

PLASMA FRIO EM BENEFÍCIO DA SUSTENTABILIDADE DO MEIO-AMBIENTE: RECICLAGEM DE EMBALAGENS LONGA VIDA¹

Mônica de Mesquita Lacerda²
Muriel de Paul³
Leandro Lameirão Ferreira³
José Fernando Fragalli⁴

Resumo

Este trabalho tem como objetivo contribuir para a reciclagem de embalagens longa vida através da separação do polímero e do alumínio empregando-se tecnologia de plasma frio. Amostras de embalagens longa vida com 100 cm² foram submetidas a diferentes condições de bombardeamento iônico. Variações quanto à temperatura, tempo de exposição e tensão elétrica propiciaram avaliar as melhores condições experimentais para que se conseguisse remover a camada de polietileno da camada de alumínio. As amostras foram mantidas às temperaturas de fusão (T_f) e de cristalização (T_c) de PEBD e EMAA, que são, respectivamente, $T_f = 106\text{ }^\circ\text{C}$ e $T_c = 88\text{ }^\circ\text{C}$; $T_f = 102\text{ }^\circ\text{C}$ e $T_c = 83\text{ }^\circ\text{C}$. O trabalho foi realizado considerando-se temperaturas acima de T_f , tal que eles se encontrassem no estado de amolecimento, e à temperatura de cristalização do EMAA. Nestas condições a mobilidade atômica é alta facilitando a remoção de átomos e moléculas durante o bombardeamento da superfície. Os resultados mostram que existe um compromisso entre tensão elétrica, temperatura da amostra e tempo de bombardeamento para que se possa remover o polímero da camada de alumínio. As amostras foram investigadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDX).

Palavras-chave: Plasma frio; Reciclagem; Embalagens longa-vida.

COLD PLASMA FOR ENVIROMENT SUSTENABILITY: RECYCLING TETRA-PAK CARTONS

Abstract

Tetra Pak cartons are fully recyclable and recycling them represent an important activity to environmental protection. Many works have been developed in order to improve efficiency for recycling cartons and this work aims to contribute to cartons recycling by splitting apart polymers and aluminum foil using cold plasma technique, which consists in ionize, through electric discharge, a specific gas confined in a high vacuum chamber. Clean and paper free cartons samples were bombarded under different system condition. Temperature, bombardment time and electric voltage were varied in order to obtain the right set up to remove polymer from aluminum foil. Temperature values are related to thermal properties of polymers employed in cartons preparation. PEBD and EMAA fusion (T_f) and crystallization (T_c) temperatures are $T_f = 106\text{ }^\circ\text{C}$ e $T_c = 88\text{ }^\circ\text{C}$; $T_f = 102\text{ }^\circ\text{C}$ e $T_c = 83\text{ }^\circ\text{C}$, respectively. The work considered temperatures above T_f and at T_c . In both cases atomic mobility is high and promotes removing polymer molecules from aluminum surface. Results show a compromise between electric voltage, temperature and bombardment time in order to improve polymer-removing efficiency. Samples were also analyzed by Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersion x-ray spectroscopy (EDX).

Key words: Cold plasma; Recycling; Tetra-pak cartons.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Doutora, Departamento de Física – Universidade do Estado de Santa Catarina.

³ Estudantes de graduação, Departamento de Física – Universidade do Estado de Santa Catarina.

⁴ Doutor, Departamento de Física – Universidade do Estado de Santa Catarina.

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem de embalagens do tipo longa vida caracteriza-se como uma atividade de extrema importância para a preservação ambiental. O aumento no consumo dessas embalagens que possuem grande versatilidade e aplicabilidade para o acondicionamento de alimentos como leites, sucos, polpas e derivados tem despertado questionamentos relacionados ao destino final do produto.

Devido à constituição da embalagem podem-se manter os alimentos por vários meses sem a necessidade de refrigeração ou produtos químicos adequados para aumentar a durabilidade do alimento, e ainda há um ganho apreciável na energia necessária para a manutenção e transporte do produto favorecendo desse modo a relação custo-benefício de sua utilização. A Figura 1 ilustra os diversos componentes de construção da embalagem longa vida, que podem ser resumidos em papel, polímeros de baixa densidade e alumínio.

