

ESTUDO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE RECICLADO PARA USO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS¹

L.M. Candian²

A.A. Dias³

D.B.V. Castro⁴

G.M. Dalfré²

D. Spinelli⁵

W.W. Bose Filho⁶

J.R. Tarpani⁵

C.O.F.T. Rucker,⁵

Resumo

Neste trabalho, foi realizada a caracterização do polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado, por ser um dos materiais poliméricos rígidos mais disponíveis para reciclagem. Foi determinada a composição das amostras do material polimérico (PEAD) reciclado, obtidas no mercado, por meio dos ensaios termoanalíticos: calorimetria exploratória diferencial e análise termogravimétrica. Os resultados mostraram que o material fornecido pela empresa de reciclagem é isento dos contaminantes comumente encontrados nos materiais reciclados e apresenta um significativo grau de pureza. A determinação de alguns parâmetros mecânicos como limite de resistência, limite de escoamento, percentual de alongamento, tenacidade ao impacto, por meio de ensaios mecânicos finalizou o estudo do material analisado. A resistência à compressão obtida foi maior que os valores encontrados na literatura, para o PEAD puro, que gira em torno de 17 MPa e não muito inferior à do concreto e à da madeira. Entretanto, a rigidez do PEAD reciclado foi bem menor que a dos materiais de construção tradicionais, sendo esta a sua maior deficiência. De acordo com os resultados, o PEAD reciclado pode ser aplicado como elemento estrutural, desde que sejam estudadas possíveis formas de controlar essa deficiência, como a incorporação de nervuras, a utilização de blendas poliméricas e adição de cargas minerais e de fibras de elevado módulo de elasticidade e resistência mecânica.

Palavras-chave: Polímeros reciclados; Elementos estruturais; Polietileno de alta densidade reciclado; Resistência mecânica.

RECYCLED HIGH DENSITY POLY-ETHYLENE FOR USE IN STRUCTURAL ELEMENTS

Abstract

In this work, one of the most rigid polymers available for recycling, HDPE (high-density polyethylene) was characterized. The composition of recycled HDPE obtained in the market, was determined by thermoanalytical tests, as DSC and TG. The results showed that the furnished materials are free from contaminants usually found in recycled materials and presents a significant purity. The determination of mechanical parameters of tensile, compressive, bend and Izod impact complemented the study on the material. For pure HDPE, the compressive resistance was higher than values found in literature, around 17MPa and not much low than for concrete and wood. Nevertheless, recycled HDPE stiffness was very low than the stiffness of traditional construction materials, which was its major deficiency. According to the obtained results, recycled HDPE is suitable for structural element applications, since this deficiency can be controlled by ribs (notches) and additions of polymeric blends, minerals and high elastic modulus and mechanical resistance fibers.

Key-words: Recycled polymers; Structural elements; High density poly-ethylene; Mechanical resistance.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Mestre em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

³ *Professor Doutor do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

⁴ *Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais no programa de Pós-Graduação Interunidades da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

⁵ *Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

⁶ *Professor Titular do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, projetistas e engenheiros civis trabalham com os plásticos porque eles oferecem combinações de vantagens não encontradas em outros materiais, tais como baixo peso específico, resiliência, resistência à deterioração por decomposição e ataque de microorganismos, resistência à corrosão, resistência mecânica, transparência, facilidade de processamento e baixo custo de manutenção.

A utilização dos polímeros na construção civil existe há bastante tempo, porém é mais usual em elementos não estruturais, como, por exemplo, nas tubulações de água e de esgoto, telhas plásticas, calhas, esquadrias, etc. Entretanto, o alto consumo de energia na produção de metais e de cimento, juntamente com a pressão contra a utilização da madeira tropical e o baixo custo do plástico reciclado estimularam sua inserção na construção civil, em estruturas que anteriormente eram constituídas apenas de madeira, de aço ou de concreto.

Os polímeros mais utilizados para reciclagem são basicamente os termoplásticos, que por sua vez são os empregados na Engenharia. Segundo Spinacé et al.,⁽¹⁾ dentre os termoplásticos, o PEAD e o PP (polipropileno) apresentaram um aumento significativo de volume e de taxa de crescimento, quando comparado com o aumento do PEBD (polietileno de baixa densidade) e do PS, e em relação ao PVC, poli (cloreto de vinila), que apresentou uma diminuição nesses valores, no período de 1982 a 2002. O PE e o PP são os termoplásticos mais procurados pelas empresas que atuam nesse setor, cuja reciclagem é de 20 t/mês a 50 t/mês, em média.

Por meio de ensaios específicos é possível determinar as propriedades, a composição e o desempenho dos materiais poliméricos. Com a diversificação dos plásticos, para aplicações de engenharia, as técnicas de caracterização dos polímeros tiveram um grande avanço nos últimos 15 anos.

