

Reciclagem de Carcaças de Monitores: Propriedades Mecânicas e Morfológicas

Adjanara P. Gabriel, Inês H. Grochau, Ruth M. C. Santana, Hugo M. Veit
*Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais,
Escola de Engenharia, UFRGS*

Resumo: A substituição da tecnologia CRT (cathode ray tube) utilizada em televisores e monitores, há mais de 60 anos, pelas novas tecnologias de Plasma, LCD (liquid crystal display) e LED (light-emitting diode) tem gerado grande quantidade de resíduos. Não existem estatísticas oficiais da quantidade de resíduos gerados no Brasil, contudo, para alguns países, como os EUA, a China e Taiwan, estimam-se descartes anuais de 3,2 milhões, 5 milhões e 1 milhão de televisores e monitores, respectivamente. Os monitores são compostos por polímeros, metais e cerâmicas, incluindo alguns materiais tóxicos. Este trabalho está focado na caracterização e reciclagem da carcaça polimérica dos monitores CRT. Foram coletados monitores danificados ou obsoletos e as carcaças foram separadas por marca, caracterizadas, cominuídas e injetadas para obter corpos de provas para os ensaios mecânicos. A caracterização mostrou que as carcaças, independentemente da marca, utilizam o mesmo material polimérico, o ABS (Acrlonitrila Butadieno Estireno). Os resultados dos ensaios mecânicos apresentaram variações nas diferentes marcas, provavelmente por possuírem composições diferenciadas. Esta variação também foi verificada analisando a superfície de fratura dos corpos de prova após o ensaio de tração. Com base nos resultados pode-se concluir que o material reciclado apresentou desempenho mecânico satisfatório, viabilizando tecnicamente a sua reciclagem.

Palavras-chave: *Monitor CRT, carcaça polimérica, reciclagem mecânica.*

Recycling of Frames of Monitors: Mechanical and Morphological Properties

Abstract: The cathode ray tube (CRT) technology—used in televisions and monitors for more than 60 years—has generated a lot of waste, now that is has been replaced by newer technologies such as plasma, liquid crystal display (LCD), and light-emitting diodes (LED). There are no official statistics on the amount of waste generated in Brazil; however, for some countries, such as the United States, China, and Taiwan, the estimated annual disposal of televisions and monitors is 3.2 million, 5 million, and 1 million, respectively. Monitors mainly contain polymers, metals, and ceramics, some of which may be hazardous. This work is focused on characterization and recycling of polymeric frames of CRT monitors. Monitors, damaged and obsolete, were collected and separated by brand, comminuted, and then injected to obtain the samples to be used in mechanical tests. The results pointed to the same polymeric material being used, viz. acrylonitrile butadiene styrene (ABS), regardless of the brand. The mechanical properties varied across different brands, probably because of different compositions. This variation was also observed in the analysis of the fracture surface of the samples after the tensile test. On the basis of the results, it can be concluded that the recycled material showed satisfactory mechanical performance, enabling recycling technically.

Keywords: *CRT monitors, mechanical recycling, polymer frame.*

Introdução

É cada vez mais marcante a presença dos chamados resíduos tecnológicos junto ao resíduo sólido urbano. Dentre eles destacam-se: lâmpadas, eletrodomésticos, computadores, telefones celulares, impressoras, pilhas e baterias^[1,2]. Dados da Computer Industry Almanac^[3] indicam que em 2011 foram vendidos 372 milhões de computadores em todo o mundo com projeção de alcançar 517 milhões de unidades em 2015. No Brasil, também em 2011, as vendas de computadores cresceram 12% atingindo 15,4 milhões de computadores, número que o deixa como o terceiro maior em vendas de computadores no mundo, atrás apenas da China e dos EUA. No fim de 2011 havia 1,6 bilhão de computadores em uso no mundo, sendo a maior parte, 19%, nos EUA, seguida da China com 12,2% e o Brasil na nona posição

com 3,01%, o que correspondia a cerca de 48,1 milhões de computadores em uso^[3].

Robinson^[4] estimou que computadores, telefones celulares e aparelhos de televisão corresponderam a 5,5 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos, em escala global, gerados em 2010, e fez uma projeção de 9,8 milhões de toneladas para 2015. Segundo o autor, o resíduo eletrônico pode corresponder a cerca de 8% em volume de todos os resíduos urbanos gerados. Com relação aos monitores CRT, não existe um número concreto sobre as quantidades descartadas anualmente, contudo, para alguns países, como os EUA, a China e Taiwan, estimasse que ocorra, respectivamente, o descarte de 3,2 milhões, 5 milhões e 1 milhão de televisores e monitores anualmente^[5].

Autor para correspondência: Adjanara P. Gabriel, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Setor 4, Prédio 74, Sala 103, Campus do Vale, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil, e-mail: dijapg@hotmail.com

Se por um lado, o avanço tecnológico revolucionou o mundo com produtos mais acessíveis, por outro lado, estes produtos eletroeletrônicos tornam-se obsoletos cada vez mais rápidos, reduzindo o seu ciclo de vida. O tempo de vida útil de um aparelho celular é de aproximadamente 9-18 meses^[6], um computador varia de 5-8 anos^[7] e um monitor do tipo CRT é de aproximadamente 5 anos^[8]. Após esses períodos, os aparelhos tornam-se ultrapassados e incompatíveis com as novas tecnologias, resultando em uma quantidade enorme e crescente de produtos eletrônicos que acabam sendo descartados, pois muitas vezes é mais barato comprar um aparelho novo do que reparar ou atualizar um produto quebrado ou obsoleto^[9,10].

Desta forma, são necessárias ações para coletar adequadamente esse tipo de resíduo, evitando o contato com outros materiais e, especialmente, a disposição direta sobre o solo e exposição às intempéries evitando assim a contaminação do solo, lagos, rios e lençóis freáticos devido a presença de materiais tóxicos em sua composição, como chumbo, mercúrio, cádmio e compostos bromados^[2].

Associado a uma coleta adequada, programas de reciclagem devem ser intensificados, pois muitos países em desenvolvimento, entre eles o Brasil, irão enfrentar volumes significativos de geração de resíduos eletroeletrônicos nos próximos anos, permitindo não só a proteção ambiental, mas também a recuperação de materiais interessantes do ponto de vista econômico, como diversos tipos de polímeros, vidros e metais^[11,12].

