

Review: compósitos poliméricos para substituir madeira aplicada em semirreboques – fatores que influenciam no comportamento mecânico¹

Cezar de Mattos²
Edson Luiz Francisquetti³

Resumo

A busca por materiais leves para aplicação automotiva é crescente, e os compósitos são uma opção para os veículos de carga. A redução de massa e durabilidade são fatores importantes, quando competitividade é avaliada. Atualmente, a carroceria do semirreboque tipo graneleiro é confeccionada em aço e revestida com madeira. A substituição da madeira por um material compósito pode ajudar no aumento da carga líquida e também na vida útil do semirreboque. No entanto, desenvolver um compósito polimérico reforçado por fibras com características similares as da madeira não é uma tarefa fácil. Nessa lógica, este artigo tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica, avaliando os fatores que interferem no comportamento mecânico desses compósitos poliméricos reforçados com fibra. Através da análise dos manuscritos, foi possível determinar que a fração volumétrica, as orientações e as características físicas das fibras, bem como a adesão interfacial, são fatores que influenciam significativamente no comportamento mecânico dos compósitos.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos. Semirreboques. Propriedades mecânicas.

Abstract

The search for lightweight materials for automotive applications is increasing and composites are an option for cargo vehicles. The reduction of mass and durability are important factors, when competitiveness is evaluated. Currently, the body of the bulk semi-trailer is made of steel and coated with wood. The replacing of the wood by a composite material can help in increasing the net load and also the service life of the semi-trailer. However, developing a fiber-reinforced polymer composite with wood-like characteristics is not an easy task. In this logic, this article aims to make a bibliographical review, evaluating the factors that interfere in the mechanical behavior of these fibers reinforced by polymer composites. Through the analysis of the manuscripts, it was possible to determine that the volumetric fraction, orientations and physical characteristics of the fibers, as well as interfacial adhesion, are factors that influence significantly the mechanical behavior of the composites.

Keywords: Polymer composites. Semi-trailers. Mechanical properties.

¹ Este trabalho é resumo de dissertação de conclusão do Curso de Mestrado Profissional do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), Caxias do Sul, RS, Brasil. A defesa foi em outubro de 2018, sob orientação do Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti.

² Graduado em Engenharia de Produção pela Universidade de Caxias do Sul (UCS) e especialista em Segurança do Trabalho pela Faculdade da Serra Gaúcha (FSG), Caxias do Sul. E-mail: czr.mattos@yahoo.com.br

³ Doutor em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, mestre em Biotecnologia pela UCS, graduado em Programa Especial de Formação de Professores para os Componentes Curriculares pelo IFRS, Farroupilha, RS e em Engenharia Química pela UCS. Professor do IFRS, Farroupilha, RS. E-mail: edson.francisquetti@farroupilha.ifrs.edu.br

Artigo recebido em 28.03.2018 e aceito em 10.06.2018.

1 Introdução

A utilização de compósitos com matriz polimérica e enchimento de fibras naturais, onde se destacam a serragem, oriunda de processos de transformação da madeira (WPC), apresentam um atrativo estético e baixa manutenção, quando comparados com artefatos de madeira. Esses argumentos impulsionam a utilização do WPC, como alternativa para substituir artefatos produzidos em madeira, tais como: *decks*, assoalhos e tábuas. Somente nos Estados Unidos, em 2003, foram consumidos 771 milhões de quilos de compósitos poliméricos de fibra natural, com previsão de um aumento anual de dois dígitos até 2010. Já no mercado europeu, nesse mesmo período, o consumo foi moderado de 65.000 toneladas, sendo que desse total 55% foram utilizados pela indústria automotiva, indicando seu potencial para a indústria de semirreboques (MARKARIAN, 2005, p. 20).

Os compósitos poliméricos, reforçados com fibras, possuem potencial de superar o aço e o alumínio, quando falamos na redução de massa e estética para a aplicação em semirreboques, uma vez que, a redução de massa em empresas prestadoras de serviços de transporte de cargas ajuda na diminuição do consumo de combustíveis fósseis, o que também reduz a emissão de substâncias tóxicas ao ambiente, conforme legislação específica de cada país.

Materiais metálicos estruturais como o aço, ferro e alumínio, atualmente dominantes na confecção de semirreboques, podem ser substituídos por compósitos leves. Exemplo disso seriam os compósitos, reforçados com fibra de vidro, os quais podem oferecer redução de massa em torno de 15 a 25% e compósitos reforçados com fibra de carbono, onde a redução pode ser de 25 a 40% (SCHACKELFORD, 2008, p. 315; KOMORNICKI *et al.*, 2016, p. 9).

