

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

MAIARA ANDRADE DE ARAÚJO

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA RECUPERAÇÃO DE OURO E OUTROS METAIS A
PARTIR DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais d
Escola Politécnica da USP

SÃO PAULO

2018

MAIARA ANDRADE DE ARAÚJO

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA RECUPERAÇÃO DE OURO E OUTROS METAIS A
PARTIR DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, Departamento
de Engenharia Metalúrgica e de Materiais,
como requisito para a obtenção do título de
Engenheira de Materiais.

Orientador: Profº Drº Eduardo Franco
Monlevade

SÃO PAULO

2018

TF 2018
Pn 15 a

2895903
H-2018 D

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009340

Catálogo-na-publicação

Araújo, Maiara Andrade de

Análise de viabilidade da recuperação de ouro e outros metais a partir de resíduos eletrônicos / M. A. Araújo -- São Paulo, 2018.

51 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Resíduos eletroeletrônicos 2. Extração secundária 3. Ouro 4. Reciclagem
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

8038390

À Marina, João e ao Anderson, que acreditaram nesse sonho antes que eu mesma tivesse certeza de que era a escolha certa.

AGRADECIMENTOS

À todos que de alguma forma colaboraram com a elaboração desse trabalho, seja direta ou indiretamente, muita gratidão.

Ao professor Dr. Eduardo Monlevade, por toda orientação, ajuda, incentivo, disponibilidade e principalmente por topar embarcar nesse desafio junto comigo.

Aos meus pais, irmão e cunhada, por todo o amor, paciência, compreensão, incentivo e por todo o apoio durante toda essa trajetória.

Ao time de futsal da Poli, maior motivação e melhor válvula de escape para os momentos mais difíceis da jornada.

Ao Rafael Rocha Maia, pelo suporte para realização desse trabalho e ao longo de vários anos da graduação.

Ao professor Dr. Hercílio Gomes de Melo por ter cedido o Laboratório de Processos Eletroquímicos para realização da parte experimental e a Janeth Marlene Quispe Avilés por ter me auxiliado ao longo do ensaio.

Aos amigos e colegas da Poli e PMT por toda a parceria, estudos nas mesinhas, exercícios resolvidos no Whatsapp, noites mal dormidas, enfim, todo companheirismo nesses anos.

Por fim, todos os amigos e família que me acompanharam desde que tomei a decisão de me preparar pra estudar na Poli até agora. Gratidão.

"However bad life may seem, there is
always something you can do and succeed
at. Where there's life, there's hope."

(Stephen Hawking)

RESUMO

A geração dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no mundo chega à 50 milhões de tonelada/ano, montante esse que cresce 3x mais rápido do que todas as outras classes de resíduos urbanos. A preocupação ambiental e humana com esse tipo de rejeito ocorre principalmente em decorrência da presença de metais tóxicos como chumbo, mercúrio e cromo, que são elementos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Apesar disso, também estão presentes nessa classe de material diversos outros metais como cobre, estanho e alumínio, bastante utilizados na indústria, além de uma fração mínima de metais preciosos, que apesar de constituírem somente 1% em massa, acabam representando mais de 80% em valor. O ouro - mais valioso dentre os metais presentes – possui alta demanda no mercado, além de preço elevado, de modo que se torna interessante a alternativa de criação de uma planta piloto para recuperação secundária do ouro a partir do lixo eletrônico em escala industrial.

Palavras-chave: resíduos eletroeletrônicos; extração secundária; ouro; reciclagem.

ABSTRACT

The generation of waste electrical and electronic equipment in the world reaches 50 million tons / year, an amount that grows 3x faster than all other classes of municipal waste. The concern with this type of waste occurs mainly due to the presence of heavy metals such as lead, mercury and chrome which are harmful to the human health and the environment. Despite this, a variety of metals such as copper, tin and aluminum, which are widely used in industry, are also present in this type of material, as well as a minimum fraction of precious metals, which, although they constitute only 1% by mass, account for more than 80% of value. The gold - more valuable among the present metals - has high demand in the market, besides a high price, so it becomes interesting the alternative of creating a pilot plant for the secondary recovery of the other from the electronic waste on an industrial scale.

Keywords: e-waste; secondary recovery; gold; recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Materiais encontrados nos REEE (% em massa)	18
Figura 2 - Rota percorrida pelos compostos químicos na natureza	20
Figura 3 - Principais países produtores primários de ouro	32
Figura 4 - Distribuição percentual do consumo de ouro por diversos setores no período de 2000-2007	33
Figura 5 - Histórico preço do ouro nos últimos 5 anos	36
Figura 6 - Amostras de cartão para realização de ensaio	37
Figura 7 - Chips de cartão de crédito	38
Figura 8 - Esquema utilizado para realização do ensaio	39
Figura 9 - Conjunto após término da reação	40
Figura 10 - a) Chips antes do ensaio; b) Chips após realização do experimento	41
Figura 11 - Amostras 2 após experimento	42
Figura 12 - Tanque misturador e bomba para transferência do material.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definições de resíduos eletrônicos.....	16
Tabela 2 - Limites máximos RoHS	22
Tabela 3 - Porcentagem média de metais em minérios e nas placas de circuito impresso.....	23
Tabela 4 - Metais recuperados a partir das principais técnicas de pirometalurgia	26
Tabela 5 - Produção mundial de ouro por extração mineral por países	31
Tabela 6 - Demanda dos principais setores fabricantes de produtos que contem ouro.	32
Tabela 7 - Reservas oficiais de ouro dos bancos centrais de países e instituições diversas	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	15
3	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1	Resíduos eletroeletrônicos	16
3.2	Legislação pelo mundo	20
3.2.1	WEEE e ROHS	21
3.2.2	Legislação brasileira	22
3.3	Placas de Circuito Impresso	22
3.4	Métodos para extração de metais dos REEE	24
3.4.1	Processamento Mecânico	24
3.4.2	Processamento Pirometalúrgico	25
3.4.3	Processamento Hidrometalúrgico	26
3.4.3.1	Método de peeling	27
3.4.4	Biometalurgia	28
3.5	Ouro	29
3.5.1	Extração primária e secundária	30
3.5.2	Produção e Consumo	31
3.5.3	Preços	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1	Materiais	37
4.2	Procedimento Experimental	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	Planta Piloto	42
5.1.1	Logística de obtenção de matérias-primas	43

5.1.2	Espaço físico	43
5.1.3	Equipamentos	44
5.1.4	Licenças	44
6	CONCLUSÃO	46
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS	48
	ANEXO A – COTAÇÃO DO OURO ÚLTIMOS 15 ANOS	50
	ANEXO B – COTAÇÃO DO OURO DESDE 1974	51

1 INTRODUÇÃO

O uso de aparelhos eletrônicos aumentou exponencialmente nas últimas décadas, em especial a partir dos anos 80, quando se desenvolveram tecnologias para uso individual. [1] Paralelamente, a quantidade de dispositivos eletrônicos como computadores e celulares que são descartados cresce na mesma velocidade.

Sucata eletrônica pode ser definida como todos estes equipamentos eletroeletrônicos, incluindo suas partes e componentes, que deixam de funcionar ou são considerados obsoletos pelos seus usuários. [2] É importante frisar, entretanto, que a despeito do que indica a nomenclatura - categorizando os eletrônicos usados como lixo - muitos desses materiais são reutilizados no chamado "mercado secundário". [3]

Lixo eletrônico possui em sua composição mais de 1000 substâncias diferentes, muitas delas tóxicas como mercúrio, chumbo, arsênio, cádmio e retardantes de chama que quando queimados emitem dióxidos na atmosfera. Além disso, esses elementos podem também causar danos cerebrais e reações alérgicas. Desse modo, ano após ano o acúmulo desses resíduos gera grandes preocupações ambientais devido à composição dessa sucata, que quando é descartada ou reciclada sem as precauções e técnicas adequadas, pode ser prejudicial tanto ao meio ambiente, quanto para a saúde humana. [4]

A despeito de todas essas preocupações, a sucata eletrônica também possui quantidade significativa de materiais com grande interesse comercial, como metais de base (cobre, ferro, alumínio) e metais preciosos (ouro, prata e platina), que possuem altíssimo valor agregado. [5] Assim, a reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) tem grande potencial como negócio comercial de fato. [4]

É importante destacar, no entanto, a importância da legislação e das iniciativas de gerenciamento de resíduos dos países de modo a regular as maneiras que o lixo eletrônico deve ser descartado, bem como propor maneiras onde os REEE são coletados, incentivando o ciclo da reciclagem e apoiando a ação numa possível rota comercial. O Brasil possui algumas normas para o destino da sucata eletrônica no fim de vida, como a de pilhas e baterias, porém sabe-se de regulamentações ainda mais

abrangentes em diversos países como Coréia do Sul, Japão, Taiwan e União Europeia. [3]

O Japão pode ser mencionado como um exemplo na extração de metais preciosos a partir do lixo eletrônico, dada a sua ação de produzir todas as medalhas das Olimpíadas de Tóquio 2020 a partir de metais extraídos de smartphones que foram doados pela população. [6]

Atualmente, os principais métodos utilizados para extração de metais dos REE são os processos pirometalúrgicos (mais tradicionais), hidrometalúrgicos que incluem lixiviação com cianeto, tiouréia e tiosulfato, além das técnicas de biotecnologia que estão sendo amplamente estudadas devido ao menor impacto ambiental que proporcionam. [7]

2 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivos principais:

- Apresentar um panorama geral a respeito de dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil e no mundo, passando por conceitos que vão desde tipos de produtos até composição média;
- Analisar a viabilidade da recuperação de ouro e outros metais provenientes desses resíduos;
- Avaliar o rendimento da extração do ouro utilizando o método de *peeling*.
- Efetuar um mapeamento das estruturas necessárias para o desenvolvimento de uma planta piloto para extração em escala industrial de ouro da sucata eletrônica utilizando o método de *peeling*.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Resíduos eletroeletrônicos

"Resíduo eletrônico" é um termo genérico que se refere a diferentes tipos de equipamentos eletroeletrônicos que de alguma forma deixaram de ter valor para quem os possui. [4]

Todas as definições de resíduos eletroeletrônicos que existem atualmente são muito abrangentes, desse modo é interessante conhecer os diferentes conceitos existentes pelo mundo. A Tabela 1 apresenta algumas dessas definições.

