UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
VERDI DE CESARO NETO

PURIFICAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE METAIS PRECIOSOS EM UMA OFICINA DE JOIAS

Tubarão
2019

VERDI DE CESARO NETO

PURIFICAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE METAIS PRECIOSOS EM UMA OFICINA DE JOIAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Jair Juarez João, Dr.

Tubarão

2019

VERDI DE CESARO NETO

PURIFICAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE METAIS PRECIOSOS EM UMA OFICINA DE JOIAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 29 de novembro de 2019.

Prof. Dr. Jair Juarez João (Orientador)
Universidade do Sul de Santa Catarina

Profª. Dra. Suzana Cimara Batista (Avaliadora)
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. MSc. César Renato Alves da Rosa (Avaliador)
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais Maria e Paulino, minha namorada Kalinka e meu tio João Gabriel que me apoiaram em toda atrajetória para que mais um conquista fosse realizada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me dado saúde e forças para enfrentar esta jornada.

A minha família, principalmente meus pais Maria Elizabeth e Paulino, que sempre me apoiaram e oportunizaram para que este sonho pudesse realizado.

Ao meu tio João Gabriel, por acreditar e insistir para que concluísse mais esta etapa.

A minha namorada Kalinka, por toda a compreensão e apoio nos momentos de ausência para realização deste trabalho.

Aos meus colegas de faculdade por todo o companheirismo e auxílio em cada etapa.

Ao meu professor orientador Jair Juarez João, por compartilhar seu conhecimento e depositar sua confiança na realização deste trabalho.

A todos os professores, que me proporcionaram o conhecimento em toda trajetória acadêmica, em especial ao professor Gilson Rocha Reynaldo por agregar a este trabalho toda a sua experiência na realização e publicação de trabalhos de conclusão de curso e aos responsáveis pelas análises de laboratório Cíntia e Elias por auxiliar nos resultados da realização do projeto.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, em especial Matheus Stürmer por concederem a realização do estágio, no qual deu-se origem ao presente trabalho.

E por fim, a Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL) pela oportunidade de fazer o curso.

- “Não vai ser fácil, mas vai valer a pena.” (GERAÇÃO DE VALOR).

RESUMO

Metais preciosos como o ouro, a prata, a platina, o paládio e o ródio são muito empregados no ramo de fabricação de joias, sendo misturados com outros metais para lhe conferir maior dureza e cor. Se tratando de metais de valor sua recuperação se torna importante para o ramo sendo um assunto pouco abordado. O objetivo do estudo é purificar **metais nobres** (ouro e prata) provenientes de oficina de joias, sendo assim, o estudo buscou avaliar os métodos existentes e evidenciar o tratamento dos resíduos gerados. O estudo aborda desde os processos de fabricação de joias até a **purificação** dos metais e resíduos. A água-régia se mostrou ser o método mais viável levando em consideração diversos fatores, sendo econômicos, de pureza e quantidade. Os efluentes gerados neste processo são de origem ácida necessitando de uma neutralização. O sistema proposto contou com uma eficiência de 90,55% e demonstrou ser viável economicamente, em contra partida para atender a Legislação do CONAMA n°430/11 para resíduos líquidos e a norma NBR 10004 para resíduos sólidos é necessário um estudo mais aprofundado.

Palavras-chave: Metais preciosos, Metais nobres, Purificação.

ABSTRACT

Precious metals such as gold, silver, platinum, palladium and rhodium are widely used in jewelry making and are mixed with other metals to give it more hardness and color. When it comes to value metals, its recovery becomes important for the industry and it is a little addressed subject. The objective of the study is to purify **noble metals** (gold and silver) from a jewelry workshop, thus, the study sought to evaluate the existing methods and highlight the treatment of the generated residues. The study covers everything from jewelry making processes to metal and waste **purification**. The royal water proved to be the most viable method taking into consideration several factors, being economic, purity and quantity. The effluents generated in this process are of acid origin requiring neutralization. The proposed system had an efficiency of 90.55% and proved to be economically viable, in return to comply with CONAMA Legislation No. 430/11 for liquid waste and the NBR 10004 standard for solid waste further study is required.

Keywords: Purification, Noble metals, Precious metals.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bancada de ourives 24
Figura 2 – Banca de polimento..... 24
Figura 3 – Mesa de Fundição 25
Figura 4 – Processo de fundição com maçarico de oxigênio 26
Figura 5 – Cadinho usado na fundição de metais com resíduos metálicos 26
Figura 6 – Broca serra copo de aço carbono. 27
Figura 7 - Moinho automático 28
Figura 8 – Moinho manual 28
Figura 9 – Laminadores 29
Figura 10 – Processo de trefilação..... 30
Figura 11 – Partículas retidas na bancada de ourives 31
Figura 12 – Tipos de cravação..... 32
Figura 13 – Pó retido pela banca de polimento. 33
Figura 14 – Triturador de metais Hidrometal 47
Figura 15 – Amostra de resíduos de oficina de joias 56
Figura 16 – Amostra após a incineração 56
Figura 17 – Filtro com prata e resíduos orgânicos 58
Figura 18 – Filtro com precipitado de ouro..... 60
Figura 19 – Prata pura após sua fundição 61
Figura 20 – Ouro puro após sua fundição 62
Figura 21 – Solução proveniente da reação de purificação..... 63
Figura 22 – Neutralização dos resíduos 64
Figura 23 – Filtro com o sal proveniente da neutralização 65
Figura 24 – Solução resultante da filtração..... 65
Figura 25 – Líquido recuperado ao fim do processo. 66
Figura 26 – Teste de ouro utilizado na joalheria 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ligas de ouro (em milésimas) 17
Tabela 2 – Diferenças na propriedade da prata 18
Tabela 3 – Diferente ligas de ouro branco (em milésimas) 19
Tabela 4 – Comparação entre quilate e milésima para o ouro..... 23
Tabela 5 – Percentual de remoção dos metais base ao se empregar o método pirometalúrgico. 40
Tabela 6 – Comparativo entre os métodos de refino de ouro. 40
Tabela 7 – Condições de lançamentos de efluentes de acordo com a Resolução n°430 de 2011. 50
Tabela 8 – Parâmetros de lançamento de efluentes de acordo com a Resolução n°430 de 2011. 51
Tabela 9 – Resultados obtidos da purificação 68
Tabela 10 – Escala de cores para teste de metais..... 70
Tabela 11 – Apresentação dos resultados dos parâmetros analisados da água recuperada..... 71
Tabela 12 – Resultado da espectrofotometria de absorção de chama para o resíduo líquido .. 71
Tabela 13 – Resultado da espectrofotometria de absorção de chama para o resíduo sólido 72
Tabela 14 – Lista de materiais e equipamentos 73
Tabela 15 – Lista de reagentes 74
Tabela 16 – Custo e valor recuperado em um processo 74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
JUSTIFICATIVA E PROBLEMA 14
OBJETIVOS 14
Objetivo Geral 14
Objetivos específicos 15
RELEVÂNCIA SOCIAL E CIENTÍFICA DA PESQUISA 15
2 REVISÃO DE LITERATURA 16
PROPRIEDADES E UTILIZAÇÃO DOS METAIS NA OURIVESARIA 16
Ouro 16
Prata 17
Grupo da platina 18
Platina 18
Paládio 19
Ródio 20
Metais não preciosos na joalheria 20
Cobre 20
Cádmio 21
Níquel 21
Zinco 22
Unidade de medida 22
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE JOIAS 23
Local de Trabalho 23
Bancada de ourives 24
Bancada de polimento 24
Bancada de Fundição 25
Fundição 26
Laminação 29
Trefilação 29
Modelagem 30
Solda 31
Acabamento 32
Cravação e Gravação 32

Polimento **33**
MÉTODOS DE REFINO DO OURO 34
Copelação **34**
Inquartação e divisão **35**
Método de cloração de Miller **36**
Método eletrolítico de Wohlwill **36**
Célula de Fizzer **37**
Extração por solvente **37**
Método com água-régia **38**
Processo pirometalúrgico **39**
Escolha do método para refino do ouro **40**
MÉTODOS DE REFINO DA PRATA 41
Cloreto de prata da água-régia **42**
Redução da prata com Dextrose ($C_6H_{12}O_6$) **42**
REFINO DA PLATINA 43
REFINO DO PALÁDIO 43
REFINO DO COBRE 44
Método de precipitação e eletrolítico **44**
MÉTODO DE ESCOLHA PARA RECUPERAÇÃO DOS RESÍDUOS 45
Incineração **46**
Seleção **47**
Trituração **47**
Retirada do ferro e lavagem **48**
Dissolução em água régia **48**
Filtração **49**
Precipitado **49**
Fundição **49**
TRATAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS (SÓLIDOS E LÍQUIDOS) 50
Resíduo líquido **50**
Resíduo Sólido **52**
3 MATERIAIS E MÉTODOS **54**
A INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA 54
PROCESSO DE SEPERAÇÃO E PURIFICAÇÃO 55
Purificação dos metais **55**

Preparo da amostra 55
Incineração 56
Dissolução em água-régia 57
Filtração do ouro 60
Fundição 61
Tratamento dos resíduos 63
Neutralização do ácido 63
Filtro de carvão ativado 66
Análise da água recuperada 67
Análise do sólido retido no filtro 67
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 68
PURIFICAÇÃO 68
Características do ouro recuperado 69
Características da prata recuperada 70
TRATAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS 70
Resíduo líquido 70
Classificação de Resíduo Sólido 72
VIABILIDADE 73
5 CONCLUSÃO 76
REFERÊNCIAS 77

1 INTRODUÇÃO

Metais preciosos como o ouro, a prata, a platina, o paládio e o ródio são muito empregados no ramo de fabricação de joias, sendo misturados com outros metais para lhe conferir maior dureza e cor. Estes metais preciosos são escassos na natureza e conforme a sua exploração aumente com o passar dos anos a sua proporção diminui em comparação com a oferta disponível. Por este motivo o preço tem se elevado com o passar dos anos, sendo assim, a purificação de metais nobres tem se tornado cada vez mais importante e merece atenção para que se faça da maneira certa, pois é um processo bastante agressivo dependendo da metodologia aplicada.

Para que uma empresa seja competitiva em sua área de atuação é necessário inovar, manter-se lucrativa e mais sustentável. A produção de joias requer um controle da produção, pois uma quantia mínima desperdiçada gera um prejuízo considerável. Adicionado o alto custo da matéria prima e com seu aumento com o passar do tempo a implantação deste processo ou fornecer este tipo de serviço se torna importante e cada vez mais necessário.

O refino de metais nobres é de extrema importância, pois permite alcançar uma elevada pureza e auxilia a minimizar perdas no processo produtivo de fabricação de joias, que possui várias etapas até chegar no produto final. A pesquisa abordará as possíveis formas de recuperar os metais nobres e buscar alternativas para minimizar os resíduos provenientes do processo de purificação dos mesmos, sendo necessário o tratamento de efluentes como ácidos, bases e metais pesados que não podem ser despejados de qualquer maneira devido a sua agressão ao meio ambiente.

O ambiente de trabalho de um ourives deve ser limpo e necessita de bancadas específicas para realizar seu trabalho pensando na retenção completa dos metais trabalhados, ou seja, este profissional deve ter conhecimento dos processos e da importância econômica e ambiental no longo prazo.

Existem diversos processos que envolvem a purificação de metais preciosos, mas a metodologia foi escolhida de acordo com a amostra considerando fatores econômicos e recursos disponíveis. Os resíduos encontram-se na forma pó e limalhas, restos de lixas e pedaços de metais, sendo necessária sua preparação prévia para posterior dissolução em água régia, com o objetivo de separa-los por precipitação química com um agente redutor.

Os resultados desta pesquisa direcionam a pesquisas futuras no que se refere a melhora do processo de purificação e tratamento dos resíduos recuperando outros metais de

menor valor e tendo a oportunidade de expandir-se a áreas distintas como a recuperação de sucatas eletrônicas, banhos de galvanoplastia, objetos banhados, fixador fotográfico, lamas cianídricas, chapas de raio X e catalisador automotivo.

JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Os metais nobres ao longo da história são materiais desejados devido a suas propriedades físicas e químicas, e seu alto valor econômico. Na joalheria os metais mais utilizados são o ouro e a prata, que por serem maleáveis necessitam ser misturados com outros metais para que aumente sua resistência e dureza, assim surge a medida utilizada no ramo, o quilate, que tem o objetivo de medir a pureza do metal. Os metais que são utilizados são de maior dureza e resistência, são eles o cobre, o zinco, o paládio, o níquel e a própria prata no caso de misturar-se com o ouro.

No mercado de joias, conseguir a matéria prima a um baixo custo é bastante difícil. Cabe recorrer a compra do material de pessoas que precisam de dinheiro e aceitam receber um valor menor, ou investir em um processo de recuperação praticando a purificação dos mesmos, podendo atender a região que necessita, assim como a empresa atualmente e como forma de pagamento ficar com parte dos metais recuperados.

O processo envolve um baixo consumo de produtos químicos e um elevado grau de pureza do metal como resultado. Assim, o objetivo do presente trabalho é fazer a recuperação dos metais preciosos, como platina, ouro, prata e paládio, onde podem estar presentes metais que não estão entre os desejados como ferro, cobre, cádmio, estanho, entre outros.

Desse modo, pergunta-se: **como recuperar e purificar metais preciosos com simultâneo controle dos efluentes gerados, em uma joalheria, através de investigação realizada no ano de 2019 na cidade de Tubarão, sul de Santa Catarina.**

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Purificar e recuperar metais preciosos em uma oficina de joias, enfatizando o melhor aproveitamento do processo e da quantidade de resíduos gerados, apontando as vantagens em purificar do ponto de vista financeiro e ambiental.

Objetivos específicos

a) Definir o processo a ser utilizado;
b) Elencar todos os equipamentos e reagentes necessários;
c) Descrever as variáveis do processo;
d) Analisar os resultados obtidos;
e) Identificar os resíduos gerados após a purificação dos metais;
f) Descrever o processo de recuperação adotado;
g) Determinar a viabilidade econômica do processo em questão.

RELEVÂNCIA SOCIAL E CIENTÍFICA DA PESQUISA

Qualquer pesquisa, para ter relevância social e científica necessita de sistematização, ou seja, para garantir seu compromisso social o estudo precisa contribuir para a melhoria de um processo ou produto ou propor uma solução para um problema, que por fim trará melhorias para a sociedade.

Investigar cientificamente é ir afundo em um determinado assunto e definir qual a melhor forma de pôr em prática o que se estudou. Este projeto propõe-se a adicionar um processo que não é utilizado na empresa em questão com o objetivo de aumentar sua área de atuação no ramo joalheiro, mas com a visão de recuperar a matéria prima e otimizar o tratamento dos efluentes gerados.

O estudo é de caráter socioambiental no que se refere a importância de otimizar o processo devido a sua escassez e valor agregado alto unindo com a preocupação evidente com o meio ambiente, sendo este, um assunto cada vez mais abordado e importante para mudarmos o modo insustentável de vida atual. O conceito sustentável leva a reflexão teórica de um caminho longo e necessário de trabalho para a transformação econômica e social para que se torne realidade.

Quando o assunto é resíduos gerados vem à tona a questão social, pois afeta a todos em geral e é um dos problemas mais comuns no ramo, pois preocupa-se muito com o maior percentual de material recuperado pelo seu valor agregado e é deixado um pouco de lado o resto do processo que inclui resíduos como metais pesados e ácidos, que são poluidores do meio ambiente. Por si está definida então a relevância social deste estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O mercado mundial de joias, semijoias e bijuterias tem crescido a cada ano. Estimativas e estudos realizados apontam que em 2014 foram vendidos 148 bilhões de dólares em vendas e segundo o relatório da McKinsey Global Institute, estimasse que as vendas anuais chegarão a 250 bilhões até 2020.