No Brasil, a matéria-prima principal para fabricação de implementos rodoviários é o aço e a madeira. Entretanto, há uma tendência de que esses materiais deixem de ser absolutos, pois a diminuição da massa, sem perda da resistência estrutural e o aumento da durabilidade fazem com que a indústria nacional busque uma alternativa nos polímeros e compósitos poliméricos (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS, 2016, p. 78).

Segundo Sartori (2007, p. 16), a busca por materiais mais leves, para confecção de semirreboques, tem como objetivo principal a redução da massa e consequentemente o aumento da massa de carga a ser transportada. Além da durabilidade do produto, quando comparados com componentes confeccionados em madeira.

Este artigo de revisão visa discutir fatores que influenciam no comportamento mecânico de materiais compósitos com matriz polimérica reforçados com fibra, como alternativa para substituir a madeira aplicada nas tampas laterais de semirreboque graneleiro.

2 Desenvolvimento

2.1 Semirreboque graneleiro

A matriz de transporte de cargas no Brasil é altamente concentrada no modal rodoviário (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2015, p. 25-26). Cerca de 60% das cargas brasileiras são transportadas por implementos rodoviários, sendo que desse total, 50% do *market share* são das empresas do Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2012, p. 16-17). Segundo dados de emplacamento, entre 2013 e 2015, foram fabricados no Brasil 269.782 implementos rodoviários (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS, 2016, p. 114).

A movimentação de grãos normalmente é feita a granel para as indústrias de esmagamento ou para silos de armazenagem. Essa movimentação, no Brasil, ocorre por via rodoviária, com a utilização de semirreboques graneleiros com capacidade de carga líquida entre 27 e 50 toneladas (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2015, p. 25-26). Segundo dados de emplacamento, um dos implementos mais vendidos no Brasil é o semirreboque graneleiro (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS, 2016, p. 114).

O semirreboque graneleiro é composto por uma estrutura em aço, o chassi e por uma caixa de carga composta por tampas laterais articuláveis de aço e madeira, conforme ilustrado na figura 1. Esse implemento foi concebido para movimentação de grãos (soja, trigo, milho, arroz e outros), mas na entressafra, também é utilizado para o transporte de outros produtos, tais como: caixas, sacos e pallets (CASTILHOS, 2011, p. 21-22).



Figura 1 – Semirreboque Graneleiro
Fonte: Castilhos (2011).

A caixa de carga é confeccionada por tampas laterais e traseiras estruturadas em aço, revestidas por chapas de compensado naval de 12 mm de espessura e pelo fechamento frontal confeccionado em aço. As chapas de compensado naval recebem uma proteção emborrachada de tinta látex à base d'água, antes da pintura de acabamento. A fixação da estrutura à chapa de compensado naval é realizada, através de parafusos, conforme mostra a figura 2 (SARTORI, 2007, p. 105; CASTILHOS, 2011, p. 41).

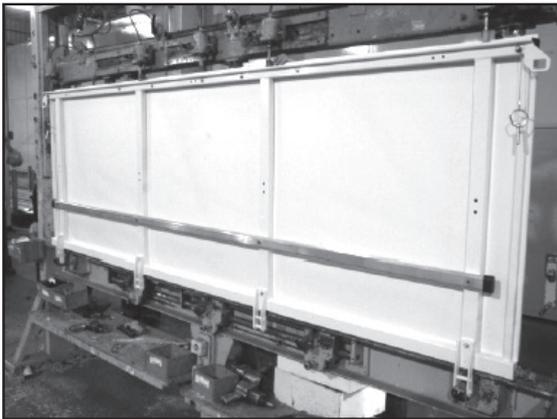


Figura 2 – Tampa lateral
Fonte: Castilhos (2011).

As chapas de compensado têm um período de utilização de no máximo dois anos, quando utilizadas no transporte rodoviário de grãos, devido à

umidade, que acelera o processo de decomposição da madeira (SARTORI, 2007, p. 23).

2.2 Materiais compósitos

Materiais compósitos são materiais multifásicos cujas propriedades são uma combinação benéfica (sinergia) das propriedades das duas ou mais fases que o constituem. O objetivo de desenvolver um material compósito é obter uma combinação de propriedades que não pode ser exibida por um único material. Existe um grande número de compósitos que são representados por combinações de metais, polímeros e cerâmicos. Além desses, existem os materiais compósitos naturais, como por exemplo, a madeira e o osso (SCHACKELFORD, 2008, p. 8; CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 10).

A estrutura dos materiais compósitos é constituída por uma combinação de dois ou mais produtos não solúveis entre si. A matriz envolve o reforço, podendo ter em sua composição adições, tais como aditivos e materiais de enchimento que modificam suas propriedades. Concreto, madeira e osso humano são alguns tipos de compósitos (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008, p. 55).

