

### III-350 - CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO MECÂNICO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE TELEFONES CELULARES

**Angela Cristina Kasper**<sup>(1)</sup>

Química Industrial pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS). Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, área de Ciência e Tecnologia de Materiais, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutoranda em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, área de Ciência e Tecnologia de Materiais, pela UFRGS.

**Guilherme Batista Tartaro Berselli**

Graduando em Engenharia de Materiais/UFRGS

**Bruno Dias Freitas**

Graduando em Engenharia de Materiais/UFRGS

**Andrea Moura Bernardes**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais/UFRGS

**Hugo Marcelo Veit**

Prof. Dr. em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais/UFRGS

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Av. Bento Gonçalves, 9500 – Setor 4 – Prédio 74 – Campus do Vale – Porto Alegre/RS – CEP: 91501-970 - Fone: (51) 3308-9425. e-mail: angelakasper@globo.com

#### RESUMO

A cada ano que passa enormes quantidades de aparelhos de telefones celulares são desativados, seja por defeitos ou por obsolescência tecnológica. Estes aparelhos se descartados incorretamente acabam por ocasionar perdas ambientais e econômicas. Deste modo este trabalho pretende caracterizar os materiais presentes nas placas de circuito impresso (PCI's) dos telefones celulares e, utilizando o processamento mecânico, separar e concentrar as diferentes frações de materiais presentes nestas PCI's (metais, polímeros e cerâmicos), possibilitando a reciclagem dos mesmos. Os materiais poliméricos da base e dos componentes das placas de circuito impresso dos telefones celulares foram caracterizados por infravermelho (FT-IR) e análise térmica (TGA), enquanto que fração metálica das placas foi caracterizada por espectroscopia de emissão atômica. Os resultados indicaram a presença de materiais como epóxi, poliéster e fibra de vidro na base e nos componentes das placas, enquanto que a fração metálica é constituída por metais de interesse econômico (grandes quantidades de cobre, e metais preciosos) e por quantidade apreciáveis de metais perigosos como o chumbo. Após a caracterização inicial, o material das placas foi submetido a etapas de processamento mecânico (cominuição, classificação granulométrica e separação magnética e eletrostática) visando separar e concentrar os materiais a partir das suas características em uma fração não condutora (polímeros e cerâmicos), uma fração magnética (metais magnéticos) e um fração condutora (metais não magnéticos). Os resultados de obtidos indicaram o processamento mecânico como uma boa alternativa para a concentração de alguns metais (ferro, cobre e zinco), enquanto que apresentam resultados relativamente ruins para outros (ouro e prata, por exemplo).

**PALAVRAS-CHAVE:** Telefones Celulares, Placas de Circuito Impresso, Caracterização, Processamento Mecânico.

#### INTRODUÇÃO

Segundo a empresa americana de consultoria em tecnologia da informação Gartner, somente no ano de 2009 foram vendidos no mundo mais de 1,2 bilhões de aparelhos celulares, sendo que 45,5 milhões destes aparelhos foram vendidos no Brasil<sup>(1)</sup>. Em face a esta enorme quantidade de aparelhos vendidos está uma enorme quantidade de aparelhos que entram em inatividade a cada ano, por defeitos ou por obsolescência tecnológica. Uma estimativa da agência americana de proteção ambiental EPA (Environmental Agency Protection), mostrou que um telefone móvel é mantido pelos usuários por cerca de 9 -18 meses<sup>(2)</sup>. No Brasil, estima-se que a cada ano entrem em inatividade entre 10 e 20% dos aparelhos produzidos<sup>(3)</sup>.

Em geral, entre 65% e 80% dos componentes dos aparelhos celulares podem ser reciclados. No entanto, segundo dados de uma pesquisa realizada pela empresa Nokia<sup>(4)</sup>, no Brasil apenas 2% dos aparelhos celulares

são reciclados, enquanto que 32% dos aparelhos são simplesmente guardados em casa, 29% são repassados para outras pessoas e 10% são descartados no lixo doméstico.

Desconsiderando-se as baterias, os principais componentes dos telefones celulares são: a carcaça polimérica, geralmente fabricada com polímeros termoplásticos, que por não sofrerem alterações químicas durante o seu processamento podem ser remoldados; a placa de circuito impresso (PCI), que é composta por metais, materiais cerâmicos e resinas termofixas; e os displays <sup>(5)</sup>.

