

# CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE APARELHOS DE TELEFONE CELULAR

Hellington Bastos da Silva de Sant'ana <sup>1</sup>

Francisco José Moura <sup>2</sup>

Hugo Marcelo Veit <sup>3</sup>

## Resumo

Atualmente, um dos setores que mais se desenvolve é a indústria eletroeletrônica. À medida que tecnologias evoluem, barateando os produtos, o consumo de eletroeletrônicos aumenta. A vida útil de tais produtos é relativamente curta 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 metais base, quantidade considerável de metais valiosos e elementos perigosos. Neste trabalho, as sucatas passaram por várias etapas de processamento mecânico: inicialmente foram separados em lotes, conforme ano de lançamento (<2001; >2002), e desmontados manualmente. As placas de circuito impresso foram moídas abaixo de 1 mm. Foram realizadas separações por massa específica e magnética. As frações obtidas ao longo do processamento mecânico foram caracterizadas por análises químicas. Com o processamento mecânico é possível obter frações metálicas de até 80% em massa. Foi realizado um ensaio de lixiviação a fim de caracterizar a periculosidade do resíduo, de modo que a sucata de telefones celulares deve ser considerada na classe de resíduo perigoso devido à concentração de chumbo acima do limite estabelecido pela legislação brasileira.

**Palavras-chave:** Caracterização; Lixo eletrônico; Metais; Reciclagem.

## PHYSICAL CHEMISTRY CHARACTERIZATION OF PRINTED CIRCUIT BOARD OF MOBILE PHONES

## Abstract

Nowadays, 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, as year of release (<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 mechanical processing it was possible to obtain metal fractions of 80 wt%. 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 in the category of hazardous residue because the lead concentration was above the limit established by Brazilian Standards.

**Key words:** Characterization; Electronic waste; Metals; Recycling.

<sup>1</sup>Químico Industrial, MsC, Bolsista de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ, Rua Marquês de São Vicente, 225, Vila dos Direitórios, Casa XXI, Gávea, Cep 22451-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: hbss89@gmail.com

<sup>2</sup>Engenheiro Metalúrgico, PhD, Professor Associado, Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ, Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, Cep 22451-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: moura@puc-rio.br

<sup>3</sup>Engenheiro Metalúrgico, DSc, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Setor 4, Prédio 74, sala 107, Agronomia, Cep 90501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: hugo.veit@ufrgs.br

## I INTRODUÇÃO

O rápido aumento populacional associado à globalização tem promovido uma grande demanda por produtos e serviços. A cada ano as indústrias superam recordes de produção, ou seja, a população consome cada vez mais produtos industrializados. Os equipamentos eletroeletrônicos (EEE) são, atualmente, um dos principais responsáveis pelos recordes de produção industrial. O ser humano nunca foi tão “dependente” da tecnologia e a tendência é que tal “dependência” aumente ainda mais. Além disso, a própria indústria eletrônica tem investido cada vez mais em “produtos descartáveis”. O termo descartável não se refere ao produto de uso único, mas ao produto concebido para não ser reparado. Não que seja impossível, mas não é viável frente ao baixo custo de aquisição para produtos novos.

Lixo eletrônico (*E-Waste*) é o nome dado aos resíduos resultantes da rápida obsolescência de equipamentos eletrônicos (o que inclui computadores, aparelhos de telefonia móvel, televisores, geladeiras e outros dispositivos).

Tais resíduos, quando descartados sem cuidados especiais (principalmente em lixões), constituem-se num sério risco para o meio ambiente, pois sua composição, geralmente heterogênea, pode apresentar mais da metade da Tabela Periódica em apenas um aparelho, incluindo chumbo, arsênio e até mercúrio nos aparelhos mais antigos.<sup>(1)</sup> Em contato com o solo, esses produtos podem contaminar o lençol freático e, se queimados, podem poluir o ar. Além disso, podem causar doenças graves em catadores que sobrevivem da venda de materiais coletados nos lixões.

