

Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno Reforçado com Celulose de Bagaço e Palha de Cana

Sandra M. da Luz^a; Adilson R. Gonçalves^a; Antônio P. Del'Arco Jr^b

^aDepartamento de Biotecnologia – Faculdade de Engenharia Química de Lorena
Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5 – CEP 12600-970 – Lorena, SP

email: sandra@debiq.faequil.br, adilson@debiq.faequil.br

^bDivisão de Materiais – Centro Técnico Aeroespacial

Pça Mar-do-Ar Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias – CEP 12228-904 – São José dos Campos, SP

email: delarco@iae.cta.br

RESUMO

Compósitos que utilizam fibras vegetais como reforço têm despertado crescente interesse por parte da comunidade científica e industrial. O bagaço e a palha de cana são materiais renováveis e quando usados como reforço em uma matriz termoplástica podem dar origem a compósitos com baixo custo, baixa densidade e interessantes propriedades mecânicas. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de polipropileno reforçados com celulose de bagaço e palha. A celulose foi obtida através do processo NaOH/AQ a 170°C durante 3,5 h de reação. Os compósitos reforçados com 20 e 30% em massa de fibras foram preparados utilizando um misturador “Dryser”. Após moagem e moldagem por injeção, esses materiais foram analisados por ensaios de tração, flexão, microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A resistência à tração dos compósitos reforçados com 20% em massa de fibras foi similar ao polipropileno puro, no entanto, diminuiu com o aumento de reforço. Os módulos de elasticidade em tração e flexão aumentaram em até 79,4 e 81,7 %, respectivamente, influenciados pelo alto módulo das fibras inseridas dentro da matriz polimérica. A análise por MO da superfície dos compósitos mostraram distribuição homogênea das fibras na matriz, comprimento e forma variada das fibras e ainda que as fibras celulósicas da palha são menores que as do bagaço. A análise por MEV dos compósitos fraturados mostrou descolamento das fibras em relação à matriz e comportamento típico de fratura frágil. As fibras celulósicas obtidas a partir do bagaço e da palha deram origem a compósitos com propriedades mecânicas e morfológicas semelhantes e forneceu à matriz uma maior rigidez.

Palavras chaves: celulose, bagaço e palha de cana, polipropileno, compósitos, morfologia.

Microstructure and Mechanical Properties of Polypropylene Composites Reinforced with Cellulose from Sugarcane Bagasse and Straw

ABSTRACT

Composites utilizing vegetable fibers as reinforcement have attracted increasing interest of the scientific and industrial communities. Sugarcane bagasse and straw are renewable materials and when used as reinforcement in thermoplastic matrix can give origin to composite materials with low cost, low density and interesting mechanical properties. This work aimed to evaluate the mechanical and morphological properties of polypropylene composites reinforced with cellulose from sugarcane bagasse and straw. The cellulose was obtained through NaOH/AQ pulping process at 170°C for 3.5 h. The composites reinforced with 20 and 30 % wt of fibers were prepared utilizing a Dryser mixer. After ground and injection molding, these materials were analyzed by tensile and flexural tests, optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The tensile strength of composites reinforced with fibers (20 wt.%) was similar to that of pure polypropylene, however, it decreased with increasing amount of reinforcement. The tensile and flexural elasticity moduli increased up to 79.4 and 81.7 %, respectively, due to the high modulus of the fibers inserted inside the polymeric matrix. The composite surface analysis by OM showed homogeneous distribution of fibers inside the matrix and variable length and shape of the fibers. The cellulosic fibers from straw were also smaller than those from bagasse. SEM analysis of fractured composites exhibited displacement of the fiber with respect to the matrix and a typical behavior of brittle fracture. Cellulosic fibers obtained from sugarcane

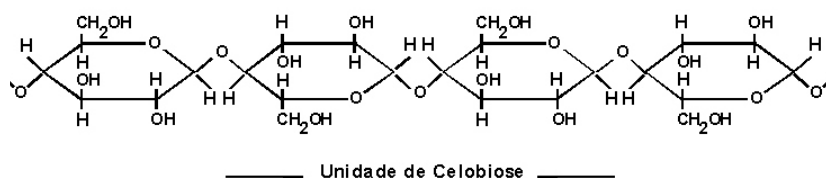
bagasse and straw resulted in composites with similar mechanical and morphological properties and provided rigidity to the matrix.

Keywords: cellulose, sugarcane bagasse and straw, polypropylene, composites, morphology.

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos poliméricos são materiais extensamente estudados e têm grande aplicação nas indústrias aeronáutica, automobilística, esportiva e de construção civil [1]. Nas últimas duas décadas, a busca de novos materiais que atendam às tendências mundiais que visem à viabilidade econômica e ao mesmo tempo, a preocupação com o meio ambiente, leva à alternativa de se fazer uso dos recursos naturais renováveis [2].

