



## AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE COMPÓSITOS AUTOMOTIVOS: PP REFORÇADO COM FIBRAS LONGAS vs. PA6 COM FIBRAS CURTAS

<sup>1</sup>E. de Moraes, <sup>1</sup>G. H. B. Donato, <sup>2</sup>S. H. P. Bettini, <sup>1</sup>B. C. Bonse

<sup>1</sup>Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Humberto de A.C. Branco, 3972, CEP 09850-901, São Bernardo do Campo, SP, Brasil –  
prebbonse@fei.edu.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais

### RESUMO

*Para melhorar a eficiência energética dos veículos, os fabricantes estão substituindo componentes metálicos por materiais compósitos mais leves e resistentes, como os compósitos termoplásticos reforçados com fibras longas. No Brasil, esses materiais ainda são pouco utilizados. Comparados aos reforçados com fibras curtas, os compósitos com fibras longas oferecem maior rigidez, resistência ao impacto, estabilidade dimensional e retenção de propriedades em altas e baixas temperaturas. O polipropileno (PP), devido ao baixo custo e alta reciclabilidade, é amplamente usado na indústria automobilística. Analisaram-se as propriedades mecânicas de compósitos de PP reforçados com fibras de vidro longas, comparando-os com poliamida 6 (PA6) reforçada com fibras curtas. PP com 50% de fibras longas apresentou rigidez e resistências à tração, à flexão e ao impacto semelhantes aos de PA6 com 20% a 45% de fibras curtas, indicando a possibilidade de substituir compósitos de PA6 com fibras curtas por PP com fibras longas para determinadas aplicações.*

**Palavras-chave:** polipropileno com fibras de vidro longas; PA6 com fibras de vidro curtas; compósitos; propriedades mecânicas

### INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais leves e resistentes é crucial para a indústria automobilística, especialmente para aumentar a eficiência energética dos veículos e reduzir emissões de gases. Reduzir massa é uma forma eficaz de melhorar a economia de combustível, o que contribui para a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>.

Com o avanço de fontes alternativas de energia, como células de combustível, que oferecem menor potência por unidade de massa, a leveza dos automóveis torna-se ainda mais importante para compensar a menor produção de energia dessas fontes (1).

A indústria automotiva se destaca como a principal consumidora de compósitos poliméricos, devido às novas regulamentações de emissões e padrões de economia de combustível. Isso aumenta a demanda por materiais leves, especialmente aqueles reforçados com fibras de vidro e carbono. A Europa deverá liderar o mercado de

compósitos automotivos, enquanto o Brasil segue essa tendência com o programa federal Rota 2030, que promove o desenvolvimento tecnológico e a eficiência energética.

A baixa densidade dos compósitos é ambientalmente relevante, pois está ligada ao consumo de combustível e às emissões de CO<sub>2</sub>. Por exemplo, a redução de 4 kg na massa de um automóvel médio pode economizar até 36 litros de combustível e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 75 kg durante sua vida útil (2). Em ônibus, uma redução de 100 kg na massa pode economizar até 2500 litros de diesel, correspondendo a uma diminuição de 5200 kg de CO<sub>2</sub> (3).

Para atender às novas exigências, as indústrias automobilísticas têm adaptado seus processos e produtos, impulsionando o mercado de compósitos. A combinação de polímeros e fibras permite desenvolver materiais com propriedades específicas para diversas aplicações automotivas (4). Compósitos de termoplásticos com fibras curtas de vidro são comuns em aplicações semiestruturais, mas apresentam limitações comparados àqueles com fibras longas, que oferecem melhor desempenho mecânico, como maior rigidez e resistência ao impacto, além de vantagens como resistência à corrosão e processabilidade em geometrias complexas (5).

Nos últimos anos, a demanda por materiais como a poliamida (PA) aumentou, mas a produção não acompanha, elevando os preços, especialmente no Brasil, onde grande parte é importada. Como alternativa mais econômica, o polipropileno (PP) reforçado com fibras longas surge como uma opção viável. Este trabalho visa substituir uma peça automotiva feita em PA 6 com fibra de vidro curta por uma feita em PP com fibras longas, caracterizando suas propriedades mecânicas, comparando-as com as da poliamida 6.

