

CARACTERIZAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE APARELHOS DE TELEFONE CELULAR VISANDO RECUPERAÇÃO DE METAIS VALIOSOS¹

Hellington Bastos da Silva de Sant'ana²

Francisco José Moura³

Hugo Marcelo Veit⁴

Resumo

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, 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. Com o processamento mecânico foi possível obter frações metálicas de até 80% em peso. 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: Caracterização; Lixo eletrônico; Metais valiosos; Reciclagem.

CHARACTERIZATION OF PRINTED CIRCUIT BOARD OF MOBILE PHONES AIMING TO RECOVER VALUABLE METALS

Abstract

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 leaching test was carried out to determine if a waste needs to be man-aged 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: Characterization; Electronic waste; Valuable metals; Recycling.

¹ *Contribuição técnica apresentada no 67º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 31 de julho a 03 de agosto de 2012, Rio de Janeiro - RJ.*

² *Mestre, Bolsista de Doutorado da CAPES/PUC-Rio.*

³ *PhD., Professor associado do Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio, Rio de Janeiro - RJ*

⁴ *Dr., Professor adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais - UFRGS, Rio Grande do Sul - RS.*

1 INTRODUÇÃO

O rápido aumento populacional associado à globalização tem promovido uma grande demanda por produtos e serviços. A cada ano as indústrias “batem” 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 sem reparo. Não que seja impossível, mas, não é viável.

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 de qualquer maneira (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.⁽¹⁾ Em contato com o solo, estes 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 bilhões de aparelhos no mundo.⁽²⁾ Atualmente, o tempo de vida útil de um telefone celular é inferior a dois anos⁽³⁾ e cerca de 10% a 20% dos aparelhos produzidos entram em inatividade a cada ano.⁽⁴⁾

Deste modo, o presente trabalho teve os seguintes objetivos: caracterizar este tipo de resíduo quanto a sua composição química; caracterizar este resíduo quanto 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 MATERIAL E MÉTODOS

As sucatas utilizadas neste trabalho correspondem a aparelhos obsoletos (ou defeituosos). Todos os aparelhos foram recebidos através de doação. Ao todo, utilizou-se aproximadamente 12 kg de aparelhos de telefone celular (sem baterias) de diferentes anos, marcas e modelos. Inicialmente os aparelhos foram classificados por idade, através 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.

Após a classificação, para fins de caracterização, os aparelhos foram separados em dois lotes: lançados até o final do ano de 2001 (<2001) e lançados 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” baseou-se no fato de ambos os lotes possuírem aproximadamente a mesma quantidade de aparelhos.

As baterias, por não serem objeto de estudo do presente trabalho, foram retiradas, classificadas (Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion e outras) e encaminhadas ao programa municipal de coleta de pilhas e baterias.

Os aparelhos foram desmontados manualmente e as partes plásticas grosseiras (carcaças, teclados e etc) foram separadas. O material restante (PCI, conectores etc.) foi submetido à 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 (1mm) seu uso não foi suficiente. Deste modo, 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 sobre moagem do material. A peneira utilizada foi a 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, acrescentava-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 gauss). O Separador era ajustado para 0,5A (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 disposição existentes. No Brasil este ensaio é normatizado através da ABNT NBR 10005.⁽⁵⁾ O procedimento foi realizado com os aparelhos sem baterias. De cada lote (<2001 e >2002) separou-se 20 aparelhos. Os aparelhos foram moídos e classificados granulometricamente de modo que todo o resíduo estivesse com granulometria inferior a 9,5 mm. A solução utilizada consiste de um tampão descrito pela NBR 10005, onde, em um balão volumétrico (1L) adiciona-se 5,7 ml de ácido acético glacial e 64,3 ml de solução de NaOH (1N) e o volume é 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. Como o material é heterogêneo, este ensaio foi realizado em duplicata. 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. Das três garrafas, duas continham amostra e uma continha a

solução pura (branco). Em cada garrafa, colocou-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 de modo a caracterizar as frações presentes. As análises realizadas foram: espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), espectrometria por absorção atômica (AAS). O Procedimento de abertura foi idêntico para todas as amostras. Pesava-se 5 g de amostras e digeriu-se em 100 ml de água régia à temperatura de 70°C por 30 minutos. Ao final da digestão, o líquido obtido era filtrado, seu volume determinado e submetido a análise. O material não solubilizado era lavado e, após seco, pesado novamente, de forma a determinar a massa realmente digerida.

