

# RECICLAGEM DE PRODUTOS ELETRO ELETRÔNICOS OBSOLETOS COM ÊNFASE EM APARELHOS DE TELEFONIA <sup>1</sup>

Viviane Tavares <sup>2</sup>  
Jorge Alberto Soares Tenório <sup>3</sup>  
Denise Croce Romano Espinosa <sup>4</sup>  
Mariana Ferian Maioli <sup>5</sup>

## Resumo

O avanço da tecnologia de aparelhos de telefonia móvel faz com que os consumidores destes equipamentos efetuem trocas mais constantes, com isso o descarte de aparelhos obsoletos se torna um problema ambiental, devido o seu acúmulo em aterros. A fim de minimizar os impactos ambientais provocados pelos componentes destes equipamentos se observa a necessidade da reciclagem dos materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos. O principal objetivo desta reciclagem é estudar o processamento das placas de circuito impresso dos aparelhos de telefonia através de operações unitárias de tratamento de minérios a fim de recuperar cobre. Inicialmente foram processadas placas de circuito impresso em um moinho de facas, a fim de liberar o material ferroso, em seguida foi feita a separação magnética do resíduo cominuído. Com a fração não magnética foi feita a análise granulométrica e ensaios de lixiviação com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio. Com os resultados das análises químicas realizadas com as alíquotas retiradas da lixiviação foi possível observar que o método de lixiviação com peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico apresentou maior recuperação de cobre.

**Palavras-chave:** Placa de circuito impresso (PCI); Aparelho de telefonia móvel; Reciclagem; Eletro-eletrônico.

## OBSOLETE ELECTRO ELECTRONIC PRODUCTS RECYCLING WITH EMPHASIS IN TELEPHONE DEVICES

### Abstract

The technology advance of mobile devices makes with that the consumers of these equipment do more constant exchanges, with this the obsolete devices discarding becomes an environmental problem, due its landfill accumulation. In order to minimize the environmental impacts caused by these equipment components observes the recycling necessity of polymers, ceramic and metallic materials. The main goal of this recycling is to study the printed circuit board of device mobile processing through unit operations of ore treatment in order to recoup copper. Initially were processed printed circuit boards in a knives mill, in order to liberate the ferrous material, after that was done the magnetic separation of the reduced residue. With the not magnetic fraction it was done the grain sized analysis and sulfuric acid and hydrogen peroxide leaching analysis. With the chemical analysis results done with the leaching aliquot it was possible to observe that the leaching method with sulfuric acid and hydrogen peroxide presented greater copper recovery.

**Key words:** Printed circuit board; Recycling; Obsolete mobile.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *Doutoranda em Engenharia de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*

<sup>3</sup> *Professor Titular da Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Materiais.*

<sup>4</sup> *Doutora em Engenharia de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*

<sup>5</sup> *Iniciação Científica de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento e a popularização de bens eletro-eletrônicos tem aumentado sensivelmente nas últimas décadas. A variedade de produtos oferecidos ao consumidor também tem aumentado. Além disso, novos modelos de produtos que prometem oferecer ainda melhores soluções para o consumidor são lançados anualmente.

A oferta contínua de novos produtos gerou na sociedade uma ânsia pelo consumo que faz com a troca de produtos se torne cada vez mais rápida. Atualmente a troca de um produto não se dá apenas porque o antigo deixou de funcionar, mas também porque um modelo mais moderno foi lançado e o consumidor se sente impelido a trocar substituir seu produto antigo.

Analisando este quadro conclui-se que o descarte de produtos eletro-eletrônicos obsoletos ou danificados também tende a aumentar com os anos. Os produtos eletro-eletrônicos são compostos por uma diversidade de materiais que podem ser reciclados ou reaproveitados.

