

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO LAMINADO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS DE GARRAFA PET

Daniel Goretti Leporate Barroso, danielgoretti@ufs.br¹
Túlio Hallak Panzera, panzera@ufs.br¹
Lincoln Cardoso Brandão, Lincoln@ufs.br¹
André Luis Christoforo, alchristoforo@ufs.br¹
Antonio Luis Ribeiro Sabariz, sabariz@ufs.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica - DEMEC, Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ, Campus Sto Antônio, Praça Frei Orlando 170, São João del-Rei, MG, 36.307-352, Brasil.

Resumo: A quantidade de embalagens e produtos descartáveis aumentou significativamente nas últimas décadas. Os plásticos usados em embalagens industriais, principalmente em garrafas e sacolas, apresentam um perigo ao meio ambiente devido a seu longo período de biodegradabilidade. A adição de fibras sintéticas em diferentes classes de materiais tem sido o foco de inúmeras pesquisas, tornando esta uma boa alternativa para reciclagem de resíduos plásticos. Este trabalho consiste na investigação do efeito da adição de fibras de garrafa PET e partículas de sílica em compósitos poliméricos de matriz epóxi. O planejamento fatorial completo (DOE) do tipo 2^3 foi utilizado na investigação dos fatores: adição de partículas de sílica, largura e fração volumétrica da fibra de PET, sobre as propriedades físico-mecânicas dos compósitos, entre elas, densidade volumétrica, resistência à tração e módulo de elasticidade. Os compósitos desenvolvidos exibiram propriedades satisfatórias, viabilizando a reutilização de garrafas PET em materiais sustentáveis para várias áreas da engenharia.

Palavras-chave: compósito laminado, fibra de PET, sustentabilidade, propriedades mecânicas

1. INTRODUÇÃO

Os plásticos usados em embalagens industriais, principalmente em garrafas e sacolas, representam um perigo ao meio ambiente devido a seu longo período de biodegradabilidade (Satapathy, 2008). A rentabilidade do mercado de reciclagem de embalagens plásticas no Brasil, assim como em outros países desenvolvidos, mostra aspectos atraentes para iniciativas empresariais do setor, com reflexos sócio-econômicos diretamente relacionados com a melhoria da qualidade de vida da população, geração de renda, economia de recursos naturais e atenuação de problemas ambientais (Forlin, 2002).

O politereftalato de etileno (PET) foi desenvolvido em 1941 pelos químicos ingleses Whinfield e Dickson. Na década de cinquenta, este polímero começou a ser pesquisado em laboratório, e somente na década de setenta passou a ser utilizado pela indústria de embalagens. No Brasil, o PET chegou em 1988, mas somente a partir de 1993 começou a ter importância no mercado de embalagens (ABIPET, 2009). O PET é um polímero termoplástico que possui resistência ao impacto moderada, além de baixa porosidade, proporcionando uma excelente barreira para gases e odores. O PET é o produto ideal para o armazenamento de bebidas, e por isso, é utilizado em larga escala pela indústria alimentícia. Outra vantagem do PET é o seu baixo peso específico, o que reduz os custos com transporte, e como consequência reduz também o preço final ao consumidor. (ABIPET, 2009)

Num país emergente, com uma população de cerca de 3 milhões de habitantes são produzidos cerca de 400 toneladas de resíduos plásticos por dia. Para resolver este problema, a melhor opção seria promover a reciclagem deste material através de processos mecânicos ou termo-mecânicos. Em 2008, 54,8% do total de resina PET produzidas no Brasil foi reciclada, isto representa um montante de 253 mil toneladas das 462 mil toneladas produzidas, e coloca o Brasil na segunda colocação do ranking mundial de reciclagem de PET, ficando atrás somente do Japão (CEMPRE, 2009).

A adição de fibras sintéticas em diferentes classes de materiais como cerâmicos e polímeros surge como uma boa opção de processo de reciclagem de resíduos plásticos (Satapathy, 2008). A adição de fibras curtas em uma matriz de HDPE (polietileno de alta densidade) aumentou a resistência mecânica do polímero, tornando esta uma alternativa viável para reuso do material (Ávila, 2002).