O bagaço e a palha de cana-de-açúcar são materiais lignocelulósicos gerados em grandes proporções, constituídos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, e em menores proporções, extrativos e cinzas. A celulose (Figura 1), o principal componente dessas fibras vegetais, é um homopolímero linear composto de unidades de anidro-glicose, as quais são ligadas entre si através de ligações β - (1 \rightarrow 4) - glicosídicas e possui estrutura fibrilar [3, 4] e módulo de elasticidade relativamente alto [5]. A maior parte desses resíduos agroindustriais é utilizada na própria indústria alcooleira e açucareira para a geração de energia; no entanto, o excedente pode ser utilizado em outras aplicações mais nobres, por exemplo como reforço em materiais compósitos.



Para a obtenção de celulose a partir desses resíduos, a separação dos componentes macromoleculares pode ser feita através de processos químicos, físicos ou enzimáticos [6]. O processo utilizado neste trabalho foi essencialmente químico, e é chamado de polpação NaOH/AQ. A polpação alcalina utilizando a AQ (antraquinona) apresenta maior preservação das cadeias de celulose [7].

Figura 1: Estrutura da celulose. Parte central da cadeia molecular.

Compósitos de polipropileno reforçados com celulose de bagaço ou palha foram obtidos. O polipropileno foi proposto como matriz por ser um polímero semicristalino obtido por poliadicação e por se tratar de um importante termoplástico de engenharia, sendo largamente utilizado em uma infinidade de aplicações [8].

O uso de fibras vegetais traz como vantagens primárias a introdução de propriedades diferenciadas ao material final, além de baixo custo do processo e dos efeitos sócio-econômicos. Os materiais compósitos, mistura entre fibra e matriz, foram obtidos utilizando um misturador termocinético de alta intensidade, mais conhecido como misturador Dryser. A fonte de aquecimento é gerada pela alta rotação das palhetas, fazendo com que o material fique em atrito entre as palhetas e as paredes da cápsula de mistura (Figura 2). Essa técnica é muito efetiva na dispersão das fibras no termoplástico; no entanto, a alta ação cisalhante pode desenvolver uma redução no comprimento final das fibras dentro dos compósitos [9]. As características sinérgicas dos materiais dependem das características iniciais do reforço e da matriz. Em testes de resistência mecânica, o comportamento da fratura em compósitos é afetado por muitas variáveis, incluindo a natureza da fibra e matriz, ligação entre fibra e matriz e orientação das fibras [10]. Testes de tração e flexão foram realizados e as fraturas avaliadas por microscopia eletrônica de varredura e a distribuição e forma das fibras foram avaliadas por microscopia ótica.

Alguns dos possíveis danos nos compósitos são associados à ruptura da matriz, falha da ligação entre fibra e matriz, quebra da fibra e delaminação [11]. Essas características podem ser avaliadas pelas duas análises microscópicas acima citadas, podendo-se estudar a adesão relacionada às propriedades mecânicas [12].

2 EXPERIMENTAL

2.1 Polpação NaOH/AQ de Bagaço e Palha de Cana-de-açúcar

Ao material lignocelulósico foi adicionada solução de NaOH 20,64 % m/v (16% de Na₂O ativo) obedecendo à relação licor:bagaço de 6:1 (v/m) e licor: palha de 7,5:1 (v/m), e 0,15% (m/v) de AQ em relação ao volume total do licor. A polpação foi feita em um reator de aço inoxidável MILLIPORE com capacidade de 10 L a 170°C por 2 h. O tempo de aquecimento até a temperatura de 170°C previamente determinado foi de 1,5 h, resultando em um tempo total de processo de 3,5 h. As polpas obtidas foram exaustivamente lavadas com água até pH 7 e secas ao ar.

2.2 Preparação dos Materiais Compósitos

Os compósitos foram obtidos em misturador termocinético de alta intensidade para plásticos (Dryser) (10-50 % em massa de reforço). Inicialmente o reforço e a matriz foram secos em estufa a 80°C por cerca de 2 h. Após mistura entre reforço e matriz no misturador “Dryser” (Figura 2), o material foi moído em moinho granulador, novamente seco em estufa a 80°C por 2 h e injetado utilizando injetora de plásticos PIC-BOY (3 zonas de aquecimento, 180, 180 e 200°C) em um molde contendo cavidades com dimensões necessárias para a realização dos ensaios mecânicos (tração e flexão). Corpos de prova de polipropileno puro foram obtidos utilizando o mesmo procedimento, para comparação.

