

# Série Tecnologia Ambiental

## Extração de Ouro a partir de Placas de Circuito Impresso por Cianetação Intensiva

Ana Luiza Agostinho Marques dos Santos

Naiara Soares Bello

Luis Gonzaga Santos Sobral

Débora Monteiro de Oliveira

## **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Extração de Ouro a partir de Placas de Circuito  
Impresso por Cianetação Intensiva**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Dilma Vana Rousseff**

Presidente

**Michel Miguel Elias Temer Lulia**

Vice-Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**

**Celso Pansera**

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação

**Emília Maria Silva Ribeiro Curi**

Secretária-Executiva

**Kayo Julio Cesar Pereira**

Coordenador-Geral das Unidades de Pesquisa

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Fernando Antonio Freitas Lins**

Diretor

**Arnaldo Alcover Neto**

Coordenador de Análises Minerais

**Claudio Luiz Schneider**

Coordenador de Processos Minerais

**Durval Costa Reis**

Coordenador de Administração

**Cosme Antonio de Moraes Regly**

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

**Francisco Wilson Hollanda Vidal**

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

**Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos**

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

# SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN – 978-85-8261-038-1

STA - 85

## **Extração de Ouro a partir de Placas de Circuito Impresso por Cianetação Intensiva**

### **Naiara Soares Bello**

Bióloga, pela Universidade Veiga de Almeida. Bolsista PCI do CETEM/MCTI.

### **Ana Luiza Agostinho Marques Santos**

Graduanda em Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos pela UFF. Bolsista de Iniciação Científica do CETEM/MCTI.

### **Luis Gonzaga Santos Sobral**

Eng. Químico, PhD em Hidrometalurgia. Pesquisador Titular do CETEM/MCTI.

### **Débora Monteiro de Oliveira**

Bióloga, M.Sc. pela Escola de Química da UFRJ. Estudante de doutorado na EQ-UFRJ.

**CETEM/MCTI**

2015

## **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Luis Gonzaga Santos Sobral**

Editor

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Subeditora

### **CONSELHO EDITORIAL**

Marisa Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio M. Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Sílvia Gonçalves Egler (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos Augusto da Costa (UERJ), Fátima Maria Zanon Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP), Virginia Sampaio Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minerometalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

**Valéria Cristina de Souza**

Coordenação Editorial

**João Henrique de Castro Rocha**

Programação Visual

**Valéria Cristina de Souza**

Editoração Eletrônica

**Andrezza Milheiro**

Revisão

---

Bello, Naiara Soares

Extração de ouro a partir de placas de circuito impresso por cianetação intensiva / Naiara S. Bello [et al.]. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015.

38p.: il (Série Tecnologia Ambiental, 85)

1. Cianetação. 2. Metais preciosos. 3. Reciclagem. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Santos, Ana Luiza Agostinho Marques. III. Sobral, Luiz G. Santos. IV. Oliveria, Débora Monteiro. V. Título. VI. Série.

# SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1   INTRODUÇÃO	9
1.1   Lixo Eletrônico ou e Lixo	10
1.2   Tipos de Sucatas	10
1.3   Elementos Contidos na Sucata	10
2   RECICLAGEM	12
2.1   Processamento Mecânico	15
2.2   Eletrometalurgia	16
2.3   Pirometalurgia	17
2.4   Hidrometalurgia	18
3   OBJETIVO	23
4   METODOLOGIA	24
4.1   Amostra de Sucata Eletrônica	24
4.2   Caracterização Química	24
4.3   Ensaios de Cianetação	24
5   RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1   Caracterização Química	26
5.2   Ensaios de Cianetação	26
6   CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32



## **RESUMO**

Com o avanço tecnológico, os equipamentos eletrônicos se tornam obsoletos e muitas vezes são substituídos em um curto período de tempo, gerando um aumento de resíduos. A sucata eletrônica é constituída de metais preciosos, metais de base e metais especiais, metais perigosos ao ambiente, halogêneos, plásticos e outros compostos orgânicos, vidro e material cerâmico. Dentre as diversas rotas tecnológicas utilizadas para a extração de metais preciosos a partir de sucatas eletrônicas, a cianetação intensiva foi escolhida devido à elevada eficiência extrativa.

### **Palavras-chave**

Sucata eletrônica; Reciclagem; Cianetação; Metais Preciosos.

## **ABSTRACT**

With the advances in technology, the electronic devices become quickly obsolete and sometimes are replaced in a short term, generating a great deal of residues. The e-waste consists in precious metals, base and special metals, heavy metals, halogens, plastics and some other organics, glass and ceramics. Among the used technological routes for extracting precious metals out of e-waste the intensive cyanidation was chosen due to the high extraction efficiency.

### **Keywords**

Electronic waste; Recycling; Cyanidation; Precious Metals.

## 1 | INTRODUÇÃO

A produção e utilização de equipamentos eletro-eletrônicos está crescendo cada vez mais em todo o mundo devido ao grande uso desses produtos pela população e à sua rápida obsolescência.

Com o avanço tecnológico, esses equipamentos se tornam obsoletos e são descartados com uma maior rapidez, aumentando a produção de resíduo eletrônico, sendo necessária a sua reciclagem visando à recuperação dos bens metálicos contidos, ao invés de descartá-los no meio ambiente, fato que se configura como um problema ambiental.

Os países em desenvolvimento estão gerando cada vez mais resíduos nocivos à saúde pública e ao meio ambiente e, a menos que as medidas corretas de destino e reciclagem desses resíduos sejam tomadas, podem ocorrer graves consequências à população e ao meio ambiente.