Os materiais compósitos são divididos em três tipos principais: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e estruturais. Também existem pelo menos duas (2) subdivisões para cada um, conforme figura 3 (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 579).

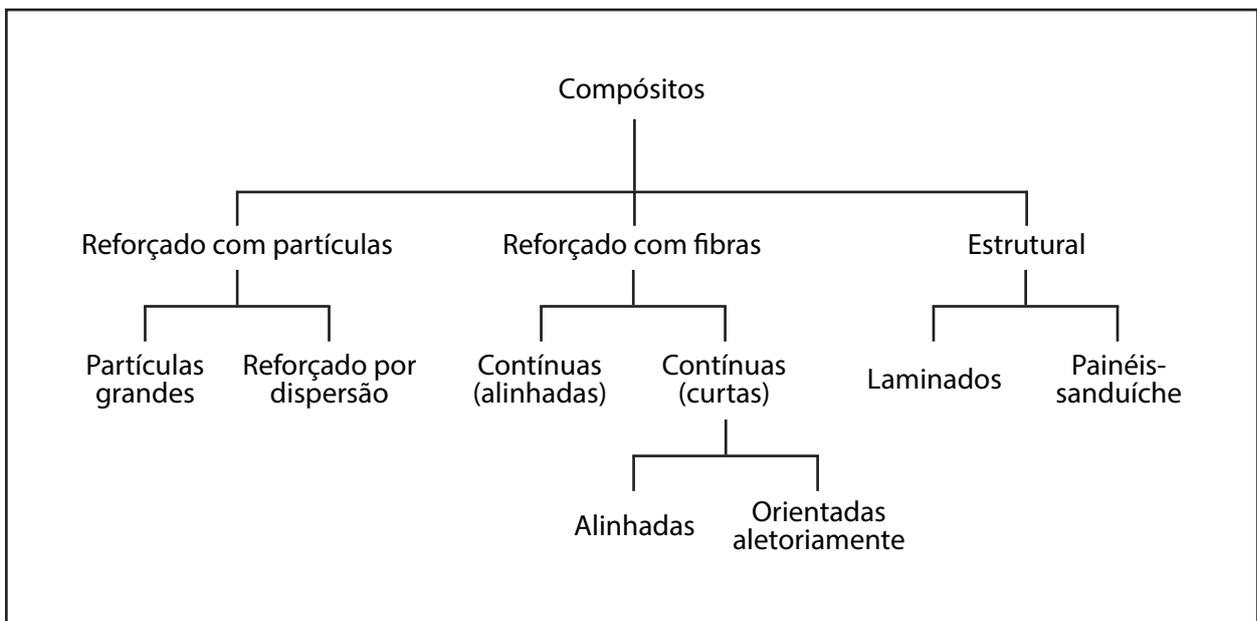


Figura 3 – Divisão dos materiais compósitos
Fonte: Callister e Rethwisch (2012, p. 537).

2.3 Compósitos poliméricos reforçados com fibra

Os compósitos poliméricos reforçados com fibra consistem em uma resina polimérica como matriz e a fase dispersa que é formada por fibras. Normalmente, esses materiais são utilizados para diversas aplicações, devido às suas propriedades mecânicas serem superiores às dos termoplásticos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p. 585).

Rodolfo Jr. e John (2006) estudaram o compósito de policloreto de vinila (PVC), reforçado com pó de pinus *elliotti* e pinus *taeda*, oriundo de resíduos da produção de móveis. O objetivo deste estudo foi de substituir assoalhos de madeira. O PVC foi utilizado como matriz, devido às suas propriedades mecânicas que se assemelham muito às da madeira. Os efeitos da incorporação dos resíduos de pinus na matriz polimérica foi estudado com dois tamanhos de partículas, amostras com 80% das partículas, retiradas em malha de 60 mesh e amostras com 95% de partículas, retiradas em malha 100 mesh e com variação dos teores de pinus de 10 a 60% em concentração mássica. Através das análises reológicas, elas obtiveram a influência do tamanho das partículas.

Para a obtenção do compósito, os resíduos provenientes do pinus, foram secos em estufa a 90°C. Durante a secagem dos resíduos, foram adicionados lubrificantes funcionais e outros aditivos, visando a redução da tendência de reabsorção de umidade pelas partículas. Duas técnicas de tratamento superficial das partículas foram utilizadas: a primeira foi com 1,5 % em massa de um lubrificante funcional e, a segunda, utilizou uma mistura de lubrificantes funcionais e agentes de acoplamento (RODOLFO JR.; JOHN, 2006, p. 5). A eficiência dos tratamentos foi comprovada, quando observado os teores de umidade, presente nos resíduos de madeira, as quais apresentavam um teor de umidade superior a 7% no estado normal de fornecimento e, após o tratamento, os teores de umidade caíram para valores entre 1% e 2%, adequados ao processamento por extrusão.

