

Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos

José Cláudio Caraschi*¹ e Alcides Lopes Leão²

¹Departamento de Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

²Departamento de Recursos Naturais, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Fazenda Experimental Lageado, C. Postal 237, 18603-970, Botucatu, São Paulo, Brasil *Autor para correspondência. Rua Milton Méris Jaqueta, 24, Vila Carmelo, 18609-710, Botucatu, São Paulo, Brasil. e-mail: caraschi@fca.unesp.br

RESUMO. O objetivo deste trabalho foi contribuir para a reciclagem dos plásticos provenientes de resíduos sólidos urbanos. Os materiais foram separados por tipos e, em seguida, moídos, lavados, secos e posteriormente moldados por extrusão a 180°C, seguidos da moldagem por injeção nas temperaturas de 180, 190 e 200°C. Os plásticos PP, PS, PEAD e uma mistura de plásticos não-identificados (PEAD, PEBD, PP e PS) foram avaliados quanto à densidade, pureza, propriedades mecânicas e termomecânica (MFI). Os resultados mostraram que os plásticos reciclados apresentam boa performance quanto às propriedades mecânicas, indicando que podem ser utilizados na fabricação de peças que não exigem especificações técnicas. O material composto pela mistura de plásticos apresentou propriedades semelhantes ao PEAD, entretanto com a vantagem de apresentar maior resistência à flexão. Quanto à temperatura de injeção, concluímos que ela não influenciou significativamente na faixa de 180 a 190°C nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: reciclagem, resíduos plásticos, poliolefinas recicladas e propriedades mecânicas.

ABSTRACT. Evaluation of the mechanical properties from urban solid waste recycled plastics. The aim of this research was to contribute to recycling of plastics obtained from urban solid waste. Different kinds of plastic were separated, ground, washed, dried and later molded by extrusion at 180°C, followed by the injection molding process at 180, 190 and 200°C. The plastics evaluated were PP, PS, PEAD and a mixture of non-identified plastics (PEBD, PEAD, PP and PS) regarding their density, purity, mechanical and thermomechanical properties (MFI). Results showed good performance in mechanical properties, indicating potential application to the manufacture of low requirement parts. The mixture of plastics resulted in a material with properties similar to PEAD, with higher flexural resistance in advantage. Injection temperature (at 180 to 190°C) had no significant influence on mechanical properties.

Key words: recycling, plastic waste, recycled polyolefins, mechanical properties.

Introdução

Atualmente está sendo dada muita ênfase à preservação e conservação do meio ambiente como forma de garantir um desenvolvimento sustentável. Entre os diversos danos causados ao meio ambiente, um está relacionado com os resíduos plásticos. Esses resíduos, em geral, levam muito tempo para sofrerem degradação espontânea e, quando queimados, produzem gases tóxicos (Mano *et al.*, 1991). Portanto, existe uma tendência geral ao aproveitamento desses resíduos considerando-se o imenso valor potencial dos materiais processados e as implicações dos desperdícios e poluição decorrentes de não utilização desses resíduos (Mano e Bonelli, 1994; Forlin e Faria, 2002).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) têm aumentado continuamente (Leão e Tan, 1998),

sendo que o resíduo plástico industrial e urbano representa cerca de 8% em massa do RSU, correspondendo de 15% a 20% em volume deste mesmo universo (Agnelli, 1996). Os tipos de plásticos mais encontrados nos resíduos são o poli(cloreto de vinila) (PVC), o poli(tereftalato de etileno) (PET), o polietileno de alta densidade (PEAD), o polietileno de baixa densidade (PEAD), o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS). Como exemplo de quantidade, temos o PEAD que vem tornando um dos plásticos mais consumidos no mercado nacional, devido à sua crescente utilização, principalmente no setor de embalagens de rápido descarte. Sua presença nos RSU é estimada em torno de 30% do total dos resíduos plásticos rígidos descartados, perdendo o primeiro lugar apenas para o PET (60%) (Cruz e Zanin, 1999).

A baixíssima degradabilidade aliada ao alto volume (baixa densidade) destes resíduos, fazem com que ocupem vastos espaços no ambiente por um longo tempo. Com o crescente uso desses materiais, principalmente na área de embalagens, cujo descarte é muito rápido quando comparado a outros produtos, tem-se um agravamento dos problemas ambientais, prejudicando, inclusive, o tempo de vida útil dos locais de destino do lixo, como por exemplo, dos aterros sanitários.