Muitos pesquisadores tem utilizado o PET como matriz de compósitos laminados ou particulados. Dá-se o nome de compósito laminado, àqueles cuja fase dispersa está na forma de fibra, e de compósito particulado, àqueles cuja fase dispersa está na forma de partículas (Daniel e Ishai, 2006).

A utilização do PET como reforçador em materiais compósitos laminados tem sido investigado nos últimos anos. De acordo com Satapathy (2008), as fibras de PET apresentam baixa densidade, alta tenacidade, resistência ao impacto, além de sua resistência à abrasão. Araújo (2007) investigou um compósito de matriz poliéster ortoftálica reforçado com tecido unidirecional de fibras de garrafa PET confirmando sua elevada capacidade na absorção de energia.

Este trabalho investiga os efeitos dos fatores espessura da fibra de PET (2 e 4mm), fração volumétrica da fibra de PET (30 e 50% de fibra), e adição de sílica (com e sem adição), sobre as propriedades físico mecânicas, entre elas, densidade volumétrica, resistência à tração e módulo de elasticidade de compósitos laminados com matriz epóxi. O planejamento fatorial completo (DOE) do tipo 2^3 foi utilizado na realização do experimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As fibras de PET foram obtidas através da usinagem de garrafas de refrigerante de 2L utilizando um dispositivo de corte e um torno convencional. As garrafas de PET foram coletadas na Associação de Catadores de Materiais Recicláveis de São João del Rei – MG (ASCAS). As partículas de sílica utilizadas como fase dispersa na matriz polimérica foram cedidas pela empresa Moinhos Gerais Ltda, situada em Ribeirão Vermelho-MG. As partículas de sílica foram secas em estufa a 80°C por 24hs e posteriormente classificadas por peneiramento na faixa granulométrica de 150 a 200 US-Tyler. A Tabela (1) exibe a análise química das partículas de sílica, verificando um alto teor de SiO₂.

Tabela 1. Análise química das partículas de sílica.

Componente químico	(%)
SiO ₂	99,80
Fe ₂ O ₃	0,024
Al ₂ O ₃	0,030
TiO ₂	0,010
CaO	0,030
MgO	0,010
K ₂ O	0,005
P ₂ O ₅	0,005
pH	6,4

A fase matriz é constituída de duas partes: a resina epóxi (RQ-0100RF) e o catalisador (RQ-0164RF PLUS), misturados nas proporções de 66,7% e 33,3%, respectivamente, conforme especificação do fabricante Alpha Resiqualy.

Dentre os valores de maior relevância e possíveis de serem controlados no experimento foram escolhidos três, entre eles: fração volumétrica de fibra de PET (30 e 50%), largura da fibra de PET (2 e 4mm) e adição de partículas de sílica (com e sem). O percentual de sílica adicionado foi de 10% em massa sobre a quantidade de resina. Os fatores mantidos constantes nos experimentos foram: temperatura de fabricação (~22°C), tipo de matriz (epóxi), tempo de cura (7 dias) e coloração da fibra de PET (transparente).

O planejamento fatorial completo (DOE) do tipo 2³ fornece oito combinações experimentais (ver Tab.(2)) distintas, permitindo investigar o efeito dos fatores principais individualmente e suas interações. As variáveis respostas investigadas neste experimento foram três: densidade volumétrica, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Tabela 2. Planejamento Fatorial Completo, do tipo 2³.

Condições Experimentais	Fração volumétrica de Fibra (%)	Largura da fibra de PET (%)	Adição de partículas de sílica
C1	30	2	Sem
C2	50	2	Sem
C3	30	2	Com
C4	50	2	Com
C5	30	4	Sem
C6	50	4	Sem
C7	30	4	Com
C8	50	4	Com

Após a obtenção das fibras de PET, utilizou-se um tear de madeira para orientar as fibras de PET em uma única direção, e posteriormente adotou-se o método manual de laminação (ver Fig. (1)) para fabricação dos corpos de prova. Um tecido de nylon/teflon (Armalon) foi utilizado para garantir o acabamento superficial e a desmoldagem da lâmina compósita.



Figura 1. Tecelagem e laminação das fibras de PET.

Após o período de cura de 7 dias, a lâmina foi cortada nas dimensões 250mm de comprimento e 10mm de largura para obtenção de corpos de prova para o ensaio de tração, conforme recomendações da norma Britânica BS2561 (1995). Cinco corpos de prova foram fabricados para cada condição experimental. Considerando a adoção de duas réplicas, e a existência de oito condições experimentais, foram fabricados 80 corpos de prova.