O lixiviado obtido no ensaio da ABNT NBR 10005⁽⁵⁾ foi analisado por ICP-OES, de forma direta, ou seja, sem necessidade de abertura ou diluição.

3 RESULTADOS

O passo inicial foi classificar os aparelhos de acordo com o ano de lançamento. Os dados foram obtidos em catálogos de fabricantes e sites especializados de telefonia celular. Após a classificação obtiveram-se aparelhos de 1994 a 2009, entretanto, a maioria dos aparelhos foi lançada entre os anos de 1999 e 2004. Após a classificação etária e a divisão em lotes, os aparelhos foram desmontados manualmente. Nesta etapa os aparelhos foram pesados ainda montados. Após o desmonte, 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.

Tabela 1 – Massa utilizada no processamento mecânico

Lote	Total de aparelhos	Massa total	Carcaças	Demais constituintes
<2001	58	4973,16 g	2370,42 g	2602,74 g
>2002	62	4152,86 g	1893,53 g	2259,33 g

A cominuição das placas de circuito impresso dos aparelhos de telefone celular foi realizada e dois moinhos de tamanhos distintos. No primeiro, o maior, os aparelhos eram cominuídos a partir de seu tamanho inicial (~8 cm x 2,5 cm) para partículas de tamanho inferior a 8 mm, diâmetro da peneira utilizada neste moinho. No segundo moinho, de menor tamanho e capacidade, os aparelhos foram cominuídos para 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 granulometria inferior a 1 mm obtidas das diferentes etapas de cominuição

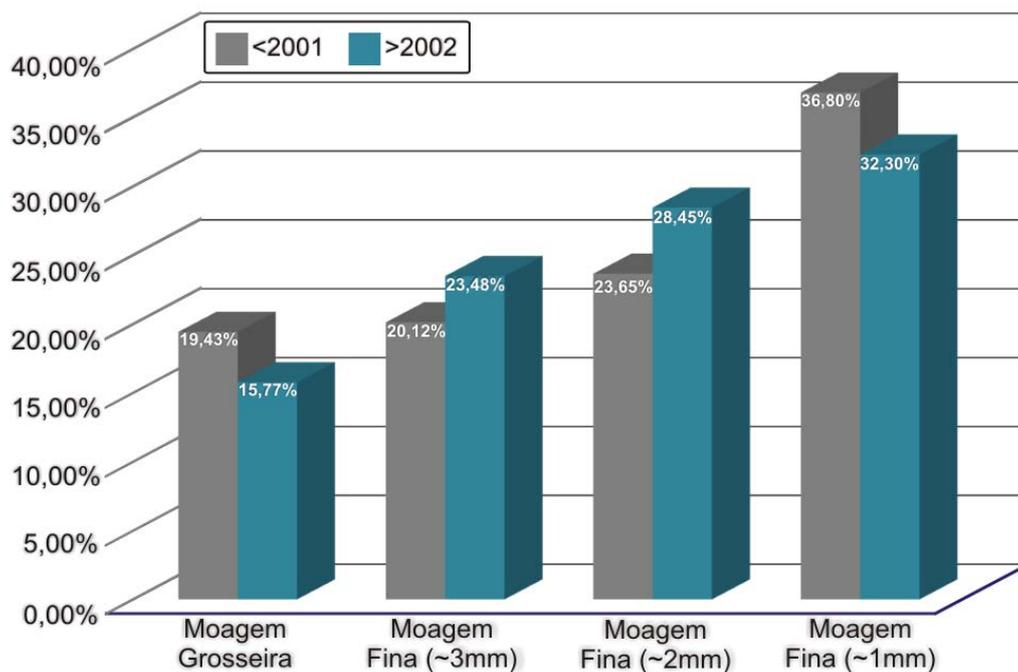


Figura 1 – Frações com granulometria inferior a 1 mm.

Após a cominuição realizou-se a caracterização química em ICP-OES (elementar) do material, de modo a avaliar a presença e concentração dos metais presentes. A Tabela 2 mostra os metais encontrados e suas respectivas concentrações para ambos os lotes.