Tabela 1 - Definições de resíduos eletrônicos

Fonte	Definição
Diretiva europeia de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) [4]	Equipamentos elétricos e eletrônicos que são considerados resíduos (qualquer substância ou objeto onde o detentor se desfaz ou é obrigado a se desfazer por força de leis em vigor) incluindo todos seus componentes, partes e consumíveis que fazem parte do produto no momento do descarte
<i>Basel Action Network (BAN)</i> [4]	Dispositivos eletrônicos que vão desde grandes dispositivos domésticos, como geladeira, ar-condicionado, celular, aparelho de som, até computadores que forem descartados por seus usuários.
Congresso Nacional [8]	Resíduo gerado a partir de aparelhos eletrodomésticos ou eletroeletrônicos e seus componentes, incluindo acumuladores de energia (baterias e pilhas), e produtos magnetizados, de uso doméstico, industrial, comercial e de

			serviços, que estejam em desuso e sujeitos à disposição final.
Instituto Brasileiro de EcoTecnologia (BIET) [8]			Partes, peças, componentes ou resíduos da indústria mineral e de equipamentos de informática, incluídos a informação neles armazenada e os aparelhos eletrodomésticos e eletroeletrônicos.

Fonte: Adaptado de Widmer (2005, vol. 25, p. 439)

O desenvolvimento tecnológico e o crescimento substancial da população nas últimas décadas são os principais fatores responsáveis pelo grande aumento no volume de resíduos eletrônicos gerados. [5] Atualmente temos equipamentos que são substituídos quando ainda não chegaram ao fim de sua vida útil, apenas por terem se tornado “ultrapassados tecnologicamente”. [2] Isso se dá pelo barateamento dos componentes de fabricação e como consequência, menor preço final do produto, de modo que os consumidores tendem a comprar equipamentos mais avançados e descartar os anteriores. [9] Como exemplo temos os celulares mais modernos do mercado, como *Iphone* e *Samsung Galaxy S*, que possuem atualizações lançadas anualmente em eventos grandiosos, incentivando os consumidores a trocarem os seus aparelhos de forma desnecessária, sem atingir o esgotamento.

Segundo estudos feitos pela Organização das Nações Unidas (ONU), estima-se que a geração anual dos chamados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) ou, em inglês *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*, varia entre 20 e 50 milhões de toneladas, o que representa cerca 5% de todo o lixo produzido no mundo, sendo que esse montante cresce 3x mais rápido para os resíduos eletrônicos do que outras classes de resíduos urbanos. [8][10]

No Brasil, segundo projeções da Associação Brasileira de Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) foram vendidos cerca de 10,1 milhões de computadores e 48,8 milhões de unidades de aparelhos celulares, em 2010. [8] Entretanto, um estudo realizado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) verificou que o crescimento dos países emergentes - como os BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China, África do Sul), entre outros - têm impulsionado o aumento no consumo de

eletrônicos, de modo que atualmente, o volume de vendas de computadores, celulares, etc., deve ser muito maior. [9]

O país não possui número oficiais sobre a reciclagem de lixo eletrônico, porém estimativas baseadas no mercado formal mostram que apenas 1% dos REEE possuem fim de vida adequado, seja com reaproveitamento de todo o equipamento ou parte dele, seja com a reciclagem, extraindo os componentes viáveis para o processo. [8] Estima-se nos próximos 12 anos os brasileiros devem gerar em média 3,4kg de REEE anualmente, sendo a maior parte desses resíduos compostos por celulares, televisores, geladeiras e outros eletrodomésticos em geral. [5]

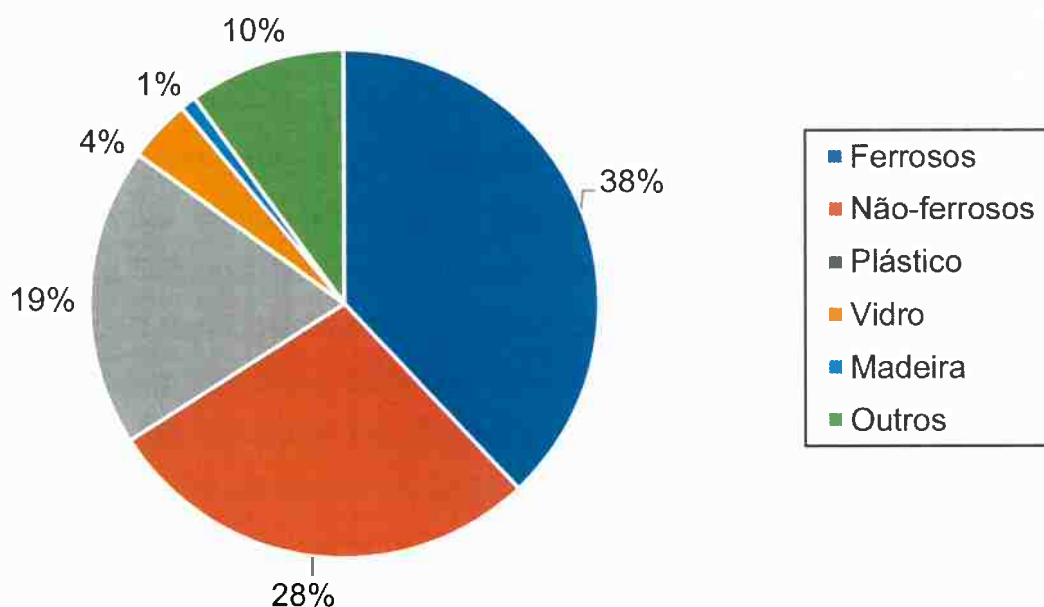


Figura 1 - Materiais encontrados nos REEE (% em massa)

Fonte: Adaptado de [11]

Conforme apresentado no Figura 1, o lixo eletrônico possui em sua composição diversos elementos, como plástico, vidro, metais, entre outros. A maior parte em massa dos REEE (66%) é composta por metais, tais como ferro, cobre, alumínio e ouro, além de outras substâncias. [11]

A preocupação ambiental com esse tipo de resíduo se dá pela presença de elementos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, como chumbo, mercúrio, arsênio, cádmio, selênio e cromo hexavalente. Essa é a razão pela qual o lixo eletrônico não pode ser descartado juntamente com o resíduo urbano padrão. Para

compreender a gravidade de uma contaminação com metais tóxicos, temos abaixo alguns dos efeitos dessas substâncias. [11]

- Chumbo (Pb): está presente em baterias, revestimentos espelhados, solda em placas de circuito impresso, entre outros componentes e em humanos causa danos no sistema nervoso central, periférico, sanguíneo, rins além do sistema reprodutor. [11], [12]
- Cádmio (Cd): é usado em chips semicondutores, detectores de infravermelho, entre outros equipamentos. A partir do momento que os compostos de cádmio são absorvidos pelo humano eles são bioacumulados, ou seja, não são eliminados pelo corpo, se acumulam ao longo da vida e podem chegar a um nível de concentração no organismo maior do que a encontrada no ambiente. O Cd pode causar desmineralização óssea, disfunção renal, entre outros danos graves ao ser humano. [8], [11], [13]
- Mercúrio (Hg): é encontrado em termostatos, sensores, baterias de celulares, lâmpadas, entre outros produtos. O Hg não possui nenhuma função na bioquímica e fisiologia humana, de modo que devido a sua toxicidade pode causar os mais variados danos que vão desde o cérebro até os rins, além de prejudicar fortemente fetos em desenvolvimento, que são expostos à esse elemento através de contaminação da mãe, podendo ocasionar desde má formação congênita até aborto espontâneo. [11], [14]
- Cromo VI/ Cromo Hexavalente (Cr^{6+}): ainda é muito usado na galvanoplastia, tanto para proteção contra corrosão quanto para fins puramente estéticos. Essa substância é facilmente absorvida, pois consegue penetrar a membrana celular sem muitas dificuldades e é conhecida por possuir propriedades carcinogênicas. [11], [15]

Além dos metais mencionados acima, outras substâncias tóxicas e poluentes como níquel, os Clorofluorcarbonetos (CFCs), Hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), etc., podem ser encontradas nos resíduos eletroeletrônicos, contaminando os chamados “compartimentos ambientais” (atmosfera, litosfera e hidrosfera) e degradando recursos naturais como a água. [8], [11]

Esses elementos tóxicos seguem mecanismos de introdução, distribuição e transformação nos organismos através dos seguintes processos: [8]

- i. Bioconcentração: aumento da concentração de contaminantes no meio externo;
- ii. Bioacumulação: transferência de contaminantes do meio para um organismo, onde as concentrações verificadas nos seres são muito maiores do que no ambiente;
- iii. Biomagnificação: aumento da concentração de poluente à medida que se encontram em um nível trópico superior na cadeia alimentar.

A Figura 2 esquematiza o percurso dos agentes químicos no meio ambiente, desde o despejo dos contaminantes até absorção através do consumo pelos seres vivos. Através dessa estrutura é possível constatar os motivos pelos quais mesmo em pequenas quantidades esses elementos tóxicos são altamente nocivos para todo o ecossistema e isso corrobora com a imprescindibilidade de um sistema de gestão de resíduos adequado.