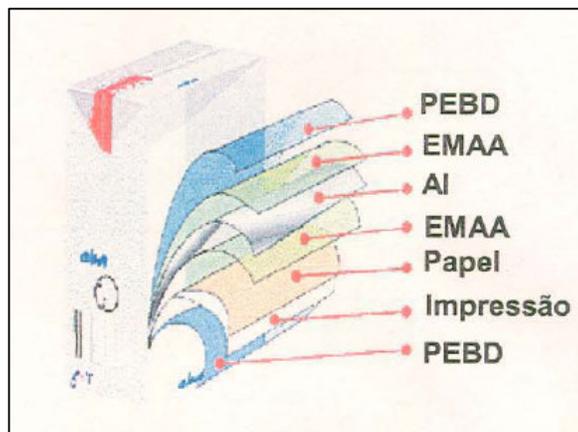


Figura 1. Composição da embalagem longa vida.⁽¹⁾

Várias pesquisas com o objetivo de encontrar a melhor forma de reciclagem têm sido desenvolvidas, porém, o principal entrave da reciclagem das embalagens é a separação dos componentes, mais especificamente o alumínio e o polietileno. O polietileno é utilizado como protetor para que o alumínio não entre em contato com o alimento, evitando dessa forma, qualquer tipo de contaminação, conforme Neves.⁽²⁾ O alumínio, metal que faz parte da constituição das embalagens é caracterizado por sua grande possibilidade de reciclagem sem perda das qualidades características. A reciclagem do papel já vem sendo realizada, e atualmente, no Brasil são várias as empresas que desenvolvem essa atividade.

Muitas técnicas já foram desenvolvidas visando a reutilização desses materiais, como utilização da mistura alumínio e polietileno na construção de telhas, chapas e outros materiais destinados principalmente à construção civil, como em Cerqueira;⁽³⁾ utilização da queima da liga para produção de energia; e atualmente está sendo utilizada uma nova tecnologia, o “Plasma Térmico”, que faz a separação entre o alumínio e o polietileno, resultando em parafina devido a quebra das moléculas do plástico e em lingotes de alumínio, advindos da fusão do material.

Portanto, este trabalho tem como objetivo contribuir para a reciclagem de embalagens longa vida, através da separação do polímero e do alumínio empregando-se tecnologia de plasma frio. Numa primeira abordagem o polímero é eliminado durante o processo de separação e o alumínio inteiramente aproveitado

na sua forma original. Este trabalho mostra que através da escolha adequada das condições de processamento é possível obter folhas de alumínio livres de hidrocarbonetos superficiais. No capítulo de perspectivas futuras discute-se uma aplicação nobre para o polímero separado e justifica-se a importância deste projeto frente a tecnologias já consagradas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Atualmente, existem alguns processos para a reciclagem de embalagem, como técnicas mecânicas que consistem em reduzi-la a pequenos pedaços sem que haja a separação dos seus constituintes e transformá-la em um material sólido em condições de alta temperatura e alta pressão. Após a separação do papel, as embalagens podem ser usadas como recurso energético para a geração de vapor e energia através da incineração do polietileno e alumínio. O alumínio pode ser aproveitado por processos de pirólise e a mistura polímero + alumínio vem sendo empregada na indústria de injeção de plásticos, segundo Von Zuben e Neves.⁽⁴⁾ E, com alta eficiência energética, existem, ainda, técnicas em que as embalagens, são submetidas a temperaturas elevadas, em atmosfera inerte, por meio da tecnologia de plasma quente, e que tem a vantagem de separar o polímero do alumínio, transformando o primeiro em parafina e obtendo o último em sua forma pura. Esta técnica foi desenvolvida pelo grupo de plasma do Instituto de Pesquisas Tecnológicas da USP (IPT) e vem sendo utilizada pelas empresas Klabin, Tetra Pak, Alcoa e TSL.

2.1 Plasma Frio

Tecnologia de plasma frio, que consiste em ionizar um gás a partir de uma descarga elétrica, é amplamente utilizada na indústria de materiais mecânicos com severas restrições dimensionais. Através da técnica de deposição de filmes assistida por plasma se desenvolvem materiais que tenham como característica proteger a superfície metálica de ferramentas, de instrumentos cirúrgicos e de precisão contra desgastes mecânicos, proteger componentes ópticos de satélites e, de modo geral, modificar uma superfície tal que suas propriedades alcancem os requisitos necessários de empregabilidade.

Utilizar plasma frio para reciclar embalagens longa vida tem como benefício o uso de uma tecnologia limpa, barata e largamente conhecida.

Este projeto utiliza um reator de plasma frio, mostrado na Figura 2, que consiste de uma câmara de aço inoxidável para alto vácuo que contém os equipamentos periféricos de controle e componentes para geração de plasma.

2.2 Componentes do Reator

A câmara de aço inoxidável tem 30 litros de volume e em seu interior encontram-se duas grades perfuradas, que fazem papel de eletrodos, com diâmetro de 150 mm com 1 mm de espessura apoiadas em quatro postes de aço inoxidável e isoladas por anéis de teflon. Contém, ainda, quatro postes metálicos que servem para posicionar o porta-amostra na altura adequada para o bombardeamento e um porta-substratos com aquecedor. O sistema possui válvulas agulhas de precisão para regular a entrada de gases no sistema, um medidor de vácuo, uma fonte de tensão de 3.000 V e 1 A e um sistema de bombeamento para alto vácuo.

