

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Hellington Bastos da Silva de Sant'ana

**Caracterização de placas de circuito impresso de
aparelhos de telefone celular visando recuperação de
metais valiosos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia da
PUC-Rio.

Orientador: Professor Francisco José Moura
Co-Orientador: Professor Hugo Marcelo Veit

Rio de Janeiro
Abril de 2011



Hellington Bastos da Silva de Sant'ana

**Caracterização de placas de circuito impresso de
aparelhos de telefone celular visando recuperação de
metais valiosos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof.º. Francisco José Moura

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC Rio

Prof.º Hugo Marcelo Veit

Co-Orientador

Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul - UFRGS

Prof.º Rui de Goes Casqueira

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro- UFRRJ

Prof.º. Luiz Alberto Cesar Teixeira

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC Rio

Prof.º. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 08 de abril de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Hellington Bastos da Silva de Santana

Bacharel em Química Industrial pela Universidade Severino Sombra (2008). Atualmente é Mestrando em Engenharia de Materiais pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Tem experiência em Química de Alimentos e Ambiental.

Ficha Catalográfica

Sant'ana, Hellington Bastos da Silva de

Caracterização de placas de circuito impresso de aparelhos de telefone celular visando recuperação de metais valiosos / Hellington Bastos da Silva de Sant'ana ; orientador: Francisco José Moura ; co-orientador: Hugo Marcelo Veit. – 2011.

105 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Reciclagem. 3. Sucata eletrônica. 4. Telefone celular. 5. Prata. I. Moura, Francisco José. II. Veit, Hugo Marcelo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

“Há três métodos para ganhar sabedoria: primeiro, por reflexão, que é o mais nobre; segundo, por imitação, que é o mais fácil; e terceiro, por experiência, que é o mais amargo”.

Confúcio

Agradecimentos

Ao professor Francisco José Moura, pela orientação e apoio para a realização deste trabalho.

Ao professor Hugo Marcelo Veit pela co-orientação neste trabalho.

Ao CETEM, representado por Salvador Almeida, fundamental, permitindo a utilização de equipamentos e instalações durante o processamento mecânico das sucatas de aparelhos de telefone celular.

Ao Rodrigo, sempre disponível na operação do MEV.

Ao *gentleman* Maurício Dupim, sempre solícito na realização das análises químicas.

Ao meu irmão Henrique, pelo apoio incondicional no decorrer do trabalho.

Aos meus pais e familiares pelo apoio constante, carinho e preocupação.

Ao CNPq e a PUC-Rio, pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

Aos funcionários Carmem, Rosely e Leonardo pelo apoio, fundamental na coleta dos aparelhos.

Aos professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia de Materiais.

Resumo

Sant'ana, Hellington Bastos da Silva de; Moura, Francisco JoséL Veit, Hugo Marcelo. **Caracterização de placas de circuito impresso de aparelhos de telefone celular visando recuperação de metais valiosos.** Rio de Janeiro, 2011. 105p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Atualmente um dos setores industriais que mais se desenvolve é a indústria eletroeletrônica. À medida que tecnologias evoluem, barateando os produtos, o consumo de eletroeletrônicos aumenta. O tempo de vida útil de tais produtos é relativamente curto e, em pouco tempo, esse material torna-se resíduo, conhecido como sucata eletrônica. Um tipo de sucata eletrônica comum é o telefone celular. Esta sucata representa uma matéria-prima interessante, pois, contém grande quantidade de metais base, quantidade considerável de metais valiosos e contendo também elementos perigosos. Neste trabalho, as sucatas passaram por várias etapas de processamento mecânico: inicialmente os aparelhos foram separados em lotes (<2001; >2002) e desmontados manualmente. As placas de circuito impresso foram moídas abaixo de 1 mm, Em seguida, as separações por densidade e magnética foram realizadas. As frações obtidas ao longo do processamento mecânico foram caracterizadas por análises químicas. Realizou-se um estudo em caráter preliminar para recuperar prata utilizando processamento hidrometalúrgico. O material concentrado mecanicamente foi lixiviado com ácido nítrico. Em seguida a prata foi recuperada da solução lixiviada por cementação. Com o processamento mecânico foi possível obter frações metálicas de até 80% em peso. A cementação da prata pelo cobre mostrou-se viável, possibilitando obter prata metálica em forma de precipitado e um lixiviado concentrado de cobre. Um ensaio de lixiviação foi realizado com a finalidade de caracterizar o resíduo quanto à sua periculosidade, de modo que, as sucatas de telefone celular devem ser consideradas resíduo perigoso, pois, a concentração de chumbo foi superior ao limite estabelecido pelas normas brasileiras.

