



Estudo das propriedades mecânicas, térmicas e ópticas do PMMA rubi reciclado para fabricação de lentes de lanternas automotivas.

Lazareti C*§, Moraes AJ§ e Nunes ECD§

§Faculdade SENAI de Tecnologia – Escola SENAI Mario Amato, São Bernardo do Campo SP.

Resumo. Os polímeros são considerados grandes vilões ambientais, pois têm uma degradação lenta, ocupam um volume considerável em aterros sanitários e quando descartados incorretamente causam um impacto ainda maior ao meio ambiente. Este trabalho estudou a recuperação de resíduos de PMMA ou Poli (metacrilato de metila) provenientes de lanternas automotivas por meio da reciclagem, formando compostos com frações de PMMA virgem e reciclado, visando à redução de custo e consumo de matéria-prima, assim como a diminuição dos impactos ambientais. O estudo adotou adições de 10% a 50% de PMMA reciclado na produção de corpos de provas para realização dos testes para análise e comparação de propriedades mecânicas, térmicas, ópticas e discutiu o potencial de aplicação no mercado. De acordo com a matriz de decisão que foi elaborada, a fração de PMMA reciclado que se mostrou apta para o uso no reprocessamento com pequenas variações, porém aceitáveis foi de 10% a 20%. O estudo apontou que é possível a obtenção de uma redução no consumo de PMMA utilizando-se a fração de 15% de PMMA reciclado, gerando uma redução de consumo de 20% no período analisado.

Palavras chave. *PMMA. Reciclagem de polímero. Blendas de PMMA. Lanterna automotiva.*

Introdução. Atualmente, a redução de custos, peso e ainda, a melhoria dos produtos, principalmente na área automobilística, e de bens de consumo em geral, tem sido amplamente usado, buscando uma demanda crescente pela injeção de materiais poliméricos.

O acrílico é um material nobre e moderno que tem sua aplicação em praticamente todos os segmentos como: lojas, museus, hotéis, supermercados, escolas, restaurantes, bancos, entre outros. Acrílico ou PMMA é um material termoplástico rígido e transparente que também pode ser considerado um dos polímeros com maior qualidade do mercado, por sua facilidade de adquirir formas, por sua leveza e alta resistência (1). É o principal polímero da família dos polímeros acrílicos e um dos materiais mais importantes na indústria de polímeros, e também o mais estudado. O PMMA é um termoplástico, rígido e transparente, com boa resistência as intempéries, apresenta também baixa absorção de água. Versátil o acrílico é muito utilizado comercialmente, ocupando uma posição intermediária entre os commodities e polímeros de engenharia (2).

A partir destas características e aplicação, este trabalho estudou a recuperação de resíduos de PMMA provenientes dos processos de injeção de uma multinacional fabricante de dispositivos

de iluminação veicular (lanternas) por meio da reciclagem por um processo composto pela moagem deste material residual. Estima-se que das 4500 toneladas de PMMA consumidas no Brasil em 2006, 75% são injetadas para a produção de componentes automotivos (3). De fácil implantação, esta proposta visou reduzir o descarte (sucateamento) destes resíduos bem como a reintegração destes no processo produtivo visando a redução dos custos, consumo de matéria-prima e a diminuição dos impactos ambientais provocados visto que uma das desvantagens da moldagem por injeção é a grande quantidade de material descartado após a retirada da peça injetada, sob a forma de galhos e canais (4).

É prática comum nas indústrias automobilísticas e de eletrodomésticos a utilização de determinadas porcentagens de material reciclado misturado à virgem. Esta porcentagem de mistura é em função da aceitabilidade dos clientes, estando vinculadas eventuais interferências nas propriedades e reologia do material, bem como as características de aparência, por se tratar de um item estético como uma lente de lanterna automotiva.

Para a execução do trabalho problematizou-se qual a proporção de uso de material reciclado *versus* novo que atende às propriedades mecânicas, térmicas e ópticas para aplicação na fabricação de lentes de lanternas automotivas. Como solução para o problema adotou-se como hipótese realizar a adição de 10% a 50% de PMMA reciclado na produção de corpos de provas objetivando manter as propriedades mecânicas, térmicas e ópticas dentro de um limite aceitável. O estudo endossa a importância da ampliação do ciclo de vida dos materiais e produtos, minimizando assim os impactos ambientais desde a extração de recursos até o descarte final e uma das alternativas para esse prolongamento é a reciclagem (5).

Entre os motivos que justificaram a viabilidade do estudo realizado estão a determinação da máxima fração possível de material reciclado ao material novo, redução de consumo de material virgem e do impacto ambiental.

Materiais e métodos

Equipamentos utilizados

- Balança analítica Shimadzu modelo AW220;
- Estufa de ar quente Fanen, modelo 315 SE;
- Moinho triturador de baixa rotação RONE;
- Injetora convencional SEMERARO;
- Plastômero Dynisco modelo D4002;
- Máquina universal de ensaios Kratos modelo IKCL3-USB
- HDT CEAST modelo 6911;
- Câmara para VICAT Frank modelo KPM/KPV;
- Pêndulo de impacto CEAST Resil Impactor;
- Colorímetro KONICA MINOLTA
- Espectroradiômetro JETI, modelo Specbos 1201M

Matéria prima

PMMA *grade* LEP100 UNIGEL na cor vermelho rubi

Preparação das amostras

Secou-se a resina PMMA em estufa secadora de bandeja com circulação de ar seco, sendo realizado a por um período mínimo de 4 horas com temperatura entre 80 e 85°C por 2 horas a 80°C.