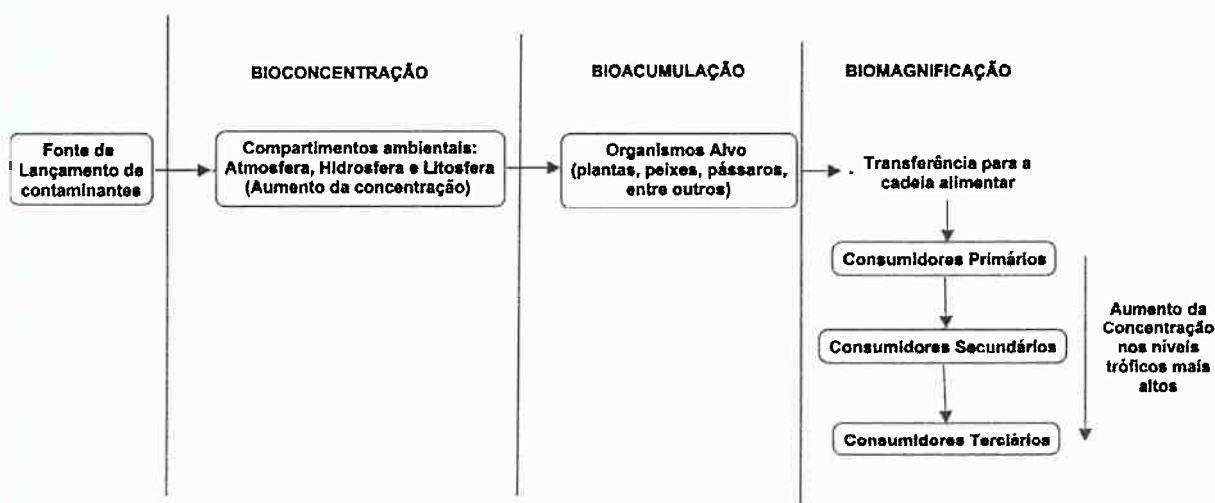


Figura 2 - Rota percorrida pelos compostos químicos na natureza [8]

3.2 Legislação pelo mundo

O mundo começou a se preocupar com o descarte dos resíduos eletroeletrônicos já no último século, por volta das décadas de 70 e 80 e em especial nos países desenvolvidos, as leis se tornavam mais rigorosas. Como alternativa para o fim de vida dos WEEE, países de primeiro mundo começaram a exportar seus resíduos para países em desenvolvimento como China e Índia. [2], [5]

Pensando em combater essa atividade, foi desenvolvido na Convenção de Basileia em março de 1989 um acordo global chamado de Controle de Movimentos entre Fronteiras de Resíduos Perigosos e seu Armazenamento (em inglês, *Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal*), que está em vigor desde 1992. Essa foi a primeira iniciativa legal internacional com essa finalidade. [4], [5]

Desse modo, o transporte de resíduos eletroeletrônicos entre países é regulado pela Convenção de Basileia, por ser considerado perigoso para o meio ambiente e humanos e também por conter diversas substâncias tóxicas, conforme mencionado nas seções anteriores.[4]

3.2.1 WEEE e ROHS

A União Europeia foi um dos primeiros grupos de países a se preocupar com fatores relacionados à disposição de resíduos eletroeletrônicos e em 2002 foi criada a Diretiva 2002/96/CE WEEE que estabelece metas de coleta, reciclagem e recuperação para todos os tipos de produtos eletroeletrônicos, responsabilizando os produtores e/ou os distribuidores pela disposição de seus equipamentos. Nos últimos anos esses objetivos vêm sendo atualizados para perspectivas que englobem a realidade atual, de modo que a diretiva passou por revisões em 2006 e 2009. [5], [16]

Com intuito de complementar a diretiva WEEE foi publicada pela União Europeia (UE) em 2003 a 2002/95/CE RoHS (*Restriction of Certain Hazardous Substances*, em português - tradução livre - "restrição de determinadas substâncias perigosas"). Essa é uma diretiva que veta o uso de elementos tóxicos como mercúrio, cádmio, chumbo, cromo IV, etc. no processo de produção de diversos produtos. Conhecida como "lei do chumbo livre" (*lead free*), essa norma foi implementada a partir de 2006, obrigando fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos, roupas e calçados à adequarem seus itens de forma a conseguirem continuar vendendo seus produtos na Europa. [16]

A Tabela 2 apresenta os limites máximos permitidos segundo a RoHS, sendo o Cádmio o elemento com concentração mais restritiva.

Tabela 2 - Limites máximos RoHS [5]

Elemento	Limite máximo (ppm)
Cádmio (Cd^{2+})	100
Mercúrio (Hg^{2+})	1000
Chumbo (Pb^{2+})	1000
Cromo VI (Cr^{6+})	1000
PBB e PBDE (Br)	1000

3.2.2 Legislação brasileira

Ao contrário da Europa, o Brasil não possui leis tão específicas e restritivas para os REEE. As principais legislações nacionais aprovadas com essa temática são a Lei 12.305 - Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) de 02 de agosto de 2010 e a Resolução CONAMA 401 de 04 de novembro de 2008.[8]

A PNRS responsabiliza todo ciclo produtivo e de consumo, desde fabricante, comerciantes, até os consumidores, para efetuarem as devidas separações dos resíduos para os processos de reuso e/ou reciclagem, sendo que uma das formas apresentadas por essa lei para retornar os detritos para o ciclo produtivo é o conceito de logística reversa, que consiste em um "instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada".[8], [17]

3.3 Placas de Circuito Impresso

Placas de circuito impresso (PCI) são elementos essenciais para a indústria eletrônica, sendo indispensáveis no funcionamento de diversos aparelhos como os smartphones, rádios, TVs, entre outros componentes. Nas áreas de entretenimento e processamento de dados os aparelhos chegam a ter 30% em massa de PCI. As placas

consistem em uma base onde são impressas trilhas de cobre que por sua vez se conectam a outros componentes. [5], [18]

As PCIs possuem composição bastante heterogênea, mas em geral são compostas de lâminas poliméricas, isolantes, de resinas fenólicas e epóxi com retardante de chama. Os principais metais presentes nas placas são: cobre (Cu), ferro (Fe), alumínio (Al), estanho (Sn), tântalo (Ta), gálio (Ga), ouro (Au), prata (Ag), cromo (Cr), mercúrio (Hg), cádmio (Cd), zinco (Zn), níquel (Ni) e chumbo (Pb). A Tabela 3 apresenta um comparativo com a concentração média de metais encontrados nas placas e no minério correspondente.[2], [19]

Tabela 3 - Porcentagem média de metais em minérios e nas placas de circuito impresso [19]

Metal	% no minério	% média PCI
Cobre	0,5 – 3,0	21,19
Zinco	1,7 – 6,4	0,17
Estanho	0,2 – 0,85	3,17
Chumbo	0,3 – 7,5	1,20
Ferro	30 – 60	1,31
Níquel	0,7 – 2,0	0,17
Alumínio	51 – 64	1,79

Analisando a Tabela 3 observa-se que a concentração média de cobre e estanho nas placas de circuito impresso é maior do que a encontrada no minério, o que torna a extração desses metais nas PCIs um método interessante em termos de disponibilidade dos metais e talvez também economicamente.

Além disso, se fazem presente nas placas de circuito impresso os metais preciosos, que apesar de constituírem apenas 1% em massa, representam mais de 80% do valor intrínseco total das placas, sendo que a concentração desses metais pode chegar a ser até 10 vezes maior do que no minério. O ouro é o mais importante desses metais preciosos e sua concentração nas placas varia segundo diversos fatores como tipo de PCI, origem, idade e utilização da placa. Em linhas gerais, temos em média aproximadamente 1655g de prata por tonelada de placa de circuito impressa, 850g/ton de ouro e 42g/ton de paládio. [18], [19]

3.4 Métodos para extração de metais dos REEE

As primeiras pesquisas sobre reciclagem de sucata eletrônica com intuito de recuperar metais preciosos remontam a 1969 quando o *U.S. Bureau of Mines* iniciou estudos sobre procedimentos para extração desses metais a partir de resíduos eletrônicos militares obsoletos e/ou danificados que naquela época já atingiam o montante de 9100 ton/ano.[18], [19]

O tratamento dos resíduos eletroeletrônicos para reciclagem dos materiais exige métodos complexos devido a diversidade de elementos presentes em sua composição. A reciclagem da sucata eletrônica pode ser dividida em três grandes etapas: pré-tratamento, separação/concentração e refino mecânico/químico. [2], [18]

O pré-tratamento envolve análise dos componentes do REEE para determinação de elementos tóxicos e aqueles suscetíveis a recuperação, enquanto na separação são utilizados processos mecânicos e/ou metalúrgicos para concentração das substâncias e por fim, no refino há a recuperação dos metais. Os processos metalúrgicos podendo ser pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos ou biometalúrgicos. Vale a pena ressaltar que há essa divisão nos processos de concentração apenas para fins de compreensão dos mecanismos, pois em geral essas técnicas são aplicadas em conjunto para a separação efetiva dos metais dos resíduos eletroeletrônicos. [2]

3.4.1 Processamento Mecânico

Os processos mecânicos objetivam a liberação dos materiais presentes nos REEE por meio de ação física, para posterior separação dos elementos dos resíduos eletrônicos com intuito de concentrar os metais para a extração. Esse procedimento pode envolver os estágios de moagem, separação granulométrica, eletrostática, magnética e por densidade.[2], [19]

A moagem visa separar os metais dos outros componentes, com intuito de aumentar o teor de recuperação. A classificação granulométrica é a técnica usada para separar grupos de partículas com diâmetros distintos através de passagem por

uma sequência de peneiras, com intuito de classificar as partículas por tamanho, preparando o material para as etapas que envolvem reações químicas. [2], [5], [19]

A separação eletrostática é mais um processo de concentração de materiais baseado em propriedades como condutividade elétrica, propensão em adquirir cargas elétricas superficiais, forma geométrica e densidade. Para a segmentação ocorrer é necessário que haja um campo elétrico com intensidade necessária para desviar uma partícula eletricamente carregada. [5]

A separação magnética efetua a separação dos componentes magnéticos em três grandes categorias: materiais ferromagnéticos, que são fortemente atraídos pelo campo magnético, paramagnéticos, que são fracamente atraídos e diamagnéticos, que são repelidos. As principais substâncias separadas por esse processo são ferro, níquel e cobalto. [2], [5]

Por fim, na separação densitária, a diferença de densidade entre os materiais é a diretriz para separação. Para que o processo ocorra, o meio denso usado deve possuir uma densidade intermediária entre os materiais que se deseja separar, para os que possuam densidade maior afundem e os com densidade menor flutuem. [5], [19]

Os materiais derivados desses processos de separação, em geral passam por um aumento de concentração de metais, que poderão ser ainda mais enriquecidos e separados usando diferentes processos como pirometalurgia, hidrometalurgia e biometalurgia. [19]