Um tipo de sucata eletrônica muito comum atualmente são os aparelhos de telefone celular e seus “periféricos” (carregadores e baterias). Só em 2009 foram vendidos 1,211 bilhão de aparelhos no mundo.<sup>(2)</sup> Atualmente, o tempo de vida útil de um telefone celular é inferior a dois anos<sup>(3)</sup> e cerca de 10 a 20% dos aparelhos produzidos entram em inatividade a cada ano.<sup>(4)</sup>

O presente trabalho tem os seguintes objetivos: caracterizar esse tipo de resíduo quanto a sua composição química e a sua periculosidade; avaliar a viabilidade de reciclar placas de circuito impresso (PCI) de telefone celular utilizando processamento mecânico e comparar o teor de metais valiosos presentes nos aparelhos de telefone celular com os teores habituais encontrados em minérios.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As sucatas utilizadas neste trabalho correspondem a aparelhos obsoletos ou defeituosos. Ao todo, utilizaram-se aproximadamente 12 kg de aparelhos de telefone celular (sem baterias) de diferentes anos, marcas e modelos. Inicialmente, os aparelhos foram classificados por idade, por meio de informações obtidas em catálogos ou em sites

de informações sobre aparelhos – os telefones foram classificados de acordo com o ano de lançamento do modelo e não com o real ano de fabricação. Em seguida, os aparelhos foram separados em dois lotes: lançados até o final do ano de 2001 (<2001) e após o início de 2002 (>2002). A finalidade de tal classificação foi avaliar a variabilidade dos aparelhos ao longo dos anos. A escolha do “ano de corte” baseia-se no fato de ambos os lotes possuírem aproximadamente a mesma quantidade de aparelhos.

Os aparelhos foram desmontados manualmente e separadas as partes plásticas grosseiras (carcaças, teclados etc.). O material restante (PCI, conectores etc.) foi submetido a cominuição.

A etapa de cominuição foi realizada em dois moinhos de facas. O primeiro moinho (moinho RONE - KRB3307), por apresentar dimensões maiores, foi utilizado para a fragmentação inicial dos aparelhos; todavia, para obter partículas inferiores a 16 mesh (1 mm) seu uso não foi suficiente. Assim, fez-se uso de um segundo moinho (M.S. Mistura - MSM610/SM). As moagens são descritas como “moagem grosseira” e “moagem fina”. A classificação (conjunto de peneiras telastem Ro-tap) foi realizada entre cada etapa de cominuição, de modo a evitar a sobremoagem do material. Empregou-se uma peneira de 16 mesh para todas as etapas. Após a moagem/classificação os lotes (<2001 e >2002) foram submetidos a processos de separação: separação em meio denso e separação magnética.

Na separação em meio denso, o líquido utilizado foi o bromofórmio ( $\rho = 2,89 \text{ g/cm}^3$ ). A operação de separação em meio denso foi realizada em um funil de separação com capacidade para 1.000 mL. Inicialmente, colocava-se cerca de 300 mL de bromofórmio no funil de separação. Em seguida, acrescentavam-se 100 g de resíduo. Por fim, o volume do funil era completado com bromofórmio. A separação durava aproximadamente 2 h, de modo que a fração mais pesada encontrava-se afundada e a fração mais leve flutuada.

Após a separação em meio denso, o material foi separado em “afundado” e “flutuado”. O flutuado foi reservado para caracterização e o afundado foi submetido à separação magnética.

A separação magnética (separador Frantz Isodynamic L-1) foi realizada em um separador magnético de bancada. A separação foi realizada sob um campo de 0,5 T (~5.000 G). O Separador era ajustado para 0,5T e cerca de 100 g eram colocados no topo do cone. O material com caráter ferromagnético ficava retido enquanto materiais com caráter paramagnético e diamagnético depositavam-se em um recipiente localizado no fundo do cone. Em seguida, o separador era desligado de modo a liberar o material magnético retido, sendo este coletado em outro recipiente.