A calorimetria exploratória diferencial, DSC, também conhecida por calorimetria diferencial de varredura, é uma das técnicas de análise térmica que têm sido largamente empregadas na caracterização de diversos tipos de materiais.

A análise termogravimétrica, TG, no campo de materiais poliméricos, vem sendo largamente empregada desde a década de 60, no desenvolvimento de diversos tipos de estudos, relacionados à variação de massa, em função do tempo ou da temperatura.⁽²⁾

O objetivo principal desta pesquisa foi determinar as propriedades mecânicas de resistência e de rigidez de um material polimérico reciclado, constituído basicamente de polietileno de alta densidade (PEAD).

Primeiramente, realizou-se o ensaio de Beilstein para detectar a presença de halogênios (cloro, bromo ou iodo), para evitar possíveis danos aos equipamentos durante a realização dos ensaios termoanalíticos e detectar a possível contaminação com PVC. O referido ensaio foi complementado pelo ensaio termoanalítico DSC, a fim de se verificar se havia a presença de possíveis contaminantes nas amostras de PEAD reciclado. Logo após, foram escolhidas as amostras que mais se afastavam do polietileno de alta densidade puro, com base no grau de cristalinidade e foi realizada uma análise termogravimétrica, TG, para se ter uma idéia da composição dos materiais reciclados disponíveis no mercado. Com estas amostras foram determinadas as propriedades mecânicas do PEAD reciclado por meio de ensaios de tração, de compressão, de flexão estática e de impacto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, bem como confecção dos corpos-de-prova, foram utilizados os procedimentos da norma ASTM. Os ensaios foram realizados no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais – CCDM, no Laboratório de Ensino da Área de Polímeros, no Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa, da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, e no Núcleo de Ensaio de Materiais e Análises de Falha do Departamento de Materiais, Aeronáutica e Automobilística – SMM, da EESC – USP. Para estudar o polietileno de alta densidade reciclado e disponível no mercado foram adquiridas quatro amostras de cores distintas de péletes (marrom, vermelho, azul, branco e verde) de PEAD reciclado, provenientes de embalagens moldadas a sopro. As amostras foram ensaiadas quanto à presença de possíveis contaminantes (Ensaio de Beilstein e Ensaio de DSC). Com base no grau de cristalinidade, obtido no ensaio de DSC, foram escolhidas as amostras que mais se afastam do PEAD puro (branca e verde), para se ter uma idéia da composição dos materiais reciclados disponíveis no mercado.

Para se determinar a temperatura e as entalpias de fusão e de cristalização, foram utilizadas as normas ASTM D3417-99 (DSC) e D3418-99. O ensaio de Beilstein e o ensaio de DSC foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, DEMa.

Para a realização do DSC foi utilizado o equipamento Perkin-Elmer Modelo DSC 7. Os parâmetros utilizados para a realização do ensaio de DSC estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Características das amostras no ensaio DSC.

Amostra	Peso da amostra (mg)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Faixa de Temperatura (°C)		Pressão (N)
			Início	Fim	
Branca	8,06				
Azul	6,83				
Vermelha	8,11	10	25	280	15
Marrom	7,55				
Verde	7,67				

As amostras foram submetidas a uma atmosfera de gás nitrogênio super seco, para manter constante a composição da atmosfera do forno. A vazão contínua foi mensurada por meio da pressão obtida por um manômetro, por isso ela foi fornecida em Newton (N), já que o equipamento utilizado não era provido de fluxômetro. Entretanto, na maioria dos equipamentos de DSC, a vazão varia entre 10 a 50mL/min.

As curvas termogravimétricas (TG) e termogravimétricas derivadas (DTG) foram obtidas em um módulo termogravimétrico Hi-RES TG 2950, acoplado a um analisador térmico TA2000. A massa da amostra, antes e durante a realização do ensaio, foi constantemente monitorada por uma termobalança. Este ensaio foi realizado no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, CCDM, da UFSCar. Os parâmetros utilizados para realização do ensaio de TG estão listados na Tabela 2.

Tabela 2. Característica das amostras verde e branca no ensaio TG.

Amostra	Peso da amostra (mg)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Faixa de Temperatura (°C)		Vazão (mL/min)
			Início	Fim	
Verde	14,0940	10	25	600	50
Branco	10,9043				

Os corpos de prova para os ensaios de tração e de impacto foram fabricados pelo processo de extrusão. Em seguida, foram usinados, com geometria e dimensões segundo as normas ASTM D638-03 e ASTM D256-04, respectivamente. Foi utilizada uma extrusora monorroscas para os termoplásticos reciclados, com capacidade de produção de 120 kg/h. Foram confeccionados três matrizes de calibração e três calibradores, para obter as dimensões dos corpos de prova, prescritas nos padrões normativos. Para os corpos de prova de tração e de impacto foi utilizado o mesmo perfil, dado que possuem a mesma espessura.

