zero (ZLD) tem se mostrado um avanço no campo da mineração e beneficiamento de cobre e de outros metais, pois é uma prática onde os efluentes são purificados e reciclados por meio de uma série de procedimentos de variadas naturezas (SANTORO *et al.*, 2021).

Entretanto, é necessário se atentar para alguns problemas desta tecnologias, como o vazamento de resíduos, podendo causar um risco de lixiviação dos produtos químicos em águas subterrâneas e também na fase de pré-tratamentos da água de alimentação, onde a acidificação seguida da gaseificação pode liberar dióxido de carbono para a atmosfera (GREENLEE *et al.*, 2009).

A Figura 1 busca exemplificar o funcionamento desta tecnologia, onde é observada a entrada de água tratada e fresca dentro do processo de produção industrial, onde posteriormente é direcionada para uma planta de tratamento de descarga de líquido zero para a obtenção dos produtos químicos isolados e sólidos para uma reutilização no processo, visando a recuperação de recursos, a eliminação de resíduos e a obtenção de água tratada para reiniciar o ciclo.

Figura 1- Processo de tratamento de uma planta de descarga de líquido zero



Fonte: Saltworks, (2018).

4 INDÚSTRIA DO COBRE SECUNDÁRIO

O cobre secundário é aquele que se torna definitivo e totalmente inservível para o uso que se reservava de maneira original, e que agora, só se presta ao emprego, como matéria prima, para a confecção de outro produto. De uma maneira trivial, a indústria de cobre secundário ou reciclado, é dividida em três fases distintas e definidas: a coleta de resíduos, a triagem e a recuperação metalúrgica (LOIBL; ESPINOZA, 2021).

O desenvolvimento de novas tecnologias que visam a aprimoração dos processos já existentes nessas três etapas industriais são de extrema importância para a consolidação da indústria de reciclagem de cobre como um ator indispensável para a transição energética verde da indústria, tanto pelos seus produtos finais quanto pelo seu processo em si, dessa forma, a indústria.

Na questão da preservação ambiental, a reciclagem de cobre tem um papel fundamental na redução da produção de poeiras e gases residuais, como o dióxido de enxofre, que é bastante prejudicial para o meio ambiente (MOREAU *et al.*, 2021). Apesar do fato do emprego do dióxido de enxofre produzido na etapa de mineração e fundição ser utilizado posteriormente na produção de ácido sulfúrico e ter o efeito atenuado sobre o ecossistema, a reciclagem dos materiais de cobre ainda é uma solução mais viável devido a sua pouca ou nenhuma emissão de gases poluentes (MOREAU *et al.*, 2021).

Desta forma, é de grande importância ressaltar neste trabalho a necessidade do descarte correto de materiais eletrônicos, que possuem grande quantidade do metal em sua composição, pois esta atitude possibilita o reaproveitamento de cobre e de outros metais, e dispensa um novo processo de mineração deste minério na natureza e dessa forma, diminuindo o impacto ambiental sobre o ecossistema onde a mina está instalada e melhorando a qualidade de vida da população que vive ao redor.

4.1 IMPACTOS AMBIENTAIS

O cobre secundário alivia o impacto ambiental causado pela sua produção devido ao fato de mesmo não necessitar da etapa de extração mineral no meio ambiente e o beneficiamento do minério extraído. Porém, a obtenção de um cobre secundário de boa qualidade prejudica o meio ambiente de forma similar. Na fase de fundição do cobre secundário, o principal poluente emitido é o material particulado (HAMMOND *et al.*, 1973). Em indústrias metalúrgicas secundárias é comum o uso da técnica pirometalúrgica para separar e refinar o cobre ou qualquer outro metal desejado, e esta ferramenta industrial desencadeia a emissão de óxidos metálicos devido a queima do isolamento do fio de cobre empregado neste processo. Da mesma maneira, uma descarga de compostos orgânicos voláteis e a emissão de produtos de combustão incompletos podem ser desencadeadas durante o processo de secagem de cavacos e brocas usados na remoção de excessos de fluidos de corte e óleos (XU; LI; LIU, 2016).