Dentre os componentes dos aparelhos de telefone celular o que desperta maior interesse, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, são as placas de circuito impresso (PCI). As PCI's são compostas por 3 unidades básicas: um substrato não condutor ou laminado; circuito de condutores impressos sobre ou dentro de substratos utilizados nas PCI's, e; os componentes montados.

Segundo Zhang et al. <sup>(6)</sup> o tipo de substrato mais utilizado é o FR4, que é composto por resina epóxi reforçada com fibra de vidro e utiliza um retardante de chama bromado na matriz de epóxi. Os componentes montados geralmente incluem chips, conectores, capacitores, entre outros. Cada um destes componentes com uma composição diferente de materiais. O tântalo (Ta), por exemplo, é utilizado nos capacitores, enquanto que elementos como o gálio (Ga), índio (In), titânio (Ti), silício (Si), germânio (Ge), arsênio (As), selênio (Se) e telúrio (Te) podem ser encontrados em chips e outras unidades, as soldas podem conter chumbo (Pb), estanho (Sn), prata (Ag) e cádmio (Cd). Semicondutores contêm gálio, silício, selênio, germânio, entre outros <sup>(6)</sup>.

O descarte incorreto, bem como a queima de sucatas eletrônicas sem que haja um controle das emissões, são apontados por Babu et al. e Eldik et al. <sup>(7, 8)</sup>, como causadores de graves problemas ambientais, principalmente no que se refere a poluição por chumbo, bifenilos polibromados (PBB), éteres difenil polibromados (PBDE) e outros materiais tóxicos. Sepúlveda et al. <sup>(9)</sup> também apontam a reciclagem incorreta de sucatas eletrônicas como causadora de graves problemas ao meio ambiente e à saúde da população.

Além dos riscos a saúde e ao meio ambiente associados à disposição incorreta destes resíduos, deve-se levar em conta que cada tonelada de telefones celulares contém em média cerca de 3,5 kg de prata, 340 g de ouro, 140 g de paládio e 130 kg de cobre, ocasionando perdas econômicas <sup>(10)</sup>. Portanto, se por um lado essa diversidade de materiais torna o processo de reciclagem das PCI's difícil, por outro, a presença de metais preciosos ou elevado valor econômico como cobre, prata e ouro, entre outros, torna as PCI's uma matéria-prima interessante para reciclagem <sup>(11)</sup>.

Os principais processos utilizados na reciclagem de PCI's são o processamento mecânico, a hidrometalurgia, a pirometalurgia e a eletrometalurgia. Sendo que na maioria dos casos são utilizados uma combinação de dois ou mais destes processos.

Vários autores, como Zang e Forssberg <sup>(12)</sup>, Tenório et al. <sup>(13)</sup>, Veit et al. <sup>(14, 15, 16)</sup>, Duan et al. <sup>(17)</sup>, Lee et al. <sup>(18)</sup>, Cui e Forssberg <sup>(19)</sup>, dentre outros, utilizaram o processamento mecânico em seus trabalhos, obtendo bons resultados.

As principais etapas do processamento mecânico são: cominuição, classificação e separação dos componentes.

A cominuição ou redução de tamanho ou moagem nada mais é do que a ação de uma força bruta fragmentando a sucata pelo movimento de "martelos", "bolas" ou "facas" dentro de um compartimento fechado. A classificação granulométrica é feita através de peneiras que são superfícies perfuradas ou vazadas sobre a qual se dá o movimento de partículas. Esse processo separa o material somente pelo tamanho das partículas e não identifica o material por qualquer outra propriedade. A separação dos materiais pode ser feita por: diferença de densidade (gravimétrica), granulometria, propriedades magnéticas e propriedade elétricas <sup>(20)</sup>.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização da fração polimérica das placas de circuito impresso

Na caracterização da fração polimérica das placas de circuito impresso foram utilizados ensaios de espectroscopia de infravermelho (FT-IR) para identificação dos materiais da base e dos componentes, e análise térmica (TGA), para quantificar a presença de materiais não poliméricos (cerâmicos, fibra de vidro, etc.) no material.

Os ensaios de Espectroscopia de infravermelho (FTIR) foram realizados em um equipamento modelo Spectrum 1000, da Perkin-Elmer. Enquanto que na análise termogravimétrica (TGA) foi utilizado o equipamento TGA 2050, da TA Instruments. O ensaio foi realizado em atmosfera de nitrogênio, com aquecimento de 0 - 1000°C e taxa de 20°C/min.

