

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO PÓS-CONSUMO E SERRAGEM DE *Pinus elliottii*

M. Poletto, J. Dettenborn, A. J. Zattera, M. Zeni

Universidade de Caxias do Sul (UCS). Laboratório de Polímeros. Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 - CEP 95070-560. Caxias do Sul, Brazil. Correo electrónico: mzandrad@ucs.br

Recibido: Junio de 2009; Aceptado: Enero de 2010

Resumo

As propriedades mecânicas de compósitos de poliestireno expandido pós-consumo e serragem de *Pinus elliottii* foram analisadas com o intuito de verificar a utilização destes resíduos na obtenção de novos materiais. O poliestireno expandido (EPS) possui baixo valor de mercado para a reciclagem e a serragem é outro resíduo abundante na região nordeste do RS, devido à grande concentração de indústrias pertencentes ao pólo moveleiro. O EPS foi moldado por compressão em molde aquecido para aumento da densidade aparente. Os compósitos foram obtidos em extrusora dupla rosca co-rotante durante sua preparação e por injeção para a confecção dos corpos de prova para ensaios mecânicos. Foram avaliados os efeitos da adição de 20 e 40% em massa de serragem nas propriedades mecânicas. Dentre as propriedades avaliadas, o aumento da quantidade de serragem provocou aumento do módulo de elasticidade, na resistência à tração e na resistência ao impacto dos compósitos.

Palavras-chave: compósitos, reciclagem, poliestireno expandido, serragem.

ABSTRACT

The mechanical properties of post-consumer composites of expanded polystyrene and sawdust of *Pinus elliottii* were analyzed in order to verify the use of such waste in obtaining new materials. The expanded polystyrene (EPS) has low market value for the recycling and other waste sawdust is abundant in the region northeast of RS-Brazil, due to high concentration of furniture industries. The EPS was shaped by heated compression in order to increase the apparent density. The composites were obtained in twin screw extruder during their preparation and injection for the preparation of samples for testing. The effects of adding 20 and 40% by mass of sawdust in mechanical properties were evaluated. Among the properties evaluated, increasing the quantity of sawdust caused increase in the modulus of elasticity, the tensile strength and impact resistance of composites.

Key words: composites, recycling, expanded polystyrene, sawdust.

RESUMEN

Las características mecánicas de los materiales reforzados del post-consumo del poliestireno y del serrín ampliados del *pinus elliottii* eran analizadas para verificar el uso de tal basura en la obtención de los nuevos materiales. El poliestireno expandido (EPS) tiene valor de mercado bajo para el reciclaje y el otro serrín inútil es abundante en el noreste de la región sud del Brasil, debido a la alta concentración de industrias de los muebles. El EPS fue formado por la compresión calientes para aumentar la densidad evidente. Los materiales reforzados fueron obtenidos en una extrusora de doble tornillo durante su preparación e inyección para la preparación de las muestras para la prueba. Los efectos de agregar 20 y el 40% por la masa del serrín en características mecánicas fueron evaluados. Entre las características evaluadas, el aumento de la cantidad de serrín causó aumento en el módulo de la elasticidad, de la fuerza extensible y de la resistencia de impacto del material reforzado.

Palabras claves: Material reforzado, reciclado, poliestireno expandido, serrín.

INTRODUÇÃO

Atualmente o crescente aumento do uso de fibras naturais como reforço em polímeros termoplásticos é impulsionado por razões ecológicas e especialmente uma alternativa ao uso de fibras de vidro. As fibras naturais apresentam boas propriedades mecânicas, fácil processamento, baixo custo quando comparadas as fibras inorgânicas, são amplamente disponíveis e renováveis, possuem baixa densidade e propriedades específicas elevadas além de serem biodegradáveis e menos abrasivas aos equipamentos utilizados no processamento [1-3]. A desvantagem no uso de fibras naturais é a baixa temperatura de processamento e a elevada absorção de umidade das fibras e conseqüentemente dos compósitos produzidos [4].

Os materiais poliméricos perfazem uma quantia considerável dos resíduos sólidos municipais. Assim uma quantidade substancial de poliolefinas potencialmente recicláveis, especialmente aquelas provenientes de embalagens, deve ser diariamente coletada e enviada à reciclagem [5]. Nos últimos anos intensificaram-se os estudos para combinar estas poliolefinas recicláveis com resíduos de madeira ou fibras naturais em uma estrutura de material compósito devido ao crescente interesse da indústria [2, 3, 5, 6].

