

**CENTRO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICO PAULA SOUZA
ETEC TRAJANO CAMARGO
ENSINO MÉDIO INTEGRADO AO TÉCNICO EM QUÍMICA**

**Gustavo Lima da Silva
Pedro Henrique Batista Pereira
Thiago Henrique Barbosa da Silva
Vinicius de Almeida Guimarães Fahl**

**RECUPERAÇÃO DE COBRE EM LODOS GALVÂNICOS E
REUTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE SEMIJOIAS**

Prof. ^a Gislaine Aparecida Barana Delbianco

**LIMEIRA - SP
2024**

Gustavo Lima da Silva
Pedro Henrique Batista Pereira
Thiago Henrique Barbosa da Silva
Vinicius de Almeida Guimarães Fahl

**RECUPERAÇÃO DE COBRE EM LODOS GALVÂNICOS E
REUTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE SEMIJOIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico em Química da Etec Trajano Camargo, orientado pela Prof. Dr^a Gislaine Aparecida Barana Delbianco, como requisito parcial para obtenção do título de técnico em Química.

LIMEIRA - SP
2024

RESUMO

O trabalho aborda a recuperação e reutilização de cobre a partir de lodos galvânicos gerados na indústria de semijoias, com foco em promover a sustentabilidade e a economia circular. Realizado em Limeira, um dos principais polos dessa indústria no Brasil, o estudo visou transformar o hidróxido de cobre I e II presentes nos efluentes industriais em óxido de cobre II (CuO), utilizando técnicas como calcinação e quantificação por iodometria. A pesquisa destacou o papel essencial do cobre na economia moderna, suas propriedades únicas e os desafios decorrentes do descarte inadequado de resíduos galvânicos, ricos em metais pesados. Durante os experimentos, etapas como secagem, tratamento químico, precipitação e calcinação foram analisadas, revelando dificuldades na separação completa de impurezas, o que comprometeu a obtenção de óxido de cobre II. Apesar disso, o estudo mostrou a viabilidade parcial do método e reforçou a importância de melhorias nas técnicas e no controle dos processos. Os resultados indicam que a reciclagem do cobre pode minimizar impactos ambientais, reduzir a extração de novos recursos já escassos e oferecer soluções práticas para a sustentabilidade industrial, embora desafios técnicos ainda precisem ser superados para aumentar a eficiência e pureza dos materiais recuperados.

Palavras-chaves: Iodometria; resíduos galvânicos; metais pesados; reciclagem; sustentabilidade.

ABSTRACT

The work addresses the recovery and reuse of copper from galvanic sludge generated in the semi-jewelry industry, with a focus on promoting sustainability and the circular economy. Carried out in Limeira, one of the main centers of this industry in Brazil, the study aimed to transform the copper hydroxide present in industrial effluents into copper oxide (CuO), using techniques such as calcination and iodometry. The research highlighted the essential role of copper in the modern economy, its unique properties and the challenges arising from the improper disposal of galvanic waste, which is rich in heavy metals. During the experiments, stages such as drying, chemical treatment, precipitation and calcination were analyzed, revealing difficulties in the complete separation of impurities, which compromised obtaining pure copper oxide. Despite this, the study showed the partial viability of the method and reinforced the importance of technical improvements and process control. The results indicate that copper recycling can minimize environmental impacts, reduce the extraction of new resources and offer practical solutions for industrial sustainability, although technical challenges still need to be overcome to increase the efficiency and purity of the recovered materials.

keywords: Iodometry; galvanic waste; heavy metals; recycling; sustainability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	4
2. OBJETIVOS.....	6
2.1. Objetivo Geral.....	6
2.2. Objetivo Específico.....	6
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
3.1. Limeira a Capital Brasileira da Semijoia.....	7
3.1.2 Histórico da Galvânica.....	7
3.2. Sustentabilidade na Galvanoplastia.....	8
3.3. A importância de um Teste na Galvanoplastia.....	9
3.3.1. Barreira protetora:.....	9
3.3.2. Aparência estética:.....	9
3.3.3. Dureza melhorada:.....	9
3.4. A indústria da Galvanostegia de Metais Nobre.....	10
3.5. Classificação do Resíduo Galvânico.....	10
3.6. Importância da Reciclagem do Cobre.....	12
3.7. Toxicidade dos Metais Pesados.....	14
3.7.1. Propriedade do Cobre Utilizado na Indústria de Semijoias.....	14
3.7.2. Propriedade do Níquel Utilizado na Indústria de Semijoias.....	15
3.7.3 Propriedade do Prata Utilizado na Indústria de Semijoias.....	15
3.7.4. Propriedade do Estanho Utilizado na Indústria de Semijoias.....	16
3.7.5. Propriedade do Cádmio Utilizado na Indústria de Semijoias.....	16
3.8. Princípio de Extração de metais pesados.....	17
3.8.1. Métodos de Identificação do Cobre.....	17
3.8.1.1. Método Iodometria.....	17
3.8.1.2. Método de Calcinação do Cobre.....	18
3.9. Legislação pertinente.....	19
4. MATERIAS E MÉTODOS.....	20
4.1. Coleta da Amostra do Lodo do Galvânico.....	20
4.2. Remoção da Umidade.....	21
4.3. Calcinação do Lodo para a Extração do Cobre do Resíduo.....	22
4.3.1. Cuidados a ser tomado.....	25
4.3.2. Iodometria para Identificação do Cobre.....	25
4.4. Coleta da amostra para a iodometria.....	26
4.4.1. Acidificação.....	26
4.4.2. Adição de amido.....	26
4.4.3. Titulação.....	27
5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	28
5.1. Coleta e Conservação da Amostra.....	28
5.2. Realização da Adição de Ácido Clorídrico.....	28
5.2.1. Realização da Adição de Hidróxido de Sódio.....	30
5.3. Calcinação do Lodo para a Extração do Cobre do Resíduo.....	31
5.5. Processo de Fundição com Maçarico de gás butano.....	32

5.5.1. Fonte de Calor Maçarico de Gás Oxigênio e Gás Butano.....	33
5.6. Iodometria para Identificação do Cobre.....	33
REFERÊNCIAS.....	39

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O cobre é um metal extremamente flexível e reciclável, sendo considerado um dos metais mais importantes para a humanidade. Com uma história que remonta a milhares de anos, o cobre é utilizado desde as civilizações mais antigas e apresenta propriedades únicas que o tornam indispensável na sociedade moderna (MAKE, 2022).

Sua adaptabilidade, aliada à sua elevada condutividade elétrica e térmica, torna o cobre uma substância indispensável em componentes elétricos presentes em diversas indústrias ao redor do mundo; o que despertou maior interesse e que especialistas alertam que poderá levar a uma escassez no fornecimento é a importância do cobre para o futuro da energia (MAKE, 2022).

Além do ouro e da prata, o cobre e o latão são materiais muito utilizados na fabricação de bijuterias, e seus produtos acabam sendo tão atraentes quanto os elaborados a partir de minerais e metais preciosos. Essa característica torna-o uma ótima opção para a galvanização, uma vez que a camada de cobre pode proteger o material subjacente, que é mais vulnerável à corrosão (METALS, 2024; Rapid Direct, 2024).

À medida que o mundo avança em direção a uma maior eletrificação, as metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa estimulam a demanda por esse metal, elevando a demanda para 50 milhões de toneladas métricas anuais até 2035, de acordo com um estudo da S&P Global (ATTWOOD, 2022). Diante da ausência de novas reservas de cobre, as principais fontes de suprimento futuro devem ser provenientes da reciclagem do metal usado em outros equipamentos ou de aumentos na produção das minas existentes. A expectativa é de que, em 13 anos, o mercado global sofra um déficit de aproximadamente 10 milhões de toneladas de cobre (ATTWOOD, 2022; CLIMAINFO, 2022).

Embora essa previsão seja, em grande parte, hipotética, pois o cobre não terá utilidade se não houver oferta, outras análises também indicam um aumento potencial na demanda. A BloombergNEF estima um crescimento de mais de 50% entre 2022 e 2040 (ATTWOOD, 2022).

Em uma nota divulgada em 16 de janeiro de 2023, o Goldman Sachs disse que é provável que o Chile produza menos cobre entre 2023 e 2025. Porém, um

observador do mercado advertiu para não se apegar muito às notícias (SHAN, 2023).

Timna Tanners, a diretora administrativa da Wolfe Research, afirmou: "É comum haver interrupções e não acredito que estejamos vivendo algo diferente do habitual", acrescentando que 2023 deverá representar um aumento na operação de diversas novas minas (SHAN, 2023).

Na segunda-feira, 6 de fevereiro de 2023, os futuros do cobre atingiram £4,035 (28,94 reais) por libra, de acordo com a CME. O metal atingiu a mínima de £3,9930 (28,64 reais), a menor desde o dia 10 de janeiro de 2023, quando foi negociado a £3,9875 (28,60 reais) (SHAN, 2023).

O preço do cobre atualmente está em evidência globalmente, alcançando cerca de US\$10.000 por tonelada na Bolsa de Metais de Londres, o que é bastante superior às médias históricas. Essa valorização se deve ao fato de que, no setor de mineração, as previsões indicam um aumento significativo na demanda nos próximos anos, enquanto a produção metálica não será capaz de suprir o aumento do consumo (APRILE, 2024).

Na Comex, divisão de metais da New York Mercantile Exchange, o cobre com entrega em julho de 2023 teve uma queda de 2,80%, atingindo US\$4,5370 por libra-peso. Na London Metal Exchange (LME), o metal para três meses registrava uma diminuição de 2,67%, cotado a US\$9.921,00 por tonelada, por volta das 14h05 (horário de Brasília) (ANDRADE, 2024).

Os preços do cobre têm sofrido uma pressão desde que atingiram um novo pico histórico em meados de maio. O mercado apresentou sinais de aquecimento durante a alta, impulsionados pelos primeiros sinais de uma recuperação industrial global, o que levou a uma postura cada vez mais unilateral por parte dos traders especulativos no mercado de futuros, consoante o relato de Julius Baer (ANDRADE, 2024).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um método para a reutilização do Cobre no processo de galvanização nas indústrias de semijoias.