A usinagem final dos corpos de prova foi realizada em uma Freza Universal AZERF ASA/79 1. Os corpos de prova de impacto foram obtidos a partir dos corpos de prova de tração, apenas reduzindo-se a largura com a mesma fresa. Utilizou-se uma fresa entalhadora para a execução do entalhe de corpos de prova de impacto do tipo Izod/Charpy, marca CEAST, modelo Notchvis. A entalhadora é motorizada, com entalhes padronizados segundo a norma ASTM D256-04. Foram ensaiados 10 corpos de prova, para cada tipo de ensaio: tração, compressão, flexão e impacto, e para cada tipo de coloração de pélete: verde e branco.

A geometria e as dimensões dos corpos de prova de tração e compressão estão mostradas nas Figura 1(a) e 1(b), de acordo com o tipo I da norma ASTM D638-03.

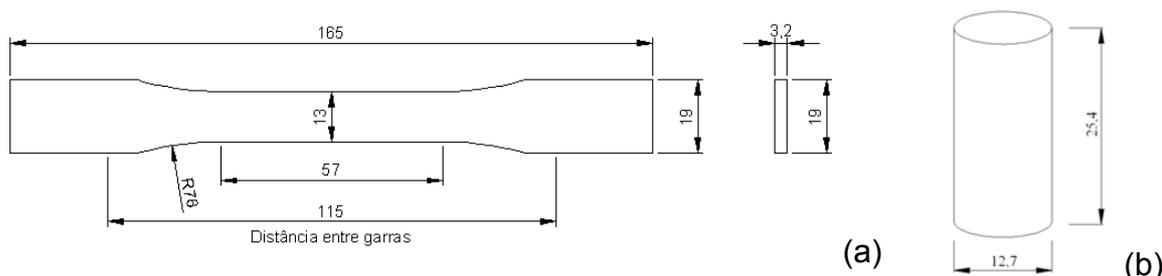


Figura 1. Corpos de prova de: (a) tração do tipo I, de acordo com a norma ASTM D638-03 e (b) compressão, de acordo com a Norma ASTM D695-02.

Os ensaios de tração dos corpos de prova de PEAD foram realizados no Laboratório do Núcleo de Ensaio de Materiais e Análise de Falhas (NEMAF) da Universidade de São Paulo, São Carlos. Foram realizados à temperatura ambiente em torno de 23°C e umidade de 50%. O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL 10000, com célula de carga com capacidade de 1,0 kN, interligada ao software Tesc-versão 1.13, que registra valores de deslocamento e de força. Metade dos corpos de prova (cinco fabricados com o pélete verde e cinco com o branco) foi ensaiada com velocidade de deslocamento de 5 mm/min, com a finalidade de se medir o módulo de elasticidade. O deslocamento foi quantificado por meio de um extensômetro eletrônico EMIC, modelo EEPA, com base de medida de 50 mm, posicionado na região central do corpo de prova. O resultado obtido corresponde à tensão e à deformação nos pontos de 0,05% e 0,25% de deformação, segundo a norma ISO 527-1.

Os demais corpos de prova foram submetidos a uma velocidade de deslocamento de 50 mm/min para a determinação da tensão e da deformação no ponto de escoamento, tensão e deformação na ruptura e o alongamento na ruptura. O deslocamento foi obtido com a utilização de um transdutor indutivo de deslocamento, acoplado à máquina. O ensaio foi conduzido dessa maneira, pois a norma ASTM D638-03 exige que para a determinação do módulo de elasticidade o corpo de prova seja submetido à velocidade de 5 mm/min. Já para os demais parâmetros não há esta exigência, e sim que a duração dos ensaios esteja entre 0,5 e 5 minutos.

O ensaio de compressão foi realizado no mesmo equipamento utilizado para os ensaios de tração. Todos os corpos de prova, dez de coloração verde e dez de coloração branca, foram submetidos a uma velocidade de deslocamento de 1,3 mm/min. Os deslocamentos foram obtidos com a utilização de um transdutor de deslocamento acoplado à máquina de ensaio. Os ensaios de compressão foram realizados segundo a norma ASTM D695-02. O corpo de prova utilizado no ensaio apresentou seção cilíndrica, com 25,4 mm de altura e 12,7 mm de diâmetro.

Devido às dificuldades encontradas durante o processo de moldagem, foram obtidos corpos de prova de compressão com seções transversais diferentes das dimensões prescritas pela ASTM D695, diâmetro de 12,7mm. Por esse motivo, no intuito de se obter a real área da aplicação da carga, foi utilizado um estéreo microscópio Carl Zeiss, modelo Citoval II, acoplado a um aquisitor digital de imagem, para se obter imagens das seções transversais dos corpos de prova ensaiados, as quais foram quantificadas com a utilização de um software de analisador de imagem digital, Image Pro-Plus versão 4.5.