A réplica consiste na repetição da condição experimental, proporcionando a estimativa do erro experimental de uma resposta individual. A extensão desse erro é importante na decisão se existem ou não efeitos significativos que possam atribuir à ação dos fatores (Werkema e Aguiar, 1996). O software estatístico Minitab versão 14 foi utilizado para o tratamento dos dados utilizando a ferramenta *Design of Experiment* (DOE) e Análise de variância (ANOVA).

3. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para as médias das variáveis respostas investigadas. Os fatores relacionados a P-valor menor ou igual a 0,05 (95% de confiabilidade) são considerados significativos. O efeito principal de um fator deve ser interpretado individualmente apenas se não há evidência de que o fator não interage com outros fatores. Quando um ou mais efeitos de interação de ordem superior são significativos, os fatores que interagem devem ser considerados conjuntamente (Werkema e Aguiar, 1996). Os P-valores sublinhados na Tab. (3) exibiram efeito significativo sobre as variáveis respostas investigadas e serão discutidos nos parágrafos subsequentes.

O valor de R^2 adjunto exibido na ANOVA mede a proporção da variabilidade presente nas observações da variável resposta e que é explicada pelas variáveis preditoras presentes na equação de regressão. Quanto mais próximo de 100% for R^2 , melhor a qualidade da equação ajustada aos dados (Werkema e Aguiar, 1996). Os valores de R^2 ajustado das variáveis respostas, densidade volumétrica, módulo de elasticidade e resistência à tração, foram respectivamente de 82,18%; 78,98% e 93,18%, indicando que a qualidade de ajuste dos modelos foram satisfatórias.

Tabela 3. Análise de variância (P-valor)

ANOVA		P-valor $\leq 0,05$		
	<i>Fatores experimentais</i>	Densidade volumétrica (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Fatores Principais	<i>Largura da Fibra</i>	0,001	<u>0,012</u>	0,019
	<i>Adição de Sílica</i>	0,391	0,323	0,000
	<i>Fração Volumétrica da Fibra</i>	0,459	<u>0,005</u>	0,065
Interação de Fatores	<i>Largura da Fibra*adição de fibra</i>	<u>0,026</u>	0,190	0,576
	<i>Largura da Fibra*fração volumétrica</i>	0,107	0,976	<u>0,001</u>
	<i>Adição de Sílica*fração Volumétrica</i>	0,802	0,481	<u>0,011</u>
	<i>Fração volumétrica*Largura da Fibra*Adição de Sílica</i>	0,231	0,405	0,073
	<i>R² (adjunto)</i>	82,18%	78,98%	93,18%

Os resultados obtidos na ANOVA são mostrados nos gráficos de “efeitos principais” e de “interações”. Os gráficos de “efeitos principais” são usados para comparar as variações no nível da média, investigando quais fatores possuem efeito significativo sobre a variável-resposta. Gráficos de interações são usados para visualização do efeito de interação de dois ou mais fatores experimentais sobre a variável resposta e comparar a significância relativa entre os efeitos (Werkema e Aguiar, 1996).

3.1 Densidade volumétrica

Os valores de densidade volumétrica dos compósitos variaram de 1,02 a 1,23 g/cm³. O P-valor (0,026) sublinhado na Tab. (3) mostra que a interação dos fatores “largura da fibra de PET e adição de sílica” afetam significativamente a densidade volumétrica dos compósitos. A Figura 2 exibe o gráfico de resíduos de distribuição normal para a variável resposta densidade volumétrica, mostrando uma adequada distribuição dos pontos ao longo da reta, validando a análise estatística realizada.