Também foram realizados ensaios mecânicos de flexão e impacto Charpy. Segundo o autor, foi desenvolvido um modelo teórico para determinar o módulo elástico do compósito, a partir da comparação aos ensaios de flexão. Esse modelo teórico considerou as propriedades do compósito proporcional à fração volumétrica e às propriedades dos componentes. As equações foram desenvolvidas, considerando um regime de deformação do reforço e da matriz, dentro do limite elástico e que a adesão entre as fases seria perfeita. A resistência ao impacto Charpy foi reduzida pela presença do reforço de madeira, sendo que as partículas de maior tamanho

médio apresentaram resultados superiores de resistência ao impacto. Esse resultado foi atribuído à maior continuidade da matriz dúctil de PVC. O comportamento do módulo de elasticidade, sob flexão, aumentou em função da incorporação de frações mássicas do reforço até um limite de 50%. Para o reforço com fração mássica de 60 %, em ambos os tipos de tratamento, o módulo de elasticidade na flexão foi inferior ao mínimo definido pelo modelo teórico, reforçando a suspeita de excesso de partículas e falta de adesão entre matriz e reforço. Todas as formulações apresentaram baixo grau de adesão entre a matriz de PVC e as partículas de madeira, evidenciando que o tratamento com o agente de acoplamento selecionado não apresentou a eficiência esperada (RODOLFO JR.; JOHN, 2006, p. 7).

Jeamtrakull *et al.* (2012, p. 2724) analisaram as propriedades mecânicas e o comportamento de desgaste de um compósito de madeira e PVC, utilizando três tipos diferentes de farinha de madeira com e sem a adição de fibras de vidro cortadas em pedaços. As partículas de farinha de madeira e a fibra de vidro foram misturadas a seco e úmido por compressão com o PVC para formar chapas. As propriedades mecânicas dos compósitos foram analisadas por ensaios de flexão e dureza Shore D. Também foram realizados ensaios de desgaste por abrasão, utilizando um Taber 5130 Abraser, de acordo com ASTM D40. A dureza dos compósitos ficou semelhante, evidenciando que o aumento do teor de madeira tende a aumentar a dureza, e esse comportamento também foi evidenciado nos resultados dos ensaios de flexão, até um teor de 40% de madeira, acima disso ocorre a queda da resistência a flexão, devido ao alto teor de madeira que tem dificuldade de se dispersar ao redor da matriz de PVC.

Com relação à comparação das propriedades de flexão dos três tipos de madeira, o nível de porosidade de uma das madeiras ajudou no ganho de resistência à flexão, uma vez que o PVC penetrou no corpo da partícula, durante o processamento, causando um intertravamento físico (JEAMTRAKULL *et al.*, 2012, p. 2727).

Como conclusão, os autores afirmaram que a adição de partículas de madeira na matriz de PVC aumentou a resistência ao desgaste do compósito, corroborando com os resultados de dureza e propriedades de flexão. O aumento da resistência ao desgaste dos compósitos foi devido ao fato de que as partículas de madeira são mais rígidas do que o PVC. A adição de fibra de vidro nos compósitos, com os três diferentes tipos de partículas de madeira, melhoraram as propriedades de resistência à

flexão e resistência ao desgaste. No entanto, a dureza pouco mudou (JEAMTRAKULL *et al.*, 2012, p. 2727-2728).

Khan *et al.* (2016), por moldagem por compressão, confeccionaram painéis multilaminares de 4, 8, 12, 16 e 20 camadas de fibra de carbono, dispersas em matriz de polietileno de alta densidade, obtendo assim, um compósito de PEAD, reforçado com fibras de carbono. Foram medidas as propriedades de superfície, mecânicas, térmicas e a interação do reforço com a matriz.

As propriedades de superfície foram analisadas por FTIR (Análise Infravermelho por Transformada de Fourier). Ocorreu interação física e química entre a matriz e o reforço, sem o uso de agentes de acoplamento, o que foi confirmado na microscopia eletrônica por varredura (MEV), a qual mostrou que as fibras estavam bem envolvidas com a matriz de polietileno. As análises térmicas de termogravimetria (TGA) mostraram a extensão da degradação e a estabilidade térmica do material, onde a decomposição das amostras testadas ocorreu no intervalo de 30 a 1400°C (KHAN *et al.*, 2016, p. 1078).

O módulo de flexão na direção transversal aumentou com o aumento das camadas de fibra de carbono e com uma variação de 64% na resistência à flexão entre o menor e o maior número de camadas. A melhora foi devido à colocação adequada da fibra de carbono na direção transversal, da cura integral e da adesão das camadas da fibra de carbono com a matriz de polietileno (KHAN *et al.*, 2016, p. 1079).