Assim, a reciclagem é a forma de tratamento de resíduo plástico que mais tem concentrado esforços no âmbito empresarial e governamental, ou seja, é uma das maneiras de tornar a longa vida dos plásticos uma característica útil para as empresas e saudável para a sociedade e o meio ambiente. Tais esforços estimulam o surgimento de uma variedade de legislações, tecnologias e centros de pesquisa e desenvolvimento voltados para o setor. Portanto, a reciclagem apresenta-se como o método de reaproveitamento do resíduo plástico que contribui para a redução desse resíduo e recuperação do material dos plásticos descartados.

A reciclagem de plástico pode ser dividida em três categorias: a reciclagem mecânica, química e energética (Agnelli, 1996). O processamento mais tradicional de reciclagem é a mecânica, que converte o resíduo plástico novamente em grânulos. O processo consiste na combinação de um ou mais processos operacionais (moagem, aglomeração, extrusão, granulação) para conversão dos resíduos plásticos (descartes plásticos pós-industriais e pós-consumo) em grânulos que podem ser reutilizados na produção de outros produtos.

Esse tipo de reciclagem é denominada de secundária, isto é, a conversão de resíduos plásticos por um ou mais processos operacionais dando produtos com menor atuação e características, do que com plástico virgem (Agnelli, 1996).

O objetivo deste trabalho foi contribuir para a reciclagem de plásticos obtidos a partir dos descartes domiciliares (embalagens, frascos, tampas, etc). Esses plásticos, PP, PEAD, PS e os plásticos não-identificados, denominados por PLÁSTICOS (mistura de PS e poliolefinas (PEAD, PEBD e PP), depois de reciclados foram avaliados quanto às suas propriedades e qualidades resíduos para a fabricação de peças com baixas especificações.

Material e métodos

Os materiais utilizados neste trabalho foram os plásticos reciclados polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (PEAD), poliestireno (PS), poli(tereftalato de etileno) (PET) e os plásticos

não-identificados, denominadas por PLÁSTICOS, compostos principalmente por PEAD além de PP, PS e PEBD. Os plásticos virgens PP, PEAD e PEBD foram usados como referência. Os plásticos reciclados foram obtidos a partir da separação (triagem) dos diferentes tipos de plásticos recolhidos dos RSU do município de Botucatu, Estado de São Paulo. A separação dos diferentes tipos de plástico foi feita de maneira a minimizar sua contaminação por outros plásticos e no intuito de obter um reciclado constituído de um único tipo de plástico.

Os plásticos separados por tipo foram moídos, lavados com água para remover os contaminantes (sujeiras e restos de conteúdos) e posteriormente secos em estufa a 50°C. Em seguida, foram extrudados em uma extrusora dupla-rosca, modelo ZSK-25 da Werner e Pfleiderer, com uma razão L/D de 25, com perfil de temperatura ao longo do barril de 180°C. Posteriormente, foram injetados numa injetora automática Sandretto 65micro, para moldagem dos corpos-de-prova de tração e flexão, na qual a variável do processo foi à temperatura de injeção (180, 190 e 200°C). Os materiais injetados foram caracterizados em relação às suas propriedades mecânicas e termomecânicas segundo as normas ASTM. Também foram injetados os polímeros virgens PP, PEAD e PEBD como referência.

Para os ensaios de caracterização, todos os materiais obtidos foram acondicionados em temperatura de 25°C e umidade relativa de 50% por um período de 48h. Foram realizados ensaios mecânicos de tração, flexão e dureza (Shore D) segundo as normas ASTM. Os resultados obtidos dos ensaios apresentados correspondem à média de cinco medidas obtidas para cada tipo de amostra. Os ensaios de resistência à tração e flexão foram realizados em Máquina Universal de ensaios EMIC DL 10.000 segundo as normas ASTM D 638 (1999) e D 790M (1993), respectivamente. Já os ensaios de dureza do tipo Shore D foram realizados em um durômetro Zwick, de acordo com a norma ASTM D 2240 (1999). O método prescrito nessa norma permite medir a penetração após um tempo especificado por um durômetro. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

A densidade foi determinada segundo a norma ASTM D 1622 (1992), à temperatura de 25°C, e as medidas do índice de fluidez (MFI) foram conduzidas num plastômetro, utilizando amostras extrudadas conforme a norma ASTM D 1238 (1991). As condições específicas para cada tipo de polímero são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições específicas dos ensaios de índice de fluidez

Materiais	Carga Nominal	Temperatura (°C)
PEAD	2,160	190
PP	2,160	230
PS	5,000	200
PET	2,160	285

Foram realizados ensaios químicos nos plásticos (PP, PEAD, PS e PLÁSTICOS) visando confirmar a ausência de PVC no reciclado. Os plásticos foram submetidos a dois tipos de ensaios químicos: o teste de queima e o da solubilidade em acetato de etila (Padula *et al.*, 1989). O teste de queima permite identificar a presença de cloro com base nas características da chama. Uma coloração alaranjada e verde nas bordas indica teste positivo, ou seja, de cloro. No teste de solubilidade (realizado de acordo com os procedimentos normais), fragmentos do polímero reciclado foram colocados em um béquer, adicionando-se solvente acetato de etila e deixando o béquer coberto em repouso por 24h à temperatura ambiente (Collins *et al.*, 1973).