3.4.2 Processamento Pirometalúrgico

Considerado o mais tradicional dos métodos extrativos para recuperação de não-ferrosos e metais preciosos a partir de lixo eletrônico, o processamento pirometalúrgico engloba técnicas como incineração, fusão em forno com arco de plasma ou alto-forno, escorificação, sinterização, além de reações em fase gasosa à altas temperaturas. [7]

A pirometalurgia se fundamenta pelo uso de alta temperatura, em geral entre 500 e 1600°C, permitindo a formação de uma fase metálica (maior concentração de metais) e uma fase de escória, onde se concentram materiais cerâmicos. A fração

polimérica dos REEE é degradada termicamente por meio da quebra de ligações químicas das cadeias orgânicas, de modo que não interfere nos processos subsequentes para extração dos metais. [2], [5]

Algumas das vantagens na utilização desse tipo de processo é não precisar de tratamento prévio dos materiais, não ter restrição com relação ao tipo de sucata eletrônica usada, além de possuir poucas etapas. Com relação a desvantagens temos a emissão gasosa de tóxicos, pois quando os polímeros que compõem as PCs, por exemplo, são degradados termicamente pode ocorrer a formação dioxinas e furanos, substâncias altamente poluentes.[2], [18]

Atualmente, os principais métodos pirometalúrgicos utilizados industrialmente para extração de metais dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são o Processo Noranda (Canadá), Fundição *Boliden Rönnskår* (Suécia) e Umicore (Bélgica). A Tabela 4 apresenta um resumo dos metais recuperados por meio dessas técnicas. [19]

Tabela 4 - Metais recuperados a partir das principais técnicas de pirometalurgia [7]

Técnica	Metais recuperados
Processo Noranda	Cu, Au, Ag, Pt, Pd, Se, Te, Ni
Fundição <i>Boliden Rönnskår</i>	Cu, Ag, Au, Pd, Ni, Se, Zn, Pb
Umicore	Metais de base, preciosos, platina, selênio, telúrio e índio

3.4.3 Processamento Hidrometalúrgico

Os processos hidrometalúrgicos são aqueles que ocorrem entre a interface de uma fase sólida com uma fase líquida, com temperatura variando entre 10 e 300°C. As principais etapas desses procedimentos consistem em uma sequência de lixiviações ácidas ou cáusticas dos materiais sólidos, que por sua vez ocorrem com uso de uma solução aquosa ou agente lixiviante. [5], [7], [19]

Com foco na extração de metais preciosos os agentes lixiviantes mais utilizados são: cianeto, água-régia, tiouréia, haleto, cloreto férrico, isocianato de potássio, tiosulfato e mistura de ácidos sulfúrico, nítrico e clorídrico. [19]

Após essa etapa de lixiviação, com intuito de concentrar os metais de interesse as soluções utilizadas passam por processos de separação e purificação, como a precipitação das impurezas, extração por solvente, além de adsorção e troca iônica. Por fim, para recuperação do metal, as soluções passam pelo eletrorrefino e a redução química ou cristalização. [19]

Como vantagens dos processos hidrometalúrgicos temos um risco menor de poluição atmosférica, maior facilidade na separação dos componentes, além de um menor custo do processo como um todo. De pontos negativos observa-se a geração de resíduos sólidos, menor facilidade para aplicar o processo com lixo eletrônico mais complexo, necessidade em reduzir o volume dos REEE, além da geração de efluentes com a presença de metais corrosivos e/ou tóxicos. [18]

3.4.3.1 *Método de peeling*

Lixiviação com cianeto e água régia são os processos mais conhecidos para extração secundária de ouro e outros metais, entretanto o que essas técnicas possuem em comum é o uso e a produção de subprodutos e/ou efluentes tóxicos que são prejudiciais ao meio ambiente e a saúde humana. Assim, para evitar o uso e contato com esse tipo de material, fez-se necessário o desenvolvimento de novas estratégias ecologicamente corretas para recuperação de metais.

Estudos apresentaram um método viável para extração de ouro a partir de placas de circuito impresso chamado de “peeling”, onde são utilizadas soluções de persulfato ativadas que são responsáveis por oxidar e lixiviar o substrato metálico, onde estão presentes níquel, ferro e cobre, por exemplo, e que se encontram combinados superficialmente com ouro. A “dissolução” seletiva desse substrato metálico permite a recuperação do ouro em forma de partículas metálicas. [20]

Essa “oxidação seletiva”, onde o ouro não é solubilizado, permite com que todo o processo de extração ocorra em um tempo menor, pois algumas etapas de purificação podem deixar de ocorrer, além de aumentar a taxa de recuperação do ouro para até 98%. [20]

O alto poder oxidante do persulfato ($S_2O_8^{2-}$) é obtido a partir da ativação desse ânion a partir da adição de calor, radiação UV ou metais de transição, gerando radicais

de sulfato (SO_4^{2-}) que possuem um potencial de redução elevado (E^0 2,5 – 3,1 V) de modo que metais como níquel ($E^0 = -0,257$ V) e cobre ($E^0 = 0,34$ V), que estão superficialmente conectados com o ouro, são facilmente lixiviados e ionizados, quebrando suas ligações com o ouro que é então recuperado em forma de fragmentos metálicos. [20], [21]

Uma das formas de replicar essa reação é utilizando persulfato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ em solução com peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que atua como catalisador, aumentando a eficiência e reduzindo consumo do reagente. Pesquisas apontaram uma recuperação de até 98,95% de ouro presente em cartões de memória, em 30 minutos de reação, indicando o elevado rendimento apresentado por esse processo.[21]

3.4.4 Biometalurgia

Nas últimas décadas a extração secundária de metais através da biotecnologia é um dos campos que mais se desenvolveu, principalmente devido ao interesse de grandes empresas nessa nova tecnologia. Diversas pesquisas foram desenvolvidas no final do século XX e outras tantas permanecem hoje em dia, principalmente no que diz respeito a recuperação de metais como cobre, níquel, cobalto, zinco, ouro e prata.[7]

Biolixiviação e bioissorção são as duas técnicas principais utilizadas na biometalurgia. A biolixiviação envolve a extração de metais sólidos através da ação de micro-organismos, a partir de reações de oxi-redução, onde há a oxidação indireta ou direta dos sulfetos metálicos. Quando a rota indireta é utilizada o agente oxidante é o íon férrico, enquanto que para o processo direto é o oxigênio. [2], [7]

O processo de bioissorção trata-se de uma interação físico-química passiva entre os grupos de micro-organismos carregados superficialmente e os íons da solução, tanto criaturas vivas quanto mortas podem ser usadas. Diversos espécimes como algas, bactérias, leveduras e fungos são conhecidos como bons acumuladores de metais tóxicos, facilitando o processo de bioissorção. [7]

Vale a pena ressaltar que atualmente, para ouro e prata exclusivamente, as bactérias lixiviantes são utilizadas como um tratamento primário, para remoção de

sulfetos metálicos que podem interferir no processo de extração dos metais preciosos.[7]

Como vantagens dos processos biometalúrgicos temos custo mais baixo, menor volume de resíduos químicos e/ou biológicos, além de maior eficiência na retirada dos componentes tóxicos dos efluentes. As principais restrições são a obrigação dos metais a serem extraídos estarem expostos, além da longa duração do processo, com demorados períodos de “ataque”. [7], [18]

3.5 Ouro

Há milhares de anos o ouro é usado pelas civilizações com as mais diversas utilidades, indo desde das tradicionais joias e adornos, passando pela eletrodeposição em superfícies de conexões elétricas, para garantir baixa resistência elétrica e à ataques químicos do meio, indústria eletroeletrônica, até o uso como lastro monetário nos principais países do mundo. [22]

Material com alto valor agregado, principalmente no caso de joias e adornos, de modo que a relação entre demanda e produção é muito estreita, levando a baixos níveis de estoque no mundo todo. [22]

No Brasil, o maior pico de exploração e produção de ouro na história se deu no período do Brasil colonial. As principais reservas exploráveis do país se encontram atualmente em 5 estados apenas, Minas Gerais, Goiás, Pará, Bahia e Mato Grosso, atingindo o valor de 1.950 toneladas, incluindo reservas de ouro e cobre associados. As reservas mundiais, por sua vez, superam 90.000 toneladas, sendo que menos de 20% delas são consideradas de elevado teor do metal, ou seja, acima de 8g de ouro/ton. [22]

Em 2007, a produção de ouro bruto e beneficiado no Brasil atingiu cerca de 50 toneladas e estima-se que até 2030 haverá acréscimo de 50% na produção, a partir de investimentos estimados em US\$ 2 bi para manter a produção nesses níveis projetados. [22]

3.5.1 Extração primária e secundária

Na natureza, o ouro pode ser encontrado na sua forma pura, entretanto sabe-se que na maior parte das vezes ele é encontrado junto da prata em diferentes quantidades e outras vezes associado com cobre e ferro. [22]

Metal de pureza elevada e alto valor agregado, é obtido por extração primária em 90% dos casos, sendo que as mais importantes minas do mundo são lavradas de forma subterrânea. Cabe destacar que as reservas de ouro podem ter longa extensão e profundidade, com espessura de centenas de metros. Desse modo, as minas de ouro podem ter vida útil elevada, se tornando operações de grande dimensão. [22]

Em linhas gerais, o processamento para extração do ouro das minas acontece da seguinte maneira: as rochas extraídas da mina passam por um processo de fragmentação com a britagem, posterior classificação, seguida de nova moagem, agora com o moinho de bolas. Para concentração do ouro podem ser utilizados processos como flotação, entre outros métodos químicos que serão determinados no caso a caso. [22]

Os danos ambientais gerados pela mineração vêm sendo monitorado nos últimos anos, porém ainda que a responsabilidade ambiental das companhias que realizam essa atividade tenha aumentado é importante ressaltar o risco envolvendo as barragens de rejeito do beneficiamento dos minérios, uso do mercúrio nos garimpos, além do uso de cianetos na lixiviação (processos hidrometalúrgicos). Assim, apesar dos avanços no tema, ainda há um grande espaço para melhorias nos processos como um todo. [22]