No Brasil, um impulso importante foi dado pelo governo federal ao sancionar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, em agosto de 2010. Esta lei define, entre outras coisas, que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de eletroeletrônicos são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos^[13]. Esta política incentiva a adoção da logística reversa tornando-a obrigatória para as seis cadeias citadas na legislação. A Figura 1 apresenta

um diagrama de blocos demonstrando as principais etapas envolvidas na logística reversa para monitores. Deve-se levar em conta também que por mais que se busque uma alta eficiência na reutilização, reciclagem ou valorização energética de materiais, a logística reversa dos resíduos eletroeletrônicos pode ainda gerar uma quantidade de resíduo. A última alternativa é a disposição final em aterros e neste caso deve-se adotar medidas de minimização do impacto ambiental destes resíduos através da disposição em aterros industriais observando as normas operacionais específicas para este tipo de disposição^[5,14,15].

Os produtos eletrônicos são uma integração de numerosas tecnologias modernas, ou seja, mistura de materiais de alta qualidade (melhores em propriedades elétricas, magnéticas, óticas, etc.) e processos de fabricação mais automatizados e eficientes. Com isto podemos dizer que a reciclagem eficaz destes resíduos é bastante complexa e também irá envolver diversos processos e técnicas oriundos de diversas áreas do conhecimento, como a química, a metalurgia e a mineração. Os principais fatores que afetam a reciclagem de eletroeletrônicos são: a quantidade do fluxo de resíduos, ou seja, são necessárias grandes quantidades de resíduo e de forma constante para que um processo em larga escala se torne viável; as tecnologias de reciclagem disponíveis, pois como se trata de um tipo de resíduo bastante complexo, algumas partes e componentes ainda não possuem uma rota ou técnica de reciclagem já estabelecida; e as regulamentações governamentais pois elas fazem com que pequenos e grandes geradores de resíduos eletroeletrônicos sejam obrigados a procurar alternativas de descarte, protegendo o meio ambiente e ao mesmo tempo proporcionando a coleta de grandes quantidades deste tipo de resíduo gerando a “escala” necessária para processos industriais de reciclagem.

A reciclagem destes resíduos, além de envolver um amplo espectro de técnicas e processos, visa diferentes materiais (metais e polímeros). A maioria dos trabalhos de pesquisa está focada na recuperação dos metais presentes, especialmente nas placas de circuito impresso (PCI) que possuem em sua composição metais preciosos^[11,12]. No caso dos polímeros, uma questão importante e preliminar

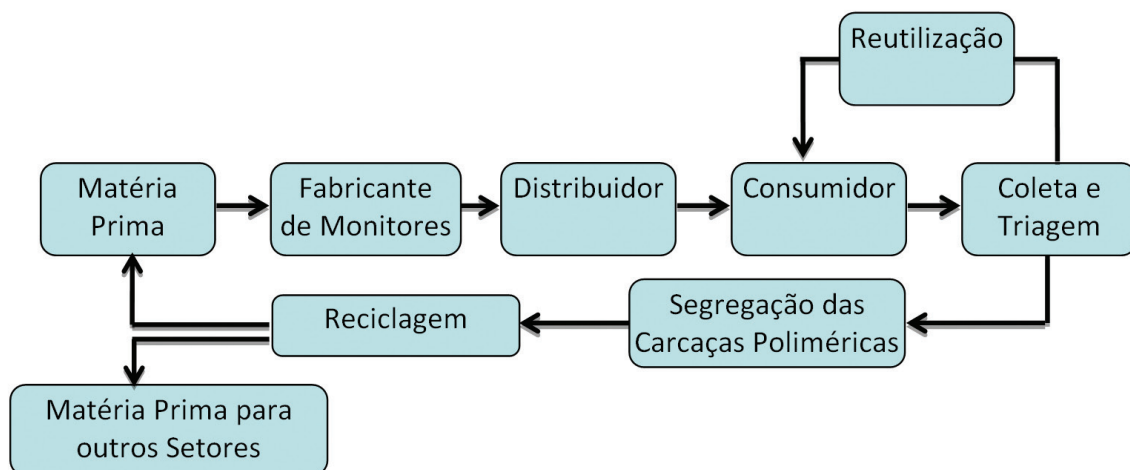


Figura 1. Diagrama de blocos do processo de logística reversa para monitores.

é a discussão sobre o equilíbrio entre a reciclagem e a recuperação de energia, que sempre devem ser levadas em consideração^[11].

Especificamente neste caso, onde as carcaças de equipamentos eletrônicos normalmente são fabricadas ou podem conter polímeros de melhor qualidade e maior custo, como por exemplo, o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), o HIPS (poliestireno de alto impacto) e o PC (policarbonato), a reciclagem energética é descartada em um primeiro momento, pois o material reciclado pode apresentar boas propriedades para ser novamente utilizado pela indústria.

Dentre todos os tipos de resíduos eletrônicos, os monitores de computador do tipo CRT (Tubos de Raios Catódicos) destacam-se neste contexto pela representatividade em termos de volume e massa e pela composição destes equipamentos. Em um monitor são encontrados diversos materiais perigosos como, por exemplo, revestimentos de fósforo nos tubos de raios catódicos, alto teor de chumbo no vidro, capacitores contendo mercúrio e polímeros contendo retardantes de chama, normalmente a base de bromo.

O descarte incorreto, junto ao lixo doméstico ou diretamente no solo, em rios ou lagos bem como a queima destes resíduos sem que haja um controle das emissões, são apontados por Babu et al. e Eldik et al.^[16,17], como causadores de graves problemas ambientais, principalmente no que se refere a poluição por chumbo, bifenilos polibromados (PBB), éteres difenil polibromados (PBDE). Segundo Frazzoli et al.^[18], problemas de saúde como a desregulação endócrina e a neurotoxicidade são exemplos de problemas relacionados a este tipo de resíduo e, o mais grave é que, são problemas que podem se perpetuar por gerações. Além dos materiais perigosos, também podem ser encontrados alguns materiais valiosos como o cobre em placas de circuito impresso^[2,4] e as partes/peças poliméricas que também possuem interesse econômico. Dentre os diferentes polímeros presentes, pode-se destacar o ABS e o HIPS.