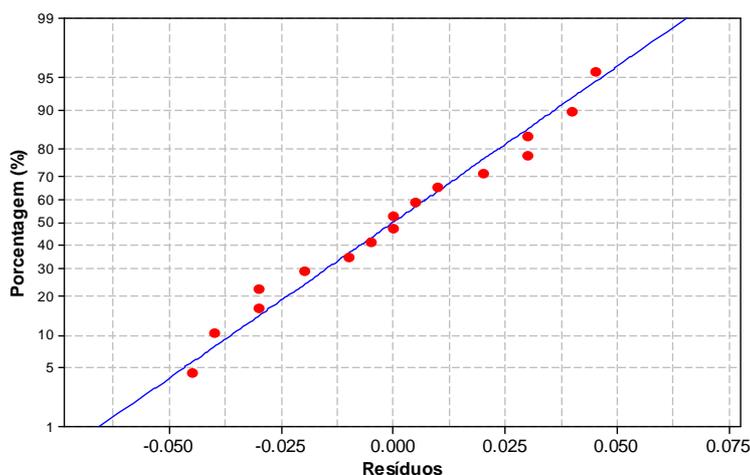


Figura 2. Gráfico de resíduos de distribuição normal para a densidade volumétrica.

Verifica-se no gráfico da Fig. (3) que os compósitos fabricados com fibras de PET de largura de 4mm exibiram uma densidade volumétrica superior àqueles de largura de 2mm. Este comportamento pode ser atribuído à diferença de densidade aparente entre a fase dispersa de PET (~1,10g/cm³) e a fase matriz epóxi (~1,15g/cm³). Os compósitos laminados com fibras de 2mm de largura exibem uma maior região de interface matriz/fibra, reduzindo a quantidade de fibras por área, e conseqüentemente diminuindo significativamente sua densidade volumétrica em comparação aos compósitos com fibras de 4mm de largura. Observou-se que a adição de partículas de sílica aumenta a densidade volumétrica dos compósitos laminados com fibra de 4mm. A explicação para este comportamento não é tão evidente, entretanto, observou-se um espalhamento mais homogêneo da matriz particulada sobre a superfície das lâminas fabricadas com 4mm de largura, reduzindo a espessura da lâmina e por sua vez aumentando a densidade final dos compósitos.

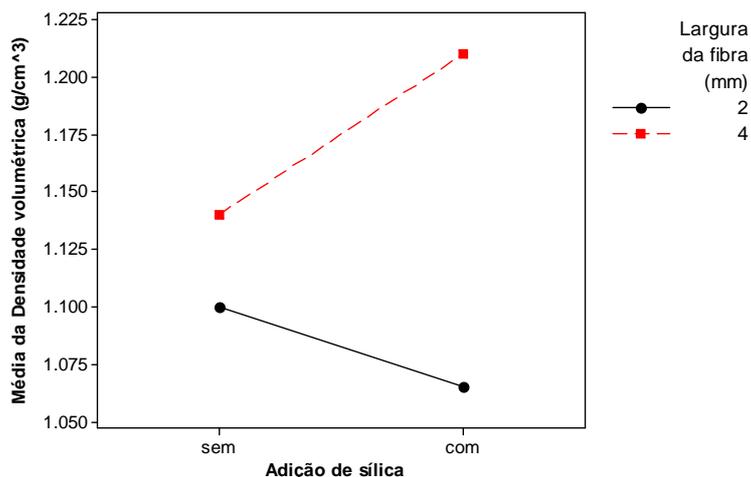


Figura 3. Efeito da interação largura da fibra de PET e adição de sílica sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos.

3.2 Resistência à tração

Os valores de resistência à flexão dos compósitos variaram de 34,35MPa a 50,38MPa. Os efeitos principais dos fatores “largura e fração volumétrica da fibra” afetam significativamente a resistência à tração dos compósitos. Os pontos distribuídos ao longo da reta do gráfico de resíduos validam as condições de normalidade dos dados investigados de resistência mecânica (Fig. (4)).

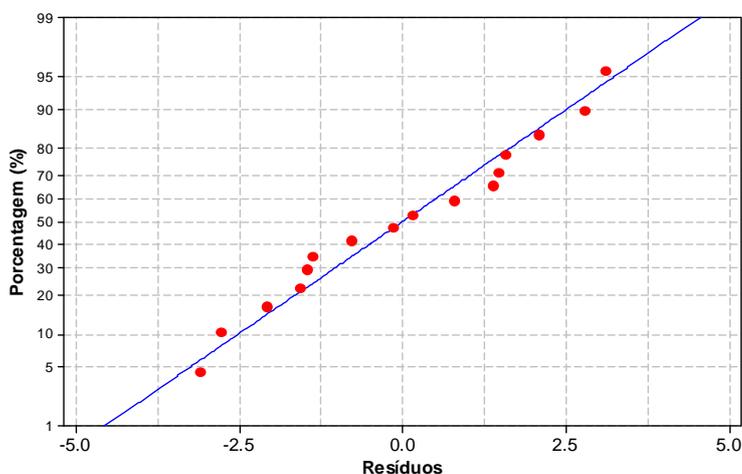


Figura 4. Gráfico de resíduos de distribuição normal para a resistência a tração.