Com relação à produção secundária do ouro, temos que ela é resultado de reciclagem de materiais em fim de vida, fora de uso, além de escória ou limalhas derivadas de múltiplos processos produtivos. Ao longo de muitos anos, a extração do ouro a partir de recursos secundários foi feita a partir da lixiviação com cianeto. Entretanto, após o acontecimento de diversos acidentes pelo mundo gerando a contaminação de recursos hídricos naturais com uso de cianeto, alternativas de extração vêm sendo estudadas com intuito de evitar esse grave problema ambiental.[23], [24]

3.5.2 Produção e Consumo

No mundo, a produção de ouro, pela extração primária, apresentou leve queda no período entre 2000 e 2007, permanecendo aproximadamente estável. A Tabela 5 e a Figura 3 apresentam os dados da produção mundial de ouro distribuída por países. A partir desses dados observa-se que o principal país responsável pela queda foi a África do Sul, que teve uma baixa de 37% da produção entre 2000 e 2007, perdendo em 2007 o posto de principal país produtor primário de ouro para a China, que por sua vez compensou o declínio da África do Sul e aumentou a produção em 53%. [22]

Tabela 5 - Produção mundial de ouro por extração mineral por países

Países Produtores	Produção por ano (em ton)							
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Brasil	51	56	42	40	48	39	43	50
África do Sul	431	400	399	373	341	295	275	272
Austrália	296	290	273	282	259	262	251	251
Canadá	154	160	149	141	129	119	104	93
China	180	185	190	202	215	225	240	276
EUA	353	350	298	277	258	256	260	255
Indonésia	125	120	135	140	93	140	167	171
Peru	133	140	138	172	173	208	203	167
Rússia	126	155	170	170	169	169	153	152
Outros	735	725	756	793	745	758	773	758
Total	2.584	2.581	2.550	2.590	2.430	2.470	2.469	2.445

Fonte: Adaptado de [22]

Produção Mundial Primária de Au - Principais Países (em ton)

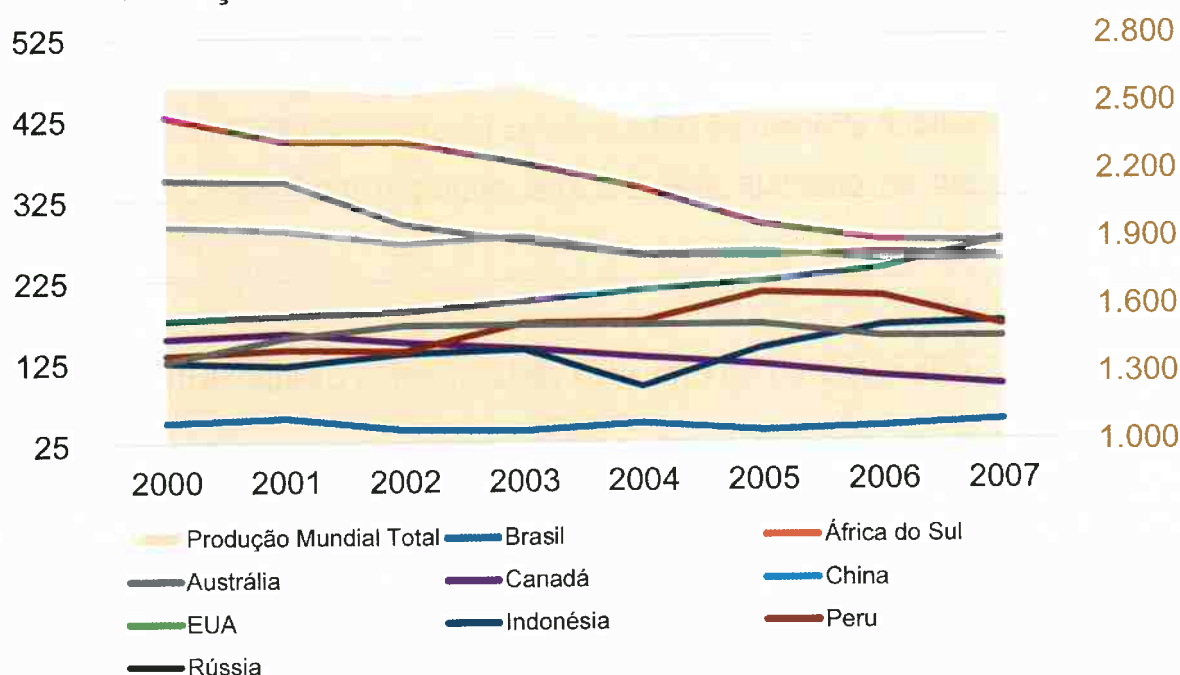


Figura 3 - Principais países produtores primários de ouro. Adaptado de [22]

A demanda mundial pelo ouro é composta por diferentes setores, incluindo segmentos industriais, saúde, eletrônicos, além da tradicional joalheira e o mercado financeiro (fins especulativos). Conforme apresentado na Tabela 6, o consumo global pelo ouro oscilou entre o período de 2000-2007, apresentando queda no ciclo como um todo. [25]

Tabela 6 - Demanda dos principais setores fabricantes de produtos que contem ouro. Adaptado de [25]

SETORES	Demanda por ano (em ton)							
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Joalheria	3.209	3.016	2.667	2.481	2.611	2.708	2.284	2.401
Eletrônica	284	198	207	235	261	281	308	311
Odontologia	70	68	69	68	68	63	61	58
Outros fins industriais	98	97	83	80	82	86	91	93
Moedas	77	83	96	105	112	111	129	137
Medalhas	28	29	26	26	30	37	59	73
TOTAL	3.766	3.491	3.148	2.995	3.164	3.286	2.932	3.073

A Figura 4 apresenta a distribuição de demanda do ouro por diversos setores como joalheria, eletrônica, odontologia, investimentos financeiros, moedas e barras (categoria “moedas”), medalhas e outros fins industriais. Conforme podemos observar, essa divisão no consumo se comportou de maneira relativamente uniforme ao longo dos anos, com destaque para um leve aumento na demanda do setor eletrônico. [25]

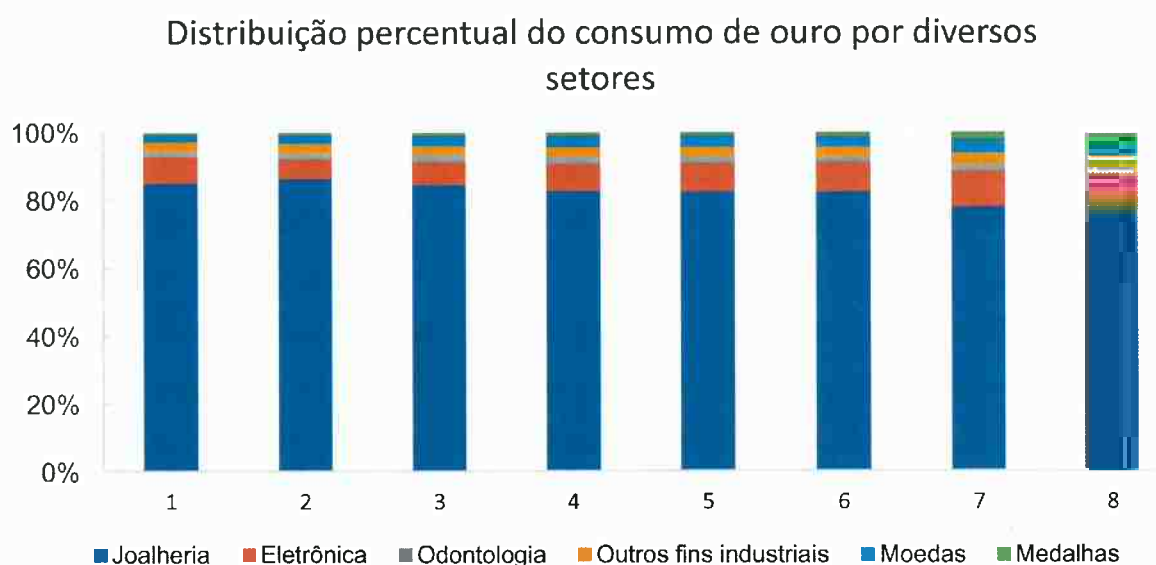


Figura 4 - Distribuição percentual do consumo de ouro por diversos setores no período de 2000-2007. – Adaptado de [25]

É importante destacar que o aumento na demanda do setor eletrônico comparativamente aos demais, é um movimento esperado, dado a elevação na produção de equipamentos que utilizam as placas de circuito impresso como notebooks, smartphones, televisores, etc. Japão, Taiwan e outros países asiáticos lideram a fabricação desses semicondutores. [25]

3.5.3 Preços

A cotação do preço do ouro utiliza como métrica o ouro 24K, chamado de “ouro puro”, e as unidades mássicas onça troy ou grama, sendo que uma onça troy (t oz)

equivale aproximadamente 31,1g. Diversos fatores influenciam no preço de mercado do ouro, principalmente quando comparado aos demais metais. [23]

Em geral, o desempenho da indústria joalheria é o que determina o consumo do metal, dado que esse setor é responsável por mais de 70% do consumo aurífero. Já a oferta está ligada à produção na mineração, que depende da cotação do ouro em si e aos custos operacionais para a operação.[23]

Fatores financeiros também interferem na formação do preço do ouro, principalmente a partir de 1968, com a instituição do mercado livre, com o princípio da oferta e demanda e a livre concorrência. A partir desse período, os mercados de matérias-primas nos EUA iniciaram operações no *forward market* (mercado a prazo) de ouro e outros mercados como Londres, Tóquio e Hong Kong, que ampliaram a atuação nessas operações. Atualmente, as Bolsas de Metais com maior importância são Londres e Nova York.

Por fim, fatores políticos também podem influenciar na cotação do ouro. A situação econômica dos países, além de períodos de crise são fortes elementos na variação do preço do metal. A crise do petróleo na década de oitenta, por exemplo, elevou o preço do ouro no período. [22] Bancos centrais de diversos países como Austrália e Estados Unidos possuem uma extensa reserva de ouro estocadas sob posse dos respectivos tesouros nacionais. [23] A Tabela 7 apresenta as reservas oficiais de ouro dos países e instituições diversas, em toneladas.