Para o ensaio de flexão 3 pontos, prescrito pela ASTM D790-03, existem dois procedimentos de ensaio denominados A e B. O procedimento tipo A é indicado para materiais que rompem em pequenos deslocamentos e quando se deseja obter as propriedades de flexão, como módulo de elasticidade à flexão. O procedimento tipo B é indicado para materiais que suportam grandes deslocamentos durante o ensaio onde é utilizado para medir somente a resistência à flexão. Para a realização deste ensaio, adotou-se o procedimento A, que é o utilizado para se obter módulo de elasticidade, mesmo prevendo que o material suportaria grandes deslocamentos durante o ensaio. O procedimento B é utilizado para medições de propriedades como resistência a flexão, pois se utiliza uma velocidade cerca de 10X maior inviabilizando o cálculo do módulo de elasticidade.

Os seguintes parâmetros do corpo de prova retangular de flexão foram medidos em concordância com a norma ASTM D790-03: 6,4 mm de altura, 12,7 mm de largura e 127 mm de comprimento. Foi utilizada uma distância de 102 mm entre os apoios e um vão de carga de 51 mm.

Os ensaios de flexão foram realizados no Laboratório do Núcleo de Ensaios de Materiais e Análise de Falhas (NEMAF) da USP - São Carlos. O raio das superfícies em contato com o corpo de prova foi de 3,42 mm, dentro do limite permitido pela norma referida. Foi utilizada uma máquina de ensaios universal EMIC, modelo DL 10000, com célula de carga com capacidade de 1,0 kN interligada ao software Tesc-versão 1.13, que registra valores de deslocamento e de força.

A velocidade dos ensaios e o deslocamento máximo, para todos os corpos de prova, dez de coloração verde e dez de coloração branca, foi de 2,8 mm/min e 13,55mm, respectivamente. Estes parâmetros foram obtidos conforme prescrita na norma ASTM 790-03, admitindo-se que a deformação máxima permitida é de 5%, e a taxa de deformação é de 0,01 mm/mm/min, na superfície oposta ao carregamento.

Os ensaios de impacto IZOD foram realizados no Laboratório de Ensino do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), e o equipamento utilizado foi uma máquina de impacto instrumentada CEAST, modelo RESIL 25R, provida de um martelo que liberou uma energia de 2J, com perda de energia do pêndulo por atrito corresponde a 0,024J. O método de ensaio foi do tipo A da norma consultada.

O corpo de prova utilizado para o ensaio de impacto segue a norma ASTM D 256-04 e está esquematizado na Figura 2.

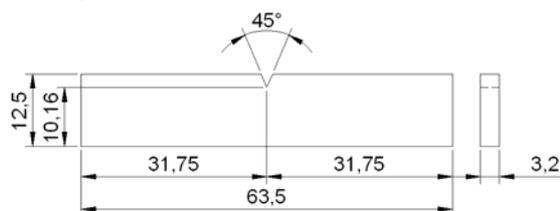


Figura 2. Geometria e dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de impacto IZOD.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio de chama de Beilstein não detectou vestígio de contaminação com policloreto de vinila (PVC) em todas as amostras: branca, azul, vermelha e verde. Isto pode ser comprovado pela permanência da coloração amarela da chama.

As curvas de DSC, obtidas para as cinco amostras de PEAD, estão ilustradas na Figura 3.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para todas as amostras, isto é, os valores da temperatura de fusão cristalina (T_M), entalpia de fusão (ΔH), temperatura no início da fusão (T_{onset}) e o grau de cristalinidade (χ).

Tabela 3. Resultados obtidos no ensaio de DSC para todas as cores de PEAD.

Amostra	T_M (°C)	ΔH (J/g)	T_{onset} (°C)	χ (%)
Branca	135,5	160,7	123,9	55
Azul	130,9	182,4	122,4	62
Vermelha	130,6	172,8	122,3	59
Verde	131,4	148,2	123,5	51

As curvas de DSC obtidas para todas as amostras apresentam apenas um pico de fusão, que varia entre 120,6°C (amostra vermelha) e 135,5°C (amostra branca). A presença de um único pico de fusão na temperatura de fusão do PEAD, em torno de 137°C, comprova a isenção de possíveis contaminantes, como o PET e o PP.⁽³⁾ Pode-se perceber também que o formato do pico de fusão está bem definido para todas as curvas de DSC, comprovando que o material é uniforme, mesmo apresentando variação na coloração.