O Brasil atualmente é o 12° maior produtor de ouro no mundo e 22° em fabricação de joias. Em 2018, a indústria joalheira no Brasil consumiu 5% a mais de ouro, indicando maior produção. A combinação desses fatores: crescimento na exportações, aumento na produção de joias e ampliação das vendas no varejo, apontam para recuperação do setor. (IBGM, 2018).

Outro fator importante a ser mencionado é que as empresas brasileiras do setor joalheiro estão inseridas na cadeia produtiva de Gemas e Joias que representa um sistema de atividades que engloba desde a extração da matéria-prima, a lapidação de pedras, a transformação em produtos e a sua comercialização. (DOMINGUES; PAULINO, 2009).

O Banco Central, através da Resolução no 4327/14, estabeleceu Políticas de Responsabilidade Socioambiental (PRSA) que devem ser observadas nos estabelecimentos, processos e produtos das instituições financeiras sob sua supervisão, mostrando com isso uma evolução da instituição e a preocupação com os impactos ambientais. (BCB, 2014).

PROPRIEDADES E UTILIZAÇÃO DOS METAIS NA OURIVESARIA

Os metais preciosos desde os tempos mais antigos despertou o interesse do homem, e por sua causa desencadearam-se guerras e levantaram-se cidades e, até hoje, o seu poder continua vigente. Todos os metais que nos rodeiam tem uma composição molecular, uma propriedade física que o diferencia dos outros metais. Os metais que se trabalha em joalheria (ouro, prata, platina e paládio) normalmente não são puros, são feitas ligas para que suas propriedades atendam as expectativas do mercado, sendo que os metais de menor valor agregado também são utilizados (cobre, níquel, cádmio e zinco).

Ouro

O ouro é um metal que em sua forma pura é extremamente macio, e por esta característica na ourivesaria ele é utilizado normalmente misturados com outros metais como o cobre e a prata, fazendo com que ele mude para uma característica mais dura, para que se possa

molda-lo sem provocar alterações nas suas características. A (Tabela 1) são mostrados as ligas de ouro usuais misturadas com cobre e prata.

Tabela 1 – Ligas de ouro (em milésimas).

Ligação de ouro amarelo	Metal	Em milésimas	Percentagem
Ouro verde	Ouro fino	750	100%
	Prata	187	25%
	Cobre	62	8%
Ouro palha	Ouro fino	750	100%
	Prata	125	16,65%
	Cobre	125	16,65%
Ouro vermelho	Ouro fino	750	100%
	Prata	62	8%
	Cobre	187	25%

Fonte: adaptado de Codina, 2000.

> O ouro é um metal pesado com sua característica cor amarela. Em forma pulverizada, é marrom avermelhado. Funde a 1064,8ºC. O ouro é resistente a ácidos; só a água-régia pode dissolvê-lo, formando os ânions tetracloroaurato (III), $[AuCl_4]^-$. O ouro dissolve-se lentamente em cianeto de potássio, formando os aníons dicianoaurato (I), $[Au(CN)_2]^-$. Partindo tanto de suas formas monovalente com trivalente, o ouro pode ser facilmente reduzido a metal. Os compostos de ouro (I) são os menos estáveis que os de ouro (III). (VOGEL, 1981, p.562).

O ouro é um metal simbólico que nos leva a caracteriza-lo como sinônimo de valor, riqueza, realeza desde tempos antigos. Atualmente ele é utilizado de forma geral em joalherias, industrias e em eletrônicos por sua boa condutividade elétrica, resistência a corrosão, exercendo funções em computadores, celulares e até em naves espaciais e em motores de reação na aviação.

Prata

A prata é um metal maleável assim como o ouro no seu estado puro, normalmente é ligado com o cobre para lhe conferir maior dureza. Sua ocorrência é na forma de grãos ou pepitas e por possuir as características de maleabilidade e cor brilhante quando polida é empregada em grande quantidade na joalheria e com um valor agregado menor que o ouro. Sua composição nas joias normalmente é diferente do ouro ele é ligado na proporção de 925 milésimas e 75 partes de liga, isto se dá porque a prata adquire uma maior dureza e resistência

com menor quantidade de liga e também por se tornar mais oxidável, sendo que para joalheria perderia seu brilho facilmente. A prata ligada tende a mudar seu ponto de fusão e densidade (Tabela 2).

Tabela 2 – Diferenças na propriedade da prata.

	Prata	
	Ponto de Fusão	**Densidade**
Prata fina	960°C	10,5g/cm³
Prata 925	893°C	10,4g/cm³

Fonte: adaptado de Codina, 2000.

> A prata é um metal branco, maleável e dúctil. Apresenta um elevado peso específico (10,5 $g.m^{-1}$) e funde a 960,5ºC. É insolúvel em ácido clorídrico, sulfúrico diluído (M) e nítrico diluído (2M). Dissolve-se em ácidos mais concentrados, tais como: ácido nítrico (8M) ou em ácido sulfúrico concentrado a quente. (VOGEL, 1981, p.227).

As pessoas quem tem joias de prata normalmente reclamam que ela com o tempo escurece, isso se dá devido a sua oxidação, formando sulfeto de prata em contato com ozônio, gás sulfídrico ou ar com enxofre. O ácido úrico em alto nível no organismo, pode sim interferir no brilho da peça mas não é o principal agente.

Grupo da platina

Os metais do grupo platina (MGP) são formados por seis metais, a platina (Pt), o paládio (Pd), o ródio (Rh), o irídio (Ir) e o ósmio (Os). São pouco abundantes na natureza e muitos deles tem grande aplicação devido suas características, por estes motivo são raros e valiosos. Na joalheria os três utilizados são a platina, o paládio e o ródio, normalmente para formação de ligas como o ouro branco e para a galvanoplastia, sendo usado no banho de joias e semijoias.

Platina

A platina é um elemento do grupo 10 da tabela periódica, de cor prata branqueada e é um metal de transição. Algumas de suas características são sua resistência a corrosão e baixa reatividade. É um metal nobre, não atacado por ácidos diluídos ou concentrados, exceto água

régia que dissolve a platina, formando íons hexacloroplatinato (IV). (VOGEL, 1981, p.562). É encontrada na forma de pepitas ou grânulos na natureza e sua escassez é notória até mesmo nos países produtores de relativa importância. Na joalheria tem grande aplicação, sendo utilizada na confecção de joias, muitas vezes mesclando a peça com ouro amarelo e alguns a utilizam para formações de ligas tendo como resultado o ouro branco, nome usualmente dado no ramo de joias.

Paládio

O paládio é um metal de cor prata branqueada, assim como a platina porém mais duro e menos dúctil. Este metal tem muito interesse comercial, pois é aplicado como um componente essencial de conversores catalíticos reduzindo a emissão de monóxido de carbono dos automóveis. Na joalheria é utilizado para formação de ligas como o ouro branco.

> O paládio é um metal cinza-claro que funde a 1555ºC. Sua característica física mais interessante é que ele é capaz de dissolver (absorver) hidrogênio gasoso em grandes quantidades. De modo diferente que a platina, o paládio é lentamente dissolvido por ácido nítrico concentrado e por ácido sulfúrico concentrado a quente, formando uma solução marrom de íons paládio (II). O paládio também pode ser dissolvido primeiro por fusão do metal com pirossulfato de potássio e depois por lixiviação da fusão solidificada com água. O metal dissolve-se facilmente em água régia. (VOGEL, 1981, p.564).

O ouro branco tal como acontece com o ouro amarelo ele é proveniente de uma mistura normalmente com outros metais como o paládio, prata e cobre. A (Tabela 3) demonstra diferentes ligas de ouro branco paladiado.

Tabela 3 – Diferente ligas de ouro branco (em milésimas).

Ouro	Paládio	Prata	Cobre
750	125	125	-
750	80	125	45
750	200	50	-
750	250	-	-

Fonte: adaptado de Codina, 2000.

Ródio

Está situado no grupo 9 da tabela periódica, é um metal dúctil que apresenta um ponto de fusão maior que o da platina, aproximadamente 1964ºC. Sua dissolução ocorre somente com água régia ou ácido sulfúrico concentrado. O ródio é um dos elementos de ocorrência natural menos abundantes na terra, sendo encontrado em quantidades muito pequenas como metal livre. (WELLER, 2017, p. 506).

O ródio na joalheria tem seu uso mais para banhos eletrolíticos por ser um metal com uma cor branco prateado, com uma ótima reflexão da luz, sendo que previne possíveis manchas e arranhões a peça. O ouro branco possui um tom amarelo pálido e, por isso, dá-se-lhe habitualmente um banho eletrolítico de ródio depois de ter sido polido. (CODINA, 2000, p.19).

Metais não preciosos na joalheria

Os metais não preciosos mais utilizados no ramo joalheiro são formados por quatro metais, o cobre, o cádmio, níquel e o zinco. São empregados normalmente para formar ligas, pois podem produzir algum tipo de alergia e também por não ter a característica de manter o brilho, uma vez que se oxidam, criam manchas na peça.

Cobre

O cobre é um elemento químico pertencente ao grupo 11 da tabela periódica e é um dos metais mais importantes industrialmente, sendo muito utilizado na área da eletricidade. Ele junto ao estanho cria uma liga muito conhecida como bronze.

> O cobre é um metal vermelho-pálido. Macio, maleável e dúctil. Funde a 1038ºC. Devido a seu potencial de eletrodo padrão ser positivo (+ 0,34V para o par Cu/Cu^{2+}), é insolúvel em ácido clorídrico e ácido sulfúrico diluído, embora na presença do oxigênio possa ocorrer alguma solubilização. O ácido nítrico, medianamente concentrado (8M), dissolve rapidamente o cobre. (VOGEL, 1981, p.239).

O cobre na joalheria é utilizado principalmente para conferir dureza e resistência a metais como o ouro e a prata, e tem características que favorecem o trabalho com ferramentas manuais. Ele não é tão usual como joia porque com o tempo ele tende a oxidar e é por este

motivo que ele é ligado com metais de maior valor, pois sua combinação resulta em uma liga que atende os requisitos para a joalheria.

Cádmio

O cádmio é um dos metais mais tóxicos, mesmo em concentrações muito pequenas. Está situado no grupo 12 da tabela periódica, sendo um metal de transição. Na joalheria é muito pouco utilizado, sendo necessário em raros casos onde se necessita fazer algum trabalho específico, onde se adiciona uma pequena quantidade na liga de prata e cobre.

> Em alguns casos, por exemplo para embutir ou para tornear, se lhe possa acrescentar uma pequena porção de cádmio (2,5 milésimas). Este deve ser vertido para o crisol envolto em papel de fumar, sempre e quando o cobre e a prata estiverem já fundidos. Caso contrário, perder-se-á propriedades na liga, uma vez que o cádmio oxida rapidamente e se volatiza. (CODINA, 2000, p. 17).

Há também sua utilização na fabricação de bijuterias, sendo que de acordo com o instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia (INMETRO) estabeleceu-se limites para a presença de metais pesados, como cádmio e chumbo, para fabricação e importação de bijuterias e joias. As concentrações máximas dos metais são respectivamente 0,01% de cádmio em contato com o corpo e 0,03% de chumbo.

Níquel

O níquel é um metal de transição presente no grupo 10 da tabela periódica, sendo utilizado na joalheria principalmente na formação de ligas, pois por mais que ele seja dúctil e maleável não pode ser laminado e é dificilmente polido e em contato com a pele pode causar alergias.

> O níquel é um metal duro, branco, prateado, dúctil, maleável e muito tenaz. Funde a 1455°C. É ligeiramente magnético. O ácido clorídrico (diluído e/ou concentrado) e o ácido sulfúrico diluído dissolvem o níquel com a formação de hidrogênio. (VOGEL, 1981, p.291).

Utilizado bastante na confecção de bijuterias por ser um ótimo condutor facilitando o banho eletrolítico e pelo seu preço atrativo, sendo muito mais barato que o cobre. Atualmente

tem perdido mercado sendo substituído por outros metais, justamente por poder reagir em contato com a pele.

Zinco

O zinco é um metal pesado tóxico do grupo 12 da tabela periódica que na presença de umidade forma uma camada superficial de óxido que o protege da corrosão. Sua utilização na joalheria é para formar uma liga chamada de latão (liga de cobre e zinco) que é utilizado para fazer bijuterias.

> O zinco é um metal branco azulado, moderadamente maleável e dúctil a 110-150°C. Funde a 410°C e seu ponto de ebulição é 906°C. O metal puro dissolve-se muito lentamente em ácidos e em álcalis; a presença de impurezas ou em contato com a platina ou cobre, produzidas pela adição de algumas gotas das soluções de sais destes metais, acelera a reação. Isto explica a solubilidade do zinco comercial. Este se dissolve facilmente em ácido clorídrico e em ácido sulfúrico, com liberação de hidrogênio. (VOGEL, 1981, p.300).

É utilizado na formação de ligas com ouro e prata, modificando a coloração que nas devidas proporções é chamado de Ouro azul e é muito empregado na joalheria por manter a cor original após o uso prolongado da joia.

Unidade de medida

A necessidade de uma unidade de medida para classificação da pureza de um metal ocorreu devido estes possuírem características que quando puro, por exemplo, o ouro é muito maleável e para atender à necessidade dos trabalhos de joalheria é necessário liga-lo com um outro metal como a prata, o cobre ou paládio, de modo a lhe conferir uma maior resistência ou até modificar sua coloração.

> O título do metal indica a sua pureza, que pode ser expressa em quilates ou em milésimas. Estes dois termos constituem unidades de medida que indicam o título do metal. O título 18 quilates indica que, de 24 partes, 18 são de ouro fino e as restantes 6 são de ligas. Estes 18 quilates podem ser expressos em milésimas, unidade de medida muito mais precisa e profissional: o ouro de18 quilates é ouro de 750 milésimas, pois contém 750 partes de ouro fino e 250 partes de liga. (CODINA, 2000, p. 15).

O quilate é a medida mais conhecida no ramo e sua classificação pode ser comparada com milésimas. A (Tabela 4) faz a devida equivalência das duas unidades de medida.

Tabela 4 – Comparação entre quilate e milésima para o ouro.

Equivalências entre quilates e milésimas

Quilates	Milésimas
24	1000
22	916
18	750
14	583
9	378
1	41,6

Fonte: adaptado de Codina, 2000.

Sendo assim, por exemplo, se precisarmos ligar 10 gramas de ouro 24 quilates transformando-a em ouro 18 quilates, seguimos a seguinte formula:

$$\frac{(Lei\ \ alta - Lei\ \ baixa) \times Peso\ do\ \ lingote}{Lei\ baixa} = Liga para\ acrescentar \qquad (1)$$

$$\frac{(1000-750)\times 10}{750} = 3{,}33g\ de\ liga \qquad (2)$$

Ou seja, teremos ao final do procedimento 13,33 gramas de ouro 18 quilates.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE JOIAS

A fabricação de joias manualmente exige uma série de etapas que são necessárias para que encante o cliente com uma linda e brilhosa joia que costuma-se encontrar. Cada peça tem seu processo de fabricação peculiar, então não há um modelo a ser seguido, mas os processos que existem na ourivesaria que irão ser citados são sempre os mesmos, cabe a necessidade de ser utilizado ou não. Por isso o ourives para realizar o trabalho necessita criar uma rota de processo para cada novo serviço a ser realizado.