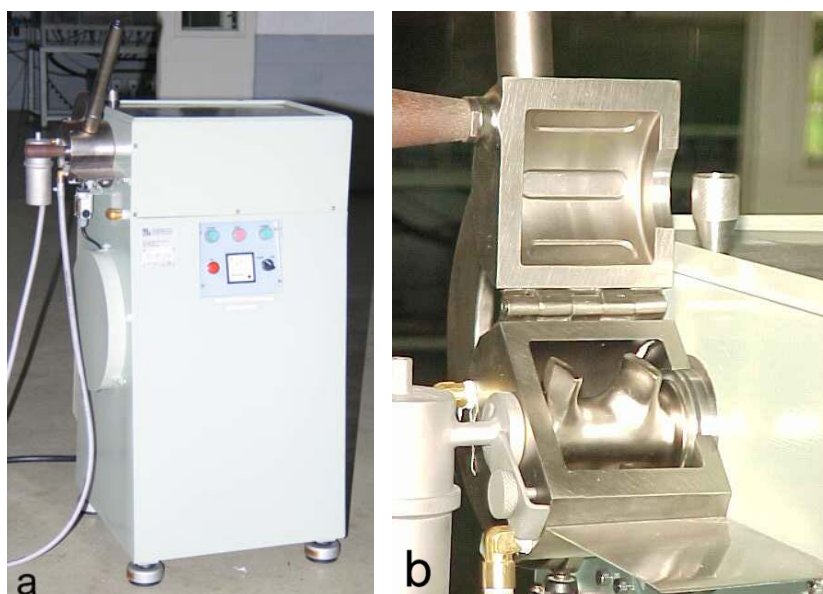


Figura 2: a. Homogeneizador de plástico de laboratório (Dryser) e b. Detalhe da cápsula de mistura.

2.3 Ensaios Mecânicos dos Materiais Compósitos

Os compósitos foram analisados por ensaios de tração e flexão em um equipamento Instron modelo 4301. Os ensaios de tração foram realizados sob a velocidade de 2 mm.min⁻¹. Foram analisados para cada compósito o mínimo 5 corpos de prova, com dimensões de acordo com a norma ASTM D 638 [13], com 13 mm de largura, 160 mm de comprimento e 2,7 mm de espessura. As propriedades mecânicas de resistência à tração, alongação e módulo de elasticidade em tração foram avaliadas. Os ensaios de flexão foram realizados sob a velocidade 2,8 mm.min⁻¹. Foram analisados no mínimo 5 corpos de prova, com dimensões de acordo com a norma ASTM D 790 [14], com 13 mm de largura, 130 mm de comprimento e 6,0mm de espessura. O método de análise de flexão adotado foi o de 4 pontos com carregamento a ¼ do ponto. As propriedades mecânicas de resistência à flexão e módulo de elasticidade em flexão foram avaliadas.

2.4 Microscopia Óptica (MO)

Após seleção da região de interesse, as amostras foram cortadas e embutidas em resina de poliéster e catalisador (MEC) para a realização do lixamento e polimento. O lixamento foi feito em uma Politriz de marca Knuth Rthor da Struers com rotação de 400 rpm utilizando lixas d'água de nº 80, 320, 400, 600, 800 e 1000. Já o polimento foi feito em uma politriz modelo "DP" da Struers com rotação de 300 rpm com pano de polimento do tipo DP MOL, pasta de diamante com granulometria de 3 µm da Arotec e água destilada, seguida de polimento com suspensão de alumina. Após o polimento, os compósitos foram analisados em um microscópio ótico LEICA, modelo DMR XP. O microscópio ótico permitiu visualizar a distribuição das fibras dentro da matriz. O tamanho médio das fibras foi determinado por um programa de análise de imagens LEICA Qwin.

2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os compósitos fraturados foram presos em um suporte com auxílio de fita de carbono e a superfície da fratura foi submetida ao recobrimento metálico com ouro, espessura de 8 nm sob atmosfera de argônio, utilizando equipamento de recobrimento metálico marca Bal-Tec MED 020. As amostras metalizadas foram submetidas à análise em microscópio eletrônico de varredura LEO 1450 VP operando de 15 a 20 kW e utilizando detector de elétrons secundários.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Mecânica dos Compósitos de Polipropileno Reforçados com Celulose de Bagaço ou Palha de Cana

Após polpação do bagaço e da palha de cana, as fibras resultantes apresentaram formato cilíndrico ou achatado, e dimensões de 500 µm de comprimento e até 25 µm de diâmetro. No entanto, após a mistura em Dryser, as fibras celulósicas foram excessivamente quebradas devido a alta ação cisalhante do equipamento, resultando em fibras com 150 µm de comprimento e diâmetro de 15 a 25 µm.

Compósitos obtidos com composições variáveis de reforço estão mostrados na Figura 3. As fotos indicam que a coloração dos compósitos varia do marrom claro (celulose de bagaço) para o acinzentado (celulose de palha). Pode-se observar que aumentando a quantidade de reforço, as fibras ficam mais expostas (no caso de 50 % em massa, principalmente). Os compósitos reforçados com 50 % em massa de reforço não puderam ser injetados, pois além do entupimento no bocal da injetora, o material também não foi moldável. Os materiais compósitos depois de moídos em moinho granulador (partículas de até 12 mm) foram injetados diretamente em moldes com as dimensões específicas para a preparação dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração e flexão.