Palavras-chave

Reciclagem; Sucata Eletrônica; Telefone Celular; Prata.

Abstract

Sant'ana, Hellington Bastos da Silva de; Moura, Francisco José (Advisor); Veit, Hugo Marcelo (Co-Advisor). **Characterization of printed circuit board of mobile phones aiming to recover valuable metals.** Rio de Janeiro, 2011. 105p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nowadays the electronics industry is the leading sector in developing new technologies. These new technologies lead to cheaper products increasing the consumption. The lifetime of such products is relatively short and soon it becomes waste, known as electronic waste. Cell phone is a common electronic waste. This waste represents an interesting raw material, because it contains large amount of base metals, considerable amount of valuable metals and also those dangerous. In this work, the electronic waste was submitted to mechanical processing: initially the devices were separated into two categories (<2001,> 2002) and disassembled manually. The printed circuit boards were milled below 1 mm and then submitted to density and magnetic separation processes. The fractions obtained during the mechanical processing were characterized by chemical analysis. Using the mechanical processing was possible to obtain metal fractions of 80 wt%. A preliminary study to recover silver using hydrometallurgical processes was carried out. The concentrated material mechanically obtained was leached with nitric acid. Then the silver was recovered from the leached solution by cementation process. The silver cementation with copper was feasible; the precipitate was rich in silver and leachate in copper. A leaching test was carried out to determine if a waste needs to be managed as a hazardous; so that, cell phone waste must be considered hazardous residue because the lead concentration was above the limit established by Brazilian Standards.

Keywords

Recycle; Electronic Waste; Gold; Silver; Palladium.

Sumário

1 Introdução	15
2 Objetivo	17
3 Revisão bibliográfica	18
3.1. Lixo eletrônico	18
3.2. Reduzir, Reutilizar e Reciclar: Os 3R's	23
3.3. Aparelhos de telefone celular	24
3.4. Placas de circuito impresso	25
3.5. Métodos de processamento	27
3.5.1. Processamento mecânico	28
3.5.2. Hidrometalurgia	29
3.5.3. Eletrometalurgia	32
3.5.4. Processos em altas temperaturas	33
3.5.5. Processos biometalúrgicos	36
3.6. Processamento Mecânico	38
3.6.1. Cominuição	38
3.6.2. Classificação	40
3.6.3. Métodos de separação	41
3.7. Técnicas hidrometalúrgicas	48
3.7.1. Lixiviação	49
3.7.2. Cementação	50
3.8. Caracterização de resíduos	52
4 Materiais e métodos	55
4.1. Materiais	55
4.1.1. Aparelhos de telefone celular	55
4.1.2. Reagentes e soluções	55
4.1.3. Equipamentos	57
4.2. Métodos	58
4.2.1. Caracterização do tipo de resíduo	60
4.2.2. Processamento mecânico	61

4.2.3. Processamento hidrometalúrgico	67
4.2.4. Análise química	69
4.2.5. Microscopia eletrônica de varredura	72

5 Resultados e Discussão	73
---------------------------------	-----------

5.1. Pré-processamento	73
5.2. Caracterização do tipo de resíduo	77
5.3. Processamento mecânico	78
5.3.1. Cominuição e classificação granulométrica	79
5.3.2. Separação em meio denso	83
5.3.3. Separação magnética	86
5.4. Processamento hidrometalúrgico	88
5.4.1. Lixiviação com HNO_3	88
5.4.2. Cementação de prata com fios de cobre	90