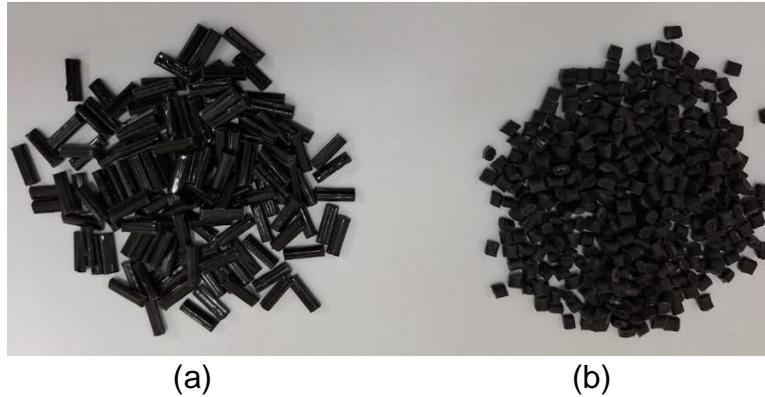
## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### Materiais

Os materiais utilizados foram PP contendo 30%, 40% e 50% em massa de fibra de vidro longa (PP LGF) cedidos pela empresa Celanese e PA6 contendo 30%, 40% e 50% em massa de fibra de vidro curta (PA6 SGF) cedidos pela empresa Lanxess. Ambos os materiais foram fornecidos na forma de grânulos (*pellets*), contendo

estabilizante térmico. A Figura 1 mostra os grânulos das formulações de PP e PA6 com comprimento média, respectivamente, em torno de 11 mm e 3 mm.

Figura 1. Grânulos de PP com fibra longa (a) e de PA6 com fibra curta (b)



### Métodos

Os grânulos foram injetados em injetora ARBURG modelo 270V com força de fechamento de 35 toneladas, alocada na Universidade Federal de São Carlos. O molde de duas cavidades permitia a moldagem simultânea de corpos de prova para tração, flexão e impacto conforme as normas ASTM D638-14 (tipo I), D790-17 e D6110-18. Os parâmetros de processamento foram baseados na ficha técnica do fornecedor de matéria prima, com alguns ajustes. Ambos os materiais foram desumidificados a uma temperatura de 70°C antes de serem injetados. O PP LGF ficou na estufa por 2 horas, já a PA6 SGF ficou na estufa por 4 horas. Após a injeção, os corpos de prova (cps) foram acondicionados em laboratório climatizado no Centro Universitário FEI a 23 °C e com umidade relativa de 50%.

Os cps foram submetidos a ensaios de tração, flexão em três pontos e impacto Charpy. Para os ensaios de tração e flexão foram utilizados seis cps para cada formulação e nos ensaios de impacto dez cps com entalhe em V de 2 mm de profundidade. Os ensaios de tração e flexão foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio Instron 5567. No ensaio de tração utilizou-se uma velocidade de 5 mm/min, extensômetro de 50 mm com deformação máxima de 10% e célula de carga de 30 kN. Nos ensaios de flexão, foram empregados uma velocidade de 1,3 mm/min, célula de carga de 5 kN, distância entre apoios de 50 mm e deformação máxima de 5%. Os ensaios de impacto Charpy foram realizados em uma máquina de impacto Instron Ceast 9050, com martelo de 5,4 J.

Para determinar o teor e tamanho das fibras nos cps, foi realizada a calcinação de cps de tração seguindo a norma D5630-13. Foram calcinadas quatro amostras de cada um dos compósitos estudados.