Paralelamente, foi realizado um ensaio de lixiviação de resíduos com a finalidade de simular as condições que podem ser encontradas nos diferentes cenários de dispo-

sição existentes. No Brasil, esse ensaio é normatizado pela ABNT NBR 10.005.<sup>(5)</sup> O procedimento foi realizado com os aparelhos sem baterias. De cada lote (<2001 e >2002) separaram-se 20 aparelhos. Os aparelhos foram moídos e classificados granulometricamente com granulometria inferior a 9,5 mm. Utilizou-se uma solução tampão descrita pela NBR 10.005, onde, em um balão volumétrico (1 L), adicionaram-se 5,7 mL de ácido acético glacial e 64,3 mL de solução de NaOH (1 N) e o volume completado com água deionizada. O pH médio das soluções preparadas foi de 4,95.

O ensaio de lixiviação foi realizado em moinho de bolas, com o suporte do jarro cerâmico adaptado para comportar três garrafas. Três garrafas de 2.500 mL foram colocadas em um suporte cilíndrico de modo que a posição da garrafa mudasse constantemente, impedindo a estratificação da amostra. A velocidade média do suporte foi de 30 rpm. Em cada garrafa, colocaram-se 100 g de amostra e 2.000 mL da solução preparada. Os ensaios de lixiviação tiveram a duração de 18 h. Ao final do ensaio, a solução foi filtrada e analisada.

Ao longo deste trabalho, realizaram-se diversas análises: espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), espectrometria por absorção atômica (AAS). O lixiviado obtido no ensaio da ABNT NBR 10.005<sup>(5)</sup> foi analisado por ICP-OES.

### 3 RESULTADOS

Após a classificação etária e a divisão em lotes, os aparelhos foram desmontados manualmente. As carcaças compostas majoritariamente por polímeros foram separadas em um grupo e os demais constituintes do telefone em outro. A Tabela 1 mostra um resumo do material utilizado no processamento mecânico.

A cominuição das placas de circuito impresso dos aparelhos de telefone celular foi realizada em dois moinhos de tamanhos distintos. No primeiro, as placas eram cominuídas a partir de seu tamanho inicial (~8,0 cm × 2,5 cm) para partículas de tamanho inferior a 8 mm. No segundo, o material obtido previamente foi cominuído em partículas com tamanho inferior a 1 mm.

As operações de cominuição e classificação granulométrica foram realizadas concomitantemente. O material obtido após a moagem grosseira apresentava granulometria inferior a 8 mm; entretanto, a faixa granulométrica compreendia diversas granulometrias, inclusive abaixo de 1 mm. A Figura 1 mostra as frações com granu-

lometria inferior a 1 mm obtidas das diferentes etapas de cominuição.

Após a cominuição realizou-se a caracterização química em ICP-OES do material, de modo a avaliar a presença e concentração dos metais presentes. Os resultados são mostrados na Tabela 2.

O valor indicado como total (Tabela 2) indica a fração metálica presente nas placas de circuito impresso. Combinando os resultados da Tabela 1 com a Tabela 2, pode se estabelecer a composição metálica média dos aparelhos de telefone celular. A Figura 2 mostra a composição média dos aparelhos estudados neste trabalho. As frações metálicas são próximas, tanto em composição quanto em concentração. A fração denominada “outros” compreende basicamente polímeros e cerâmicos.

Posterior à cominuição, a separação em meio denso foi realizada com o intuito de concentrar os metais em uma fração e polímeros e cerâmicos em outra. Os resultados mostrados na Figura 3 correspondem à fração de material que afunda e que flutua quando se adicionam cerca de 100 g de material no funil de separação e completando o volume com bromofórmio e deixando por 2 h.

A concentração dos metais mais importantes presentes na fração afundada (determinados por ICP-OES) é mostrada na Tabela 3.

A concentração dos metais presentes na fração fluída é mostrada na Tabela 4.

Após a separação em meio denso, o material afundado passou por mais uma etapa de concentração física: a separação magnética. A concentração dos metais na fração não magnética é mostrada na Tabela 5.

A concentração da fração magnética é mostrada na Tabela 6.