No caso do HIPS, a polimerização borracha-estireno resulta em um produto com propriedades mecânicas sob impacto superiores, quando comparado com o PS (Poliestireno) e blendas de PS e borracha^[19]. Este polímero é amplamente utilizado, especialmente nos produtos onde o poliestireno frágil não pode cumprir os padrões requeridos de resistência ao impacto^[20].

O ABS é um copolímero composto por homopolímeros de natureza elastomérica e termoplástica e, portanto, exibe excelente tenacidade e boa estabilidade dimensional. Essas resinas encontram ampla aplicação, sobretudo na confecção de eletrodomésticos, telefones e na indústria automobilística. Portanto, existe uma tendência cada vez maior de descarte de produtos contendo ABS e/ou HIPS e o seu tempo de vida útil poderá influenciar na sua reciclagem^[21].

Geralmente, a degradação deteriora as propriedades mecânicas dos materiais poliméricos e dependendo da estrutura, um polímero pode ser vulnerável a efeitos do ambiente como o calor, o oxigênio e as suas formas ativas, a umidade, as emissões de poluentes atmosféricos, como NOx e a radiação ultra violeta. Esta degradação

poderá incluir mudanças na estrutura química e nas propriedades físicas resultantes^[21]. Segundo Santos et al.^[22], os resíduos plásticos pós-consumo, antes de serem reciclados já sofreram algum tipo de deterioração de suas propriedades físicas e químicas. Estas reações de degradação normalmente são oriundas da polimerização, processamento, uso e descarte do polímero. A degradação por processamento mecânico tem provado causar alterações no comportamento reológico e nas propriedades mecânicas do ABS e HIPS; estas alterações podem ser devido à cisão da cadeia da fase PS e modificações na estrutura física da fase borracha^[23].

Santana et al.^[24] avaliaram a reciclabilidade do HIPS em 5 reprocessamentos por injeção e como isso refletia na suas propriedades termo-mecânicas. Os resultados revelaram que o efeito da degradação da reciclagem consecutiva sobre as propriedades térmicas do HIPS são baixas e pode ser considerada desprezível. Já as propriedades mecânicas, em cinco ciclos de reprocessamento, mostraram indícios de degradação, que poderia ser atribuído a cisão da cadeia causada por ciclos consecutivos de exposição à tensão de cisalhamento e a temperaturas elevadas. O material tornou-se ligeiramente mais rígido e frágil, como indicado pelos resultados dos testes mecânicos.

De qualquer forma a reciclagem mecânica ainda é a mais utilizada no Brasil e consiste no uso de polímeros pós-consumo que são submetidos a processos que pode incluir alguns ou todos os seguintes passos: moagem, lavagem, secagem, reafiação (flocos) ou aglutinação e reprocessamento. Esta sequência de processos pode provocar a degradação do material, por exemplo, reduzir o seu peso molecular uma vez que as cadeias poliméricas são submetidas a temperaturas elevadas, a tensões mecânicas, a luz, entre outros^[24].

Todos estes fatores, ou seja, o tipo de polímero, o seu processamento original, a degradação prévia do material e o tipo de processamento a ser utilizado na reciclagem irão influenciar na qualidade do produto reciclado. Neste sentido, neste trabalho estudou-se a reciclagem das carcaças poliméricas presentes em monitores do tipo CRT e avaliou-se propriedades físico-químicas de corpos de prova reciclados moldados por injeção.

Materiais e Métodos

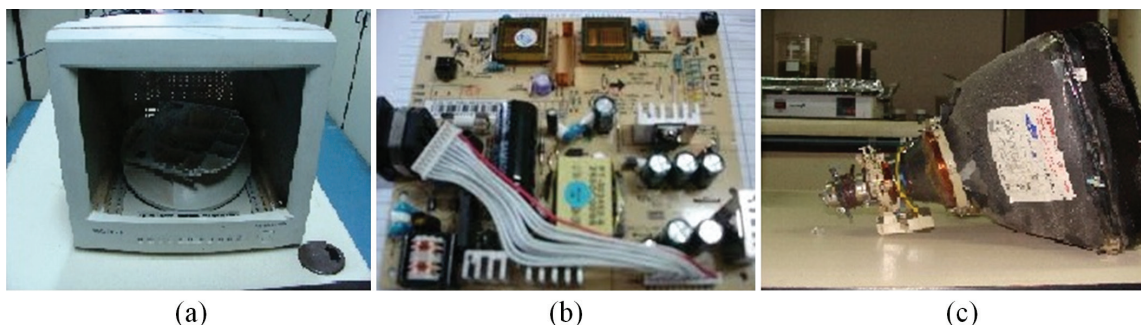
Os materiais utilizados neste trabalho são provenientes de carcaças de monitores do tipo CRT, danificados ou obsoletos, de diferentes marcas que foram coletados em diversas assistências técnicas. Após a coleta, os monitores foram separados por marca e desmontados manualmente para realizar a segregação dos componentes, como descrito na Tabela 1.

Os monitores foram separados basicamente em três partes: carcaça polimérica, placas de circuito impresso e o tubo de raios catódicos. A Figura 2 apresenta as partes desmontadas de um monitor CRT.

Na maioria das carcaças foi encontrado o símbolo do material polimérico ABS, indicando o material da qual foi fabricada. Porém, não foi encontrado o símbolo na amostra 8.

Tabela 1. Monitores coletados divididos por marca.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8
Ano de fabricação	1998	2004	1998 - 2003	2005-2006	1996	2001-2002	1995	2006
Marca	A	B	C	C	D	E	F	G
Tamanho (pol)	15-17	15-17	15	15-17	15	15-17	15	15
Cor	Bege escuro	Bege escuro	Bege claro	Cinza	Bege claro	Bege escuro	Bege claro	Amarelo

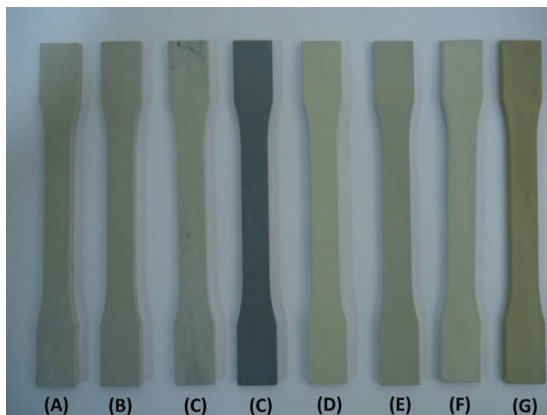
**Figura 2.** Componentes do monitor: (a) carcaça polimérica, (b) placa de circuito impresso e (c) tubo de raio catódico.