Como exemplo pode-se citar o caso dos computadores pessoais. A vida útil de um computador em uma empresa é em média dois anos, enquanto que computadores pessoais têm uma vida útil de três a cinco anos. Estima-se que cerca de 325 milhões de computadores ficarão obsoletos entre 1985 e 2005 nos Estados Unidos da América.<sup>(1)</sup>

Os componentes eletrônicos estão dispostos nos mais diversos tipos de equipamentos, sendo portanto muito vasto o universo de materiais nessa classificação. A indústria eletro-eletrônica divide esses materiais para uso doméstico em grandes grupos: linha branca, linha marrom, e portáteis. A linha branca caracteriza-se basicamente por equipamentos de maior tamanho, tais como lavadoras, geladeiras, fogões, micro-ondas. A linha marrom é composta por produtos como televisões, vídeos cassetes, DVD's, e equipamentos de som. Esta classificação da indústria não engloba todos os materiais eletro-eletrônicos de uso doméstico tais como pilhas, baterias e lâmpadas.

Em cada uma dessas linhas existem diversos problemas em comum. Por exemplo, em todas existe um circuito impresso. Entretanto, existem especificidades, na linha branca o uso de aço como material estrutural é maior do que nas demais. Nos equipamentos portáteis utilizam-se mais plásticos e a quantidade de circuitos impressos é maior relativamente.

Alguns problemas de toxicidade ou de reciclagem são específicos de determinada família de equipamentos. Exemplos disso são as lâmpadas fluorescentes e as de Na que contém Hg, as soldas de circuitos impressos contém Pb e a espuma de poliuretano usados como isolantes.

Os produtos eletro-eletrônicos são compostos por uma diversidade de materiais em proporções diferentes, dependendo do produto. Mas, praticamente todo produto eletro-eletrônico é composto de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos (plásticos e borrachas).<sup>(2)</sup> Os recicladores de sucata eletrônica reportam que os seguintes materiais são recuperados por eles: vidro, plásticos, metais (aço, alumínio, cobre, ouro, prata, platina, paládio).<sup>(Erro! Indicador não definido.)</sup>

O interesse na recuperação de metais preciosos a partir de equipamentos eletrônicos data de 1969, quando o U.S. Bureau of Mines iniciou pesquisa para a recuperação destes metais a partir de sucatas eletrônicas militares que já naquela época atingiam 9100t por ano.<sup>(3)</sup> Atualmente, a quantidade de metais preciosos em placas de circuito impresso está diminuindo, mas não é inexistente. Existem vários

estudos que indicam a possibilidade de recuperação desses metais preciosos.<sup>(Erro! Indicador não definido.,4,5)</sup> Uma tonelada de sucata de computadores tem mais ouro que é possível recuperar com 17 t de minério,<sup>(Erro! Indicador não definido.)</sup> e existem várias empresas que fazem a reciclagem de computadores.

A maioria dos produtos eletro-eletrônicos tem placas de circuito impresso (PCI) em seu interior que podem chegar a representar até 30% do peso do produto. Para se ter uma idéia do tamanho do problema que pode ser causado apenas por placas de circuito impresso, em Taiwan resíduos de PCI chegam a 100 mil toneladas por ano.<sup>(6)</sup> Atualmente, tem se pesquisado também a recuperação de outros metais de placas de circuitos impressos e produtos eletro-eletrônicos.<sup>(7-11)</sup>

Os produtos portáteis trouxeram um aumento no uso de pilhas e baterias. Existem diversos produtos que apresentam pilhas ou baterias recarregáveis em seu interior, como, por exemplo, notebooks, telefones sem fio, vídeos cassetes, computadores, filmadoras, aparelhos de som, luzes de emergência, barbeadores elétricos, alguns brinquedos. Muitas vezes as pilhas e baterias não estão colocadas em posição de fácil acesso, o que dificulta a sua retirada antes do descarte do produto. Além disso, em geral o consumidor não está consciente de que tipo essas pilhas e baterias são ou mesmo não está consciente da sua existência nos aparelhos eletrodomésticos, e as descartam juntamente com o aparelho. Entretanto, a Resolução 257 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regula que alguns tipos de pilhas e baterias devem ser devolvidos aos fabricantes/distribuidores para que tenham uma destinação ambientalmente correta.<sup>(12)</sup> As pilhas e baterias podem conter metais tóxicos como cádmio, chumbo, e mercúrio que tem um potencial alto para a poluição do meio ambiente se não forem tratados adequadamente antes da disposição final.<sup>(13,14)</sup>