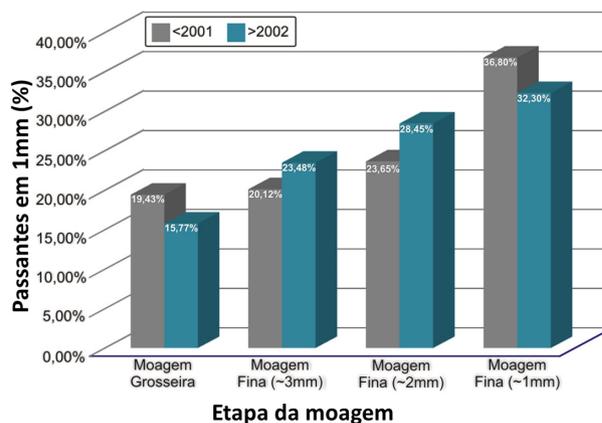


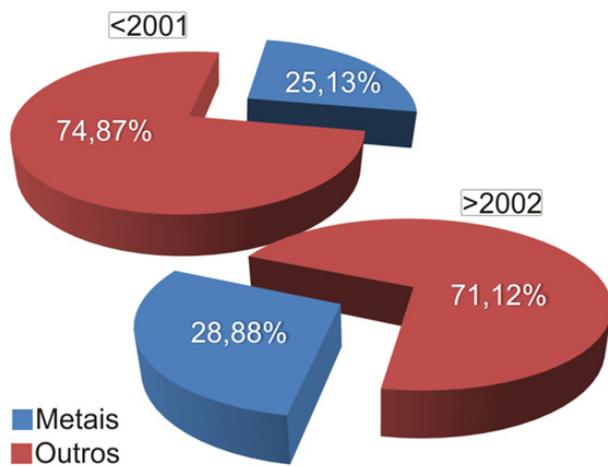
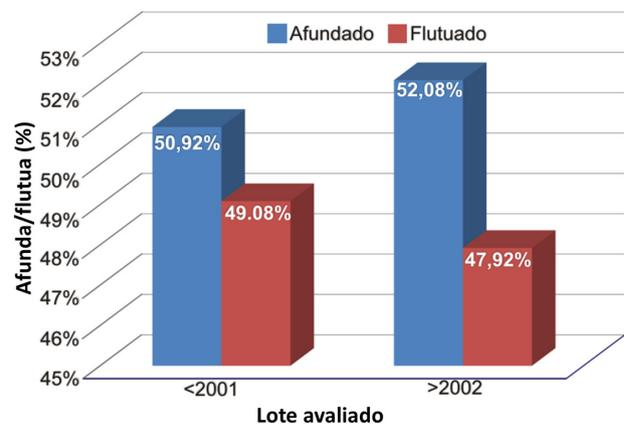
Figura 1. Frações com granulometria inferior a 1 mm.

Tabela 1. Massa utilizada no processamento mecânico

Lote	Total de aparelhos	Massa total	Carcaças	Demais constituintes
<2001	58	4.973,16 g	2.370,42 g	2.602,74 g
>2002	62	4.152,86 g	1.893,53 g	2.259,33 g

**Tabela 2.** Composição química (metais) de PCI e partes metálicas de aparelhos de telefone celular

Elemento	Concentração (%p)		Elemento	Concentração (%p)	
	<2001	>2002		<2001	>2002
Ag	0,28	0,12	Al	0,62	0,84
Au	0,06	0,04	Ba	0,63	0,64
Be	0,01	0,01	Ca	1,13	0,70
Cr	0,72	2,16	Cu	26,75	22,81
Fe	9,60	17,42	K	0,03	0,02
Mg	0,04	0,14	Na	0,03	0,02
Ni	2,37	2,77	Pb	1,33	0,57
Pd	0,02	0,01	Sb	0,06	0,03
Sn	1,81	1,56	Sr	0,02	0,01
Ti	0,21	0,18	V	0,01	0,01
Zn	2,25	2,92	Zr	0,03	0,02
<b>Total</b>	<b>48% (&lt;2001)</b>		<b>53%(&gt;2002)</b>		