2.2. Objetivo Específico

- Separar o Hidróxido de cobre II produzido pelas indústrias de semijoias durante o processo de tratamento do efluentes;
- Transformar Hidróxido de cobre II em Óxido de Cobre II;
- Incentivar a economia circular nas indústrias de semijoias;
- Considerar os impactos ambientais causados pelo descarte de hidróxido de cobre II;
- Quantificar a porcentagem de cobre presente nos Lodos Galvânicos analisados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Limeira a Capital Brasileira da Semijoia

Limeira é conhecida como a capital das semijoias devido às inúmeras empresas desse segmento na cidade. Aliás, segundo dados da ALJ, 70% de toda a produção deste produto no país acontece aqui. A cidade é um verdadeiro paraíso para quem quer comprar semijoias, principalmente para venda. Afinal, existe uma grande variedade, que atende ao perfil de todos os tipos de clientes. É possível encontrar peças cruas, personalizadas, galvanizadas e acompanhar as principais tendências. Por isso a compra de pedras semipreciosas em Limeira é quase uma parada obrigatória para quem trabalha na área (FRANCO GALVÂNICA, 2024).

Em janeiro de 1991, Walter Oricolli publicou um pouco da história da indústria da joia folheada em Limeira, em uma edição única do jornal "Biju News", o saudoso jornalista teve o maior privilégio em contar com o depoimento de alguns artífices e protagonistas que ainda estavam vivos. (JÚNIOR, 1930).

3.1.2 Histórico da Galvânica

Luigi Galvani descobriu, em 1780, que a combinação de dois metais diferentes, como cobre e zinco, ao serem colocados em contato com diferentes partes de um nervo na perna de uma rã, provocava a contração da perna. Ele

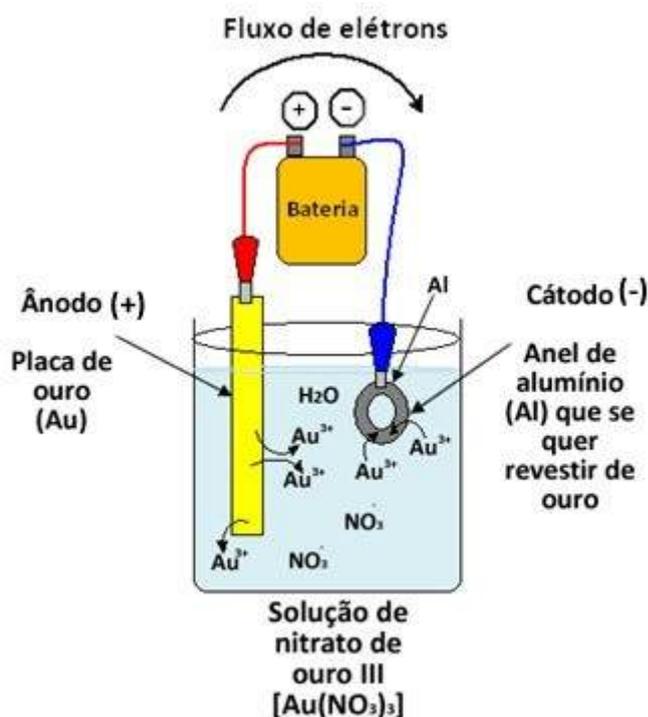
chamou essa energia de "eletricidade animal". A célula voltaica, criada por Alessandro Volta em 1800, é semelhante à célula galvânica. Tais inovações permitem o desenvolvimento de baterias elétricas (KIMAIYO, 2008).

A célula galvânica é constituída por duas meias células. Cada meia célula é composta por um metal e uma solução salina do mesmo. Esta solução contém um cátion metálico, associado a um ânion, que tem como objetivo equilibrar a carga do cátion. Em essência, cada meia célula apresenta o metal em dois estados de oxidação. A reação química que ocorre é denominada reação redox, que pode ser representada de forma simbólica na direção da redução, de acordo com KIMAIYO, 2008):



Numa célula galvânica, um metal consegue reduzir o cátion do outro e, inversamente, o outro cátion pode oxidar o primeiro metal. As duas meias-células devem estar fisicamente separadas para que as soluções não se misturem (Figura 1). Uma ponte salina ou placa porosa é usada para separar as duas soluções (KIMAIYO, 2008).

Figura 1: Esquema de um processo de galvanoplastia específico (douração).



Fonte: AGOSTINHO, 2018.

3.2. Sustentabilidade na Galvanoplastia

Tendo em mente que a galvanoplastia é uma das principais atividades industriais potencialmente poluidoras e que o planeta Terra tem sido severamente castigado por esta atividade, especialmente no período posterior à segunda metade do século XX, com o lançamento de grandes cargas de metais no solo, água e ar, destacando-se: cianeto, ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA), hidróxi-etileno di-fosfônico (HEDP), gluconato, amônia, cloro, fósforo, Refletindo sobre a causa e o efeito destes processos industriais, tem havido o desenvolvimento de inúmeras tecnologias que permitem uma produção mais limpa em galvanotécnica sem causar impactos ambientais e além de eliminar a degradação do meio ambiente (ARAÚJO, 2019).

Ao longo dos últimos cinquenta anos, a galvanotécnica passou a ser regulamentada globalmente por meio de normas legais e técnicas voltadas para a conformidade ambiental. Isso gerou oportunidades para a sustentabilidade desse setor, especialmente quando se entende os processos de licenciamento ambiental de cada país. É importante destacar que apenas estar em conformidade ambiental não garante a sustentabilidade do empreendimento, pois há muito mais a ser feito. Assim, a realidade da galvanoplastia insustentável está com os dias contados. Existe, portanto, a possibilidade de transformar e reverter essa prática em uma galvanoplastia sustentável (ARAÚJO, 2019).

3.3. A importância de um Teste na Galvanoplastia

3.3.1. Barreira protetora:

A galvanoplastia forma uma barreira protetora no substrato (camada de passivação), que protege contra condições ambientais. A proteção contra corrosão é particularmente benéfica para peças expostas a condições severas e significa que é necessária uma substituição menos frequente (WILLIAMS, 2020).

3.3.2. Aparência estética:

Muitos usarão a galvanoplastia para simplesmente melhorar a aparência externa de um substrato. Aplicar uma fina camada de metal precioso, como prata, o tornará esteticamente mais agradável. A galvanoplastia oferece um resultado eficaz a um preço acessível, o que, por sua vez, significa que peças atraentes podem ser vendidas a um custo menor (EC WILLIAMS, 2020).

3.3.3. Dureza melhorada:

Uma razão popular para as indústrias usarem galvanoplastias é que elas melhoram a resistência e a durabilidade dos materiais do substrato. Portanto, melhorando sua capacidade de suportar estresse e uso frequente. Novamente, isso ajuda a aumentar a vida útil das peças galvanizadas, reduzindo a frequência de substituição (EC WILLIAMS, 2020).

3.4. A indústria da Galvanostegia de Metais Nobre

A Galvanostegia (ou galvanoplastia) de metais nobres é um processo industrial que envolve a deposição de uma fina camada de metais preciosos, como ouro, prata, platina e paládio, sobre uma superfície metálica, por meio de corrente elétrica. Este processo é amplamente utilizado para melhorar a resistência à corrosão, a condutividade elétrica ou a estética de diversos produtos, além de economizar o uso de metais preciosos, já que apenas uma fina camada é aplicada (ADEMILSON RAMOS, 2024).

3.5. Classificação do Resíduo Galvânico

O processo galvânico consiste em depositar uma fina camada de metal sobre uma superfície metálica ou plástica. Esse processo gera um volume significativo de efluentes, que devem ser tratados segundo a legislação ambiental. O sistema de tratamento de efluentes é responsável pela geração de resíduo sólido galvânico, também conhecido como lodo galvânico (ALVES; SEO, 2014).

A indústria galvânica gera uma variedade de resíduos, dos quais o lodo galvânico é o mais representativo (AMARAL, 2015). A sua composição química e cor são determinadas pela tecnologia aplicada e pela natureza da produção que lhe deu. Portanto, normalmente apresentam coloração variando do branco-leite, verde, azul, laranja-tijolo ao marrom acinzentado (PONTE, 2015) e seu pH pode atingir valores extremos quando não são tratados (INEA, 2014). O lodo é caracterizado como um material duro, mas muitas vezes é encontrado em estado pastoso. (ALVES; SEO, 2014).

Os principais componentes do lodo galvânico em estudo são metais pesados (Cr - 28,53% e Zn - 20,28% em peso), tendo um total de 48,81% da composição. O mesmo lodo galvânico utilizado por Magalhães *et al.* (2020), tinha apenas 11,71% de metais pesados. Os resíduos galvânicos e a areia de fundição também apresentam metais pesados, porém em menor quantidade, 1,21%. A quantidade total de metais pesados em ambos os resíduos em questão resulta em 51,90%. Nos testes de difratometria, estão bem visíveis duas curvas suaves de material amorfo com seus centros em aproximadamente em 35° e 60° (MYMRIN; CANFIELD; PONTE, 2006).

Os processos galvânicos causam alto impacto ambiental, devido ao elevado consumo de água, à natureza tóxica dos produtos químicos usados, à geração de lodo galvânico e a emissão de gases. O setor galvânico está cada vez mais

buscando implantar medidas ambientais para modular os efeitos negativos do processo produtivo (TOCCHETTO *et al*, 2004).

A adoção de um sistema de gestão ambiental garante a conformidade com as leis vigentes, diminui os custos de produção e aprimora a reputação das empresas junto a seus diversos stakeholders. Os indicadores de impacto ambiental ajudam a entender e monitorar os efeitos significativos que um determinado processo provoca no meio ambiente. Por este motivo, constitui-se em uma ferramenta significativa para a implantação de medidas ambientais nas empresas (TOCCHETTO *et al*, 2004).