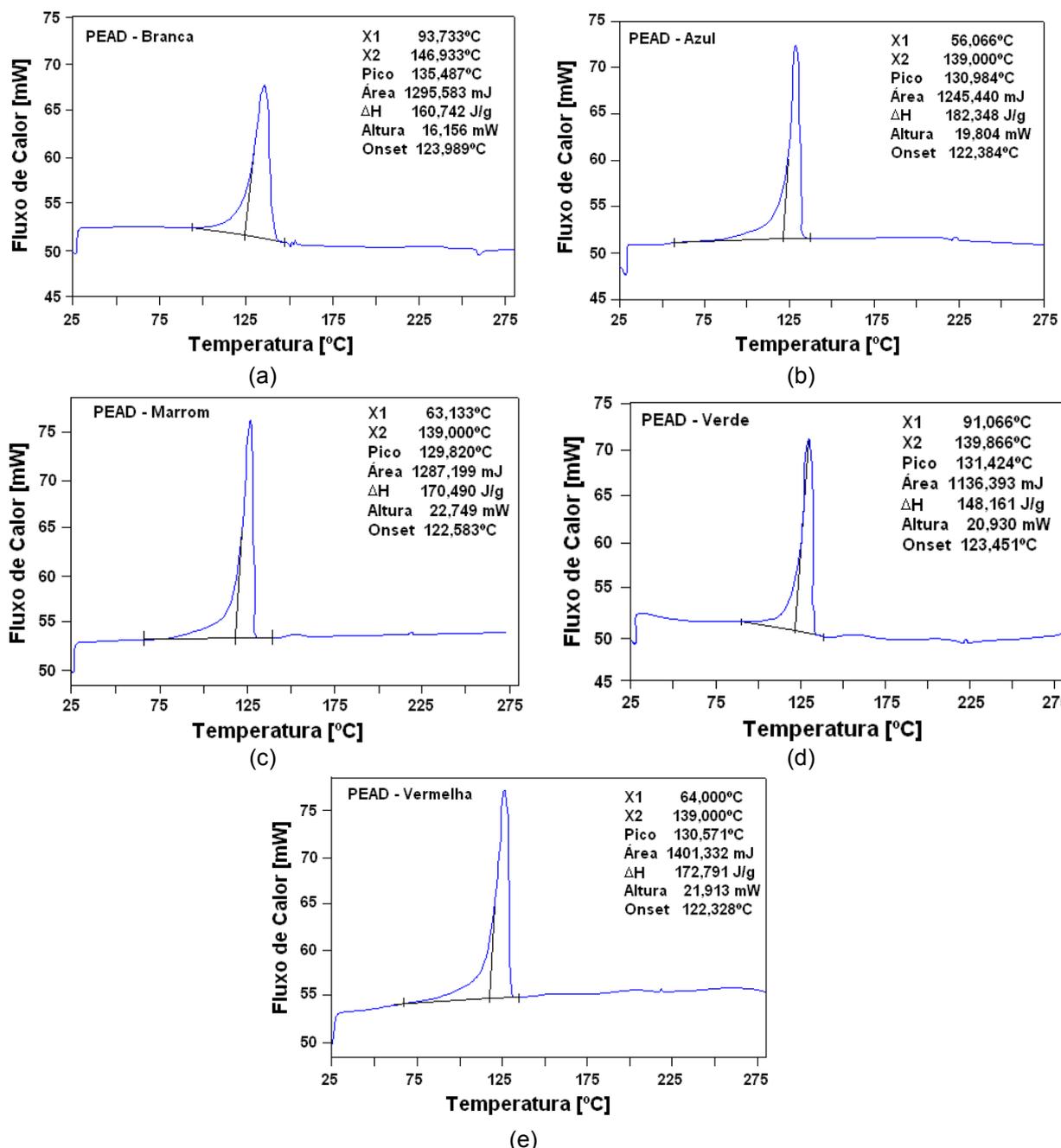


Figura 3. Curvas obtidas nos ensaios de DSC das amostras de PEAD das cores: (a) branca, (b) azul, (c) marrom, (d) verde e (e) vermelha.

Devido à uniformidade das amostras, escolheu-se apenas o PEAD verde e o branco para a determinação da composição por meio do TG e a realização dos ensaios mecânicos. Esta escolha se deu pelo fato dos materiais apresentarem um grau de cristalinidade mais distante do PEAD puro, entre 75% a 95%,⁽²⁾ isto é, foram utilizados os materiais reciclados de pior qualidade.

O resultado da análise de termogravimetria é mostrado sob a forma de um gráfico relacionando a massa residual com a temperatura (Figura 4), para a amostra PEAD verde e branca, sob atmosfera dinâmica de N_2 . A massa da amostra foi de 14,0940 mg (PEAD verde) e 10,9043 mg (PEAD branca), a vazão de gás foi de 50 mL/min, a razão de aquecimento foi de 10°C/min e foi utilizado suporte de alumina para a amostra.