Local de Trabalho

Para que um ourives realize seu trabalho sem que ocorra perda de uma grande quantidade de material de valor agregado alto, é necessário uma oficina preparada para realizar os diversos processos que está profissão exige e que será abordando logo adiante. Primeiramente irá se decorrer sobre seu local ideal de trabalho e especificando a importância da ferramenta abordada. Três ferramentas indispensáveis são a bancada de ourives, onde se retém a maior parte de material. Nesta bancada, o ourives praticamente realiza os processos de

modelagem, solda, cravação e gravação. A outra é a bancada de polimento, onde são realizados os processos de acabamento e polimentos das peças, e pôr fim a mesa de fundição onde é realizado o processo de fusão dos metais.

Bancada de ourives

A bancada de ourives foi projetada justamente para reter os materiais, possuindo uma gaveta central, o que evita a perda a perda de materiais (Figura 1).

Figura 1 – Bancada de ourives.

Fonte: Adamon, 2019.

Bancada de polimento

A bancada de polimento tem o objetivo de além de polir e dar acabamento nas peças reter por meio de um exaustor o pó de metais e das pastas de polimento, mantendo eles em um reservatório para posterior purificação (Figura 2).

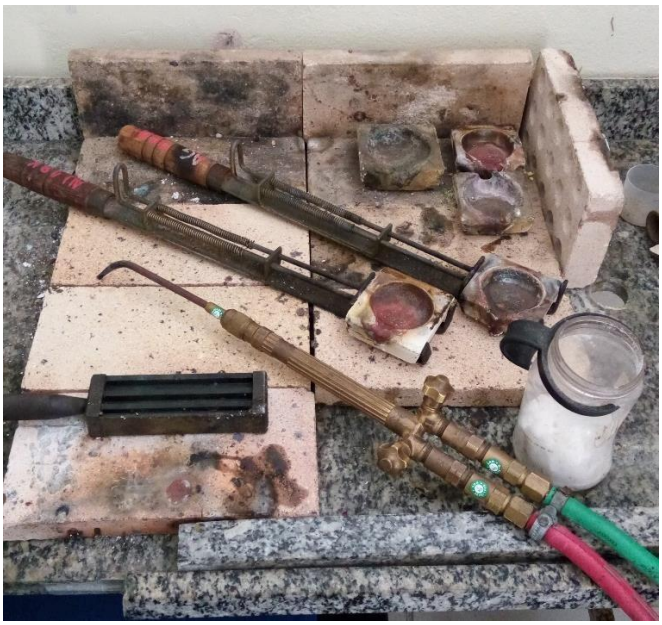
Figura 2 – Banca de polimento.

Fonte: Adamon, 2019.

Bancada de Fundição

A bancada de fundição consiste em um local com tijolos refratários para que se possa fazer a fundição dos metais. O metal é fundido em um cadinho que é preso por um suporte para que se possa manusear e é forrado com bórax para que se possa derrama-lo posteriormente na lingonteira (Figura 3).

Figura 3 – Mesa de Fundição.

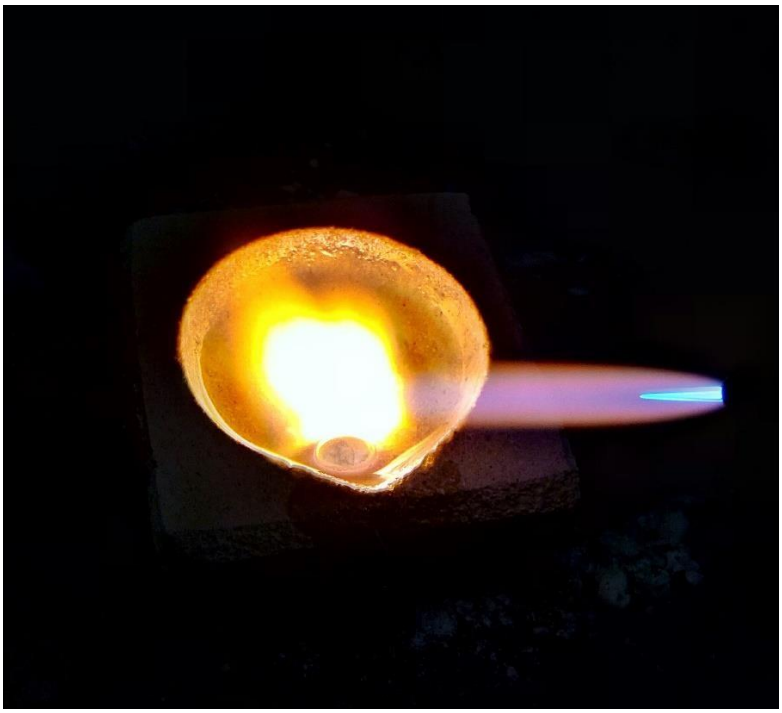


Fonte: do autor, 2019.

Fundição

A fundição de metais e ligas é um processo que é cotidiano na profissão de ourives, pois é o começo de toda fabricação de uma joia, que consiste na transformação do estado sólido para o líquido com o auxílio de um maçarico (Figura 4). O utilizado usualmente é o que contém duas mangueiras, uma de condução do gás e outra para a condução de ar ou oxigênio, e a temperatura máxima alcançada depende da composição da mistura de gases (KLIAUGA; FERRANTE, 2009). O metal depois de atingir sua fusão é derramado em uma lingoteira lubrificada, onde nela há a opção de diversos tamanhos e formatos (Figura 3).

Figura 4 – Processo de fundição com maçarico de oxigênio.



Fonte: do autor, 2019.

A fundição é um processo que exige uma atenção quanto a perda de metais, pois o cadinho que é o local que é forrado com bórax formando uma camada que propicia a fundição do metal, após várias repetições há o acumulo de metais na borda do ambiente de fundição (Figura 5).

Figura 5 – Cadinho usado na fundição de metais com resíduos metálicos

Fonte: do autor, 2019.

Observando-se este cadinho usado podemos perceber pontos metálicos, onde o processo para recuperar o metal seria uma raspagem com uma broca serra copo do tamanho do cadinho em um ambiente que possamos recuperar o pó gerado ao final do processo.

Figura 6 – Broca serra copo de aço carbono.

Fonte: casa São Pedro, 2019.

Após a raspagem do cadinho ele é peneirado, os resíduos que ficarem na peneira são levados a um moinho. Este moinho consiste em uma panela de aço, impulsionada por um motor que o faz girar, e com auxílio de um cilindro de aço solto no moinho faz com que o material vire pó. O material moído então é levado a peneira novamente, e se ainda restar resíduos na peneira o processo se repetirá.

Figura 7 - Moinho automático.

Fonte: Marluci, 2019.

A um método manual para quem não tem o moinho que é feito com um tubo de 75mm e um pilão com uma porca de diâmetro menor, para que se possa moer manualmente o material (Figura 8).

Figura 8 – Moinho manual.

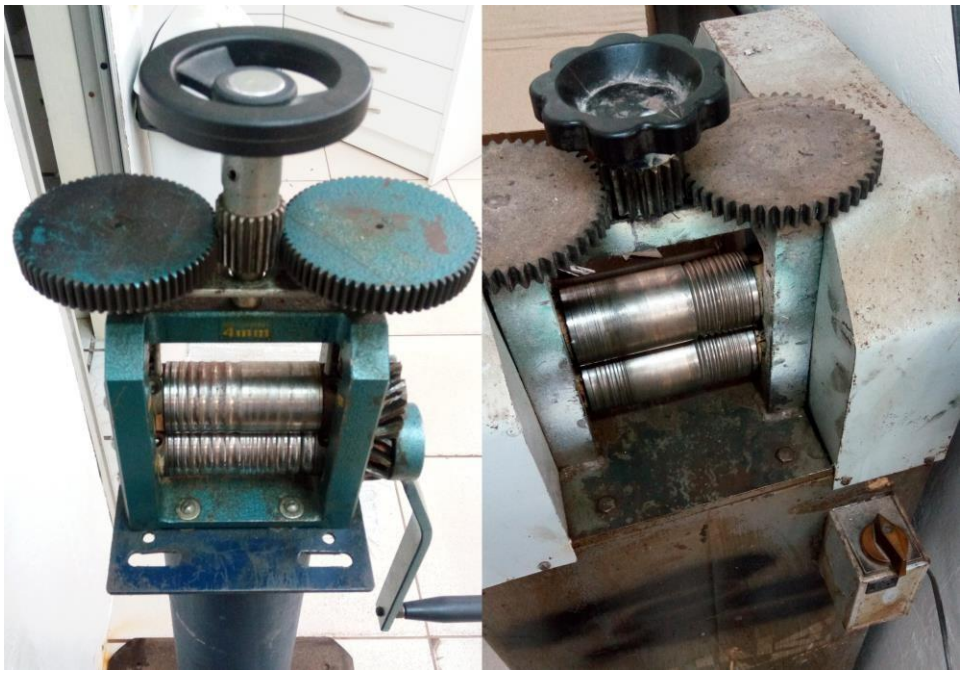
Fonte: Marluci, 2019.

Após todo material ser moído, naturalmente as partículas metálicas serão levadas a fundição e o pó será processado quimicamente junto com o restante dos resíduos gerados dos outros processos que serão abordados.

Laminação

Para preparar o metal para diferentes formatos, deve-se utilizar o laminador, que é um maquinário importante, pois nele conseguimos dois tipos de formatos que é a chapa e o quadrado, que posteriormente pode-se utilizar o ato de trefilar o fio. Nele é constituído dois rolos com várias bitolas com diferentes espessuras, e uma manivela para que se diminua a cada passagem o tamanho do metal. Também temos o laminador de fios com outros dois formatos conhecidos na ourivesaria como meia cana e anatômica, como é demonstrado o laminador com diversas espessuras (Figura 9) que é utilizado geralmente na fabricação de alianças e pulseiras.

Figura 9 – Laminadores.



Fonte: do autor, 2019.

No processo de laminação é de desgaste mínimo de material, pois todo material é formatado após passar no rolamento, somente haverá desgaste se o material estiver quebradiço. Quando isso ocorre o material fica retido abaixo do rolo inferior de laminação e é varrido e separado para posterior purificação junto com o restante dos resíduos.

Trefilação

O ato de trefilar que depois de passar pelo processo de laminação no formato quadrado consiste em dar outros quatro formatos ao metal, são eles o redondo, o quadrado, o

retangular e o oval. O fio é limado na ponta para passar parte dele na bitola de menor espessura e assim ser puxado com o auxílio de um alicate de forma manual, sendo recozido em cada cinco ou seis buracos. Para realizar esse processo é necessário a fieira que é demonstrado na (Figura 10).

Figura 10 – Processo de trefilação.

Fonte: do autor, 2019.

A trefilação é um processo de pouco desgaste, ele só ocorre quando o material está quebradiço ou com falta de recozimento, fazendo com que partes se desfaçam do fio. Pode ocorrer a quebra do fio no momento de puxa-lo, mas como se trata de um pedaço normalmente grande e limpo, não há a necessidade de purifica-lo, somente é levado a posterior fundição com mais do mesmo material.

Modelagem

A modelagem consiste em diversos métodos para que a peça comece a tomar o formato de uma joia, utilizando técnicas como limar e esmerilhar que utiliza-se de lixas e limas de diversos formatos para desgastar o metal.

Ainda neste processo temos as técnicas de calar e perfurar, que utiliza a serra de joalheiro para cortar e eliminar partes de material ou no interior de uma peça, e também de

brocas de diversos formatos, que são essenciais para furar, cravar pedras, fazer gravação e detalhes desejados no metal.

A bancada de ourives retém parte destes materiais (Figura 11) que após o acúmulo é levado posteriormente para sua purificação.

Figura 11 – Partículas retidas na bancada de ourives.

Fonte: do autor, 2019.

Solda

Segundo Codina (2000) a soldadura (do latim *solidare*, que significa tornar sólido) proporciona uma forma de união sólida e invisível entre os diferentes elementos metálicos que intervêm na construção de uma peça. A soldadura constitui o processo mais utilizado para unir metais entre si, a partir de uma interação das suas estruturas.

O processo de soldar exige elementos para obter-se sucesso, o primeiro consiste na liga do mesmo metal que se pretende soldar, mas que tenha um ponto de fusão mais baixo. Outro elemento é o calor com auxílio de um maçarico e um antioxidante que é aplicado antes

de se fazer a solda. Alguns detalhes como unir perfeitamente a peça e ajusta-la na posição correta e a distribuição do calor por toda a superfície faz toda a diferença na hora de soldar, pois evita que a solda percorra para um local indesejado.

Acabamento

O acabamento geralmente vem depois de todas as etapas anteriores acima citadas, e consiste em retirar excessos de materiais e ligas, através de esmeril, limas e lixas. Onde são utilizadas diversas numerações e tem o objetivo de deixar a superfície cada vez mais lisa e polida.

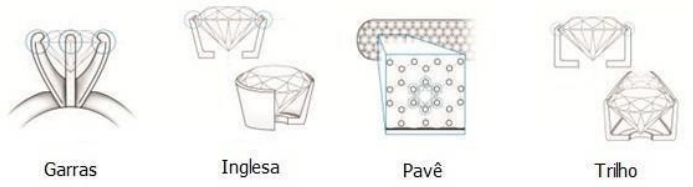
Tanto a limadura como a esmerilagem constituem processos constantemente aplicados no decorrer de um trabalho. Podem parecer trabalhos de fácil execução, mas são as tarefas mais difíceis de realizar. (CODINA, 2000).

É o processo que mais gera pó, que é retido na gaveta da bancada de ourives, junto com o processo de modelagem (Figura 11).

Cravação e Gravação

A cravação é uma técnica utilizada na ourivesaria para fixar as pedras nas joias. Há diversos tipos de cravação, mas o que todas tem em comum é o objetivo de através da modelagem do metal no formato da pedra encaixa-la, sendo necessário uma sobra de metal suficiente para que se “crave” a pedra empurrando metal ao redor, ou fazendo garras para segura-las (Figura 12).

Figura 12 – Tipos de cravação.



Fonte: Alcade, 2016.

A gravação de metal, pode ser feita manualmente com auxílio de um pantógrafo ou de um motor de suspensão conhecido como “chicote” que com auxílio de uma broca específica é feita o trabalho.

Ambos os métodos tem bastante desgaste de metal, sendo necessário um local para reter o pó que é gerado, como o método é feito na bancada de ourives ele fica junto com as partículas de outros métodos (Figura 10).

Polimento

No ramo joalheiro podemos ter dois tipos de polimentos, o de superfície planas e o de superfícies irregulares. Segundo Codina (2000) para o polimento de uma peça com características planas, em que se deve respeitar as arestas e não arredonda-las, dever-se-á esmerilar cada lado cuidadosamente antes de se começar o desbaste e utilizar discos de feltro planos para polir cada um dos lados, evitando, dentro do possível, os cepilhos ou outros utensílios que possam arredondar as arestas. Já para as outras superfícies requerem o uso de cepilhos ou catrabuchas específicas. O discos duros deixariam pequenos planos na superfície, que dificultariam um correto acabamento.

O resíduos provenientes do polimento (Figura 13) são retidos pela banca de polimento (Figura 2).

Figura 13 – Pó retido pela banca de polimento.

Fonte: o autor, 2019.

MÉTODOS DE REFINO DO OURO

Copelação

A copelação é um processo que é feito após a separação da escória por meio de um banho de fusão reduzindo o teor de chumbo metálico que funciona como solvente dos metais preciosos e é adicionado na sucata de joias que se dissolve no metal. Este processo tem o objetivo de separar o ouro e a prata da escória, fazendo com que reste no cadinho somente os metais nobres e o chumbo se transforme em óxido de chumbo devido à alta temperatura.