De acordo com o trabalho de trabalho de TOCCHETTO *et al* tiveram como objetivo analisar o conjunto de indicadores de impacto ambiental, identificado por um grupo de empresas com atividade galvânica, e a sua influência na implantação de medidas preventivas de poluição. Foi empregada uma metodologia de investigação, utilizando um questionário pré-estruturado como instrumento de avaliação. A pesquisa ocorreu em quatorze grandes empresas localizadas no Estado do Rio Grande do Sul (RS) no ano de 2003. Os resultados obtidos mostraram que, em certa medida, as empresas não têm conhecimento sobre o impacto ambiental gerado por suas atividades produtivas. Esse desconhecimento parcial se manifesta na definição dos indicadores de impacto ambiental. Impactos, como contaminação do solo, emissões gasosas, não foram reconhecidas como significativas pelas empresas. Isto explica a não implantação, por parte das empresas, de medidas preventivas para o controle destes impactos (TOCCHETTO *et al*, 2004).

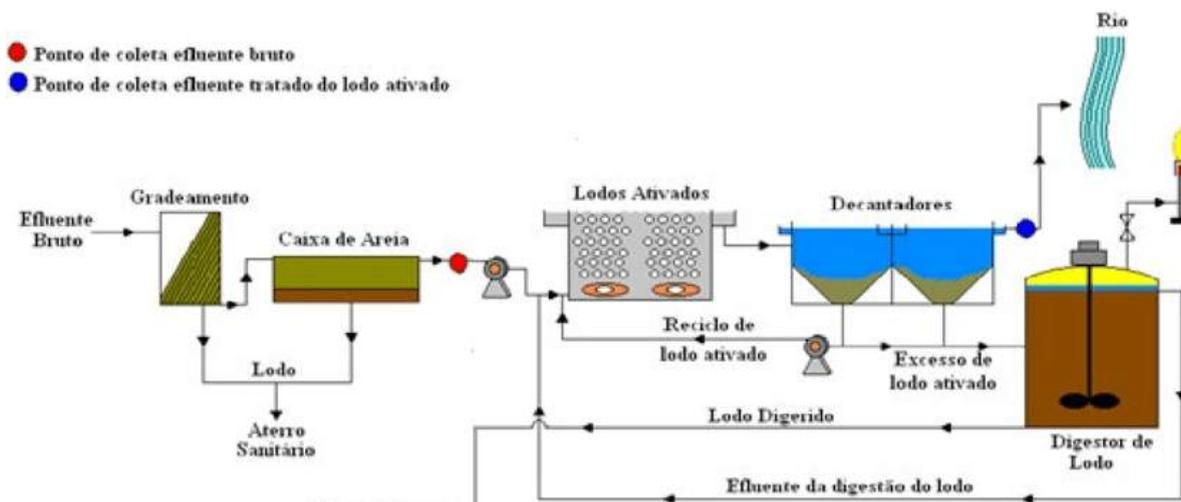
O tratamento físico remove poluentes sólidos e misturas coloidais em suspensão sedimentáveis e flutuantes por meio de separações físicas, utilizando processos como gradeamento, peneiramento, caixas separadoras de óleos e gorduras, desarenadores e flotação (BLOG GRUPO OPERSAN, 2024).

No processo de tratamento químico, os poluentes são removidos, alterando a composição molecular do efluente por meio de produtos específicos do processo, como coagulação, floculação, neutralização de pH, oxidação, redução e desinfecção. Em geral, cada processo de tratamento recebe substâncias específicas determinadas por análises laboratoriais que simulam reações e tentam encontrar o método de tratamento mais eficaz e com menor consumo de insumos (BLOG GRUPO OPERSAN, 2024).

Alguns dos principais processos incluem: limpeza química e eletrocoagulação, precipitação de fosfato, oxidação de ozônio, redução de cromo

hexavalente, oxidação de cianeto, precipitação de metais tóxicos e troca iônica, Figura 2 (BLOG GRUPO OPERSAN, 2024).

Figura 2: Fluxograma Geral de Estação de Tratamento de Efluente.



Fonte: Fluxograma geral da ETE.

3.6. Importância da Reciclagem do Cobre

A reciclagem do cobre se revela um processo não apenas eficaz, mas também extremamente benéfico, tanto para o meio ambiente quanto para a economia. Esse material é completamente reciclável, o que significa que pode ser reaproveitado de forma ilimitada, mantendo suas propriedades originais (CICLO LIGAS, 2024).

Esse processo de reutilização ajuda a reduzir a dependência da extração de novos recursos, resultando em menor consumo de energia e na diminuição das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, é fundamental reconhecer que, apesar de seus diversos benefícios, a reciclagem de metais enfrenta alguns obstáculos (CICLO LIGAS, 2024).

A coleta seletiva, a conscientização da população e a infraestrutura necessária para o tratamento adequado dos materiais são apenas alguns dos desafios que precisam ser superados para que a reciclagem possa atingir seu máximo potencial (CICLO LIGAS, 2024).

O cobre se destaca por sua resistência à corrosão, especialmente pela sua notável durabilidade e estabilidade frente a uma ampla gama de agentes químicos.

Segundo uma pesquisa conduzida por Glöser (2013), estima-se que aproximadamente dois terços das 550 milhões de toneladas de cobre produzidas desde 1900 ainda estejam em uso ativo, criando assim uma "reserva urbana" deste metal que pode atender às demandas de produção (RODRIGUES, 2022).

A prática da reciclagem do cobre diminui a necessidade de exploração mineral, que ocorre em grandes minas ao ar livre e pode resultar em desmatamento, erosão do solo e destruição de habitats naturais. Ao optar por reciclar o cobre, conseguimos mitigar a demanda por novas atividades de mineração, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e a proteção dos ecossistemas (FASTERCAPITAL, 2024).

O cobre, por ser um material não biodegradável, pode permanecer em aterros sanitários por períodos prolongados, chegando possivelmente há séculos. Ao reciclarmos o cobre, estamos evitando que esse recurso precioso seja descartado de maneira inadequada, contribuindo para a redução do volume de resíduos e seus impactos ambientais. Além disso, a reciclagem do cobre ajuda a proteger o solo e a água contra o descarte impróprio (FASTERCAPITAL, 2024).

As vantagens discutidas até agora ressaltam um grande potencial para ampliar o consumo de sucatas, visto que atualmente cerca de 35% dos novos produtos semiacabados de cobre são derivados de matérias-primas secundárias. Entretanto, é fundamental haver uma agenda de ações organizadas pela sociedade civil, com o suporte ao fortalecimento e monitoramento das políticas públicas (RODRIGUES, 2022).

3.7. Toxicidade dos Metais Pesados

Os metais pesados podem ser tóxicos para o organismo, causando danos a vários órgãos, como os rins, pulmões, estômago e cérebro. Os efeitos da toxicidade dos metais pesados podem ser silenciosos e levar algum tempo para aparecer. (DINIZ, 2024).

Alguns dos efeitos da intoxicação por metais pesados são (REIS, 2023):

- Anúria (supressão da urina);
- Diarreia sanguinolenta;

- Aumento da pressão arterial;
- Aborto;
- Problemas de visão;
- Problemas de memória;
- Cólica;
- Fraqueza muscular.

A intoxicação aguda por metais pesados acontece quando se acumula uma grande quantidade desses metais em um curto espaço de tempo. Os sintomas físicos incluem: (REIS, 2023).

- Náuseas;
- Vômito;
- Dor de cabeça;
- Dor abdominal;
- Arritmia;
- Alteração dos batimentos cardíacos;
- Formigamento das mãos e dos pés.

O tratamento da intoxicação por metais pesados consiste na descontinuação da exposição ao metal e no uso de agentes quelantes para favorecer a excreção do elemento tóxico pela urina. Alguns metais pesados que são considerados altamente tóxicos são o arsênio, o cádmio, o chumbo e o mercúrio (DINIZ, 2024).

3.7.1. Propriedade do Cobre Utilizado na Indústria de Semijoias

O cobre é um elemento essencial aos organismos vivos em pequenas quantidades. A população geral pode ser exposta por inalação, ingestão de alimentos e água ou contato dérmico, porém a principal via de exposição não ocupacional é a oral. A ingestão de sais de cobre causou vômito, letargia, anemia hemolítica aguda, dano renal e hepático e, em alguns casos, morte. A ingestão de água contendo altas concentrações do metal pode produzir náusea, vômito, dor abdominal e diarreia. As crianças são mais sensíveis aos efeitos da exposição ao cobre. A exposição prolongada a concentrações elevadas do metal em alimentos ou água pode causar dano ao fígado de crianças. Trabalhadores expostos a fumos e poeiras de cobre podem apresentar irritação no nariz, na boca e nos olhos, cefaleia, náusea, vertigem e diarreia (CETESB, 2012).

3.7.2. Propriedade do Níquel Utilizado na Indústria de Semijoias

O níquel pode ser tóxico de várias formas, dependendo de sua forma e da exposição. Enquanto o níquel elementar é um oligoelemento essencial e não é considerado tóxico, outras formas, como o níquel carbonil, são extremamente perigosas — este gás pode causar insuficiência respiratória e lesões renais (MACHADO, 2022).

A exposição ao níquel também pode provocar dermatite de contato, uma inflamação da pele que se desenvolve lentamente, e é classificado como agente carcinogênico pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC), podendo causar câncer nos pulmões, cavidade nasal e seios paranasais. Trabalhadores em refinarias e indústrias de processamento de níquel estão em risco de desenvolver bronquite crônica. Além disso, o contato prolongado com altas concentrações de níquel pode levar a má-formação de fetos e danos ao sistema imunológico. Os níveis de níquel considerados seguros são bastante baixos, não devendo superar $0,05 \text{ mg/cm}^3$ (LABORANÁLISE, 2024).

3.7.3 Propriedade do Prata Utilizado na Indústria de Semijoias

A prata é um metal com baixa toxicidade, mas pode causar efeitos colaterais se ingerida em altas concentrações, como problemas neurológicos, problemas renais, dores de cabeça, indigestão e argiria — uma condição que causa descoloração cinza-ardósia ou azulada da pele e dos tecidos profundos (SIGMA-ALDRICH, 2011).

O óxido de prata pode irritar o nariz, a garganta, os olhos e a pele, e sua inalação pode provocar tosse ou dificuldade respiratória. As nanopartículas de prata (AgNPs), presentes em produtos comerciais como pesticidas, também podem ser tóxicas; estudos indicam que a nanop prata é mais tóxica do que os íons de prata para sementes de alface. A toxicidade de nanopartículas (nanotoxicidade) é um assunto polêmico e ainda pouco esclarecido (PORTO; PAIM; SOARES. 2022).