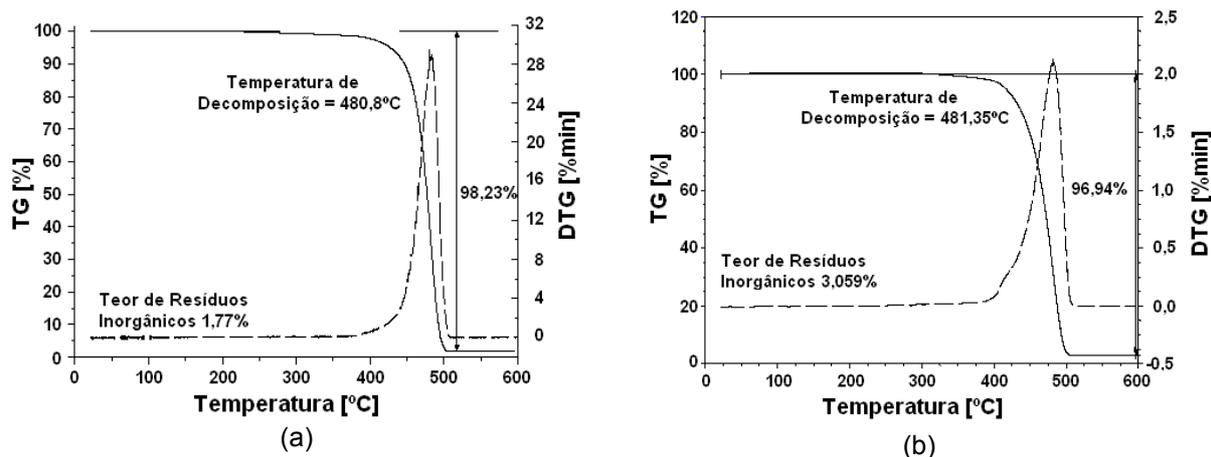


Figura 4. Curvas TG (---) e DTG (—): (a) amostra PEAD verde; (b) amostra PEAD branca.

As amostras de PEAD verde e branca apresentaram comportamentos semelhantes sob o ponto de vista de análise térmica. As amostras verde e branca não apresentaram variação em sua massa até a temperatura de 290°C (320°C). A partir dessa temperatura, observa-se uma diminuição acentuada de sua massa inicial, até cerca de 510°C (520°C). Nesse intervalo de temperatura, a amostra perde 98,23% (97,00%) de sua massa inicial, devido à decomposição/degradação do polímero. A temperatura de decomposição do polímero, medida no pico da curva DTG, é de 480,8°C (481,4°C). Entre 510°C e 600°C (520°C e 600°C), a curva TG exhibe um patamar, onde não há perda significativa de massa. O teor de resíduos estáveis a 600°C é de 1,77% (3,06%), que equivale a 0,25 mg (0,33 mg) da amostra utilizada. Os valores entre parênteses correspondem os valores obtidos para a amostra de coloração branca.

Essa pequena porcentagem de resíduos, tanto na amostra de PEAD de coloração verde quanto na de coloração branca, pode corresponder à pigmentação inorgânica ou a um aditivo lubrificante, não sendo, portanto, significativas, pois em uma resina virgem, sua pigmentação pode corresponder em até 3,0% da massa.

A Tabela 4 apresenta uma compilação de todos os resultados obtidos em ensaios mecânicos, tais como: tração, compressão, flexão em três pontos e impacto. Todos os valores médios com seus respectivos desvios padrões se referem a dez corpos de provas ensaiados em sua respectiva condição.

Em relação aos parâmetros obtidos nos ensaios de tração, ressalta-se que o PEAD reciclado possui um comportamento dúctil, devido aos valores elevados de deformação e/ou alongamento antes da ruptura dos corpos de prova. A estricção inicia-se quando é atingida a tensão máxima, e prolonga-se por toda a extensão do corpo de prova, com seção reduzida, pois o material apresenta comportamento de estiramento a frio. Segundo Agnelli,⁽⁴⁾ no PEAD, geralmente a tensão na ruptura é superior à tensão no escoamento, proveniente de uma orientação molecular intensa, informação verbal. Esse comportamento evidencia que a orientação molecular não é tão intensa para o PEAD testado.

Os corpos de prova de tração de PEAD branco apresentaram um comportamento bastante uniforme, pois atingiram o alongamento conforme a norma ASTM D638-03, deformando até o final do cursor da máquina universal de ensaios. Entretanto, os corpos de prova de coloração verde apresentaram valores de alongamento na ruptura bastante distintos, fato este corroborado pelo elevado valor do desvio padrão.

Tabela 4. Propriedades mecânicas das amostras de PEAD branca e verde.

Parâmetros mecânicos	Resultados	
	PEAD - Branco	PEAD - Verde
TRAÇÃO		
Tensão no escoamento (MPa)*	21,85 ± 0,37	22,24 ± 0,66
Deformação no escoamento (mm/mm)	0,168 ± 0,008	0,170 ± 0,009
Tensão na ruptura (MPa)	14,15 ± 0,28 **	15,36 ± 0,92
Deformação na ruptura (mm/mm)	> 6,54 ± 0,15	4,38 ± 2,95
Alongamento na ruptura (%)	> 654 ± 15	438 ± 295
Módulo de elasticidade tangente (MPa)	598 ± 8	547 ± 11
COMPRESSÃO		
Resistência (MPa)	26,20 ± 1,19	28,72 ± 2,72
Tensão no escoamento (MPa)	14,11 ± 0,63	14,25 ± 0,87
Deformação no escoamento (mm/mm)	0,041 ± 0,003	0,049 ± 0,007
Tensão de escoamento deslocada (MPa)	16,84 ± 0,52	16,69 ± 0,71
Módulo de elasticidade (MPa)	300 ± 20	245 ± 34
Resistência (MPa)	26,20 ± 1,19	28,72 ± 2,72
FLEXÃO		
Força máxima correspondente a 5% de deformação (N)	48 ± 2	72 ± 2
Módulo de Elasticidade Tangente (MPa)	805 ± 25	719 ± 23
Resistência correspondente a 5% de deformação (MPa)	17,64 ± 0,35	18,73 ± 0,37
IMPACTO		
Resistência (J/m)	137,3	8,3
Resistência (kJ/m ²)	13,2	0,8