> O botão de chumbo, já isolado da escória, será submetido ao processo denominado copelação para reparar do chumbo o ouro, a prata, o paládio e a platina. O chumbo, mantido a uma temperatura entre 800°C e 900°C é rapidamente oxidado a PbO. Noventa e oito por cento é absorvido pelo cadinho e os dois por cento restantes são volatilizados. Consequentemente, apenas os metais nobres restarão no cadinho. O sucesso dessa operação dependerá, em grande parte, da vivência do operador e da natureza do cadinho. (TENGNON, 1985, p. 64,).

O problema deste método é a alta emissão de gases tóxicos como o óxido de chumbo no seu processo, sendo necessária a instalação de sistema de purificação de gases. Outro empecilho do processo é que após a separação dos metais da sucata teríamos que separa-los, pois como resultado teríamos o ouro e a prata fundidos juntos.

Inquartação e divisão

O método de inquartação consiste em criar uma liga que contém aproximadamente 25% de ouro e é aplicável quando este estiver ligado com prata, cobre, paládio, zinco e cádmio. Isto é devido sua solubilidade em ácido nítrico.

> O método de inquartação consiste em ligar o ouro com três partes de prata ou cobre e a seguir submeter esta liga à dissolução com ácido nítrico. Pode ser utilizada para o refino do ouro ligado, a prata ou cobre e estarem presentes paládio, zinco e cádmio, sendo que o ouro puro na forma de pó marrom depois de devidamente lavado é fundido diretamente. (SPERB, 2008, p. 72).

As reações que englobam este método podem ser definidas pela interação destes metais com o ácido nítrico e o balanceamento estequiométrico se dá pelas seguintes equações:

$$3Ag_{(s)} + 8HNO_{3(l)} = 2NO_{(g)} + 4H_2O_{(l)} + 3AgNO_{3(s)} \quad (3)$$

$$3Cu_{(s)} + 8HNO_{3(l)} = 2NO_{(g)} + 4H_2O_{(l)} + 3Cu(NO_3)_{2(s)} \quad (4)$$

$$3Pd_{(s)} + 8HNO_{3(l)} = 2NO_{(g)} + 4H_2O_{(l)} + 3Pd(NO_3)_{2(s)} \quad (5)$$

$$3Cd_{(s)} + 8HNO_{3(l)} = 2NO_{(g)} + 4H_2O_{(l)} + 3Cd(NO_3)_{2(s)} \quad (6)$$

O ouro em forma de pó marrom permanece insolúvel nesta reação e pode ser precipitado. A solução de ácido nítrico com os metais dissolvidos remanescente da reação deve ser armazenada para posterior extração na forma de sais solúveis nesta solução. A inquartação só é válida para o refino de pequenas quantidades de ouro amarelo devido a duas razões, segundo Ibid. (2008, p.77):

1. A primeira refere-se à pureza do ouro obtido, que dificilmente se compara com o da precipitação química.
2. A segunda razão refere-se à quantidade de ácido obtido, que é bem maior que no caso da precipitação química.

O problema deste método como podemos perceber é que ele não atinge uma pureza do ouro obtido e também só é válido para pequenas quantidades de ouro, que quando comparado com o da precipitação química com água-régia perde no custo benefício, pois se fizermos os cálculos de acordo com a estequiometria da reação considerando 50g de ouro, precisaríamos acrescentar 150g de prata ou cobre. Sendo assim de acordo com Ibid. (2008, p.75):

$$200g \times 3mL\ g^{-1} = 600mL \text{ (liga com prata)} \quad (7)$$

$$200g \times 5mL\ g^{-1} = 1000mL \text{ (liga com cobre)} \quad (8)$$

Método de cloração de Miller

De acordo com Miller (1867) o refino de ouro por cloretação foi originalmente desenvolvido por Francis B. Miller na Casa da Moeda de Sidney, Austrália e por ele patenteado em junho de 1867, conforme Patente Britânica no 1767 "Toughening Gold Bullion, Refining-Alloyed Gold, e C." (MILLER, 1867, *apud* BARBOSA, 2002, p. 147).

O processo de cloretação Miller consiste basicamente em borbulhar gás cloro através do ouro fundido, convertendo as impurezas metálicas – geralmente, prata e metais de base (cobre, ferro, zinco e chumbo) – em seus respectivos cloretos, que sendo mais leves flutuam na superfície do ouro fundido, de onde são facilmente retirados. (MILLER, 1867, *apud* BARBOSA, 2002, p. 147).

Corti (2002) afirma que o final do processo é identificado pelo desprendimento de gases com coloração roxa característicos da formação de cloreto de ouro e, geralmente, isto ocorre quando o teor de ouro alcança um valor de 99,6 a 99,7%. Nenhum metal do GP presente é removido. A pureza típica de ouro conseguida por este método é de 99,5%, tendo a prata como a principal impureza. (CORTI, 2002, *apud* ROJAS, 2009, p. 16).

Este não é indicado para refino em pequena escala, pois este método requer um cuidado maior perante aos outros, pois implica a instalação de extrator de gases e posterior tratamento do mesmo. Olhando pela ótica do custo benefício este método acaba se inviabilizando perante os outros, de acordo com a quantidade que foi tratada, por outro lado em questão de pureza é o mais adequado.

Método eletrolítico de Wohlwill

De acordo com Corti (2002) outro método bem conhecido é o método eletrolítico de Wohlwill, amplamente utilizado nas principais refinarias de ouro, frequentemente em conjunto com o método de Miller. A técnica do refino eletrolítico envolve a dissolução eletrolítica de um anodo impuro de ouro em um eletrólito de ácido clorídrico (HCl) e a consequente deposição do ouro com pureza de 99,99% no catodo. (CORTI, 2002, *apud* ROJAS, 2009, p. 17).

O processo de eletrorefino de ouro foi desenvolvido como resultado dos experimentos efetuados, a partir de 1874, por Emil Wohlwill (1904) então diretor da Deutsche Affinerie de Hamburgo. A princípio, as investigações tinham por objetivo o estabelecimento de um método eletrolítico de separação da platina do ouro. Para este caso o processo eletrolítico mostrou-se bastante satisfatório. Entretanto, Wohlwill verificou que a característica essencial deste processo consistia na dissolução eletroquímica dos constituintes do material rico em ouro, funcionando como anodo, e a deposição de ouro quimicamente puro no catodo; ou seja, a aplicação principal deste processo estava destinada à obtenção de ouro de elevada pureza a partir de ouro impuro. (WOHLWILL, 1904, *apud* BARBOSA, 2002, p. 157).

Este método normalmente vem posterior do método de Miller ou da inquartação, pois necessita de um anodo de ouro que é obtido através desses processos. E tem o objetivo de separar os metais presentes e aumentar sua pureza. No cátodo fica depositado o ouro puro (99,99%), em solução fica metais como platina, paládio e o cobre e no lodo cloreto de prata, irídio, rutênio e ródio. Claro sabendo que possa ter ou não a existência desses metais que serão posteriormente tratados e recuperados, o método consiste em recuperar o ouro inicialmente.

Célula de Fizzer

As vantagens do método de Fizzer é que é a única recomendada para reciclagem em pequena escala sendo uma variação do método de Wohlwill. Utiliza-se ácido clorídrico para fazer a eletrólise onde o cátodo é um recipiente de cerâmica poroso, que não permite a passagem do ouro dissolvido, ficando retido no mesmo.

Segundo Corti (2002), periodicamente a célula é drenada, filtrada e o ouro no eletrólito é precipitado com um agente redutor seletivo. Desta maneira, os metais do GP dissolvidos são separados do ouro, o qual pode alcançar uma pureza de 99,99%. Ao contrário do método de Wohlwill, a célula de Fizzer pode tratar anodos com até 10% de prata e, se corrente alternada for empregada, anodos com um teor de até 20% podem ser utilizados. (CORTI, 2002, *apud* ROJAS, 2009, p. 19).

Extração por solvente

Segundo Corti (2002) Este método envolve o uso de reagentes orgânicos para extrair o ouro solúvel na fase orgânica que é imiscível em água (H_2O), permitindo assim sua

separação seletiva. Este método não é recomendado para a recuperação de metais preciosos a partir de sucata de joias pelo seu alto teor de ouro (CORTI, 2002, *apud* ROJAS, 2009, p. 19).

Método com água-régia

O ouro, assim como as suas ligas, são solúveis na água-régia, que é uma solução composta de 30% de ácido nítrico e 70% de ácido clorídrico, em média, com exceção da prata que, durante o processo químico com a água-régia, transforma-se em cloreto de prata. É justamente devido ao cloreto de prata que a reação de dissolução do ouro ligado com a água-régia começa de forma intensa e, após alguns minutos, perde a intensidade e nos leva a afirmar erroneamente que ela, a água-régia, perdeu a força, Assim o purificador poderá ser levado a cometer um grande erro. (SPERB, 2008, p.16).

> Na expectativa de resolver esse problema, normalmente adiciona-se água-régia na liga de ouro, o que acaba por resultar em uma solução excessivamente forte com consequentes perdas na precipitação do ouro. (VOGEL, 1979, p. 234).

É o método que permite obter-se a pureza elevada do ouro a partir de suas ligas, além de inúmeras vantagens, por isso é muito usado hoje em dia no mundo inteiro. Tais benefícios são, por exemplo, baixo consumo de produtos químicos, principalmente os ácidos, baixa poluição ambiental e grande facilidade na obtenção de outros metais das ligas de ouro. Exemplo a prata, a platina e o paládio. (Ibid., p.15).

Na prática para que aumente o rendimento do método, as sucatas da oficina de joias são trituradas até partículas de 0,1mm, aumentando a sua área superficial, consequentemente a reação se torna mais eficaz. Um aquecimento moderado (aproximadamente 60ºC) acelera a dissolução.

A reação estequiométrica que consiste o método é a seguinte:

$$Au_{(s)} + 4HCl_{(l)} + HNO_{3(l)} = H(AuCl_4)_{(l)} + NO + 2H_2O_{(l)} \quad (9)$$

Para a dissolução do íon complexo:

$$4H(AuCl_4)_{(l)} + 6H_2O_{(l)} = 4Au_{(s)} + 16HCl_{(l)} + 3O_{2(g)} \quad (10)$$

Experimentalmente, determinou-se que quando a solução possui pH = 0 até pH = 1 ocorre o máximo de íons $^{+3}$ na solução áurica. A tarefa final na purificação do ouro consiste na precipitação química do mesmo utilizando reagentes apropriados como redutores. Os redutores fornecem elétrons para neutralizar a carga íon áurico, Au^{+3} que assim se reduz a Au^{0} e precipita íons à forma de uma lama marrom. Os reagentes mais usados para este fim são o sulfito de sódio, a hidroquinona e o sulfato ferroso. (Ibid., p.21).

Depois que a precipitação se completou, a solução deve permanecer em repouso durante a noite (overnight) para permitir que as partículas finas de ouro se depositem no fundo, como lamas. A maior parte do licor pode ser separada por decantação e o restante, que contém o ouro, é filtrado. O ouro filtrado deve ser lavado com H_2SO_4 e depois com água, seco e fundido. (ROJAS, 2009, p. 20).

As vantagens desse método são várias, pois além de ser de baixo custo ele atinge de pequena até grande escala atendendo aos requisitos do projeto, onde pode dissolver todos os metais presentes em uma oficina de joias, como o ouro, o cobre, o zinco, o níquel, o paládio, a platina, o ródio e a prata que já é separada como precipitado. Outra vantagem é demandar pouco reagente quando comparado com os outros métodos, sendo que sua purificação posterior dos resíduos gerados é realizada por meio de neutralização ácido base.

Processo pirometalúrgico

O princípio deste método é a oxidação seletiva das impurezas dos metais base. Isto é possível pelo borbulhamento de ar ou oxigênio através da sucata de ouro durante a fusão. Este procedimento remove, inicialmente, todos os metais base diferentes do cobre, e, em seguida, algum cobre. Os óxidos formados e as inclusões não metálicas flutuam na superfície do banho de metais fundidos e são dissolvidos para formar a escória (ROJAS, 2009, p. 20).

O processo pirometalúrgico é uma boa pedida quando falamos de grandes quantidades de sucatas, principalmente quando levamos em consideração o tempo do processo e a rentabilidade, pois utiliza somente o borbulhamento de ar ou oxigênio.

De acordo com Corti (2002) a (Tabela 5) demonstra a quantidade percentual de remoção dos metais base no método pirometalúrgico:

Tabela 5 – Percentual de remoção dos metais base ao se empregar o método pirometalúrgico.

Metal	% Remoção
Zinco	99
Chumbo	92
Estanho	96
Ferro	> 99
Cádmio	91
Antimônio	90
Bismuto	77
Arsênio	94
Níquel	> 90

Fonte: adaptado de Rojas, 2009.

Escolha do método para refino do ouro

Existem vários métodos para o refino do ouro como vimos anteriormente, a escolha tende a ser feita de acordo com o processo que atende melhor a necessidade de quem fará a operação. A (Tabela 6) é um indicativo das vantagens, desvantagens, limitações, escala e restrições dos método citados durante o capítulo.

Tabela 6 – Comparativo entre os métodos de refino de ouro.

Método	Escala	Vantagens	Desvantagens	Limitações	*Restrições*
Copelação	Pequena	Processo de custo baixo e simples de ser realizado	Emissão de gases tóxicos	Necessita de métodos para separar o metais após a realização do método	Presença de chumbo
Inquartação	Pequena e média	Separa o ouro da prata	Não atinge uma pureza ideal do ouro	Necessita criar uma liga com 25% de ouro	Presença somente de ouro e prata
Cloração de Miller	Grande	Grande pureza (99,5%)	Requer um sistema de extrator de gases	-	-

Wohlwill	Grande	Grande pureza (98%)	Método lento	Baixo teor de prata	Exige métodos posteriores
Célula de Fizzer	Pequena	Grande pureza (99,99%) e é a mais indicada quando temos a presença dos metais do grupo da platina	Necessita da limpeza dos ânodos durante o processo	Método lento e necessita de tratamento posterior	Máximo de 10% de prata nos ânodos e com corrente alternada 20%
Extração por solventes	Grande	Separação seletiva	Não recomendada para sucatas com alto teor de ouro	Uso de compostos orgânicos	-
Método com água-régia	Pequena e média	Dissolve todos os metais podendo ter como pureza final do ouro (99,99%) e é de baixo custo	Requer cuidado para total dissolução na lixiviação do ouro	Necessita de área superficial para maior eficiência	Teores de prata maior que 10%
Processo pirometalúgico	Pequena e média	Processo de baixo custo e oxidação seletiva das impureza	Não há uma grande pureza na recuperação do ouro	Necessita de processos posteriores	-

Fonte: do autor, 2019.

O método de escolha foi baseado com os dados acima (Tabela 6) onde deve-se levar em consideração todos os critérios e definir de acordo uma rota de trabalho, pois depende do caso, onde pode-se até fazer a união dos métodos ou até adapta-los conforme a necessidade.

MÉTODOS DE REFINO DA PRATA

A purificação da prata advém dos métodos de refino do ouro, e de acordo com o processo escolhido se toma uma rota de trabalho diferente, não se indica a purificação separada

dos metais prata e ouro, porque de qualquer forma teremos a presença deste metal, pois fazem parte das ligas de ouro. O ponto de partida será escolhido de acordo com o método anteriormente feito.

Cloreto de prata da água-régia

O cloreto de prata forma-se quando dissolvido em água-régia, sendo que o próximo passo lava-lo com bastante água destilada quente e cobri-lo com formol e com igual quantia de soda cáustica. Aguarda sua metalização de cor cinza e filtra-se a solução e por fim funde-se com bórax em um cadinho.