Após, as carcaças poliméricas foram separadas de acordo com a marca (7 marcas), e em seguida foram cominuídas em um moinho de facas da marca Rone modelo SRB 2305, obtendo o ABS fragmentado com partícula inferior a 4mm (peneira de 5 mesh). Antes da injeção dos corpos de prova foi realizada a caracterização por FTIR (Infravermelho por transformada de Fourier), usando a técnica da pastilha de KBr (brometo de potássio), das diversas marcas estudadas a fim de comprovar o tipo de polímero presente.

Na sequência foi realizada a moldagem por injeção de corpos de prova (Figura 3) normatizados (ASTM D638-08) em uma injetora marca Battenfeld Plus 350, com temperatura de 200°C e 50 barg de pressão atmosférica.

A propriedade física avaliada foi a determinação da densidade do polímero pelo método de Picnometria, segundo a norma ISO 1183-1 (2004). Para a caracterização mecânica, foram realizados os ensaios de impacto, tração, flexão e dureza. Os ensaios de impacto foram realizados de acordo com a norma ASTM D-256-06 (2009) em um equipamento marca Ceast, modelo Impactor II. Os ensaios de tração e flexão foram realizados de acordo com as normas ASTM D-638-08 (2009) e ASTM D-790-10 (2011) em um equipamento universal de ensaios da marca Instron, modelo 3369. O ensaio de dureza foi realizado em um equipamento Marca Woltest Sd 300, shore D, seguindo a norma ASTM D-2240-05 (2010). Para cada ensaio realizado, foram utilizadas 8 (oito) amostras, sendo 7 (sete) corpos de prova de cada uma.

Além da caracterização mecânica, também foi realizada a análise morfológica das amostras na região de fratura do ensaio de tração, na qual foi usado Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), JSM 6060. Para esse ensaio, foi necessário o recobrimento com ouro da superfície da amostra.

**Figura 3.** Corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos.

Resultados

FTIR

As carcaças poliméricas, em sua maioria, são fabricadas com ABS, porém, na amostra 8, coletada para este trabalho, não havia a identificação do tipo de polímero presente. Desta forma, foram realizadas a identificação de todas as amostras pela técnica de FTIR. Os espectros, Figura 4, comprovam que as carcaças são compostas basicamente com ABS e/ou HIPS, conforme visualizado através dos picos, não importando a marca do monitor.

Como pode ser observado na Figura 4, existe a presença de um pico pequeno, mas significativo em torno de 2230 à 2240 cm^{-1} indicando a presença de ligações $\text{C}\equiv\text{N}$, típicas das nitrilas que pode ser relacionado ao grupo nitrila do copolímero ABS^[25]. As bandas mais importantes e que fornecem mais informações sobre a estrutura dos compostos são encontrados na região de baixa frequência, entre 900 a 675 cm^{-1} , essas bandas provêm da deformação angular das ligações C-H do anel

aromático. Observa-se ainda vibrações do esqueleto da cadeia polimérica em aproximadamente 1600 a 1585cm^{-1} e em 1500 a 1400cm^{-1} , relacionadas à deformação axial das ligações carbono-carbono do anel^[26]. Os picos próximos a 910 e a 960cm^{-1} indicam fases de butadieno (ligações $-\text{CH}=\text{CH}-$) que pode ser relacionado ao grupo

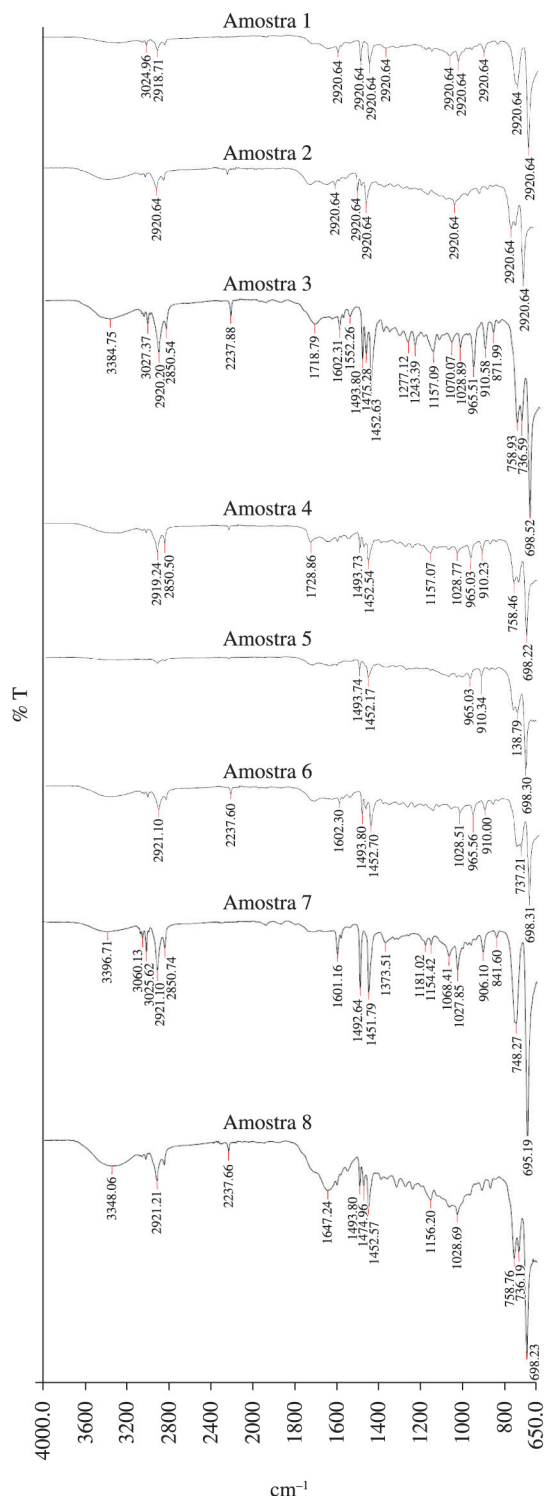


Figura 4. FTIR das carcaças dos monitores.

butadieno do copolímero ABS. E os picos próximos a 700 e 760cm^{-1} indicam a presença de anel aromático relacionado ao anel aromático do estireno no copolímero ABS.