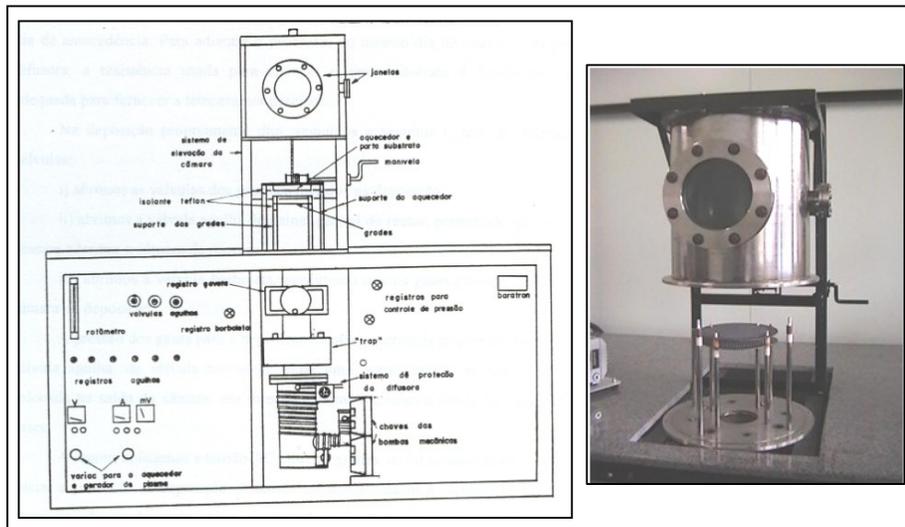


Figura 2. Esquema do reator de plasma frio utilizado no trabalho. Ao lado, foto do equipamento.

O gás utilizado no processo é o argônio livre de oxigênio e umidade, com certificado de pureza emitido pela empresa Air Products. A tensão foi variada de -305 V a -485 V. Outro parâmetro que pode ser controlado é a temperatura em que a amostra é submetida, nesse trabalho temos a variação entre dois pontos específicos, 83°C e 120°C. A pressão, considerada aspecto de extrema importância no tratamento realizado, foi mantida aproximadamente constante em todos os bombardeamentos, sendo a pressão de base utilizada igual a 10^{-5} mbar. Pressões de base pequenas garantem um ambiente livre de contaminantes, como oxigênio, para a realização do experimento.

2.3 Detalhamento do sistema de plasma

Inicialmente, o sistema de bombeamento é responsável por estabelecer o vácuo base de 1.0×10^{-5} mbar pelo período de duas horas. Neste mesmo intervalo, o aquecedor do porta-amostra entra em regime estacionário para que se garanta temperatura constante durante todo o processo de bombardeamento.

A entrada de argônio de alta pureza é feita através de válvula agulha, onde a pressão limite foi estabelecida em 7.0×10^{-2} mba, mantida constante para todas as condições avaliadas neste trabalho. O plasma é criado estabelecendo-se uma diferença de potencial entre os eletrodos com uma descarga AC e frequência de 60 Hz, conforme descrito em Fragalli et al.⁽⁵⁾ Maiores detalhes sobre as tensões utilizadas neste trabalho podem ser encontrados na Tabela 1.

A Figura 3 ilustra o processo de bombardeamento, onde íons de argônio do plasma são acelerados em direção ao eletrodo negativo, neste caso, o próprio porta-amostra, provocando a remoção do átomo de carbono e a conseqüente erosão da folha de alumínio.

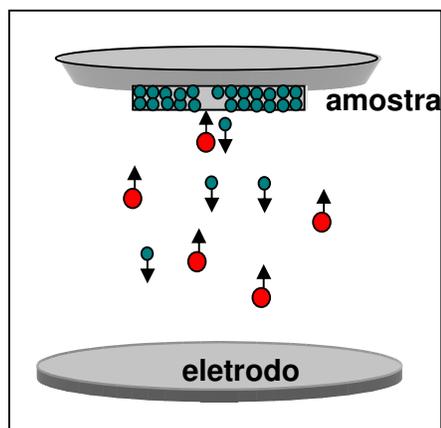


Figura 3: Representação da técnica utilizada. Em vermelho, os íons de argônio, em azul os átomos de carbono que são retirados da superfície.

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

Foram utilizadas embalagens tipo Tetra-Pak de leite e suco para a realização deste projeto. Inicialmente as embalagens foram abertas e lavadas. Após o processo de limpeza foi deixado em repouso submerso em água para que a camada mais externa, de papel fosse hidratada, para assim conseguirmos fazer a retirada da mesma. Ao final do processo, tinham-se apenas as camadas de alumínio e de polietileno, exatamente os materiais foco do estudo. As folhas de alumínio + polietileno foram cortadas e fixadas no eletrodo negativo do reator. A área exposta para bombardeamento é de 100 cm².

As amostras foram submetidas a diferentes condições de bombardeamento. Variações quanto à temperatura, tempo de exposição, pressão e tensão foram realizadas, conforme Tabela 1, buscando encontrar o melhor resultado, visando nosso objetivo, retirar a camada de polietileno que se encontra sobre a camada de alumínio.