Neste contexto, a região nordeste da *Serra Gaúcha* possui um pólo moveleiro com grande concentração de indústrias madeireiras que geram aproximadamente 348 ton de serragem de *Pinus elliottii* por mês e que em sua totalidade não é completamente reaproveitada ou reinserida no ciclo produtivo [7]. O poliestireno expandido (EPS) é um polímero termoplástico amplamente utilizado na indústria como embalagem dos mais diversos tipos de produtos e também como isolante térmico na construção civil [8,9]. O EPS pós-consumo é um material passível de reciclagem descartado juntamente com os resíduos recicláveis municipais. A geração deste resíduo no município de *Caxias do Sul* é de aproximadamente 28 ton por mês [10]. A falta de um mercado específico para a reciclagem do EPS faz com que este material seja depositado em aterro fazendo com que áreas cada vez maiores devam ser destinadas para disposição deste resíduo [10].

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma alternativa para reciclagem dos resíduos de EPS e serragem através da confecção de compósitos de EPS pós-consumo reforçados com serragem de *Pinus elliottii* avaliando as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais. A madeira utilizada nos experimentos era basicamente composta por resíduos de *Pinus elliottii* de uma madeireira de *Caxias do Sul* e se encontrava na forma de cavacos. Os cavacos foram então moídos em moinho de facas para redução do tamanho das partículas. Secou-se a

serragem em estufa a temperatura de 65°C por 24 horas para posteriormente ser utilizada no processo de extrusão. As partículas de serragem foram então caracterizadas através de ensaio granulométrico, segundo ASTM D1921. O EPS utilizado é proveniente de embalagens de eletrodomésticos e utensílios em geral e foi doado pela *Associação de Recicladores Serrano* localizada no município de Caxias do Sul. A densidade média aparente do EPS conforme recebido foi determinada segundo a norma ABNT NBR 11949 obtendo-se 22,5 kg/m³. Para a redução da densidade aparente e também visando à melhor processabilidade deste material o EPS foi prensado utilizando-se uma prensa hidráulica FKL-150 ton com pressão de 100 kgf/cm² e temperatura de 130°C por 5 minutos. Logo após as chapas de EPS obtidas do processo de prensagem também foram moídas em moinho de facas utilizando-se uma peneira de 2,5 mesh.

MÉTODOS

Confecção dos compósitos. Os compósitos, sem agente compatibilizante, foram confeccionados em uma extrusora dupla-rosca co-rotante MH-COR-20-32 nas proporções de 0, 20 e 40% em massa de serragem sendo que a alimentação dos materiais foi realizada com auxílio de dois dosadores volumétricos, um para cada material. A extrusora dupla-rosca utilizada possui diâmetro da rosca de 20 mm e razão comprimento diâmetro L/D 32, com degasagem. A extrusão foi realizada com temperaturas nas diferentes zonas de aquecimento variando conforme o perfil a seguir: 100, 160, 175, 185, 190, 170°C na zona de degasagem, 185, 190, 190 °C e com temperatura do fundido igual a 190°C, conforme trabalho [16] anteriormente desenvolvido. O material extrusado em dupla-rosca foi transformado em grânulos utilizando-se um picotador e seguiu para a secagem em estufa a temperatura de 65°C por 24 horas [17] e posterior processamento em injetora *Himaco LH 150-80* com temperaturas entre 180 e 190°C, para a confecção de corpos de prova de resistência à tração, resistência à flexão e resistência ao impacto.

Ensaios mecânicos. O ensaio de tração foi realizado uma máquina de ensaios universais modelo EMIC DL-3000, segundo ASTM D 638, com extensômetro de 50 mm. A velocidade do ensaio foi fixada em 1,5 mm/min. Os ensaios de resistência à flexão três pontos também foram realizados na máquina de ensaios universais modelo EMIC DL-3000, de acordo com a ASTM D 790, com velocidade de ensaio de 1,5 mm/min. Os ensaios de resistência ao impacto IZOD com entalhe foram realizados com martelo de 1J em equipamento da CEAST modelo *Resil 25*, de acordo com a ASTM D 256. A densidade dos compósitos também foi determinada através da relação entre massa e volume.