Para obtenção dos corpos de provas em material virgem e material incluso de 10% a 50% de material moído utilizou-se matrizes de injeção plástica mostradas na Figura 1 e diagrama de atividades mostrado abaixo na Figura 2:



Figura 1: Matrizes para obtenção de corpos de provas

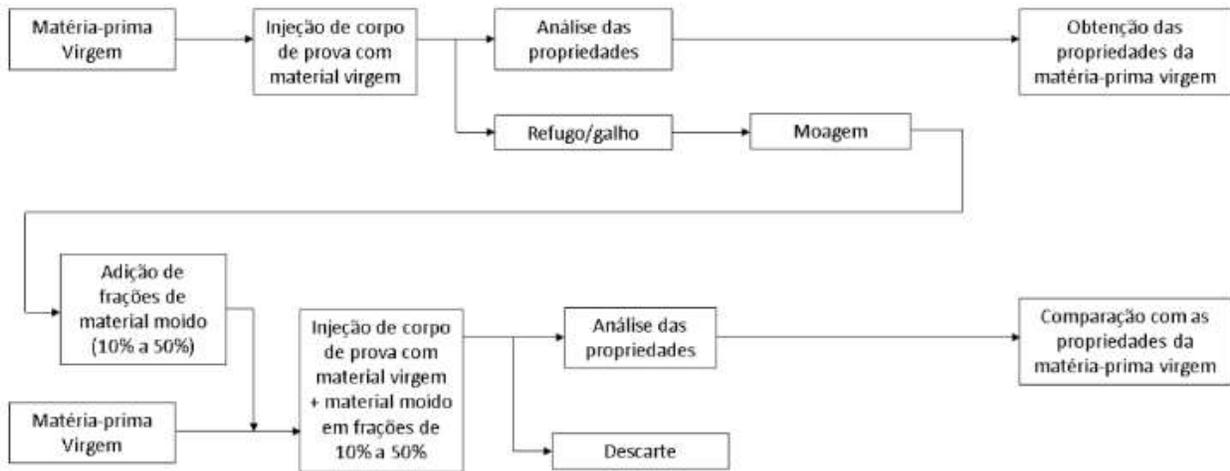


Figura 2: Diagrama de atividades de obtenção dos corpos de provas

Resultados e discussão

Análise do índice de fluidez

A Figura 3 aborda um comparativo dos índices de fluidez conforme norma ASTM D 1238 nas amostras analisadas, onde se avaliou o comportamento do fluxo do material plástico durante o processo no estado fundido. Em se tratando de material reciclado, é importante a familiarização com esta propriedade para obtenção do produto adequado.

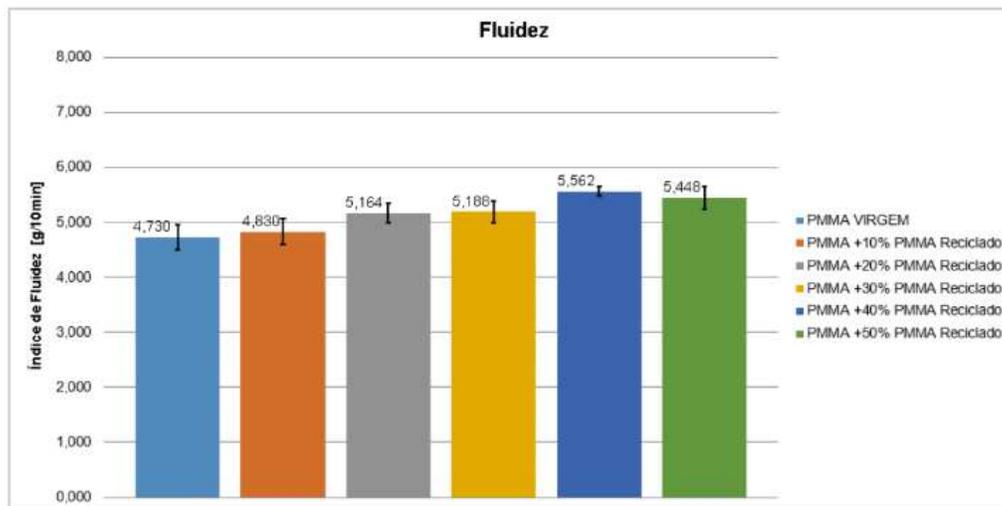


Figura 3: Resultados dos índice de fluidez

Pode-se observar que houve um aumento do índice de fluidez nas amostras com frações de PMMA reciclado de 10% a 50% em relação a amostra de PMMA virgem. Tal fato pode ser resultado da degradação das cadeias poliméricas que são quebradas em partes menores devido serem submetidas novamente ao aquecimento quando o material é reciclado, o que altera seu peso molecular, assim aumentando sua fluidez.