Segundo Widmer *et al.* (2005), uma estimativa mostrou que 100 milhões dos computadores em uso se tornaram obsoletos em 2004.

De acordo com Frazzoli *et al.* (2010), os problemas de saúde como desregulação endócrina e a neurotoxicidade são exemplos de problemas relacionados aos resíduos descartados inadequadamente, e são problemas que podem se perpetuar por gerações.

Compostos que servem de matéria-prima para os produtos tecnológicos, são responsáveis pela poluição e destruição de espécies de animais, além da liberação de gases venenosos na atmosfera, de acordo com Vieira *et al.* (2009).

## 1.1 | Lixo Eletrônico ou e-Lixo

Pode ser classificado como lixo tecnológico/eletrônico ou e-lixo todo resíduo oriundo do descarte de aparelhos eletrônicos que seja passível de reciclagem, como computadores, celulares, dispositivos eletrônicos portáteis, televisões, pilhas, baterias, rádios, dentre outros.

## 1.2 | Tipos de Sucatas

Existem diversos tipos de sucata eletrônica/lixo eletrônico, como placa de DVD, computador, celular, placa de celular, memória, HD, fonte de *notebook*, *nobreak*, estabilizador, placa mãe, dentre outros.

De acordo com Zhang (1998), o avanço tecnológico tem gerado uma grande quantidade de lixo eletrônico, sendo sua maior parte descartada juntamente com o lixo doméstico, ocasionando poluição e perda de metais ou, segundo Kasper (2011), guardados em casa ou em depósitos esperando uma destinação final.

## 1.3| Elementos Contidos na Sucata

A sucata eletrônica contém metais que não devem ser descartados sem serem reaproveitados, e muitos elementos tóxicos e perigosos que representam uma considerável ameaça para o meio ambiente caso não sejam tratados de forma adequada (UMICORE, 2015).

Os aparelhos eletrônicos modernos podem conter uma grande quantidade de elementos, dentre eles estão os plásticos, os metais preciosos (Ag, Au, Pd e Pt), os metais ferrosos (V, Cr, Fe, Mn, Ni, Nb, Mo), os metais não ferrosos (Mg, Al, Ti, Co, Cu, Zn, Sn, Pb), e os metais de aplicações especiais (Li, Be, B, Ga, As, Se, Sr, Y, Zr, Cd, In, Sb, Te, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Hg, Tl, Bi) (OLIVEIRA E SOBRAL, 2012).

## 2 | RECICLAGEM

Uma das rotas alternativas para a destinação do e-lixo é a reciclagem. Atualmente, além da reciclagem, as opções para o tratamento de resíduos eletrônicos envolvem a reutilização, o remanufaturamento, assim como a incineração e a deposição em aterros sanitários (CUI & ZHANG, 2008).

Por reciclagem entende-se que um material, após ter completado o seu ciclo de vida em um produto, pode ser reprocessado, entrar novamente no ciclo dos materiais e ser utilizado em outro produto (RESENDE, 2011).

A reciclagem tem a vantagem de diminuir a quantidade de resíduos gerados e a possibilidade de reutilizar esses materiais que foram descartados.

De acordo com Cui e Zhang (2008), a reciclagem de lixo eletrônico é um assunto importante não só do ponto de vista do tratamento de resíduos, mas também devido à recuperação de materiais valiosos.

Segundo Cui e Forsberg (2003), a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) identificou sete grandes benefícios, dentre eles a economia de energia e a redução da poluição quando materiais reciclados, como sucata de ferro e aço são reutilizados ao invés de materiais virgens.

Dentre os diversos tipos de sucata, as placas de circuito impresso necessitam, também, ser processadas de maneira ambientalmente sustentável. A reciclagem dessas placas é um problema, devido à mistura heterogênea de matéria orgânica, metais (inclusive os preciosos), e fibra de vidro (PIETRELLI *et al.* 2014).

De acordo com Vivas e Costa (2013), os principais processos utilizados para a reciclagem dessas placas são os processos Pirometalúrgicos, Hidrometalúrgicos, Eletrometalúrgicos, Processamentos Mecânicos e Biotecnológicos.

Devido à elevada variabilidade do preço dos recursos e à alta geração de poluentes, de acordo com a Diretiva da União Europeia, a reciclagem de placas eletrônicas tornou-se obrigatória. Para tornar-se autossustentável e ambientalmente segura, essa reciclagem de equipamentos elétricos e eletrônicos necessita ser lucrativa. Os metais preciosos presentes nas placas de circuito impresso parecem ser os maiores geradores de recursos econômicos da reciclagem de equipamentos elétricos e eletrônicos (PIETRELLI *et al.* 2014).

O conceito de recuperação de elementos contidos nos produtos que se encontram em desuso, conhecido como mineração de superfície, é considerado como um passo importante para alcançar uma sociedade sustentável (TUNSU, 2015).

Segundo Resende (2011), há uma grande preocupação sobre o que fazer com o e-lixo gerado, pois são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. Sendo assim, a deposição do lixo eletrônico em aterros sanitários não é permitida, e o armazenamento deste lixo, em um recinto apropriado, tem um custo elevado.

A maior parte dos aterros sanitários hoje disponíveis estão com sua vida útil limitada e tem-se localizado, cada vez mais, distantes das cidades, aumentando o custo do transporte. A construção e o uso inadequado dos aterros vem acarretando sérios impactos ao meio ambiente, à poluição dos solos e das águas subterrâneas pela infiltração de líquidos percolados, e

das águas superficiais pelo escoamento destes líquidos ou carregamento de resíduos pelas águas das chuvas (OLIVEIRA, 1997).

