

## PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS EXPANDIDOS DE POLI(ETILENO-CO-ACETATO DE VINILA) EVA, REFORÇADO COM PÓ DE MADEIRA E FIBRA DE BANANEIRA

Matheus V. G. Zimmermann<sup>1\*</sup>, Taís C. Turella<sup>1</sup>, Ruth M. C. Santana<sup>2</sup>, Ademir J. Zattera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Polímero, Universidade de Caxias do Sul (UCS),  
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, Caxias do Sul / RS, Brasil.  
\* e-mail: matheus.vgz@gmail.com

<sup>2</sup> Laboratório de Polímeros, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS),  
Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre / RS, Brasil.

**Resumo**—Neste trabalho foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas de compósitos expandidos de poli(etileno-co-acetato de vinila) (EVA) reforçado com pó de madeira (PM) e com fibra de bananeira (FB). Os compósitos foram processados em uma extrusora monorroscas e moinho de rolos para incorporação e mistura dos componentes, e após foram expandidos por compressão, pelo método livre de pressão. Os resultados demonstram que aumentando o teor de PM e FB, a resistência à compressão e a dureza aumentam, enquanto a resistência ao rasgamento tende a diminuir com o aumento do teor de PM e a propriedade de resistência ao rasgamento aumenta com o aumento do teor de FB. A capacidade de expansão do compósito expandido reforçado com a FB decai com o aumento do teor de carga, observado pelo aumento da densidade dos compósitos e micrografia de MEV, enquanto que com o aumento do teor de PM proporciona a formação de maior número de células devido a capacidade de nucleação com a presença do PM nos compósitos expandidos.

**Palavras-chave:** *poli(etileno-co-acetato de vinila), pó de madeira, fibra de bananeira, agente expansor, compósitos expandidos*

### Introdução

O uso de compósitos com fibras vegetais cresceu significativamente nos últimos anos, porém a sua aplicação ainda é limitada em alguns casos devido à sua baixa ductilidade, baixa resistência ao impacto e densidade superior aos constituintes originais, como o plástico e a madeira. Geralmente a densidade do compósito polímero-fibra vegetal é o dobro superior à madeira bruta, o que limita a sua substituição dependendo das condições de uso. Uma alternativa frente à redução da densidade dos compósitos polímero-fibra vegetal é a produção de compósitos expandidos (compósitos celulares) [1-4].

Compósitos poliméricos são geralmente constituídos de duas fases. Já compósitos poliméricos celulares ou compósitos poliméricos expandidos, existe uma terceira fase, que são os espaços vazios compostos de ar no interior dos compósitos, e são denominados células [5].

O uso de compósitos reforçados expandidos com fibras vegetais é de grande interesse devido à capacidade de redução da densidade, muitas vezes mantendo a relação de propriedades mecânicas específicas (propriedade mecânica sobre a densidade do compósito), isolamento térmico e acústico, absorção de água e maior resistência ao impacto quando comparado ao compósito não expandido [5].

Doroudiani & Kortschot (2004) relacionam que diferentes morfologias celulares podem ser obtidas conforme o tipo, tamanho e concentração de fibra vegetal utilizados na composição de compósitos expandidos e, de acordo com a morfologia obtida, diferentes propriedades podem ser atribuídas ao compósito expandido [6]. Nesse sentido o objetivo de este trabalho foi realizar um estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de compósitos expandidos de poli(etileno-co-acetato de vinila) (EVA) reforçado com pó de madeira e com fibra de bananeira.

### Parte Experimental

O poli(etileno-co-acetato de vinila), grade EVA 1825, com 18,8% de acetato de vinila (AV), foi fornecido pela Quattor S.A (Brasken). O agente compatibilizante a base de polietileno grafitado com anidrido maleico (PEgMA), grade Polybond 3029, fornecido pela Chemtura. O agente expansor químico azodicarbonamida (ACA) ativado com óxido de zinco (ZnO) fornecido pela Inbra Indústria Química Ltda. O agente reticulante peróxido de dicumila, grade DCP 40 SAP e o agente lubrificante (Lub), grade Retiflux fornecidos pela Retilox Química Especial Ltda. A fibra de bananeira (FB) foi obtida através da extração do pseudocaule da bananeira, do tipo prata, coletado em Brasil/RS. A

fibra foi submetida a lavagem alcalina com 1% de NaOH (m/v), por 1 hora a temperatura ambiente. Após a fibra foi lavada com água destilada e seca em estufa a 70°C por 5 horas e cortadas no tamanho de 2 cm. O pó de madeira (PM) foi coletado do caule de árvore da espécie *Eucalyptus dunniis*. A madeira foi moída em um moinho de facas na granulometria 80-150 mesh (tamanho de partícula 0,230-0,095 mm) e seca em estufa a 70°C por 5 horas.