Os valores de temperatura utilizados estão diretamente relacionados às propriedades térmicas dos polímeros empregados na formação das embalagens. As temperaturas de fusão (T_f) e de cristalização (T_c) de PEBD e EMAA são, respectivamente, $T_f = 106\text{ °C}$ e $T_c = 88\text{ °C}$; $T_f = 102\text{ °C}$ e $T_c = 83\text{ °C}$. O trabalho foi realizado considerando-se temperaturas acima da temperatura de fusão dos polímeros, tal que eles se encontrassem no estado de amolecimento, e à temperatura de cristalização do EMAA. Nesta condição a mobilidade atômica é alta, o que propicia a remoção de átomos e moléculas durante o bombardeamento da superfície por íons de maior massa atômica.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nos bombardeamento com íons de argônio.

Nome da amostra	Imagem da Amostra	Tensão elétrica (V)	Temperatura (°C)	Tempo (horas)
I	06-A	-484	118	1
II	07-A	-310	115	2
III	08-A	-305	83	2
IV	09-A	-335	83	2

As técnicas utilizadas para analisar as amostras bombardeadas por íons de argônio foram Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que possibilita uma visão mais detalhada da topografia das amostras, e Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDX), que tem como finalidade detectar e quantificar os elementos químicos presentes na superfície das amostras.

Na Figura 4 podemos observar a estrutura superficial de uma amostra “virgem”, ou seja, que não tenha sido submetida ao bombardeamento iônico, e que apresenta polietileno de baixa densidade sobre a camada de alumínio (componentes da embalagem Tetra-Pak). Ao lado é mostrado o EDX da amostra, onde se observa o predomínio de carbono na superfície, resultado da camada de polietileno presente na amostra. Sendo o aparelho capaz de realizar leituras apenas superficialmente, a quantidade de alumínio presente na amostra analisada é praticamente desprezível. Além disso, para a análise por MEV é necessário depositar uma pequena camada de ouro, com espessura da ordem de micrômetros, sobre a amostra a fim de tornar a superfície condutora. Isso acontece devido ao fato de o aparelho utilizar a técnica de emissão de feixe de elétrons para fazer as imagens e, sendo o polietileno um material isolante necessita-se utilizar essa deposição para facilitar o deslocamento dos elétrons pela superfície.

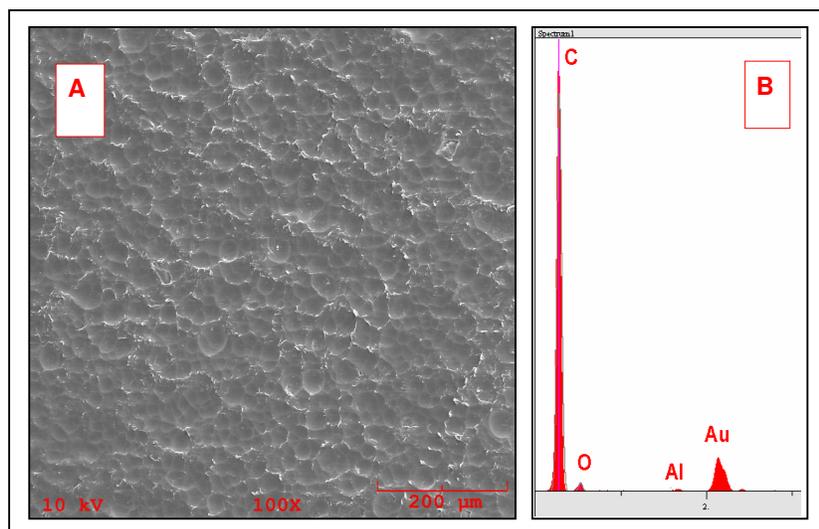


Figura 4: Em “A”, imagem de uma amostra virgem. O EDX da amostra é mostrado em “B”.

As amostras foram submetidas ao bombardeamento de íons de argônio, utilizando a técnica e as condições acima descritas. Os parâmetros de bombardeamento foram determinados com base nas características físicas e químicas dos materiais envolvidos. Os resultados obtidos com essas variações são mostrados a seguir.

Inicialmente, a tensão de ionização do gás de argônio foi mantida em -484 V e a amostra, submetida à temperatura de 118°C, sofreu bombardeamento pelo período de 1 hora. A Figura 5 mostra imagens externa e interna do reator durante a realização do experimento. A cor violeta-azulada do gás ionizado é típica de plasma de argônio.