A Figura 5 exibe o gráfico de efeito principal do fator “fração volumétrica de fibra de PET” para a variável resposta resistência à tração. A redução excessiva do percentual de fase matriz nos compósitos pode implicar diretamente na distribuição das tensões ao longo do material, além de diminuir a adesão matriz/laminado. O aumento da fração volumétrica de fibra de 30% para 50% acarretou na diminuição percentual média de 13,17% sobre a resistência à tração, o que pode ser atribuído às condições de interface matriz/laminado, devido à redução volumétrica da fase matriz de 40%.

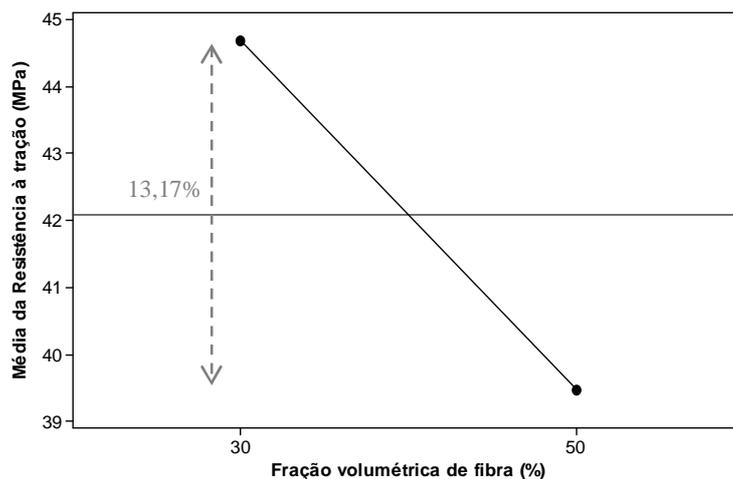


Figura 5. Efeito principal da fração volumétrica de fibra sobre a média da resistência à tração dos compósitos.

Os compósitos fabricados com fibras de PET de largura de 4mm exibiram um aumento percentual da resistência à tração de 11% em comparação àqueles com 2mm de largura (ver Fig. (6)). A resistência mecânica está, na maioria das vezes, relacionada com a densidade específica apresentada pelos materiais. Observa-se nos gráficos das Fig. (6) e Fig. (3) que os compósitos de maior densidade e resistência são aqueles fabricados com as fibras de PET de 4mm de largura, confirmando esta correlação. As fibras mais estreitas (2mm) exibem uma maior região de interface matriz/fibra por área, o que pode ter contribuído na redução da resistência à tração.

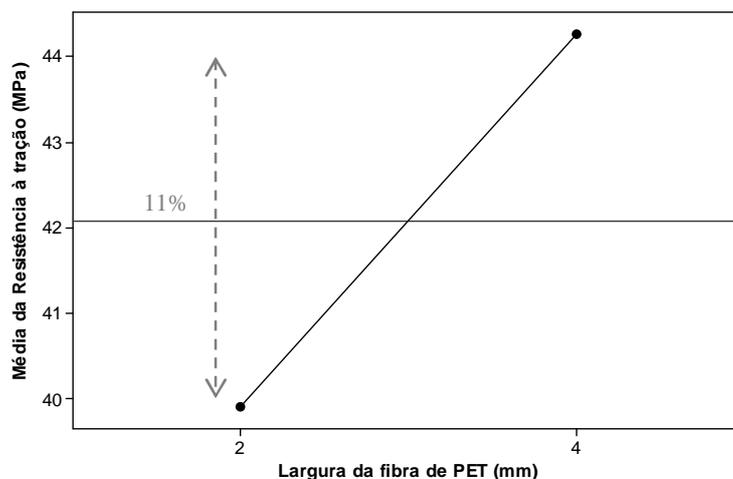


Figura 6. Efeito principal da largura da fibra sobre a média da resistência à tração dos compósitos.