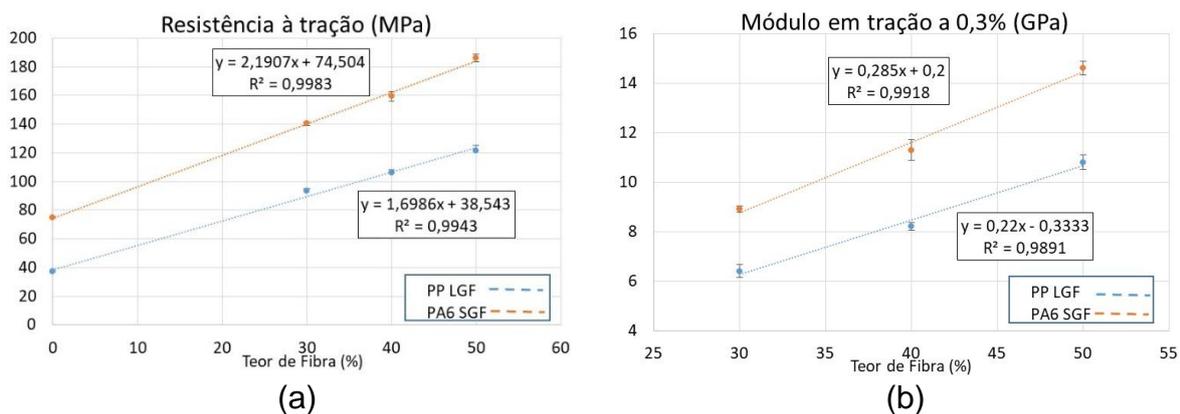
Para a maioria dos resultados numéricos foi aplicada a análise de variância estatística ANOVA, que é um teste usado para comparar a média aritmética de grupos populacionais. Se o valor-p for inferior a 0,05, as médias não são iguais.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A calcinação mostrou que os teores de fibra estavam de acordo com os declarados pelo fabricante. Quanto ao tamanho, as fibras curtas dentro dos cps de PA6 variaram de 100 a 450 micrometros com média de 230 micrometros. As fibras longas dentro dos cps de PP variaram de 0,75 mm a 5 mm com média de 1,6 mm, ou seja, o tamanho médio das fibras longas é 7 vezes maior do que o tamanho das fibras curtas.

Os resultados dos ensaios mecânicos são apresentados nas Figuras 2 a 4, na forma de gráficos que mostram as propriedades dos compósitos PP LGF e PA SGF em função do teor de fibra de vidro. São apresentados também linhas de tendências de ajuste aos dados com suas respectivas equações e coeficientes de determinação.

Figura 2 – Resistência e módulo de elasticidade em tração para PP LGF e PA6 SGF



Na figura 2a observa-se que a incorporação de diferentes teores de fibras de vidro, tanto longas quanto curtas, provocou aumento na resistência à tração (RT) dos compósitos. Para fins de comparação, foi inserido no gráfico os valores de RT das matrizes, fornecidos pelos produtores das resinas.

Observa-se que o aumento da RT dos dois compósitos segue uma função linear com o teor de fibras, tanto curtas quanto longas. Este padrão também foi observado por Thomason (6).

O aumento de RT em relação à resina pura de PP foi de 167%, 203% e 247% quando incorporado 30%, 40% e 50% em massa de fibras de vidro longas. Para a PA6 os aumentos foram de 87%, 112% e 148% com a incorporação de 30%, 40% e 50% em massa de fibras curtas. Isso mostra que para o mesmo teor de fibras, o aumento alcançado na RT com fibras longas no PP é aproximadamente o dobro daquele obtido com fibras curtas para a PA6, evidenciando o maior reforço alcançado com fibras longas em relação às fibras curtas.

Outros estudos (6,7,8) também evidenciaram o aumento da RT com a incorporação de fibras de vidro longas. Segundo Callister (9) este efeito obtido pelo aumento no tamanho das fibras, possibilitou o aumento na RT, pois a tensão transmitida da matriz para as fibras será distribuída por toda a extensão da fibra. Na teoria, isso significa que as fibras longas conseguem distribuir maiores cargas em sua extensão, pois o comprimento crítico, que é o local onde se concentra as cargas, está acima de 15 vezes o tamanho mínimo crítico de uma fibra curta. Subramanian e Senthivelan (10) indicam em seu estudo, que um tamanho maior na fibra também aumenta o número de ligações físicas entre a interfase fibra-matriz, deixando o compósito mais resistente.