Ainda no processo de fundição de cobre secundário, partículas de fluxos de gases de escapes são gerados na fase de oxidação de zinco, sulfetos e outros componentes indesejados nas sucatas de cobre, e estas partículas vem dos grandes volumes de ar utilizados nessa função e que escapam devido a modificações no projeto do forno e nas qualidades da carga empregadas no mesmo (HAMMOND *et al.*, 1973). O zinco citado nesse processo também é um grande acentuador no impacto ambiental causado por este processo, pois o zinco possui baixo ponto de ebulição, o mesmo acaba volatilizado, oxidado e consequentemente produzindo óxido de zinco como partículas submicrônicas que são bastantes agressivas ao ser humano e ao ecossistema (HAMMOND *et al.*, 1973).

4.2 NOVAS TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM

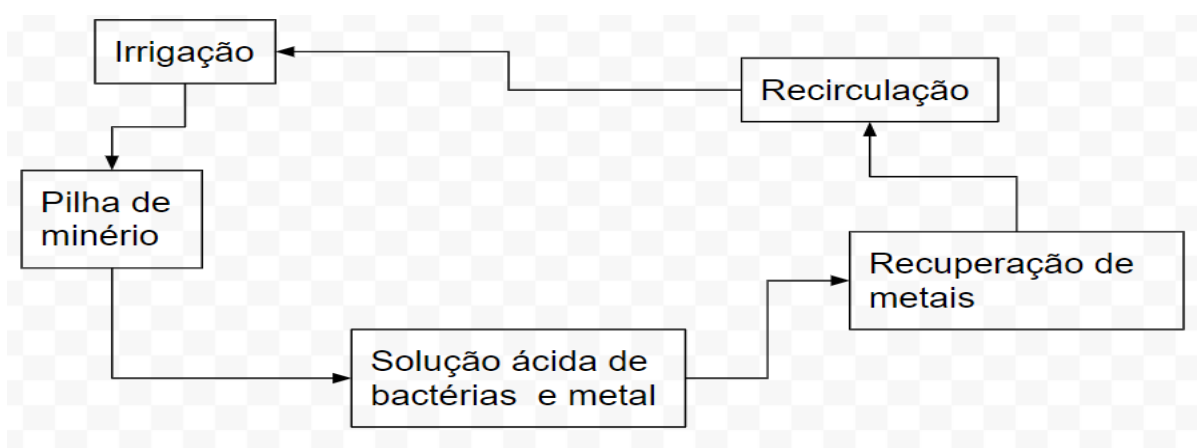
A promoção do conhecimento dessas tecnologias são de suma importância para que se entenda as necessidades reais do setor mineral e se antecipe a futuras demandas da mesma, além de possibilitar o projeto de futuras tecnologias que otimizem ou substituam a biolixiviação ou a lixiviação com uso de refinado por alternativas mais modernas e sustentáveis de produtos e processos para o setor metalúrgico. Ou até mesmo, busque por alternativas como a substituição de cobre por outro material equivalente para a função ou a otimização do material para o prolongamento do seu tempo de vida (HENCKENS; WORRELL, 2020).

4.2.1 Biolixiviação

A bioengenharia otimizada é cada vez mais utilizada para a recuperação de cobre metálico de lixo eletrônico por meio do processo de biolixiviação, onde é utilizada uma solução inicial constituída de íons férricos, frutos da oxidação de Fe^{2+} e gerados por bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans*. O potencial de otimização deste processo pode ser acentuado pela observação de fatores como a atividade dos elétrons, pH e a vazão com o uso de uma análise estatística do processo (MURALI *et al.*, 2022).

A Figura 2 ilustra os íons ferrosos da solução restante após a remoção de cobre sendo oxidados novamente em um biorreator (recirculação) e utilizados em uma nova biolixiviação (Solução ácida de bactérias e metal), de maneira alternativa, no biorreator pode ser utilizado peróxido de hidrogênio para oxidação.