3.7.4. Propriedade do Estanho Utilizado na Indústria de Semijoias

O estanho metálico não é altamente tóxico para os seres humanos, pois sua absorção pelo trato gastrointestinal é limitada; no entanto, o consumo de grandes quantidades de compostos inorgânicos de estanho pode causar dor de estômago,

anemia, problemas no fígado e nos rins. Níveis excessivos de estanho em alimentos e bebidas enlatados podem provocar irritação gástrica aguda, e sua aspiração pode resultar em irritação respiratória e digestiva, náuseas, cefaleia e tontura (CETESB, 2020).

Em caso de exposição ao estanho, as medidas de primeiros socorros incluem: em caso de inalação, remover a pessoa para um local ventilado; em contato com a pele ou olhos, lavar com água corrente (pelo menos 15 minutos para os olhos); e, em caso de ingestão, beber bastante água (NOVAIS, 2024).

3.7.5. Propriedade do Cádmio Utilizado na Indústria de Semijoias

O cádmio é um metal pesado que pode ser altamente tóxico para os organismos vivos, mesmo em pequenas concentrações. A exposição ao cádmio pode causar diversos problemas de saúde, incluindo intoxicação, distúrbios gastrointestinais, pneumonite e edema pulmonar. A inalação de poeira com cádmio pode danificar os rins e o trato respiratório, podendo ser fatal, enquanto a ingestão pode provocar intoxicação, danos ao fígado e aos rins, além de distúrbios gastrointestinais (CAMPOS, 2024).

O cádmio também é classificado como carcinogênico para humanos pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC) e pelo Departamento Americano de Saúde e Serviços Humanos (DHHS). Além disso, o cádmio tende a se acumular nos rins e no fígado, e trabalhadores que manipulam fertilizantes com fosfato ou que atuam na área de combustíveis fósseis e produção de aço estão especialmente expostos à contaminação por esse metal (COLASSO, 2020).

3.8. Princípio de Extração de metais pesados

A precipitação química é o método mais comum de remoção de metais pesados, onde compostos químicos reagem com os íons de metais formando compostos insolúveis em água, que posteriormente serão separados por filtração ou sedimentação. A técnica mais usada para precipitação de metais é a utilização de hidróxidos, por ser relativamente simples, de baixo custo e possuir um bom controle de pH, porém, em alguns casos, na presença de uma mistura de metais, o pH ideal para um metal, pode não ser para outro, fazendo com que ocorra a redissolução (NASCIMENTO; VALDIVÂNIA, 2019).

A precipitação de metais utilizando sais de ácidos carboxílicos surgiu como uma alternativa à utilização de hidróxidos. Primeiramente, pelo fato da solubilidade dos compostos metálicos formados com carboxilatos ser inferior à do hidróxido de metal correspondente, e por permanecerem insolúveis em uma vasta faixa de pH, precipitando, assim, simultaneamente diferentes metais (MAUCHAUFFÉE e MEUX, 2007).

Os sais de ácido carboxílicos são classificados como tensoativos aniônicos. A interação entre os íons bivalentes e este tipo de tensoativo (aniônico), em solução aquosa, leva a formação de carboxilatos de metal, que podem precipitar na forma de flocos. Tal interação depende do comprimento da cadeia alquila do tensoativo e de sua concentração (AKANNI *et al.*, 1992).

3.8.1. Métodos de quantificação de Cobre

3.8.1.1. Método da Iodometria

Nos métodos de titulação indireta, a solução que contém o analito é misturada com uma quantidade excessiva de iodeto de potássio, resultando na liberação de I_2 nessa condição. Esse I_2 é, então, titulado com uma solução padrão de tiosulfato de sódio ($Na_2 S_2 O_3$) ou trióxido de arsênio ($As_2 O_3$). A análise ocorre na presença de I^- , que se origina da dissociação do KI, sendo o íon triiodeto I_3^- a forma predominante gerada pela reação (SALES, 2019).

Assim, as titulações envolvem o sistema I_2/I^- , resultando na formação do íon triiodeto I_3^- (SALES, 2019).

Quando as condições são apropriadas, a reação ocorre de forma quantitativa, permitindo a determinação do cobre por meio de uma titulação iodométrica, onde o iodo liberado é titulado com uma solução padrão de tiosulfato. Este método de análise do cobre pode rivalizar, em termos de precisão, com o método eletrolítico, além de ser mais ágil e menos suscetível a interferências de outros elementos (BACCAN *et al.*, 1979).



Em meio neutro ou levemente ácido, os íons Cu (II) reagem com íons iodeto, resultando na formação de iodeto cuproso, que é insolúvel, com a liberação de iodo" (BACCAN *et al*, 1979).

3.8.1.2. Método de Calcinação do Cobre

A calcinação refere-se ao processo de transformação de minérios em óxidos por meio de aquecimento intenso. O minério é aquecido a temperaturas inferiores ao seu ponto de fusão, podendo ocorrer em um ambiente sem ar ou com suprimento restrito. Este processo é bastante utilizado para transformar carbonatos e hidróxidos em óxidos equivalentes (BYJU'S, 2024).

Durante a calcinação, também ocorre a remoção de umidade e impurezas voláteis. Além disso, a calcinação pode ser entendida como um processo térmico cujo objetivo é converter minérios e outros materiais sólidos, resultando numa decomposição térmica. A reação de calcinação ocorre em temperaturas de decomposição térmica ou em intervalos superiores (BYJU'S, 2024).

A calcinação é o aquecimento ao qual se submete, especialmente carbonatos e hidratos, para eliminar CO₂, água e outros gases que estão quimicamente "fortemente ligados" a esses compostos (ROSENQUIST, 1983). É um processo endotérmico que é, sobretudo, usado para a fabricação de óxidos (CAMPOS *et al*, 2018).

Ficou evidenciado que o hidróxido de cobre Cu(OH)₂ é uma fase metaestável que se converte facilmente em óxido de cobre CuO, que é mais estável. Essa conversão ocorre no estado sólido por meio da desidratação térmica a temperatura relativamente baixa, além de também ocorrer em meio aquoso à temperatura ambiente. Em 1970, Günter e Ostwald divulgaram os resultados de suas investigações sobre essa questão (CUDENNEC, 2003).

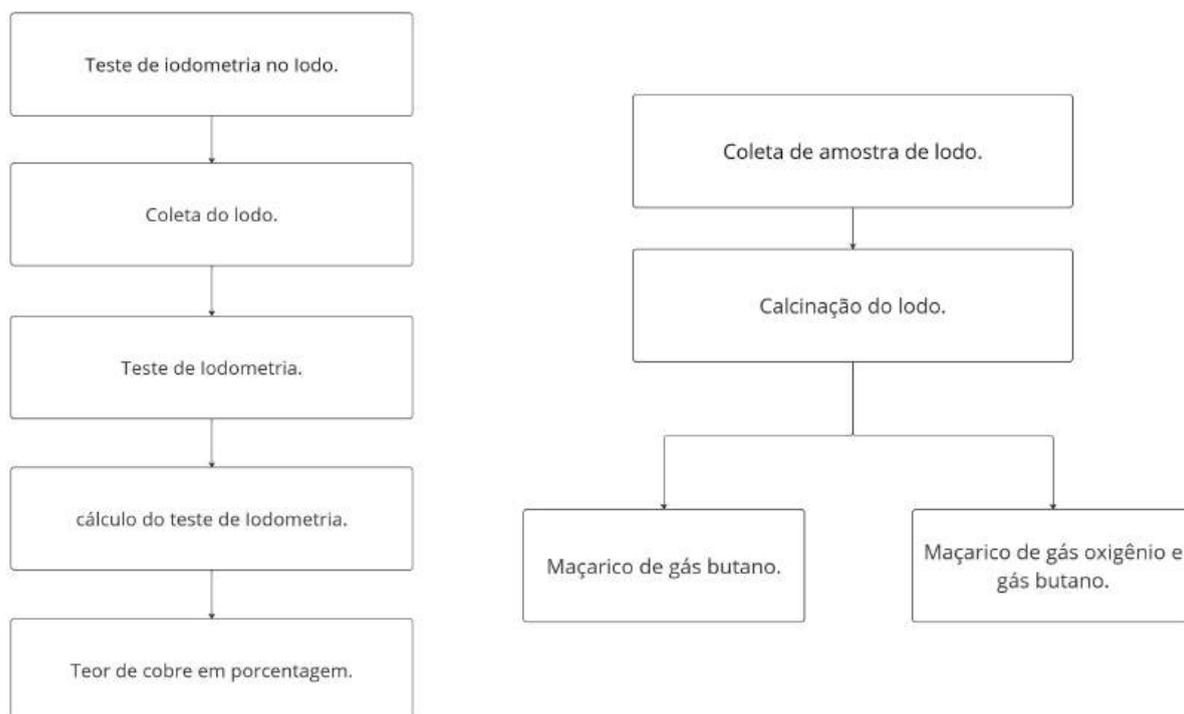
O hidróxido de cobre II é facilmente decomposto por meio de calor ou irradiação eletrônica em um microscópio eletrônico. A decomposição térmica do Cu(OH)₂, no intervalo de 298 a 1273 K, foi monitorada por uma câmera de difração de raios-x em pó de alta sensibilidade. Aproximadamente a 323 K, observou-se um aumento reversível no parâmetro c em cerca de 1,5%, e a 423 K, a curva DTA apresentou um grande pico endotérmico que corresponde à desidratação do Cu(OH)₂ e à formação de CuO. Uma nova transformação ocorre em uma

temperatura superior (1093 K), resultando na formação de Cu_2O (CUDENNEC, 2003).

4. MATERIAS E MÉTODOS

As atividades experimentais foram realizadas no laboratório da Empresa MD Folheados de Limeira, sob a supervisão do Edson Marcelo Belineli, Químico Responsável pelo banho, baseado nos trabalhos de Delbianco (2008) e Larissa da Silva, Gonçalves Ferreira, Vitória Ventura (2018) conforme o fluxograma (Figura 3).