**Figura 2.** Composição média dos lotes avaliados.**Figura 3.** Percentagem de material que afunda/flutua em contato com o bromofórmio ( $\rho=2,89 \text{ g/cm}^3$ ) durante 2 h.**Tabela 3.** Composição da fração afundada

Lote	Concentração dos metais afundados (%p)									
	Ag	Al	Au	Cu	Fe	Ni	Pb	Pd	Sn	Zn
<2001	0,12	0,14	0,08	40,79	19,27	4,26	2,25	0,03	3,20	4,24
>2002	0,19	0,30	0,05	36,31	27,94	4,44	1,06	0,01	2,97	5,17

**Tabela 4.** Composição da fração flutuada

Lote	Concentração dos metais flutuados (%p)		
	Cu	Al	Total
<2001	14,50	1,67	16,17
>2002	16,08	3,01	19,10

A última etapa da caracterização consistiu de um ensaio visando avaliar a periculosidade das sucatas, enquanto resíduos dispostos sem nenhum cuidado no meio ambiente. Os resultados da análise do extrato lixiviado são apresentados na Tabela 7.

## 4 DISCUSSÃO

Com os valores obtidos (Tabela 1) é possível observar que, ao longo do tempo, os aparelhos ficaram mais leves. A massa média de um aparelho (sem bateria) no lote mais antigo (<2001) é 85,75 g, enquanto no lote mais novo (>2002) é de 66,98 g, ou seja, uma redução de 22% em massa.

É escolhida granulometria de  $\leq 1 \text{ mm}$ , pois, de acordo com Veit,<sup>(6)</sup> os metais atingem bom grau de liberação nestas condições e tendem a se concentrar nas frações entre 0,5 mm e 1 mm; além disso, de acordo com

Campos, Luz e Carvalho,<sup>(7)</sup> a eficiência da separação em meio denso tende a diminuir abaixo de 0,6 mm.

No que diz respeito aos metais valiosos, é interessante comparar os teores obtidos neste trabalho com o teor encontrado em minérios. As frações obtidas nas análises são ajustadas com a massa total (telefone inteiro), onde a porcentagem real é inferior à mostrada na Tabela 2. A Tabela 8 apresenta o comparativo.

Apesar da menor concentração de metais valiosos no lote mais novo, ainda sim é maior que a concentração média desses metais em minérios. Além do apelo ambiental para que tal resíduo não seja descartado de forma inadequada, há a justificativa financeira, pois as sucatas são excelente fonte de metais valiosos.

Combinando as Tabelas 2 e 3 pode-se observar que a separação em meio denso é eficiente para concentrar boa parte dos metais. Antes do processo de separação em meio denso, os 10 metais mostrados na Tabela 3 correspondiam a 45% (<2001) e 49% (>2002) enquanto que,

após a separação em meio denso, a concentração do mesmo grupo subiu para 74% (<2001) e 78% (>2002). Ao se observar as massas específicas dos metais comumente encontrados em sucatas eletrônicas, pode-se prever a separação em meio denso dos mesmos. A Tabela 9 mostra as massas específicas dos dez metais analisados na fração afundada.

Dentre os metais concentrados destaca-se o ferro que, no lote mais antigo, dobra a concentração após o meio denso. O ferro, em particular, geralmente encontra-se livre, pois é usado em parafusos, suportes e blindagens e raramente está associado a algum componente plástico ou cerâmico, de modo que se concentra nas frações mais grosseiras e, conseqüentemente, no afundado.