Figura 2- Esquema do processo de biolixiviação



Fonte: Elaborado pelo autor.

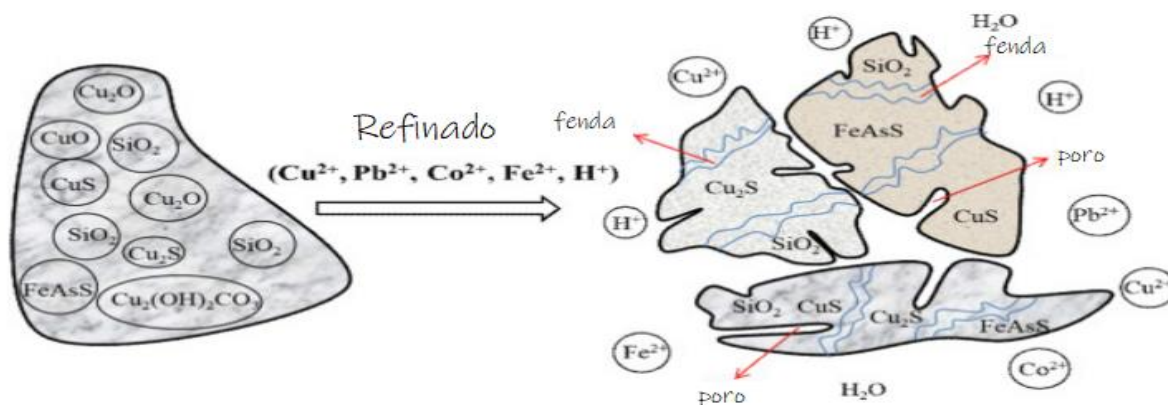
4.2.2 Lixiviação com uso de refinado

O processo de lixiviação seletiva utilizando refinado como agente lixiviante é um processo bastante promissor na indústria metalúrgica, em especial a de cobre. O refinado obtido na extração de cobre metálico contém ácidos e vários íons de natureza metálica, cujo descarte irregular ao término do procedimento pode acarretar uma série de efeitos danosos ao meio ambiente e perdas de recursos preciosos para a otimização da lixiviação de cobre secundário na indústria deste segmento (WANG *et al.*, 2020).

O refinado em questão é o vapor líquido que permanece depois da remoção de íons de cobre do mineral lixiviado por meio do contato com o agente extrator, comumente este não possui valor comercial notável e é tratado como efluente pelos operadores devido ao seu alto grau de acidez, sendo necessária a implementação e a manutenção de uma estação de tratamentos para lidar com o refinado (LI; YANG; ZHAO, 2017).

O processo demonstrado pela Figura 3 aponta a recuperação de refinado para uma futura utilização como agente lixiviante em um novo processo de lixiviação, é bastante vantajoso, pois apresenta um baixo consumo de insumos químicos e por ser um processo relativamente curto.

Figura 3- Processo de lixiviação seletiva usando refinado como agente de lixiviação



Fonte : WANG *et al.* (2020).

5 FUNDIÇÃO INSTANTÂNEA (FSF) - CONVERSÃO PEIRCE-SMITH

A elaboração deste tópico tem como propósito a divulgação de uma metodologia eficiente de obtenção de cobre primário que busca o menor impacto ambiental possível, evidenciando a necessidade de buscar alternativas sustentáveis para a extração deste tipo de cobre, e não simplesmente alternando para a prática de reciclagem em um contexto de alta demanda comercial pelo metal no planeta. Assim, o presente tópico busca atentar para o pensamento de exploração estratégica do metal em âmbitos de mineração e reciclagem, não se desfazendo de um ou outro.

Os métodos de fundição mais modernos e com uma visão mais sustentável para esta etapa de fundição do cobre metálico, são parametrizados com valores para potencial de mudanças climáticas, esgotamento fóssil e demanda de energia acumulada, e dessa forma, é possível expressar a gravidade de um determinado impacto ambiental (ALEXANDER *et al.*, 2021).