3.3 Módulo de elasticidade

Os valores de módulo de elasticidade dos compósitos variaram de 0,78GPa a 1,40GPa. Os P-valores sublinhados na Tab. (3) mostram que as interações entre a “fração volumétrica de fibra e adição de sílica” e a “fração volumétrica de fibra e largura de fibra” exibem efeito significativo sobre o módulo de elasticidade. A Figura 7 exibe o gráfico de resíduos de distribuição normal para os dados de módulo de elasticidade, mostrando uma distribuição satisfatória dos pontos ao longo da reta, validando a análise estatística realizada.

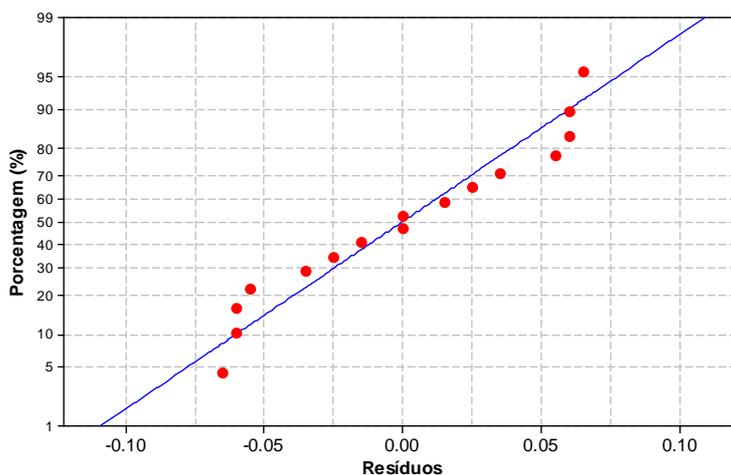


Figura 7. Gráfico de resíduos de distribuição normal para a resistência a tração.

A Figura 8 exibe o gráfico de interação dos fatores “fração volumétrica de fibra e adição de sílica”. É possível observar que a adição de sílica promoveu o aumento do módulo de elasticidade dos compósitos, reduzindo também o efeito da queda de resistência mecânica atribuído ao aumento da fração de fibra de PET. Por outro lado, os compósitos fabricados sem adição de sílica tiveram um comportamento similar ao da resistência à tração (Fig. (5)), os quais exibiram uma diminuição da resistência em função do aumento da fração volumétrica de fibras de PET nos compósitos.

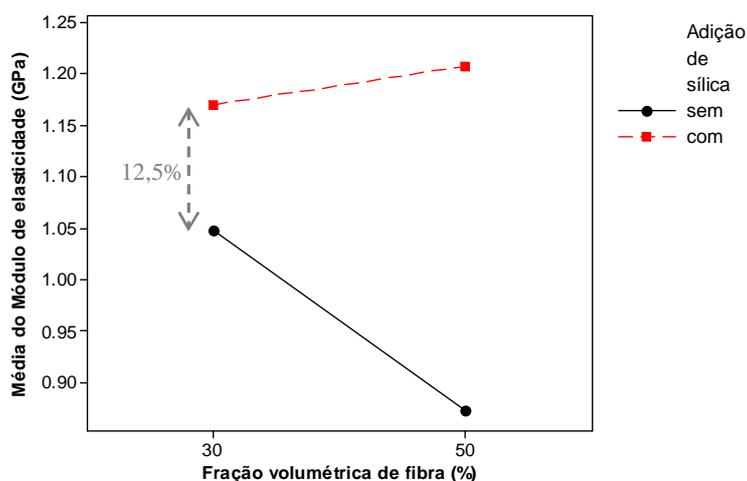


Figura 8. Efeito da interação fração volumétrica e adição de sílica sobre a média do módulo de elasticidade dos compósitos.

O efeito de interação dos fatores “fração volumétrica e largura da fibra de PET” sobre o módulo de elasticidade dos compósitos está mostrado no gráfico da Fig. (9). Nota-se para o nível alto de fração volumétrica de fibra (50%) um comportamento oposto entre os compósitos fabricados com 2 e 4mm de largura. Assim como verificado para a resistência à tração (Fig. (6)), a fibra de 4mm promoveu uma maior resistência e módulo de elasticidade dos compósitos. Este comportamento indica que o fator largura da fibra de PET influencia na condição de interface matriz/fibra, implicando na variação do módulo de elasticidade em função da adesão entre as fases constituintes.