A resistência ao impacto também aumentou de 2,78 J/pol. para 28,71 J/pol., quando o número de camadas de fibra de carbono foi aumentado de quatro (4) para doze (12). Esse aumento significativo ocorreu em função da alta tenacidade da matriz de polietileno, porque com o aumento das camadas de fibra de carbono a quantidade de polietileno também aumentou. Além disso, teve boa interação entre o reforço e a matriz polimérica, na direção perpendicular à força de impacto. A boa adesão entre o reforço e a matriz refletiu na melhora das propriedades mecânicas e confirmou a eficácia da técnica de moldagem por compressão, dando uniformidade às chapas, onde as fibras estavam bem acopladas ao polietileno, sem o uso de agente de compatibilização. Os resultados obtidos confirmaram que o compósito testado tem potencial de aplicação, devido à sua alta resistência e estabilidade térmica (KHAN *et al.*, 2016, p. 1080).

Matuana, Park e Balatinecz (1998) investigaram os efeitos da estrutura microcelular expandida em compósitos de PVC, com fibra de madeira do tipo

comercial, com comprimento de 30-40 µm e diâmetro de 0,3-1,0 µm. O compósito foi expandido com CO₂. As investigações foram em relação ao comportamento das propriedades mecânicas e físicas. Entende-se como uma estrutura microcelular, a estrutura formada com auxílio de expansores químicos ou físicos, gerando uma espuma, a qual reduz a massa do objeto produzido. Devido à presença de vazios na estrutura, ocorre uma melhora na resistência ao impacto.

Os compósitos foram obtidos, utilizando fibras tratadas e não tratadas, as quais foram homogeneizadas em misturador de bolas. A moldagem ocorreu por compressão, e a formação das chapas ocorreu em prensa a quente. Foram determinados os parâmetros de sorção. A morfologia celular das espumas foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura. Ensaio de tração e impacto das espumas foram realizados para investigar a dependência dessas propriedades em função da morfologia celular (MATUANA; PARK; BALATINECZ, 1998, p. 1863).

Os ensaios mostraram que a formação de espuma no material compósito reduziu a massa e aumentou significativamente a resistência ao impacto, porém a resistência à tração foi reduzida, devido à presença de vazios na matriz polimérica, sendo que a resistência à tração diminuiu, à medida que a fração vazia aumenta. Quando um agente de acoplamento não é utilizado durante a composição, as fibras tendem a aglomerar-se, devido à interações fortes entre elas, provenientes da ligação de hidrogênio e, a dispersão dessas fibras na matriz torna-se não uniforme. Devido à dispersão não uniforme das fibras, ocorreram irregularidades na estrutura da espuma. Os autores afirmam que o tratamento do reforço para melhorar a aderência das fibras ao polímero é um meio adequado para melhorar a resistência mecânica (MATUANA *et al.*, 1998, p. 449-450; MATUANA; PARK; BALATINECZ, 1998, p. 1870-1871).

Kargar; Behraves; Taheri (2016, p.1675-1676) estudaram o desempenho mecânico de compósitos de PVC com madeira, espumados e não espumados, reforçados com fibras de vidro contínuas e processados por extrusão em extrusora dupla rosca. A formação de espuma foi realizada durante o processo de extrusão. Para caracterizar o material, foram realizados ensaios por termogravimetria (TG), ensaios de flexão e medição da densidade por meio de uma balança digital com precisão de 0,001g.

Os resultados mostraram uma redução da densidade na ordem de 14%, para perfis reforçados com quatro cordões contínuos de fibra de vidro. Em geral, a resistência à flexão e o módulo de elasticidade

diminuíram, após a formação da espuma, enquanto que tal redução foi maior nos compósitos não reforçados com fibra de vidro. Por outro lado, o reforço com fibra de vidro contínua aumentou significativamente os valores de resistência à flexão (KARGAR; BEHRAVESH; TAHERI, 2016, p. 1677-1679).

Martins *et al.* (2004) estudaram a influência do plastificante e do comprimento das fibras em compósitos de PVC reforçados com fibra de sisal. As propriedades mecânicas e térmicas foram o foco do estudo.