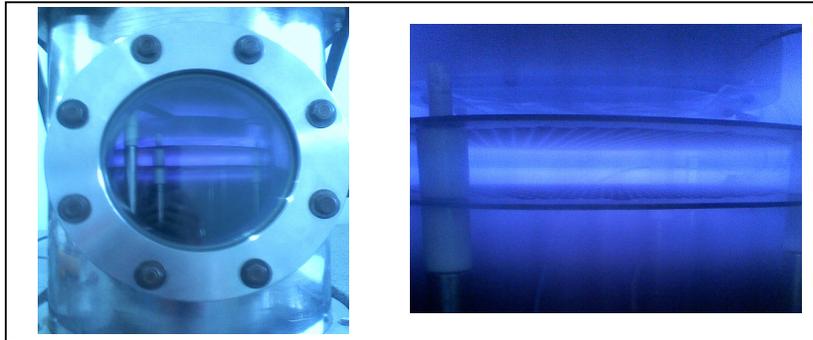


Figura 5: Na imagem podemos observar a câmara de plasma (reator), onde é feito o bombardeamento de argônio. Do lado direito temos uma visão do plasma no interior da câmara.

Os resultados obtidos com o bombardeamento, seguindo os parâmetros acima determinados, podem ser visualizados na Figura 6. Em algumas regiões percebe-se a diferença inclusive na tonalidade, caracterizando assim diferença de material exposto na superfície.

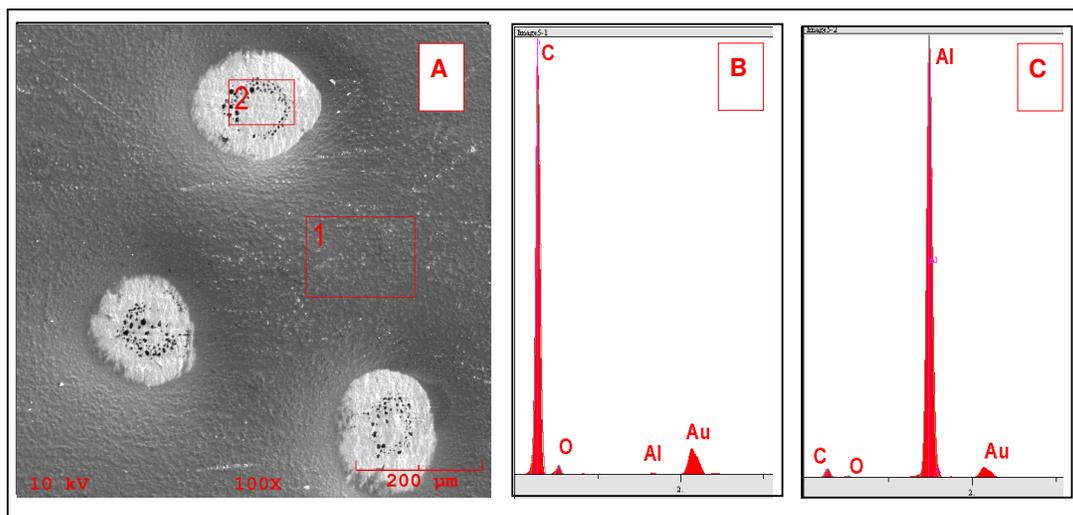


Figura 6: Na imagem “A”, o resultado de microscopia eletrônica de varredura da amostra I. Em “B” podemos visualizar o EDX da área 1, destacada. Ao lado, em “C”, tem-se o espectro da região 2.

Para avaliação do experimento foi realizada a análise utilizando EDX, que apontou modificações significativas na composição. Na área 1, destacada na imagem, temos uma maior quantidade de carbono (Figura 6-B), exatamente como o EDX mostrado para a amostra virgem. Porém, na área 2 observamos uma modificação na quantidade de carbono apresentada, sendo essa muito pequena em comparação com a de alumínio (Figura 6-C). Como o equipamento utilizado para fazer essas leituras – EDX – é baseado na análise das características da superfície do material, pois tem resolução espacial de algumas monocamadas, podemos afirmar que na região 2, o alumínio está a mostra na superfície, ou seja, o polímero que havia sobre ele foi retirado.

Analisando os resultados obtidos nesse processo com a amostra da Figura 6-A, é possível observar uma grande mudança no comportamento superficial, comparando com a amostra virgem (Figura 2-A). No interior da área mais clara encontram-se alguns pontos com tonalidade mais escura. Esses locais são pontos

específicos em que foi possível observar que, além de ser retirado o polímero, houve também a remoção do alumínio. Este efeito é explicado pelo bombardeamento de íons de alta energia, capazes de quebrar a ligação metálica da rede cristalina do alumínio.

Mudando os parâmetros tempo e tensão, realizamos outro bombardeamento. A amostra foi submetida à temperatura de 115°C, tensão de -310 V e tempo de bombardeamento de 2 horas, o dobro do tempo de bombardeamento anterior. O resultado obtido está mostrado na Figura 7.