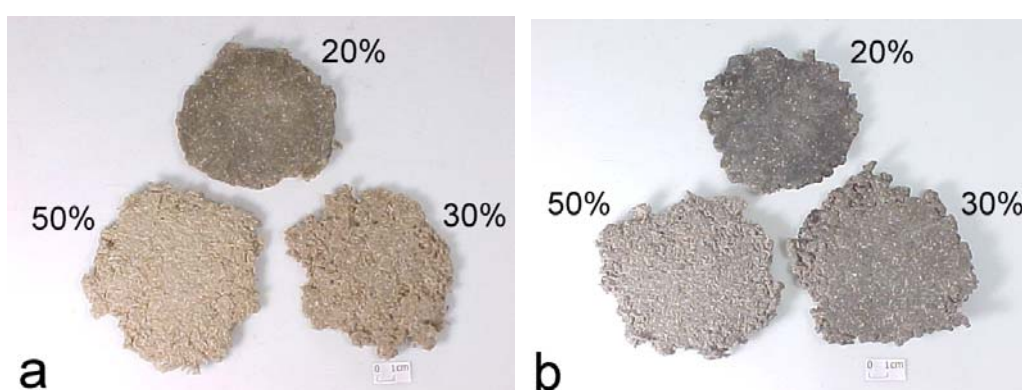


Figura 3: Compósitos de polipropileno, obtidos logo após a mistura em "Dryser", utilizando como reforço: a. celulose de bagaço; b. celulose de palha.

Os ensaios de tração forneceram três informações referentes aos novos materiais obtidos em relação ao polipropileno puro: deformação até a ruptura, resistência à tração e módulo de elasticidade em tração. A Tabela 1 mostra as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos utilizando o polipropileno como matriz e a celulose de bagaço e celulose de palha como reforço, em diferentes proporções.

Os valores de deformação até ruptura dos materiais compósitos diminuem em relação ao polipropileno puro, independentemente da quantidade de reforço, isto é, diminuem de 2,0 a 3,9 vezes para os compósitos contendo de 20 a 30 % em massa de reforço. Ao contrário do compósito reforçado com celulose de bagaço, que apresenta praticamente a mesma deformação até a ruptura (cerca de 8 %), o compósito reforçado com celulose de palha apresenta queda dos valores de deformação com o aumento do teor de fibras.

A Figura 4 mostra o perfil diferenciado da curva dos compósitos em relação ao polipropileno puro. HAWLEY [15] descreve o comportamento típico de curvas de tração em relação a deformação para materiais frágeis e flexíveis. As curvas da Figura 4 mostram que os compósitos reforçados com a celulose de bagaço apresentam um comportamento típico de materiais frágeis, e o polipropileno puro, comportamento de um material flexível.

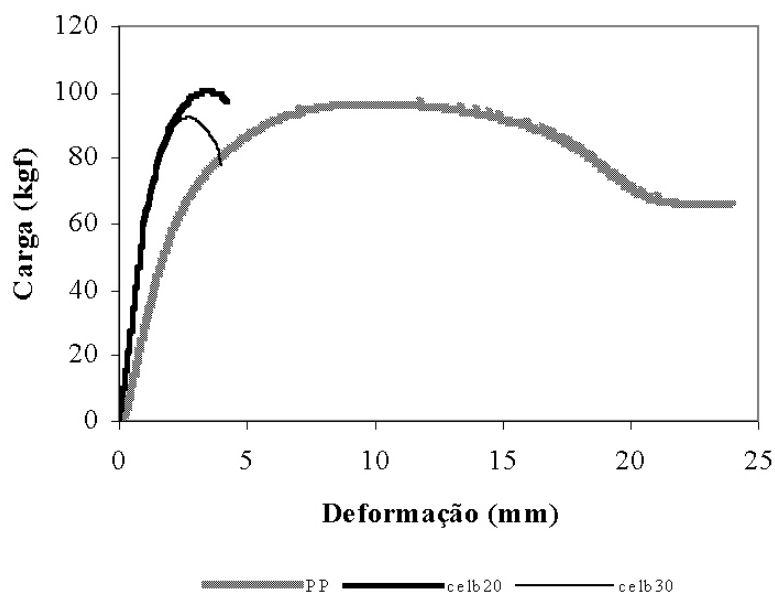


Figura 4: Comportamento mecânico dos compósitos de polipropileno com celulose de bagaço em função da deformação perante a aplicação de uma carga.

