

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO LAMINADO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRA DE GARRAFAS PET

Daniel Goretti Leporate Barroso¹

Túlio Hallak Panzera²

Antonio Luis Ribeiro Sabariz³

Cristiano Gabriel Persch⁴

André Luis Christoforo⁵

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 a materiais convencionais como os metais, cerâmicas e polímeros surge como uma boa opção de 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

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 as 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 2^3 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: composite laminate, PET fiber, sustainability, mechanical properties.

¹ Departamento 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. E-mail: danielgoretti@ufsj.edu.br

² Departamento 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. E-mail: panzera@ufsj.edu.br

³ Departamento 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. E-mail: sabariz@ufsj.edu.br

⁴ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Av. Roraima 1000, Cidade Universitária, Camobi, Santa Maria-RS, 97105-900, Brasil. E-mail: cristianog.persch@bol.com.br

⁵ Departamento 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. E-mail: alchristoforo@ufsj.edu.br

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. Apresenta-se como um 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).

A produção do plástico por empresas sem a consideração de políticas ambientais implica diretamente na geração de resíduos. Para resolver este problema, a melhor opção seria promover a sua reciclagem através de processos mecânicos ou termo-mecânicos. Em 2008, 54,8% do total de resina PET produzidas no Brasil foram recicladas, representando 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) permitiu o aumento da resistência mecânica do polímero, mostrando-se como alternativa viável para o reuso do material (Ávila, 2002).

Muitos pesquisadores tem utilizado o PET como reforço em materiais compósitos laminados ou particulados. Dá-se o nome de compósito laminado àqueles cuja fase dispersa está na forma de fibras longas, e de compósito particulado àqueles cuja fase dispersa se apresenta 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 e resistência ao impacto, além de sua resistência a 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 objetiva investigar 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 de um compósito híbrido de matriz epóxi, entre elas, densidade volumétrica, resistência à tração e módulo de elasticidade. 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 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. O material foi aquecido 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 SiO_2 .

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	6,40

A fase matriz é constituída de duas partes: resina epóxi (RQ-0100RF) e 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: fração volumétrica de fibras de PET (30 e 50%), largura das fibras 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 resina. Os fatores mantidos constantes nos experimentos foram: temperatura de fabricação (-22°C), tipo de matriz (epóxi), tempo de cura (7 dias) e coloração das fibras de PET (transparente).

O planejamento fatorial completo (DOE) do tipo 2³ fornece oito combinações experimentais (ver Tabela 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 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 orientação em uma única direção, e posteriormente adotou-se o método manual de laminação (Figura 1). Um tecido de Nylon/Teflon (Armalon) foi utilizado para garantir o acabamento superficial e 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 British Standard 2561 (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). Maiores detalhes sobre a análise de variância podem ser encontrados em Werkema e Aguiar (1996).

3. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os resultados da 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 os demais. 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 Tabela (3) exibiram efeito significativo sobre as variáveis respostas investigadas, sendo discutidos nos parágrafos subsequentes.

O valor de R^2 adjunto exibido na ANOVA mede a proporção da variabilidade presente nas observações da variável resposta, 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 a tração foram respectivamente de 82,18%; 78,98% e 93,18%, indicando ser satisfatória a qualidade no ajuste dos modelos. Estes resultados poderiam ser melhores, entretanto, a imprecisão na montagem das lâminas, nos cortes dos fios e no espalhamento de resina e sílica conferem considerável variabilidade, minorando a qualidade dos ajustes.

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 sílica</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%

Cabe ressaltar, a título de exemplificação, que o fator principal individual referente à largura da fibra, de P-valor igual a 0,001, não foi devidamente sublinhado na Tabela 3 por ficar explícita a sua in-

teração com a adição de sílica. Como discutido por Werkema e Aguiar (1996), o efeito principal de um fator só é interpretado individualmente no caso da sua não interação com os demais.

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 Tabela 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, apresentando boa homogeneidade.

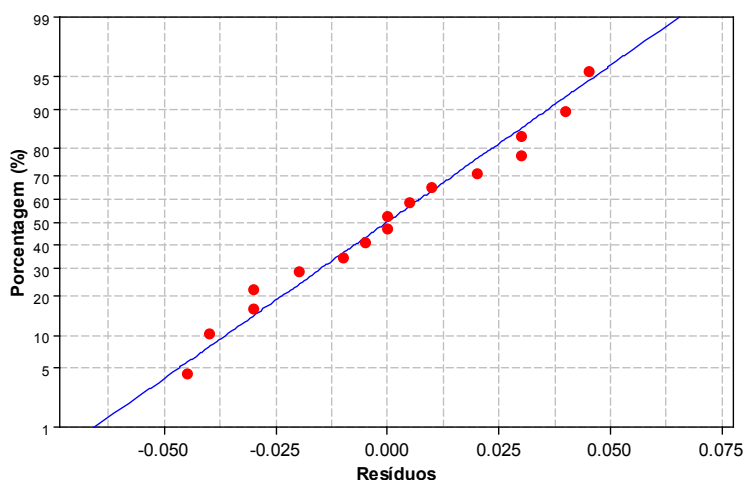


Figura 2. Gráfico de resíduos de distribuição normal para a densidade volumétrica

Verifica-se no gráfico da Figura 3 que os compósitos fabricados com fibras de PET com 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 (-1,11g/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 significati-

vamente 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 óbvia, 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.