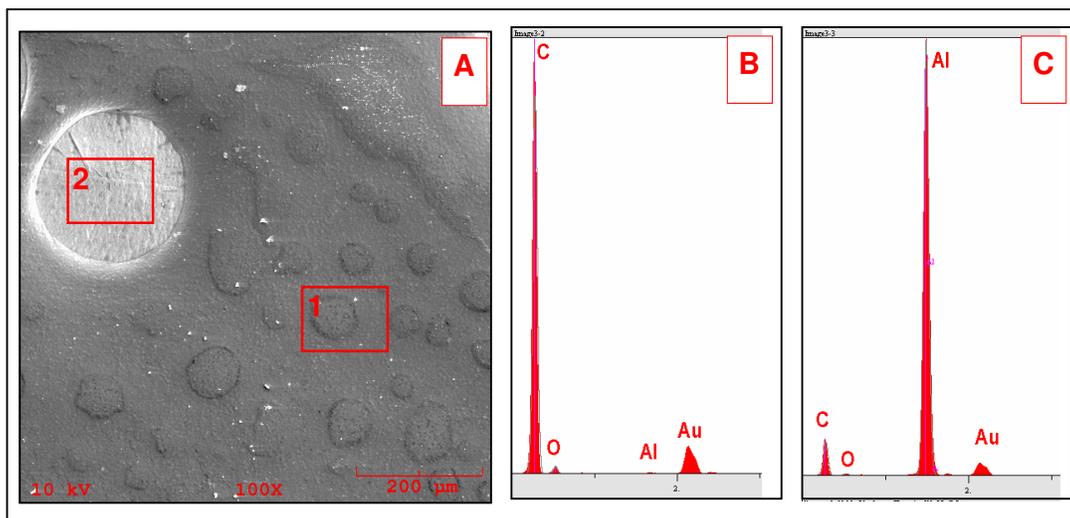


Figura 7: Em “A” temos uma imagem de microscopia eletrônica de varredura da amostra II. Em “B” podemos observar o EDX da área 1, mostrada na imagem. Em “C” é mostrado o EDX da área 2.

A diferença de tonalidade é bastante nítida, sendo assim considerado um fenômeno de grande interesse no estudo desenvolvido. As áreas destacadas na amostra foram analisadas mais detalhadamente e obtiveram-se os espectros de energia mostrados nas imagens acima. Assim, foi possível verificar, novamente, um comportamento desigual nas regiões destacadas, sendo a composição na região 1, formada quase exclusivamente de carbono, enquanto a região 2 apresenta uma quantidade muito significativa de alumínio. Diferentemente da amostra I, esta amostra apresenta pequenas manchas circulares (veja região 1) que indicam a separação física, i.e., o descolamento entre o polímero e o alumínio, como consequência do contato térmico com o porta-amostra durante o período de 2 horas, e da transferência de energia dos íons de argônio para a rede polimérica.

Com os parâmetros utilizados no bombardeamento da amostra da Figura 7A, é possível observar que nesse caso não ocorreu os pontos escuros dentro da área 2, dessa forma, o alumínio foi preservado e apenas o polietileno foi retirado por meio do bombardeamento.

Outra característica física relevante do polímero foi utilizada, sua temperatura de cristalização, sendo essa igual a 83°C para o EMAA e 88°C para o PEBD. Além disso, utilizou-se tensão de -305 V e tempo de exposição de 2 horas. A imagem da amostra após bombardeamento pode ser visualizada na imagem 8.

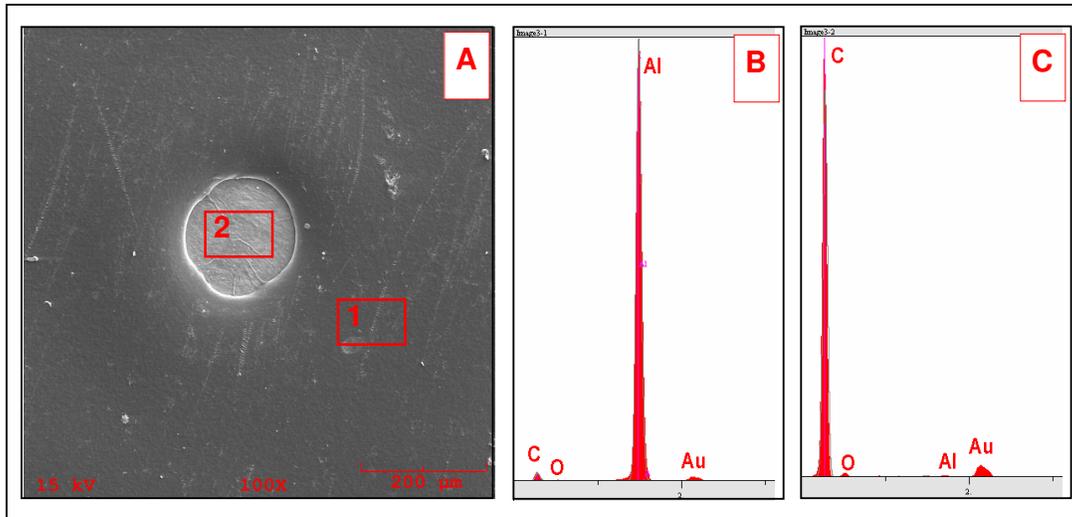


Figura 8: Resultado de microscopia eletrônica de varredura da amostra III, “A”. A imagem “B” mostra o EDX relacionado à área destacada 1. Em “C” tem-se o EDX da área 2.