A preparação das fibras de sisal ocorreu, através da lavagem com água por uma (1) hora a 80°C, com secagem em estufa a 60°C por seis (6) horas. Uma guilhotina manual foi utilizada para cortar as fibras transversalmente em diferentes comprimentos. A adição do plastificante em estado sólido e líquido ao PVC foi realizada em um misturador intensivo à temperatura de 80 ± 5°C por um tempo de 5 minutos. A adição das fibras ocorreu em três comprimentos, sendo de 3mm, 6mm e 10mm. Para preparação dos compósitos, foi utilizado um misturador aberto de cilindros com disposição horizontal, à temperatura de 170 ± 5°C, no tempo de 10 ± 2 min. Foram realizados ensaios de termogravimetria (TG), análises de calorimetria exploratória diferencial (DSC), ensaios de resistência à tração e ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As micrografias de uma fibra de sisal, sem tratamento, e de uma fibra, após a etapa de lavagem, mostraram que na fibra, sem tratamento, a superfície está recoberta pelas células de parênquima e pelos resíduos, provenientes do processo de beneficiamento da fibra. Foi evidenciado que a lavagem com água quente remove esses resíduos superficiais e parcialmente as células do parênquima que podem prejudicar a interação entre a matriz polimérica e as fibras. A adição das fibras leva à redução dos valores de resistência à tração e alongação na ruptura. Com relação ao comprimento de fibra de sisal, os compósitos com fibra no comprimento de 6mm apresentaram um melhor desempenho, quando solicitadas mecanicamente. Provavelmente, o tamanho de 6mm de comprimento, um tamanho médio, provoca uma melhor dispersão delas na matriz. O plastificante em estado sólido apresentou um melhor desempenho, talvez, devido à melhor interação entre a resina e o plastificante (MARTINS *et al.*, 2004, p. 328-330).

A análise por DSC teve como objetivo verificar o aparecimento de fase cristalina na matriz com a adição do plastificante sólido e também verificar se as fibras de sisal interferem no processo de cristalização. Foi constatada a presença de fase cristalina no compósito com plastificante sólido, o que pode

estar relacionado com os resultados mecânicos encontrados. Na análise por TG, foi verificado que as fibras de sisal não introduziram um processo de degradação adicional pela interação com a matriz polimérica. No entanto, a substituição do plastificante líquido pelo plastificante sólido, não altera a estabilidade térmica dos materiais até a temperatura de aproximadamente 250°C. A partir de 300°C, ocorre uma perda de massa mais acentuada para a matriz que contém o plastificante líquido, em relação ao plastificante sólido. Esse comportamento pode estar relacionado com o comportamento térmico do plastificante sólido, onde sua perda de massa só se inicia à temperatura de 300°C, devido ao fato do plastificante apresentar ramificações que aumentam a resistência térmica dele, quando comparados com o plastificante líquido. As análises de MEV mostraram que as fibras de sisal possuem uma maior mobilidade pela matriz plastificada com o plastificante sólido, quando comparada com a matriz com plastificante líquido, resultando uma melhor adesão na interface da matriz com a fibra, o que contribui positivamente para o desempenho mecânico encontrado (MARTINS *et al.*, 2004, p. 332).

Balzer *et al.* (2007) estudaram as propriedades mecânicas do compósito de PVC reforçado com fibras de bananeira. A preparação das fibras de bananeira ocorreu, através da imersão em uma solução aquosa de hipoclorito de sódio com uma concentração de 10% em volume, por um período de 10 minutos. Após as fibras foram secas em estufa a 60°C, desfiadas e cortadas em lotes de 10mm de comprimento. Para preparação dos compósitos, foi utilizada uma extrusora monorosca. O processamento ocorreu a uma temperatura entre as zonas de aquecimento de 160 a 180°C, com rotação da rosca de 60 rpm. A adição das fibras ao composto de PVC foi nas proporções de 5, 10 e 20% em volume. Os compósitos, após extrudados, foram resfriados ao ar e moídos em um moinho de facas, para posterior injeção dos corpos de prova. Foram realizados ensaios mecânicos de tração (norma ISO 527) e impacto (norma ISO 180). Os corpos de prova, utilizados no ensaio de impacto, após fratura, foram avaliados em microscópio eletrônico de varredura. Também foi determinada a massa específica do compósito, através do método por deslocamento de água (pesagem hidrostática) com base na norma ASTM D792. Com o aumento do teor das fibras de bananeira, ocorreu um pequeno decréscimo na massa específica do compósito, provavelmente, devido ao fato da menor massa específica das fibras de bananeira e de sua porosidade, quando comparado ao composto rígido de

PVC. Houve aumento de 8% na resistência à tração e de 43% na resistência ao impacto, sendo que a melhor composição foi com a adição de 10% de fibra. A incorporação da fibra no composto de PVC, mesmo sem a adição de compatibilizantes, traz um potencial de reforço ao compósito produzido, altera a concentração de tensão local ao longo das fibras, melhorando a resistência ao impacto e uma discreta redução da massa específica do compósito. Nas micrografias, constatou-se baixa afinidade entre a matriz e a fibra, devido à falta de adesão na interface e pelos vazios decorrentes do arrancamento das fibras, sugerindo a necessidade da adição de um agente compatibilizante, de forma a incrementar a adesão interfacial (BALZER *et al.*, 2007, p. 2-4).