Microscopia eletrônica de varredura. As micrografias foram obtidas de corpos de prova criogenicamente fraturados utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura marca *Shimadzu*

modelo *Superscan SS -550* operando com tensão de aceleração de 10 kV. As superfícies fraturadas foram recobertas com ouro utilizando-se um metalizador antes da análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica da serragem utilizada.

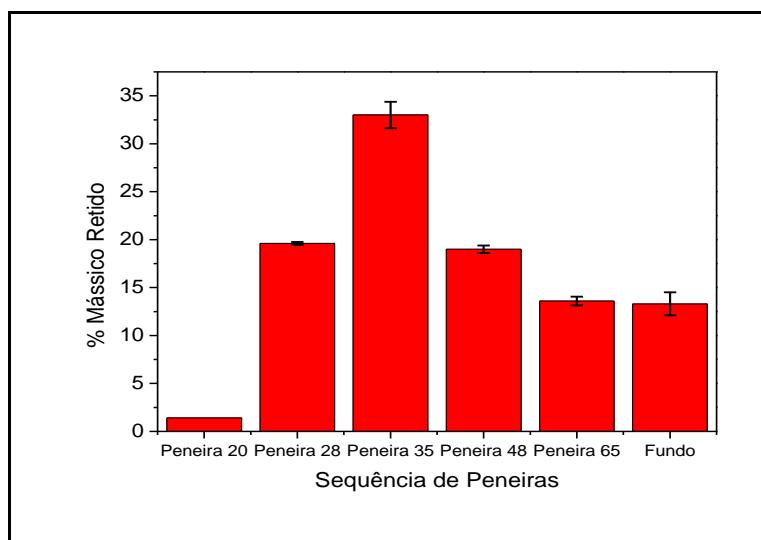


Figura 1. Distribuição granulométrica da serragem utilizada.

Verifica-se na distribuição do tamanho de partícula que a maior proporção da serragem encontra-se na faixa de 28 a 48 mesh (0,297 a 0,595 mm). Partículas com distribuição de tamanho entre 0,24 e 0,5 mm são preferidas, pois possuem elevada área superficial e são mais homogeneamente distribuídas na matriz quando comparadas aos compósitos com fibras longas [11].

A Tabela 1 apresenta os valores de resistência à tração e alongamento na ruptura, resistência à flexão e deformação na ruptura para as amostras e a densidade dos compósitos obtidos.

Tabela 1. Propriedades mecânicas e densidade dos compósitos de EPS.

| Proporção serragem % | Resistência à Tração MPa | Alongamento na Ruptura % | Resistência à Flexão MPa | Deformação na Ruptura % | Densidade g/cm³ |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|
| 0 | 29 ± 3 | 0,98 ± 0,11 | 47 ± 4 | 1,72 ± 0,15 | 1,05 ± 0,01 |
| 20 | 29 ± 4 | 0,73 ± 0,14 | 32 ± 6 | 0,87 ± 0,17 | 1,12 ± 0,01 |
| 40 | 32 ± 2 | 0,56 ± 0,06 | 25 ± 4 | 0,53 ± 0,08 | 1,20 ± 0,02 |

Observa-se que a resistência à tração aumenta com o respectivo aumento da quantidade de serragem até atingir o valor máximo com a adição de 40% em massa de serragem. A deformação específica por outro lado diminui em virtude do aumento de adição de serragem. A resistência à flexão diminui de forma mais pronunciada com o aumento da quantidade de serragem.

As propriedades mecânicas dos compósitos são governadas pelas propriedades dos componentes individuais, pela orientação das fibras de reforço e pela adesão interfacial entre o reforço e a matriz [12]. A resistência à tração para a serragem depende de fatores inerentes às características de um material anisotrópico como a madeira. Além do mais, para a serragem a resistência não se refere à resistência das fibras individuais, mas sim a resistência de um agregado de partículas de serragem [13]. Desta forma, a resistência à tração dos compósitos deve aumentar com o aumento da proporção de serragem o que só irá ocorrer se houver dispersão homogênea da serragem na matriz polimérica [13]. Com o aumento da concentração de serragem o esforço é mais uniformemente distribuído e a resistência à tração do compósito aumenta [14] o que também pode causar aumento no módulo elástico.

Como pode ser constatado pela Tabela 1 ocorreu aumento da densidade com a adição de serragem no compósito. A densidade aumenta com o aumento da quantidade de serragem devido à densidade da madeira ser superior a densidade do poliestireno. O aumento da densidade dos compósitos provocado pela adição de 20% de serragem foi de 6% e adicionando-se 40% o aumento foi de 14%.