A vantagem de se fazer pelo método da água-régia é que a prata já é precipitada como cloreto de prata, sendo que no da inquartação teríamos que fazer a redução da mesma. O processo é simples e de baixo custo.

Redução da prata com Dextrose ($C_6H_{12}O_6$)

A prata estará em solução na forma de $AgNO_3$ se a sucata de joias for pré-tratada pelo método de inquartação com HNO_3 ou como um precipitado branco de AgCl proveniente do método com água régia. Ao licor que contem AgNO3 adiciona-se salmoura para formar o precipitado de AgCl. O precipitado de AgCl posteriormente é reduzido à prata metálica com dextrose e soda cáustica. (ROJAS, 2009, p. 37).

A reação é feita à temperatura de 80°C por 15 minutos. Após este processo é feita sua fusão com bórax em um cadinho. A reação estequiométrica é dada pela seguinte equação:

$$AgNO_{3(aq)} + NaCl_{(s)} = AgCl_{(\downarrow)} + NaNO_{3(s)} \qquad (11)$$

O cobre e os outros metais em solução são separados do AgCl pela lavagem repetida com água ou água quente acidificada com HNO_3. As lavagens são repetidas 12 vezes, aproximadamente, ou até que a água de lavagem esteja clara. Logo que a água de lavagem estiver clara, coloca-se uma alíquota do líquido em um vidro e se adiciona a solução de NH_4OH.

O cobre ao reagir com amônia torna a solução azul e isto indica que mais lavagens com água são necessárias. (ROJAS, 2009, p. 40).

O método é bastante satisfatório com relação a pureza da prata, sendo que necessita de processos simples e de fácil acesso, a única desvantagem é que necessita de várias lavagens.

REFINO DA PLATINA

Como a platina só é dissolvida em água-régia e normalmente é encontrada ligada com outros metais como o ouro, o paládio, a prata e o cobre. É necessário saber identifica-la, pois se assemelha a prata e ao paládio.

Segundo Sperb (2008, p.95) há três características para reconhecer a platina:

1. Infusível ao maçarico comum;
2. Fusível ao maçarico de oxigênio;
3. Unicamente solúvel em água-régia.

A reação estequiométrica para dissolução da platina em água régia é a seguinte:

$$3Pt_{(s)} + 18HCl_{(l)} + 4HNO_{3(l)} = 8H_2O_{(l)} + 4NO_{(g)} + 3H_2[PtCl_6]_{(l)} \quad (12)$$

Se adicionarmos cloreto de amônio a solução, obtemos um precipitado amarelo, de cloro-platinado de amônio:

$$H_2[PtCl_6]_{(l)} + 2NH_4Cl_{(s)} = 2HCl_{(l)} + (NH_4)_2[PtCl_6]_{(s)} \quad (13)$$

Posteriormente precipita-se o ouro que ficou dissolvido na solução como já foi abordado.

REFINO DO PALÁDIO

O refino do paládio pode ser feito posteriormente ao refino do ouro e feito a recuperação da platina. De acordo com Sperb (2008, p. 97) evapora-se a solução, em banho-maria até a consistência de açúcar. A seguir, acresce-se 10mL de amônia para cada grama de

paládio. Adiciona-se 50mL de água, agitar e filtrar a solução. Precipita-se o paládio com ácido clorídrico diluído em água em 50% até o pH 2. Filtrar, lavar o precipitado e fundir.

A reação de formação do precipitado é a seguinte:

$$[Pd(NH_3)_4]\,(OH)_{2(l)} + 2HCl_{(l)} = Pd(NH_3)_4Cl_{2(s)} + 2H_2O_{(l)} \qquad (14)$$

No refino do paládio há dois casos importantes que precisam ser avaliados. Se a quantidade de paládio em solução for menor que 5% deve-se precipita-lo adicionando iodeto de potássio, com cuidado, e guarda-se em estocagem para refino posterior, isto é necessário pois há o aparecimento do efeito iônico, caso contrário deve-se seguir o método de precipitação com a amônia.

REFINO DO COBRE

O refino do cobre é necessário, pois é originado das sobras das soluções ácidas. Este pode ser precipitado, sendo que junto a ele podem restar traços de metais nobres e o método mais adequado é o de precipitação e após o eletrolítico.

Método de precipitação e eletrolítico

Agrega-se limalhas de ferro à solução proveniente da purificação dos metais nobres e aguarda em torno de 5 horas. Logo após a solução é filtrada lavando com água em excesso. A solução deve ser neutralizada posteriormente. Ao secar o cobre é necessário com o auxílio de um imã ver se há a presença de ferro. O passo a seguir é fundir o cobre e submetê-lo ao processo de eletrólise para recupera-lo com uma pureza maior.

O sistema eletrolítico consiste em um ânodo que é o cobre impuro recuperado anteriormente, este fica dentro da solução eletrolítica, ou seja, o sulfato de cobre mais a água. No cátodo é colocado o cobre puro ou uma placa de chumbo.

A solução, ou eletrólito, utilizada é aquosa com 5% de ácido sulfúrico, 2% de sulfato de cobre e 1% de álcool etílico e água. O cobre ficará aderido na placa de chumbo e os metais nobres, se existirem, ficarão no saco anódico “Polo +”. (SPERB, 2008, p.104).

A reação de oxirredução pode ser explicada da seguinte maneira:

$$CuSO_{4(s)} + H_2O_{(l)} = Cu^{2+}_{(aq)} + SO_4^{2-}{}_{(aq)} \quad (15)$$

No polo positivo:

$$Cu_{(s)} = Cu^{2+}_{(aq)} + 2e^- \quad (16)$$

No polo negativo:

$$Cu^{2+}_{(aq)} + 2e^- = Cu_{(s)} \quad (17)$$

MÉTODO DE ESCOLHA PARA RECUPERAÇÃO DOS RESÍDUOS

O objetivo da recuperação de resíduos é restaurar frações ou algumas substâncias que possam ser aproveitadas no processo produtivo desde que em condições economicamente vantajosas e que representem um benefício à sociedade em geral, independentemente da rentabilidade. Um exemplo bem sucedido de recuperação de substâncias a partir de seus resíduos são os metais (TOCCHETTO, 2003, p. 1).

O processo de purificação exige a escolha de uma rota de etapas bem definidas, pois para cada processo teremos um resíduo com misturas diferentes, como vimos nos processos de fabricação de uma joia. Então pensando em um grau de pureza e o melhor rendimento possível do processo optou-se pela precipitação química, que conforme Vogel (1981, p. 81):

> Um grande número de reações utilizadas em análise qualitativa inorgânica envolve a formação de precipitados. Um precipitado é uma substância que separa de uma solução, formando uma fase sólida.

Para que a precipitação ocorra da melhor maneira é necessário tomar atenção a diversos fatores que determinam o sucesso da reação, que segundo Vogel (1981, p. 300):

> O precipitado de ser tão insolúvel que não ocorra perda apreciável quando for recolhido por filtração. Na prática, isto significa, usualmente, que a quantidade que permanece em solução não excede o mínimo detectável pela balança, ou seja, 0,1 mg. A natureza física do precipitado deve ser tal que ele seja prontamente separado da solução por filtração e possa ser lavado até ficar livre de impurezas solúveis. Estas condições requerem que as partículas não passem pelo meio de filtração. O precipitado deve ser conversível em uma substância pura de

> composição definida; isto pode ser feito por calcinação ou por uma operação química simples como uma evaporação com um líquido adequado.

Para realizarmos a precipitação química é necessário utilizar um dos métodos descritos, que de acordo com a análise realizada, levando em conta parâmetros de quantidade de matéria e reagente utilizado, custo benefício, pureza do metal recuperado e percentual de recuperação, optou-se pelo método da água régia, pois é um método que atende as especificações de avaliação.

Os resíduos das oficinas de joias requerem uma preparação para que possam ser feitas as devidas reações químicas posteriores, pois estes normalmente estão misturados com pó de pasta de polimento e metais, lixas, serras, entre outros. Então é importante descrever o processo de preparação do resíduo antes de dissolve-lo quimicamente no processo de água régia, que segue a sequência recomendada de acordo com Sperb (2008, p. 36)

1. Incineração;
2. Seleção;
3. Trituração;
4. Retirar o ferro e lavar;
5. Nova Incineração à temperatura aproximadamente de 600 °C;
6. Dissolução em água régia;
7. Filtração;
8. Precipitado.
9. Fundição.

Os resíduos das oficinas de joias, normalmente estão acompanhados de partículas de metais precioso contidas nos diversos processos, podendo ser limalhas, cavacos, abrasivos, partículas em cadinho, lixas e pasta de polimentos, em um percentual que vai de 1 até 10% de metal recuperável. Sperb (2008) recomenda dois processos antes de começar o tratamento químico. Um deles consiste na fundição prévia de todos os resíduos ligando-os. O outro é o processo direto de tratamento com ácidos.

Incineração

A incineração consiste na queima de determinado lixo ou resíduo com o objetivo de reduzir o volume, fazendo com que resíduos orgânicos se decomponham. Este método não pode ser considerado o mesmo da fundição prévia, onde podemos perceber que na presença de

bórax e salitre (nitrato de potássio) quando o aquecimento ultrapassa 800°C observa-se as cinzas e os metais se transformando em líquido. O ponto ideal é a transformação do material em cinza, para posterior seleção.

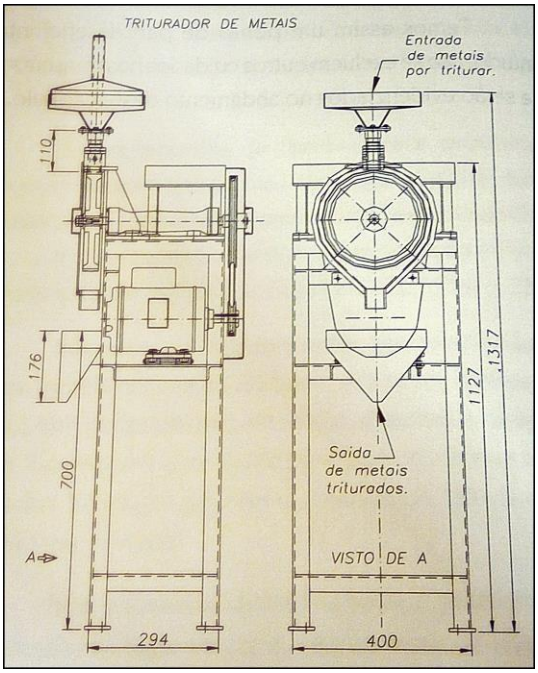
Seleção

A seleção ocorre a partir da separação das impurezas nocivas ao processos, ou seja, neste caso seriam ferro, latões e cerâmicas. De acordo com Sperb (2008, p.38) afirma que como os resíduos já estão sob a composição de cinzas, devemos selecionar o resíduo grosso do fino com uma peneira de 0,5 mm de diâmetro do poro. Do lixo "grosso" são recolhidos ferros, aço, materiais de elevada dureza, e pedaços de metais não nobres. Essa parte é a chamada de catação e pode ser auxiliada por um imã. Do lixo fino até a maior parte do ferro é retirada também com auxílio de um imã.

Trituração

A trituração ocorre com um moinho (figura 7) ou com um triturador feito para este tipo de processo que é da marca Hidrometal (figura 14) para que as partículas fiquem em um tamanho aproximado menores que 0,1mm, considerando que isso aumentará sua área superficial para posterior ataque ácido, favorecendo o sucesso da reação.

Figura 14 – Triturador de metais Hidrometal.



Fonte: adaptado de Sperb, 2008.

Retirada do ferro e lavagem

Segundo Sperb (2008, p.39) os resíduos finos são misturados com o resíduo triturado, que como já foi dito, também já passou a ser fino e deve-se acondiciona-los em um recipiente plástico de 10 litros para receber cinco litros de água e meio litro de ácido clorídrico, agita-se inicialmente e este deve permanecer em repouso durante meia hora. Segue-se o processo filtrando o mesmo com um filtro de manga que pode ser constituído com um tecido de fibra sintética, o recomendado é o tecido Tiodolin. Após toda solução de água e ácido escorrer, lava-se com mais cinco litros de água.

Para retirar todo o resíduo do filtro e prepara-lo para o próximo processo lava-se com um jato de álcool e pode ser feito uma nova incineração em forno à temperatura de 600°C até 700°C, na ausência do forno pode ser posto em brasa com carvão sobre um recipiente de aço inox.

Dissolução em água régia

O tratamento com água-régia para os resíduos incinerados no objetivo da dissolução e separação química dos metais nobres, utiliza-se uma composição de 80% de ácido clorídrico e 20% de ácido nítrico, pois os resíduos foram bem concentrados e os seus metais ativados anteriormente.

Para a quantidade de resíduos em questão (1 kg de cinzas) o volume de água-régia deve ser de meio litro. O resíduo é então colocado em frasco tipo Ernemayer de capacidade igual a quatro litros para então receber a água-régia. Depois disso, normalmente a solução de água-régia com o resíduo de ouro é aquecida levemente até a temperatura aproximadamente de 50°C durante uma hora para depois receber o aquecimento de fervura, que não pode ser excessivo para evitarem-se as perdas por ebulição. (SPERB, 2008, p. 40)

Filtração

Inicialmente, a água-régia deve ser diluída com 1,5 litro de água pura e depois filtrada com o auxílio de um filtro de manga elaborado com tecido do tipo Tiodolin. Após haver escorrido todo o líquido, joga-se água quente (80°C) sobre o resíduo da seguinte maneira: usa-se meio litro e deixa-se escorrer todo o líquido. Depois, adiciona-se mais meio litro e novamente deixar escorrer todo o líquido e assim sucessivamente até completar 4 litros de líquido filtrado. A última porção de solução filtrada deve ser quase incolor. Como esta filtração não é perfeita, deve-se realizar a filtração final com papel filtro e um funil adequado. (SPERB, 2008, p. 41).

Precipitado

Agrega-se um pequena porção de sulfito de sódio à solução, somente para iniciar o processo de precipitação. Os primeiros precipitados servirão de núcleo para os posteriores. Com uma agitação circular na solução, agrega-se mais sulfito à solução até que todo o líquido atinja a cor marrom médio. Deixar em repouso por uma hora e após filtrar com filtro de papel. (SPERB, 2008, p.42).

Fundição

Os ouro devidamente em pó já dessecados e avaliados são, então misturados em um gral de porcelana com 1g de bórax e 1g de nitrato de potássio com auxílio de um bastão de porcelana. A seguir, a mistura de ouro com os fundentes é colocada em um cadinho cerâmico para se efetivar a fundição do mesmo. Com auxílio de um maçarico a gás e oxigênio procede-se a fundição, tendo-se o cuidado de processar movimentos circulares com chama pelas bordas do cadinho cerâmico (SPERB, 2008, p.31).

TRATAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS (SÓLIDOS E LÍQUIDOS)

Os resíduos gerados no processo de água régia são respectivamente a mistura de ácido clorídrico, ácido nítrico e pequenas concentrações de metais dissolvidos ou até suspensos. Para realizar-se seu tratamento é necessário realizar primeiramente a separação do resíduo da água por meio de uma neutralização, onde uma simples titulação com uma base forte, como por exemplo uma solução de hidróxido de sódio 20% será efetiva, pois como produto das reações anteriores temos como resultado um ácido forte diluído em água. A titulação é feita por meio de uma bureta com conta gotas, sendo medido o pH constantemente. O objetivo é neutralizar a solução, então o pH deve ficar na faixa de 7. Realiza-se logo após a filtração dos sais gerados na titulação, formando assim um resíduo líquido e um resíduo sólido.