As partes que compõem um aterro sanitário, de acordo com Sant'ana Filho (1992), são: sistema de drenagem de águas pluviais, gases e chorume (líquido originário da decomposição de matéria-orgânica), de cor preta e odor desagradável, altamente poluente, cerca, pátio, balança, dentre outros.

O descarte indevido de aparelhos celulares faz com que uma grande parcela destes sejam destinados a aterros sanitários ou sejam incinerados de forma incorreta, liberando materiais tóxicos ao meio-ambiente, como Mercúrio (Hg), Cádmiu (Cd), Chumbo (Pb), Arsênio (As), dioxinas e furanos. Estas substâncias poluem o solo, a água e o ar, podendo biocumularem-se e persistirem no ambiente, causando risco não só ao ambiente mas também à saúde humana (WU, 2008).

Tendo em vista esses problemas, rotas alternativas são utilizadas para o tratamento do e-lixo.

A disposição de sucatas em aterros, segundo Veit (2001), gera riscos de poluição por contaminação de áreas com componentes metálicos e a perda dos materiais metálicos valiosos.

As sucatas utilizadas nesse trabalho foram placas de circuito impresso e, de acordo com Kasper (2011), os principais processos utilizados na reciclagem dessas placas são o processamento mecânico, a eletrometalurgia e os processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.

## **2.1 | Processamento Mecânico**

O processamento mecânico ultimamente tem sido utilizado como um pré-tratamento para o reaproveitamento de metais a partir de sucatas eletrônicas (VEIT, 2002).

De acordo com Moraes (2011), o processamento mecânico envolve operações unitárias de tratamento de minérios como a moagem, a classificação granulométrica, a separação magnética e eletrostática.

### **2.1.1 | Moagem**

De acordo com Kasper (2011), após serem separados, o material polimérico e cerâmico são fragmentados e moídos para, em seguida, serem devidamente separados.

### **2.1.2 | Classificação Granulométrica**

Para resíduos eletrônicos, essa classificação é realizada em peneiras vibratórias horizontais, uma vez que permitem a separação por tamanho de partícula e facilita a etapa de caracterização dos materiais através de análises químicas, permitindo a identificação das frações que concentram metais, cerâmicos e polímeros (CUI, 2003).

### **2.1.3 | Separação Magnética**

A separação magnética é uma operação unitária utilizada no beneficiamento de minérios e remoção de materiais magnéticos de sucatas. Os materiais podem ser classificados de três formas distintas: ferromagnéticos, que são atraídos

fortemente pelo campo magnético; paramagnéticos, que são atraídos fracamente por esse campo; e os diamagnéticos, que são repelidos pelo esse mesmo campo (LUZ, *et al.* 1995).

#### 2.1.4 | Separação Eletrostática

Segundo Luz *et al.* (1995), a separação eletrostática é uma operação de concentração de minérios e materiais que considera algumas propriedades como condutividade elétrica, susceptibilidade em adquirir cargas elétricas superficiais, densidade e forma geométrica. Dois fatores podem influenciar na separação eletrostática: a intensidade do campo elétrico, para se ter a capacidade de desviar uma partícula eletricamente carregada, e carga elétrica superficial das partículas.

## 2.2 | Eletrometalurgia

Segundo Veit (2005), a eletrometalurgia consiste em processos de obtenção de metais por eletrólise que, normalmente, são efetuados em meios eletrolíticos aquosos ou em sais fundidos.

Na eletrometalurgia há um grande uso de recursos energéticos; porém, não se compara ao uso desses recursos na pirometalurgia (VIVAS *et al.* 2013).

O objetivo da maioria dos processos eletrometalúrgicos ligados à reciclagem de sucatas eletrônicas é recuperar, ao final do processo, os metais em suas formas puras (HOFFMANN, 1992).

As desvantagens na eletrólise em sais fundidos, de acordo com Veit (2001), são a alta energia requerida e o rigoroso controle das emissões atmosféricas de cloretos e fluoretos. Já as vantagens, segundo Sum (1991), em relação aos metais preciosos são: poucas etapas; o eletrólito pode ser reciclado; é aplicável a qualquer tipo de sucata, e os preciosos podem ser dissolvidos, simultaneamente, ou seletivamente.

### 2.3 | Pirometalurgia

O processo pirometalúrgico é um mecanismo de concentração de metais em uma fase metálica, a partir de sucatas eletrônicas, e se caracteriza pelo uso de altas temperaturas para esse processamento (HOFFMANN, 1992; CAPONERO, 2002).

A queima de equipamentos eletro-eletrônicos, segundo Guo *et al.* (2010) e Jie *et al.* (2008), libera gases tóxicos (dioxinas e furanos) devido à presença de retardantes de chamas (compostos bromados, clorados e ésteres). Essas dioxinas e furanos podem gerar graves problemas ao meio ambiente e à saúde. Essa emissão gasosa é um dos principais problemas do processo pirometalúrgico quando não é devidamente tratada (VEIT, 2005).

Na pirometalurgia pode haver uma grande perda de metais devido à volatilização de seus cloretos. A quantidade de escória no forno aumenta por conta dos componentes cerâmicos e vidros das sucatas ocasionando, assim, a perda de metais nobres e de base (VIVAS *et al.* 2013).

A sucata, devidamente triturada, pode ser queimada, em um forno em altas temperaturas, para destruir os polímeros, deixando os resíduos metálicos. Ligas metálicas impuras podem ser produzidas pela fusão de um concentrado de metal bruto. Estas ligas podem ser refinadas através dos processos eletrometalúrgico ou pirometalúrgico. Cabe avaliar a energia térmica utilizada no processamento desses materiais que não será recuperada (SUM, 1991).