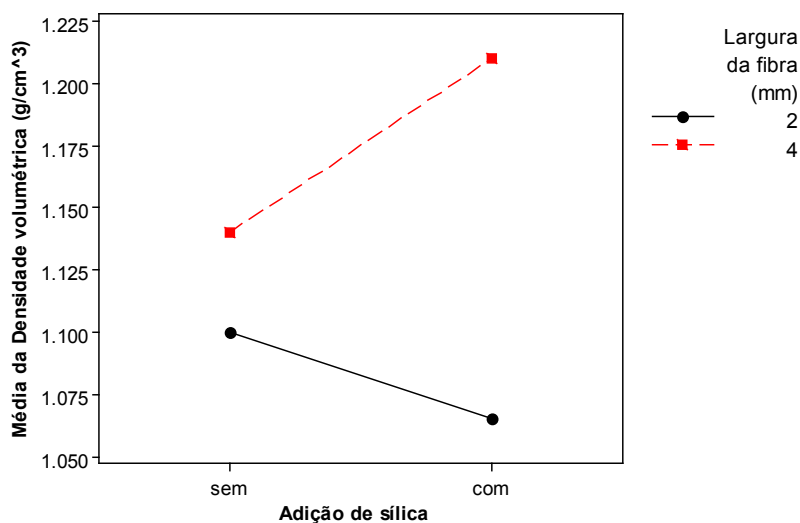


Figura 3. Efeito da interação entre a largura da fibra de PET e adição de sílica sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos

3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os valores de resistência à flexão dos compósitos variaram de 34,35 MPa a 50,38 MPa. 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 (Figura 4).

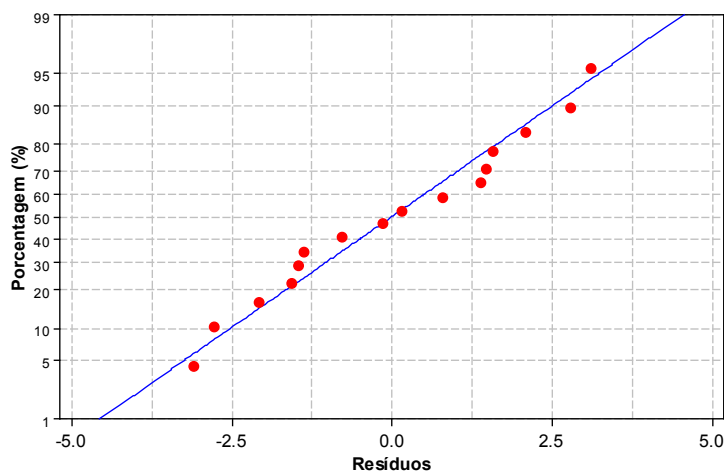


Figura 4. Gráfico de resíduos de distribuição normal para a resistência a tração

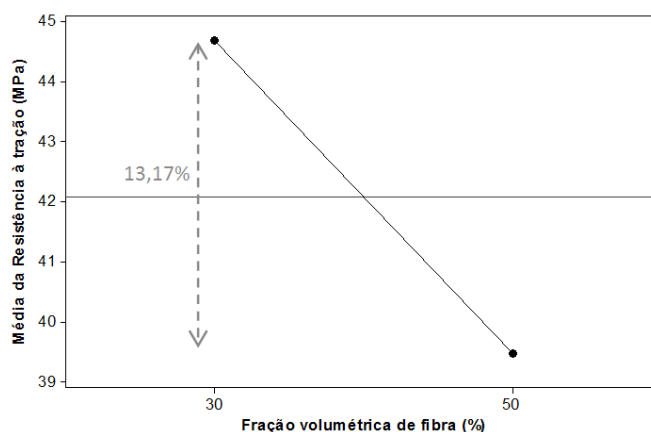


Figura 5. Efeito principal da fração volumétrica de fibra sobre a média da resistência à tração dos compósitos

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 (Figura 6). A resistência mecânica está, na maioria das vezes, relacionada com a densidade apresentada pelos materiais. Observa-se nos gráficos das Figuras

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 da fração 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.