Análise do ensaio de tração e alongamento

As Figuras 4 e 5 abordam respectivamente os resultados de limite de resistência à tração e alongamento do PMMA virgem e com as frações de PMMA reciclado de 10% a 50% conforme norma ASTM D 638:

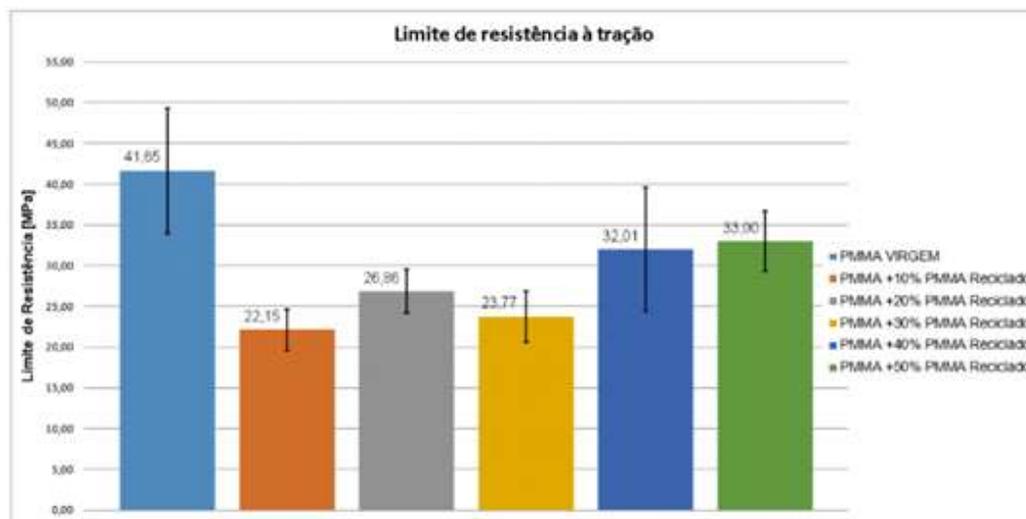


Figura 4: Resultados dos limites de resistência a tração

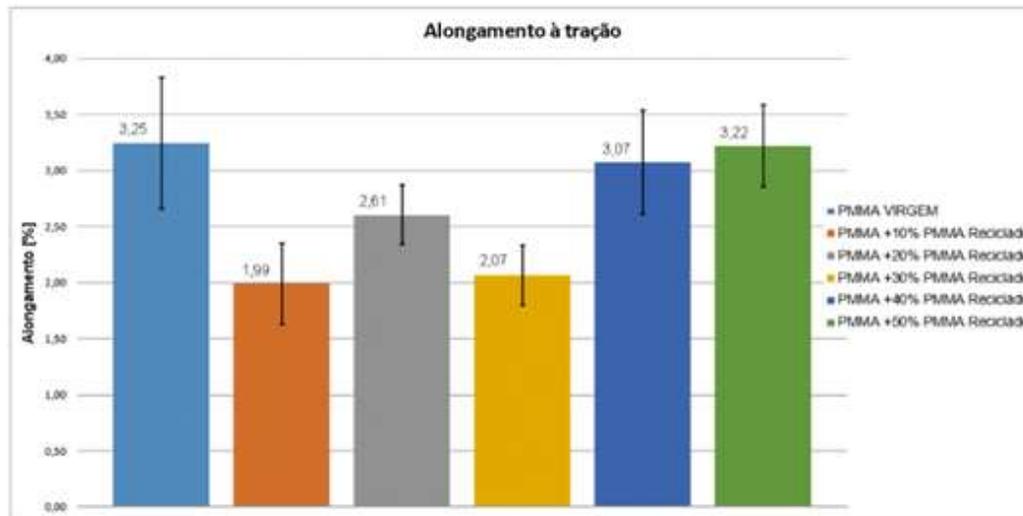


Figura 5: Resultados de alongamento à tração

Pode-se observar que tanto a medição de resistência como o alongamento, o PMMA com as frações de 10% e 30% apresentaram menor resistência a tração e menor alongamento em relação ao PMMA virgem. Tal fato também pode ter ocorrido devido a divergências nos parâmetros de injeção, ocasionalmente podem ocorrer excesso de tensão de injeção, assim como a refrigeração inadequada do molde do corpo de prova, causando um comportamento frágil nos corpos de prova durante o ensaio de tração, o que acarreta um menor alongamento, pois o limite de tensão de ruptura do material é alcançado mais rapidamente.

Análise de resistência ao impacto

Na Figura 6 observa-se o comparativo dos resultados obtidos por ensaio de impacto Izod conforme norma ASTM D 256 que é usado para medir a quantidade de energia absorvida durante um impacto, fator importante para análise de resistência e sensibilidade do material.

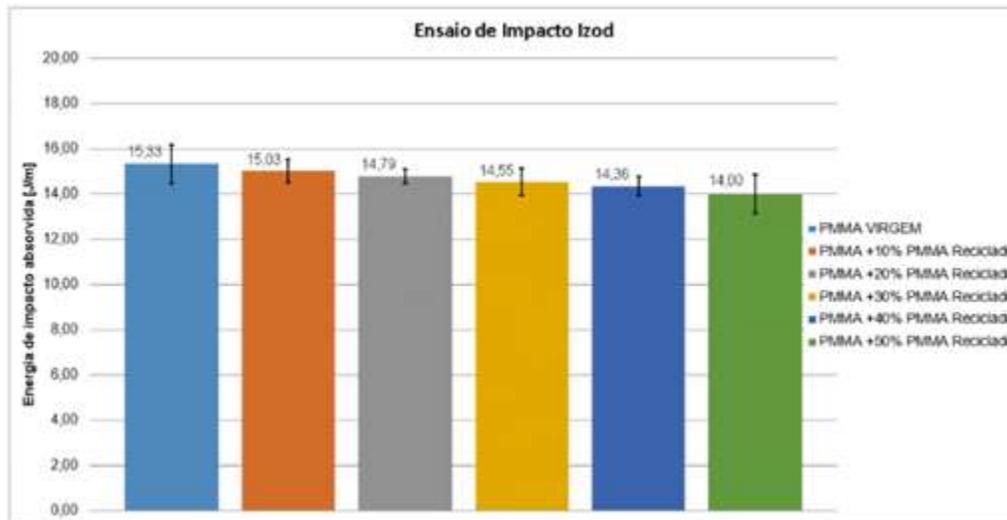


Figura 6: Resultados de resistência ao impacto Izod

Os resultados de impacto método Izod mostraram uma ligeira queda na capacidade de absorção de energia de impacto, conforme a fração de PMMA reciclado foi aumentando, ou seja, podem ter um comportamento levemente frágil como se pode observar na Figura 5. Porém, acredita-se que os resultados estejam dentro de uma tolerância aceitável, pois a variação da energia de impacto absorvida entre os valores máximo e mínimo obtidos está em torno de 9,5%.