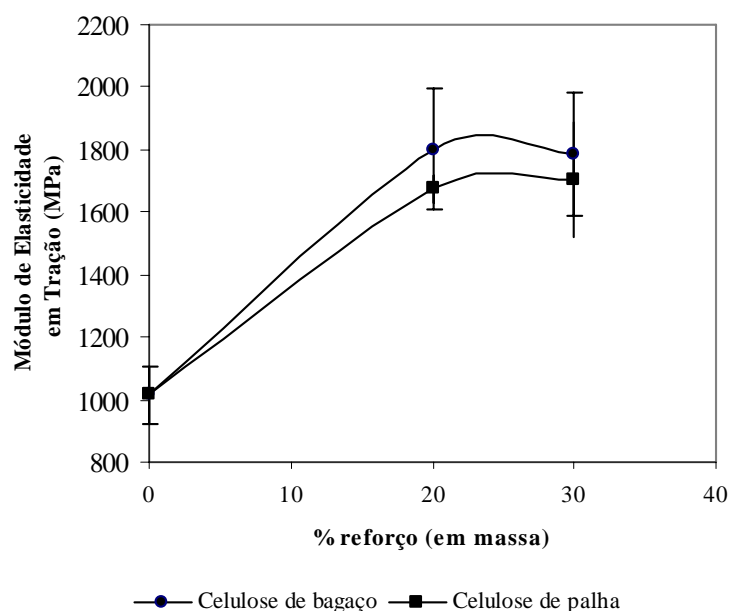
O comportamento da curva do polipropileno apresenta duas regiões típicas dos materiais termoplásticos: deformação elástica (primeira região), plástica até a ruptura (segunda região) [16]. Os compósitos se deformam plasticamente até a ruptura e observa-se que o aumento do teor de fibras leva a uma diminuição da resistência ao carregamento e menor alongação do material. A adição de celulose (alto módulo) dentro de matrizes poliméricas termoplásticas usualmente resulta em um aumento da fragilidade do material [17]. O comportamento mecânico dos compósitos reforçados com celulose de palha é típico também de materiais frágeis.

Na Tabela 1 estão descritos também os resultados em relação à resistência à tração dos compósitos. Os compósitos contendo 20% em massa de reforço apresentam resistência à tração muito semelhante ao polipropileno puro, isto indica que mesmo com a inserção de uma grande quantidade em volume de reforço, a resistência à tração é mantida. Com o aumento da quantidade de reforço observa-se que a resistência à tração diminui devido provavelmente ao aumento dos pontos de falha ocasionados pela presença de fibras.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos compósitos em comparação ao polipropileno puro.

Materiais	Ensaio de Tração			Ensaio de Flexão	
	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação até Ruptura (%)	Resistência a Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Polipropileno	27 ± 1	1015 ± 93	20	28 ± 1	1139 ± 5
Celulose de bagaço 20 %/PP	27,0 ± 0,6	1800 ± 194	8	37 ± 1	1894 ± 77
Celulose de bagaço 30 %/PP	25 ± 1	1785 ± 200	8	43 ± 1	2040 ± 130
Celulose de palha 20 %/PP	29 ± 2	1675 ± 43	10	37,8 ± 0,8	1850 ± 77
Celulose de palha 30 %/PP	24 ± 2	1703 ± 185	7	41,9 ± 0,7	2070 ± 90

A Figura 5 mostra o comportamento da curva de módulo de tração em relação a quantidade de reforço para os compósitos reforçados com as fibras celulósicas de bagaço ou palha. Com a inserção do reforço, o módulo de tração aumenta em relação ao polipropileno puro.

**Figura 5:** Módulos de elasticidade em tração de compósitos de polipropileno com quantidade variável de celulose de bagaço ou palha de cana.

Os dados de resistência à flexão mostrados na Tabela 1 exibem um aumento dos valores de resistência dos compósitos em relação ao polipropileno puro. A resistência à flexão dos materiais compósitos reforçados com 20% em massa de fibras aumenta em média 35% em relação à resistência do polipropileno puro. A incorporação de 30% em massa de celulose de palha apresenta um aumento na resistência a flexão de até 50%. Isso indica que a quantidade de fibras favorece a maior resistência à flexão. GASSAN e BLEDZKI [18] observaram que a resistência à flexão dos compósitos de juta/polipropileno aumenta com o aumento da quantidade de fibras e adição de agentes de acoplamento. Isto devido ao melhoramento da adesão entre fibra e matriz.

Os módulos de elasticidade em tração e flexão são diretamente influenciados pelo alto módulo de elasticidade das fibras [4]. Deste modo os compósitos apresentaram maiores valores de módulos de elasticidade em flexão em relação ao polipropileno puro, atingindo em média 66% de aumento para os compósitos reforçados com 20% em massa de fibras. Com a adição de fibras, o módulo de flexão aumentou sensivelmente. Já em relação ao módulo de tração, o aumento chega a 77%, no entanto não varia com o teor de fibras adicionadas à matriz.

3.2 Caracterização Microestrutural dos Compósitos

A superfície de alguns corpos de prova de tração (antes do ensaio) foi cortada e submetida a análises em microscópio ótico (após o lixamento e polimento do material). A Figura 6 mostra as superfícies dos compósitos reforçados com 20 % e 30 % em massa de fibras. As superfícies desses materiais com diferentes reforços se mostram uma distribuição homogênea das fibras dentro da matriz. No entanto, as fibras são de tamanhos diferentes e a distribuição das fibras dentro da matriz é aleatória.