A diferença de tonalidade pode ser também visualizada na figura 08-A, porém nota-se uma mudança no tamanho da área com tonalidade mais clara.

Utilizando ainda a temperatura de 83°C, tensão de -335V, pressão de 7×10^{-2} mbar e tempo de bombardeamento de 2 horas, obtivemos o resultado mostrado na Figura 9.

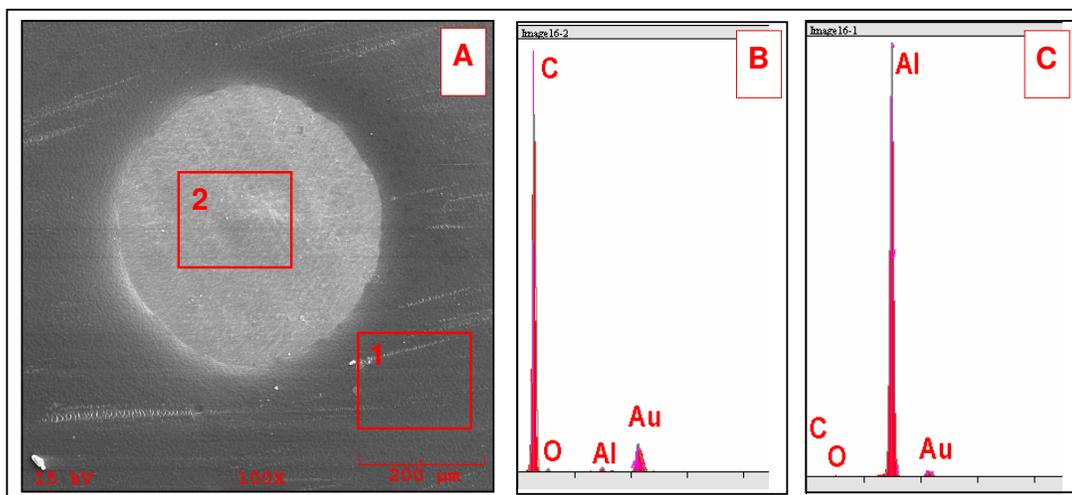


Figura 9: Em “A” resultado de microscopia eletrônica de varredura da amostra IV. “B” mostra o EDX da região 1, destacada na primeira imagem. Em “C” temos o EDX da região 2.

Através da imagem de MEV da amostra IV é possível constatar que o tamanho da região erodida é bem superior ao das áreas equivalentes nas outras amostras. Note que as escalas se equivalem. Outro fato bastante curioso é que no EDX (Figura 9-C), vemos que a quantidade de carbono na região 2 é zero. Assim, concluímos que nessa região encontra-se somente alumínio, e todo o polietileno que estava sobre a camada de alumínio foi retirado sem danificar a camada observada.

Comparando-se as imagens das amostras II, III e IV, nota-se que à temperatura de cristalização não ocorre o descolamento do polímero da superfície do alumínio.

Uma questão importante dos resultados obtidos diz respeito à densidade de erosão sobre a superfície. Como se pode notar ao longo deste texto, a remoção do polímero é localizada. A erosão é caracterizada por manchas claras nas imagens obtidas por microscopia eletrônica, enquanto as áreas escuras mostram a localização do polímero. Através de imagens com ampliações menores podemos comparar a densidade de erosão de amostras obtidas com tensões aproximadamente iguais (diferença de 15%), porém submetidas a temperaturas diferentes. Neste caso comparamos as amostras II e IV, conforme Figura 10 que mostra imagens com ampliação de 20x de suas superfícies.

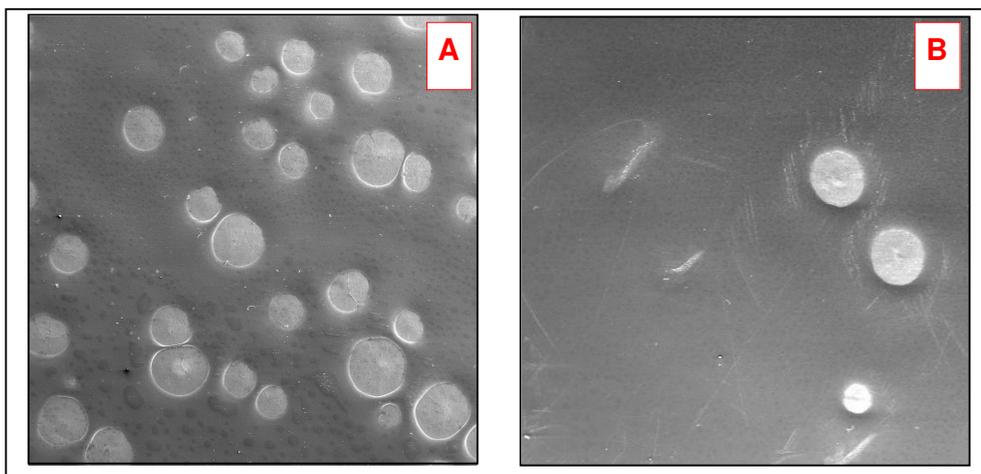


Figura 10: Em “A” amostra II. E em “B” amostra IV. As duas imagens possuem aumento de 20x.