Figura 3. Fluxograma de atividades experimentais.



Fonte: Acervo Pessoal 2024.

4.1. Coleta da Amostra do Lodo do Galvânico

A coleta do lodo foi efetuada na Indústria Galvânica MD Folheado, Figura 4, logo após a produção do material recém-gerado. A amostra foi acondicionada em um saco plástico e posteriormente transportada para a Escola Técnica Estadual Trajano Camargo (ETEC Trajano Camargo), com o objetivo de dar seguimento aos experimentos subsequentes.

Figura 4: Coleta do Lodo na MD Folheados.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

4.2. Remoção da Umidade

Após a coleta, a amostra foi submetida ao processo de secagem, considerando-se diversas opções para a remoção de umidade. Optou-se por realizar a secagem utilizando um fogão a gás, conforme demonstrado na (Figura 5). Inicialmente, foi pesada uma quantidade de 202g de lodo úmido, ao final do procedimento, obteve-se uma massa de 67 g.

Figura 5: Lodo após a secagem.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

4.3. Calcinação do Lodo para a Extração do Cobre do Resíduo

Calcinação é um processo térmico que ajuda a transformar hidróxidos em óxidos. Dado que o uso de maçaricos não é mais tão frequente, optou-se por utilizar as informações fornecidas por Highett Metals e FOCO Induction como base para os futuros experimentos (FOCO INDUCTION, 2023; HIGHETT METALS, 2012)

Aproximadamente 202 gramas de lodo úmido foram pesadas e submetidas a um processo de secagem no fogão a gás. Após a secagem, o lodo desidratado foi novamente pesado e transferido para um erlenmeyer de 250 mL. Posteriormente, cerca de 70 mL de ácido clorídrico (HCl) PA foram adicionados ao erlenmeyer, resultando na formação de um precipitado, resultante da reação química dos metais presentes no lodo. Esses metais, que estavam inicialmente na forma de hidróxidos, foram convertidos em cloretos.

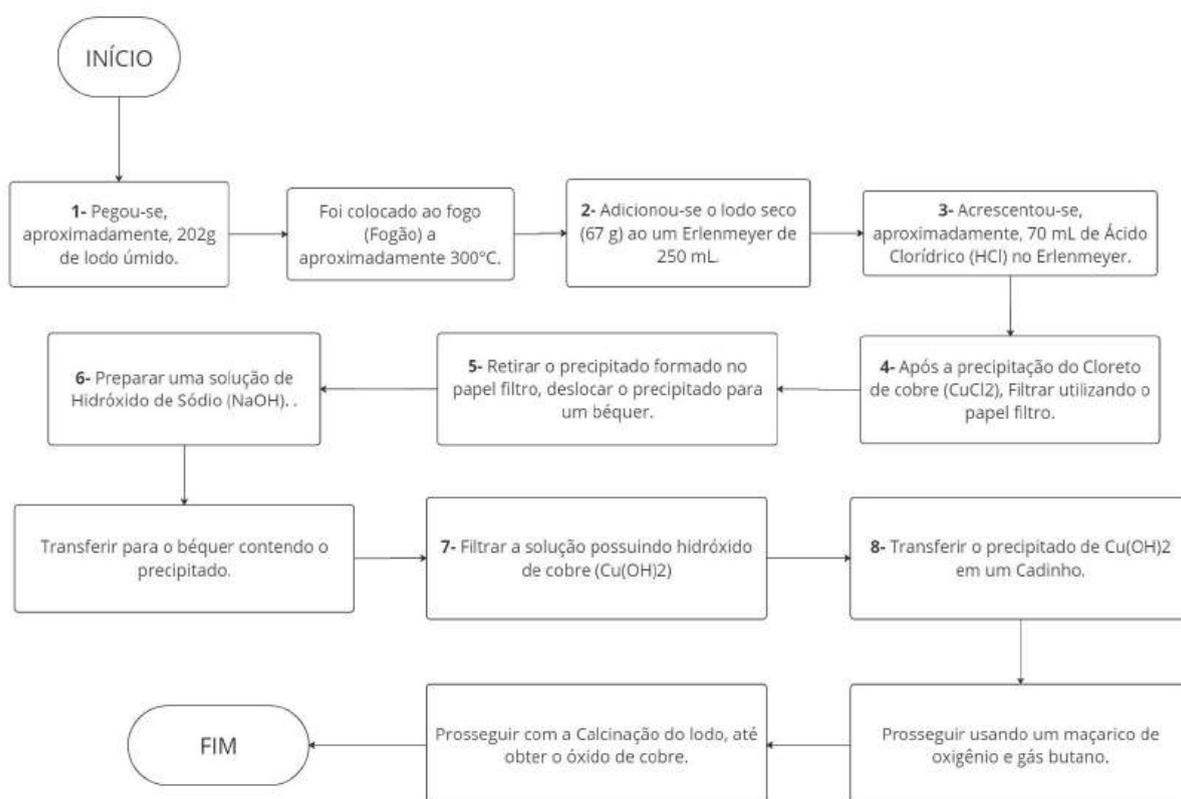
Para separar o precipitado da solução, foi realizada uma filtração simples utilizando papel de filtro. Após a separação, o precipitado retido no papel de filtro foi transferido para um béquer de vidro. Em seguida, preparou-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) visando reverter o cloreto cuproso (I) (esse composto é insolúvel em água) em hidróxido de cobre II (normalmente insolúvel em água), uma vez que, durante a calcinação, o hidróxido de cobre II liberará água (H₂O) e se converterá em óxido de cobre II (CuO). A solução de NaOH preparada foi transferida para o béquer contendo o CuCl₂, resultando na formação de Cu(OH)₂ + H₂O e cloreto de sódio (NaCl). Após essa reação, realizou-se uma nova filtração utilizando papel de filtro, separando o precipitado, composto por Cu(OH)₂ + H₂O, da solução.



Como demonstrado na reação acima, há a formação de hidróxido de cobre, que se precipita por ser insolúvel em água. Este precipitado é capaz de filtrar, isolando, unicamente, o hidróxido de cobre. Neste estágio, o cobre está presente de forma mais estável e adequada para a calcificação posterior. A técnica também reduz os riscos de acidentes, uma vez que libera o gás cloro (Cl₂), que seria liberado caso o aquecimento fosse realizado diretamente sobre o cloreto Cuproso (CuCl) Ao calcinar o hidróxido de cobre, a água é liberada, o que resulta na formação de óxido de cobre (CuO), o que evita a liberação de cloro e torna o processo mais seguro e controlado.

Foi preparado um cadinho limpo para a transferência do precipitado. O maçarico foi ajustado até atingir uma chama de coloração azul intensa, iniciando-se então a calcinação do $\text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$. O hidróxido de cobre hidratado se decompõe facilmente a baixas temperaturas, liberando a água presente no precipitado e deixando apenas o hidróxido de cobre II. Quando a temperatura ultrapassa 500°C , o hidróxido de cobre II se decompõe, liberando água e formando óxido de cobre (CuO), como mostrado na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma de Calcinação.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

O ajuste do maçarico para uma chama de cor azulada é essencial, pois, indica uma maior eficiência de combustão e uma maior temperatura. Sabrina Santana Klabacher demonstra através da tabela a seguir (Tabela 1), como dependendo do combustível utilizado no maçarico, possui capacidades variáveis de temperaturas (KLABACHER, 2023).

Ao iniciar o processo de calcinação, começamos com o aquecimento do cadinho contendo o lodo galvânico. Posicionando-se a chama do maçarico

diretamente na superfície do lodo. A temperatura ideal para o ponto de fusão do cobre é de 1.080° C. O cobre, em particular, será transformado de Hidróxido de cobre (Cu(OH)₂) para óxido de cobre(II) (CuO) nessa faixa de temperatura. Mantendo o aquecimento contínuo por 30 a 40 minutos. O material inicialmente de tonalidade amarronzada mudará para um resíduo preto, indicando a formação do óxido de cobre (CuO).

Tabela 1: Diferentes temperaturas com combustíveis diversos.

Mistura Gasosa	Temperatura (°C)
Gás de rua + Ar	1.100
Gás de rua + Oxigênio	1.800
Propano + Oxigênio	2.526
Gás natural + Oxigênio	2.538
Acetileno + Oxigênio	3.087

Fonte: Metalurgia básica para ourives e designers.

Durante o procedimento, observa-se a formação de vapores (resultantes da liberação de água dos hidróxidos) e, em algumas situações, pode haver uma leve emissão de fumaça, devido à queima de matéria orgânica ou impurezas presentes no lodo. Se houver formação de bolhas ou incandescência, ajuste a chama do maçarico para evitar superaquecimento, que pode prejudicar a amostra.

Após o período de aquecimento indicado, desligue o maçarico e deixe o cadinho esfriar naturalmente no ambiente por alguns minutos.

4.3.1. Cuidados a serem tomados

Podem surgir vapores metálicos tóxicos, especialmente o cádmio, que pode liberar gases perigosos se superaquecido. A experiência deve ser realizada em uma área ventilada ou sob uma capela de exaustão.

4.3.2. Iodometria para quantificação do Cobre

A reação se processa quantitativamente, sob condições adequadas, ela baseia-se na titulação do iodo com solução padrão de tiosulfato. Este método para determinação do cobre pode competir, em precisão, com método eletrolítico, é mais rápido e está sujeito a menos interferência de outros elementos (BACCAN, 1979).

Em soluções neutras ou fracamente ácidas os íons Cu (II) reagem com íons iodeto formando iodeto cuproso, insolúvel e iodo.



Os métodos volumétricos que envolvem a oxidação de íons iodetos ou a redução de iodo são baseados na semi-reação. As substâncias que possuem potenciais de redução menores que o do sistema são oxidadas pelo iodo, e, portanto, podem ser tituladas com uma solução padrão desta substância (VOGEL,1981).

Os íons iodeto exercem uma ação redutora sobre sistemas fortemente oxidantes, com a formação de uma quantidade equivalente de iodo. O iodo é então titulado com solução padrão de tiosulfato de sódio, a reação ocorre com maior eficiência em pH menores que 8,0, pois o potencial de redução aumenta consideravelmente quando se aumenta a concentração de íon hidrogênio na solução (BACCAN et al, 1979).