6 Conclusões	94
---------------------	-----------

7 Sugestões para trabalhos futuros	95
---	-----------

8 Bibliografia	96
-----------------------	-----------

9 Anexos	103
-----------------	------------

Lista de figuras

Figura 1 – Comparação entre os processos PTH e SMT de montagem de componentes.	27
Figura 2 – Fluxograma proposto para a recuperação de metais preciosos por rotas hidrometalúrgicas.	31
Figura 3 – Moinho de martelos e moinho de facas.	40
Figura 4 - Diferenças de suscetibilidade magnética entre materiais paramagnéticos e diamagnéticos.	47
Figura 5 - Características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos.	48
Figura 6 - Principais processos de recuperação hidrometalúrgica através de precipitação em soluções aquosas.	51
Figura 7 – Fluxograma das etapas de processamento	59
Figura 8 - Ensaio de lixiviação de acordo com a ABNT NBR 10005.	61
Figura 9 – Moinho de facas (RONE)	62
Figura 10 – Moinho de Facas (M.S. Mistura)	63
Figura 11 – Peneiras utilizadas nos moinhos de facas: A (8 mm) do moinho RONE; B (1 mm), C (2 mm) e D (3 mm) do moinho M.S. Mistura.	63
Figura 12 – Conjunto de peneiras (Tela Stem)	64
Figura 13 – Resumo da operação de classificação granulométrica	65
Figura 14 – Funil utilizado na separação em meio denso.	66
Figura 15 – Separador magnético (Frantz).	67
Figura 16 – Solução de metais (A) e o fio de cobre (B) utilizados para a cementação de prata.	69
Figura 17 – Análises realizadas	71
Figura 18 – MEV/EDX do contato de bateria.	74
Figura 19 – Solda de contato contendo chumbo	75
Figura 20 – Solda “leadfree”.	76
Figura 21 – Capacitores	76
Figura 22 – Frações com granulometria inferior a 1 mm.	80
Figura 24 – Composição média dos lotes avaliados	82
Figura 25 – Porcentagem de material que afunda/flutua em contato com o bromofórmio ($\rho=2,89 \text{ g/cm}^3$) durante 2h.	84

Figura 26 – Relação do material não magnético/magnético para os lotes processados.	87
Figura 27 – Variação da concentração de Ag e Cu ao longo do tempo.	91
Figura 28 – Prata cementada	92
Figura 29 – Fio de cobre antes (A) e depois (B) da cementação	92

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparativo entre as principais leis e normas que regulamentam resíduos sólidos e lixo eletrônico no Brasil.	19
Tabela 2 – Principais políticas relacionadas à solução de problemas dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.	21
Tabela 3 – Composição de plásticos	35
Tabela 4 – Velocidade e tempo de sedimentação estimados para partículas esféricas de $2,65\text{g/cm}^3$, em solução de politungstato de sódio ($\rho = 2,6\text{ g/cm}^3$ e $\eta = 8\text{ mPa.s}$) sob ação da gravidade.	42
Tabela 5 – Líquidos orgânicos utilizados em ensaios de separação por meio denso.	44
Tabela 6 – Suscetibilidade magnética de alguns metais presentes em sucatas eletrônicas.	46
Tabela 7 – Principais reações de dissolução em meio aquoso	50
Tabela 8 – Potenciais de oxidação para prata e cobre.	68
Tabela 9 – Massa utilizada no processamento mecânico.	73
Tabela 10 - Anexo F da NBR 10004. Limite máximo (mg/L) no extrato obtido no ensaio de lixiviação (inorgânicos).	77
Tabela 11 – Análise química do lixiviado obtido do ensaio da NBR 10005	78
Tabela 12 – Composição química (metais) de PCI e partes metálicas de aparelhos de telefone celular.	81
Tabela 13 – Concentração dos metais valiosos encontrados nos aparelhos de telefone celular e a média encontrada em minérios.	83
Tabela 14 – Composição da fração afundada	84
Tabela 15 – Densidade de alguns metais presentes nos aparelhos de telefone celular.	85
Tabela 16 – Composição da fração flutuada	85
Tabela 17 - Composição da fração não magnética.	86
Tabela 18 – Composição da fração magnética	87
Tabela 19 – Relação entre metais solubilizados/não solubilizados no	

ensaio de solubilização com HNO_3 para as relações L/S 6/1 e 10/1.	89
Tabela 20 – Aparelhos utilizados no processamento mecânico (<2001)	103
Tabela 21 - Aparelhos utilizados no processamento mecânico (>2002)	104