### Caracterização da fração metálica das placas de circuito impresso

Para as marcas de telefones celulares A e B, por apresentarem uma maior quantidade de unidades disponíveis, a caracterização foi realizada individualmente. Já os aparelhos das demais marcas, por apresentarem um número menor de unidades, foram caracterizados como uma única amostra homogeneizada.

Para a caracterização da fração metálica das placas foi necessário moer algumas placas, até que as mesmas atingissem granulometrias inferiores a 1 mm. Uma amostra destas placas moídas (10g) foi lixiviada com água régia (sólido:líquido = 1:20, em temperatura de 60°C, por 2 h) e posteriormente caracterizada por Espectroscopia de Emissão Atômica.

O ensaio de caracterização foi realizado em um equipamento de espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES), modelo Optima 7300 DV, da Perkin-Elmer.

### Processamento mecânico das placas de circuito impresso

O primeiro passo para a recuperação dos materiais presentes nas PCI's foi a cominuição, realizada primeiramente em um moinho de martelos modelo A4R da marca Tigre, e, posteriormente, em um moinho de facas modelo SM2000 da Retsch.

Após a cominuição, os materiais foram classificados em duas granulometrias diferentes, uma entre 1,0 mm - 0,5 mm e menor que 0,5 mm. Esta classificação foi realizada no separador granulométrico marca Retsch, equipado com um conjunto de peneiras.

O passo seguinte foi passar o material por um separador magnético de correias cruzadas, onde o mesmo foi separado em duas frações, uma magnética e outra não magnética.

Após a retirada da fração metálica magnética, a fração não magnética passou por um separador eletrostático, onde foi separada em outras duas frações uma não condutora e outra condutora. Neste trabalho, foi utilizado um separador eletrostático modelo ES1010 da Equimag.

Após as etapas de separação, foram coletadas 10g de amostra de cada uma das frações (magnética, condutora e não condutora), para a caracterização destas frações. Cada uma das amostras foi lixiviada em água régia (sólido:líquido = 1:20, em temperatura de 60°C, por 2 h) e, posteriormente, analisadas por Espectroscopia de Absorção Atômica, para verificar a concentração dos metais em cada uma das frações. Na caracterização destas frações foi utilizando o espectrofotômetro de absorção atômica modelo AA240FS da Varian.

Cabe salientar que os resultados obtidos na caracterização inicial possibilitaram que este material anteriormente separado em marca A, marca B e outras marcas (conforme descrito na caracterização) fosse misturado e homogeneizado antes da realização do processamento mecânico (classificação e separação), ou seja, no processamento mecânico foi utilizado uma mistura de placas de todas as marcas e modelos coletados nas lojas de assistência técnica.

## RESULTADOS

### Caracterização do material polimérico das PCI's

No espectro de infravermelho (FTIR) apresentado na figura 1, obtido do polímero da base das placas de circuito impresso, observa-se em torno de  $3400\text{ cm}^{-1}$  a banda de absorção de vibração da hidroxila (-OH), entre  $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$  aparecem as bandas de vibração das deformações CH alifáticas, entre  $1500\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$  as bandas de estiramento das ligações C=C do anel aromático. Em torno de  $1250\text{ cm}^{-1}$  aparece a banda característica do estiramento fenil-oxigênio, próxima  $1040\text{ cm}^{-1}$  a banda característica das vibrações de estiramento C-O alifáticos e em  $829\text{ cm}^{-1}$  a banda de absorção referente a flexão para fora do plano das ligações C-H características do anel aromático dissubstituído.

As bandas em  $1250$ ,  $1040$  e  $830\text{ cm}^{-1}$  são características de resinas epóxi <sup>(21)</sup>, o que nos leva a afirmar que a base das placas de circuito impresso (PCI) é basicamente constituída por uma resina epóxi.