Para execução do ensaio pesou-se uma quantidade conhecida da amostra problema. A amostra foi dissolvida em ácido sulfúrico 10%, para garantir a dissolução completa, a mesma ficou em repouso por 5 minutos envolta em jornal, em busca de diminuição de luz. A solução resultante, que estivesse concentrada, foi diluída até um volume final de 100 mL (VOGEL,1981).

Uma solução de iodo (I₂) 0,01 M foi preparada em um balão volumétrico e, em seguida, padronizada com uma solução padrão de tiosulfato de sódio de 0,01 mol/L. Uma quantidade medida da solução de iodo foi adicionada à solução da amostra em um Erlenmeyer, onde o iodo reagiu com o cobre, oxidando o cobre metálico a íons cúpricos (Cu²⁺).

Em seguida, adicionaram-se 2 a 3 gotas de solução de amido à mistura, que formou um complexo azul com o iodo livre. Quando o iodo foi completamente reduzido pelo tiosulfato, a cor azul desapareceu.

Encheu-se uma bureta com a solução de tiosulfato de sódio 0,01 M e ajustou-se o nível para zero. A solução foi titulada lentamente, adicionando-se a solução de tiosulfato à mistura da amostra, com agitação contínua. A titulação continuou até que o complexo azul desaparecesse, indicando que todo o iodo livre havia sido reduzido.

Finalmente, a concentração de cobre na amostra foi calculada com base no volume de tiosulfato utilizado na titulação, e os resultados foram usados para determinar a presença e concentração de cobre na amostra, conforme o fluxograma (Figura 7).

4.4. Coleta da amostra para a iodometria

Pipetou-se 25 mL da solução contendo íons de cobre para um erlenmeyer de 250 mL. Utilizou-se uma pipeta volumétrica para garantir precisão no volume transferido, assegurando que a solução estava bem homogênea antes do procedimento. Após a transferência, deu-se uma leve batida no erlenmeyer para evitar que qualquer resíduo permanecesse na pipeta.

4.4.1. Acidificação

Adicionou-se excesso de KI a 10% à solução, garantindo que houvesse iodo suficiente para a reação desejada. Em seguida, foi acrescentado ácido sulfúrico diluído a 2% para acidificar o meio, controlando o pH e facilitando a liberação de iodo. Todo o procedimento foi realizado com cuidado, misturando bem a solução após cada adição.

4.4.2. Adição de amido

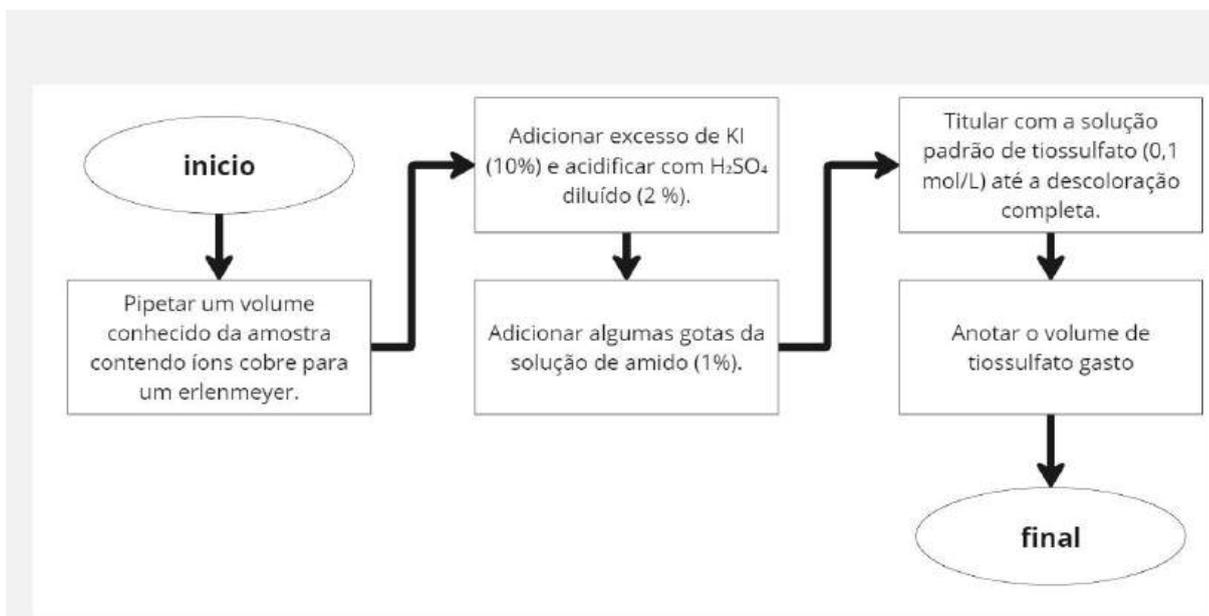
Durante o preparo da solução, adicionaram-se algumas gotas de amido a 1% para estabilizar a mistura. O objetivo era usá-lo como indicador de reação, então foi importante controlar bem a concentração para não interferir no resultado final. Após a mistura, observou-se que o amido reagiu conforme esperado, criando um leve efeito de turvação.

4.4.3. Titulação

Realizou-se a titulação da solução padrão de tiosulfato 0,01 mol/L. A adição foi feita lentamente até a descoloração completa da amostra, que havia sido

previamente tratada com iodo. À medida que o tiosulfato reagia com o iodo, a coloração azul desaparecia gradualmente, indicando o ponto final da titulação.

Figura 7: Fluxograma de Método de Iodometria para Determinação do Cobre nas Amostras de Lodo Galvânico.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. Coleta e Conservação da Amostra

Com a amostra devidamente armazenada, retornou-se à empresa, considerando-se que o local apresentava melhores condições para a execução dos experimentos. A quantidade obtida de lodo seco foi transferida para um Erlenmeyer de 250 mL. Contudo, devido à ausência desse recipiente no local, foi necessário utilizar um béquer como alternativa. Durante o período em que a amostra permaneceu armazenada, não houve alterações significativas nas suas características visuais.

5.2. Realização da Adição de Ácido Clorídrico

Com base nas atividades práticas realizadas pelo nosso grupo, a adição de 70 mL de ácido clorídrico PA (HCl) no béquer causou uma reação rápida e quase imediata, o que resultou na alteração da coloração do lodo para um tom amarelo-esverdeado, conforme demonstrado na Figura 7. O fenômeno é causado pela conversão dos metais presentes no lodo, incluindo o cobre, de hidróxidos para cloretos. A grande maioria dos cloretos metálicos é solúvel em água, o que os torna estáveis em solução. Entretanto, o cloreto cuproso (I), devido à sua menor solubilidade, pode precipitar no fundo do béquer. Essa característica do cloreto cuproso (I) facilita sua separação dos outros metais ainda dissolvidos. A reação é apresentada a seguir, demonstrando a seletividade desse processo de precipitação.



Figura 8: Adição do HCl.

Fonte: Acervo pessoal, 2024.

Com a formação de cloretos dos metais presentes no lodo, o cobre, na forma de cloreto, foi precipitado. Para separá-lo, realizou-se o processo de filtração utilizando papel filtro. No entanto, durante o procedimento, observou-se que o precipitado com características estruturais maiores, inviabilizava a passagem do filtrante, então devido a isso, optamos por trocar nosso filtro de papel por um de pano. Diante dessa ocorrência, optou-se pelo uso de um pano limpo para atuar como filtro, o que se mostrou eficaz. Assim, o procedimento foi concluído, garantindo que todo o precipitado permanecesse no filtro, sem ou com mínima presença de resíduo da solução aquosa (Figura 9).

Figura 9: Filtração do cloreto cuproso.

Fonte: Acervo pessoal, 2024.

5.2.1. Realização da Adição de Hidróxido de Sódio

Após a transferência do precipitado para um béquer limpo, foi usada uma solução previamente preparada de hidróxido de sódio a 54% (NaOH). A solução foi adicionada ao béquer contendo a amostra e, imediatamente, observou-se uma reação exotérmica, caracterizada pela liberação de calor e pela mudança de coloração, passando de uma solução transparente para uma solução de coloração azul-escura, conforme a figura anterior (Figura 9). A reação, teoricamente, resultou no hidróxido de cobre $\text{Cu}(\text{OH})_2$, água (H_2O) e cloreto de sódio (NaCl).

A filtração foi realizada novamente utilizando papel filtro. No entanto, a solução aquosa apresentou, mais uma vez, uma consistência espessa, o que impossibilitou a continuidade do processo com o papel filtro. Assim, optou-se por aplicar a mesma técnica anterior, utilizando um pano limpo como substituto para o filtro. Felizmente, o procedimento transcorreu conforme o esperado, garantindo a separação completa do precipitado (Figura 10).

Figura 10: Solução.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

5.3. Calcinação do Lodo para a Extração do Cobre do Resíduo

Após a separação adequada do precipitado da solução de hidróxido de cobre, procedeu-se à calcinação. A amostra foi transferida para um cadinho e, com a assistência do químico responsável da empresa, Marcelo, o maçarico foi aceso até atingir uma coloração azul intensa. O maçarico foi direcionado para o cadinho, e em

poucos minutos a amostra tornou-se líquida. No entanto, ao esfriar o suficiente para solidificar, a amostra apresentou características arenosas e vítreas, com uma coloração preta, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Calcinação.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

5.5. Processo de Fundição com Maçarico de gás butano

Um maçarico de soldagem é um dispositivo que utiliza gases inflamáveis para gerar chama e fogo controlados (Figura 12). Esta chama é amplamente utilizada em diversas aplicações, desde soldagem até culinária. A principal característica dos maçaricos é a capacidade de atingir altas temperaturas, o que as torna ideais para trabalhos que requerem calor intenso, como é o caso da calcinação (Figura 13). (Frigelar, 2023).

Figura 12:Maçarico de gás butano**Figura 13:** Calcinação

Fonte: Acervo pessoal, 2024.