Nos processos pirometalúrgicos, de acordo com Vivas *et al.* (2013), assim como nos processos hidrometalúrgicos, também são gerados resíduos sólidos, que não são reciclados, como escórias de cerâmicos, polímeros e metais de difícil reciclagem.

Os processos pirometalúrgicos são comumente os mais utilizados pelas indústrias de reciclagem para a recuperação de metais preciosos devido ao fato deste processo trazer algumas vantagens como aceitar qualquer tipo de sucata eletrônica, ter poucas etapas e não requerer um pré-tratamento (VEIT, 2005).

## **2.4 | Hidrometalurgia**

Os minerais se apresentam agregados na natureza, na forma de rochas ou minérios, e devem ser separados para sua utilização adequada.

A hidrometalurgia permite a extração de metais de interesse contidos nos minérios, através de sua dissolução em meio aquoso por meio de processos unitários como a lixiviação.

A lixiviação consiste na remoção do metal ou metais de interesse através de um agente lixiviante, em condições variadas de temperatura, ou através da utilização de

micro-organismos, denominado como processo de biolixiviação, em que estes são capazes de solubilizar metais através da oxidação de sulfetos minerais.

Segundo Kasper (2011), o processo hidrometalúrgico consiste de uma série de ataques com soluções ácidas ou cáusticas, tendo em vista a dissolução de um material sólido. Posteriormente, essas soluções são tratadas por processos de precipitação, extração por solventes, cementação e troca iônica para separar e concentrar os metais de interesse (VIVAS, *et al.* 2013).

A hidrometalurgia, segundo Veit (2005), tem como principal vantagem, comparada a outros processos, a não necessidade da utilização de qualquer recurso energético significativo como energia elétrica.

As técnicas hidrometalúrgicas têm sido muito utilizadas na extração de elementos presentes nos minérios e nos minerais de origem nas últimas duas décadas para a posterior recuperação desses metais, principalmente os preciosos, de lixos eletrônicos (CUI & ZHANG, 2008).

Em geral, a extração hidrometalúrgica ocorre de duas maneiras, segundo Resende (2011): através da lixiviação, que é a dissolução seletiva dos metais de interesse, provenientes de seus minérios, e a precipitação que consiste na recuperação seletiva dos metais de interesse a partir das lixívia produzidas.

De acordo com Veit (2001), as principais vantagens dos processos hidrometalúrgicos no tratamento de sucata eletrônica em relação aos processos pirometalúrgicos são: baixo custo operacional, baixo consumo de energia e reaproveitamento dos reagente químicos; melhor proteção

ambiental, com relação aos riscos de poluição atmosférica, e fácil separação dos principais componentes da sucata. Já algumas de suas desvantagens são: necessidade de uma operação mecânica para reduzir o volume de sucata; efluentes contendo metais de base que são tóxicos; grande volume do agente lixiviante necessário para a dissolução das sucatas e geração de resíduos sólidos.

### 2.4.1 | Cianetação

O processo de cianetação consiste na dissolução de ouro/metals preciosos pela ação conjunta dos íons cianeto, agente complexante, com o oxigênio, agente oxidante. Esse processo ocorre com baixa eficiência na dissolução desses metais, devido, sobretudo, à baixa solubilidade do oxigênio na água, que é da ordem de  $8 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ . A cinética de dissolução é, portanto, uma função direta da concentração de oxigênio dissolvido na solução lixiviante e, portanto, qualquer mudança nesse sistema que possa causar redução da solubilidade do oxigênio agrava, ainda mais, esse problema (TRINDADE & MONHEMIUS, 1993).

A química da cianetação é expressa pela reação a seguir:



O íon cianeto atua como agente complexante do metal e o oxigênio atua como o agente oxidante da reação.

O ajuste de pH da solução cianídrica é essencial para que os íons cianeto ( $\text{CN}^-$ ), quando da dissolução do cianeto de sódio em água, não sofra hidrólise, com formação de ácido

cianídrico, gás extremamente tóxico, preservando, assim, esses íons cianeto, em sua forma livre, na solução. A reação abaixo mostra a hidrólise dos íons cianeto.



Valores de pH acima de 11 das soluções cianídricas garantem a total dissociação cianeto com uma porcentagem mínima de hidrólise. Já em valores de pH abaixo de 7, esses íons são totalmente hidrolisados com geração de ácido cianídrico.

De acordo com Young (2001), cerca de 0,6 milhão de tonelada da produção mundial de cianeto é utilizada na mineração. Cerca de 95%, maior parte desta produção, é utilizada na lixiviação de ouro e prata, e os outros 5% são utilizados, em grande parte, como agente depressor em operações de flotação, visando separar metais como cobre, chumbo, molibdênio e zinco, de seus respectivos sulfetos.

#### 2.4.2 | Método de Recuperação de Cianeto

O cianeto é uma substância empregada nos processos de lixiviação para a extração de ouro e é um reagente hidrometalúrgico de elevado custo. Uma boa parte do cianeto se perde pela sua oxidação a cianato e pela formação de cianocomplexos metálicos. Sendo assim, a recuperação do cianeto é de grande importância para a indústria minero-metalúrgica na extração de ouro (ANDRADE e MARTINS, 2005).