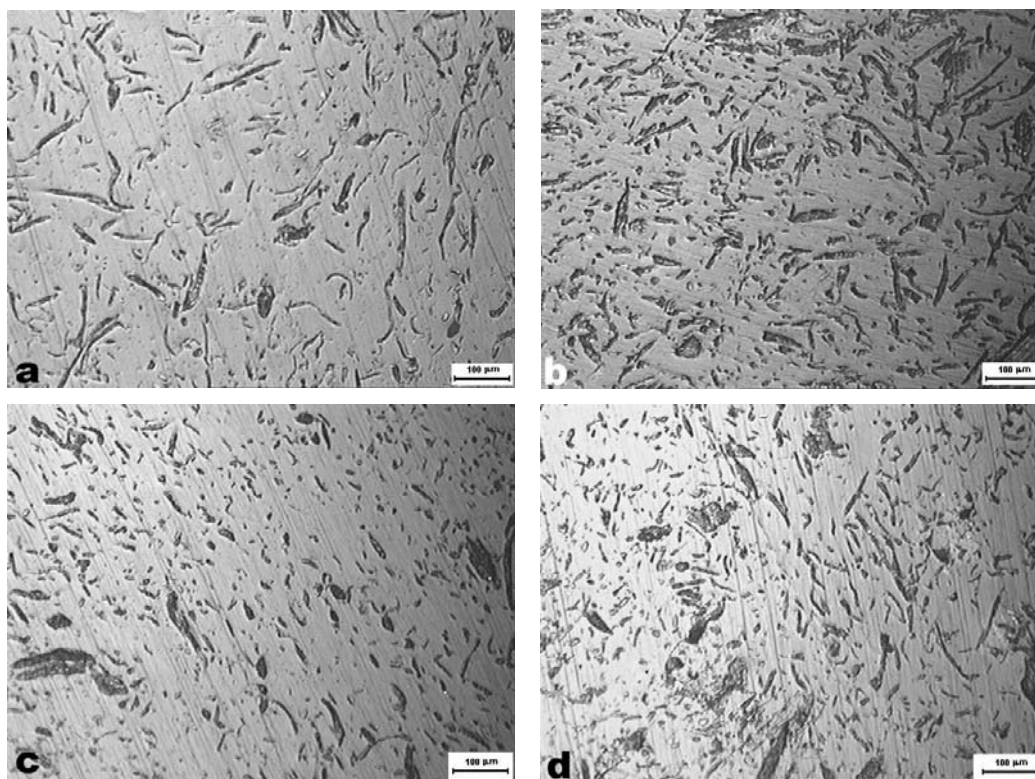


Figura 6: MO dos compósitos de polipropileno com celulose de bagaço 20 (a) e 30% (b) em massa; e celulose de palha 20 (c) e 30% (d) em massa. Ampliação de 100 vezes.

A figura 6a do polipropileno reforçado com celulose de bagaço apresenta um comprimento médio das fibras de 46 μm (com mínimo de 3,8 e máximo de 114,7 μm). A Tabela 2 mostra o comprimento médio das fibras dentro da matriz para os vários compósitos obtidos com quantidade e tipos de fibras diferentes.

Tabela 2. Comprimentos médios, mínimos e máximos das fibras celulósicas de bagaço ou palha de cana inseridas dentro dos compósitos de polipropileno.

Compósitos*	Número de medidas	Comprimento (μm)		
		Médio	Mínimo	Máximo
Celulose de bagaço 20 % / PP	72	46 \pm 27	3,8	114,7
Celulose de bagaço 30 % / PP	93	38 \pm 24	4,0	141,8
Celulose de palha 20 % / PP	101	28 \pm 21	4,3	156,9
Celulose de palha 30 % / PP	90	28 \pm 20	5,3	126,2

* Quantidade de reforço expressa como % em massa.

A medida do comprimento das fibras, mesmo sendo uma estimativa (determinação através da análise de imagens das micrografias óticas), pode fornecer informações importantes sobre as características das fibras depois de inseridas dentro da matriz. Os valores da Tabela 2 referentes ao comprimento médio mostram uma grande variabilidade no comprimento final das fibras dentro da matriz. Com o aumento da quantidade de fibras, observa-se um conseqüente aumento na concentração dessas fibras dentro da matriz.

O comprimento médio das fibras dos compósitos reforçados com 30 % em massa apresenta valores diferenciados: celulose de palha < celulose de bagaço. Por meio das medidas, indicadas na Tabela 2, fica evidente que o comprimento médio das fibras de palha é menor que as fibras do bagaço. No entanto, os resultados de resistência à tração mostram que o comprimento das fibras não interfere nesta propriedade, pelo menos nesta ordem de comprimento, considerando a mesma proporção em massa de fibras. Uma relação dos comprimentos das fibras com outras propriedades mecânicas podem ser evidenciadas somente para os módulos de elasticidade em flexão. Os valores do módulo são menores para os compósitos reforçados com a celulose de palha de cana.