El-Shekeil *et al.* (2014) analisaram a influência nas características mecânicas e térmicas de compostos de PVC misturados com fibras de poliuretano, reforçado com fibras de Kenaf, uma planta nativa da Ásia do Sul. Os compósitos foram preparados com teores de fibras de 20, 30 e 40% em massa. A mistura ocorreu por compressão, utilizando-se uma máquina de moldagem do mesmo tipo. Foram estudadas as resistências à tração e ao impacto Izod, propriedades térmicas por análises termogravimétricas (TG) e as propriedades morfológicas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Com o aumento do teor de fibras, a resistência à tração apresentou uma redução, conforme segue: de 8,9 MPa para 20% de fibra, 7,75 MPa para 30% de fibra e 6,7 MPa para 40% de fibra. A resistência ao impacto também diminuiu com o aumento do teor de fibras, como segue: 34,9 kJ/m² para 20% de fibra, 29,9 kJ/m² para 30% de fibra e 20,2 kJ/m² para 40% de fibra. O aumento no teor de fibras causa falta de absorção do impacto, devido à redução do teor do composto de PVC e possivelmente da incompatibilidade do PU com PVC. As análises de MEV foram realizadas nos corpos de prova fraturados por criogenia, onde foi possível observar descolamento das fibras da matriz e a presença de vazios entre a fibra e a matriz, evidenciando a falta de aderência da fibra com a matriz, o que pode ser observado nos resultados dos ensaios mecânicos. Com o aumento do teor de fibras, aumentou o número de pontos de falhas e de tensão. Na análise termogravimétrica, evidenciou-se que, na faixa de temperatura de 250°C e 300°C, a tendência de perda de massa para os três teores de fibras apresentaram uma perda ligeiramente crescente com o aumento do teor de fibra, assim, menor teor de fibra tem uma estabilidade térmica mais elevada do que um maior teor de fibra. No entanto, em outro ponto de degradação, verifica-se que o pico máximo de degradação

aumentou, após a introdução de fibra kenaf, a partir de 275°C, comparando com o pico de degradação do composto sem a fibra kenaf. Isso mostra que o kenaf aumentou a estabilidade térmica dos compósitos a temperaturas mais elevadas (EL-SHEKEIL *et al.*, 2014, p. 134).

Zhang *et al.* (2014, p. 604) analisaram o comportamento mecânico de compósitos de PVC reforçados com fibras de mandioca com e sem o tratamento da fibra. As fibras de mandioca foram adicionadas a um misturador de alta velocidade e, quando a temperatura atingiu 80 °C, adicionou-se 1% do agente de acoplamento. A mistura ocorreu durante o tempo de 25 min, após esse período, as fibras foram levadas a um forno a 105 °C, durante duas (2) horas para secagem. A preparação dos compósitos foi realizada em um misturador de alta velocidade com teor de 50% em massa. Após, os corpos de prova foram moldados por compressão. Os corpos de prova foram submetidos a testes de tensão-deformação, resistência à flexão e à microscopia eletrônica de varredura (MEV). O efeito do tratamento superficial da fibra de mandioca foi positivo. Aumentou em 29,3% a resistência à flexão e 41,1% a resistência à tração do compósito em comparação com a composição não tratada. Na análise por MEV, foi possível observar que os compósitos com fibras não tratadas apresentaram superfícies de fraturas ásperas e muitas lacunas entre o reforço e a matriz. Após tratadas, as fibras apresentaram uma superfície de fratura compacta e lisa com pequenas folgas e a interface fibra-matriz é indistinta, indicando a melhor compatibilidade entre a fibra e a matriz.

3 Conclusão

Nota-se que, para substituir a madeira em diversas aplicações, os compósitos reforçados com fibra natural estão sendo os mais utilizados e muitos tipos de fibra estão sendo estudadas como reforço. Para aplicação estrutural, a matriz polimérica mais utilizada nos estudos é a de PVC, devido às suas propriedades. Muitos trabalhos reduzem a massa dos compósitos, através da utilização de agentes expansores, mesmo que isso acarrete em perda de propriedades mecânicas.

Características de superfície, fração de volume, propriedades físicas e orientação da fibra natural têm influência significativa no desempenho mecânico dos compósitos. A natureza das fibras controla o comportamento mecânico dos compósitos, por isso a modificação e a seleção crítica das fibras são necessárias para obter um alto desempenho do composto. Para compósitos reforçados com fibras naturais, o

tratamento das fibras tem influenciado no comportamento mecânico do material resultante. O tratamento das fibras naturais ajuda a estabilizar a área de ligação entre a fibra e a matriz, o que aumenta a capacidade da fibra para transportar a carga sob cargas mecânicas (SHALWAN; YOUSIF, 2013, p. 23).