Comparando-se o PP com teor máximo de 50% de fibras longas com a PA6 com teor mínimo 30% de fibras curtas, verifica-se que a resistência à tração do compósito de PA6 é superior ao compósito de PP aproximadamente 16%. Usando a tendência linear da RT em função do teor de fibra, conclui-se que um compósito de PP contendo 50% de fibras longas terá a mesma RT de um PA6 contendo 20% de fibras curtas. Isso também se deve ao fato da resina de PA6 pura ser inerentemente mais resistente que a resina de PP puro.

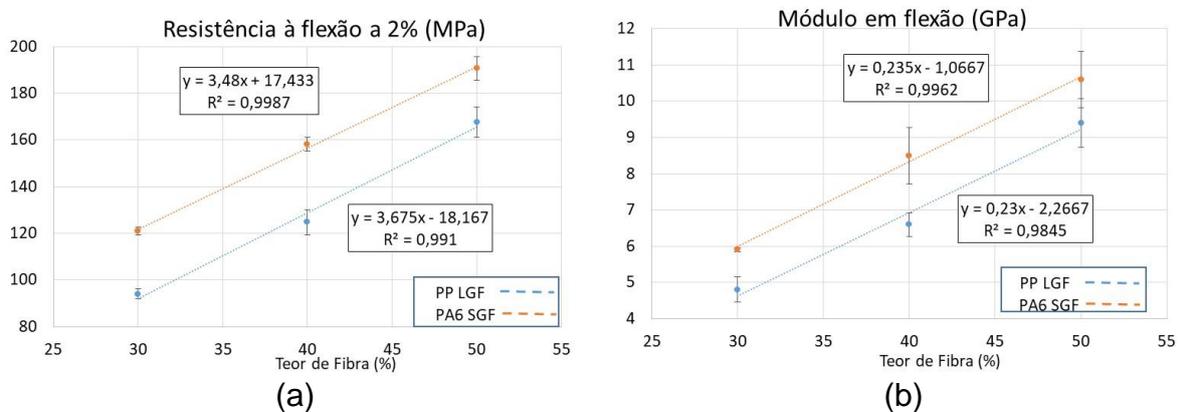
Na Figura 2b observa-se, analogamente à RT, um aumento praticamente linear do módulo elástico em tração (MT) com o aumento do teor de fibras, tanto para os compósitos de fibra curta quanto de fibra longa, conforme previsto pela regra de misturas na Equação 1 (11). Thomason (6), Liu et al. (12) e Zhang et al (13) também observaram o mesmo comportamento em seus estudos com fibras longas em compósitos de PP.

Comparando os compósitos de PP e PA6 observa-se que o valor obtido do MT do PP com 40% em massa de fibras longas é próximo ao MT obtido pela PA6 carregada com 30% em massa de fibras curtas. Fazendo o comparativo, a PA6 com 30% de fibras curtas possui um MT 8,5% superior ao MT do PP com 40% de fibras longas. Aumentando a fração de fibras longas para 50% em massa, o compósito com matriz de PP é superior em 22% quando comparado com o compósito de PA6 com 30% em massa de fibras curtas. A diferença é menor quando comparado o PP com 50% de fibras longas com PA6 com 40% de fibras curtas, sendo a fração de 40% de fibras curtas apenas cerca de 4,5% superior ao PP com 50% de fibras longas.

Quanto às propriedades em flexão, a Figura 3 mostra que tanto a resistência (RF) como o módulo de elasticidade em flexão (MF) aumentam linearmente com o teor de fibra.

Houve aumento na RF de 69% no PP carregado com fibras de vidro longas, enquanto o aumento no PA6 foi de 57%, indicando que o uso de fibras longas, contribui para um maior aumento percentual na RF.