O processo de fundição e transporte de concentrado de cobre representa normalmente um valor de 80% do total de energia consumida e das emissões de dióxido de carbono no impacto ambiental da cadeia de produção do metal. Entretanto, essas novas tecnologias passaram a representar apenas 20% do valor total do impacto, sendo o processo de fundição instantânea seguido da conversão Peirce-Smith o menos agressivo para o meio ambiente nos quesitos de energia demandada e emissões de CO₂ resultante do processo (ALEXANDER *et al.*, 2021).

É de grande importância ressaltar que assim como em outros tópicos, neste a grande fonte de emissões de dióxido de carbono é a eletricidade, e no caso do processo de fundição instantânea seguido da conversão Peirce-Smith, a mesma é bastante empregada para a produção de oxigênio. A etapa de conversão desse método representa cerca de 91% do fator de mudanças climáticas da cadeia de produção quando utilizado essa metodologia e combustíveis fósseis para sua alimentação (ALEXANDER *et al.*, 2021). Porém, quando são empregadas energias mais sustentáveis e não oriundas de combustíveis fósseis para a manutenção deste método, o mesmo pode apresentar uma redução de até 80% do fator de mudanças climáticas apresentado (ALEXANDER *et al.*, 2021).

A seguir será apresentada a tabela 1 que mostra o método de fundição instantânea seguido da conversão Peirce-Smith, trabalhado com minérios de diferentes teores de cobre em sua composição e com capacidade de produção de 0.8 megatoneladas anuais. Os resultados mostram os valores ambientais calculados para cada tecnologia.

Tabela 1- Relação entre o teor de cobre e fatores energéticos e ambientais

Relação	22%	27%	29%
Energia total demandada	9,903 MJ	7,308 MJ	6,816 MJ
Mudanças Climáticas	612 kg de CO ₂	496 kg de CO ₂	462 kg de CO ₂
Esgotamento fóssil	165 kg de óleo	134 kg de óleo	125 kg de óleo

Fonte: ALEXANDER et al. (2021).

5.1 FUNCIONAMENTO DO PROCESSO

A primeira etapa deste método consiste em um processo pirometalúrgico com o objetivo de fundir os concentrados de sulfetos metálicos, onde o calor do procedimento de oxidação é aproveitado para manter o equilíbrio térmico do forno e em alguns casos, esse calor pode ser o suficiente para tornar o processo autógeno (ALEXANDER *et al.*, 2021). As matérias primas para essa etapa são:

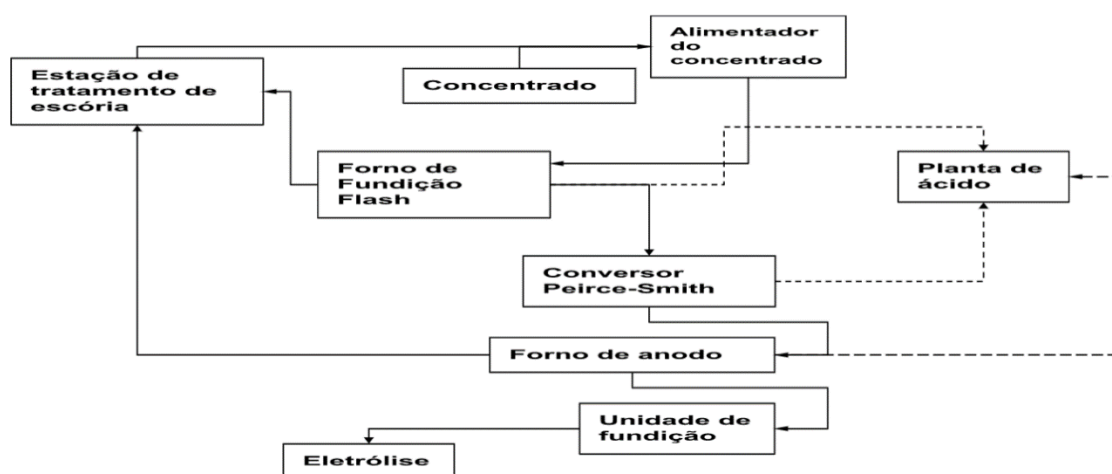
- concentrado de cobre
- fluxo de sílica
- ar
- oxigênio industrial