Análise de temperatura de deflexão térmica (HDT)

Na Figura 7 observa-se os resultados obtidos por ensaio de HDT conforme norma ASTM D 648 que consiste em registrar o comportamento da amostra a deformação sob flexão quando submetida ao aquecimento constante.

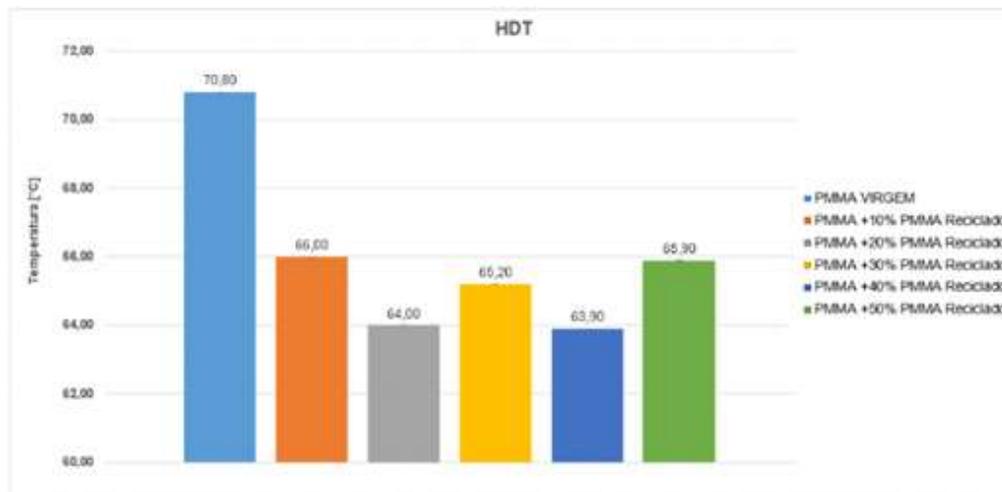


Figura 7: Resultados de temperatura de distorção ao calor (HDT)

Por meio desse ensaio, observou-se que as adições das frações de PMMA reciclado diminuíram em 8,9% a capacidade de deformação sob flexão quando submetido ao aquecimento, esta questão pode ser direcionada pela degradação do PMMA ou a redução de aditivos presentes no polímero. Este fato pode ser devido ao primeiro processamento que o PMMA virgem passou. Quando comparamos as frações de PMMA reciclado adicionado ao PMMA virgem, observa-se que a variação entre as amostras apresenta uma variação média de 3,28%. Esse resultado, de certa forma, já era esperado, uma vez que não é possível afirmar que as amostras possuíam boa homogeneidade na mistura (PMMA virgem + PMMA reciclado) quando injetados nos corpos de prova.

Análise de temperatura de amolecimento VICAT

As temperaturas de amolecimento VICAT forma obtidas conforme norma ASTM D 1525 observando um comparativo dos resultados obtidos com as amostras de PMMA virgem e de frações de 10% a 50% com as cargas padronizadas de 10N a 120°C/h (Figura 8) e de 50N a 50°C/h (Figura 9), respectivamente.