Tabela 7 - Reservas oficiais de ouro dos bancos centrais de países e instituições diversas – Adaptado de [25]

PAÍSES	Reservas por ano (em ton)							
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Eua	8.137	8.149	8.149	8.135	8.136	8.135	8.134	8.134
Alemanha	3.469	3.457	3.446	3.440	3.422	3.428	3.423	3.417
França	3.025	3.025	3.025	3.025	2.985	2.828	2.720	2.603
Itália	2.452	2.452	2.452	2.452	2.452	2.452	2.452	2.452
Suíça	2.419	2.199	1.917	1.633	1.354	1.290	1.290	1.145
Japão	765	765	765	765	765	765	765	765
Holanda	912	885	852	778	778	695	641	621
China	395	501	600	600	600	600	600	600
Brasil	66	34	34	34	34	34	34	34
EU	13.299	13.108	12.977	12.806	12.694	12.236	11.895	11.251
Todos os países	30.107	29.366	28.999	28.447	27.917	27.339	26.989	26.519
FMI	3.217	3.217	3.217	3.217	3.217	3.217	3.217	3.217
BIS	199	197	197	193	208	186	172	138
Instituições	3.417	3.414	3.414	3.411	3.426	3.403	3.389	3.355
MUNDO	33.060	32.781	32.413	31.858	31.342	30.742	30.379	29.874

Analisando as informações observa-se que em 2007 os Estados Unidos possuíam a maior reserva individual para um país, com 8.134 ton, enquanto a União Europeia possuía 11.251 ton, liderada pela Alemanha com 3.417. Comparado com esses países o Brasil possuía uma reserva inexpressiva de 34 ton.

Dessa forma, por conta de alguns países possuírem estocadas uma quantidade tão expressiva de ouro, que em muitos casos supera toda a demanda anual no mundo, temos uma influência política na formação do preço do ouro. Além do fato de ouro ser considerado um investimento seguro, de modo que em momentos de crise, muitos investidores procuram o metal como uma forma de garantir suas riquezas com risco menor.

A Figura 5 apresenta a variação na cotação do preço do ouro em US\$/oz e US\$/kg nos últimos 5 anos.

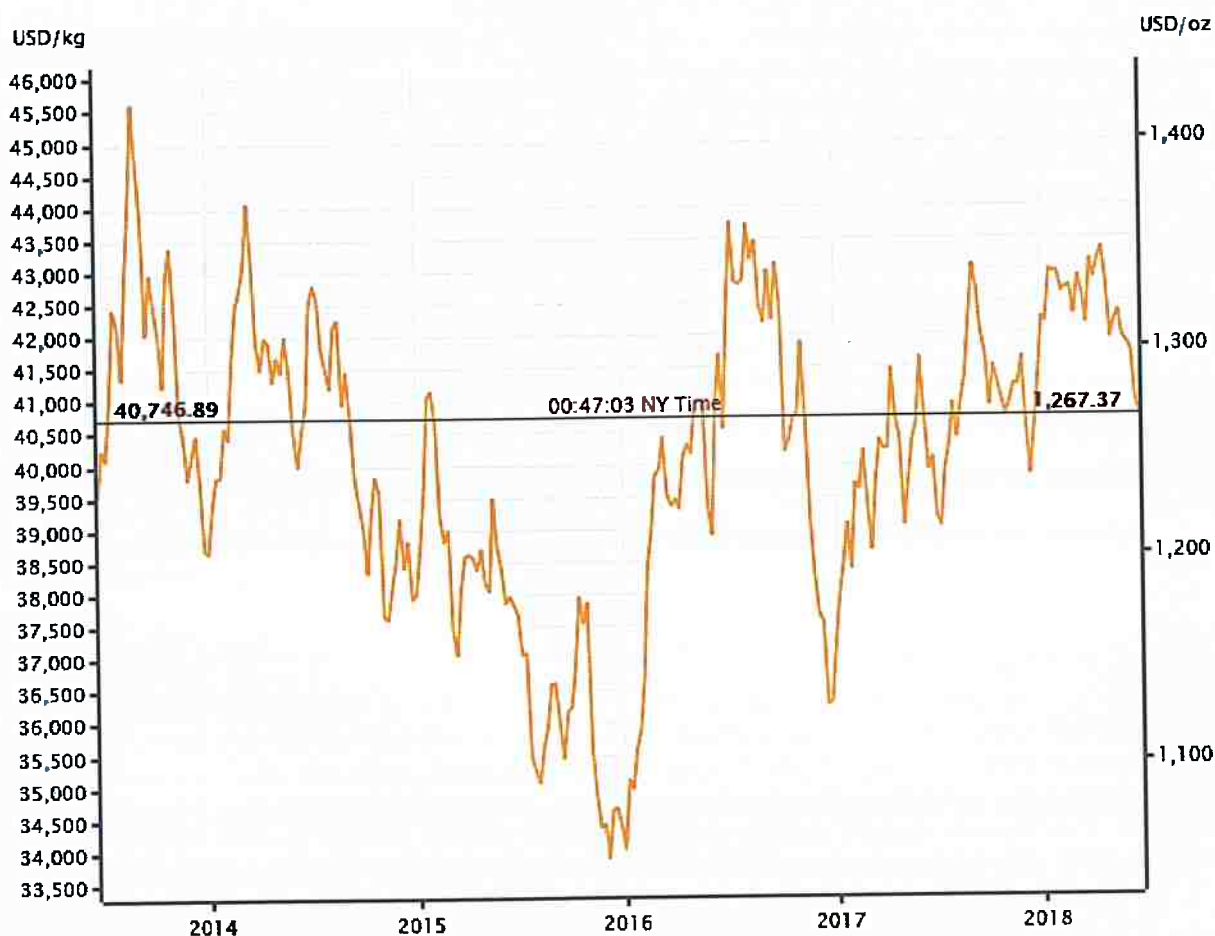


Figura 5 - Histórico preço do ouro nos últimos 5 anos [26]

Analisando a Figura 5 temos que a cotação do ouro atualmente está no patamar de cerca de US\$ 41 mil/kg, próximo à média entre o menor valor (US\$33,9mil/kg) dos últimos 5 anos que ocorreu em dez/15 e o maior preço (ago/13) de US\$ 45,6 mil/kg.

Observando um histórico ainda maior, presentes nos Anexos A e B [26], consegue-se observar que a crise do *subprime* americano em 2008, aliada com diversos outros fatores, foi um grande incentivo para a cotação do ouro atingir patamares nunca antes alcançados, com máxima alcançando US\$ 58mil/kg em setembro/2011. Isso ocorre pois em tempos muito agitados, em um cenário onde diversos minérios caem incontrolavelmente, o ouro se torna um “porto seguro” e os investidores preferem o metal do que aplicar seus recursos em ativos com risco maior.[25]

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O método de *peeling* para extração de ouro foi aplicado com intuito de verificar a eficácia do processo, além da determinação do rendimento em quantidade mássica, ou seja, quanto de massa é extraído a partir de uma quantidade específica de amostras.

A motivação para esse experimento se deu a partir do estudo do trabalho de formatura da Gabriella Morelli Vezza [21], que analisou o fim de vida de contatos não permanentes folheados a ouro e constatou a efetividade do método de *peeling*.

4.1 Materiais

Para a realização do ensaio foram utilizados como amostra os chips de diversos cartões (crédito, débito, vale refeição, etc.) com diferentes graus de uso (Figura 6).



Figura 6 - Amostras de cartão para realização de ensaio

Além disso, foram usados os seguintes reagentes e equipamentos para realização do método de *peeling* de ouro:

- i. Persulfato de Amônio [$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$] com Pureza Analítica (P.A.) da Êxodo Científica® ;
- ii. Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) com pureza analítica (P.A.) da Synth®;
- iii. Água destilada;
- iv. Balança Semi-Analítica BG200 da Quimis®;
- v. Placa aquecedora com agitação magnética Hotlab II da Nalgon®;
- vi. Termômetro químico;
- vii. Béqueres com volumes variados;
- viii. Barra magnética;
- ix. Bagueta;
- x. Provetas com volumes variados;
- xi. Funil;
- xii. Papel de Filtro;
- xiii. Tesouro.

4.2 Procedimento Experimental

Primeiramente foram preparados 250mL de Persulfato de Amônio com concentração 0,8 M. Após preparar a solução os chips foram separados da parte polimérica de cada um dos cartões com auxílio de uma tesoura (Figura 7), além disso os chips foram pesados antes de iniciar o experimento.



Figura 7 - Chips de cartão de crédito

Foram realizados 3 ensaios e para cada um deles foram feitas soluções contendo 120 mL de $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 0,8M com 8 mL de Peróxido de Hidrogênio P.A., que foram aquecidas na placa aquecedora por 30min, até atingir 85°C, em constante agitação. Nesse ponto foram colocados na mistura os chips dos cartões, que permaneceram lá por 30min, também sob constante agitação.



Figura 8 - Esquema utilizado para realização do ensaio

Os chips foram retirados da mistura e a solução foi filtrada com intuito de separar e reter todas as partículas sólidas extraídas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo do experimento inicialmente era o de se obter o rendimento do processo como um todo, para posteriormente determinar o custo para obtenção de uma quantidade mássica de ouro.

Em cada um dos ensaios foram utilizados três chips simultaneamente e suas massas foram medidas pré e pós análise para que fosse possível determinar a variação de mássica.

A Figura 9 apresenta a solução pós reação contendo ainda os chips dos cartões. Os círculos vermelhos indicam regiões onde é possível notar a presença de partículas que foram extraídas das amostras, fragmentos esses que podem se tratar do metal foco da pesquisa, o ouro.



Figura 9 - Conjunto após término da reação

No ensaio com melhor resultado, a massa dos três chips em conjunto diminuiu em 0,10 g, passando de 0,35g para 0,25 g. Acredita-se que essa variação foi fruto da extração de material das amostras. A Figura 10 mostra o antes e depois dos chips.