Percebe-se que na amostra 1 não encontram-se picos visíveis de acrilonitrila, indicando que nem sempre o símbolo encontrado na carcaça corresponde efetivamente ao material real, ou seja, a carcaça possui o símbolo do ABS marcado na superfície interna, porém a composição utilizada para a fabricação da carcaça pode não corresponder. Após a comprovação de que todas as carcaças, independente da marca, utilizadas neste trabalho eram compostas de materiais semelhantes, com exceção da amostra 1, foram produzidos corpos de prova normalizados, através de injeção, para realizar a caracterização física e mecânica.

Propriedades físicas

Na Figura 5 estão apresentados os resultados dos ensaios de densidade. Observa-se que a amostra 7 (marca F) apresentou o maior valor e a amostra 1 (marca A) obteve menor valor de densidades, aproximadamente $1,1\text{g/cm}^3$. Essas diferenças provavelmente estão associadas ao tipo e quantidade de carga e aditivos colocados para formulação do material. Segundo Tiganis et al.^[27], a degradação termo-oxidativa na superfície da fase do polibutadieno provoca um aumento na densidade do polímero.

Propriedades mecânicas

Na Figura 6a verificam-se diferentes respostas mecânicas com relação à resistência ao impacto das amostras dos corpos de prova reciclados. Isto deve-se provavelmente às diferentes marcas possuírem composições de carcaças específicas com relação a cargas e aditivos e também pela possível degradação termo-mecânica e química e que estes materiais sofreram durante o seu uso e no seu reprocessamento^[28]. Percebe-se que as amostras 1 e 8 foram as que apresentaram menor resistência ao impacto, sendo que a amostra 8, apresentou a menor resistência, isto provavelmente devido ao ambiente de descarte (armazenagem e intemperismo) a que foi submetida, enquanto que a amostra 7 foi a que apresentou o melhor resultado. Segundo Arostegui et al.^[28] o primeiro parâmetro que pode ser um indicador de alguma degradação em materiais poliméricos é uma mudança na cor do material. Kim e Kang^[29] estudaram a reciclagem mecânica de ABS, onde todas as amostras

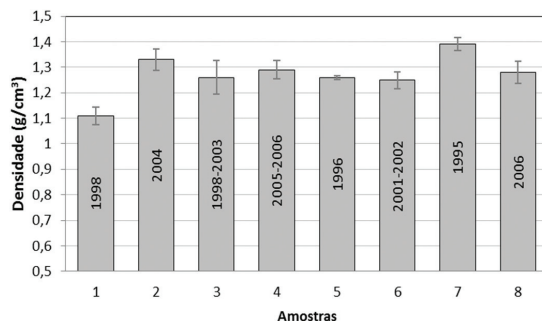


Figura 5. Resultados do ensaio de densidade.

tornaram-se amareladas (comportamento similar ao da amostra 8). O escurecimento do ABS reciclado com apenas um ciclo pode ser atribuído a algumas degradações da fase do butadieno. Já Ito et al.^[30], estudaram que quando o ABS possui uma menor quantidade da fase elastomérica e uma maior quantidade do copolímero estireno, este ABS tem como característica uma maior facilidade de processamento e uma resistência ao impacto não muito elevado. Brennan et al.^[31] nos dizem que as forças de impacto, tanto do ABS quanto do HIPS, diminuem significativamente após a reciclagem. Esta redução é devido aos efeitos da injeção, o que provavelmente causa degradação do polímero, diminuindo a capacidade de ambos os polímeros de resistir a cargas de impacto súbitas. O autor também conclui que a diminuição na propriedade de impacto de HIPS, devido à reciclagem, não pode ser apenas devido aos efeitos da degradação da cadeia, mas também pode ser provocada pela presença de pigmento e/ou carga.

Nos resultados do ensaio de dureza (Figura 6b) foi possível determinar a dureza superficial do material, e observou-se um comportamento bastante semelhante entre as amostras. As amostras 1 e 2 apresentaram durezas levemente superior as outras amostras, provavelmente devido a formulação e a adição de cargas e aditivos^[32]. Segundo Arostegui et al.^[28], o teor de butadieno acrescentado na formulação do material contribui principalmente na dureza do material final.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração das amostras. Este tipo de ensaio fornece informações importantes quanto à resistência mecânica (módulo de elasticidade, tensão de ruptura, entre

outros) das amostras reprocessadas. Segundo Tiganis^[27], a influência da degradação da superfície nas propriedades mecânicas é evidente através da comparação das propriedades de tração do ABS. O alongamento à tração rompe mais rápido nas amostras mais envelhecidas, e também o baixo módulo de elasticidade ocorre devido a imperfeições na superfície da amostra.

A amostra 1 apresentou menor tensão de escoamento, seguido da amostra 8. No caso da amostra 8, que corresponde provavelmente a uma carcaça exposta em intempérie (devido a cor amarelada na Figura 3) sendo um indicativo de degradação prévia. As amostras 2 e 6 foram as que obtiveram melhor resultado em relação a tensão máxima de escoamento, sendo que as demais estão com valores muito próximos. Na tabela 2 é possível visualizar melhor os resultados da tensão máxima obtida no escoamento.