O trabalho entre esses materiais acarreta uma oxidação controlada do ferro e do enxofre do concentrado, calor e a fusão dos sólidos. Essas reações geram como produto um gás de exaustão com dióxido de enxofre (produto da oxidação) e gás nitrogênio (produto da explosão),

uma escória fundida formada de óxido de ferro e um fosco de cobre, ferro e enxofre, este é rico em cobre fundido (ALEXANDER *et al.*, 2021).

Passada para a etapa de conversão Peirce-Smith, as impurezas do material fosco obtidas na fase de fundição instantânea são removidas. Nesta fase, o enxofre sofre oxidação pelo ar enriquecido com oxigênio, passando para dióxido de enxofre e posteriormente é transformado em ácido sulfúrico. No processo o ferro também é oxidado e se liga à sílica contida na etapa e forma a escória, e esta é removida. Feito isso, o teor de cobre após a fase de conversão pela tecnologia Peirce-Smith é aumentado da faixa entre 55% a 70% para um teor final em torno de 98% no material obtido (ALEXANDER *et al.*, 2021). A Figura 4 ilustra todo o processo de fundição instantânea seguido de conversão Peirce-Smith descrito em forma de um organograma simplificado.

Figura 4 - Esquema da tecnologia Flash Smelting - Conversão Peirce-Smith



Fonte: Produção do próprio autor.

Um fato interessante para essa tecnologia é o fato da possibilidade de remoção de elementos como chumbo, bismuto e antimônio. Porém é possível garantir a permanência de ouro, prata, níquel e selênio no material final (ALEXANDER *et al.*, 2021).

6 METAS DE MEIO AMBIENTE, SOCIAL E GOVERNANÇA NA INDÚSTRIA DE COBRE

O presente trabalho busca ressaltar a necessidade de mudança para sociedades de baixo carbono, e que esta mudança seja a mais equitativa possível, garantindo o trabalho decente, a inclusão social e a erradicação da pobreza somados ao propósito de sustentabilidade ambiental através da exploração correta do minério de cobre e as sucatas deste metal.

6.1 PACTO GLOBAL DA ONU – BANCO MUNDIAL

A parceria entre essas duas instituições globais gerou-se o termo ESG (Environmental, Social and Governance), onde o ex-secretário geral das Nações Unidas, Kofi Annan, em conjunto com mais de 50 CEOs de grandes instituições financeiras, a incorporar fatores ambientais, sociais e de governança no mercado global de capitais, com o propósito de tornar os negócios mais sustentáveis e trazer melhores resultados para a sociedade em geral.

A crescente preocupação com práticas sustentáveis de operação industrial fez com que as empresas também abraçassem a agenda ESG, pois os investidores perceberam a visibilidade e a excelente reputação pública que é atrelada a empresa que segue as práticas, e estas podem impulsionar a movimentação dessas organizações de diversas formas, seja criando facilidades para o crescimento do faturamento, a redução de custos, a minimização das ações regulatórias, o aumento de potencial da produtividade dos colaboradores e melhorando os investimentos.

A agenda de ESG prevê no segmento ambiental a adoção de práticas que não contribuam para as mudanças climáticas, o estabelecimento de um compromisso com a diminuição das emissões de gases do efeito estufa e a criação de políticas para o armazenamento e descarte correto de resíduos. No âmbito social é previsto o respeito ao bem-estar dos colaboradores, a constante busca por melhores condições de trabalho, o compromisso com o combate à escravidão e ao trabalho infantil e o incentivo à diversidade no quadro de funcionários da empresa. E por fim, na área de governança corporativa, espera-se práticas anticorrupção,

auditorias frequentes, a implementação de medidas que evitem o conflito de interesses e a criação de um conselho de administração independente na empresa.