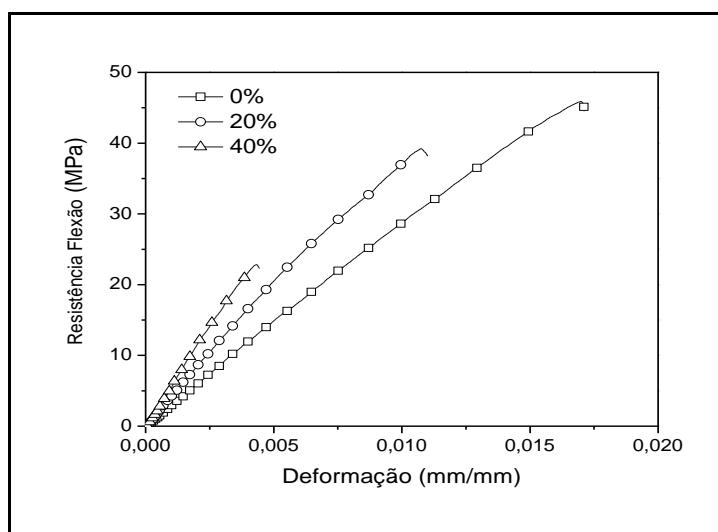


Figura 2. Comportamento tensão versus deformação obtido em flexão.

Na Figura 2 são apresentadas às curvas de resistência à flexão em função da deformação para os compósitos. À medida que se adiciona serragem à formulação de reforço, se acresce o coeficiente de inclinação da reta e desta forma o módulo em flexão aumenta. O aumento do teor de

fibra provoca o aumento da rigidez do material, reduzindo a deformação na ruptura em cerca de 50% para os compósitos com 20% de serragem e aproximadamente 70% para aqueles onde a adição de serragem foi de 40% em massa.

O módulo elástico dos compósitos variou de forma praticamente linear com o aumento da quantidade de serragem, como pode ser observado na Figura 3. O módulo elástico obtido com a adição de 40% em massa de serragem é aproximadamente da ordem de duas vezes superior do módulo do poliestireno reciclado demonstrando que a adição de serragem aumentou a rigidez diminuindo a elasticidade do compósito. Comportamento semelhante foi verificado por *Mondadori* e colaboradores [18] avaliando a adição de fibras curtas de vidro a matriz de poli(tereftalato de etileno) reciclado através do processo de extrusão em dupla-rosca onde o aumento na quantidade de fibras curtas e responsável pelo crescente aumento do módulo em flexão bem como da resistência ao impacto.

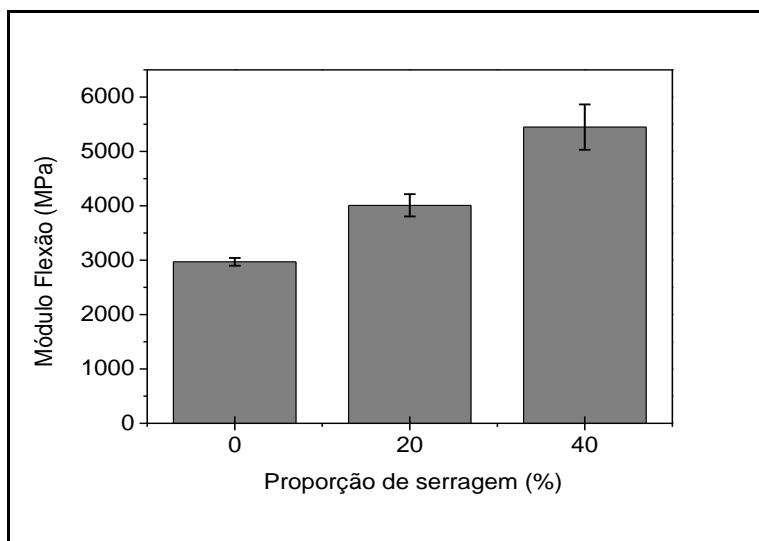


Figura 3. Módulo em flexão dos compósitos EPS.