Tabela 1 – Composição química (metais) de PCI e partes metálicas de aparelhos de telefone celular

Elemento	Concentração (em peso)		Elemento	Concentração (em peso)	
	<2001	>2002		<2001	>2002
Ag	0,278%	0,117%	Al	0,622%	0,841%
Au	0,059%	0,043%	Ba	0,631%	0,637%
Be	0,008%	0,006%	Ca	1,135%	0,697%
Cr	0,720%	2,157%	Cu	26,751%	22,814%
Fe	9,598%	17,418%	K	0,028%	0,017%
Mg	0,044%	0,143%	Na	0,033%	0,021%
Ni	2,366%	2,775%	Pb	1,332%	0,567%
Pd	0,019%	0,005%	Sb	0,060%	0,035%
Sn	1,811%	1,556%	Sr	0,021%	0,014%
Ti	0,207%	0,179%	V	0,002%	0,006%
Zn	2,247%	2,919%	Zr	0,032%	0,018%
Total	<2001 48,007%		Total	>2002 52,987%	

Os resultados da Tabela 2 são referentes às placas de circuito impresso e outras partes contendo metais (carcaças, parafusos, suporte de cartão SIM e etc). 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.

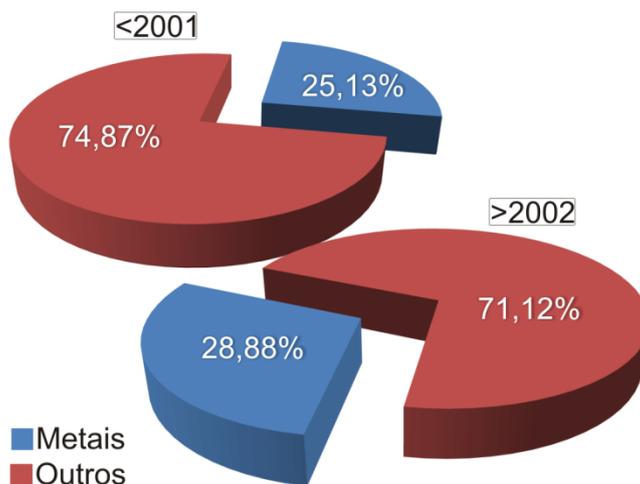


Figura 1 – Composição média dos lotes avaliados.

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.

A utilização de líquidos densos é uma técnica precisa para caracterizar a separação por densidade de minerais e serve para uma grande variedade de objetivos. Neste trabalho optou-se por utilizar esta técnica, mesmo sabendo que, em geral, os líquidos densos são caros e perigosos.⁽⁶⁾ Os resultados mostrados na Figura 3 correspondem à fração de material que afunda e que flutua quando se adiciona cerca de 100 g de material no funil de separação e completando o volume com bromofórmio e deixando por 2h.

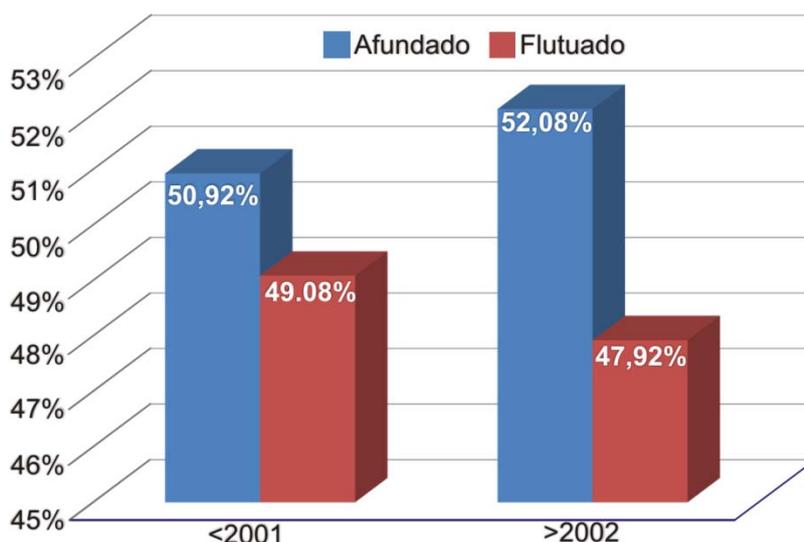


Figura 3 – Porcentagem de material que afunda/flutua em contato com o bromofórmio ($\rho=2,89 \text{ g/cm}^3$) durante 2h.