6.2 A AGENDA ESG E AS ZONAS DE SACRIFÍCIO

Os metais verdes têm papéis fundamentais na transição energética global para atender os compromissos com a redução das emissões de gases do efeito estufa, pois os mesmos servem de matéria prima para a construção de tecnologias sustentáveis que dispensam o uso de combustíveis fósseis como o carro elétrico, geradores eólicos e placas solares.

Todavia, estes países não são os que detêm as maiores reservas de minério de cobre, logo não são os que mais exploram em seu próprio território. Este título é de países andinos como o Chile e o Peru, além de algumas regiões rurais da China e países do cinturão cuprífero africano, como a Zâmbia e a República Democrática do Congo. Estes países sacrificam uma determinada área, o seu ecossistema e o bem-estar da população local para que ocorra o abastecimento, deslocamento, estabelecimento e operação de soluções para sustentar transições de baixo carbono, assim como o tratamento de fim de vida de desperdício de material relacionado (ZOGRAFOS; ROBBINS, 2020).

6.3 SOLUÇÕES

O alinhamento da indústria de cobre com a agenda ESG, depende de evitar um colonialismo climático em nome de uma transição energética justa. Neste contexto, as metas de ESG vêm buscando soluções em quatro diferentes segmentos: a política do uso da terra, fatores econômicos, fatores políticos e soluções de cunho qualitativo e etnográfico.

No âmbito do direito ao uso da terra, os signatários da agenda buscam organizar uma base para buscar divisões de custos mais igualitárias e auxiliar no desenvolvimento de políticas do uso da terra que não se atrevem a repetir ações coloniais e desapropriação de terras indígenas.

As soluções econômicas se organizam para desenhar uma economia política de transferência de custos, se atentam às circulações de capital, aos valores associados para múltiplas partes interessadas e zonas em cada etapa da economia verde e aos pactos institucionais que facilitam o processo (ZOGRAFOS; ROBBINS, 2020).

No segmento político, é previsto a investigação da mobilização de diferentes pensamentos e formas de poder político e autoridade em decorrência da extração de minerais, transporte, tratamento de resíduos e implementação de projetos em vistas de uma análise de caso de minerais e de soluções de energia.

E por fim, o tópico referente às soluções de propósito qualitativo e etnográfico propõe a análise das iniciativas de proteção contra as mudanças climáticas conduzidas por comunidades vulneráveis que estimulam lógicas alternativas à salvação e à colonialidade para definir um plano de ação em relação com a mudança de custos, controle de terras e o efeito das zonas de sacrifício, e os desafios que enfrentam (ZOGRAFOS; ROBBINS, 2020).

Neste cenário de alinhamento com as soluções propostas, a indústria de cobre primário e secundário tem o potencial de tornar-se uma grande geradora de produtos que irão impulsionar a economia verde a partir dos métodos mais eficientes e ecológicos possíveis. A agenda de Meio Ambiente, Social e Governança tem como propósito a ampliação deste conceito para todas as indústrias e que estas reflitam em um mercado financeiro mais responsável com investimentos focados em empresas com compromisso sustentável.

7 DISCUSSÕES

A sociedade vive tempos de incerteza mundial, a pandemia de Covid-19 e o desencadeamento da guerra na Ucrânia, trouxeram novas temáticas para o campo das discussões em torno de planejamento energético: todos os setores da população estão demandando cada vez mais o uso de energia elétrica, em paralelo, temos as mudanças climáticas que clamam por emissões mais baixas de gases do efeito estufa, e resoluções para que uma transição para uma economia circular e verde tendem a aparecer como uma forma de controlar o aumento dos efeitos do aquecimento global e fazer com que a temperatura média global se limite a menos de 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais (WATARI *et al.*, 2022).