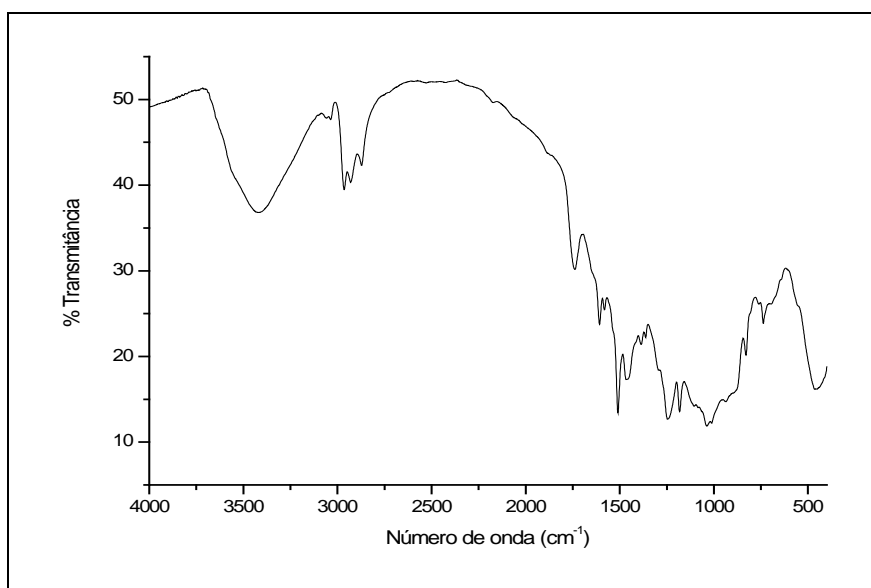


Figura 1: Espectroscopia de infravermelho de amostra da base das PCI's

Os resultados obtidos nos ensaios de TGA (figura 2) mostram um percentual de resíduos na ordem de 71,72%. Este elevado percentual de resíduo, conforme literatura, pode ser atribuído a presença de materiais como a fibra de vidro utilizada como reforço no material de base <sup>(6)</sup>.

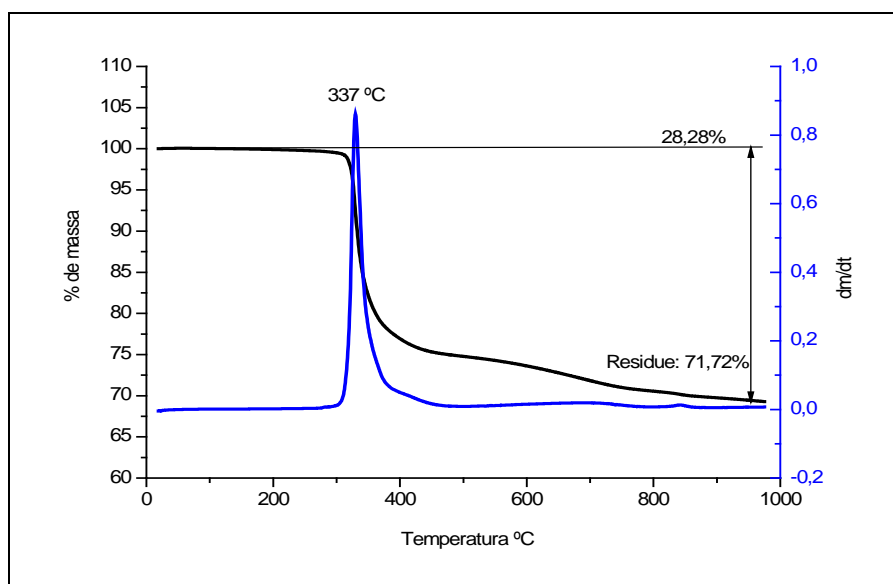
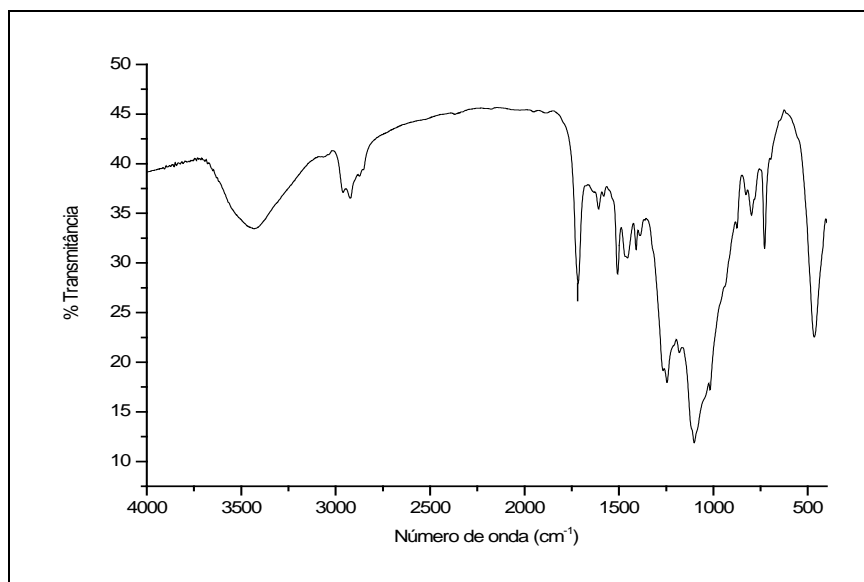