3 e 6 que os compósitos de maior densidade e resistência são aqueles fabricados com as fibras de PET de 4mm de largura. As fibras mais finas (2mm) exibem uma maior região de interface matriz/fibra por área, o que pode ter contribuído na redução da resistência à tração.

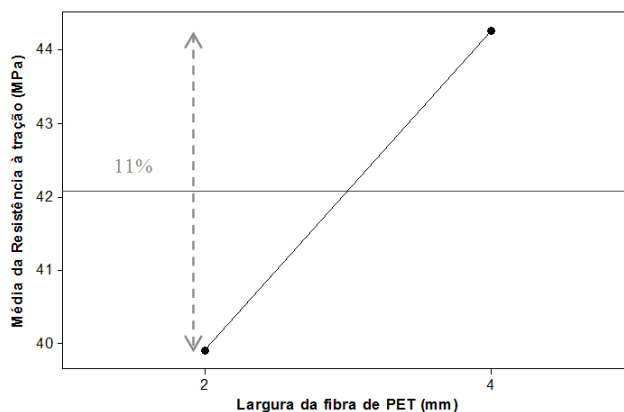


Figura 6. Efeito principal da largura da fibra sobre a média da resistência à tração dos compósitos

3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os valores de módulo de elasticidade dos compósitos variaram de 0,78 GPa a 1,40 GPa. Os P-valores sublinhados na Tabela 3 revelam que as interações entre a fração volumétrica de fibras 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 exhibe 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.

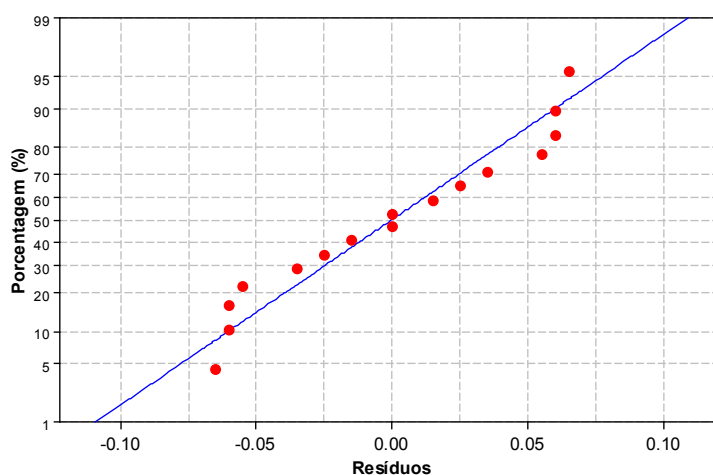


Figura 7. Gráfico de resíduos de distribuição normal para o módulo de elasticidade

A Figura 8 exhibe 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 (Figura 5), os quais exibiram uma diminuição da resistência em função do aumento da fração volumétrica de fibras nos compósitos.

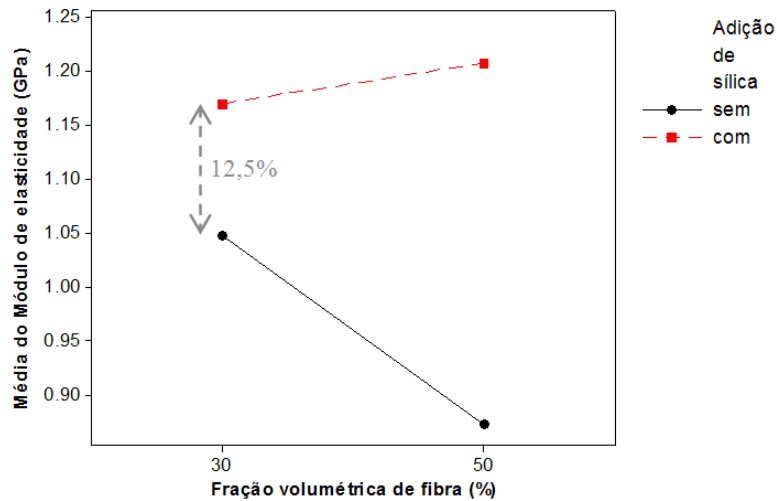


Figura 8. Efeito da interação fração volumétrica e adição de sílica sobre a média do módulo de elasticidade dos compósitos

O efeito de interação dos fatores fração volumétrica e largura da fibra de PET sobre o módulo de elasticidade dos compósitos é apresentado no gráfico da Figura 9. Observa-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, a fibra de 4mm promoveu uma maior densidade 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.