Em vista deste cenário, é observado um grande aumento nos investimentos em energia sustentável, altamente vinculado aos metais verdes como é o caso do cobre, fazendo com que aumente a demanda pelos elementos metálicos em um curto prazo. Com o mercado atrelado a diversas convenções ambientais e às metas de ESG, vários investidores têm buscado cada vez mais empresas alinhadas com esses propósitos. E no caso do cobre, essa tendência tem atraído a busca por empresas de mineração e de reciclagem de sucata de cobre com altos padrões ESG.

O presente trabalho teve a finalidade de fornecer uma avaliação aproximada da otimização de processos e equipamentos da indústria mineradora e de reciclagem de cobre, com o propósito de estimular o uso de essas e outras tecnologias desenvolvidas para a atividade estudada. Foi observado no desenvolvimento de trabalho a necessidade de aperfeiçoamento desses dois segmentos industriais, sem a necessidade imediata da substituição de um pelo outro, pois a atual demanda do metal e a política chinesa do Green Fence (WANG *et al.*, 2017) para suprir os novos objetivos globais não permite tal prática.

Dessa forma, este trabalho conclui que um melhor planejamento energético, hídrico e produtivo da cadeia de cobre somado a inclusão de novas tecnologias limpas e eficientes serão um aditivo para impulsionar esta indústria, e por consequência, tornar o planeta um lugar mais sustentável para a vida humana.

O trabalho buscou apresentar o processo de reciclagem como uma alternativa bastante notória para suprir a demanda mundial do e ao mesmo tempo sanar questões voltadas à área ambiental, de saúde e segurança do trabalho. Porém, é importante ressaltar a necessidade de um pensamento estratégico em relação à produção de cobre primário, pois a otimização de seus processos na vertente de mineração e beneficiamento do minério de cobre, pode ajudar a

resolver as questões de exploração atreladas ao metal. Visto isso, este estudo buscou apresentar tecnologias que aumentem o nível de segurança ambiental e ocupacional nas minas para que as empresas de mineração se alinhem com a agenda de ESG, e também procurou por meio da divulgação da tecnologia de Fundição instantânea seguida de uma Conversão Peirce-Smith (ALEXANDER *et al.*, 2021) mostrar que as tecnologias de beneficiamento do minério de cobre estão se desenvolvendo e buscando uma melhor eficiência energética, um melhor aproveitamento de seus resíduos e um menor impacto causado sobre o meio ambiente e a saúde da população em exposição.

Por fim, esta monografia buscou unir os estudos sobre mineração, beneficiamento e reciclagem de cobre atrelados aos propósitos de uma indústria ESG, com o ideal de expor uma solução para a população e o meio ambiente como um todo, a fim de que os países subdesenvolvidos e os países em desenvolvimento não sofram com todo o processo de extração de cobre, para que os países desenvolvidos usufruam dos benefícios tecnológicos proporcionados pelo metal (ZOGRAFOS; ROBBINS, 2020). As tecnologias oriundas de metais verdes como um cobre deverão ser frutos de um processo produtivo ecológico e justo para todas as populações envolvidas.

Este estudo apresentou diversos desafios para o futuro da indústria de cobre em todas as fases do ciclo de vida, que precisarão ser enfrentados e que irão demandar novas oportunidades de trabalhos em cima do tema.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. *et al.* Comparison of environmental performance of modern copper smelting technologies. **Cleaner Environmental Systems**, Pori, v. 3, p. 100052, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666789421000441>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

ALLA, H. R.; HALL, R.; APEL, Derek B. Performance evaluation of near real-time condition monitoring in haul trucks. **International Journal Of Mining Science And Technology**, Edmonton, v. 30, n. 6, p. 909-915, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209526861930271X>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

ÅSTRAND, M. *et al.* A system for underground road condition monitoring. **International Journal Of Mining Science And Technology**, Stockholm, v. 30, n. 3, p. 405-411, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209526861930463X>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

DONG, D. *et al.* Scenarios for anthropogenic copper demand and supply in China: implications of a scrap import ban and a circular economy transition. **Resources, Conservation And Recycling**, Leiden, v. 161, p. 104943, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920302615>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

GERMANI, D. J. **A Mineração no Brasil**: relatório final. Rio de Janeiro: CGEE, 2002. *E-book*.