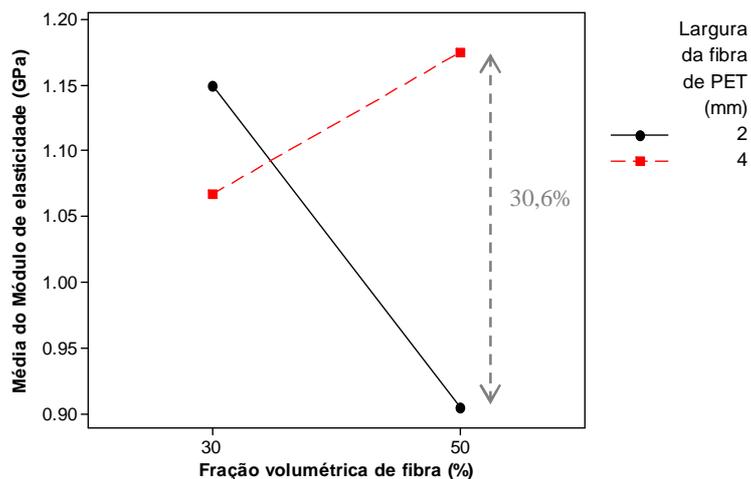


Figura 9. Efeito da interação fração volumétrica e largura da fibra de PET sobre a média do módulo de elasticidade dos compósitos.

3.4 Comportamento Mecânico

O gráfico tensão deformação apresentado na Fig. (10), mostra o comportamento mecânico dos compósitos sob ensaio de tração. Os compósitos C1, C2, C3 e C4 apresentaram uma maior tenacidade em relação às outras condições experimentais. Estes compósitos possuem uma lâmina composta por fibras de PET de 2mm de largura. Além disso, os compósitos C3 e C4 exibiram uma tenacidade ainda superior, sendo estes fabricados com a adição de sílica. Embora os compósitos constituídos de fibra de PET de 2mm apresentarem uma resistência mecânica e módulo de elasticidade (Fig. (6)) inferiores, os mesmos exibiram uma maior tenacidade. Contudo, as condições C7 e C8 fabricadas com fibras de PET de 4mm de largura apresentaram um comportamento pouco tenaz. A influência desses fatores sobre a tenacidade dos compósitos laminados será investigada em trabalhos futuros através da realização de ensaios de impacto (Charpy).

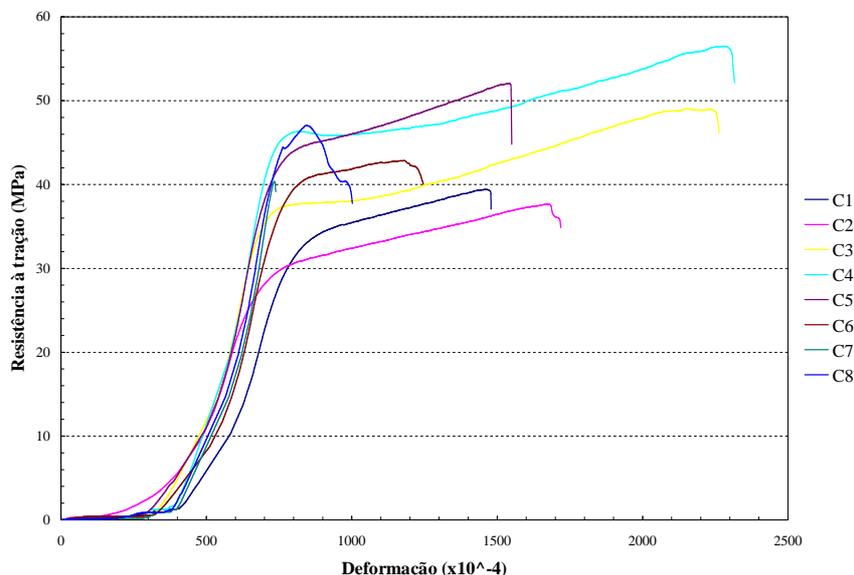


Figura 10. Comportamento mecânico dos compósitos sob ensaio de tração.