Existem diversos processos para a reciclagem de pilhas e baterias alguns já consagrados e outros em desenvolvimento. No Brasil, a reciclagem de pilhas e baterias ainda não se dá de forma sistêmica, a não ser em casos específicos como por exemplo para baterias de Pb-ácido.<sup>(13,15-8)</sup>

Portanto, a coleta e reciclagem de produtos eletro-eletrônicos é uma necessidade atual em termos não apenas de se preservar recursos naturais não renováveis, através da reciclagem de materiais, mas também de se preservar o meio ambiente e se evitar que o número cada vez maior deste tipo de produto que está sendo descartado tenha um impacto ambiental negativo, poluindo o meio ambiente e podendo colocar em risco a saúde da população devido aos metais pesados presentes.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

As placas de circuito impresso de aparelhos celulares obsoletos inicialmente foram segregadas dos outros componentes, como baterias, telas de cristal líquido e carcaça plástica.

A fim de se recuperar os metais contidos nas placas, as mesmas foram submetidas ao processo de moagem em moinho de facas, seguido de separação magnética, classificação do material pelo método de análise granulométrica e processo de lixiviação.

O líquido proveniente da lixiviação foi enviado para análise química de absorção atômica.

## 2.1 Desmantelamento Manual e Moagem

As placas de circuito impresso foram separadas manualmente do restante dos componentes do aparelho celular.

Utilizando-se um moinho de facas, FA 2305 da marca Rone, foram cominuídos 2017,4g de placas, passando-as duas vezes pelo moinho com grelha de 3mm.

## 2.2 Separação Magnética e Quarteamento

Do material passante da moagem, 917,6g foram submetidos a um ensaio de separação magnética manual, onde foi passado três vezes o imã sobre o material espalhado.

Com o material não magnético foi feito o quarteamento de pilha cônica em 32 amostras de cerca de 25g cada.

Durante o quarteamento foi coletada uma amostra de 112,9g para ensaio granulométrico.

## 2.3 Separação Granulométrica

Com a amostra de 112,9g de material passante não-magnético, separado durante o quarteamento foi realizada a separação granulométrica em agitador de peneiras. As peneiras utilizadas tinham abertura de: 2,38 mm; 1,68 mm; 0,841 mm; 0,595 mm; 0,297 mm; 0,194 mm, 0,147 mm, 0,104 mm e 0,074 mm.

## 2.4 Ensaio de Lixiviação

Das 32 amostras quarteadas em 25g +/- 5g, foram selecionadas 7 amostras aleatoriamente para realizar o processo de lixiviação do resíduo em meio ácido.

Foram preparadas como soluções lixivantes soluções de ácido sulfúrico com pH 1, 2, 3 e 4, água-régia, ácido sulfúrico pH 1 com peróxido de hidrogênio.

Amostras entre 20g e 25g foram submetidas aos ensaios na proporção 10ml de solução lixivante para 1g de amostra sólida, conforme Tabela 1.

**Tabela 1** – Relação soluto e solvente para os ensaios de lixiviação

Ensaio de lixiviação	Massa da amostra de PCI (g)	Solução (mL)
1	24,0	240
2	21,0	210
3	24,0	240
4	24,9	249
5	22,9	229
6	11,8	119

Durante a execução dos ensaios de lixiviação 1, 2, 3, 4 e 6 foram coletadas alíquotas de 2ml após 30min, 1h, 2h, 3h e 4h do início do ensaio e enviadas para análise química por espectrofotometria de absorção atômica para quantificar os metais lixiviados durante os experimentos. Para o ensaio 5, enviou-se uma alíquota da solução final após 17 horas de lixiviação.

### 2.4.1 Lixiviação por ácido sulfúrico

Os ensaios de lixiviação 1, 2, 3 e 4 foram realizados em recipientes de vidro de 1L, sobre agitador magnético com aquecimento, contendo solução lixivante de ácido

sulfúrico de pH 1, 2, 3 e 4, respectivamente, onde foram acrescentadas as amostras relacionadas na Tabela 1.