* A tensão máxima ocorreu no escoamento.
** Ensaio foi interrompido, pois foi atingido o final do cursor da máquina.

Os resultados obtidos em ensaios de compressão apresentam que o módulo de elasticidade da amostra branca foi maior que o da verde, devido a primeira ter maior grau de cristalinidade.

Os ensaios de flexão a três pontos foram concluídos para a deformação máxima de 5%, posto que a ruptura não ocorreu antes dessa deformação.

Considerando o desvio padrão, o PEAD de coloração branca apresentou menor valor de energia de impacto, conforme esperado, pois a resistência de impacto diminui com o aumento do grau de cristalinidade, indicado na Tabela 4. O PEAD reciclado apresentou resistência ao impacto Izod muito próximo do valor encontrado para o PEAD puro comprovando que a resistência ao impacto não foi influenciada pelas inúmeras variáveis que geralmente interferem no ensaio de impacto como grau de cristalinidade, temperatura de moldagem, velocidade de ensaio, etc.

Todos os corpos de prova ensaiados resultaram em ruptura completa. A resistência ao impacto Izod não deve ser considerada separadamente para quantificar a resistência mecânica do material, pois existem polímeros que são sensíveis ao entalhe, porém possuem elevadas propriedades mecânicas como, por exemplo, o nylon e o poliacetal.⁽⁵⁾

Para comparação de propriedades do PEAD, foram escolhidos o concreto e a madeira (Tabela 5). O primeiro por ser o material estrutural mais empregado na construção civil, e a madeira, por ser o material tradicionalmente usado em

aplicações para as quais se pretende utilizar os polímeros reciclados, tais como mourões, cruzetas, dormentes, etc.

Tabela 5. Valores médios do PEAD, do concreto e da madeira (7).

Material	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
PEAD virgem	17	1040
PEAD reciclado branco	26,20	805
Concreto	32	23800
Madeira <i>Eucalyptus grandis</i>	40,3	12813

Considerando que a resistência à compressão do PEAD reciclado corresponde a 82% do concreto e a 65% da madeira, uma possível aplicação do PEAD reciclado seria em elementos estruturais robustos submetidos à compressão, como coluna para marinas. Porém, em relação ao módulo de elasticidade, o PEAD reciclado representa uma porcentagem muito pequena com relação ao concreto e à madeira, e, portanto, sua rigidez precisa ser majorada.

Nos materiais poliméricos, o módulo de elasticidade à compressão gira em torno de 1,1 vezes o módulo de elasticidade à flexão.⁽⁶⁾ Utilizou-se o módulo de elasticidade à flexão do PEAD reciclado para comparar com o concreto e com a madeira, devido ao ensaio de compressão ter sido prejudicado pelas dimensões dos corpos de prova.

Essa deficiência pode ser aprimorada pela adição de cargas minerais e fibras de elevado módulo e resistência mecânica ou com a utilização de blendas poliméricas. Conforme apresentado na Tabela 6, os materiais reforçados com fibras de vidro apresentam um módulo de elasticidade muito superior, quando comparados com os materiais sem reforço. Aumentando assim a rigidez e a resistência à tração e à compressão na ruptura, o PEAD pode ser equiparado com os materiais estruturais empregados na construção civil. Na Tabela 7, pode-se perceber também que a resistência à tração e à compressão é bastante maior para os materiais com reforço. Além disto, a incorporação de fibras poliméricas e cargas na matriz também promovem o aumento da estabilidade dimensional.

A incorporação de nervuras ou costelas de reforço é uma alternativa que pode contribuir no aumento da rigidez e da resistência mecânica do PEAD (5). Porém deve-se ter cuidado com as espessuras das costelas de reforço, pois, conforme discutido anteriormente, a extrusão do PEAD é indicada apenas para perfis de paredes finas, por ele ter baixa rigidez e um processo de resfriamento muito lento.

Tabela 6. Módulo de elasticidade típico (à temperatura ambiente)⁽⁷⁾

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)
Compostos grafite-epóxi	280
Aço	210
Alumínio	70
Epóxi reforçado com fibra de vidro	40
Poliéster reforçado com fibra de vidro	14
Resinas epóxi	3,1
Polietileno de alto peso molecular	0,7

Tabela 7. Valores médios de propriedades mecânicas de alguns materiais (3).