Figura 2: Análise termogravimétrica (TGA) - Curva para material da base da PCI

Já no espectro de infravermelho (FTIR) mostrado na figura 3, obtido do polímero dos componentes fixados na base da placa de circuito impresso, na região  $3400\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$  observa-se a banda característica do estiramento -OH, na região entre  $2900\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$  o estiramento C-H alifático, entre  $1710\text{--}1720\text{ cm}^{-1}$  aparece a banda correspondente ao estiramento C=O que, junto com a absorção devido à ligação C-O em  $1245\text{ cm}^{-1}$ , indica a presença de grupamento éster. Em  $728\text{ cm}^{-1}$  aparece a banda de substituição do anel aromático <sup>(21)</sup>. As bandas observadas neste espectro de FTIR sugerem que o material dos componentes seja constituído por uma resina de poliéster.



**Figura 3: Espectroscopia de infravermelho de componentes das PCI's**

Os resultados obtidos na caracterização destes materiais indicam a possibilidade do uso de pequenos percentuais deste material (em torno de 5%) como carga na reciclagem de outros polímeros, uma vez que a sua constituição (Epóxi, poliéster, fibra de vidro, etc.) praticamente inviabiliza uma reciclagem mecânica e dificulta o seu uso em uma eventual reciclagem energética, uma vez que a presença de materiais como a fibra de vidro reduzem a eficiência energética do material.

### Caracterização da fração metálica das PCI'

Os resultados obtidos na caracterização da fração metálica de placas de circuito impresso observado na tabela 1 indicam grandes quantidades de metais de interesse econômico, tais como o cobre, estanho, alumínio e metais preciosos (ouro e prata), o que faz a reciclagem destes resíduos economicamente muito interessante. Além disso, a presença de metais perigosos ao meio ambiente, como chumbo, torna o processo de reciclagem necessária para proteção do ambiente.

**Tabela 1 – Percentuais dos metais presentes em amostras de PCI's**

%	Marca A	Marca B	Outras Marcas
Alumínio	0,31	0,99	0,61
Cobre	39,56	38,33	37,81
Chumbo	1,17	1,26	1,23
Ferro	1,42	6,53	4,85
Estanho	2,09	3,11	2,55
Níquel	3,42	1,67	2,54
Zinco	3,43	0,97	1,82
Prata	0,06	0,06	0,05
Ouro	0,06	0,10	0,09
<b>Total</b>	<b>51,56</b>	<b>52,98</b>	<b>51,55</b>

Não foram encontrados na literatura dados específicos sobre os percentuais de cobre em placas de circuito impresso de telefones celulares, no entanto, alguns autores relatam percentuais de cobre que variam de 10 – 15% da massa total do aparelho, o que significaria um percentual entre 25 – 45% da massa da placa. Desta forma, apesar de os percentuais de cobre observados neste trabalho a princípio parecerem um tanto elevados, eles são similares aos encontrados por outros trabalhos científicos.

No que se refere à quantidade de ferro nas amostras, pode-se verificar que dependendo da marca de aparelho pode haver grandes variações na quantidade do metal. A quantidade de ferro detectada em celulares da marca B (6,53%) é cerca de 4,5 vezes maior do que a detectada em celulares da marca A (1,42%). No entanto, cabe salientar que a marca do aparelho não é o único fator capaz de influenciar nesta diferença de percentual.

### **Separação e concentração dos materiais**

Os resultados da caracterização das amostras obtidas após as etapas de separação (magnética e eletrostática) para granulometria entre 1,0mm - 0,5mm podem ser vistos na tabela 2.