Em relação aos resultados do módulo de elasticidade no ensaio de tração percebe-se que as amostras 1 e 7 apresentaram os menores valores. Por outro lado, a amostra 8 alcançou aproximadamente 1700MPa. Observa-se também que as amostras 3 e 4, que são amostras da mesma marca (C), não apresentaram variação significativa do módulo de elasticidade, provavelmente devido a presença dos mesmos tipos e quantidades de cargas e aditivos. Tarantili^[20] confirma que o módulo de elasticidade diminui à medida que a concentração de ABS aumenta, um efeito sinérgico pode ser observado no módulo de elasticidade da mistura de ABS/HIPS. Estes resultados indicam uma redução significativa na ductilidade do material reciclado com um aumento da rigidez, o que pode ter sido causada por alterações de peso

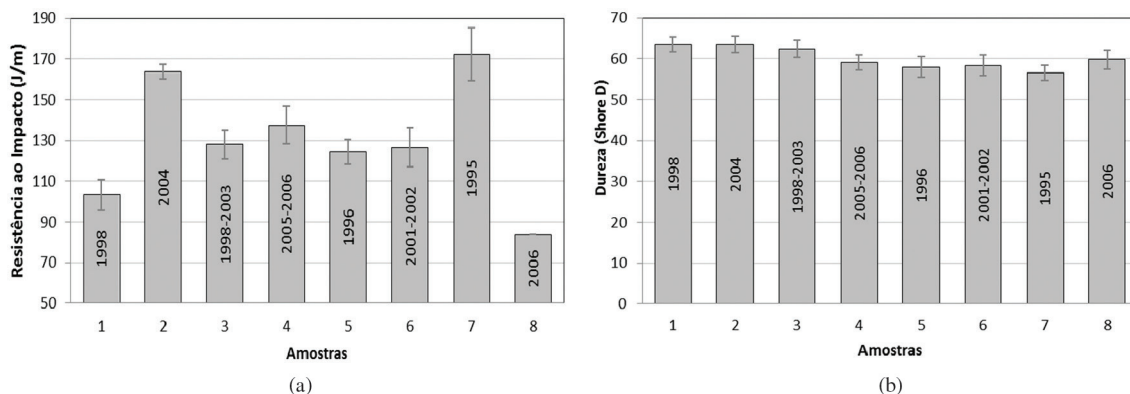


Figura 6. Resultados obtidos no ensaio de impacto (a) e dureza (b) das amostras avaliadas.

Tabela 2. Resultados do ensaio de tração e dureza.

Amostra	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Defor. Máx. Elástica (%)	Dureza (Shore D)
1	23,35 ± 1,21	13,46 ± 0,81	1386,23 ± 16,10	3,08 ± 2,26	63,5 ± 1,88
2	37,64 ± 0,43	21,49 ± 0,31	1588,05 ± 7,30	2,92 ± 0,03	63,5 ± 2,04
3	36,14 ± 0,67	20,58 ± 0,89	1565,56 ± 16,10	2,79 ± 0,05	62,40 ± 2,14
4	35,64 ± 0,69	20,48 ± 0,79	1526,45 ± 16,10	2,88 ± 0,09	59,08 ± 1,82
5	36,37 ± 1,25	20,66 ± 0,99	1478,87 ± 11,80	3,11 ± 0,10	58,00 ± 2,57
6	38,20 ± 1,08	21,85 ± 1,01	1567,80 ± 20,90	2,98 ± 0,04	58,41 ± 2,54
7	36,71 ± 0,81	21,66 ± 0,82	1466,20 ± 25,83	3,34 ± 0,07	56,50 ± 1,84
8	30,46 ± 0,45	17,47 ± 0,96	1672,73 ± 47,66	2,07 ± 0,27	59,80 ± 2,35

molecular e/ou pelos efeitos de reticulação, devido ao aparecimento de degradação durante o processamento^[31].

Na Figura 7 estão apresentados os resultados do ensaio de flexão. Na Figura 7a é possível verificar que a amostra 8 obteve um valor inferior de tensão à flexão, quando comparado com as outras amostras. Com isso comprova-se que o intemperismo acelera a degradação do material. As amostras 2 e 3 apresentaram os maiores valores de tensão e também do módulo de elasticidade. Como esperado, os materiais apresentaram um comportamento diferente entre as propriedades de flexão. Isto pode ser explicado considerando a variação que ocorre nas quantidades de cargas e aditivos em relação a formulação do material^[33] e também a questão da degradação prévia.

Em relação ao módulo de elasticidade, as amostras também apresentaram valores bastante variados, como mostra a Figura 7b. Esse comportamento, novamente, deve-se às diferentes marcas possuírem composições de carcaças específicas com relação a cargas e aditivos e as diferentes degradações prévias sofridas. Novamente a amostra 8 é a que apresentou o resultado mais inferior. Yeh et al.^[34] estudaram que estas diferenças de propriedade são, sem dúvida, devido à presença de impurezas existentes no polímero reciclado. Estas impurezas agem como concentradores de tensão e provocam uma deterioração nos principais resultados das propriedades mecânicas.

Morfologia na superfície da Fratura

A análise morfológica da superfície de fratura de corpos de prova após ensaio de tração foi realizada em MEV. A característica morfológica dos moldados por injeção é principalmente o resultado da orientação das fases ao longo das linhas de fusão durante o enchimento do molde^[35]. Na Figura 8 são apresentadas as imagens da superfície onde observa-se que a amostra 1 possui características de um material com muita porosidade e ausência de carga, resultando uma amostra de fratura frágil, o que vem ao encontro do pobre desempenho mecânico. A superfície da amostra 2 mostra um material mais compacto. A amostra 3 percebe-se que é menos compacta que a amostra 2 devido a presença de alguns vazios. Na amostra 4 verifica-se a presença de partículas

incrustadas na matriz, partículas que podem ser relacionadas a pigmento ou carga, já que justamente esta amostra corresponde ao monitor de cor cinza, diferente da amostra 3 que embora sejam da mesma marca são de cores diferentes. Na amostra 5 é possível detectar também a presença de algumas partículas que podem ser também carga e/ou pigmento. A amostra 6 mostra uma textura mais compacta, com deformações nas bordas da imagem indicando ruptura. A amostra 7 possui a superfície rugosa e com fibrilas, apresenta deformação plástica e a amostra 8 apresentou superfície de ruptura frágil, confirmando a baixa deformação plástica e nenhuma carga presente.

Conclusões

De uma forma geral, pôde-se concluir que a reciclagem das carcaças poliméricas oriundas de monitores obsoletos e/ou danificados é viável tecnicamente do ponto de vista das características mecânicas obtidas no material reciclado. Essa conclusão não inclui a amostra 8, visto que a degradação prévia sofrida no material afetou significativamente suas propriedades mecânicas.