Resíduo líquido

A realização de uma filtração com carvão ativado se faz necessária quando percebe-se uma coloração do líquido tratado não desejada, a função deste filtro é fazer a retenção de impurezas que possam ter passado na primeira filtração. Assim que a água é recuperada precisa-se realizar análises para saber se pode ser feito seu descarte na rede pública.

O controle de recursos hídricos e do lançamentos de efluentes é regulamentado pela Resolução n°430 de 13 de maio de 2011 que de acordo com o Art. 16. Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam as condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis. (RESOLUÇÃO Nº 430, 2011, p. 1).

Entende-se que de acordo com a Resolução nº 430 de 2011, que os órgãos ambientais, devem somente permitir o lançamento de efluentes não excedendo as condições e padrões de qualidade da água dispostos na (Tabela 7) e (Tabela 8), sendo uma exceção a situação em que existam metas obrigatórias estabelecidas pelos corpos de água em recuperação.

Tabela 7 – Condições de lançamentos de efluentes de acordo com a Resolução n°430 de 2011.

I - Condições de lançamento de efluentes	
pH	5 a 9
Temperatura	Inferior a 40°C

Materiais sedimentáveis	Até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone *Inmhof.*
Regime de lançamento	1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente
Óleos minerais	Até 20 mg/L
Óleos vegetais e gorduras animais	Até 50 mg/L
Materiais flutuantes	Ausentes
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor

Fonte: adaptado de Resolução n°430, 2011, p. 4.

Tabela 8 – Parâmetros de lançamento de efluentes de acordo com a Resolução n°430 de 2011.

II - Padrões de lançamento de efluentes	
Parâmetros	Valores máximos
Arsênio total	0,5 mg/L
Bário total	5,0 mg/L
Boro total	5,0 mg/L
Cádmio total	0,2 mg/L
Chumbo total	0,5 mg/L
Cianeto total	1,0 mg/L
Cianeto livre	0,2 mg/L
Cobre dissolvido	1,0 mg/L
Cromo hexavalente	0,1 mg/L
Cromo trivalente	1,0 mg/L
Estanho total	4,0 mg/L
Ferro dissolvido	15,0 mg/L
Fluoreto total	10,0 mg/L
Manganês dissolvido	1,0 mg/L
Mercúrio total	0,01 mg/L
Níquel total	2,0 mg/L
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg/L
Prata total	0,1 mg/L
Selênio total	0,30 mg/L
Sulfeto	1,0 mg/L
Zinco total	5,0 mg/L
Benzeno	1,2 mg/L

Clorofórmio	1,0 mg/L
Dicloroeteno	1,0 mg/L
Estireno	0,07 mg/L
Etilbenzeno	0,84 mg/L
Fenóis totais	0,5 mg/L
Tetracloreto de carbono	1,0 mg/L
Tricloroeteno	1,0 mg/L
Tolueno	1,2 mg/L
Xileno	1,6 mg/L

Fonte: (id ibid.).

Diante desses parâmetros legislatórios e regulamentações, as condições deverão ser seguidas e exigem posturas éticas quanto aos recursos utilizados e com os resíduos gerados, sabendo da sua disposição e agressão ao meio ambiente impactando a sociedade como um todo.

Resíduo Sólido

Caracterizar os resíduos sólidos (RS), como próprio nome indica, significa identificar particularidades ou características próprias destes resíduos no que diz respeito à tipologia e à quantidade presente. A tipologia varia de acordo com o objetivo da caracterização, mas podem ser classes de resíduos (classes A, B, C, D e E para RSS e outras), análises químicas como pH, carbono/nitrogênio (C/N), e outras até mesmo a densidade dos resíduos, que é a característica peculiar daqueles resíduos e para aquela fonte geradora. De modo geral, todos estes componentes ou tipologias, podem ser agrupados de forma genérica de acordo com três aspectos principais: características físicas, características físico-químicas e características biologicas (VIANA, 2015, p. 1).

Os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT NBR 10004, 2004, p. 1).

Segundo a Lei n° 12.305 de 2 de agosto de 2010, Art. 9. Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução,

reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

De acordo com a NBR 10004, os resíduos sólidos são divididos em dois grupos: perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II). Sendo ainda os de Classe II subdividido em não inerte (Classe II-A) e inerte (Classe II_B).

Apesar de os efluentes não terem legislações específicas, os resíduos provenientes de processo de purificação dos metais são definidos pela NBR 10004 como resíduos sólidos e, portanto, devem seguir as regulamentações específicas por essa norma.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA

Este refere-se ao conjunto de estudos sobre um determinado assunto, onde o processo de investigar nos leva a praticar o descobrimento e a provar aspectos, ou um estudo já realizado. O papel de quem exerce a investigação científica é apresentar uma conclusão a sua pesquisa, descrever suas experiências e por suas hipóteses e teses para ser novamente em um futuro testada por outros.

A seguinte sequência de passos através dos quais é conduzida uma investigação segundo Dutra (2008, p.282):

1. Uma situação indeterminada de dúvida, na qual uma questão é colocada;
2. A constituição de um problema, isto é, perceber que aquela situação requer investigação;
3. A determinação da solução para o problema, ou seja, a indicação da possibilidade de solução de um problema (uma hipótese) e as direções em que isso pode ser feito;
4. O raciocínio, ou o desenvolvimento das implicações ou consequências da hipótese ou solução aventada; e
5. A corroboração (ou verificação) da hipótese levantada, por meio de experimentação e observação ulterior.

Normalmente uma investigação cientifica provem de um problema ou duvida que necessita de solução em uma determinada área, seja colocando um estudo em prática, testando o que já foi feito anteriormente, ou constituindo uma inovação ou uma adaptação à um novo processo ou até mesmo já existente.

Com base nas premissas de Dutra, desenvolveu-se uma investigação de abordagem prática, testando um método existente, baseado na dúvida de sua eficiência e com a preocupação dos seus resíduos gerados, fazendo as adaptações necessárias partindo da pergunta de pesquisa (problema central), onde durante sua solução apareceram questões subsidiárias que contribuíram para alcançar os objetivos do projeto.

O método utilizado foi o estudo de caso, onde abordou-se e procurou solucionar a “Purificação e recuperação de metais precioso”. Segundo Ary, Jacobs e Razavieh (1987), o

estudo de caso supõe a definição de objetivos como seja, o descrever e analisar situações únicas, gerar hipóteses contrastáveis com outros estudos, diagnosticar uma situação.

Nesse sentido, a abordagem escolhida, foi a quantitativa, confirmando experimentalmente um método existente, que objetiva sua reprodução e testa sua confiabilidade.

PROCESSO DE SEPERAÇÃO E PURIFICAÇÃO

O processo de purificação foi realizado de acordo com os métodos estudados anteriormente, mas foi necessário adaptações, por falta de equipamentos como um triturador para separar os resíduos, então foi utilizado um material já pronto no tamanho de partículas para uma maior área superficial de contato com o ácido, onde objetivou-se o problema que é **a recuperação do ouro e da prata tendo em vista viabilidade ambiental do processo**. Portanto o desenvolvimento da prática utilizou as bibliografias como base para solucionar as variáveis do processo.

Purificação dos metais

Para purificação dos metais (ouro e prata) foi preparado uma amostra com aproximadamente 10 gramas de material (resíduos e metais), sendo suficientes para realizar um ensaio e comprovar a eficiência do método de purificação com água régia.

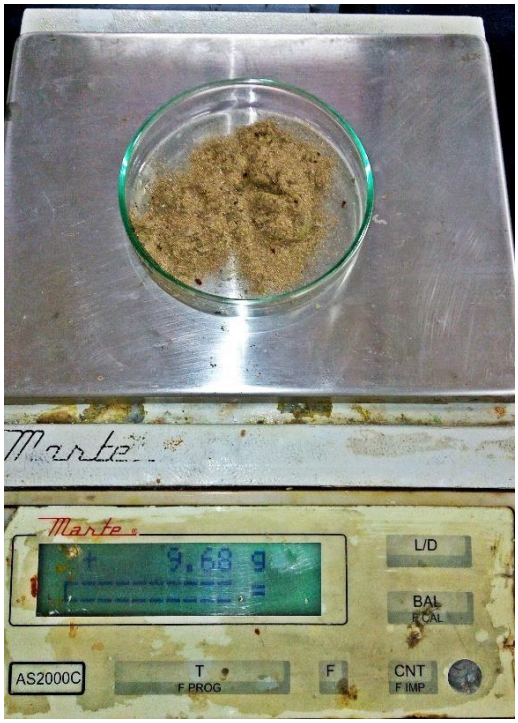
Sperb (2008) considera o método como o que atinge uma pureza elevado dos metais, além de baixo consumo dos produtos químicos e baixa poluição ambiental, sendo o método usado hoje em dia no mundo inteiro.

Preparo da amostra

O preparo da amostra foi realizada na oficina, onde pegou-se parte dos resíduos da bancada de ourives (Figura 11). A sua preparação foi feita com o auxílio de um imã, para retirada de partículas de ferro, sabendo-se que os metais ouro e prata não se atraem com o imã,

retirando a hipótese de possível contaminação do processo químico posterior. Logo após pesou-se o resíduo previamente preparado (Figura 15) com objetivo de analisar o processo.

Figura 15 – Amostra de resíduos de oficina de joias.

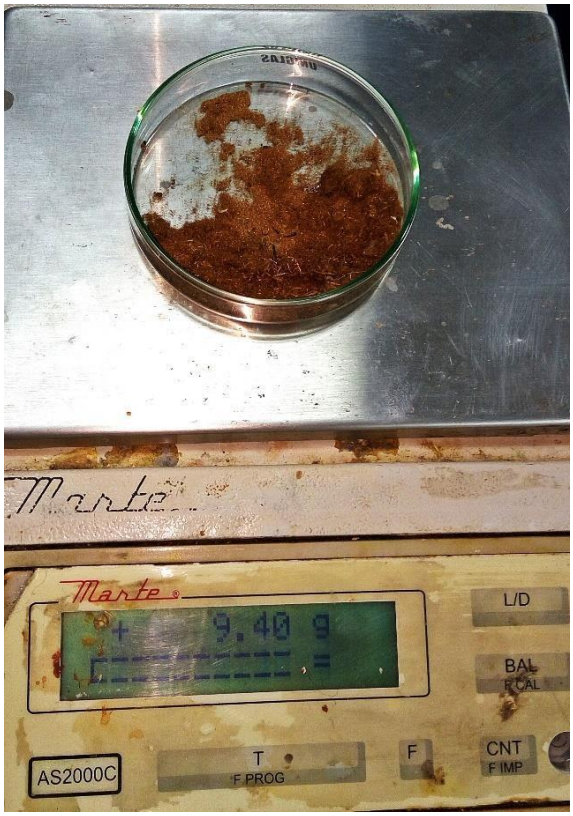


Fonte: do autor, 2019.

Incineração

A incineração neste processo consistiu-se em reduzir a quantidade de matéria orgânica presente na amostra, utilizou-se uma estufa a uma temperatura que variou de 300°C até 450°C, por um período de meia hora, somente com o objetivo de verificar a variação de peso da amostra, esperou-se a placa de Petri esfriar para não ter variação na pesagem. A nova pesagem da amostra (figura 16) foi realizada e observou-se uma variação na faixa de 0,28 gramas, mas ainda havia a presença de pó de madeira que visualmente podia ser identificada.

Figura 16 – Amostra após a incineração



Fonte: do autor, 2019.

Como o tempo demandado para incineração de toda matéria orgânica é grande optou-se em somente verificar a variação do peso da amostra, para validar o processo, sabendo que posteriormente esse resíduo ficaria precipitado junto a prata, e que o ouro iria se dissolver em água-régia. Após a separação da prata, ela fica retida na primeira filtração e no fim a matéria orgânica com a fundição da prata seria liberada como dióxido de carbono.

O processo de incineração é mais eficiente quando feito com os resíduos do processo de polimento, lixas e cadinhos, onde a presença de matéria orgânica é bem maior.

Dissolução em água-régia

De acordo com os dados práticos dispostos por Sperb (2008) o ponto de partida para essa finalidade, cujo o teor médio de ouro puro poderá ser de 75%, e o restante 25% as ligas, levando em conta que o quilate de ouro trabalhado na presente oficina é o 18 quilates, nesse caso desconsiderando a matéria orgânica, para definirmos a quantidade de água-régia a

ser utilizada para a dissolução, partindo do peso da amostra fez-se uma regra de três com o método disposto no livro:

100g de metal – 300ml de água-régia

9,40g de metal – X ml de água-régia

X = 28,20ml de água-régia. **(18)**

Sabendo que a água-régia é composta por 75% de ácido clorídrico e 25% de ácido nítrico, as quantidades utilizadas foram respectivamente 21,15ml e 7,05ml.

Com auxílio de uma manta de aquecimento, preparou-se um recipiente de vidro com água para levar a reação em banho-maria, até uma temperatura de 80°C, para que não ocorressem perdas de metais por ebulição da solução referida, por um período de 10 minutos. Ao fim desse processo dilui-se a solução com água, foram adicionados em torno de 100mL de água destilada para realizar a filtração do cloreto de prata.

Ao fim da reação realizou-se a filtragem do precipitado, onde foi adicionado mais 200mL de água morna (60°C) para lavar bem o filtro e sólido precipitado, no caso o cloreto de prata que não é solúvel em água-régia e resquícios de resíduos orgânicos (Figura 17), após a secagem em estufa, o filtro totalizou um peso de 4,96g, onde subtraindo o peso do filtro (1,2 gramas) temos uma amostra com 3,76g.

Figura 17 – Filtro com prata e resíduos orgânicos.

Fonte: do autor, 2019.

Feito a primeira filtração restou o ouro e o restante da liga dissolvidos em solução. O próximo passo é precipitar o ouro com um agente redutor (sulfito de sódio). De acordo com a prata recuperada, fez-se o cálculo da quantidade de ouro e do cobre que poderia estar contido em solução, simplesmente subtraindo do peso obtido de cloreto de prata e do resíduo.

Total Amostra = 9,40g

Cloreto de Prata + Resíduo = 3,76g

Ouro + ligas = 5,64g **(19)**

Levou-se em consideração que poderia ter uma maior quantidade de prata, pois na bancada de joias se trabalha com o mesmo, podendo haver a mistura dela com o pó de ouro. A liga de ouro 18 quilates é composta de 12,5% de prata e 12,5% de cobre, totalizando os 25% de liga presentes em quilates do ouro. Então fez-se o cálculo da quantidade de ouro que poderia ter na solução:

Ouro + ligas = 5,45g

Cobre (12,5%) = 0,68125g **(20)**

Ouro (75%) = 4,23g **(21)**

A quantidade de sulfito que seria necessário adicionar considerando 4,52 gramas de ouro em solução de acordo com a estequiometria da reação a seguir.

Formação do dióxido de enxofre:

$Na_2SO_{3(s)} + 2HCl_{(l)} = SO_{2(g)} + 2NaCl_{(s)} + H_2O_{(l)}$ (22)

Formação do ouro metálico:

$2HAuCl_{4(l)} + 3SO_{2(g)} + 6H_2O_{(l)} = 2Au_{(s)} + 8HCl_{(l)} + 3H_2SO_{4(l)}$ (23)

$$3SO_2 = 2Au$$

$$3mol.\ 64{,}066\frac{g}{mol} = 2mol.\ 196{,}96\frac{g}{mol}$$

192,198g de SO_2 – 393,92g de Au

X de SO_2 – 4,23g de Au

X = 2,06g de sulfito de sódio. **(24)**

Após adicionar o sulfito de sódio na solução, agitando-a por cerca de 2 minutos e esperou que a solução adquirisse a coloração marrom médio, comprovando a presença do ouro em solução. Caso não ocorresse se acrescentaria mais do agente redutor em pequenas porções. Considerou-se um excesso de reagente, caso houvesse a presença de mais ouro em solução e adicionou-se mais uma pequena quantidade de sulfito de sódio.