Segundo Dutra *et al.* (2002), apesar das distintas técnicas disponíveis para o tratamento dos efluentes industriais contendo cianeto, os métodos mais empregados baseiam-se

na oxidação química do cianeto a uma espécie menos tóxica, o cianato, que se hidrolisa produzindo os íons amônio e bicarbonato, além de uma lama contendo hidróxidos de metais pesados, quando presentes no efluente. A oxidação eletroquímica apresenta algumas vantagens, dentre as diversas técnicas para o tratamento de efluentes contendo cianeto, como a possibilidade de recuperação dos metais complexados pelo cianeto, além de não necessitar de reagentes químicos adicionais.

Segundo Miltzarek (2000), o processo de regeneração de cianeto, que consiste em diminuir o pH da solução através da adição de ácido sulfúrico, é utilizado com o intuito de converter o cianeto que se encontra nas formas livre ou como ciano-complexos metálicos, em gás cianídrico, tornando-se volátil e sendo recolhido numa solução alcalina, para posteriormente ser reutilizado.

### **3 | OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi definir uma rota de processamento de sucata eletrônica visando à extração de metais preciosos por meio da cianetação intensiva, utilizando agentes oxidantes distintos.

## **4 | METODOLOGIA**

### **4.1 | Amostra de Sucata Eletrônica**

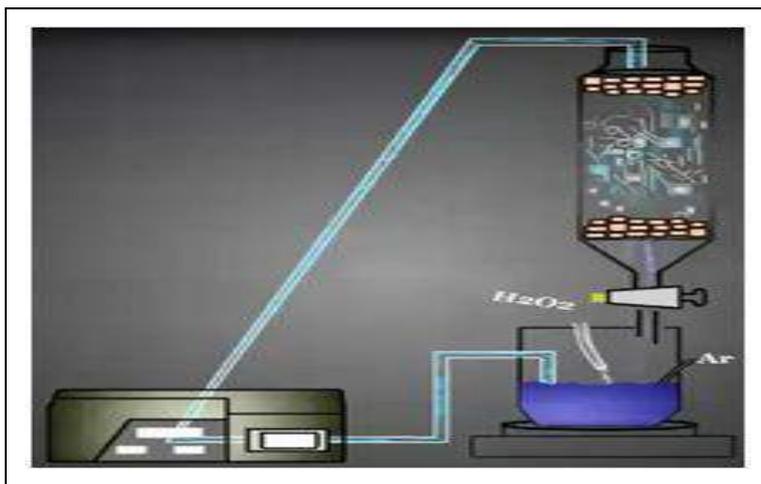
Previamente à realização dos experimentos, efetuou-se a extração manual das partes metálicas de placas de circuito impresso oriundas de computadores obsoletos.

### **4.2 | Caracterização Química**

A caracterização química da sucata foi feita através de ensaios de digestão em água régia (1:4 HNO<sub>3</sub>/HCl). Para tanto, foram realizados três ensaios (réplicas) que consistiram na solubilização de 2 gramas de sucata em 50mL de água régia. As lixívias geradas foram analisadas por espectrometria de absorção atômica e, com base nas concentrações de cada metal em solução, foi feito o cálculo para determinação dos teores de cada elemento químico analisado.

### **4.3 | Ensaios de Cianetação**

Para o início dos testes foram separadas amostras de 100 gramas de sucata para serem realizados experimentos com concentrações distintas de cianeto de sódio. Essas 100 gramas foram dipostas em uma coluna de acrílico, entre duas camadas de quartzo que se encontravam na porção superior e inferior da coluna.



**Figura 1.** Esquema representativo do sistema utilizado.

Foi preparada uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) em pH 12 e, posteriormente, foi adicionado o reagente Cianeto de Sódio (NaCN) em concentrações crescentes a cada experimento. Tais concentrações foram:  $2,5 \text{ g.L}^{-1}$ ;  $5,0 \text{ g.L}^{-1}$ ;  $7,5 \text{ g.L}^{-1}$  e  $10 \text{ g.L}^{-1}$

Essa solução era bombeada até a coluna contendo a sucata, por onde percolava de modo contínuo (Figura 1) até que fosse observada a ausência da coloração dourada na sucata.

O primeiro experimento foi realizado com injeção de ar no qual apenas o oxigênio atuou como agente oxidante da reação. Já no segundo teste, foi feita a adição de 5 mL de Peróxido de Hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) a cada 12 minutos, durante uma hora. No terceiro e último teste, junto ao sistema anterior, foi utilizada uma sonda cerâmica, contendo microporos, capaz de formar microbolhas na solução cianídrica.

## 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 | Caracterização Química

A Tabela 1 mostra os resultados da caracterização química da amostra de placa de circuito impresso, objeto do estudo.

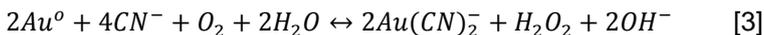
**Tabela 1.** Teor dos metais contido nas amostra de placa de circuito impresso utilizada no estudo.

mg.kg <sup>-1</sup>	Ag	483,33	±115,47
	Au	144,17	±9,46
	Pt	73,12	±4,42
	Cd	2,75	±0,35
%	Pb	0,87	±0,07
	Ni	0,99	±0,016
	Cu	63,16	±1,6
	Fe	0,85	±0,017
	Al	0,35	±0,1
	Sn	3,37	±0,06