5.5.1. Fonte de Calor Maçarico de Gás Oxigênio e Gás Butano

O maçarico, que utiliza gás oxigênio e gás butano, se destacou na soldagem profissional, atingindo temperaturas muito elevadas (Figura 14). Apesar de ser leve, ele é fácil de manusear, além de ter um excelente desempenho e longa duração. A temperatura média de funcionamento estimada foi de 1800 °C.

Figura 14: Maçarico durante o processo de calcinação

Fonte: Acervo pessoal, 2024.

5.6. Iodometria para Identificação do Cobre

O ensaio de Iodometria foi realizado três vezes. Com exceção do 1° ensaio, o 2° e 3° não houve resultados, pois durante os testes, foram notadas alterações imediatas na coloração das soluções, conforme detalhado a seguir:

No primeiro experimento, a solução apresentou uma coloração esverdeada e um aspecto levemente translúcido, conforme demonstrado na Figura (Figura 15). Após ele se homogeneizar com o precipitado, ele adquiriu uma nova coloração, parecendo com um branco opaco, como mostrado na figura a seguir (Figura 16).

Figura 15: Diluição do lodo em ácido sulfúrico em 10%.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

Figura 16: Diluição do lodo em ácido sulfúrico 10% homogeneizado.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

No segundo experimento, o precipitado em estado decantado apresentou uma coloração marrom-escura semelhante à cor do café (Figura 17). Após a homogeneização da mistura, a cor ficou alaranjada e barroca, conforme demonstrado na figura (Figura 18).

Figura 17: lodo após a titulação de tiosulfato de sódio.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

Figura 18: lodo após a titulação de tiosulfato de sódio homogeneizado.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

No terceiro experimento, a coloração do precipitado decantado apresentou uma coloração marrom-claro (Figura 19). Após a agitação, que resultou na

suspensão do precipitado na solução, observou-se uma tonalidade barroca de marrom, como é possível notar na interposição da figura (Figura 20).

Figura 19: Solução de lodo com tiosulfato de sódio.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

Figura 20: Solução de lodo com tiosulfato de sódio homogeneizado.



Fonte: Acervo pessoal, 2024.

Durante a titulação, a dosagem de tiosulfato de sódio foi cuidadosamente observada, com ênfase nas alterações de cor da solução da amostra, conforme ilustrado na figura seguinte (Figura 21). Após o término da titulação, foi registrado o volume exato de tiosulfato utilizado, diretamente na bureta, garantindo a precisão necessária para os cálculos subsequentes. Essa informação é crucial para determinar a concentração final da solução, uma vez que a relação estequiométrica entre o titulante e o analisador depende diretamente do volume exato empregado.

Figura 21: Primeiro experimento de Iodometria.

Fonte: Autores, 2024.

Adicionalmente, foi feita uma documentação visual do experimento, com fotografias que capturam as etapas críticas do processo, incluindo a variação de cor, para enriquecer a análise e validação dos resultados obtidos. A tabela a seguir apresenta os dados coletados e suas respectivas análises (Tabela 2). O cálculo foi realizado conforme a fórmula para cálculo da concentração molar, para se analisar e obter a concentração do cobre, porque tendo a concentração do titulante, massa molar e o volume, conseguimos encontrar a massa gasta presente na amostra analisada, por fim com uma simples regra de três para se encontrar a porcentagem do cobre.

Tabela 2: Resultados Obtidos da Iodometria.

Amostra de Resíduos	Concentração m/m (% de Cu)
MD Folheados	+/- 16,75%
Z & Z Folheados	+/- 14%
Galvânica A& Z	+/- 25%

Fonte: Acervo Pessoal, 2024.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cobre, metal fundamental para a indústria moderna, destacando-se por sua alta flexibilidade, condutividade elétrica e térmica, e ampla reciclabilidade. Sua demanda, impulsionada pela eletrificação e metas climáticas, cresce exponencialmente, tornando-o muito importante para o futuro energético. Apesar de suas propriedades protetoras e estéticas, que o tornam popular na fabricação de bijuterias, o cobre enfrenta um mercado volátil com preços elevados e projeções de déficit. A reciclagem emerge como solução crucial para equilibrar oferta e demanda, garantindo o abastecimento desse recurso essencial.

O principal objetivo deste estudo foi contribuir para a sustentabilidade da indústria de semijoias através da reutilização do cobre. Para isso, foi proposto um método para transformar o hidróxido de cobre presente em efluentes industriais em óxido de cobre (CuO), promovendo a economia circular e reduzindo a geração de resíduos. A pesquisa também avaliou a viabilidade econômica e os desafios do processo, buscando soluções para otimizar a recuperação do cobre e minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

Este estudo também aponta a importância do cobre na indústria e suas aplicações, especialmente em semijoias, devido à resistência, estética e propriedades protetoras conferidas pela galvanoplastia. Foi abordada a relevância de Limeira como polo produtivo de semijoias no Brasil, além do impacto ambiental dos resíduos galvânicos ricos em metais pesados, que exigem tratamento adequado para evitar contaminação. Métodos de reciclagem e extração, como a calcinação e iodometria, foram explorados como soluções para reutilizar o cobre, alinhando o estudo à busca por práticas mais sustentáveis. A metodologia empregada neste estudo envolveu a coleta de amostras de lodo proveniente de processos galvânicos em indústrias de bijuterias. Após a secagem, as amostras foram submetidas a um tratamento ácido para a solubilização dos metais. O cobre, por sua vez, foi precipitado na forma de hidróxido e, posteriormente, convertido em óxido de cobre por meio de calcinação. A quantificação do cobre presente nas amostras foi realizada por iodometria, técnica analítica que permitiu determinar a concentração desse metal com precisão. Todos os procedimentos foram conduzidos sob rigoroso controle para garantir a confiabilidade dos resultados.

A calcinação é um processo térmico utilizado para transformar compostos sólidos em óxidos, removendo impurezas e água. No caso da recuperação do cobre,

o hidróxido de cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) foi aquecido a temperaturas elevadas, entre $100\text{ }^\circ\text{C}$ e $500\text{ }^\circ\text{C}$, utilizando um maçarico. Durante esse processo, o hidróxido de cobre se decompôs, liberando água e formando óxido de cobre (CuO), um composto mais estável.

No tópico anterior, detalhamos as etapas realizadas para a recuperação de cobre do lodo galvânico, destacando os fenômenos observados e os desafios enfrentados. Adicionou-se ácido clorídrico (HCl), o lodo reagiu rapidamente, alterando sua coloração para amarelo-esverdeado devido à conversão de hidróxidos em cloretos, com o cobre, por ser menos solúvel, precipitando. Contudo, a separação enfrentou dificuldades com o papel filtro, sendo necessário utilizar um pano, o que se mostrou eficaz. Em seguida, ao adicionar hidróxido de sódio (NaOH), formou-se hidróxido de cobre em uma reação exotérmica, preparando o material para a calcinação, onde o hidróxido foi desidratado, formando óxido de cobre. A iodometria foi utilizada para quantificar o cobre nas amostras, mas a variação nos resultados indicou possíveis inconsistências no método. Embora o processo tenha se mostrado promissor, os resultados reforçam a necessidade de aprimorar os equipamentos utilizados e os parâmetros experimentais, visando maior reprodutibilidade e eficiência.

Sugerimos para trabalhos futuros a melhora da etapa de separação antes da calcinação. A utilização de métodos como precipitação seletiva ou troca iônica poderiam ser explorados para garantir que as impurezas metálicas sejam removidas de forma eficiente.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, Joana Deyse Lima. **Galvanoplastia e as bijuterias banhadas a ouro**. PET Química. Disponível em: <http://www.petquimica.ufc.br/galvanoplastia-e-as-bijuterias-banhadas-a-ouro/>. Acesso em: 03 Out. 2024.

ALVES, Lucas Campaner; SEO, Emília Satoshi Miyamaru. **Caracterização do resíduo sólido proveniente do processo galvânico para valoração econômica ambiental**. SciELO. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/dpQ9w3CWjTsfqdXmdTCRSgx/>. Acesso em: 07 Set. 2024.

ANDRADE, João Carlos de; ALVIM, Terezinha Ribeiro. **Química Analítica Básica: Aplicações dos fundamentos da análise qualitativa**. Minas Gerais: Rev. Chemkeys, 2019. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/view/9830>. Acesso em: 07 Set. 2024.

ANDRADE, Matheus. **Cobre fecha em queda após a renovação recente de recordes históricos**. Estadão E-Investidor. Disponível em: <https://einvestidor.estadao.com.br/ultimas/metais-cobre-fechamento-04-06-2024/>. Acesso em: 04 Set. 2024.

APRILE, Daniel. **O mundo está ficando sem cobre, por que este é o pior momento para isso acontecer?**. METEORED tempo.com. Disponível em: <https://www.tempo.com/noticias/actualidade/o-mundo-esta-ficando-sem-cobre-por-que-e-este-e-o-pior-momento-para-isso-acontecer.html>. Acesso em: 04 Set. 2024.

ARAÚJO, Pedro de. **Galvanoplastia (in)sustentável**. Portal TS. Disponível em: <https://www.portaltts.com.br/galvanoplastia-insustentavel>. Acesso em: 07 Set. 2024.

ATTWOOD, James. **Especialistas alertam para possível crise de cobre que frearia a economia global**. Bloomberg Línea. Disponível em: <https://www.bloomberglinea.com.br/2022/09/25/especialistas-alertam-para-possivel-crise-de-cobre-que-frearia-a-economia-global/#:~:text=Especialistas%20em%20commodities%20v%C3%AAm%20alertando,de%20caixa%20e%20congelando%20investimentos>. Acesso em: 04 Set. 2024.

BACCAN, Nivaldo *et al.* **QUÍMICA ANALÍTICA QUANTITATIVA ELEMENTAR**. São Paulo: Edgard Blucher; Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1979. **Calcination and Roasting**. BYJU'S. Disponível em: <https://byjus.com/chemistry/calcination-and-roasting/#:~:text=What%20is%20Calcination?,hydroxides%20to%20their%20respective%20oxides>. Acesso em: 08 Set. 2024.

BLOG GRUPO OPERSAN

CAMPOS, A. R. et al. **Calcinação**. In: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.16, p.727-752. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/handle/cetem/2186>. Acesso em: 08 Set. 2024.