Resultados e discussão

Os resultados das propriedades mecânicas, em função da temperatura de injeção, dos plásticos reciclados (PP, PEAD, PS, PET e PLÁSTICOS) são apresentados na Tabela 2 e os dados de densidade (d), índice de fluidez (MFI) e dureza são apresentados na Tabela 3.

Na Tabela 2 é mostrado o efeito da temperatura de injeção nas propriedades dos plásticos PP, PEAD e PLÁSTICOS. Nota-se que, em geral, nos três materiais há um decréscimo nos valores da resistência à tração nos plásticos injetados a 200°C, provavelmente devido à degradação térmica dos plásticos que provoca um empobrecimento de suas propriedades. Quanto às propriedades realizadas nos ensaios em flexão, verificou-se, também, um pequeno decaimento na resistência e no módulo em flexão com o aumento da temperatura nos PEAD e PLÁSTICOS (Tabela 2).

Comparando os resultados do PP reciclado nas três temperaturas com os dois PP virgens, notamos que o reciclado apresenta boas propriedades mecânicas, propriedades essas semelhantes ao observado nos dois PP virgens usados como referência, com exceção do MFI (Tabela 3), que foi mais baixo. Isso ocorre porque parte do PP reciclado é proveniente de embalagens que são, geralmente, processadas por extrusão a sopro, cujo MFI utilizado para este tipo de aplicação gira em torno de 0,1 a 0,3 g/10 min.

Tabela 2. Valores médios de resistência à tração ($\sigma_{\text{Tração}}$) na ruptura, módulo de elasticidade em tração ($E_{\text{Tração}}$), resistência à flexão ($\sigma_{\text{Flexão}}$) e módulo de elasticidade em flexão ($E_{\text{Flexão}}$) dos plásticos reciclados em função da temperatura de injeção (T_{inj})

Plásticos	T _{inj} (°C)	Tração		Flexão	
		σ _{Tração} (MPa)	E _{Tração} (GPa)	σ _{Flexão} (MPa)	E _{Flexão} (GPa)
Reciclados					
PP (MFI=3,22)	180	28,97 (0,19)	1,663 (0,062)	34,99 (0,52)	0,982 (0,022)
	190	28,96 (0,67)	1,673 (0,064)	41,74 (0,49)	1,392 (0,022)
	200	27,79 (0,50)	1,611 (0,048)	33,97 90,49)	0,933 (0,014)
PEAD	180	20,62 (0,29)	1,118 (0,078)	20,13 (0,64)	0,619 (0,037)
	190	20,73 (0,44)	1,066 (0,090)	18,99 (0,45)	0,581 (0,027)
	200	19,66 (0,22)	1,069 (0,044)	17,88 (0,36)	0,528 (0,014)
PLÁSTICOS	180	21,03 (0,48)	1,158 (0,052)	25,65 (0,76)	0,785 (0,021)
	190	20,73 (0,28)	1,158 (0,048)	22,09 (0,90)	0,620 (0,046)
	200	19,25 (0,50)	1,151 (0,052)	22,38 (0,69)	0,628 (0,048)
PS	200	23,49 (0,40)	2,369 (0,042)	81,58 (2,11)	2,397 (0,117)
Virgens					
PP-1 (MFI=9,24)	190	26,83 (0,44)	1,514 (0,039)	32,62 (1,21)	1,107 (0,052)
PP-2 (MFI=12,2)	190	30,72 (0,45)	1,868 (0,114)	43,48 (0,51)	1,370 (0,027)
PEAD	190	24,53 (0,12)	1,139 (0,031)	---	---
PEBD	180	12,97 (0,05)	0,197 (0,007)	---	---

* Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão

Com relação ao material denominado PLÁSTICOS, os resultados mostraram que este material, que é constituído por uma mistura de plásticos compostos por PS, PEBD, PEAD e PP, apresentou propriedades semelhantes ao PEAD reciclado, componente majoritário da mistura, com exceção da resistência à flexão, que foi superior ao PEAD nas três temperaturas, devido provavelmente ao PP e PS que são plásticos mais rígidos. De um modo geral, todas as propriedades mecânicas analisadas mantêm-se nas temperaturas de injeção, devido à homogeneização entre os componentes no material. Essas propriedades devem ser criteriosamente avaliadas quando se desejar usar em peças com especificações técnicas, nas quais prevaleça a resistência mecânica.