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

Tabela 3 – Composição da fração afundada

Concentração dos metais afundados (%)										
Lote	Ag	Al	Au	Cu	Fe	Ni	Pb	Pd	Sn	Zn
<2001	0,117	0,138	0,079	40,786	19,270	4,263	2,252	0,035	3,196	4,238
>2002	0,187	0,300	0,047	36,306	27,942	4,444	1,063	0,009	2,972	5,170

A concentração dos metais presentes na fração fluçada (determinados por AAS) é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição da fração fluçada

Concentração dos metais fluçados (%)			
Lote	Cu	Al	Total
<2001	14,502	1,669	16,171
>2002	16,085	3,015	19,100

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 (determinados por ICP-OES) é mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição da fração não magnética

Concentração do material não magnético(%)											
Lote	Ag	Al	Au	Cu	Fe	Ni	Pb	Pd	Sn	Zn	
<2001	0,137	0,077	0,061	50,321	0,631	2,651	2,424	0,038	3,322	5,078	
>2002	0,206	0,395	0,059	56,542	1,516	3,057	1,589	0,015	4,191	7,619	

A concentração da fração magnética (determinados por AAS) é mostrada na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição da fração magnética

Concentração do material magnético (%)					
Lote	Au	Cu	Fe	Ni	Total
<2001	0,108	30,176	40,470	6,195	76,949
>2002	0,062	20,680	50,430	6,573	77,745

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.

Tabela 7 – Análise química do lixiviado obtido do ensaio da NBR 10005

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

4 DISCUSSÃO

Com os valores obtidos (Tabela 1) é possível observar que ao longo do tempo os aparelhos ficaram mais leves. O peso médio 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, 22% menos material, entretanto, as carcaças poliméricas têm praticamente a mesma fração em cada lote, correspondem a 47,7% e 45,6%, respectivamente. Isso indica que a redução foi proporcional.

Na etapa de cominuição, a granulometria (≤ 1 mm) foi escolhida, pois, de acordo com Veit⁽⁶⁾ os metais atingem bom grau de liberação para granulometrias abaixo 1 mm, entretanto, tendem a se concentrar nas frações entre 0,5 mm e 1 mm. Durante a cominuição tomou-se o cuidado para que a granulometria do material processado não ficasse muito abaixo de 1 mm, pois, de acordo com Campos, Luz e Carvalho,⁽⁷⁾ a eficiência da separação em meio denso tende a diminuir abaixo de 0,6 mm.

Outro aspecto que deve ser considerado na cominuição é o custo. Veit⁽⁸⁾ realizou uma estimativa de custo para a recuperação de cobre a partir de sucata eletrônica. Com base nesta estimativa, mostrada na figura 4, é possível observar que a cominuição é responsável por aproximadamente 85% do custo total do processamento mecânico.

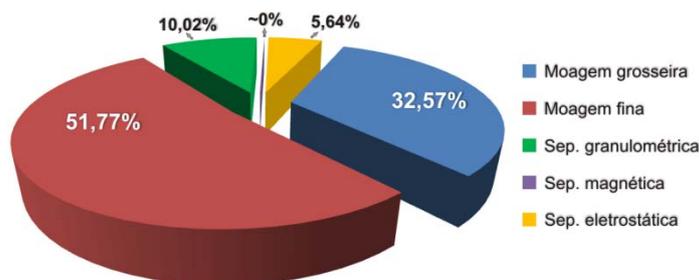


Figura 4 – Estimativa de custo para as diferentes operações do processamento mecânico.⁽⁸⁾

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

Tabela 8 – Concentração dos metais valiosos encontrados nos aparelhos de telefone celular e a média encontrada em minérios⁽⁹⁻¹¹⁾

Elemento	Concentração (g/T)		
	<2001	>2002	Minério
Ag	1450	640	8 – 115
Au	310	230	0,6 – 12
Pd	100	30	1 – 2

Apesar da concentração de metais valiosos ser menor no lote mais novo, ela é maior que a concentração média desses metais em minérios. Se por um lado há um apelo ambiental para que tal resíduo não seja descartado de forma inadequada, por outro é possível afirmar que os aparelhos de telefone celular são excelente fonte de metais, incluindo os valiosos.

Na separação em meio denso, a concentração total de metais nas frações afundadas (Tabela 3) foi de 75% (<2001) e 81%(>2002). Somando as concentrações mostradas na tabela 14 e dividindo pela concentração total de metal na fração afundada, é possível afirmar que os metais mostrados na Tabela 3 correspondem a 99%(<2001) e 97%(>2002) da fração total metálica afundada.