Figura 10 - a) Chips antes do ensaio; b) Chips após realização do experimento

Analisando a Figura 10b observa-se que parte da camada metálica foi extraída após reação com persulfato de amônio. A solução residual do experimento foi filtrada utilizando filtração simples, com intuito de separar os fragmentos sólidos do restante líquido.

A filtração não ocorreu conforme o esperado, pois as partículas não ficaram retidas no papel de filtro, não sendo possível recuperá-las e analisá-las de modo a determinar o rendimento efetivo do processo.

Além disso, em outros ensaios o procedimento não foi efetivo, pois a reação não provocou a remoção da superfície metálica das amostras, como é possível observar na Figura 11.

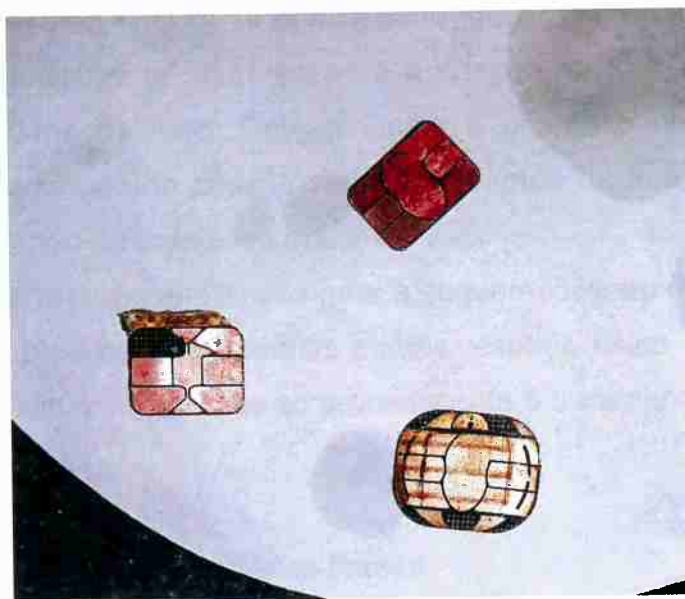


Figura 11 - Amostras 2 após experimento

Vale a pena destacar que a partir da análise do trabalho da Gabriella Morelli Vezzà [21] a efetividade do método de *peeling* já foi verificada, de modo que diversas causas podem ser apontadas para o insucesso desses ensaios, como possível contaminação na amostra, presença de impurezas, imprecisão de algum dos equipamentos usados.

Além disso, temos que esse é um processo de difícil reprodutibilidade, sendo necessário o controle de diversas variáveis como temperatura, velocidade de agitação, atmosfera e tempo de reação, para aumentar a probabilidade de sucesso da extração dos metais.

5.1 Planta Piloto

Diversos fatores como o volume de resíduos eletroeletrônicos produzidos globalmente, necessidade de destinação adequada a esses substratos, excesso de demanda de ouro pelos mercados consumidores e cotação desse metal no mercado internacional nos últimos anos, tornam atrativos a estruturação de um processo industrial para extração secundária do ouro, além de outros metais, a partir da sucata eletrônica.

A partir dessa premissa é necessário fazer uma análise preliminar determinando as condições necessárias para a criação de uma planta piloto para recuperação secundária de ouro. Determinou-se o processo hidrometalúrgico de extração a partir do método de *peeling* para continuidade da análise, procedimento que foi utilizado ao longo de todo esse trabalho.

Alguns aspectos serão analisados para a esquematização dessa planta piloto, como logística de obtenção das matérias primas, espaço físico para implantação, reator com características adequadas ao procedimento e tratamento dos efluentes.

5.1.1 Logística de obtenção de matérias-primas

Para conseguir coletar os REEE desejados para utilização na recuperação secundária, diversos meios podem ser utilizados, como:

- Aquisição do material em ecopontos e/ou outros locais que praticam a coleta de recicláveis;
- Parcerias/contratos com entidade públicas ou privadas para inserção de postos de coleta em locais com alta circulação de pessoas, como metrô;
- Aquisição apenas do chip para tratamento de instituições como a *Papa Cartão®*, que é uma empresa responsável pela implantação de um sistema de coleta seletiva desenvolvido para que o dono do cartão consiga destruí-lo em 7 partes, que serão aproveitadas posteriormente.

5.1.2 Espaço físico

Uma planta piloto de extração secundária de metais deve ser instalada em um galpão industrial que possua a estrutura necessária para a operação. Esse espaço precisa de uma separação para área de operação em si, estoque de matéria-prima, reagentes, produto acabado, além de um sistema para tratamento de resíduos.

Efetuada uma pesquisa através do website *Zap Imóveis®* verifica-se que é possível alugar um galpão industrial de 500m², adequado à prática, na cidade de São Paulo ou no município vizinho de Guarulhos, por algo entre R\$ 4.000- R\$ 6000.

5.1.3 Equipamentos

Considerando uma planta que realize apenas o processo de extração dos metais, será necessário um reator que cumpra os seguintes requisitos: panela fechada, ter aquecimento e agitação controlados, exaustão além da filtragem.

Em uma pesquisa no *Alibaba.com* foi possível encontrar um reator da empresa chinesa *Yangzhou Lianhe Chemical* com todas essas características demandadas, produzido em aço inoxidável, capacidade de 500L por US\$ 5.490, 30 dias para entrega, frete não incluso.



Figura 12 - Tanque misturador e bomba para transferência do material

5.1.4 Licenças

Por fim, para o funcionamento e manutenção da planta piloto é necessário saber e obter todas as licenças básicas necessárias para a operação, como a criação

de um CNPJ, a liberação da vigilância sanitária, CETESB, entre outros tantos órgãos reguladores.

6 CONCLUSÃO

A partir das análises feitas foi possível concluir que o método de *peeling* possui difícil reprodutibilidade, sendo necessário o controle minucioso de temperatura, velocidade de agitação e tempo de reação, além do processo precisar ser realizado em ambiente fechado, para o melhor funcionamento do método.

Estudos mostraram que esse procedimento é de fato eficiente, mais rápido que os métodos tradicionais, além de utilizar reagentes que não possuem um efeito tóxico no ambiente como o cianeto, por exemplo. Dessa forma torna-se interessante a escolha desse método na extração secundária.

Além disso, analisando os dados estudados é possível constatar primeiramente que o volume de resíduos eletroeletrônicos acumulados só cresce com o passar dos anos. Segundo, há um excesso de demanda pelo ouro, que não é suprida através da produção por mineração extrativa. E por fim, a cotação do ouro nos últimos 20 anos está em um patamar extremamente elevado, principalmente se comparado com o final do século XX.

Assim, diversos fatores contribuem para que recuperação secundária do ouro seja um processo atrativo, tanto do ponto de vista ambiental, dando a destinação mais adequada para os REEE, quanto do ponto de vista financeiro.

Por fim, foram mapeados alguns fatores necessários para criação de uma planta piloto. Dos pontos destacados, o que traria maior desafio para um possível investidor, seria a adequação dessa planta à todas as licenças e normas estabelecidas. Apesar disso, estabelecendo os parâmetros adequados ao processo, a aquisição de equipamentos e o estabelecimento de uma rotina de obtenção das matérias-primas poderiam ser efetuados sem muitas dificuldades.

Em linhas gerais, conclui-se que uma destinação adequada dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos é essencial nos tempos atuais, sendo a recuperação secundária de ouro e outros metais uma boa alternativa e a utilização do processo hidrometalúrgico de extração por *peeling* um método viável para tal.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros inúmeros tópicos seriam interessantes, como:

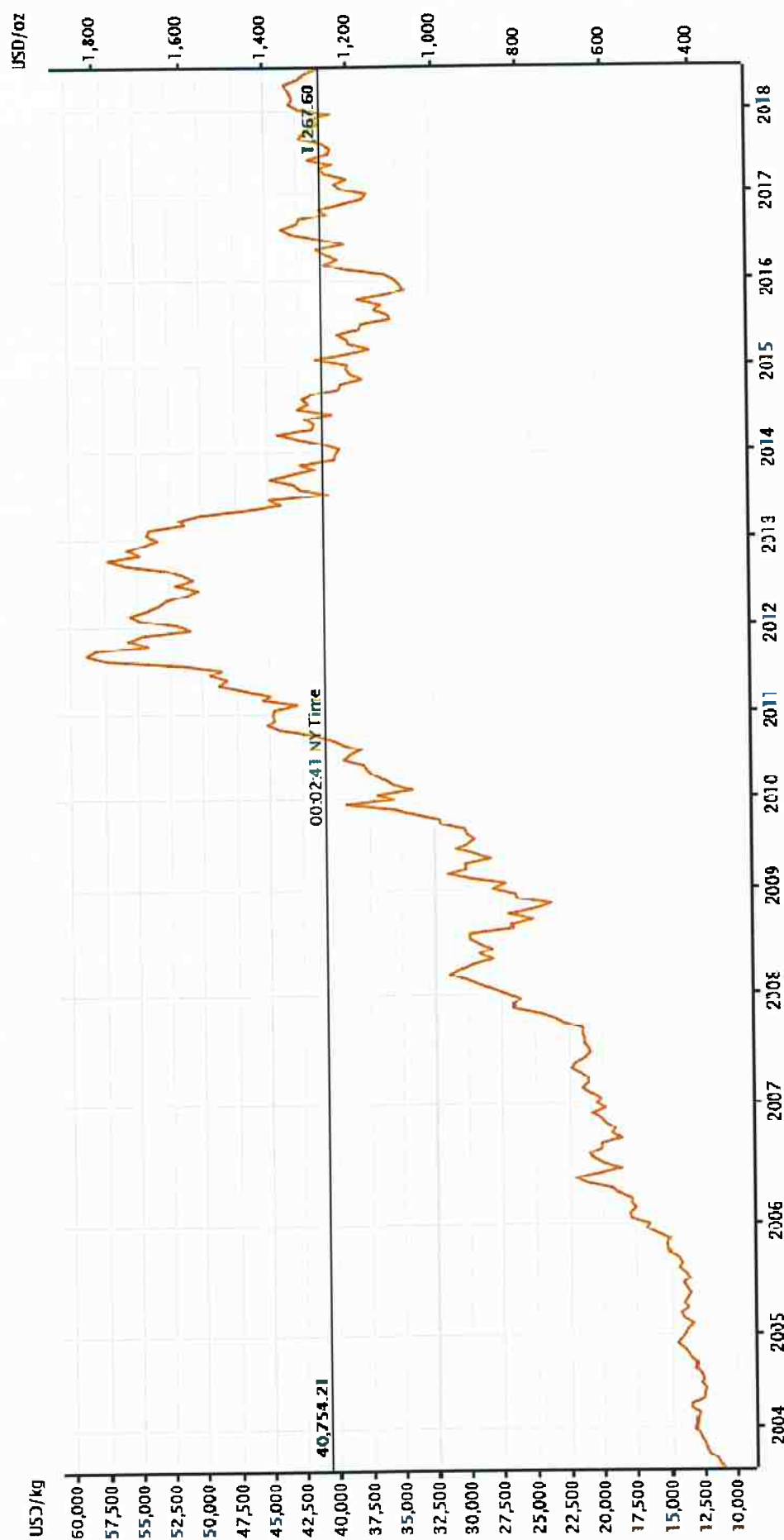
- Extração e precipitação de outros metais a partir da solução advinda da lixiviação;
- Determinação do rendimento do processo de *peeling*, comparando com outros processos tradicionais;
- Análise do investimento inicial necessário para criação de uma planta piloto para extração de ouro, bem como o *break even* dessa operação;
- Estudo sobre maneiras de incentivar a reciclagem e reuso, com análise de leis e práticas de gestão do lixo eletrônico no mundo;
- Análise de eficiência e custo de outros métodos extrativos de metais dos REEE que não utilizem substâncias como o cianeto, nocivo ao ser humano e meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Kang e J. M. Schoenung, "Electronic waste recycling : A review of U . S . infrastructure and technology options", vol. 45, p. 368–400, 2005.
- [2] V. T. D. E. Moraes, "RECUPERAÇÃO DE METAIS A PARTIR DO PROCESSAMENTO IMPRESSOS DE CELULARES OBSOLETOS", 2011.
- [3] R. Kahhat, J. Kim, M. Xu, B. Allenby, E. Williams, e P. Zhang, "Exploring e-waste management systems in the United States", *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, nº 7, p. 955–964, 2008.
- [4] R. Widmer, H. Oswald-krapf, D. Sinha-khetriwal, M. Schnellmann, e H. Bo, "Global perspectives on e-waste", vol. 25, p. 436–458, 2005.
- [5] M. Paulo Kohler Caldas, "Síntese de nanopartículas de prata a partir da reciclagem de placas de circuito impresso", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.
- [6] A. M. Leader, X. U. E. Wang, e G. Gaustad, "Creating the 2020 Tokyo Olympic Medals from Electronic Scrap : Sustainability Analysis", *JOM*, vol. 69, nº 9, p. 1539–1545, 2017.
- [7] J. Cui e L. Zhang, "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review", *J. Hazard. Mater.*, vol. 158, nº 2–3, p. 228–256, 2008.
- [8] A. C. Leis, "Riscos socioambientais dos resíduos tecnológicos: uma análise do tema na legislação e suas implicações para a sociedade", *Rev. Tecnol. e Soc.*, vol. 7, 2011.
- [9] J. Carlos e M. J. De Queiroz, "E-Lixo : O Problema E a Solução Ao Crescente Consumo E Descarte De Produtos Eletrônicos", *Inst. Fed. do Rio Gd. do Norte*, p. 8, 2010.
- [10] M. Burke, "The gadget scrap heap", *Chem. World*, nº June, p. 44–48, 2007.
- [11] B. R. Babu, A. K. Parande, e C. A. Basha, "Electrical and electronic waste: A global environmental problem", *Waste Manag. Res.*, vol. 25, nº 4, p. 307–318, 2007.
- [12] A. C. Albuquerque; e C. A. B. Neves, *Biocorrosão – Da Integridade Do Biofilme À Integridade Do Material*, vol. 33, nº 1–2. [Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial], 2014.

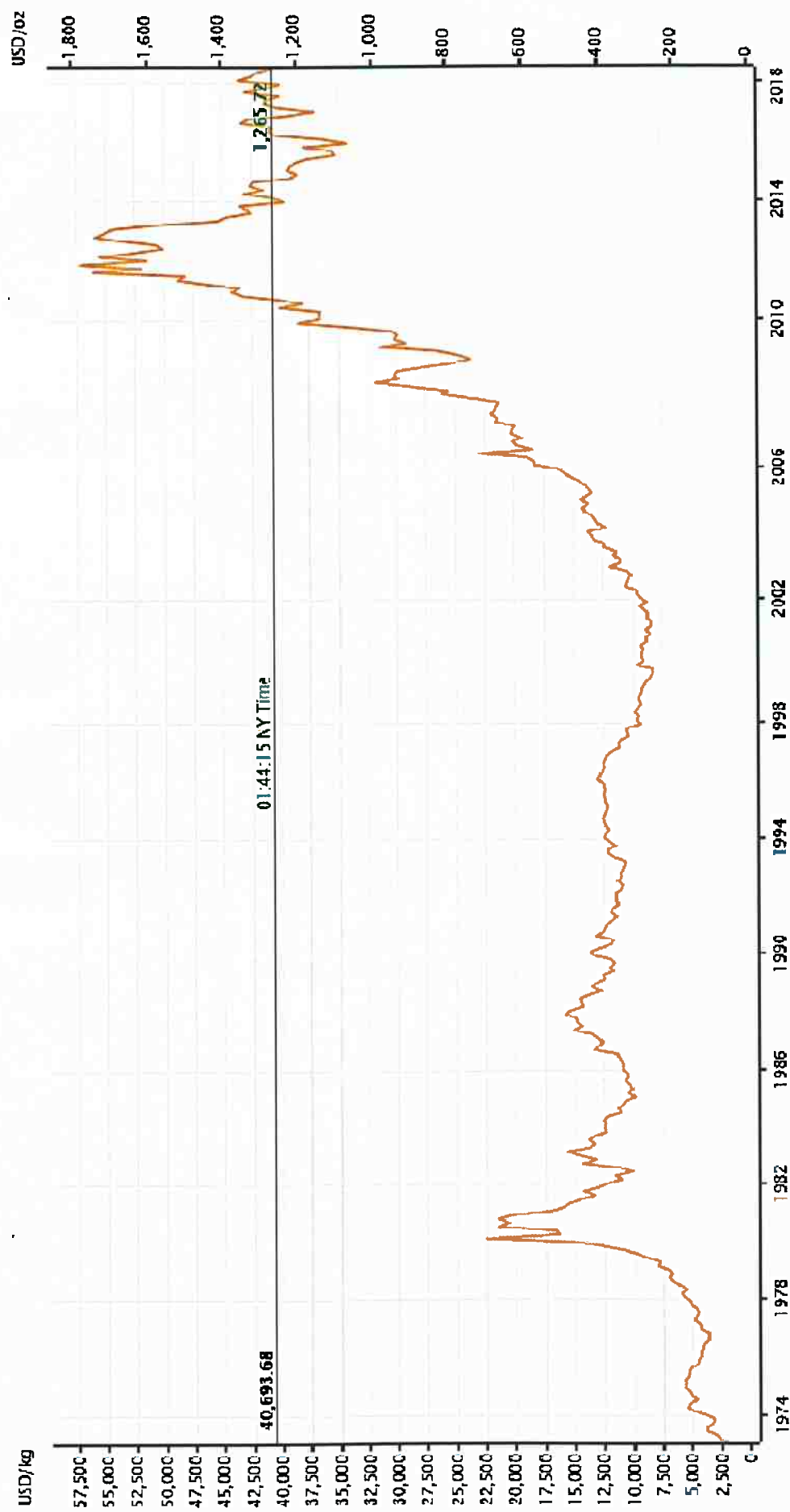
- [13] A. Bernard, "Cadmium & its adverse effects on human health", *Indian J. Med. Res.*, vol. 128, nº 4, 2008.
- [14] J. O. Duruibe, M. O. Ogwuegbu, e J. N. Ekwurugwu, "Heavy metal pollution and human biotoxic effects", *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 2, nº 5, p. 112–118, 2007.
- [15] J. A. Alcedo e K. E. Wetterhahn, "Chromium Toxicity and Carcinogenesis", *Int. Rev. Exp. Pathol.*, vol. 31, nº C, p. 85–108, 1990.
- [16] European Parliament e The Council Of The European Union, "Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE)", *Off. J. Eur. Union*, vol. 13, nº 2, p. 1–24, 2012.
- [17] P. da R.-C. Civil, "LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010", 2010. [Online]. Available at: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. [Acessado: 05-jun-2018].
- [18] H. M. Veit, "Reciclagem de cobre de sucata de placas de circuito impresso", *Univ. Fed. do Rio Gd. do Sul, Porto Alegre*, p. 115, 2005.
- [19] L. H. Yamane, "Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico.", 2012.
- [20] A. Alzate, E. López, C. Serna, e O. Gonzalez, "Gold recovery from printed circuit boards by selective breaking of internal metallic bonds using activated persulfate solutions", *J. Clean. Prod.*, vol. 166, p. 1102–1112, 2017.
- [21] G. M. Vezza, "Análise de fim de vida de contatos não permanentes folheados a ouro", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.
- [22] H. de A. Neto, "Relatório técnico 28 - Perfil do Ouro", p. 50, 2009.
- [23] M. Antonio e C. Nery, "Balanço Mineral Brasileiro", p. 1–40, 2001.
- [24] S. Syed, "Hydrometallurgy Recovery of gold from secondary sources — A review", *Hydrometallurgy*, vol. 115–116, p. 30–51, 2012.
- [25] M. L. Oliveira, "Ouro". [Online]. Available at: https://sistemas.dnrm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3988. [Acessado: 05-jun-2018].
- [26] "Gold Price Chart". [Online]. Available at: <https://goldprice.org/gold-price-chart.html>. [Acessado: 20-jun-2018].

ANEXO A – COTAÇÃO DO OURO ÚLTIMOS 15 ANOS



Fonte: [26]

ANEXO B – COTAÇÃO DO OURO DESDE 1974



Fonte: [26]