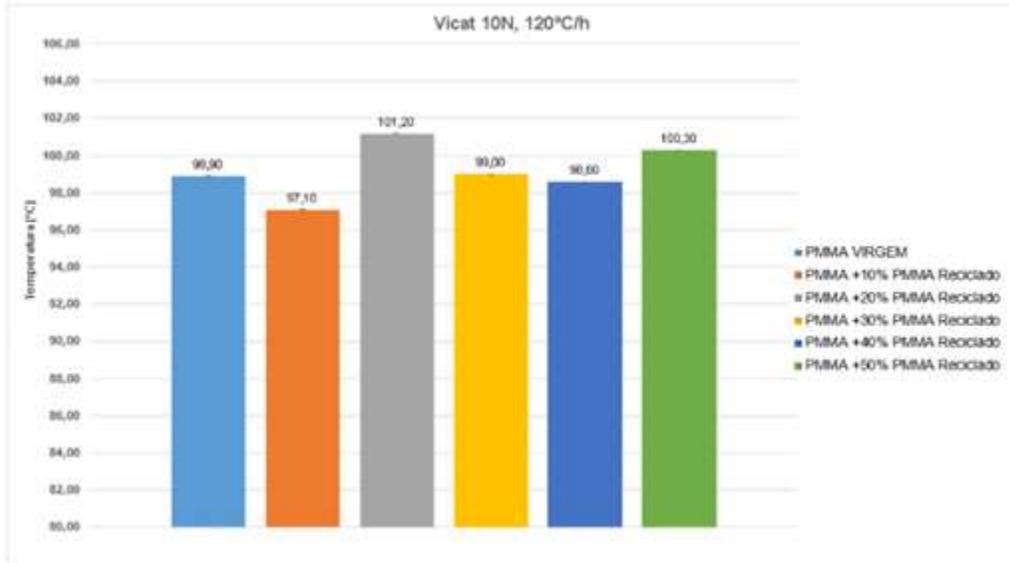


Figura 8: Resultados de temperatura de amolecimento VICAT a 10N a 120°C/h

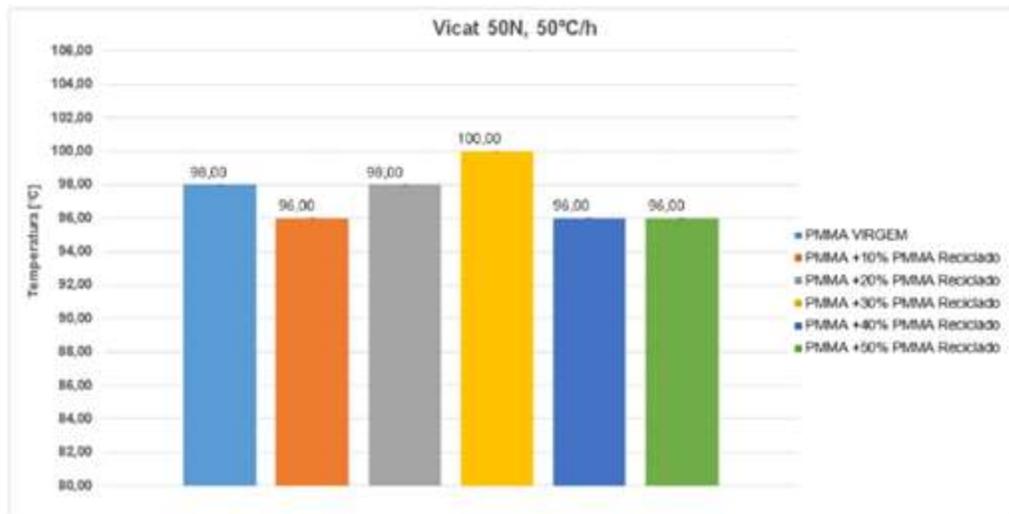


Figura 9: Resultados de temperatura de amolecimento VICAT a 50N a 50°C/h

Pode-se observar que não houve interferência considerável do teor de PMMA moído na mobilidade molecular nas regiões amorfas.

Análise da colorimetria

A colorimetria é a parte da ciência das cores que tem como propósito especificar numericamente a cor de um determinado estímulo visual; também especifica pequenas diferenças de cor que um observador pode perceber. Para analisar as características colorimétricas de lanternas automotivas, leva-se em consideração os testes de acordo com ECE Reg. 48 e CIE $L^*a^*b^*$, onde o parâmetro a cor da luz emitida dentro do campo de distribuição de luz, que deve ser vermelha ou branca e, fora deste campo, não deve ser observada uma variação acentuada de cor. A Tabela 1 mostra, de acordo com ECE Reg. 48 (6), as coordenadas de cromaticidade para luz emitida através da amostra devem estar contidas pelos limites mostrando as condições de contorno para a cor vermelho.

Tabela 1: Coordenadas de cromaticidade

Ponto	X	Y
R1	0,645	0,335
R2	0,665	0,335
R3	0,735	0,265
R4	0,721	0,259

A Figura 10 demonstra o espaço de cor vermelho de acordo com resolução CIE 1931.

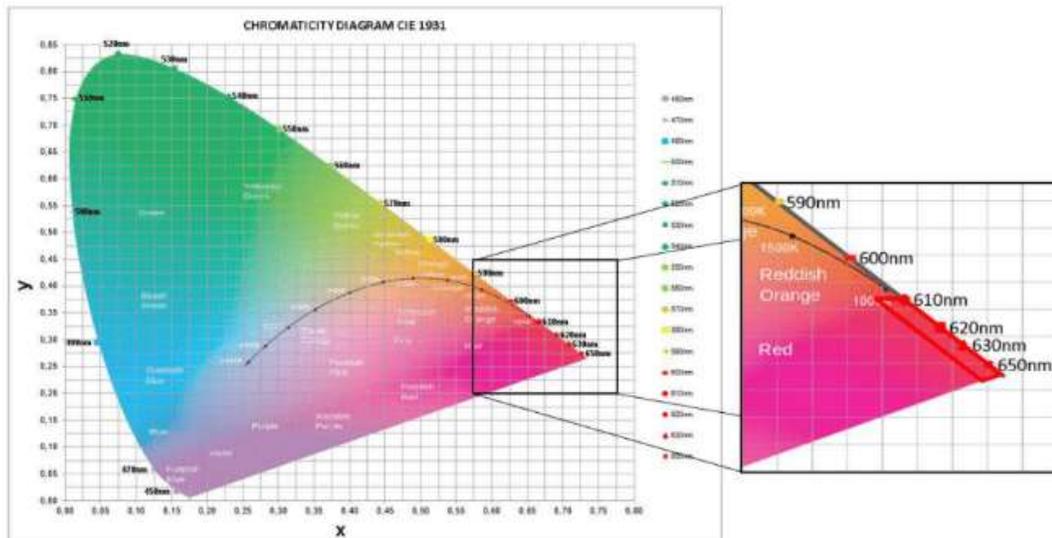


Figura 10: Espaço de cor vermelho

A Figura 11 representa o campo colorimétrico do vermelho de acordo com o ECE Reg. 48 e a Tabela 2 apresenta a síntese dos resultados obtidos:

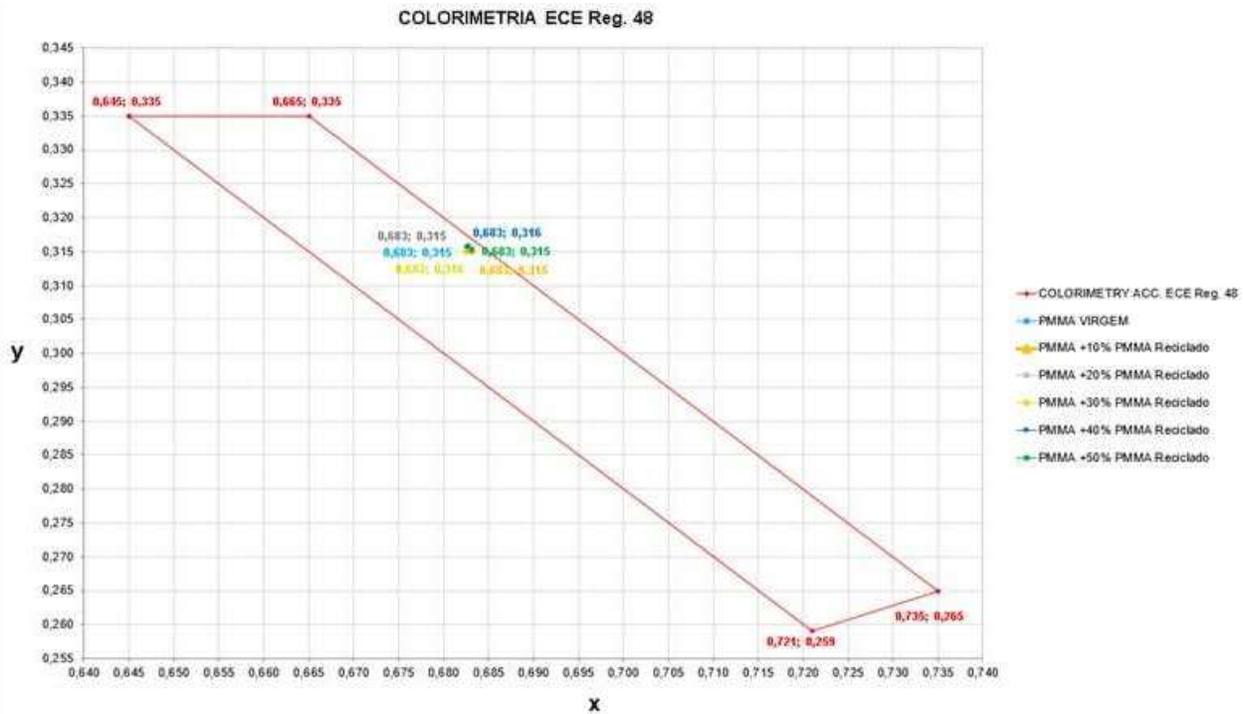


Figura 11: Campo colorimétrico vermelho

Tabela 2: Resultados de colorimetria

	Coordenadas	PMMA VIRGEM	PMMA +10% PMMA Reciclado	PMMA +20% PMMA Reciclado	PMMA +30% PMMA Reciclado	PMMA +40% PMMA Reciclado	PMMA +50% PMMA Reciclado
ECE Reg. 48	x	0,683	0,683	0,683	0,683	0,683	0,683
	y	0,315	0,315	0,315	0,316	0,316	0,315
Comprimento de onda predominante [nm]		616,72	616,72	616,72	616,51	616,51	616,72

De acordo com a Tabela 2, a análise realizada por meio do ensaio de colorimetria ECE Reg. 48 demonstrou que as amostras de com frações de 10% de PMMA reciclado, 20% de PMMA reciclado e 50% de PMMA reciclado não sofreram qualquer impacto significativo em sua cor. As amostras com frações de 30% de PMMA Reciclado e 40% de PMMA reciclado tiveram seus comprimentos de onda levemente alterados, porém a diferença entre as amostras não se mostrou significativa.

O Gráfico 1 representa o campo colorimétrico do vermelho de acordo com CIE $L^*a^*b^*$ e a Tabela 3 a síntese dos resultados obtidos:

Gráfico 1: Campo colorimétrico por coordenadas CIE Lab

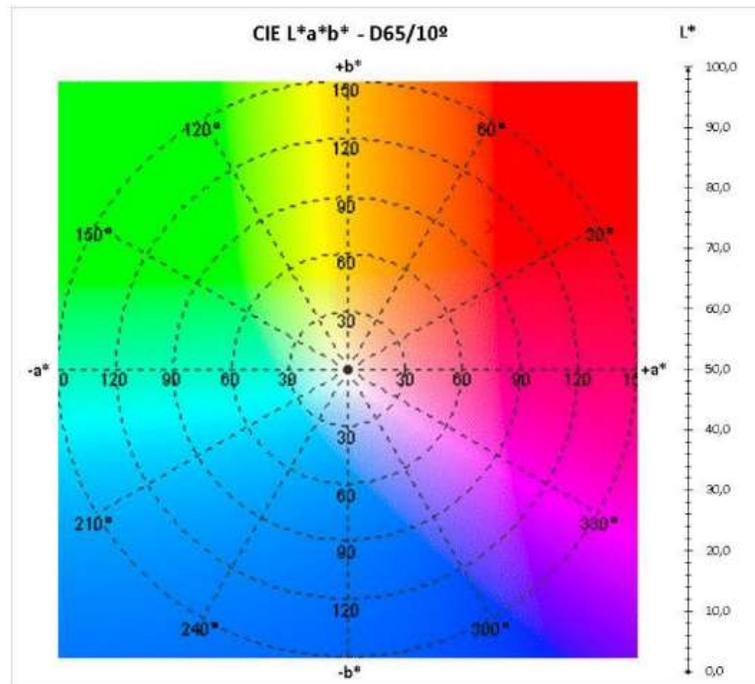


Tabela 3: Resultados obtidos do campo colorimétrico por coordenadas CIE Lab

		PMMA VIRGEM	PMMA +10% Reciclado	PMMA +20% Reciclado	PMMA +30% Reciclado	PMMA +40% Reciclado	PMMA +50% Reciclado
CIE $L^*a^*b^*$	L^*	53,974	53,974	53,974	54,303	54,303	53,974
	a^*	95,432	95,432	95,432	95,881	95,881	95,432
	b^*	91,065	91,065	91,065	91,604	91,604	91,065
	ΔL^*	—	0,000	0,000	0,329	0,329	0,000
	Δa^*	—	0,000	0,000	0,449	0,449	0,000
	Δb^*	—	0,000	0,000	0,539	0,539	0,000
	ΔE	—	0,000	0,000	0,775	0,775	0,000

De acordo com a Tabela 3, a análise realizada por meio do ensaio de colorimetria CIE $L^*a^*b^*$ demonstrou que as amostras com frações de 10% de PMMA reciclado, 20% de PMMA reciclado e 50% de PMMA reciclado não sofreram qualquer impacto significativo em sua cor. As amostras com 30% de PMMA reciclado e com 40% de PMMA reciclado são mais claras, mais

vermelhas e mais amarelas quando comparadas com o PMMA virgem, portanto pode-se concluir que a diferença total da cor não se mostrou significativa entre as amostras.

Análise da transmitância

Considera-se transmitância a fração da luz incidente com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria e que pode ser utilizada para classificar os diferentes tipos anatômicos, já que cada um possui uma capacidade distinta de absorver ou transmitir radiação. A Figura 12 traz o comparativo dos resultados obtidos pelo ensaio de transmitância para as amostras de PMMA virgem e com frações de 10% a 50% de PMMA reciclado

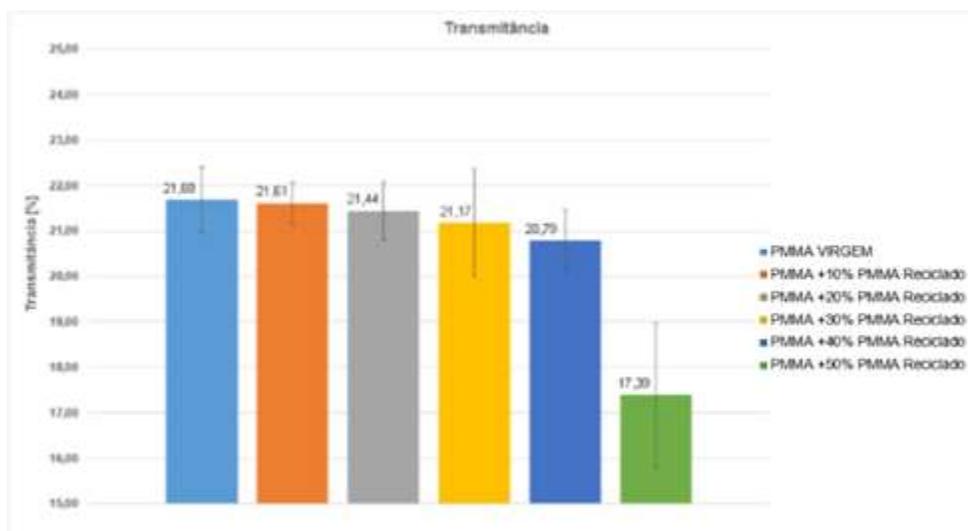


Figura 12: Resultados de transmitância

Pode-se observar que houve uma constante queda nos índices de transmitância das amostras com frações de 10% a 50% de PMMA reciclado em relação à amostra de PMMA virgem, sendo na amostra com fração de 50% de PMMA reciclado a queda mais evidente. Supõe-se que a queda do índice de transmitância é determinada pela “poeira” gerada pelo moído, a qual pode estar sendo queimada no canhão de injeção, causando assim a opacidade das amostras.

Matriz de decisão dos resultados

A avaliação proposta é comparar os resultados obtidos nos ensaios do PMMA virgem com os resultados obtidos das adições de PMMA reciclado ao PMMA virgem e selecionar a fração de PMMA reciclado que tenha as características mais próximas ao PMMA virgem. Para que isto seja possível será utilizada uma matriz de decisão por se tratar de uma ferramenta que possibilita tomar

decisão entre algumas alternativas, ponderando diferentes critérios de avaliação, sendo atribuídas notas de “1 a 5”, sendo que “5” indica que o material satisfaz os critérios exigidos e “1” indica que o material não satisfaz os critérios exigidos, estes critérios baseiam-se na aplicação de confecção de lentes para lanternas automotivas. A Tabela 4 demonstra a avaliação e a definição da fração que corresponde ao PMMA virgem.