Filtração do ouro

A filtração do precipitado de cor marrom média (Figura 18) resultante da reação anterior, com auxílio de um papel filtro quantitativo, fez-se a filtração tomando alguns cuidados onde utilizou cerca de 200mL de água destilada morna (80°C) para remover todos os íons solúveis retidos no ouro filtrado, caso houvesse algum como a platina e o paládio e sempre realizando o processo lentamente, pois sabe que se trata de um material valioso.

Figura 18 – Filtro com precipitado de ouro.

Fonte: do autor, 2019.

Fundição

A fundição foi realizada em duas ocasiões ao decorrer do processo, primeiramente fez-se a fundição do filtro com a prata e os resíduos presentes (Figura 17), onde das 3,76 gramas presentes foram recuperados 3,2 gramas de prata (Figura 19), sendo o resto 0,56 gramas resíduos, resultado este esperado considerando que havia a presença de bastante resíduos junto a prata no filtro, enfatizando a importância do método de incineração, que faria a decomposição dessa matéria. A fundição foi feita com auxílio de um maçarico de oxigênio, um cadinho. Acrescentou-se bórax e nitrato de potássio junto ao material a ser fundido, com objetivo de purificar e auxiliar na fusão do pó de prata.

Figura 19 – Prata pura após sua fundição.

Fonte: do autor, 2019.

O mesmo processo se sucedeu para a fundição do ouro contido no outro filtro (Figura 18), este sem a presença de outros resíduos, sendo que o metal presente tinha o peso de cerca de 4,22 gramas. A fundição foi feita seguindo o mesmo processo feito anteriormente e conseguiu-se um resultado ótimo, recuperando 4,2 grama de ouro puro (Figura 20)..

Figura 20 – Ouro puro após sua fundição.

Fonte: do autor, 2019.

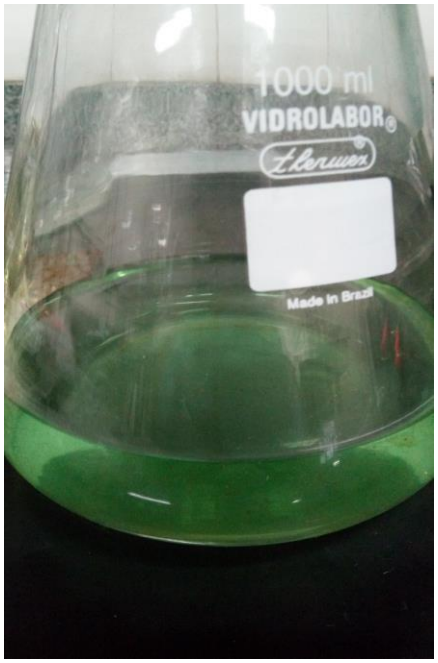
Tratamento dos resíduos

O tratamento dos resíduos foi realizado após a purificação do ouro e da prata, sendo ele uma solução ácida diluída em água. Sabe-se que por meio de uma neutralização poderíamos separar a água e neutralizar o ácido com uma base.

Neutralização do ácido

A neutralização foi realizada na solução (figura 21) utilizando uma solução básica de hidróxido de sódio 20% por meio de uma titulação com auxílio de uma bureta com torneira de 25ml, realizando-se a medição do pH até que ele atingisse o pH neutro, ou seja, próximo de 7. Adicionou-se cerca de 18,1ml hidróxido de sódio em uma amostra contendo 500ml.

Figura 21 – Solução proveniente da reação de purificação.



Fonte: do autor, 2019.

O resultado proveniente da titulação foi a formação de uma solução de coloração verde azulado (figura 22) que depois de poucos minutos em descanso formou-se o sal proveniente a neutralização.

Figura 22 – Neutralização dos resíduos.

Fonte: do autor, 2019.

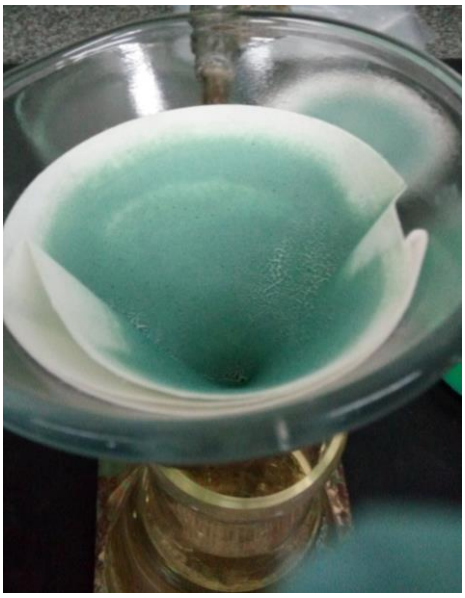
Da reação é possível a formação de dois sais, o cloreto de sódio e nitrato de sódio. As reações características desse processo são respectivamente:

$$NaOH_{(l)} + HCl_{(l)} = NaCl_{(s)} + H_2O_{(l)} \quad (25)$$

$$NaOH_{(l)} + HNO_{3(l)} = NaNO_{3(s)} + H_2O_{(l)} \quad (26)$$

Destaca-se que pode ter a presença de resíduos metálicos junto aos sais formados e também na solução, Fez-se então a filtração do sal formado (figura 23) e depois de seco foi recuperado cerca de 0,3062 gramas e encaminhada para uma análise de espectrometria de absorção atômica de chama, para identificar a quantidade de metais presentes no resíduo, para enfim dar a destinação correta.

Figura 23 – Filtro com o sal proveniente da neutralização.



Fonte: do autor, 2019.

A solução proveniente da filtração (Figura 24) resultou em uma coloração amarelada podendo ter talvez a presença de metais em pequena quantidade.

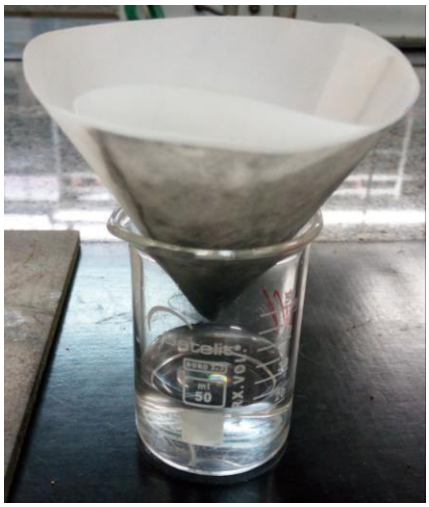
Figura 24 – Solução resultante da filtração.

Fonte: do autor, 2019.

Filtro de carvão ativado

Para que a coloração amarela da solução (Figura 24) fosse transformada em cristalina utilizou-se um filtro de carvão ativado, com o objetivo de reter as possíveis impurezas contidas na água resultante do processo, pegou-se um filtro faixa preta e cobriu-se com carvão. Aguardou-se a filtração da solução e o resultado ocorreu como o esperado (Figura 25), um líquido transparente.

Figura 25 – Líquido recuperado ao fim do processo.



Fonte: do autor, 2019.

O líquido resultante foi posteriormente levado para analises de água, para saber se atende as legislação para que possa ser descartada da maneira correta.

Análise da água recuperada

Para analisarmos a água recuperada no processo utilizamos um, que fez as análises de cor, turbidez e sólidos suspensos. A outra análise necessária para o processo é a de metais presentes, onde fez-se uma espectrofotometria de absorção atômica por chama da água recuperada analisou-se os seguintes metais: alumínio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, magnésio, níquel, prata, sódio e zinco. O método foi seguido de acordo com APHA (2012) onde para o alumínio o método foi o 3111 A.D e para o restante dos metais foi o método 3111 A.B.

Análise do sólido retido no filtro

Para a análise do filtro com resíduos (figura 23) fez-se toda a digestão ácida da amostra sólida de 0,3062g em 250mL. Com a amostra pronta para análise utilizando o método conforme LINK (1997) seguindo após o método 3111 A.D para o alumínio e o 3111 A.B para o restante dos metais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

PURIFICAÇÃO

A purificação da amostra se subdividiu em duas partes, a recuperação do ouro e o da prata, onde não abordou-se o restante da recuperação e presença de outros metais, como o cobre que sabe-se da presença dele por estar na composição das ligas de ouro 18 quilates e na prata 950 milésimas. Este tema ainda pode se estender, sendo considerado até uma oportunidade a ser explorado futuramente, sendo eles, a recuperação de lixos eletrônicos, objetos banhados como bijuterias e semijoias, lamas cianídricas, banhos de galvanoplastia, fixador fotográfico, chapas de raio X e até catalisador automotivo, onde há presença de metais preciosos e que podem ser recuperados, sendo preparados antes, e por fim utiliza-se o mesmo processo abordado nesta pesquisa para purifica-los.

Os resultados obtidos (Tabela 8) demonstram a quantidade em gramas e percentual, onde foi considerado o cálculo das ligas presentes de acordo com o percentual de ouro recuperando, onde em uma liga de ouro 18 quilates é a composta de 75% de ouro e 25% de ligas. Destas ligas 12,5% é prata e 12,5% de cobre, no caso desta oficina em questão. Então a quantidade de ligas presentes na amostra foi calculada em cima do percentual de cobre acima citado. Os resíduos orgânicos foram provenientes da soma do que foi evaporado na incineração cerca de 0,28 gramas mais o que foi queimado na fundição 0,56 gramas, sabendo que no processo de fundição foi recuperado todo material presente. A quantidade do total recuperado foi considerado o somatório do ouro, da prata, das ligas e dos resíduos orgânicos, pois assim sabemos o percentual mais precisamente do que foi recuperado.

Tabela 9 – Resultados obtidos da purificação.

Descrição	Quantidade (g)	Percentual (%)
Ouro	4,2	43,39%
Prata	3,2	33,06%
Ligas	0,525	5,42%
Resíduos orgânicos	0,84	8,68%
Total Amostra	9,68	100,00%
Total Recuperado	8,765	90,55%

Fonte: do autor, 2019.

O processo nos diz bastante do que foi atingido, como podemos perceber havia bastante prata presente nos resíduos provenientes da bancada de ouro, pois nesta oficina é feita

a separação dos dois para que facilite a purificação. O resultado de 90,55% já é um ótimo resultado, sabendo que o cobre não foi purificado no processo.

Características do ouro recuperado

O processo de purificação foi bastante satisfatório, tanto na pureza quanto na quantidade recuperada. O ouro demonstrou as características físicas citadas no item 2.1.1, quando puro, e mostrou maleabilidade quando foi levado ao processo de laminação, onde quando há impurezas ele se torna quebradiço. Sua coloração marrom avermelhado quando purificado obedeceu as características apresentadas nas bibliografias. O teste do ouro foi realizado com um ácido específico (Figura 26), onde lixa-se uma parte da peça e adiciona-se um pouco da solução, o teste não acusou nada, sendo assim é ouro, se caso manchasse o metal poderíamos chegar à conclusão de que o quilate dele é menor do que 18 quilates, ou se borbulhasse chegaríamos a conclusão de que o metal não é ouro.

Figura 26 – Teste de ouro utilizado na joalheria.

Fonte: Rock, 2017.

Conclui-se então que o processo de recuperação do ouro foi realizado de acordo com a bibliografia e trouxe resultados que podem ser replicados na empresa. O ouro após ser purificado logo já foi testado em uma nova fabricação de joia, e manteve as características de coloração e pureza que são priorizadas pela joalheria.

Características da prata recuperada

A prata recuperada no processo conferiu as propriedades físicas de maleabilidade e ductilidade. Foi aplicado o teste de toque, este específico para prata utilizado em joalheria para saber se o material é realmente verdadeiro, e acusou a cor vermelha, sendo então de acordo com a escala de cores (Tabela 9) prata pura. Teste esse que é preparado com ácido nítrico diluído e algum corante específico.

Tabela 10 – Escala de cores para teste de metais.

Cor	Metal
Vermelho	Prata Pura
Vermelho escuro	Prata 925
Marrom	Prata 800
Verde	Prata 500
Amarelo	Chumbo ou estanho
Marrom Escuro	Bronze
Azul	Níquel

Fonte: do autor, 2019.

A prata assim como o ouro manteve o padrão de qualidade exigido pela empresa, para que o produto continue sendo distribuído com excelência.

TRATAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS

Para realizar a análise de resíduos gerados, foi necessário conhecer o processo e suas respectivas reações químicas para as possíveis soluções e destinações dos mesmos. No primeiro momento foram requeridos testes de espectrometria de absorção por chama e espectrometria UV/VIS para analisar os resíduos líquido e sólido gerados.

Resíduo líquido

A (Tabela 11) apresenta o resultado obtido na análise do resíduo líquido feito na UNISUL e faz a comparação de acordo com a Legislação do CONAMA n°430/2011 afim de avaliar os parâmetros para efetuar o lançamento em rede.

Tabela 11 – Apresentação dos resultados dos parâmetros analisados da água recuperada.

Parâmetros	Água Tratada	Legislação
pH	7	5 a 9
Cor (Hz)	15,1	-
Turbidez (FAU)	2	-
Sólidos Susp. ($mg.L^{-1}$)	6	500

Fonte: CONAMA n°430, 2011.

Entretanto, sabendo que se trata de resíduos provenientes de purificação de metais fez-se uma análise de metais. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 11 em comparação com a Legislação do CONAMA n°430/2011.

Tabela 12 – Resultado da espectrofotometria de absorção de chama para o resíduo líquido.

Metal	Amostra Líquida (mg/L)	Legislação (mg/L)
Prata	0,12	0,02
Magnésio	26,06	-
Cádmio	0,012	0,1
Chumbo	0,08	0,5
Níquel	Nd.	1
Cromo	0,07	0,1
Cobre	0,238	0,5
Sódio	43,59	-
Alumínio	0,22	-
Zinco	0,082	1

Fonte: CONAMA, 2011; Santa Catarina, 2009.

Avaliando os resultados não será possível descartar o efluente diretamente no corpo receptor, pois, as condições e padrões do lodo analisado não atendem as exigências previstas na Legislação do CONAMA n°430/2011. Como possível solução e um estudo futuro poderia ser realizado a troca do filtro de carvão ativado (Figura 25) por um filtro de Zeolita, sendo este mais eficiente na remoção de metais pesados presentes em solução. Nada consta na legislação a respeito da presença de ouro, mas pode-se concluir que há a presença assim como teve a de prata, pois o rendimento da reação foi de 90,55%.

Não foi possível realizar a avaliação da presença de ouro por falta de recursos, mas sabe-se que para fins científicos seria de extrema importância ter este dado para quantificarmos com mais exatidão os resultados obtidos.

Classificação de Resíduo Sólido

Para os resíduos sólidos a classificação é diferente e seguiu-se a ABNT NBR 10004 que separa a em três classes de resíduos. Fez-se a classificação e de acordo com as concentrações apresentadas pela norma comparou-se com os resultados obtidos (Tabela 12).

Tabela 13 – Resultado da espectrofotometria de absorção de chama para o resíduo sólido.