A Figura 4 apresenta os valores de resistência ao impacto em função da proporção de adição de serragem. A resistência ao impacto também aumentou com o aumento da quantidade de serragem. Os fatores que afetam o modo da fratura em compósitos reforçados por fibras são: resistência da fibra e da matriz, eficiência na transferência de esforços da matriz para o reforço, resistência a propagação da trinca, resistência da ligação entre a fibra e a matriz, concentração volumétrica da fibra e sua organização geométrica [15]. Entretanto, uma forte interação entre a fibra e a matriz reduz a resistência ao impacto dos compósitos [12]. O aumento da resistência ao impacto, bem como o aumento da resistência a tração, com a adição de serragem pode estar associado ao fato de ocorrer uma leve interação entre o anel benzênico e o grupo hidroxila da celulose [3,12,14]. A presença das partículas de serragem em diversas direções também pode impedir o crescimento da

falha distribuindo a tensão aplicada no momento do impacto através de uma maior área [12] o que também causaria maior resistência ao impacto.

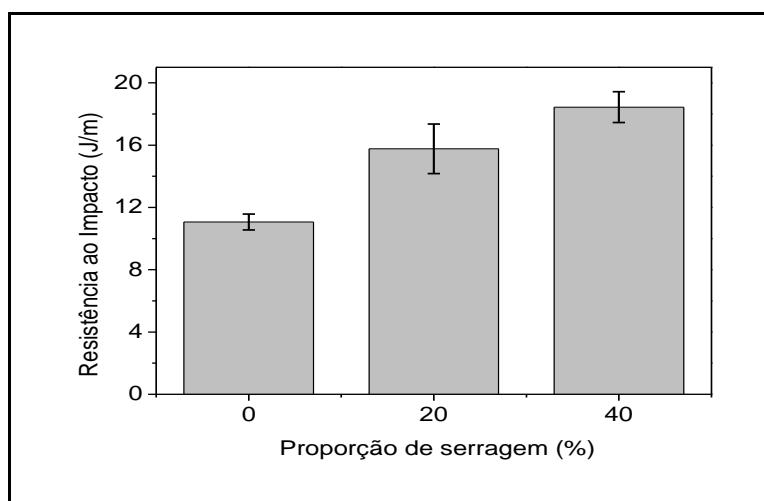


Figura 4. Resistência ao impacto dos compósitos EPS.

A Figura 5 apresenta as micrografias obtidas para os compósitos com 40% em massa de serragem. Na Figura 5a observa-se uma partícula de serragem que possui em sua superfície uma pequena quantidade de poliestireno aderida o que pode estar associado com a rugosidade superficial da fibra [3] ou com uma leve interação entre a matriz e as partículas de serragem causada pela interação entre a polaridade do anel aromático e os grupos hidroxila da celulose presente nas partículas de serragem [3,12,14], o que poderia contribuir para o aumento das propriedades mecânicas avaliadas. Na Figura 5b podem-se verificar as marcas estriadas deixadas pela fibra na matriz devido ao ancoramento mecânico.

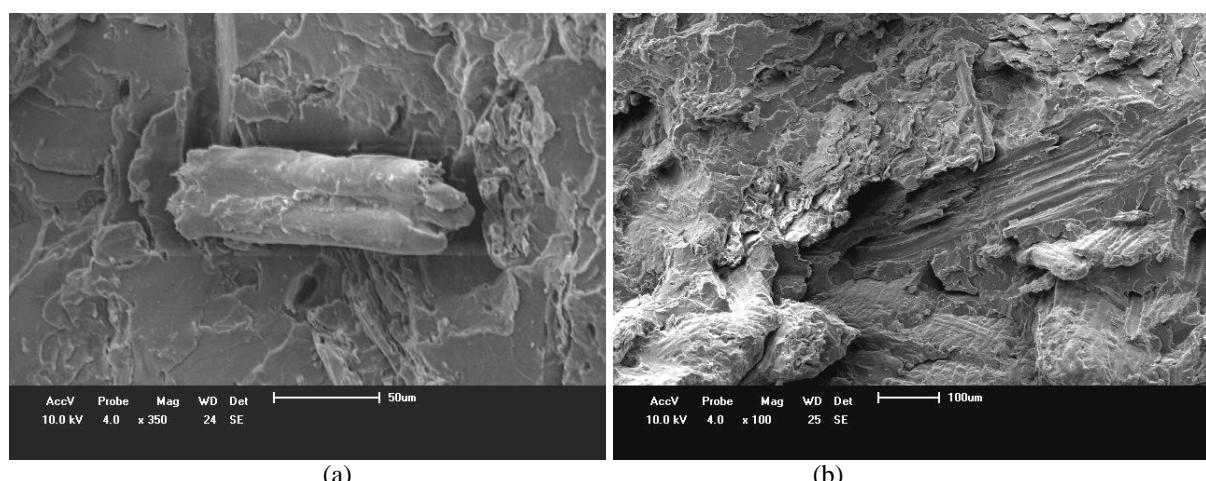


Figura 5. Micrografias (MEV) dos compósitos EPS com 40% de serragem.