Os resultados mostram que o ferro ficou quase que totalmente concentrado na fração magnética, enquanto que o níquel também se concentrou nesta fração, embora apareça também na fração condutora. Já o cobre, apesar de aparecer em quantidades ainda apreciáveis na fração não condutora, ficou concentrado na fração condutora, da mesma forma, que o zinco. A concentração destes metais em uma determinada fração facilita a recuperação (Cobre e Zinco) ou retirada (ferro) dos mesmos do material.

Se por um lado alguns metais ficaram concentrados em alguma das frações (magnética ou eletrostática), outros metais de interesse econômico, como ouro e prata, por exemplo, se distribuíram nas 3 frações (magnética, condutora e não condutora) não se concentrando em nenhuma delas.

**Tabela 2 – Percentuais dos metais após etapas de separação para granulometria entre 1,0 mm - 0,5 mm**

%	Fração magnética	Fração condutora	Fração não condutora
Alumínio	0,04	0,25	0,15
Cobre	2,12	63,42	14,44
Chumbo	0,88	5,12	1,19
Ferro	59,17	0,04	0,01
Estanho	0,54	4,15	0,66
Níquel	17,46	3,85	0,53
Zinco	0,14	2,77	0,46
Prata	0,07	0,38	0,06
Ouro	0,07	0,18	0,06
Não Metal	13,66	16,25	78,47
<b>Total</b>	<b>94,15</b>	<b>96,41</b>	<b>96,03</b>

Já a tabela 3 mostra os resultados obtidos para amostras com granulometria inferior a 0,5mm. Os resultados obtidos mostram um comportamento semelhante aos resultados obtidos para granulometrias maiores.

No entanto, neste caso observa-se que apesar de se concentrar prioritariamente na fração condutora, quantidades apreciáveis de cobre também puderam ser observadas nas frações magnética e não condutora, isso ocorre devido ao reduzido tamanho das partículas, que faz com que o metal seja arrastado juntamente com partículas de outros metais ou de polímeros.

Comparando-se os percentuais obtidos nas duas granulometrias (tabelas 2 e 3) verifica-se que alguns metais, como por exemplo o cobre, encontram-se distribuídos nas duas granulometrias de forma semelhante, enquanto que outros metais, como por exemplo o chumbo e o ferro, apesar de aparecerem nas duas granulometrias, aparecem em maiores proporções nas amostras de maior granulometria.

Tabela 3 – Percentuais dos metais após etapas de separação para granulometria menor que 0,5 mm

%	Fração magnética	Fração condutora	Fração não condutora
Alumínio	0,07	0,83	0,11
Cobre	10,20	63,94	15,34
Chumbo	2,28	1,41	0,67
Ferro	38,31	0,03	0,01
Estanho	2,21	1,76	0,17
Níquel	10,80	6,92	0,32
Zinco	0,39	8,18	0,22
Prata	0,44	0,08	0,05
Ouro	0,19	0,03	0,19
Não Metal	28,14	14,25	76,17
<b>Total</b>	<b>93,03</b>	<b>97,43</b>	<b>93,25</b>

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho nos possibilitam afirmar que a fração não condutora das placas de circuito impresso dos telefones celulares pode ser utilizada como carga em uma reciclagem de polímeros, haja vista que apresenta em sua composição uma fração polimérica (resinas epóxi e poliéster), materiais cerâmicos e uma pequena quantidade de metais que não foram separados através do processamento mecânico.

Já os resultados da caracterização da fração metálica demonstram a presença de uma quantidade apreciável de metais de interesse econômico como cobre, ouro e prata, bem como a presença de materiais potencialmente perigosos como o chumbo, deixando claro a importância da reciclagem destes materiais.