Figura 3 – Resistência e módulo de elasticidade em flexão para PP LGF e PA6 SGF



Este comportamento de aumento foi evidenciado nos estudos de Zhang et al. (13), especialmente devido à adesão entre fibras longas e a matriz. Novamente Thomason (6) evidenciou que o uso das fibras longas provoca um aumento linear com o aumento do teor das fibras. Tao et al. (14) encontrou o mesmo comportamento no aumento da RF, mas estudando a incorporação com fibras longas em outro polímero semicristalino, na qual foi constatado que o efeito da transcristalinidade aumentou a adesão superficial entre a matriz e fibra, melhorando o efeito do reforço da fibra de vidro longa.

Comparando os compósitos de PP e PA6 observa-se que o valor obtido para a resistência à flexão do PP com 40% em massa de fibras longas é próximo à resistência à flexão obtida pela PA6 carregada com 30% em massa de fibras curtas, sendo que o teste ANOVA indicou igualdade estatística de RF para estas duas composições.

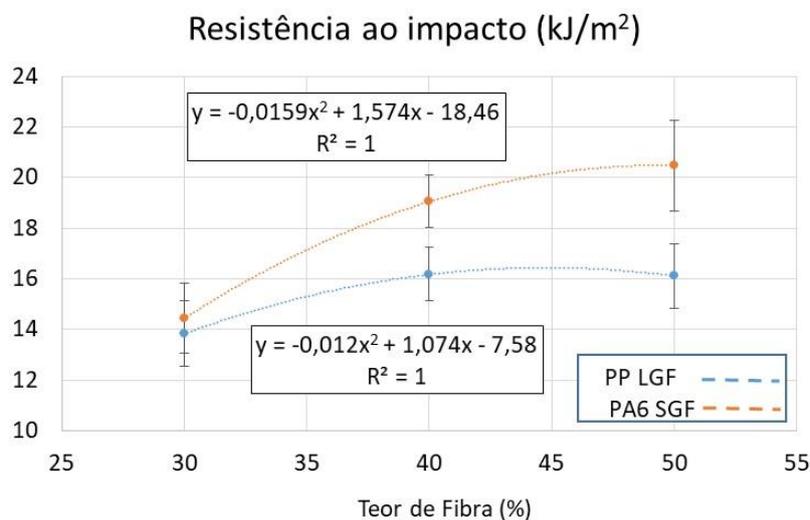
Quanto ao MF, analogamente à RF, os compósitos de PP com fibras longas, tiveram um ganho maior em porcentagem em relação aos compósitos de PA6 reforçados com fibras curtas.

O comparativo entre o PP com 30% de fibras longas com a PA6 com 30% mostra que o compósito de PA6 possui um MF superior a 23%, mas quando aumentamos o teor de fibras longas do PP para 40%, o MF fica 12% superior ao compósito de PA6 reforçado com 30% de fibras curtas.

O comparativo entre o PP com 40% de fibras longas com a PA6 com 40% mostra que o compósito de PA6 possui um MF superior a 29%, mas quando aumentamos o teor de fibras longas do PP para 50%, o resultado mostra que o PP com 50% possui um MF 11% superior ao compósito de PA6 reforçado com 50% de fibras curtas.

Os resultados da resistência ao impacto (RI) são apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Resistência ao impacto para PP LGF e PA6 SGF



Diferentemente das outras propriedades mecânicas estudadas, a RI não apresenta tendência linear com o aumento do teor de fibras. Dos compósitos de PP, aquele que absorveu menor energia foi com 30% em massa de fibras longas, cerca de 17% menor comparada com o PP contendo 40% e 50%, que apresentam valores

de RI similares, exatamente o que observou Thomason em seus estudos (6,7). Ele observou que com o aumento do teor de fibras longas, a resistência ao impacto aumenta, entretanto chega-se no ponto onde o desempenho máximo estabiliza entre 40% e 50% de fibras. Com um aumento maior do teor de fibras as propriedades começam a diminuir gradativamente, isso porque o comprimento das fibras diminui linearmente com o aumento do seu teor, devido ao excesso de cisalhamento entre fibras (7).