Resultados da análise de Infravermelho levaram a concluir que os materiais presentes na produção de carcaças de monitores são de ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) e HIPS (Poliestireno de alto impacto), independente da marca do monitor. Porém, concluiu-se também que nem sempre o símbolo encontrado na carcaça polimérica corresponde realmente ao material utilizado na sua fabricação. Através dos resultados da análise morfológica na superfície de fratura dos corpos de prova, foi possível verificar a presença de pigmentações e/ou cargas em algumas amostras, que provavelmente tem influência nas variações das propriedades mecânicas. A identificação das cargas e aditivos utilizados especificamente por cada fabricante não foi realizada neste trabalho, porém é um fator importante, visto que pode influenciar nos resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

Com os resultados encontrados, foi possível verificar que a qualidade do material reciclado, com relação às propriedades mecânicas, não é influenciada pela marca, mas provavelmente pelas condições de uso e armazenamento que estes polímeros estiveram

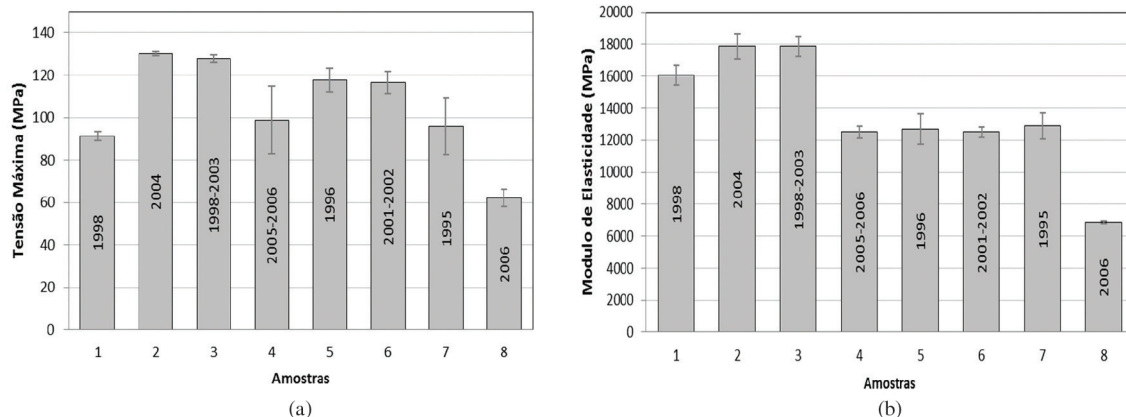


Figura 7. Tensão Máxima (a) e módulo de elasticidade (b) obtidos no ensaio de Flexão.

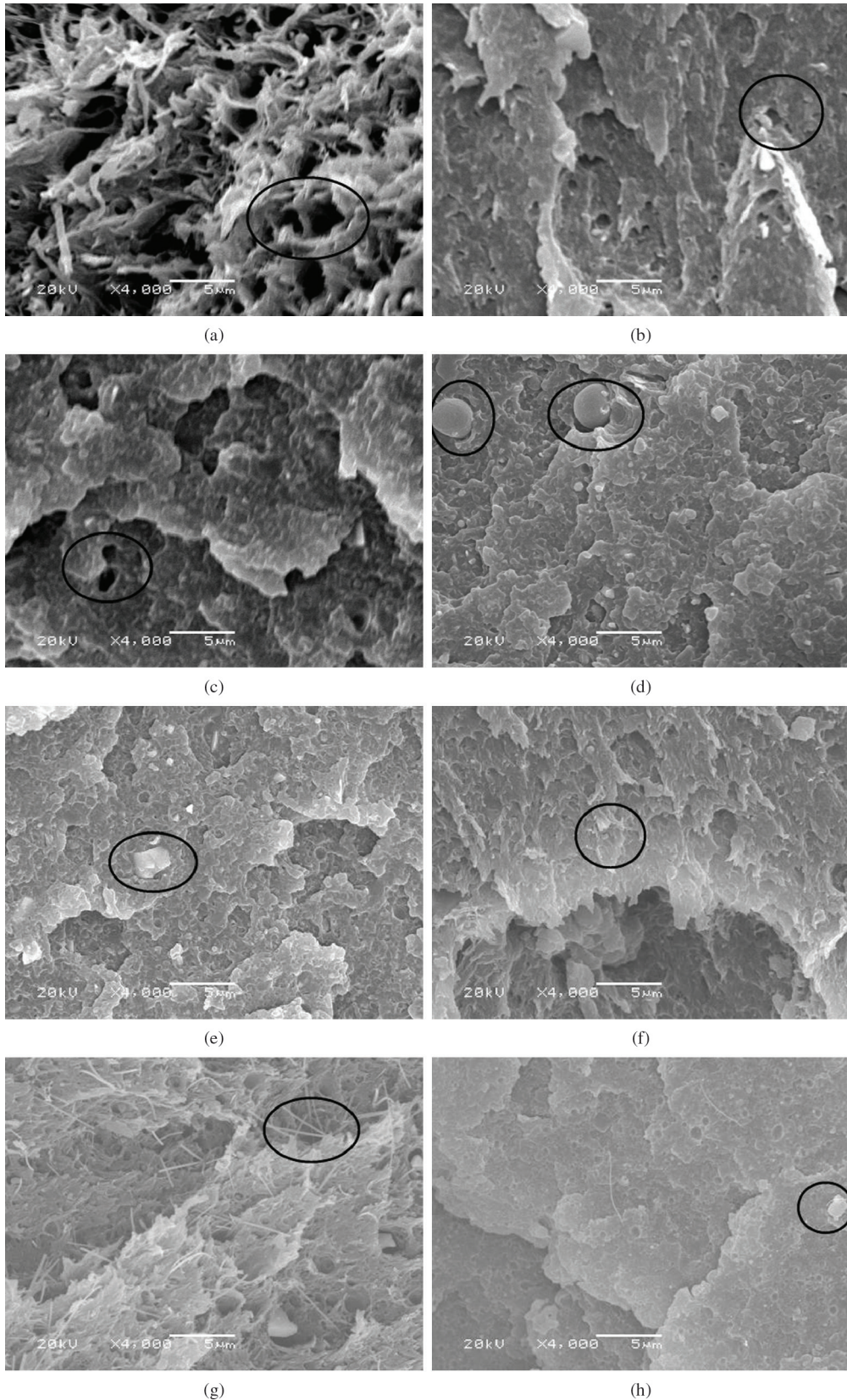


Figura 8. Imagens da superfície da fratura por MEV correspondente as amostras após ensaio de tração. (a) amostra 1; (b) amostra 2; (c) amostra 3; (d) amostra 4; (e) amostra 5; (f) amostra 6; (g) amostra 7; (h) amostra 8.

expostos durante a sua vida útil e pelas suas composições específicas quanto a cargas e aditivos.