A queda na resistência à tração é atribuída à fraca ligação interfacial da fibra com a matriz. Vários fatores afetam a resistência dos compósitos, tais como, resistência das fibras e matriz, teor de fibras e a ligação interfacial entre fibras e matriz. As fibras funcionam como portadoras de carga na matriz. A boa resistência à tração depende mais da distribuição de tensões efetivas e uniformes. A força à matriz com baixa resistência à tração deve resultar no aumento da resistência à tração do compósito, se a ligação interfacial for boa. Uma vez que existe uma queda na resistência à tração, pensa-se que a ligação interfacial é pobre (EL-SHEKEIL *et al.*, 2014, p. 132).

Referências

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS. **Anuário da indústria de implementos rodoviários**. São Paulo, 2016. 190 p.

BALZER, P. S. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas de um composto de PVC modificado com fibras de bananeira. **Polímeros**, v. 17, n. 1, p. 1-4, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 809 p.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia de construção. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 25, p. 1-13, 2008.

CASTILHOS, L. V. **Projeto e construção da tampa lateral inferior de um semirreboque destinado ao transporte de grãos**. 2011. 86 f. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Entraves logísticos ao escoamento de soja e milho**. São Paulo, 2015. 158 p.

EL-SHEKEIL, Y. A. *et al.* Influence of fiber content on mechanical, morphological and thermal properties of kenaf fibers reinforced poly(vinyl chloride)/

thermoplastic polyurethane poly-blend composites. **Materials and Design**, v. 58, p. 130-135, 2014. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2=-2s0.84894038465-&doi=10.1016%2fj.matdes.2014.01.047&partnerID=40&md5=1c133219a0e26f6ce6831c0c2f887e12>>. Acesso em: 11 jan. 2017.

JEAMTRAKULL, S. *et al.* Effects of wood constituents and content, and glass fiber reinforcement on wear behavior of wood/PVC composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2721-2729, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812002703>>. Acesso em: 21 nov. 2016.

KARGAR, M.; BEHRAVESH, A. H.; TAHERI, H. M. Experimental investigation on mechanical properties of extruded foamed PVC-wood composites reinforced with continuous glass fibers. **Polymer Composites**, v. 37, n. 6, p. 1674-1680, 2016.

KHAN, S. M. *et al.* 2D carbon fiber reinforced high density polyethylene multi-layered laminated composite panels: structural, mechanical, thermal, and morphological profile. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 32, p. 1077-1082, 2016.

KOMORNICKI, J. *et al.* **Polymer composites for automotive sustainability**. Brussels: Suschem, 2016. 56 p.

MARKARIAN, J. Wood-plastic composites: current trends in materials and processing. **Plastics, Additives and Compounding**, v. 7, p. 20-26, 2005.

MARTINS, G. S. *et al.* Caracterização mecânica e térmica de compósitos de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal. **Polímeros**, v. 14, n. 5, p. 326-333, 2004.

MATUANA, L. M. *et al.* Influence of interfacial interactions on the properties of PVC/cellulosic fiber composites. **Polymer Composites**, v. 19, n. 4, p. 446-455, 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/pc.10119>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

MATUANA, L. M.; PARK, C. B.; BALATINECZ, J. J. Cell morphology and property relationships of microcellular foamed pvc/wood-fiber composites. **Polymer Engineering & Science**, v. 38, n. 11, p. 1862-1872, 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/pen.10356>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

RIO GRANDE DO SUL. Agência de Desenvolvimento e Promoção do Investimento.

Política setorial automotivo e implementos rodoviários. Porto Alegre, 2012. 54 p.

RODOLFO JR., A.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de PVC reforçado com resíduos de pinus para substituir madeira convencional em diversas aplicações. **Polímeros**, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2006.

SARTORI, L. **Avaliação comparativa de desempenho ambiental de duas caixas de carga de semi-reboque bitrem graneleiro: compósito natural versus compósito sintético.** 2007. 81 f. (Mestrado em Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

SCHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais.** 6.

ed. São Paulo: Pearson, 2008. 557 p.

SHALWAN, A.; YOUSIF, B. F. In state of art: mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres. **Materials & Design**, v. 48, p. 14-24, 2013.

ZHANG, Y. *et al.* Mechanical and interfacial properties of poly(vinyl chloride) based composites reinforced by cassava stillage residue with different surface treatments. **Applied Surface Science**, v. 314, p. 603-609, 2014. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.084906655060&doi=10.1016%2fj.c.2014.07.044&partnerID=40&md5=763168deaffb4e2a9b37fad10a8a7ad3>>. Acesso em: 11 jan. 2017.