O teste de ANOVA indicou que não há diferença estatística entre a RI do PP LGF 40% e 50%.

Para os compósitos de PA6 também houve aumento na RI para frações maiores de fibras. A RI do compósito com 40% em massa de fibras longas é 32% superior ao compósito com 30% em massa de fibras curtas. Já a RI do compósito de PA6 com 50% é 7,5% superior ao compósito com 40% de fibras. Neste estudo não foi possível verificar se houve a mesma estabilização da resistência ao impacto como o corrido com as amostras de PP com fibra longa, para isso seria preciso uma amostra com teor de fibras curtas acima 50%.

Finalmente, com as equações das linhas de tendência obtidas para todas as propriedades estudadas e utilizando os teores de 30% e 50% de fibras, foi possível estimar a fração equivalente de fibras curtas e longas que resultam num mesmo valor para cada propriedade, conforme mostrado na Tabela 1. Exemplificando, a RT do compósito de PA6 contendo 30% de fibras curtas equivale à RT de um compósito de PP contendo 60% de fibras longas e a RI de um compósito de 50% PP LGF equivaleria à RI de 34% PA6 SGF.

Tabela 1: Equivalências entre compósitos

Propriedade	Compósito	Equivale	Compósito	Equivale
Resistência à Tração	30% PA6 SGF	60% PP LGF	50% PP LGF	20% PA6 SGF
Módulo de elasticidade em tração		42% PP LGF		38% PA6 SGF
Resistência à Flexão		38% PP LGF		43% PA6 SGF
Módulo de elasticidade em flexão		36% PP LGF		45% PA6 SGF
Resistência ao Impacto		32% PP LGF		34% PA6 SGF

## CONCLUSÕES

O levantamento das propriedades mecânicas de corpos de prova injetados de PA6 com fibras curtas e PP com fibras longas, a teores de 30%, 40% e 50% em massa, permitiu comparar o desempenho desses compósitos. Observou-se que o PP com 50% de fibras longas possui módulo de elasticidade superior à PA6 com 30% de fibras curtas, enquanto a PA6 com 40% de fibras curtas tem módulo semelhante ao PP com 50% de fibras longas. Quanto à resistência à flexão, o PP com 40% de fibras longas se comporta como a PA6 com 30% de fibras curtas, e o PP com 50% de fibras longas supera a PA6 com 40% de fibras curtas. Em termos de resistência ao impacto, o PP com 40% e 50% de fibras longas supera a PA6 com 30% de fibras curtas. Não há um material superior absoluto; a escolha depende da aplicação. Para peças sujeitas a altas tensões, a PA6 com fibras curtas é preferível, enquanto para peças leves que exigem rigidez e boa resistência, o PP com fibras longas pode ser uma alternativa.

## AGRADECIMENTOS

Ao Centro Universitário FEI, à Universidade Federal de São Carlos pela injeção dos corpos de prova, à General Motors Mercosul pela bolsa de estudo concedido a E. Moraes, às empresas Celanese e Lanxess pela doação dos materiais utilizados e à CAPES-PROAP pelo apoio financeiro para participar no 25° CBECiMat.

## REFERENCIAS

1. GARCIA, Gregorio Manuel Vélez. Experimental evaluation and simulations of fiber orientation in injection molding of polymers containing short glass fibers. 2012. 212f. Tese (Doutorado do Programa de Filosofia em Ciência Macromolecular e Engenharia) – Instituto Politécnico da Virgínia e Universidade do Estado – Blacksburg, Virgínia, 2012.
2. TEIXEIRA, D. et al. Influence of injection molding on the flexural strength and surface quality of long fiber-reinforced polyamide 6.6 composites. *Materials and Design*, v. 85, p.695 – 706, 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.097.
3. TEIXEIRA, D. et al. Influence of flow restriction on the microstructure and mechanical properties of long glass fiber-reinforced polyamide 6.6 composites for automotive applications. *Materials and Design*, v. 47, p. 287 – 294, 2013. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.12.030.