### 5.2 | Ensaio de Cianetação

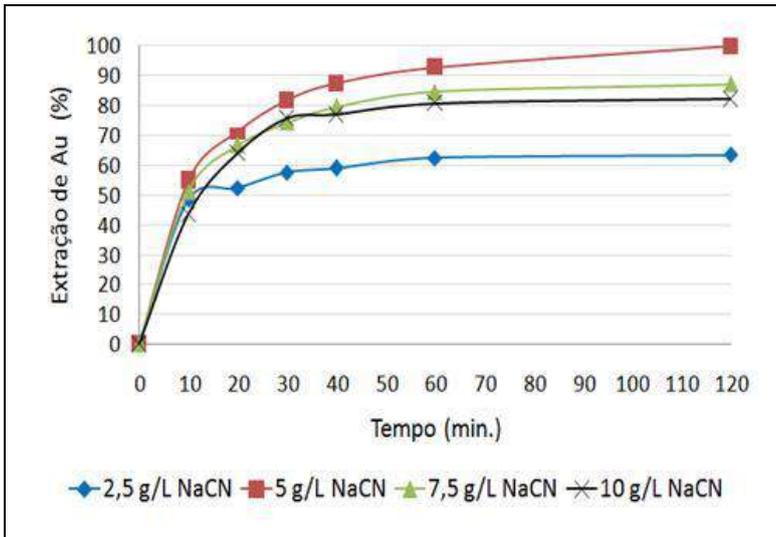
#### 5.2.1 | Ensaio com Injeção de Ar

As Equações 3 e 4 traduzem o processo de dissolução dos metais preciosos, ouro em particular, pela ação conjunta de cianeto, agente complexante, e oxigênio, agente oxidante.



Como pode ser visto, das reações acima, ocorre, num primeiro estágio, o início do processo de dissolução desses metais com geração de peróxido como intermediário da reação e, com a continuidade da cianetação, esse peróxido, juntamente com o cianeto livre, se encarregam de dar seguimento ao referido processo de dissolução. Estas mesmas reações ocorrem, igualmente, quando da dissolução dos demais preciosos.

A Figura 1 mostra a influência do aumento da concentração de cianeto no processo de dissolução de ouro em testes de cianetação com injeção de ar com duração de 2 horas. Nota-se que ao se utilizar  $5,0 \text{ g.L}^{-1}$  de cianeto de sódio, alcançou-se maior percentual de extração de ouro. A elevação da concentração tornou o processo menos efetivo devido ao comprometimento do agente oxidante, o oxigênio. Isso ocorreu pois a solubilidade desse gás diminuiu com o aumento da força iônica provocado pela aumento da salinidade do meio.

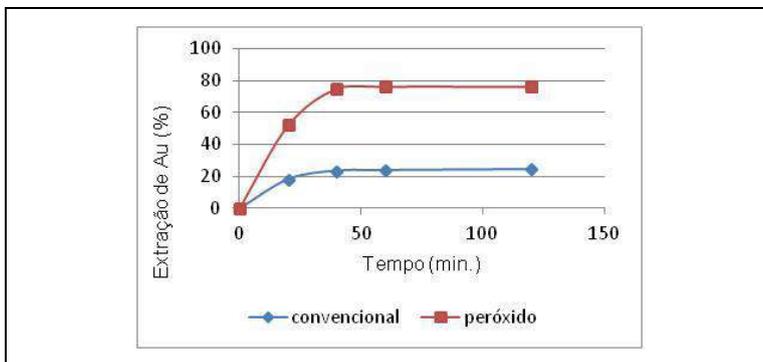


**Figura 2.** Influência da concentração de cianeto na dissolução de ouro.

Como pode ser observado nessa Figura, ocorre uma intensificação na extração de ouro à medida que se aumenta a concentração inicial de cianeto. Entretanto, com o aumento continuado dessa concentração o processo extrativo diminui, sensivelmente, a sua efetividade visto que ocorre uma diminuição da solubilidade do oxigênio em função do aumento da salinidade do meio. Dessa forma, ficou claro que não é vantajoso ultrapassar a concentração inicial de  $5 \text{ g.L}^{-1}$  em cianeto, uma vez que o benefício alcançado em concentrações mais elevadas, em termos de extração de ouro, não compensa os gastos com esse aumento na concentração do reagente.

### 5.2.2 | Ensaios de Cianetação com Adição de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Em seguida, um teste de cianetação intensiva foi realizado, desta vez fixada a concentração de cianeto inicial em 2,5 g.L<sup>-1</sup>, com a adição periódica de peróxido de hidrogênio 10M (30 volumes). Durante o teste, foram adicionados 5ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a cada 12 minutos, durante a primeira hora de teste. A Figura 3 mostra a influência dessa adição de peróxido na dissolução de ouro.

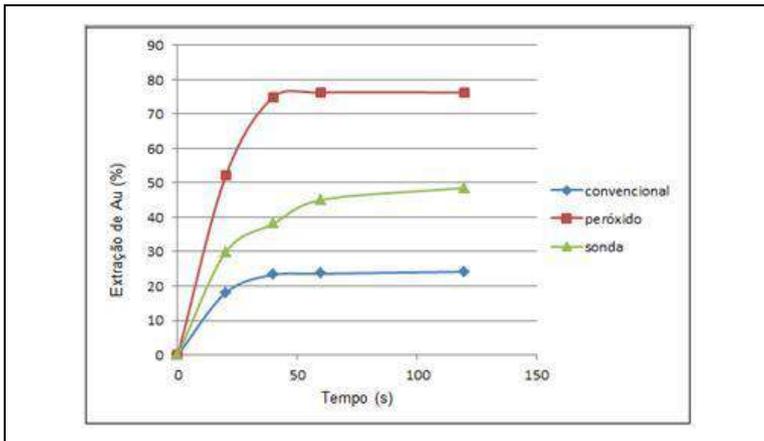


**Figura 3.** Influência da adição de peróxido de hidrogênio para extração de ouro nos ensaios de cianetação.

Comparando-se os ensaios realizados nos moldes convencionais (injeção de ar) e com a adição de peróxido de hidrogênio, nota-se que ao se utilizar a menor concentração de NaCN (2,5 g.L<sup>-1</sup>), a extração de ouro aconteceu de forma mais rápida. O percentual de extração foi superior nos testes com adição de peróxido. Isso ocorre devido à total miscibilidade do peróxido de hidrogênio no meio aquoso. Além disso, o peróxido de hidrogênio, em comparação com o oxigênio, conta com dois elétrons a menos em sua reação de redução à água, o que torna a oxidação muito mais enérgica.