Veit<sup>(6)</sup> mostra que a maior parte dos metais se concentra nas frações mais grosseiras e que a fração afundada tende a aumentar com a granulometria. A exceção é o alumínio que apresenta a tendência de ficar nas frações mais leves por dois motivos: sua massa especí-

**Tabela 5.** Composição da fração não magnética

Lote	Concentração do material não magnético(%p)									
	Ag	Al	Au	Cu	Fe	Ni	Pb	Pd	Sn	Zn
<2001	0,14	0,08	0,06	50,32	0,63	2,65	2,42	0,04	3,32	5,08
>2002	0,21	0,39	0,06	56,54	1,52	3,06	1,59	0,01	4,19	7,62

**Tabela 6.** Composição da fração magnética

Lote	Concentração do material magnético (%p)				
	Au	Cu	Fe	Ni	Total
<2001	0,11	30,18	40,47	6,19	76,95
>2002	0,06	20,68	50,43	6,57	77,74

**Tabela 7.** Análise química do lixiviado obtido do ensaio da NBR 10005

Lote	Lixiviação dos aparelhos de telefone celular (mg/L)							
	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Hg	Pb	Se
<2001	<0,01	<0,10	1,82	<0,05	<0,01	<0,01	<b>35,0</b>	<0,10
>2002	<0,01	<0,10	2,95	<0,05	<0,01	<0,01	<b>25,6</b>	<0,10

**Tabela 8.** Concentração dos metais valiosos encontrados nos aparelhos de telefone celular e a média encontrada em minérios<sup>(8,9)</sup>

Elemento	Concentração (g/T)		
	<2001	>2002	Minério
<b>Ag</b>	1.450	640	8,0-115,0
<b>Au</b>	310	230	0,6-12
<b>Pd</b>	100	30	1,0-2,0

**Tabela 9.** Massa específica de alguns metais presentes nos aparelhos de telefone celular<sup>(10)</sup>

Massa específica dos metais (g/cm <sup>3</sup> )									
Ag	Al	Au	Cu	Fe	Ni	Pb	Pd	Sn	Zn
<b>10,50</b>	2,70	19,30	8,96	7,86	8,90	11,40	12,00	7,30	7,14

fica, 2,7 g/cm<sup>3</sup>, é inferior à massa específica de corte do líquido denso utilizado, 2,89 g/cm<sup>3</sup>. Outro motivo a ser considerado é que grande parte do alumínio presente está na forma de alumina, um composto cerâmico que é mais frágil e, conseqüentemente, mais fácil de moer. Assim, concentra-se nas frações mais finas.

A concentração de metais na fração fluada (Tabela 4) é de 21% (<2001) e 26% (>2002). O alumínio, devido a sua massa específica, tende a “migrar” para a fração fluada. O cobre, embora tenha alta massa específica, é encontrado na fração fluada. Isto ocorre, pois, por ser o metal mais abundante nas placas de circuito impresso e, ao contrário do ferro, estar sempre associado a algum componente plástico ou cerâmico (de baixa massa específica), tem uma distribuição mais uniforme entre as frações (afundada e fluada). O cobre e o alumínio não são os únicos metais presentes na fração fluada. Juntos correspondem a aproximadamente 75% dos metais presentes. Os outros metais são distribuídos ao longo da fração fluada, uma vez que o processamento mecânico não é capaz de liberar totalmente os metais. Além disso, algumas partículas são reduzidas a tamanhos muito pequenos, de modo que a influência da viscosidade sobrepõe-se à massa específica.

As concentrações médias de metais nas frações não magnéticas (Tabela 5) obtidas são de 66% (<2001) e 76% (>2002), respectivamente. Como esperado, o teor de metais no material não magnético diminuiu. Este fato pode ser explicado pela remoção do ferro. Como basicamente quase todo o ferro e cerca 30% do níquel são removidos, a concentração relativa dos outros metais se eleva, inclusive a fração não metálica (polímeros e cerâmicos)

que se encontra associada aos metais. Além disso, conforme discutido anteriormente, o ferro possui uma quantidade menor de massa não metálica associada que os outros metais.

É aplicada uma baixa intensidade de campo (0,5T) no intuito de remover ferro e níquel que possuem caráter ferromagnético. A Figura 4 mostra a relação não magnético/magnético (não retido/retido) do material processado.