Tabela 4: Matriz de decisão

ENSAIOS	PMMA +10% PMMA RECICLADO	PMMA +20% PMMA RECICLADO	PMMA +30% PMMA RECICLADO	PMMA +40% PMMA RECICLADO	PMMA +50% PMMA RECICLADO
Fluidez	1	2	2	5	4
Densidade	5	5	5	4	4
Resistência à tração	1	3	2	4	5
Alongamento	1	3	2	4	5
Resistência ao impacto IZOD	5	4	3	2	1
Temperatura de Deflexão Térmica	5	1	3	2	4
Temperatura de Amolecimento Vicat (10N, 120°C/h)	1	5	3	2	4
Temperatura de Amolecimento Vicat (50N, 50°C/h)	3	4	5	3	3
Colorimetria	5	4	3	2	1
Transmitância	5	4	3	2	1
Aparência	5	4	3	4	2
AVALIAÇÃO FINAL	37	39	34	34	34
MATERIAL APROPRIADO	2	1	5	4	3

Observando a matriz de decisão a fração de PMMA reciclado possível para o uso no reprocessamento com pequenas variações, porém aceitáveis são de 10% a 20% e assim, será adotado por um coeficiente de 15% de PMMA reciclado para o uso no reprocessamento, conforme demonstra a Tabela 5 comparando consumo estimado vs. redução e perdas para o período de setembro de 2017 a fevereiro de 2018 e a Tabela 6 mostrando a redução efetiva de consumo de PMMA:

Tabela 5: Dados de consumo de matéria prima vs. redução de perdas



	CONSUMO DE MATÉRIA-PRIMA [kg]/mês					
	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
Produtividade	6761,83	7643,77	4115,87	2939,91	3821,88	4115,87
Perda	420,31	475,02	255,78	182,69	237,56	255,78
Adição de PMMA reciclado	15%					
Aumento de produtividade	6845,90	7738,77	4167,03	2976,45	3869,39	4167,03
Redução das perdas	336,25	380,02	204,62	146,16	190,04	204,62

Tabela 6: Dados de redução do consumo de matéria prima

	REDUÇÃO DE CONSUMO DE MATÉRIA-PRIMA [kg]/mês					
	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
Perda	420,31	475,02	255,78	182,69	237,56	255,78
Redução das perdas	336,25	380,02	204,62	146,16	190,04	204,62
Redução efetiva das perdas	84,06	95,00	51,16	36,54	47,51	51,16
Redução total no período	365,43					

Conclusão

De acordo com a matriz de decisão elaborada, a fração de PMMA reciclado possível para o uso no reprocessamento com pequenas variações, porém aceitáveis é de 10% a 20%. Com base nos estudos e parâmetros abordados, é possível a obtenção de uma redução no consumo de PMMA de 365,43 kg no período analisado, utilizando-se de 15% de PMMA reciclado, gerando uma redução de consumo de 20% no mesmo período. Em se visualizando escala industrial, o ão da faixa de reutilização do material moído.

Tal atividade de reaproveitamento de matéria prima plástica é amplamente usada na indústria de transformação porém ainda muito se faz necessário a aplicação de estudos de viabilidade pautados em experimentos que deem abrangência e familiaridade às aplicações de cada matéria prima.

Considerações finais

Este trabalho teve como propósito elucidar informações e dados comparativos dos efeitos da incorporação de PMMA moído ao material virgem em diferentes percentuais, bem como promover a caracterização das misturas e estabelecer um critério de utilização segura em atendimento às necessidades finais do produto lanternas automotivas.



Agradecimentos

Os autores agradecem à Faculdade SENAI de Tecnologia e ao ISI – Instituto SENAI de Inovação pelo incentivo e disponibilidade de uso dos equipamentos de laboratório.

Referências

- (1) VIEIRA, A. *et al.* **Polimetilmetacrilato**. 2006. 14f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade Engenharia Química, Universidade de Aracruz, Espírito Santo, 2006.
- (2) RIBEIRO, L. A. **Efeito de argilas organofílicas na estrutura e propriedades de nanocompósitos de poli (metacrilato de metila)**. 2013. 199 f. Dissertação (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- (3) MORAES, R. de. **Acrílicos: aprimoradas, as resinas expandem aplicações, acirram a disputa com o poliestireno e o policarbonato e elevam o consumo do polimetacrilato de metila**. 2007. Disponível em: <<http://www.plastico.com.br/plastico/14389/>>. Acesso em: 31 maio 2016
- (4) MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 208 p.
- (5) VIDALES, L. T. *et al.* **Blendas PC/PMMA como alternativa para reciclagem de óculos apreendidos pela Receita Federal do Brasil**. Florianópolis: [s.n.], 2013. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/81833/000901671.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- (6) Resolução ECE 48 **Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled Vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions**. Disponível: em <<http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs41-60.html>> Acesso em 10 de maio de 2018



Abstract. Polymers are considered major environmental villains because they have a slow degradation, occupy a considerable volume in landfills and when incorrectly discarded they cause an even greater impact to the environment. This work studied the recovery of PMMA residues from automotive lanterns through recycling, forming compounds with fractions of virgin and recycled PMMA, aiming at reducing the cost and consumption of raw material, as well as reducing environmental impacts. The study adopted additions of 10% to 50% of recycled PMMA in the production of test bodies for conducting the tests for analysis and comparison of mechanical, thermal and optical properties and discussed the potential of application in the market. According to the decision matrix that was elaborated, the fraction of recycled PMMA that proved suitable for reprocessing with small but acceptable variations was 10% to 20%. The study pointed out that it is possible to obtain a reduction in PMMA consumption using the 15% fraction of recycled PMMA, generating a 20% reduction in consumption in the analyzed period.