Ainda nesta tabela, em conjunto com a Tabela 2 pode-se observar que a operação de 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 a densidade dos metais comumente encontrados em sucatas eletrônicas, pode-se prever a separação em meio denso dos mesmos. A Tabela 9 mostra a densidade dos 10 metais analisados na fração afundada.

Tabela 9 – Densidade de alguns metais presentes nos aparelhos de telefone celular⁽¹²⁾

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

Dentre os metais concentrados destaca-se o ferro que, no lote mais antigo, dobrou 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⁽⁶⁾ mostrou 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 densidade, 2,7 g/cm³, é inferior a densidade de corte do líquido denso utilizado, 2,89 g/cm³. Outro motivo a ser considerado é que grande parte do alumínio presente está na forma de alumina, um cerâmico, que é mais frágil e, conseqüentemente, mais fácil de moer. Assim, se concentra nas frações mais finas.

A concentração de metais na fração fluçada (tabela 4) foi de 21% (<2001) e 26% (>2002). Pode-se observar na tabela 4 que a concentração de alumínio na fração fluçada é maior que a concentração do mesmo na amostra integral mostrada na tabela 2. O cobre por ser o metal mais abundante nas placas de circuito impresso e, ao contrário do ferro, estar sempre protegido por algum isolante ou associado a algum componente, tem uma distribuição mais uniforme entre as frações (afundada e fluçada) de modo que boa parte dos metais na fração fluçada corresponde a cobre, entretanto, deve-se ressaltar, conforme mostrado por Veit⁽⁶⁾ que o cobre, assim como a maior parte dos metais, concentra-se mais na fração grosseira.

Deve-se ainda ressaltar que o cobre e o alumínio não são os únicos metais presentes na fração fluçada. Juntos correspondem a aproximadamente 75% dos metais presentes na fração fluçada. Os outros metais também se distribuem ao longo da fração fluçada, pois, 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 à densidade. Assim, algumas partículas com densidade superior à da densidade de corte ficam retidas na fração fluçada.

A concentração média de metais nas frações não magnéticas (Tabela 5) obtidas foram 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 foram 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.

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

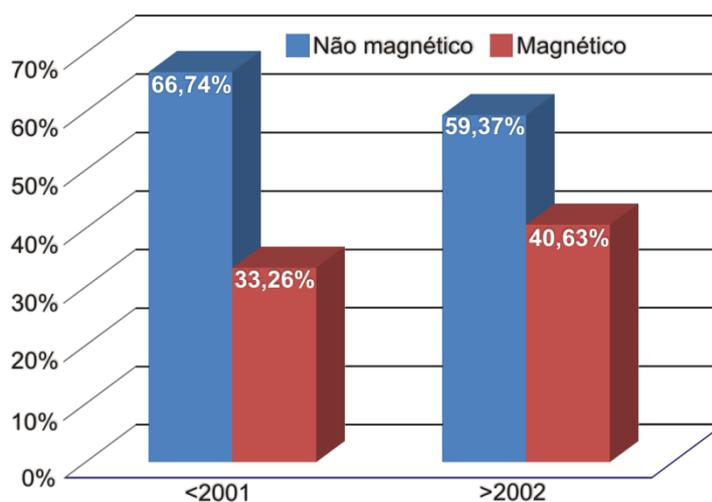


Figura 5 – Relação do material não magnético/magnético para os lotes processados.

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 a presença de outros metais, inclusive de caráter diamagnético, foi detectada.

Conforme o esperado, o ferro é dominante no material magnético por questões óbvias. De acordo com Veit⁽⁸⁾ a presença de cobre no material magnético ocorre devido à sua abundância no material metálico, o cobre é arrastado junto às partículas de ferro e níquel atraídas. O ouro, originalmente é 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, apesar de prata e ouro possuírem caráter diamagnético, podem ser facilmente arrastados junto à fração metálica. O paládio, além dos fatores já citados, apresenta caráter paramagnético e, no caso de um aumento da intensidade de campo, pode ser totalmente removido na fração magnética.