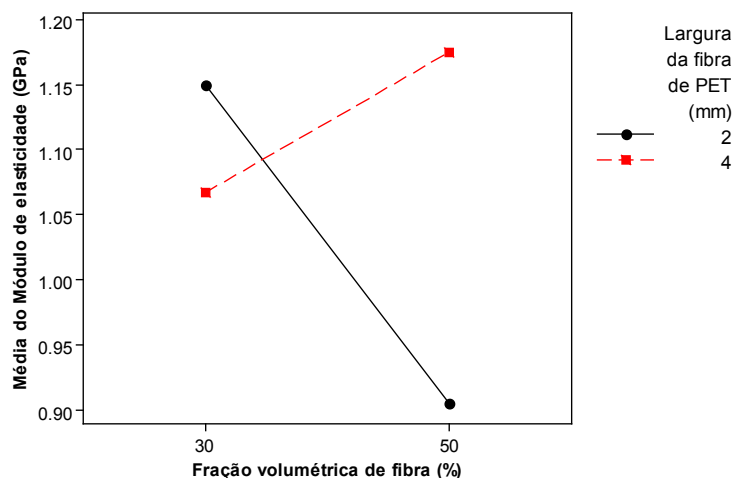


Figura 9. Efeito da interação fração volumétrica e largura da fibra de PET sobre a média do módulo de elasticidade dos compósitos

3.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO

O gráfico tensão-deformação apresentado na Figura 10 ilustra o comportamento mecânico dos compósitos sob o ensaio de tração uniaxial.

Os compósitos C1, C2, C3 e C4 apresentaram uma maior tenacidade em relação às outras quatro 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 adição de sílica. Embora os compósitos constituídos de fibra de PET de 2mm apresentarem uma resistência mecânica e módulo de elasticidade (Figura 6) inferiores, os mesmos exibiram uma tenacidade superior. Con-

tudo, as condições C7 e C8 fabricadas com fibra 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.

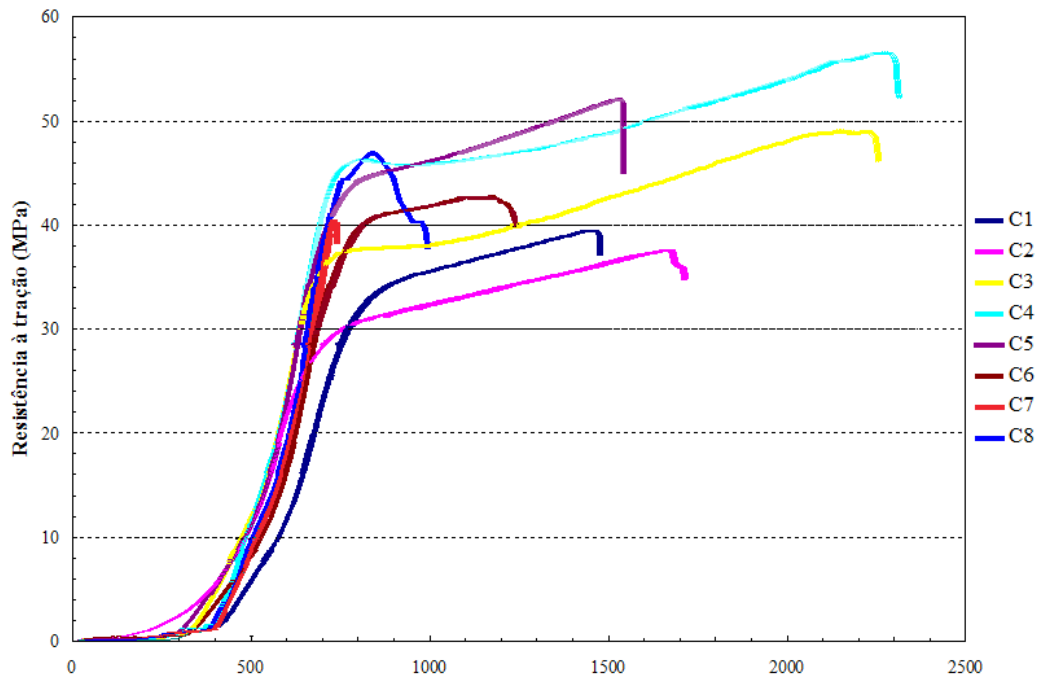


Figura 10. Comportamento mecânico dos compósitos sob ensaio de tração

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 dos compósitos.

A condição experimental C7, constituída de 30% de fibras de PET de 4mm de largura e adição de sílica, exibiu o melhor desempenho mecânico.

5. REFERÊNCIAS

- ABIPET (2009) Disponível em ABIPET: <http://www.abipet.org.br>. [Consulta em 28 de Janeiro de 2009]
- 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*.
- Askeland, D. R., (2008) *Ciência e Engenharia dos Materiais*. São Paulo, Cengage Learning.
- Callister, J. W. D., (2002) *Materials Science and Engineering. An Introduction*, New York: John Wiley & Sons.

CEMPRE (2009) Disponível em CEMPRE: http://www.cempre.org.br/fichas_técnicas.php?lnk=ft_pet.php [Consulta em 28 de Janeiro de 2009]

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.