Tabela 3. Valores médios de densidade (d), índice de fluidez (MFI) e dureza Shore D dos plásticos reciclados e virgens

Plásticos	MFI 10 g/min	d (g/cm ³)	T_{inj} (°C)	Dureza Shore D
Reciclados				
PP	3,22	0,90 (0,002)	180	68,2 (0,57)
			190	66,4 (0,42)
			200	67,9 (0,74)
PEAD	0,39	0,93 (0,006)	180	62,0 (0,79)
			190	62,0 (0,79)
			200	61,5 (0,35)
PLÁSTICOS	1,65	0,88 (0,006)	180	63,3 (0,42)
			190	63,5 (0,50)
			200	62,8 (0,45)
PS	5,67	1,01 (0,004)	200	81,5 (0,50)
Virgens				
PP-1 (OPP)	9,24	0,90 (0,001)	190	70,5 (0,50)
PP-2 (Fortilene)	12,2	0,88 (0,002)	190	71,0 (0,71)
PEAD	---	0,91 (0,007)	190	62,9 (0,55)
PEBD	7,64	---	190	45,7 (0,45)

* Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão

Quanto ao módulo de elasticidade e a dureza (Tabela 2 e 3), pode-se constatar que não há variação dessas propriedades em função da temperatura de injeção empregada. Os resultados dos ensaios químicos realizados, o teste de queima e o da solubilidade em acetato de etila confirmaram a ausência de PVC nas poliolefinas recicladas.

Conclusão

A partir da avaliação dos resultados obtidos com os plásticos reciclados, concluiu-se que eles apresentam boas propriedades, podendo ser úteis na fabricação de peças que não exigem especificações técnicas. Os plásticos compostos pela mistura de plásticos (PEBD, PEAD, PP e PS) originaram materiais com propriedades semelhantes ao PEAD, com vantagem de serem mais resistentes à flexão. Quanto à temperatura de injeção, concluímos que ela não influenciou significativamente nas propriedades mecânicas avaliadas na faixa de 180 a 190°C e que na temperatura de 200°C já há indícios de degradação do material.

Portanto, os plásticos obtidos de artefatos descartáveis, potencialmente recicláveis, resultam em um material leve, resistente e de baixo custo, podendo competir com os termoplásticos virgens em diversas aplicações.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapesp (Processo n. 97/10449-0) e ao Prof. Adriano Ballarin pela concessão do Laboratório de Ensaios Mecânicos.

Referências

AGNELLI, J.A.M. Reciclagem de polímeros: situação brasileira. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.4, n.4, p.9-18, 1996.

ASTM D 638-99 - Standard test method for tensile properties of plastics. *Annual Book of ASTM*, Philadelphia, Pa, 1999.

ASTM D 790M-93 - Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials [Metric]. *Annual Book of ASTM*, Philadelphia, Pa, 1993.

ASTM D 2240-97 - Standard test method for rubber property - durometer hardness. *Annual Book of ASTM*, Philadelphia, Pa., 1999.

ASTM D 1622 - Standard test method for standard test method for apparent density of rigid cellular plastics. *Annual Book of ASTM*, Philadelphia, Pa, 1992.

ASTM D 1238-90b - Standard test method for flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer. *Annual Book of ASTM*, Philadelphia, Pa, 1991.

COLLINS, E.A. et al. *Experiments in Polymer Science*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1973.

CRUZ, S.A.; ZANIN, M. Caracterização elétrica do HDPE reciclado proveniente de resíduo sólido urbano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 5., 1999, Águas de Lindóia-SP, CD-ROM, Trabalho n.440, p.1589-1590, 1999.

FORLIN, F.J.; FARIA, J.A.F. Considerações sobre a reciclagem de embalagens plásticas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.12, n.1, p.1-10, 2002.

LEÃO, A.L.; TAN, I.H. Potencial of municipal solid waste (MSW) as a source of energy in São Paulo: Its Impact on CO₂ Balance. *Biomass and Bioenergy*, Kidlington, v.14, n.1, p.83-89, 1998.

MANO, E.B.; BONELLI, C.M.C. A Reciclagem de plásticos pós-consumidos. *Rev. Quím. Ind.*, Rio de Janeiro, n.698, p.18-22, 1994.

MANO, E.B. et al. *Jornal do Plástico*, Niterói, n. 794/795, 1991.

PADULA, M. et al. *Embalagens plásticas - Controle de qualidade*. ITAL, Campinas: ITAL, 1989.

Received on June 13, 2002.

Accepted on September 27, 2002.