GREENLEE, L. F. *et al.* Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. **Water Research**, Austin, v. 43, n. 9, p. 2317-2348, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135409001547>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

HAMMOND, W. F. *et al.* Secondary brass and bronze melting processes. In: DANIELSON, J. A. (coord.). **Air Pollution Engineering Manual**. Los Angeles: Technical Publications Branch Of The Information Services Division Of The Office Of Administration For The Office Of Air And Water Programs, 1973. v. 1, cap. 6, p. 256- 259.

HENCKENS, M.L.C.M.; WORRELL, E. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations: the balance between production growth, sustainability and recycling rates. **Journal Of Cleaner Production**, Utrecht, v. 264, p. 121460, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620315079>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

LI, Y.; YANG, J.; ZHAO, Z. Recovery of tungsten and molybdenum from low-grade scheelite. **The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society**, Changsha, v. 69, n. 10, p. 1958-1962, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-017-2440-5>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

LIU, S. *et al.* Recycling the domestic copper scrap to address the China's copper sustainability. **Journal Of Materials Research And Technology**, Changsha v. 9, n. 3, p. 2846-2855, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785419317855>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

LOIBL, A.; ESPINOZA, L. A. Tercero. Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America. **Resources, Conservation And Recycling**, Karlsruhe, v. 169, p. 105462, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921000690>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

LOTTER, N.O.; BRADSHAW, D.J.; BARNES, A.R. Classification of the major copper sulphides into semiconductor types, and associated flotation characteristics. **Minerals Engineering**, Cape Town, v. 96-97, p. 177-184, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687516301364>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

MOREAU, K. *et al.* Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines. **International Journal Of Mining Science And Technology**, Sudbury, v. 31, n. 6, p. 1159-1167, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268621001312>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

MURALI, A. *et al.* Optimized bioengineered copper recovery from electronic wastes to increase recycling and reduce environmental impact. **Journal Of Hazardous Materials Advances**, Salt Lake City, v. 5, p. 100031, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416621000309>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

PÉREZ, K. *et al.* Environmental, economic and technological factors affecting chilean copper smelters – A critical review. **Journal Of Materials Research And Technology**, Antofagasta, v. 15, p. 213-225, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421008322>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

SANTORO, S. *et al.* Membrane technology for a sustainable copper mining industry: the chilean paradigm. **Cleaner Engineering And Technology**, Rende, v. 2, p. 100091, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821000513>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

SCHLESINGER, M. E. **Extractive Metallurgy of Copper**. 11th ed. Amsterdam: Elsevier, 2011. 455p.

WANG, L. *et al.* The optimization and characterization of the recycling utilization of raffinate in the copper leaching process. **Journal Of Materials Research And Technology**, Tangshan, v. 9, n. 2, p. 2214-2222, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785419319805>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

WANG, M. *et al.* Assessment of potential copper scrap in China and policy recommendation. **Resources Policy**, Chengdu, v. 52, p. 235-244, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142071630232X>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

WATARI, T. *et al.* Global copper cycles and greenhouse gas emissions in a 1.5 °C world. **Resources, Conservation And Recycling**, Ibaraki, v. 179, p. 106118, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921007266>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

XU, Y.; LI, J.; LIU, L.. Current status and future perspective of recycling copper by hydrometallurgy from waste printed circuit boards. **Procedia Environmental Sciences**, Beijing, v. 31, p. 162-170, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029616000232>. Acesso em: 7 Fev. 2023.

ZOGRAFOS, C.; ROBBINS, P. Green sacrifice zones, or why a green new deal cannot ignore the cost shifts of just transitions. **One Earth**, Barcelona, v. 3, n. 5, p. 543-546, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259033222030542X>. Acesso em: 7 Fev. 2023.