O pH em cada ensaio foi monitorado com pHmetro Digimed DM-22 calibrado e a temperatura foi mantida entre 50°C +/- 5°C pela chapa de aquecimento e controlada por termômetro de mercúrio.

#### **2.4.2 Lixiviação por água-régia**

A lixiviação por água régia tem por finalidade formar um meio corrosivo e oxidante que tem como característica a dissolução de todos os metais presentes na placa de circuito impresso. Assim, o resultado quantitativo da alíquota final dessa lixiviação foi considerado como referência para determinar a eficiência de solubilização das outras soluções utilizadas nas lixiviações.

O ensaio 5 de lixiviação foi realizado utilizando-se água-régia, em um béquer de 500 ml e à temperatura ambiente. A proporção utilizada foi de 10 ml de água-régia para 1g de amostra.

#### **2.4.3 Lixiviação por ácido sulfúrico com reagente oxidante**

Para a dissolução do cobre foram feitos ensaios de lixiviação usando agentes oxidantes, uma vez que o cobre não é solubilizado em ácido sulfúrico, de acordo com o Diagrama de Pourbaix.<sup>(19)</sup> O reagente escolhido foi o peróxido de hidrogênio.

O ensaio 6 foi realizado com a metade do resíduo gerado após o ensaio 1 de lixiviação. O ensaio procedeu nas mesmas condições que o ensaio 1, contendo solução lixiviante de ácido sulfúrico de pH 1.

No ensaio 6, foram adicionados 40 ml de peróxido de hidrogênio, quantidade esta calculada em excesso em relação à quantidade de metal, a partir de reações de oxido-redução entre cobre metálico e o reagente oxidante citado.

### **2.5 Filtração**

Após o término de cada ensaio de lixiviação realizou-se uma filtração simples com filtro quantitativo. Na filtração obteve-se um filtrado e um resíduo sólido retido no papel de filtro. O filtrado foi descartado e o resíduo sólido foi colocado para secar em estufa juntamente com o papel de filtro, de massa devidamente conhecida, em torno de 75°C +/- 5°C, por aproximadamente 24h. Após a secagem o material foi pesado para verificar a variação de massa durante cada experimento e assim determinar a massa lixiviada.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1 Desmantelamento Manual e Moagem**

As placas de circuito impresso processadas no moinho de facas apresentou cerca de 0,7% de perda de material, o que pode-se concluir que o processo de cominuição do material foi eficiente, considerando que a massa de perda de processos semelhantes de cominuição não devem ultrapassar 5%.<sup>(20)</sup>

### **3.2 Separação Magnética e Quarteamento**

Do material passante da moagem foi obtido cerca de 7,8% de material magnético que pode ser utilizado na reciclagem de materiais ferrosos.

O restante do material passante foi separado para quarteamento e separação granulométrica.