Metal	Amostra Sólida (mg/L)	Classificação	Legislação (mg/L)
Prata	0,0005	Resíduos classe II B	0,05
Magnésio	20,11	Resíduos classe II B	-
Cádmio	1,55	Resíduos classe II A	0,005
Chumbo	0,87	Resíduos classe II A	0,01
Níquel	3,17	Resíduos classe I	-
Cromo	0,523	Resíduos classe II A	0,05
Cobre	554,71	Resíduos classe II A	2
Sódio	33,14	Resíduos classe II B	200
Alumínio	5,16	Resíduos classe II A	0,2
Zinco	14,57	Resíduos classe II A	5

Fonte: ABNT, 2004.

Os resultados para o cádmio, chumbo, cromo, cobre, alumínio, zinco e níquel que foram acima do que a legislação permite, classificam-se como resíduos classe II A como não inertes, pois estão acima da concentração permitida que são solubilizados em ensaios padrões. O sódio e a prata classificam-se como resíduos classe II B como inertes, pois estão abaixo da concentração que podem ser solubilizados em ensaios padrões. O magnésio é classificado como classe II B por não constar nos ensaios nem em classificação de periculosidade. O níquel é o único classe I sendo perigoso por sua toxicidade. Depois de sua classificação ele pode ser destinado para um aterro sanitário.

Como esperado as concentrações maiores foram de cobre, sendo a liga mais utilizada para constituir o ouro 18 quilates, para fins quantitativos pode-se verificar quanto de metais estava presente na amostra, sabendo que a diluição da amostra foi feita em 0,3062g por 250mL.

Não foi realizado a purificação do cobre conforme item 2.7, mas é um processo simples e que diminuiria muito a quantidade de resíduos sólidos e líquidos. E para estudos futuros pode-se pensar na recuperação dos outros metais presentes.

VIABILIDADE

A análise de viabilidade de um novo processo pode ser realizada de acordo com o levantamento de investimento inicial e projetando resultados com base em testes feitos. Com base nessas premissas realizou-se um estudo de viabilidade simplificado objetivando demonstrar os dados obtido com essa pesquisa e converte-los financeiramente para mostrar se o projeto é viável ou não do ponto de vista econômico financeiro.

Foram separados em duas classes de custos para realizar o processo de purificação os custos com equipamentos e materiais (Tabela 11) que foram classificados como custos não recorrentes, pois são materiais que só necessitarão de troca se quebrados ou contaminados.

Tabela 14 – Lista de materiais e equipamentos.

Descrição	**Quantidade**	**Preço Unitário**	**Total**
Bomba de Vácuo	1	R$ 373,00	R$ 373,00
Balança 0,01g	1	R$ 178,90	R$ 178,90
Bastão de vidro	2	R$ 1,12	R$ 2,24
Becker 100ml	2	R$ 9,43	R$ 18,86
Becker 250ml	2	R$ 15,33	R$ 30,66
Bureta com torneira 25ml	1	R$ 95,89	R$ 95,89
Cadinho Copo 500ml	4	R$ 16,90	R$ 67,60
Capela	1	R$ 1.870,00	R$ 1.870,00
Escova para lavagem	2	R$ 5,35	R$ 10,70
Fita de pH	1	R$ 27,90	R$ 27,90
Forno	1	R$ 1.899,00	R$ 1.899,00
Funil de Vidro	2	R$ 12,20	R$ 24,40
Kitazato 500ml	2	R$ 61,05	R$ 122,10
Luvas	1	R$ 25,63	R$ 25,63
Maçarico de Oxigênio	1	R$ 1.699,00	R$ 1.699,00
Manta de Aquecimento	1	R$ 437,56	R$ 437,56
Óculos de Segurança	1	R$ 4,08	R$ 4,08
Papel filtro Faixa preta	1	R$ 16,85	R$ 16,85
Pipeta 25ml	3	R$ 45,36	R$ 136,08
Pipetador	2	R$ 17,77	R$ 35,54
Placa de Petri	2	R$ 5,36	R$ 10,72
Suporte do Cadinho 500ml	2	R$ 19,90	R$ 39,80
Suporte Universal	1	R$ 47,96	R$ 47,96

Termômetro	1	R$ 76,68	R$ 76,68
Total	**-**	**R$ 6.589,22**	**R$ 6.878,15**

Fonte: do autor, 2019.

A outra classe são os reagentes (Tabela 12) necessários para realizar o processo e também para realizar a purificação do mesmo, estes classificados como custos recorrentes, pois necessitam de reposição com frequência.

Tabela 15 – Lista de reagentes.

Descrição	Unidade	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
Ácido Clorídrico	L	1	R$ 36,50	R$ 36,50
Ácido Nítrico	L	1	R$ 47,99	R$ 47,99
Água Destilada	L	1	R$ -	R$ -
Borax	kg	1	R$ 11,99	R$ 11,99
Carvão Ativado	kg	1	R$ 19,90	R$ 19,90
Hidróxido de Sódio	kg	1	R$ 19,90	R$ 19,90
Nitrato de Potássio	kg	1	R$ 17,90	R$ 17,90
Sulfito de Sódio	kg	0,5	R$ 55,40	R$ 27,70
Total			**R$ 209,58**	**R$ 181,88**

Fonte: do autor, 2019.

Fez-se uma análise do custo dos produtos utilizados (tabela 13) com suas respectivas unidades do processo realizado em laboratório para recuperação dos metais e comparou-se com a quantidade recuperada (tabela 8). O cálculo realizado foi pegando a quantidade utilizada do reagente dividindo pela quantidade total e multiplicando pelo seu preço resultando na variável de valor gasto, que auxilia a percepção de quanto foi gasto para recuperar os metais. O valor recuperado dos metais recuperados foram com base na sua cotação do dia 10 de novembro de 2019, sendo respectivamente 1 grama de ouro R$ 195,28 e 1 grama de prata R$2,24987 de acordo a Wordsilver.

Tabela 16 – Custo e valor recuperado em um processo.

Descrição	Quantidade	Valor gasto	Valor Recuperado
Peso Amostra (g)	9,4	R$ -	R$ -
Peso Papel Au	1	R$ 0,17	R$ -
Peso Papel Ag	1	R$ 0,17	R$ -
Peso Papel Resíduo	1	R$ 0,17	R$ -
Ácido Clorídrico (ml)	22,2	R$ 0,81	R$ -
Ácido Nítrico (ml)	7,4	R$ 0,36	R$ -
Água Destilada (ml)	300	R$ -	R$ -

Sulfito de Sódio (g)	4,5	R$	0,50	R$	-
Hidróxido de Sódio 20% (ml)	18,1	R$	0,72	R$	-
Ouro Recuperado (g)	4,2	R$	-	R$	820,18
Prata Recuperada (g)	3,2	R$	-	R$	7,20
Total	**7,4**	**R$**	**2,89**	**R$**	**827,38**

Fonte: do autor, 2019.

Podemos perceber que o processo é bastante rentável, pois mesmo se considerarmos maiores quantidade de resíduos, ainda assim o valor é muito maior. Ainda pode-se fazer o cálculo se o processo for realizado e transformado em uma joia, onde utilizou-se os valores de venda da empresa em questão. Para o ouro o preço é R$400,00 a grama e para prata R$ 15,00 a grama. Neste caso o valor recuperado passa de R$827,38 para R$1728,00.

Visto o valor que recuperou-se de uma pequena amostra e sabendo que a oficina anualmente recupera em torno de 30 gramas de ouro e 60 gramas de prata, com este valor fez-se uma estimativa de que levaria em torno de 1 ano de 2 meses para retornar-se o investimento inicial e a uma taxa interna de retorno de 82,90%.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou fazer uma análise prática de como **purificar metais preciosos** assim como seus **resíduos gerados**. Além disso, também permitiu uma pesquisa teórica bem aprofundada com grande possibilidade de aplicação, bem como sua importância para o processo de fabricação de joias, tendo relevância por ser introduzido o estudo dos resíduos líquidos e sólidos afim de dar a correta destinação.

Sugeriu-se o processo de precipitação química visto que este atendeu os requisitos de custo benefício, eficiência e é aplicado para pequenas quantidades, sendo o único processo que dissolve o ouro, a platina, o paládio. O resultado da purificação da amostra foi de 90,55%, visto que o processo pode ser melhorado, pois poderia ter sido realizado uma nova filtração adicionando um excesso de sulfito de sódio. Realizou-se a purificação dos resíduos por meio de uma neutralização e com as análises de espectrofotometria de absorção por chama percebeu-se a presença de prata em excesso no resíduo líquido e o resto dos metais estaria no padrão para descarte, como solução pensou-se em um filtro de Zeólita, visto que este é próprio para retenção de metais pesados. Estima-se que o ouro estaria presente no resíduo também na proporção da prata, mas não foi possível realizar esta análise. O resíduo sólido apresentou o cobre em seu maior teor, sendo esperado pois é componente presente nas ligas e sua purificação poderia ser feita por um processo de eletrólise.

Por fim ao realizar o levantamento dos custos do processo foi possível analisar a viabilidade do estudo. O projeto demonstra ser viável do ponto de vista econômico e financeiro. Para evidenciar este resultado foi utilizada duas ferramentas que trouxeram dados bastante positivos. A taxa interna de retorno ficou em 82,90% sendo que para retornar o investimento inicial precisaria de um ano e dois meses.

REFERÊNCIAS

ADAMON. **Bancada de Ourives AC.** Disponível em: https://www.adamon.com.br/produto/banca-ac/. Acesso em: 17 out. 2019.

ADAMON. **Politriz SV 100.** Disponível em: https://www.adamon.com.br/produto/politriz-sv-100/. Acesso em: 17 out. 2019.

ALCADE, Miguel. **Tipos de cravação.** Disponível em: https://miguelalcade.com.br/2016/09/14/cravacao-de-gemas-saiba-mais-sobre-esse-tecnica/. Acesso em: 20 out. 2019.

APHA. Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater, 22nd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf. Acesso em: 12 nov. 2019.

ARY, D.; JACOBS, L.; RAZAVIEH, A. **Introducción a la investigación pedagógica.** Interamericana. México, 1987.

BARBOSA, Juliano. **Refino de ouro.** CETEM/MCT, 2002. Disponível em: 1. Acesso em: 29 out. 2019.

BCB, Banco Central do Brasil. **Política de responsabilidade socioambiental.** Resolução nº4.327, 25 de abril de 2014. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/2014/pdf/res_4327_v1_O.pdf. Acesso em: 19 nov. 2019.

BRASIL, Agência. **INMETRO estabelece limite para metais pesados em bijuterias e joias.** Disponível em: http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-02/inmetro-estabelece-limite-para-metais-pesados-em-bijuterias-e-joias. Acesso em: 29 out. 2019.

BRASIL, Presidência da República. Lei n°12.305 de 2 de agosto de 2010. **Política nacional de resíduos sólidos.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 20 nov. 2019.

BROWN, T. L. *et al.* **Química, a ciência central.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 9. ed. 2005.

CARVALHO, Sérgio. **Matemática financeira simplificada para concursos: teoria e questões com gabarito comentado.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

CODINA, Carles. **La Joyeria.** 1. Ed. Lisboa: Editorial Estampa, 2000.

CONAMA. Resolução n°430, de 13 de maio de 2011. **Padrões de lançamentos de efluentes.** Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646. Acesso em: 12 nov. 2019.

DOMINGUES, Rosely; PAULINO, Sônia. **Potencial para implantação da produção mais limpa em sistemas locais de produção: o polo joalheiro de São José do Rio Preto.** São Carlos, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/gp/v16n4/a16v16n4.pdf. Acesso em: 19 nov. 2019.

DUTRA, Luiz. **Pragmática da investigação científica.** Edições Loyola, São Paulo, 2008.

DUTRA, Marluci. **Recuperação de ouro de cadinhos.** Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=aTEJ2hTdclg. Acesso em: 20 out. 2019.

IBGM. **O setor em grandes números 2018: gemas, joias e metais preciosos**. Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos. São Paulo, 2018. Disponível em: http://ibgm.com.br/publicacao/publicacao-o-setor-em-grandes-numeros-2018/. Acesso em: 10 nov. 2019.

ISO. **Determination of turbidity.** Disponível em: https://www.iso.org/standard/62801.html. Acesso em: 08 nov. 2019.

JOÃO, Jair; EMERICK, Tuane; FILHO, Urias; NISHIHORA, Rafael. **Processo de eletrocoagulação-flotação: investigação dos parâmetros operacionais para o tratamento de águas residuais da indústria de pescados.** Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/qn/v41n2/0100-4042-qn-41-02-0163.pdf. Acesso em: 08 nov. 2019.

KLIAUGA, M. A.; FERRANTE, M. **Metalurgia básica para ourives e designers: do metal à joias.** São Paulo: EDGARD BLUCHER LTDA, 2009.

OLDCORN, Roger; PARKER, David. **Decisão estratégica para investidores – avaliando oportunidades em mercados dinâmicos.** São Paulo: Nobel, 1998.

ROJAS, Carol. **Reciclagem de sucata de joias para recuperação hidrometalúrgica de ouro e prata.** UFMG, Minas Gerais, 2009. Disponível em: https://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1294M.PDF. Acesso em: 29 out. 2019.

SANTA CATARINA (Estado). Lei n°14.675, de 13 de abril de 2009. **Recursos hídricos.** Disponível em: http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2009/14675_2009_lei.html. Acesso em: 12 nov. 2019.

SÃO PEDRO, CASA. **Serra copo Stamaco de aço carbono.** Disponível em: https://www.casasaopedro.com.br/serra-copo-aco-carbono-6-pecas-adaptador-stamaco. Acesso em: 20 out. 2019.

SILVER, World. **Cotação do ouro e da prata.** Disponível em: https://www.worldsilver.com.br/cotacao-da-prata. Acesso em: 10 nov. 2019.

SPERB, Eduardo. **Purificar metais precioso.** São Leopoldo, Nova Harmonia, 2008.

ROCK, Ourives. **Teste de ouro e de prata.** Blogspot. 2017. Disponível em: https://ourivesrock.blogspot.com/2010/06/acido-de-toque-18-k-750.html. Acesso em: 07 nov. 2019.

TENGNON, E. **Análise de metais nobres – ensaio de fogo. Parte 1. Construção de cadinhos e copelação.** Ecl. Química, São Paulo, 10; 63-71, 1985.

TOCCHETTO, Marta Regina Lopes. **Tratamento de Resíduos: Recuperação de Prata**. Santa Maria, 2003. Disponível em: http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/resisoli/iii-026.pdf. Acesso em: 29 out. 2019.

VERÓL, Aline. **Procedimentos analíticos e resultados no monitoramento do tratamento de esgotos.** 23° Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. Disponível em: http://aquafluxus.com.br/wp-content/uploads/2012/03/X-003.pdf. Acesso em: 08 nov. 2019.

VIANA, Ednilson. **Caracterização de resíduos sólidos: uma abordagem metodológica e propositiva.** São Paulo, jul. 2015.

VICHI, Eduardo J. S.; CHAGAS, Aécio Pereira. **Sobre a força de ácidos e bases: algumas considerações.** Quím. Nova vol.31 no.6 São Paulo, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422008000600052. Acesso em: 20 out. 2019.

VOGEL, Arthur. **Química analítica qualitativa.** 5. ed. São Paulo: Mestre Jou, 1981.

VOGEL, Arthur. **Química analítica qualitativa.** 5. ed. São Paulo: Mestre Jou, 1979.

VOGEL, Arthur. **Análise inorgânica quantitativa; incluindo análise instrumental elementar.** Vogel; revista por J.Bassett... [et.al.]; traduzido por Aïda Espinola. - 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986.

VOGEL, Arthur. **Química analítica cuantitativa.** 2. ed. Argentina, 1969.

WELLER, Mark. **Química inorgânica.** 6. ed. 2017.