4. CONCLUSÃO

O trabalho realizado investigou o efeito dos fatores fração volumétrica e largura de fibras de PET e adição de partículas de sílica nas propriedades mecânicas de compósitos laminados de matriz polimérica. Conclui-se que a fração volumétrica de fibra de 30% apresentou uma resistência superior à fração de 70%, podendo este comportamento ser atribuído a escassez de matriz na zona de transição matriz/fibra. Os compósitos fabricados com fibras de PET de 4mm

de largura exibiram densidade, resistência mecânica e módulo de elasticidade superiores às fibras de 2mm de largura. Por outro lado, as fibras de 2mm de largura apresentaram maior tenacidade no ensaio de tração. A adição de sílica na matriz polimérica mostrou ser eficaz no aumento do módulo de elasticidade e tenacidade dos compósitos. Finalmente, a condição experimental C7, constituída de 30% de fibras de PET de 4mm de largura com adição de sílica, exhibe o melhor desempenho mecânico.

5. REFERÊNCIAS

- ABIPET, 2009, Acesso em 28 de Janeiro de 2009, disponível em ABIPET: <http://www.abipet.org.br>.
- Ávila A.F., Duarte, M. V., 2002, "A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites", Polymer Degradation and Stability, Vol. 80, pp.373-382.
- Araújo, L. G., Costa, A. F., Dias, M. B., & Felipe, R. C., 2007, "Comparação Entre as Propriedades Mecânicas de um Compósito Híbrido Formado por um tecido de PET/Fibra de Vidro E/Poliéster com um Compósito Constituído por Poliéster/Fibra de Vidro E.", Anais do Congresso de Pesquisa da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica - Connepi 2007, João Pessoa – PB.
- Askeland, D. R., 2008, "Ciência e Engenharia dos Materiais", São Paulo: Cengage Learning.
- ASSINTECAL, 2009, Acesso em 28 de Janeiro de 2009, disponível em ASSINTECAL: http://ww3.assintecal.org.br/page_noticias.php?title=Reciclagem+de+PET+j%E1+movimenta+R%24+1+bilh%E3o&ckey=f7df5377da3b5ac037baffd76351093d&wts=MDAwMDAwMTAzNw.
- Callister, J. W. D., 2002, "Materials Science and Engineering: an Introduction", New York: John Wiley & Sons.
- CEMPRE, 2009, Acesso em 28 de Janeiro de 2009, disponível em CEMPRE: http://www.cempre.org.br/fichas_técnicas.php?lnk=ft_pet.php.
- CEMPRE, 2008, Acesso em 28 de Janeiro de 2009, disponível em CEMPRE: http://www.cempre.org.br/ciclosoft_2008.php.
- Daniel, I. M., Ishai, O., 1994, "Engineering mechanics of composite materials", New York: Oxford University Press.
- Forlin, F.J.J., 2002, "Considerações sobre a reciclagem", Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 12, pp. 1-10.
- Satapathy, S. G. B., 2008, " Mechanical Properties and Fracture Behavior of Short PET Fiber-Waste Polyethylene Composites", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 27, pp. 967-984.
- Werkema, M. C. C., Aguiar, S., 1996, "Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo", Fundação Christiano Ottoni - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, pp.30-57.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo suporte financeiro e as empresas Moinhos Gerais Ltda e Resiqualy Ltda pelo fornecimento das partículas de sílica e resina epóxi, respectivamente.

DEVELOPMENT OF LAMINATED COMPOSITES REINFORCED WITH PET FIBRES FROM WASTE BOTTLES

Abstract: *The amount of plastic used in the manufacture of industrial products has increased significantly in the last few decades. The landfill impact as a result of the production and disposal of based plastics in the nature is a potential threat to the environmental due to the large period of biodegradable. The addition of synthetic fibres into different classes of materials has been the focus of much research being an alternative of plastic recycling. This work investigates the effect of plastic fibres and silica particles addition into polymeric composites. A full factorial design of 2³ was set based on the following experimental factors: silica particles, volume fraction and width of PET fibres. The investigated responses were: bulk density, tensile strength and modulus of elasticity. The composites showed satisfactory properties, being able to recycle waste PET bottles as a sustainable material for some areas of engineering.*

Keywords: *laminated composites, PET fibres, sustainability, mechanical properties.*