### 5.2.3 | Ensaios de Cianetação com Utilização da Sonda Cerâmica para Injeção de Ar

A Figura 4 mostra uma comparação da extração de ouro, utilizando as três formas de adição de agente oxidante, fixando-se a concentração de cianeto em  $2,5 \text{ g.L}^{-1}$ .



**Figura 4.** Influência da adição de microbolhas de ar na extração de ouro.

Nota-se que o teste onde se utilizou uma sonda cerâmica, capaz de gerar microbolhas foi mais eficiente na extração de ouro que o teste com a injeção simples de ar (*i.e.*, processo convencional). As microbolhas foram capazes de aerar o sistema e aumentar a concentração de oxigênio dissolvido na solução. Porém, os testes com adição de peróxido se mostraram ainda mais eficientes, devido à total miscibilidade do agente oxidante na solução.

## 6 | CONCLUSÕES

Como pode ser depreendido dos testes realizados na extração de ouro por cianetação intensiva, pôde-se concluir que:

- o aumento da concentração de cianeto, durante a extração dos metais preciosos, se mostrou efetivo até o comprometimento da solubilidade do oxigênio dissolvido, agente oxidante, que ocorreu após a adição de quantidades superiores aos  $5 \text{ g.L}^{-1}$ ;
- a adição de peróxido, agente oxidante de total miscibilidade no meio reacional, se mostrou efetiva, intensificando o processo de dissolução do ouro; entretanto, com a continuidade dessa adição, deu-se início ao processo de degradação do cianeto livre, reação concorrente ao processo de cianetação dos metais preciosos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, R. C.; MARTINS, A. H. Extração por Solventes Aplicada à Recuperação de Cianetos. *Metalurgia & Materiais. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto* 58(2): 161-164, abr. jun. 2005.
- CAPONERO, J. Reciclagem de Pneus. Teses de Doutorado- Escola Politécnica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 2002.
- CUI, J.; FORSSBERG, E.; Mechanical Recycling of Waste Electric and Electronic Equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials. vol. 99 (3)*, p. 243–263, 2003.
- CUI, J.; ZHANG, L. Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A review. *Journal of Hazardous Materials, vol. 158*, 228–256, 2008.
- DUTRA, A. J. B.; SOBRAL, L. G. S.; LEMOS, F. A.; SANTOS, F. H. S. O processo Eletroquímico como Alternativa para o Tratamento de Efluentes Cianídricos. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 55(4), p. 267-272, out. dez. 2002.
- FRAZZOLI, C.; ORISAKWE, O. E.; DRAGONE, R.; MANTOVANI, A. Diagnostic Health Risk Assessment of Electronic Waste on the General Population in Developing Countries' Scenarios. *Environmental Impact Assessment Review* 30, p. 388 - 399, 2010.
- GUO, Q.; YUE, X.; WANG, M.; LIU, Y. Pyrolysis of Scraps Printed Circuit Board Plastic Particles in a Fluidized. *Powder Technology. vol. 198*, p. 422-428, 2010.
- HAYES, P. C. *Process Principles in Minerals and Materials Production*. Hayes Publishing CO. p. 29. Brisbane, Austrália, 1993.
- HOFFMANN, J. E. Recovering Precious Metals from Electronic Scraps. *JOM*, July, 1992.

- JIE, G.; YING-SHUN, L.; MAI-XI, L. Product Characterization of Waste Printed Circuit Board by Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. vol. 83, p. 185-189, 2008.
- JOHNSON, D. B. Importance of Microbial Ecology in the Development of New Mineral Technologies. *Hydrometallurgy*, vol. 59, p.147-157, 2001.
- KASPER, A. C. Caracterização e Reciclagem de Materiais Presentes em Sucatas de Telefones Celulares. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre, Fevereiro, 2011.
- LUZ, A. B. da, COSTA, L. S. N. e POSSA, M. V.; ALMEIDA, S. L. M. de. Tratamento de Minérios. CETEM/CNPq, p. 155-174, 187-200, 332-258, 1995.
- MILTZAREK, G. L. Estudo sobre Reutilização dos Cianetos Empregados no Tratamento de Minério Aurífero por Meio de Soluções Sintéticas e Efluentes da Cianetação. Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGEM. Porto Alegre, 2000.
- MORAES, V. T. Recuperação de Metais a partir do Processamento Mecânico e Hidrometalúrgico de Placas de Circuito Impressos de Celulares Obsoletos. São Paulo, 2011.
- NORRIS, P. R. Acidophilic Bacteria and their Activity in Mineral Sulfide Oxidation. *Microbial Mineral Recovery*, New York, McGraw-Hill, p. 3-27, 1990.
- NOVO, M. T. M.; SILVA, A. C.; MORETO, R.; CABRAL, P. C. P.; COSTACURTA, A., GARCIA, Jr. O.; OTTOBONI, L. M. M. Thiobacillus Ferrooxidans Response to Copper and Other Heavy Metals: growth, protein synthesis and protein phosphorylation. *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 77, p. 187-195, 2000.