A avaliação da periculosidade de um resíduo sólido deve ser feita a partir da ABNT NBR 10004.⁽¹³⁾ Nela é estabelecido que o resíduo deve ser considerado classe I (perigoso) quando apresentar uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. As características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade 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.⁽¹³⁾

Uma das formas de avaliar a toxicidade é, ao conhecer a composição química do resíduo, comparar com o anexo C da NBR. Outra forma de avaliar a toxicidade de um resíduo sólido é o ensaio de lixiviação da ABNT NBR 10005.⁽⁵⁾ Esta norma pode atuar de forma complementar ao anexo C da NBR 10004,⁽¹³⁾ todavia, é independente dele. O resíduo que apresentar algum elemento da Tabela 10 (anexo F – NBR10004) acima da concentração limite deve ser considerado classe I (perigoso). Se o resíduo for considerado classe II (não perigoso), torna-se necessário realizar o ensaio da NBR 10006 (ensaio de solubilização) de modo a determinar se o resíduo é classe II-A (não inerte) ou classe II-B (inerte).

Além dos elementos inorgânicos, o anexo F também apresenta limites para substâncias orgânicas e pesticidas, que não foram mostrados na Tabela 10 por não se aplicarem a este trabalho.

Tabela 2 - Anexo F da NBR 10004. Limite máximo (mg/L) no extrato obtido no ensaio de lixiviação (inorgânicos)⁽¹³⁾

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	

Comparando os resultados obtidos (Tabela 7) com o anexo F da NBR 10004⁽¹³⁾ (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 europeia, 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 para a prata, 517 vezes para o ouro e 100 vezes para o paládio.

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 resíduo perigoso (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 retirado junto. Deste modo, a separação magnética não é recomendada quando o objetivo é recuperar metais valiosos.

Agradecimentos

Aos professores Francisco José Moura e Hugo Marcelo Veit, pela orientação. Ao CNPq e a PUC-Rio, pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 HAGELÜKEN, C. Opportunities & challenges to recover scarce and valuable metals from electronic devices. *OECD – UNEP Conference on Resource Efficiency*. Paris, 2008, Vol. April 24.
- 2 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] 23 de Fevereiro de 2010. [Citado em: 04 de Maio de 2010.] <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1306513>.
- 3 MONTEIRO, M., MOREIRA, D., CHINELATTO, M. A., NASCENTE, P., & ALCÂNTARA, N. Characterization and recycling of polymeric components present in cell phones. *Journal of Polymers and the Environment*. 195-199, 2007, Vol. XV.
- 4 UMICORE. Manual Umicore. *Umicore Brasil*. [Online] Umicore, 2005. [Citado em: 04 de Maio de 2010.] <http://www.umicore.com.br/quemSomos/manualUmicore/>.
- 5 ABNT(b). NBR 10005. *Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro : ABNT, 2004.
- 6 VEIT, HUGO MARCELO. *Emprego do Processamento Mecânico na Reciclagem de Placas de Circuito Impresso*. Departamento de Engenharia de Materiais, UFRGS. Porto Alegre : s.n., 2001. Dissertação de Mestrado.
- 7 CAMPOS, ANTÔNIO RODRIGUES DE, LUZ, ADÃO BENVINDO DA E CARVALHO, EDUARDO AUGUSTO DE. Capítulo 7 - Separação em meio denso. [A. do livro] Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio e Salvador Luiz M. de Almeida. *Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro : CETEM/MCT, 2004.
- 8 VEIT, HUGO MARCELO. *Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS. Porto Alegre : s.n., 2005. Tese de Doutorado em Engenharia.
- 9 PORTO, CLÁUDIO GERHEIM, PALERMO, NELY E PIRES, FERNANDO ROBERTO MENDES. Panorama da Exploração e Produção de Ouro no Brasil. [A. do livro] Roberto de Barros Emery Trindade e Olavo Barbosa Filho. *Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro : CETEM/MCT, 2002.
- 10 SLUZHENIKIN, S F E MOKHOV, A V. Gold and Silver in Ores of the Noril'sk Region. *11th International Platinum Symposium*. 2010.
- 11 U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Minerals Yearbook: Metals And Minerals*. Washington : U.S. Government Printing Office, 2005. p. 1767. ISBN: 978-1-4113-1980-6.
- 12 HSC CEMISTRY. *Outokumpu HSC Chemistry® for Windows v.5.0 - Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database*. [Software]. 2002. ISBN 952-9507-08-9.
- 13 ABNT(a). NBR 10004. *Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro : ABNT, 2004.