O comportamento dos metais pode ser previsto de acordo com seu caráter: ferromagnético (fortemente atraído), paramagnético (fracamente atraído) e diamagnético (fracamente repelido). A grande quantidade de ferro presente nas frações obtidas (Tabela 6) após a separação em meio denso explica a proporção de material retido como magnético; entretanto, além de ferro e níquel, que apresentam caráter ferromagnético, é detectada a presença de outros metais, inclusive de caráter diamagnético. De acordo com Veit<sup>(11)</sup> a presença de cobre no material magnético ocorre devido à sua abundância no material metálico: o cobre é arrastado junto às partículas atraídas de ferro e níquel. O ouro é originalmente eletrodepositado sobre o níquel para formar a superfície de contato dos contatos eletrônicos e, deste modo, é retirado junto ao níquel.

A separação magnética mostra-se eficiente para a concentração de metais de modo geral; entretanto, quando há o interesse em recuperar metais valiosos, deve ser levar em consideração a distribuição desses metais em ambas as frações, pois prata e ouro podem ser facilmente arrastados junto à fração magnética.

A avaliação da periculosidade de um resíduo sólido deve ser feita a partir da ABNT NBR 10.004.<sup>(12)</sup> O resíduo deve ser considerado classe I (perigoso) quando apresentar uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, que são avaliadas de acordo com critérios específicos baseados na composição e características físico-químicas do resíduo. A toxicidade, em contrapartida, deve ser avaliada de outras formas.<sup>(12)</sup>

Uma das formas de avaliar a toxicidade é, ao conhecer a composição química do resíduo e comparar com o Anexo C da NBR. Outra forma de avaliar a toxicidade de um resíduo sólido é pelo ensaio de lixiviação proposto pela ABNT NBR 10.005.<sup>(5)</sup> Esta norma pode atuar de forma complementar ao Anexo C da NBR 10.004,<sup>(12)</sup> todavia, é independente dele. O resíduo que apresentar algum elemento da Tabela 10 (Anexo F – NBR10.004) acima da concentração limite deve ser considerado Classe I (perigoso). Se o resíduo é considerado Classe II (não

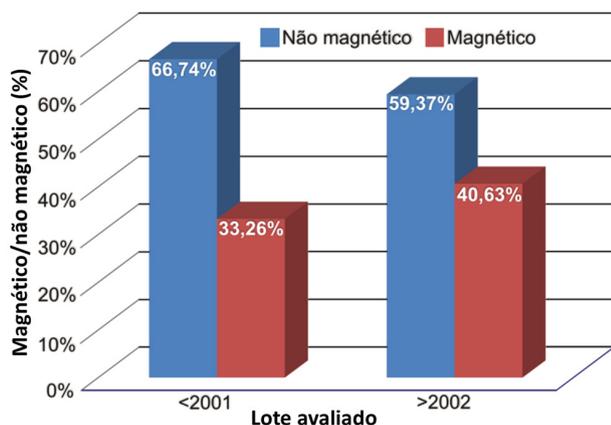


Figura 4. Relação do material não magnético/magnético para os lotes processados.

Tabela 10. Anexo F da NBR 10004. Limite máximo (mg/L) no extrato obtido no ensaio de lixiviação (inorgânicos)<sup>(13)</sup>

Limite máximo no lixiviado (mg/L)								
Ag	As	Ba	Cd	Cr	F	Hg	Pb	Se
5,0	1,0	70,0	0,5	5,0	150,0	0,1	1,0	1,0

perigoso), torna-se necessário realizar o ensaio da NBR 10.006<sup>(13)</sup> (ensaio de solubilização) de modo a determinar se o resíduo é Classe II-A (não inerte) ou Classe II-B (inerte).

Comparando os resultados obtidos (Tabela 7) com o anexo F da NBR 10.004 (Tabela 10), pode-se observar para ambos os lotes que o chumbo (Pb) encontra-se bem acima do limite máximo permitido no lixiviado que é de 1mg/L. Com base no resultado obtido os aparelhos de telefone celular devem ser considerados como resíduo classe I (perigoso). Deste modo, este tipo de produto não deve ser descartado junto ao lixo doméstico.