CONCLUSÕES

A mistura de serragem de *Pinus elliottii* a matriz de poliestireno reciclado mostrou aumento das propriedades mecânicas avaliadas quando comparadas apenas ao poliestireno reciclado. A densidade dos compósitos apresentou correlação com a proporção de serragem e com as propriedades mecânicas.

Foi verificado pela microscopia eletrônica de varredura um ancoramento mecânico e uma leve interação entre o poliestireno e as partículas de serragem. A adição de até 40% em massa de serragem a matriz de poliestireno indica que uma parcela considerável deste resíduo pode ser utilizada para a confecção de compósitos de EPS pós-consumo com serragem.

Agradecimentos. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, à *Madeireira Gold Martini* pela doação dos cavacos de madeira e também à Associação de Reciclagem Serrano pela doação dos resíduos de poliestireno expandido.

REFERÊNCIAS

1. Antich P, Vázquez A “Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers”, *Composites: Part A.*, **37**, 139 (2006)
2. Wambua P, Ivens J, Verpoest I “Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?”, *Composites Science and Technology*, **63**, 1259 (2003)
3. Manikandan Nair KC, Sabu T, Groeninckx G “Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres”, *Composites Science and Technology*, **61**, 2519 (2001)
4. Bledzki AK, Gassan J “Composites reinforced with cellulose based fibres”, *Progress in Polymer Science*, **24**, 221 (1999)
5. Selke SE, Wichman I “Wood fiber/polyolefin composites”, *Composites: Part A*, **35**, 321 (2004)
6. Corrales F, Vilaseca F, Lop M, Gironé J, Méndez JA, Mutjé P “Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites”, *J. Hazardous Materials*, **144**, 730 (2007)
7. Weber C “Situação ambiental da indústria madeireira: um estudo de caso na região do Correde – Serra/RS”. Monografia de Especialização. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul/BR (2007)
8. Mihlayanlar E, Dilmaç S, Güner A “Analysis of the effect of production process parameters and density of expanded polystyrene insulation boards on mechanical properties and thermal conductivity”, *Materials & Design*, **29**, 344 (2008)
9. Silveira CRB “Estudo da reciclagem do EPS (Poliestireno Expandido) numa perspectiva de responsabilidade ambiental e social”. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina/BR (2005)
10. Poletto M, Zattera AJ, Schneider VE “Gerenciamento de resíduos recicláveis: a problemática associada ao poliestireno expandido pós-consumo” In: VI Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre/BR (2008)

11. Bledzki AK, Gassan J, Theis S “Wood-filled thermoplastic composites”, *Mechanics Composite Materials*, **34**, 563 (1998)
12. Manikandan Nair KC, Sabu T “Effect on interface modification on the mechanical properties of polystyrene-sisal fiber composites”, *Polymer Composites*, **24**, 332 (2003)
13. Hillig DM, Hillig É, Bianchi O, Zeni M, Iwakiri S “Caracterização de compósitos de HDPE e serragem de *Pinus sp.*, confeccionados com dois tipos de extrusoras”. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu/BR (2006)
14. Manikandan Nair KC, Diwan SM, Sabu Thomas “Tensile properties of short sisal fiber reinforced polystyrene composites”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **60**, 1483 (1996)
15. Sheldon RP “Composite polymeric materials”. 1ª Edição. Nueva York. Applied Science Publishers, 1982
16. Hillig É, Freire E, Zattera AJ, Zanoto G, Grison K, Zeni M “Use of sawdust in polyethylene composites”, *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, **24**, 73 (2008)
17. Hillig É “Viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados das indústrias moveleiras”. Tese de doutorado. Curitiba: Universidade Federal do Paraná/BR (2006)
18. Mondadori NML, Nunes RCR., Zattera AJ, Oliveira RVB, Canto LB “Relationship between processing method and microstructural and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate)/short glass fiber composites”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **109**, 3266 (2008)