CAMPOS, Mario Julio Avila. **Cádmio (Cd)**. Departamento de Microbiologia - USP. Disponível em:

http://www.icb.usp.br/bmm/mariojac/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=49&lang=br. Acesso em: 08 Set. 2024.

CETESB. **Cobre**. Disponível em:

chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cobre.pdf. Acesso em: 07 Set. 2024.

COLASSO, Camilla. **TOXICOLOGIA DO CÁDMIO: QUAIS OS CUIDADOS QUE VOCÊ DEVE TER?**. Chemical Risk. Disponível em:

<https://www.chemicalrisk.com.br/toxicologia-do-cadmio/>. Acesso em: 08 Set. 2024.

Grupo Operan. **CONHEÇA OS PRINCIPAIS MÉTODOS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES**. Disponível em:

<https://info.operan.com.br/tratamentos-de-efluentes-e-os-principais-metodos-utilizados#:~:text=O%20tratamento%20de%20efluentes%20%C3%A9,para%20outros%20fins%20n%C3%A3o%20pot%C3%A1veis>. Acesso em: 07 Set. 2024.

CUDENNEC, Yannick. **The transformation of Cu(OH)₂ into CuO, revisited**.

ScienceDirect. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1293255803002140>. Acesso em: 08 Set. 2024.

DINIZ, Dra. Larissa. **Intoxicação do Metal Pesado**. Dra. Larissa Diniz. Disponível em: <https://dralarissadiniz.com.br/intoxicacao-do-metal-pesado/>. Acesso em: 07 Set. 2024.

EC WILLIAMS. **Utilising the Benefits of Electroplating for a Range of Components**. Disponível em:

<https://www.ecwilliams.co.uk/electroplaters/#:~:text=Electroplating%20is%20most%20commonly%20used,as%20well%20as%20increased%20thickness>. Acesso em: 07 Set. 2024.

ELETROFIGOR. **Kit Maçarico Turbo Set 90 Com Cilindros Oxigênio Butano Mini Ppu**. Disponível em:

<https://www.eletrofrigor.com.br/produto/kit-macarico-turbo-set-90-com-cilindros-oxigenio-butano-mini-ppu-2583?srsId=AfmBOooVQkdYQN7uW6XMbM1Sgs9Qm58qmtfqpuWzE38QctLXxdW-XBbzEAM>. Acesso em: 25 nov. 2024

CLIMAINFO. **Escassez de cobre pode comprometer metas climáticas globais**.

Disponível em:

<https://climainfo.org.br/2022/07/14/escassez-de-cobre-pode-comprometer-metas-climaticas-globais/>. Acesso em: 04 Set. 2024.

CETESB. **Estanho**. Disponível em:

chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/10/Estanho.pdf. Acesso em: 08 Set. 2024.

SIGMA-ALDRICH. **FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA**. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sites.ffclrp.usp.br/cipa/fisq/Nitrato%20de%20prata.pdf>. Acesso em: 08 Set. 2024.

FOCO INDUCTION. **Como fundir cobre**: Diferentes formas e passos. Disponível em: <https://www.focoinduction.com/pt-br/como-fundir-cobre-diferentes-formas-e-passos/#:~:text=Colocar%20peda%C3%A7os%20de%20sucata%20de,emergem%20no%20to po%20da%20mistura>. Acesso em: 02 Out. 2024.

FORTE, Cristiane Maria Sampaio; PACHECO, Luisa Célia Melo; QUEIROZ, Zilvanir Fernandes de. **Química Analítica I**. Fortaleza - Ceará: EdUece, 2019.

FRIGELAR. **Maçaricos para Solda**: Tipos, Usos e Dicas de Segurança. Disponível em: <https://blog.frigelar.com.br/macaricos-para-solda/#:~:text=O%20ma%C3%A7arico%20para%20solda%20%C3%A9,aplica%C3%A7%C3%B5es%2C%20desde%20soldagem%20at%C3%A9%20culin%C3%A1ria>. Acesso em: 21 nov. 2024.

RAPID DIRECT. **GALVANOPLASTIA DE COBRE: COMO FUNCIONA E SUAS APLICAÇÕES COMUNS**. Disponível em: <https://www.rapiddirect.com/pt/blog/copper-electroplating/#:~:text=%C3%BAtil%20da%20pe%C3%A7a,-,Excelente%20prote%C3%A7%C3%A3o%20contra%20corros%C3%A3o,vi%C3%A1vel%20para%20muitas%20aplica%C3%A7%C3%B5es%20regulares>. Acesso em: 03 Set. 2024.

HIGHETT METALS. **How To Melt Copper Wire**. Disponível em: <https://www.highettmetal.com.au/blog/copper/how-to-melt-copper-wire/#:~:text=Take%20your%20blowtorch%20with%20a,copper%20wire%20you%20prepared%20earlier>. Acesso em: 02 Out. 2024.

JÚNIOR, José Eduardo Heflinger. LIMEIRA CAPITAL NACIONAL DA JÓIA FOLHEADA VOLUME 1

KIMAIYO, Bernard. **History of Galvanic Cell**. Academia.edu. Disponível em: https://www.academia.edu/37865653/History_of_Galvanic_Cell. Acesso em: 07 Set. 2024.

KLABACHER. Sabrina Santana. **As temperaturas da chama do maçarico e os pontos de fusão de diferentes materiais**. Oito Metais. Disponível em: <http://www.8metais.com.br/as-temperaturas-da-chama-do-macarico-e-os-pontos-de-fuso-de-diferentes-materiais/>. Acesso em: 02 Out. 2024.

MACHADO, Anderson Wolf. **Níquel nas plantas - tudo o que você precisa saber**. AGROLINK. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes/niquel-nas-plantas---tudo-o-que-voc%C3%A9-precisa-saber_469444.html. Acesso em: 08 Set. 2024.

MAKE, Minerals Life. **The Importance of Copper for Modern Life**. Disponível em: <https://mineralsmakelife.org/blog/the-importance-of-copper-for-modern-life/>. Acesso em: 03 Set. 2024.

METALS, Rotax. **Copper and Brass Sales: Importance of Soldering in Jewelry Making.** Rotax Metals. Disponível em: <https://rotaxmetals.net/copper-and-brass-sales-importance-of-soldering-in-jewelry-making/>. Acesso em: 03 Set. 2024.

MYMRIN, Vsévolod; CANFIELD, Simone Borgo; PONTE, A. Haroldo. **Resíduos de Processos Galvânicos como Principais Componentes da Produção de Cerâmica Vermelha. Cerâmica Industrial.** Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876572d7f8c9d6e028b470b/pdf/ci-11-5-5876572d7f8c9d6e028b470b.pdf>. Acesso em: 07 Set. 2024.

MOREIRA, Tatiane Ribas. **CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO DE LODOS GALVÂNICOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA.** IFBA. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://portal.ifba.edu.br/salvador/ensino/cursos/superior/graduacao/engenharia-quimica/documentos/TC/2021/tcc_tatiane_ribas_final.pdf. Acesso em: 07 Set. 2024.

LABORANÁLISE. **Níquel.** Disponível em: <http://www.laboranalise.com.br/niquel/>. Acesso em: 05 Set. 2024.

NOVAIS, Stéfano Araújo. **Estanho (Sn).** Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/estanho.htm>. Acesso em: 07 Set. 2024.

PORTO, Rafael Vianna; PAIM, Thiago Moita; SOARES, Verônica Martins. **CAPACIDADE CITOTÓXICA DA PRATA COLOIDAL EM CÉLULAS DE FÍGADO.** Portal Unicamp. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2022P20748A37829O379.pdf>. Acesso em: 08 Set. 2024.

CICLO LIGAS. **Reciclagem de alumínio e cobre: quais são as vantagens?** Disponível em: <https://www.cicloligas.com.br/blog/reciclagem-de-aluminio-e-cobre/reciclagem-de-aluminio-e-cobre-quais-sao-as-vantagens/>. Acesso em: 05 Set. 2024.

FASTERCAPITAL. **Reciclagem de cobre a sustentabilidade atende a lucratividade.** Disponível em: <https://fastercapital.com/pt/contente/Reciclagem-de-cobre--a-sustentabilidade-atende-a-lucratividade.html#Compreendendo-os-beneficios-ambientais-da-reciclagem-de-cobre>. Acesso em: 05 Set. 2024.

REIS, Manuel. **Metais pesados:** o que são e sintomas de intoxicação. Tua Saúde. Disponível em: <https://www.tuasaude.com/principais-sintomas-de-contaminacao-por-metais-pesados/>. Acesso em: 07 Set. 2024.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 237, de 19 de dezembro de 1997.** Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0237-191297.PDF>. Acesso em: 07 Set. 2024.

RODRIGUES, Márcio da Silva. **Cobre como elemento chave da reciclagem consciente**. CIMM. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/artigos/23036-cobre-elemento-chave-reciclagem-consciente>. Acesso em: 05 Set. 2024.

SALES, Nadja Maria de Vasconcelos. **Fundamentos de Química Analítica Quantitativa**. Fortaleza - Ceará: EdUece, 2019.

SHAN, Lee Ying. **There isn't enough copper in the world — and the shortage could last till 2030**. CNBC. Disponível em: <https://www.cnbc.com/2023/02/07/there-isnt-enough-copper-in-the-world-shortage-could-last-until-2030.html>. Acesso em: 04 Set. 2024.

TOCCHETTO, Marta Regina Lopes *et al.* **INDICADORES DE IMPACTOS COMO INSTRUMENTO DE GESTÃO AMBIENTAL EM EMPRESAS GALVÂNICAS, RS**. alice Embrapa. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1078208>. Acesso em: 07 Set. 2024.

FRANCO GALVÂNICA. **Você sabe qual é a capital das semijoias? Conheça a cidade!**. Disponível em: <https://francogalvanica.com.br/capital-das-semijoias/#:~:text=Limeira%20%C3%A9%20conhecida%20como%20a,%2C%20em%20especial%2C%20para%20revender>. Acesso em: 07 Set. 2024

VOGEL, A. I. **Química analítica qualitativa**. São Paulo: Mestre Jou, 1981.