4. ROHAN, K. et al. Mechanical study of direct long fiber thermoplastic carbon/polyamide 6 and its relations to processing parameters. Zoltek Corporation e Centro de Projetos Fraunhofer para pesquisas de compósitos da Universidade de Western Ontario, Canadá. 2014
5. DAS, Pritam et al. Enhancing the surface finish of LFT compression molded parts via Application of surface film. Composites & Polycon 2007, American Composites Manufacturers Association, Tampa, Flórida, USA.
6. THOMASON, J.L. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP. Composites part A: applied science and manufacturing. 2002, v. 33, p. 1641-1652. DOI: 10.1016/S1359-835X(02)00179-3.
7. THOMASON, J.L. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 6. The properties of injection moulded long fibre PP at high fibre content. Composites part A: applied science and manufacturing. 2004, v. 36, p. 995-1003. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.11.004.
8. DERSTINE, David S.; HOWARTH, CARL S.; ZELLOCK, Collet M. Effect of oven-aging on tensile properties of long glass fiber versus short glass fiber engineering thermoplastic composites. In: INTERNATIONAL SAE CONGRESS AND EXPOSITION; 1996, Detroit, Michigan. DOI: DOI: <https://doi.org/10.4271/960241>.
9. CALLISTER JR, William D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7. ed. Nova York: John Wiley & Sons, Inc, 2017.
10. SUBRAMANIAN, C.; SENTHILVELAN, S. Effect of fiber length on hysterectic heating of discontinuous fiber-reinforced polypropylene. Journal INTERNATIONAL JOURNAL OF POLYMERIC MATERIALS. 2009, v. 58, p. 347-354. DOI: 0.1080/00914030902852252.
11. VAN DER WOUDE, J. H. A.; LAWTON, E. L. Composite Design and Engineering. In WALLEMBERGER, Frederick T; BINGHAM, Paul A. Fiberglass and glass technology: energy-friendly compositions and applications. 1. ed. Londres: Springer Science + Business Media, LLC. 2010, p. 125 – 172.
12. LIU, Mei Hua et al. Morphology and dynamic mechanical properties of long glass fiber-reinforced polyamide 6 composites. Journal of thermal analysis and calorimetry. 2016, Vol. 126, Issue 6, 1281 – 1288.
13. ZHANG, Daohai et al. Mechanical properties, morphology and dynamic mechanical properties of LGF / TPU / SAN composites. Fibers and Polymers. 2014, Vol. 15, N<sup>o</sup> 4, 794 – 799.
14. TAO, Zhaozeng et al. Fabrication of long glass fiber reinforced polyacetal composites: mechanical performance, microstructures, and isothermal crystallization kinetics. Polymer Composites. 2014, Vol. 36 (Issue) 10, 1826 – 1839.

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF AUTOMOTIVE COMPOSITES: LONG-FIBER REINFORCED PP VS. SHORT-FIBER REINFORCED PA6

### ABSTRACT

*To improve the energy efficiency of vehicles, manufacturers are replacing metal components with lighter and more durable composite materials, such as long-fiber reinforced thermoplastic composites. In Brazil, these materials are still underutilized. Long-fiber composites offer greater stiffness, impact resistance, dimensional stability, and property retention at high and low temperatures than short-fiber reinforced composites. Polypropylene (PP), due to its low cost and high recyclability, is widely used in the automotive industry. The mechanical properties of PP composites reinforced with long glass fibers were analyzed and compared to short-fiber reinforced polyamide 6 (PA6). PP with 50% long fibers exhibited stiffness and tensile, flexural, and impact strengths similar to those of PA6 with 20% to 45% short fibers, indicating the potential to replace short-fiber PA6 composites with long-fiber PP for specific applications.*

**Keywords:** polypropylene with long glass fibers; PA6 with short glass fibers; composites; mechanical properties