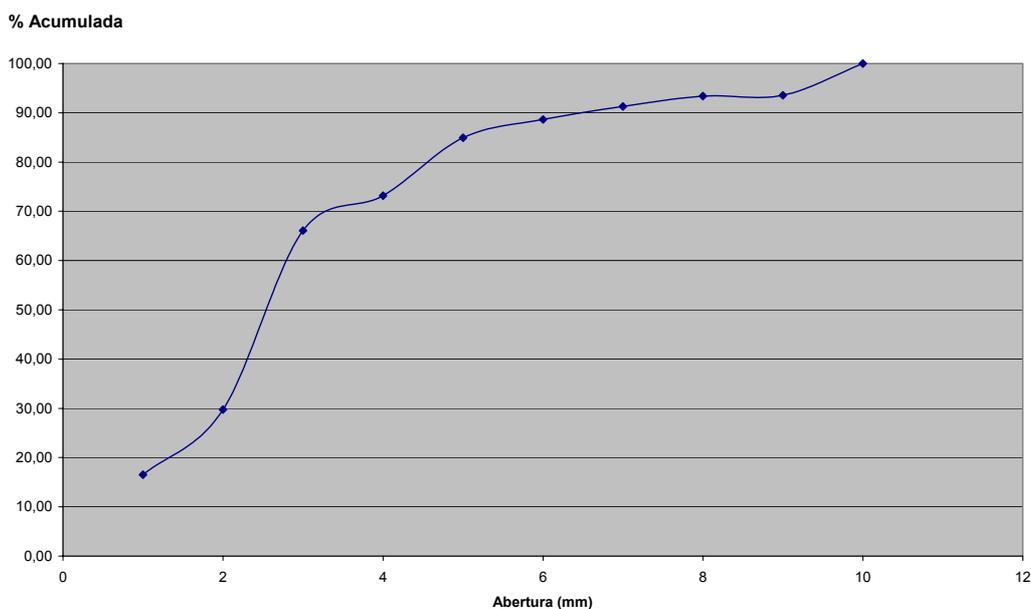
### 3.3 Separação Granulométrica

As porcentagens da massa retida do ensaio granulométrico podem ser observados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Ensaio granulométrico

Abertura (mm)	Massa material retido (g)	% em peso	% acumulada acima
+ 2,38	18,2	16,50	16,50
+ 1,68 - 2,38	14,6	13,24	29,74
+ 0,840 - 1,68	40,1	36,36	66,09
+ 0,590 - 0,840	7,8	7,07	73,16
+ 0,300 - 0,590	13	11,79	84,95
+ 0,194 - 0,300	4,1	3,72	88,67
+ 0,147 - 0,194	2,9	2,63	91,30
+ 0,104 - 0,147	2,3	2,09	93,38
+0,074 - 0,104	0,2	0,18	93,56
- 0,074	7,1	6,44	100,00
Total	110,3	100	

A visualização do ensaio granulométrico em termos de porcentagem acumulada pode ser observada na Figura 1.



**Figura 1** – Curva do ensaio granulométrico

### 3.4 Ensaios de Lixiviação e Filtração

**Tabela 3.** Ensaio de lixiviação e filtração

Ensaio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa lixiviada
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - pH 1	24,0000	23,1532	3,53%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - pH 2	21,0000	20,6561	1,64%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - pH 3	24,0000	23,7093	1,21%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - pH 4	24,9000	24,7298	0,68%
Água-régia	22,9000	11,9984	47,61%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - pH 1 /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	11,8070	10,8594	8,03%

A massa lixiviada de cada ensaio indica a massa de metais que solubilizou em meio ácido.

A lixiviação com água régia apresentou maior solubilização de metais devido ao agente oxidante atuante na reação, que é o ácido nítrico.

Segundo o Diagrama de Pourbaix<sup>(19)</sup> o cobre só pode ser solubilizado em meio ácido com a presença de um agente oxidante, por esta razão foi realizado o ensaio com peróxido de hidrogênio, que apresentou porcentagem de solubilização maior que os ensaios realizados com ácido sulfúrico, incluindo com pH1. Este aumento na porcentagem de massa lixiviada com o peróxido apresentou aumento devido à solubilização de cobre.

Com a lixiviação do cobre pode-se partir para um processo de eletroobtenção ou precipitação para recuperação do cobre.<sup>(9)</sup>

#### 4 CONCLUSÃO

O material magnético das placas de circuito impresso corresponde a 7,8% em peso do material cominuído pelo moinho de facas. Este material pode ser reutilizado na reciclagem de materiais ferrosos.

O processo de lixiviação com ácido sulfúrico, água régia e ácido sulfúrico com peróxido de hidrogênio promove a solubilização de metais existentes nas placas de circuito impresso cominuídas.

O processo de lixiviação com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio apresentou maior perda de massa devido à solubilização de cobre das placas de circuito, comprovando o Diagrama de Pourbaix.

O cobre lixiviado pode ser recuperado através de processos de eletroobtenção ou precipitação de metais.

#### Agradecimentos

À Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Materiais.