- OLIVEIRA, S. Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos na Microrregião Homogênea Serra de Botucatu- Caracterização Física dos Resíduos Sólidos Domésticos na Cidade de Botucatu/SP. Dissertação de Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura - Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista, Botucatu, p. 127, 1997.
- OLIVEIRA, D. M.; SOBRAL, L. G. S. Mineração Urbana. A Saída para a Reciclagem de Valores Metálicos de Fontes Não-renováveis. Centro de Tecnologia Mineral, CETEM, 09 de Agosto de 2012.
- PIETRELLI, L.; PIETRANTONIO, M.; PIOZZI, A.; FLAMMINI, R.; FRANCOLINI, I. Material Recovery from Printed Circuit Boards: Characterization and recycling strategy. Proceedings SUM 2014, Second Symposium on Urban Mining, Bergamo, Italy; 19-21 May, 2014.
- RESENDE, L. V.; Recuperação de Európio e Ítrio de Monitores de Computadores Sucateados por Meio de Técnicas Hidrometalúrgicas. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia, das Radiações Minerais e Materiais. Belo Horizonte, 2011.
- SANT'ANA, R. F. Aterro Sanitário. In: Técnicas de tratamento de resíduo domiciliar urbano. Vol.1. Belo Horizonte, ABES. p. 13-43, 1992.
- SUM, E. Y. L. The Recovery of Metals from Electronic Scraps. JOM, p. 53-61, Abr., 1991.
- SUZUKI, I. Microbial Leaching of Metals from Sulfid Minerals. Biotechnology Advances. Department of Microbiology, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, vol. 19, p. 119-132, 2001.
- TRINDADE, R. B. E.; MONHEMIUS, A. J. The use of Anthraquione as a Catalyst in the Cyanide Leaching of Gold. Minerals Engineering, vol. 6, June, 1993.

- TUNSU, C.; PETRANIKOVA, M.; GERGORIC, M.; EKBERG, C.; RETEGAN, T. Reclaiming Earth Elements from end-of-life Products: a review of the perspectives for urban mining using hydrometallurgical unit operations. *Hydrometallurgy*, vol.156, p. 239-258, 2015.
- VEIT, H. M. Emprego do Processamento Mecânico na Reciclagem de Sucatas de Placas de Circuito Impresso. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- VEIT, H. M. Tese de Doutorado. Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2005.
- VIEIRA, K. N.; SOARES, T. O. R.; SOARES, L. R. A Logística Reversa Do Lixo Tecnológico: Um estudo sobre o Projeto de Coleta de Lâmpadas, Pilhas e Baterias da Braskem. *RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental Set.- Dez*, vol. 3, nº 3, p.120-136, 2009.
- VIVAS, C. R.; COSTA, P. F. Tomada de Decisão na Escolha do Processo de Reciclagem e na Recuperação de Metais das Placas Eletrônicas através da Análise Hierárquica. IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Salvador/BA. Universidade Estadual de Santa Cruz- UESC, 25 a 28 de Novembro de 2013.
- WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, MAX.; BONI, H.; Global Perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25, p. 436-458, 2005.
- WU, Y. Z.; CHAN, Y. C., MIDDENDORF, A.; GU, X., ZHONG, H. W. Assessment of Toxicity Potential of Metallic Elements in Discarded Electronics: A case study of mobile phones in China. *Journal of Environmental Science*, vol. 20, p. 1403-1408, 2008.

UMICORE - Reciclagem de Sucata Eletrônica. Disponível em: <http://www.umicore.com.br/nossosNegocios/recycling/pmr/sucataeletronica/>. Acessado em 05 de Setembro de 2015.

YAMANE, L. H. Recuperação de Placas de Circuito Impresso de Computadores Obsoletos Através de Processo Biohidrometalúrgico. São Paulo, 2012.

YONG, C.A. CYANIDE: Just the Facts. In: Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects. New Orleans, p. 97-113, 2001.

ZHANG, S.; FORSSBERG, E. Mechanical Recycling of Electronics Scrap - The Current Status and Prospects. Waste Management e Research, vol. 16, p. 119-128, 1998.

## SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2014, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 280 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

### Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA- 84 – **Bioliviação de Urânio Proveniente de Minérios com Baixo Teor (fontes não convencionais)**. André Luiz Ventura Fernandes, Tatiane Franco Machado e Débora Monteiro de Oliveira, 2015.

STA-83 – **Tecnologias Limpas para a Arte em Pedra-sabão – Mata dos Palmitos, Ouro Preto – MG - Brasil**. Patricia Correia de Araujo, Adão Benvindo da Luz, Maria da Conceição da Silva Freitas e Zuleica Carmem Castilhos, 2015.

STA-82 – **Aproveitamento de Resíduos Oriundos da Lavra e do Beneficiamento do Mármore Bege Bahia, visando a Geração de Compósitos Poliméricos**. Roberto Carlos C. Ribeiro e Marcia Gomes de Oliveira, 2015.

STA-81 – **Potencial Biotecnológico do uso de Micro-organismos Imobilizados em Gel de Alginato de Cálcio**. Ellen Cristine Giese, 2015.

## **INFORMAÇÕES GERAIS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3865-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

## **NOVAS PUBLICAÇÕES**

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



## Missão Institucional

A missão do Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é desenvolver tecnologia para o uso sustentável dos recursos minerais brasileiros.

## O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m<sup>2</sup> de área construída, que inclui 22 laboratórios, 3 usinas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 37 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 720 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.