Os compósitos fraturados por meio dos ensaios de tração foram analisados por microscopia eletrônica de varredura. Essa análise foi possível, pois nos compósitos a inserção das fibras não provocou estiramento da matriz durante o ensaio de tração. A ampliação de 900 vezes permite visualizar o modo de fratura das fibras e da matriz, como também a disposição das fibras dentro da matriz. As micrografias das superfícies dos compósitos reforçados com celulose de bagaço ou palha estão mostradas na figura 7.

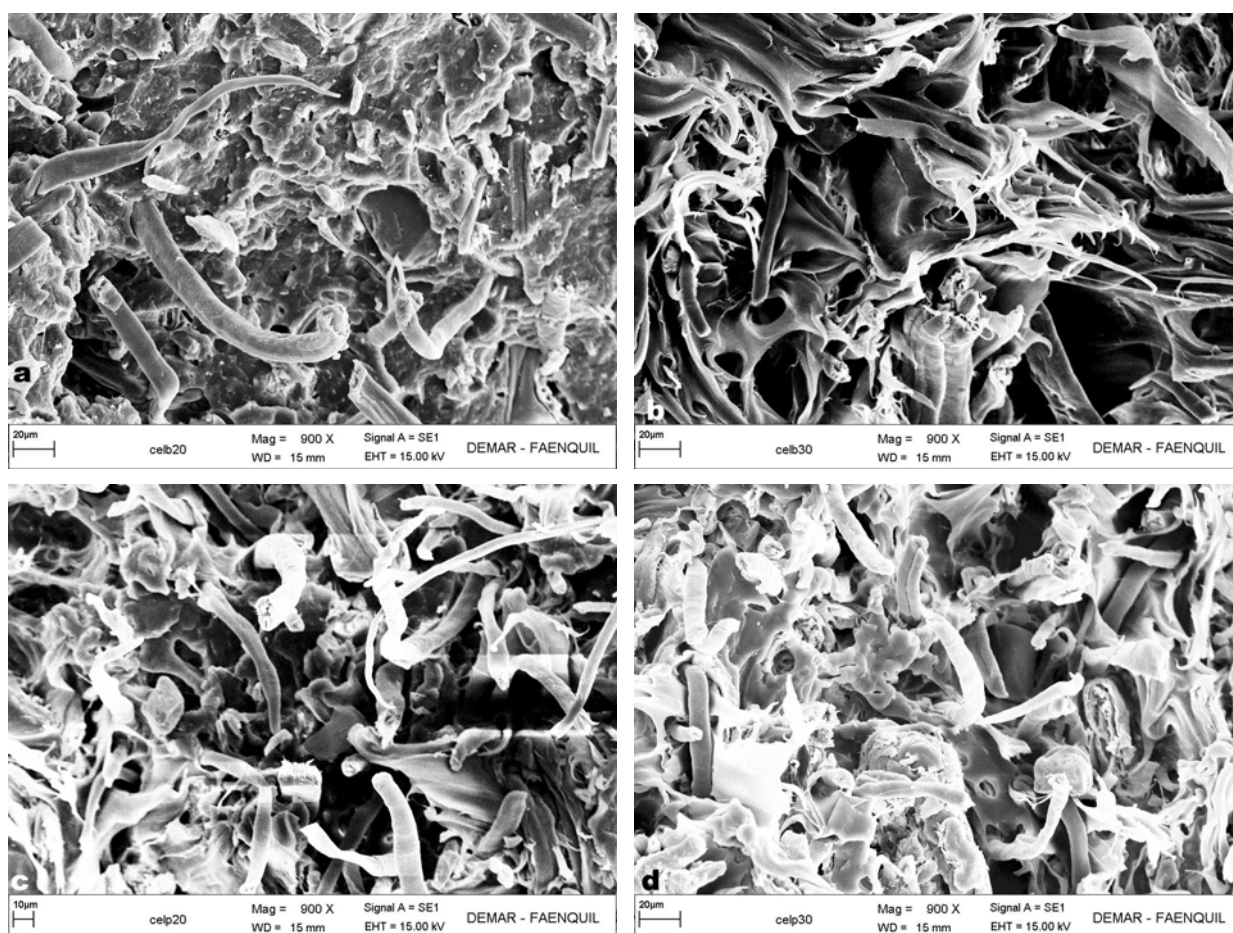


Figura 7: MEV dos compósitos de polipropileno com celulose de bagaço 20 (a) e 30% (b) em massa; e celulose de palha 20 (c) e 30% (d) em massa. Ampliação de 100 vezes.

As figuras 7a, b, c e d exibem a fratura dos compósitos reforçados com a celulose de bagaço e palha. As fibras estão dispostas tanto transversal como longitudinalmente em relação à superfície fraturada. As fraturas exibem pontos de fragilidade da matriz. HEARLE *et al.* [19] descreve o comportamento das fraturas frágeis e dúcteis. A superfície de um material compósito apresenta em sua estrutura a presença de fibras e da matriz (neste caso se trata do polipropileno) e inevitavelmente há a presença de falhas e rachaduras. A fratura frágil

está relacionada com a concentração de tensão sobre cada ponto de falha, e quando o carregamento aplicado ultrapassa a resistência à tração máxima que o material suporta, o tamanho da falha aumenta catastróficamente até a ruptura do material.