Material	Tensão na Ruptura Tração (MPa)	Tensão na Ruptura Compressão (MPa)
Aço para construção civil	≥ 370	370
Concreto	1,5 – 3,5	20 – 40
Plástico rígido não reforçado (em geral)	10 – 150	7 – 200
Plásticos reforçados	200 – 1000	150 – 500

4 CONCLUSÕES

Constatou-se que os materiais reciclados não diferem muito entre si, mesmo possuindo coloração distinta, pois todas as amostras são isentas dos contaminantes comumente encontrados nos materiais reciclados, como PVC, PET e PP.

Pode-se comprovar também, por meio do ensaio de TG, que o PEAD reciclado é praticamente puro. A porcentagem de resíduos inorgânicos, que não é significativa, pode corresponder à pigmentação inorgânica ou algum aditivo.

As dificuldades encontradas no processamento do PEAD foram as principais responsáveis pelas diferenças das propriedades mecânicas entre o PEAD puro e o reciclado. Portanto, com o material e o equipamento apropriado, além de diminuir a porosidade, poderia ser utilizada menor temperatura durante o processamento dos corpos de prova, resfriando mais rápido e evitando a ocorrência de bolhas e rechupes, obtendo também maior produção.

O PEAD reciclado apresentou um comportamento dúctil quando submetido à tração e à compressão. Devido a esse comportamento, quando ensaiado em tração, o material apresenta características típicas do material virgem, baixo módulo de elasticidade, baixa tensão de escoamento, porém elevado alongamento. Além disso, apresenta o comportamento de estiramento a frio. Porém a tensão de tração na ruptura do corpo de prova é inferior à tensão de tração no escoamento, devido à sua intensa orientação molecular.

Como o material não rompeu até a deformação máxima permitida, 5%, no ensaio de flexão, a resistência obtida corresponde a essa deformação.

O PEAD reciclado apresentou resistência ao impacto Izod muito próximo ao valor obtido na referência, para o PEAD puro, comprovando que a resistência ao impacto não foi influenciada pelas inúmeras variáveis que geralmente interferem no ensaio de impacto. Todos os corpos-de-prova ensaiados resultaram em ruptura completa.

O módulo de elasticidade do PEAD branco foi maior que o verde, para os ensaios de tração, de compressão e de flexão, pois nesses ensaios o módulo aumenta com o grau de cristalinidade. Entretanto, a resistência ao impacto tem o comportamento oposto e com isto o PEAD branco apresentou menor valor de energia de impacto quando comparado ao PEAD verde, considerando o desvio padrão.

Conforme previsto para os materiais termoplásticos, o módulo de elasticidade em flexão foi maior que o módulo de elasticidade em tração. Entretanto, o módulo de elasticidade em compressão fugiu dos padrões, pois foi menor que o módulo de flexão e até mesmo que o módulo de tração. Contudo, ambos os módulos de elasticidade, em tração e em compressão, comparados com o módulo à flexão, estão distantes da referência bibliográfica (Nielsen; Landel, 1994).

Agradecimentos

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de Mestrado concedida à primeira autora, à FAPESP Proc. No. 06/54430-2, pelo auxílio financeiro que propiciou o desenvolvimento da pesquisa, ao professor Libânio Miranda Pinheiro que junto com a empresa IPEX, de São Carlos, processaram o material e confeccionaram os corpos de prova e ao professor José Augusto Marcondes Agnelli, do DEMa-UFSCar, que realizou os ensaios de Impacto IZOD, viabilizando o trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SPINACÉ, M.A.S., PAOLI, M.A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química Nova*, v.28, n.1, p.65-72, 2005.
- 2 CANEVAROLO Jr, S.V. *Técnicas de Caracterização de Polímeros*. Editora Artliber ABPol, São Paulo/SP, 2004.
- 3 SILVA, J.F.R. Cruzetas para redes de distribuição de energia elétrica à base de polipropileno. Dissertação de Mestrado. Engenharia Elétrica – SEL/EESC/USP, São Carlos/SP, 2003.
- 4 AGNELLI, J.A.M. *Introdução a materiais poliméricos*. Notas de aula. Engenharia de Materiais – DEMa, UFSCar, São Carlos – SP, 2005.
- 5 DALFRÉ, G.M. Cruzetas de Polímeros Reciclados: Caracterização dos Materiais, Análise Numérica e Ensaio de Modelos Reduzidos. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Estruturas – SET/EESC/USP, São Carlos/SP, 2007.
- 6 NIELSEN, L.E., LANDEL, R.F. *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. 2nd edition, 1994.
- 7 MARCZAK, R. J. *Polímeros como Materiais de Engenharia*. UFRGS, Porto Alegre/RS, 2004.