#### REFERÊNCIAS

- 1 United States Geological Survey (USGS), **Obsolete Computers, “Gold Mine”, or High-Tech Trash? Resource Recovery from Recycling**. Disponível na Internet : <http://pubs.usgs.gov/fs/fs060-01/fs060-01.pdf> (10/08/2004).
- 2 HOFFMANN J.E. Recovering precious metals from electronic scrap. **JOM**, 44(7), p.43-48, jul. 1992.
- 3 SUM, E. Y. L. The recovery of metals from electronic scrap. **JOM**, p. 53-61, abr. 1991.
- 4 TENORIO, J. A. S., MENETTI, R. P., CHAVES, A. P. Production of non-ferrous metallic concentrates from electronic scrap. In: **Minerals, Metals and Materials Society/AIME (USA)**, pp. 505-509, 1997.
- 5 TOMASEK, K; VADASZ, P; RABATIN, L Gold extraction from the electronical scrap. **Acta Metallurgica Slovaca** (Slovak Republic), vol. 6, no. 2, p. 116-124, 2000.

- 6 WANG, H. P.; CHIEN, Y. Fate of bromine in pyrolysis of printed circuit board wastes. **Chemosphere**, 40, p. 383-387, 2000.
- 7 VEIT H.M., PEREIRA C.D., BERNARDES A.M. Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. **JOM**, 54(6), p. 45-47, Jun. 2002.
- 8 KOZLOWSKI, J; MAZUREK, T; CZYZYK, H. The recovering metals and alloys from the electronic scrap. **Metall** (Germany), vol. 54, no. 11, pp. 645-649, 2000
- 9 VEIT, H. M. **Emprego do processamento mecânico na reciclagem de sucatas de Placas de Circuito Impresso**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. p. 1-9, 87.
- 10 KROWINKEL, J.M.; DALMIJN, W.L. Processing of televisions by mechanical separation techniques. Implications for future work in product design and recycling. In: **Fourth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials, Pittsburgh, PA, USA, 22-25 Oct. 2000**, Minerals, Metals and Materials Society/AIME, pp. 47-59, 2000.
- 11 ZHANG, S; FORSSBERG, E; MENAD, N; BJORKMAN, B. Metals recycling from electronic scrap by air table separation--theory and application. In: **EPD Congress 1998**, San Antonio, TX, USA, 16-19 Feb. 1998. Minerals, Metals and Materials Society/AIME (USA), pp. 497-515, 1998.
- 12 ESPINOSA, D.C.R., BERNARDES, A.M., TENÓRIO, J.A.S. Brazilian policy on battery disposal and its practical effects on battery recycling. **Journal of Power Sources** 137 (1), 2004. p. 134-139.
- 13 ESPINOSA, D.C.R. **Reciclagem de baterias de níquel-cádmio**. São Paulo, 2002. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. p. 36-67.
- 14 REIDLER, N.M.V.L. **Resíduos gerados por pilhas e baterias usadas: uma avaliação da situação brasileira 1999-2001**. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. p. 159-165.
- 15 ESPINOSA, D.C.R., OLIVEIRA D.C., TENÓRIO, J.A.S. Introdução aos processos de reciclagem de pilhas e baterias. In: **SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE METAIS NÃO-FERROSOS**, 19 de outubro de 2000. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), São Paulo. 2000. p. 121-137.
- 16 ESPINOSA, D.C.R., TENÓRIO, J.A.S. Recovery of Ni-based alloys from NiMH batteries. **Journal of Power Sources**, v. 108, 2002. p. 70-73.
- 17 BERNARDES, A.M., ESPINOSA D.C.R., TENORIO J.A.S. Recycling of batteries: a review of current processes and technologies. **Journal of Power Sources** 130 (1-2), 2004. p. 291-298.
- 18 BERNARDES, A.M., ESPINOSA D.C.R., TENORIO J.A.S. Collection and recycling of portable batteries: a worldwide overview compared to the Brazilian situation. **Journal of Power Sources** 124 (2), 2003. p. 586-592.
- 19 Pourbaix, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Nova York: Pergamon Press, 1966.
- 20 CHAVES, A. P.. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios Vol.1**. Signus: São Paulo, 2006.