Com a implementação da diretiva RoHS, a tendência é que o chumbo desapareça dos aparelhos de telefone celular visto que os produtos eletrônicos fabricados nos países membros da União Europeia ou para lá exportados, devem conter no máximo 0,1% (em massa) de chumbo. Todavia, a legislação brasileira ainda é permissiva quando se trata das substâncias proibidas na diretiva RoHS. Assim, nosso mercado ainda é receptivo a eletrônicos que contém chumbo. É interessante reforçar que mesmo aparelhos do tipo *leadfree* não devem ter o descarte em lixo doméstico/urbano, uma vez que, o potencial para reciclagem de tais aparelhos é enorme.

## 5 CONCLUSÃO

Os aparelhos de telefone celular são excelente fonte de metais, desde os metais base até os metais

valiosos, visto que o teor médio de metais encontrados é, na maioria das vezes, superior ao teor encontrado nos minérios. No caso dos metais valiosos, o teor pode ser de até 181 vezes maior para a prata, 517 vezes para o ouro e 100 vezes para o paládio, nas amostras analisadas neste estudo.

De forma complementar, tais aparelhos não devem ser descartados de qualquer forma, pois, de acordo com as normas brasileiras, os aparelhos de telefone celular devem ser considerados resíduos perigosos (Classe I) que, por sua vez, necessitam de um tratamento para serem dispostos. O alto teor de chumbo presente nos aparelhos é o motivo dos mesmos serem considerados Classe I.

O processamento mecânico é perfeitamente aplicável para o processamento das sucatas de aparelhos de telefone celular. Após a separação em meio denso é possível obter um concentrado de aproximadamente 80% em metais. A separação magnética também é eficiente; entretanto, ao retirar ferro e níquel, parte do ouro é retirada junto. Deste modo, a separação magnética não é recomendada quando o objetivo é recuperar metais valiosos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a cooperação do CETEM pelos equipamentos cedidos, ao CNPq e à PUC-Rio, pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Hagelüken C. Opportunities & challenges to recover scarce and valuable metals from electronic devices. In: OECD – UNEP Conference on Resource Efficiency; 2008 April 24 [acesso em 27 mar 2012]; Paris, France. Disponível em: [http://www.docstoc.com/docs/98210112/Opportunities-\\_challenges-to-recover-scarce-and-valuable-metals](http://www.docstoc.com/docs/98210112/Opportunities-_challenges-to-recover-scarce-and-valuable-metals)
- Pettey C. Gartner says worldwide mobile phone sales to end users grew 8 per cent in fourth quarter 2009; Market remained flat in 2009. Gartner Newsroom [Online]; 2010 Feb 23 [acesso em 4 maio 2010]. Disponível em: <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1306513>.
- Monteiro M, Moreira D, Chinelatto MA, Nascente P, Alcântara N. Characterization and recycling of polymeric components present in cell phones. *Journal of Polymers and the Environment*. 2007;15:195-199. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-007-0060-9>
- Umicore. Manual de reciclagem do lixo eletrônico. Guarulhos; 2005 [citado em: 4 maio 2010]. Disponível em: <http://www.umicore.com.br/nossosNegocios/recycling/pmr/manualUmicore/>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro; 2004.
- Veit HM. Emprego do processamento mecânico na reciclagem de placas de circuito impresso [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2001.
- Campos AR, Luz AB, Carvalho EA. Separação em meio denso. In: Luz AB, Sampaio JÁ, Almeida SLM. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: Cetem/MCT; 2004. p. 270-301.
- Porto CG, Palermo N, Pires FRM. Panorama da exploração e produção de ouro no Brasil. Trindade RBE, Barbosa Filho E. Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2002. p. 1-23. PMID:11875242.
- U.S. Geological Survey. Minerals yearbook: metals and minerals. Washington, DC; 2005.

- 10 Outokumpu HSC Chemistry® for Windows v.5.0: chemical reaction and equilibrium software with extensive thermochemical database [software]. Espoo: Outotec; 2002.
- 11 Veit HM. Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso [tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2005.
- 12 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004. Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro; 2004.
- 13 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro; 2004.

Recebido em: 15/05/2013

Aceito em: 22/08/2013