São observadas na matriz as presenças de orifícios (espaços vazios) promovidas pela extração de fibras. A presença de fibras descolada da matriz também é observada ("pull-out"). A forma cilíndrica e achatada das fibras é dominante e apresentam extremidades com modos de falha diferentes, como fratura simples e desfibrilação.

4 CONCLUSÕES

Os compósitos reforçados com as fibras celulósicas apresentaram resistência à tração similar ao polipropileno puro; já perante a deformação até a ruptura, pode-se concluir que os materiais compósitos se deformam em menor grau antes do rompimento em relação ao PP puro. A resistência à flexão e os módulos de elasticidade em tração e flexão são superiores à matriz não reforçada. As fibras, devido ao alto módulo de elasticidade, acabam contribuindo com essa propriedade quando inseridas dentro do polímero. A análise da microestrutura dos materiais compósitos permitiu avaliar a distribuição homogênea das fibras dentro da matriz e o fenômeno de "pull-out" (fibras descoladas da matriz) características da falta de adesão entre os dois componentes (fibra e matriz). As propriedades sinérgicas atingidas são muito significativas no que dizem respeito à rigidez e resistência do material, considerando a importância da resistência à tração e flexão em torno da definição da aplicação final dos compósitos.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] SCHWARTZ, M.M., *Composite Materials: Processing, Fabrication and Applications*, v. 2, New Jersey, Prentice Hall, 1997.
- [2] KOZLOWSKI, R., "The Potential of Natural Fibers in Europe - Industrial Applications", In: Leão, A.L., Carvalho, F.X., Frollini, E. (eds), *Lignocellulosic – Plastics Composites*, São Paulo, Brasil, 1997.
- [3] KLEMM, D., PHILIPP, B., HEINZE, T., HEINZE, U., WAGENKNECHT, W., *Comprehensive Cellulose Chemistry*, v. 1, Weinheim, Wiley-VCH, 1998.
- [4] FENGEL, D., WEGENER, G., *Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, New York, Walter de Gruyter, 1989.
- [5] CHAWLA, K.K., *Fibrous Materials*, New York, Cambridge University Press, 1998.
- [6] ROCHA, G.J.M., "Deslignificação de Bagaço de Cana de Açúcar Assistida por Oxigênio", *Tese de D.Sc.*, Instituto de Química/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2000.
- [7] BLAIN, T.J., "Anthraquinone Pulping: Fifteen Years Later", *Tappi Journal*, v. 76, n. 3, pp. 137-146, 1993.
- [8] PUKÁNSZKY, B., "Particulate Filled Polypropylene: Structure and Properties", In: *Polypropylene – Structure, Blends and Composites*, v. 3, London, Chapman & Hall, pp. 1-61, 1995.
- [9] SANADI, A.R., "Natural Fiber–Thermoplastic Composites: a Review", In: *In: Leão, A.L., Carvalho, F.X., Frollini, E. (eds), Natural Polymers and Composites IV*, São Carlos, Brasil, 2002.
- [10] SAWYER, L.C., GRUBB, D.T., *Polymer Microscopy*, London, Chapman & Hall, 1996.
- [11] FOLKES, M.J., "Interfacial Crystallization of Polypropylene in Composites", In: *Polypropylene – Structure, Blends and Composites*, v. 3, London, Chapman & Hall, pp. 340-377, 1995.
- [12] VIGNON, M.R., DUPEYRE, D., GARCIA-JALDON, C., "Morphological Characterization of Steam-Exploded Hemp Fibers and their Utilization in Polypropylene-Based Composites", *Bioresource Technology*, n. 58, pp. 203-215, 1996.

- [13] ASTM D 638. “Association Standards Testing Materials”, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, Philadelphia, 1988.
- [14] ASTM D 790. “Association Standards Testing Materials”, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, Philadelphia, 1988.
- [15] HAWLEY, S., “Particular Requirements for Plastics”, In: Brown, R., *Handbook of Polymer Testing - Physical Methods*, New York, Marcel Dekker, pp. 309-373, 1999.
- [16] NIELSEN, L.E., LANDEL, R.F., *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, New York, Marcel Dekker, 1994.
- [17] MARCOVICH, N.E., ARANGUREN, M.I., REBOREDO, M.M., “Modified Woodflour as Thermoset Fillers - Part I. Effect of the Chemical Modification and Percentage of Filler on the Mechanical Properties”, *Polymer*, n. 42, pp. 815-825, 2001.
- [18] GASSAN, J., BLEDZKI, A.K., “The Influence of Fiber-surface Treatment on the Mechanical Properties of Jute-Polypropylene Composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, n. 28, pp. 1001-1005, 1997.
- [19] HEARLE, J.W.S., LOMAS, B., COOKE, W.D., *Atlas of Fibre Fracture and Damage to Textiles*, Boca Raton, CRC Press, 1998.