Verificou-se ainda que a utilização de métodos de separação (magnético e eletrostático) pode ser uma alternativa bastante promissora quando se trata da recuperação de alguns metais como cobre, ferro e níquel, mas que para outros metais como ouro e prata, provavelmente pela pequena quantidade presente, os processos devem ser melhorados para a obtenção de melhores resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GARTNER (2010) "Gartner Says Worldwide Mobile Phone Sales to End Users Grew 8 Per Cent in Fourth Quarter 2009," Gartner, Inc. , Feb 23, 2010, <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1306513>
2. EPA (United States Environmental Protection Agency), (2004). **The life cycle of a mobile phone, Solid waste and emergency response.**
3. MAWAKDIYE, A. (2007) **Meio ambiente - Poluição eletrônica.** Revista da Indústria, 129 (7), p. 50-53, jun. 2007.
4. NOKIA Brasil (2008). **Reciclagem de telefones celulares.** Disponível em: <http://www.nokia.com.br/a-nokia/meio-ambiente/we-recicle/por-que-reciclar>. Acesso em: março 2009.
5. WU, B. Y., CHAN, Y. C., MIDDENDORF, A., GU, X., ZHONG, H. W. (2008). **Assessment of toxicity potential of metallic elements in discarded electronics: A case study of mobile phones in China.** Journal of Environmental Science, 20, 1403–1408.
6. ZHANG, H. C., Li, J., Shrivastava, P., Gao, Z. (2004). **Printed Circuit board recycling: A state-of-the-Art Survey.** IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 27, n. 1, Janeiro de 2004.
7. BABU, B. R., PARANDE, A. K., BASHA, C. A. (2007). **Electrical and electronic waste: a global environmental problem.** Waste Management e Research, 25, 307–318.



8. ELDIK, R. V., SCHLUMMER, M., GRUBER, L., MAURER, A., WOLZ, G. (2007) **Characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management.** Chemosphere, 67, 1866–1876.
9. SEPÚLVEDA, A., SCHLUEP, M., RENAUD, F. G., STREICHER, M., KUEHR, R., HAGELÜKEN, C., GERECKE, A. C.. (2010). **A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from China and India.** Environmental Impact Assessment Review 30, 28–41.
10. SCHLUEP, M., HAGELUEKEN, C., KUEHR, R., MAGALINI, F., MAURER, C., MESKERS, C., MUELLER, E., WANG, F. (2009) **Recycling – From e-waste to resources, Final report.** United Nations Environment Programme e United Nations University, 2009. Disponível em: [www.unep.org/PDF/.../E-waste\\_publication\\_screen\\_FINALVERSION-sml.pdf](http://www.unep.org/PDF/.../E-waste_publication_screen_FINALVERSION-sml.pdf). Acesso em: outubro de 2009.
11. PETRANIKOVA, M., ORAC, C., MISKUFOVA, A., HAVLIK, T. (2009). **Hydrometallurgical Treatment of Printed wiring boards from used Computers after Pyrolytic Treatment.** In: European Metallurgical Conference. Innsbruck, Austria. July, 2009.
12. ZHANG, S., FORSSBERG, E. (1998) **Mechanical recycling of electronics scrap - The current status and prospects.** Waste Management e Research, 16, 119–128.
13. TENÓRIO, J. A. S., MENETTI, R. P., CHAVES, A. P. (1997). **Production of non-ferrous metallic concentrates from electronic scrap.** In: TMS Annual Meeting, Orlando, EUA, p.505–509.
14. VEIT, H. M., PEREIRA, C. C., BERNARDES, A. M. **Using mechanical processing in recycling printed wiring boards.** JOM, p. 45- 47, June 2002.
15. VEIT, H. M., PEREIRA, C. C., HÖRLLE, L. F., BERNARDES, A. M.. (2002). **Recycling of metals from PCB by dense medium separation processes.** In: Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects, Lulea, Sweden, 16–20 June.
16. VEIT, H.M., DIEHL, T. R., SALAMI, A. P., RODRIGUES, J. S., BERNARDES, A. M., TENÓRIO, J. A. S. (2005). **Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit board scrap.** Waste Management, 25 (1), 67–74.
17. DUAN, C., WEN, X., SHI, C., ZHAO, Y., WEN, B., HE, Y. (2009). **Recovery of metals from waste printed circuit boards by a mechanical method using a water medium.** Journal of Hazardous Materials 166, 478–482. 2009.
18. LEE, J-C., JEONG, J., YOO, K., YOO, J-M., KIM, W. (2009) **Enrichment of the metallic components from waste printed circuit boards by a mechanical separation process using a stamp mill.** Waste Management 29, 1132–1137.
19. CUI, J., FORSSBERG, E. (2003). **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review,** Journal of Hazardous Materials. 99 (2003) 243–263.
20. HAYES, P. C.. **Process Principles in Minerals and Materials Production.** Hayes Publishing CO. p. 29. Brisbane, Austrália, 1993.
21. JULIAN, J. M., ANDERSON, D. G., BRANDAU, A. H., MCGINN, J. R., MILLON, A. M. (1991). **An infrared spectroscopy atlas for the coatings industry.** Fourth Edition, Vol. 1.