Estas imagens representam as duas áreas de 10cm² bombardeadas pelos íons de argônio, e indicam que existe um compromisso entre a profundidade de remoção do polímero e a densidade areal de erosão. Na verdade, isto é consequência das condições operacionais empregadas, ou seja, temperaturas mais altas ajudam no descolamento do polímero reduzindo a energia de adesão entre os dois materiais, porém à temperatura de cristalização do EMAA, a mobilidade atômica é maior e propicia a remoção dos átomos de carbono.

É interessante notar que as regiões erodidas têm coloração diferente. Quanto mais clara mais condutora é a região analisada, o que confirma os espectros de EDX das respectivas amostras, que mostra que as condições de bombardeamento da amostra IV resultaram na total remoção do material polimérico.

4 CONCLUSÃO

A técnica proposta baseia-se na separação de alumínio e polietileno proveniente de embalagens longa vida. Se essa for utilizada em grande escala se constitui como um método alternativo de reciclagem, aumentando a quantidade de materiais submetidos ao processo de reaproveitamento.

Nesse trabalho foi possível observar que utilizando o tratamento “Plasma Frio” é possível retirar a camada de polímero encontrada sobre o alumínio. A não

uniformidade observada na remoção está relacionada com as condições de bombardeamento.

Várias questões sociais e ambientais podem ser debatidas sobre o ponto de vista da reciclagem. Com o aumento da possibilidade de reaproveitamento de materiais, os catadores desse tipo de material poderão ter uma nova perspectiva de renda, ou seja, possibilitando o aumento de renda para as pessoas que dependem dessa atividade. A geração de empregos diretos e indiretos é outro ponto a favor da técnica. A contratação de pessoal para trabalhar ativamente no processo, além dos empregos indiretos, como é o caso dos catadores e das pessoas encarregadas da seleção dos materiais se caracteriza como uma atividade sustentável com ótimas perspectivas de execução e resultados satisfatórios.

Questões como economia de matéria-prima retirada da natureza, nesse caso a bauxita, material utilizado para a fabricação de ligas de alumínio, conforme ABAL, 2007⁷, além da energia necessária para a produção desse metal, são aspectos muito relevantes na análise de todo o processo. Com um maior índice de materiais reciclados, uma quantidade menor de minérios precisa ser retirada da natureza, tem-se assim um grande avanço na questão da preservação ambiental e utilização consciente das riquezas naturais.

Outro fator de extrema importância é o investimento inicial para utilização da técnica proposta. Os equipamentos necessários para a aplicação do método não são caracterizados como um investimento grandioso em se tratando da questão financeira, por outro lado, visando à questão biológica e sustentável, sem dúvidas o investimento é de grande valia.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade do Estado de Santa Catarina pelo auxílio financeiro na manutenção do laboratório de Filmes Finos.

REFERÊNCIAS

- 1 LOPES, C. M. A. “Blendas de Poli(Tereftalo De Etileno) e Polietileno de Baixa Densidade Contendo Alumínio: Um Material Proveniente da Reciclagem de Embalagens”. Tese de Doutorado, UNICAMP, 2003.
- 2 NEVES, F. L.; “Reciclagem de embalagens cartonadas Tetra Pak”. Revista ‘O Papel’ no. 2, pág. 38-45, 1999.
- 3 CERQUEIRA, M. H., “Placas e telhas produzidas a partir da reciclagem do polietileno /alumínio presentes nas embalagens Tetra Pak”; Artigos Técnicos, Tetra Pak, 2000.
- 4 VON ZUBEN, F.; NEVES F. L. “Reciclagem do alumínio e polietileno presente nas embalagens cartonadas TETRA PAK. Revista ‘O Papel’ no.2, pág. 15-20, 1999.
- 5 FRAGALLI, J. F., MISOGUTI, L., NAKAGAITO, A. N., GRIVICKAS, V., BAGNATO, V. S. and BRANZ, H. M. Hydrogenated Amorphous Silicon Films BY 60 Hz Glow Discharge Deposition, *Journal of Applied Physics*, 1993, 74, 668-671.
- 6 JACOB, W., HOPF, C., SCHLÜTER, M.. “Chemical sputtering of carbon materials due to combined bombardment by ions and atomic hydrogen”. *Phys. Scr.* T124 (2006) 32–36.
- 7 ABAL. Catálogo da Associação Brasileira de Alumínio (Abal) - Fundamentos do Alumínio. Maio/2007.