Também podemos concluir que o polímero reciclado a partir das carcaças de monitores poderia ser novamente utilizado na confecção de carcaças para produtos eletrônicos, possivelmente utilizando um percentual de resina virgem na formulação, ou em vários outros setores, como por exemplo, a indústria de calçados (uso de ABS em partes do solado), indústria automobilística (painéis, acabamentos, carenagens), indústria de móveis (usado em acabamentos, puxadores), entre outras.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro do CNPq, CAPES e FINEP (Sibratec).

Referências Bibliográficas

- Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE. – “Eficiência Energética”. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>>. Acesso em: 08/01/2013.
- Macauley, M.; Palmer K. & Shih J. S. - J. Environ. Manag., **68**, p.13 (2003).
- Computer Industry Almanac. Disponível em: <www.c-i-a.com>. Acesso em: 08 jan. 2013.
- Robinson, B. R. - Sci. Total Environ., **408**, p.183 (2009). PMID:19846207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>
- Nnorom, I. C.; Osibanjo, O. & Ogwuegbu, M. O. C. - Resour. Conserv. Recycl., **55**, p.275 (2011). <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.007>
- United States Environmental Protection Agency – EPA. - “The life cycle of a mobile phone, Solid waste and emergency response”. Disponível em: <www.epa.gov>. Acesso em: 15 nov. 2012.
- United Nations Environment Programme – UNEP. Disponível em: <www.unep.org>. Acesso em: 26 abr. 2012.
- Vasconcelos, R. C. - “Análise Ambiental e Simulação para Substituição de Monitores CRT por LCD”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Brasil (2007).
- Global Materials Technology Group – UMICORE. Disponível em: <<http://www.umicore.com>>. Acesso em: 08 jan. 2013.
- Guia do lixo eletrônico - E-WAST GUIDE. Disponível em: <www.ewasteguide.info>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- Schaik, A. V. & Reuter, M.A. - Miner. Eng., **23**, p.192 (2010).
- Gramatyka, P.; Nowosielski, R. & Sakiewicz, P. - JAMME, **20**, p.535 (2007).
- Brasil. - “Lei Federal 12.305/2010”, Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) sancionada em 02 de agosto de 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 08 jan. 2013.
- Lacerda, L. - “Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais”. Disponível em www.sargas.com.br>. Acesso em: 08/01/2013.
- Brasil. - “Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos. Análise de Viabilidade Técnica e Econômica”, set 2012. - Disponível em: <www.desenvolvimento.gov.br>. Acesso em: 08 jan. 2013.
- Babu, B. R.; Parande, A. K. & Basha, C. A. - Waste Manag. Res., **25**, p.307 (2007).
- Eldik, R. V.; Schlummer, M.; Gruber, L.; Maurer, A. & Wolz G. - Chemosphere, **67**, p.1866 (2007). PMID:17207844. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.077>
- Frazzoli, C.; Orisakwe, O. E.; Dragone, R. & Mantovani, A. - Environ. Impact Asses. Rev., **30**, p.388 (2010). <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2009.12.004>
- Grassi, V. G.; Forte, M. M. C. & Pizzol, M. F. D. - Polímeros, **11**, p.158 (2001). <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282001000300016>
- Tarantili, P. A.; Mitsakaki, A. N. & Petoussi, M. A. - Polym. Degrad. Stabil., **95**, p.405 (2010). <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.029>
- Sanches, E. M. S.; Felisberti, M. I.; Costa, C. A. R. & Galembeck, F. - Polímeros, **13**, p.166 (2003).
- Santos, A. S. F.; Agnelli, J. A. M. & Manrich, S. - Polímeros, **9**, p.189 (1999). <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14281999000400031>
- Soriano, F.; Morales, G. & Leon, R. D. - Polym. Eng. Sci., **46**, p.1698 (2006). <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20652>
- Santana, R. C. & Manrich, S. - Prog. Rubber Plast. Recycl. Technol., **18**, p.99 (2002).
- Balart, R.; Sánchez, L.; López, J. & Jiménez, A. - Polym. Degrad. Stabil., **91**, p.527 (2006). <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.01.055>
- Silverstein, R. M. & Webster, F. X. - “Identificação espectrométrica de compostos orgânicos”, 6ª ed., LTC, Rio de Janeiro (2006).
- Tiganis, B. E.; Burn, L. S.; Davis, P. & Hill, A. J. - Polym. Degrad. Stabil., **76**, p.425 (2002). [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00045-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00045-9)
- Arostegui, A.; Sarrionandia, M.; Aurrekoetxea, J. & Urrutibeascoa, I. - Polym. Degrad. Stabil., **91**, p.2768 (2006). <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.03.019>
- Kim, J. K. & Kang, C. K. - Polym. Plast. Technol. Eng., **34**, p.875 (1995). <http://dx.doi.org/10.1080/03602559508012182>
- Ito, E. N.; Pessan, L. A. & Covas, J. A. - Polímeros, **14**, p.83 (2004). <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282004000200011>
- Brennan, L. B.; Isaac, D. H. & Arnold, J. C. - J. Appl. Polym. Sci., **86**, p.572 (2002). <http://dx.doi.org/10.1002/app.10833>
- Kasper, A. C.; Berselli, G. B. T.; Freitas, B. D.; Bernardes, A. M. & Veit, H. M. - Rev. Bras. Cienc. Ambient., **16**, p.26(2010).
- Scaffaro, R.; Botta, L. & Benedetto, G. D. - Eur. Polym. J., **48**, p.637 (2012). <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.12.018>
- Yeh, S. K.; Agarwal, S. & Gupta, R. K. - Compos. Sci. Technol., **69**, p.2225 (2009). <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.06.007>
- Lee, M. P.; Hiltner, A. & Baer, E. - Polymer, **33**, p.685 (1992). [http://dx.doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)90323-O](http://dx.doi.org/10.1016/0032-3861(92)90323-O)

Enviado: 30/08/12

Reenviado: 15/03/13

Aceito: 08/04/13