O agente compatibilizante PEgMA foi adicionado ao EVA, 2% em massa, através de uma extrusora monorroscas SEIBT, modelo ES35, L/D 20, com perfil de temperatura de 90, 120, 140°C e velocidade de rotação da rosca de 60 rpm. O processo de incorporação dos aditivos e cargas ao EVA ocorreu através de um moinho de rolos aberto, desenvolvido pela Universidade de Caxias do Sul (UCS), previamente aquecido na temperatura de 85°C no cilindro posterior e 65°C no cilindro anterior. O processo de mistura consistiu em adicionar cada um dos componentes da formulação na seguinte ordem e concentração, em partes por cem de resina (pcr): EVA/PEgMA (100 pcr), cargas FB ou PM (0, 10, 20 ou 30 pcr), lubrificante (1 pcr), ZnO (1 pcr), ACA (2 pcr) e DCP (2 pcr). O tempo médio de mistura foi de 10 a 12 minutos.

Após a mistura, o composto de EVA foi conformado em pré-formas através de uma prensa aquecida, marca Schulz, a 115°C, 5 toneladas de fechamento por 5 min, utilizando um molde vazado na dimensão de 140x160x3 mm. O peso médio da pré-forma foi de  $80 \pm 2$  g. A pré-forma então foi colocada em molde para expansão, com dimensões de 150x170x12 mm, utilizando o processo por expansão livre de pressão, com temperatura de 175°C. O tempo de permanência das amostras na prensa aquecida foi de 40 minutos.

A densidade aparente das amostras foi calculada pela relação entre a massa (g) e volume (cm<sup>3</sup>), conforme a norma ASTM D1622-08. As propriedades mecânicas de resistência ao rasgamento dos compósitos celulares foram realizadas em um equipamento universal de ensaio, marca EMIC DL2000, conforme norma ASTM D624-00. A velocidade do ensaio foi de 500 mm.min<sup>-1</sup> e célula de carga de 20 kN. O modelo de corpo de prova adotado para o ensaio de resistência ao rasgamento foi do tipo C. O ensaio de dureza foi realizado com um durômetro TECLOCH, modelo GS 702 Type O e A (escala Shore O e A), conforme norma ASTM 2240-05. A dureza foi medida no núcleo e na superfície do compósito expandido. A resistência à compressão foi realizada em um equipamento universal de ensaios, marca EMIC DL2000, com adaptação da norma ASTM D1621-10. Os corpos de prova foram confeccionados com volume de 50x50x10 mm. A velocidade do ensaio foi de 1,3 mm.min<sup>-1</sup>. A resistência à compressão é o valor da tensão dividida pela área inicial da amostra, quando atinge 30 e 75% da sua espessura inicial.

A morfologia das amostras foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um equipamento SHIMADZU, modelo superscan SS-550, cortadas criogenicamente e cobertas com Au.

## Resultados e Discussão

As propriedades físicas e mecânicas dos compósitos expandidos de EVA reforçados com a FB e com o PM são apresentadas na Tabela 1. A morfologia dos compósitos expandidos é apresentada na Figura 1.

**Tabela 1** – Propriedades físicas e mecânicas do e-EVA, e-EVA/PM e do e-EVA/FB.

Amostra	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Resistência ao Rasgamento (N.mm <sup>-1</sup> )	Tensão de compressão para deformação		Dureza	
			30 %	75 %	Núcleo (Shore O)	Pele (Shore A)
e-EVA	0,34 ± 0,02	21,7 ± 1,6	0,11 ± 0,01	0,41 ± 0,01	39,4 ± 5,4	25,3 ± 5,3
e-EVA/PM 10	0,37 ± 0,01	15,8 ± 3,5	0,38 ± 0,06	2,86 ± 0,35	68,5 ± 6,5	53,8 ± 4,0
e-EVA/PM 20	0,37 ± 0,01	16,3 ± 2,2	0,50 ± 0,08	3,58 ± 0,51	76,5 ± 2,8	55,9 ± 7,4
e-EVA/PM 30	0,38 ± 0,02	13,4 ± 1,5	0,65 ± 0,05	3,99 ± 0,44	79,8 ± 4,1	59,0 ± 6,3
e-EVA/FB 10	0,38 ± 0,02	23,3 ± 1,9	0,34 ± 0,02	2,97 ± 0,63	53,4 ± 6,2	39,5 ± 9,1
e-EVA/FB 20	0,50 ± 0,05	21,1 ± 3,0	0,46 ± 0,05	3,69 ± 0,41	76,4 ± 4,3	65,5 ± 3,4
e-EVA/FB 30	0,74 ± 0,08	30,4 ± 2,5	0,59 ± 0,03	4,46 ± 0,39	87,0 ± 2,6	69,7 ± 2,6

A densidade aparente das espumas é um parâmetro que caracteriza a razão entre o conteúdo sólido e gasoso de uma espuma e tem influência direta nas propriedades físicas, mecânicas, térmica, acústicas e elétricas da espuma. Os compósitos expandidos produzidos com a FB apresentaram maior densidade com o aumento do teor de fibra, devido ao fato de a fibra de bananeira aumentar a viscosidade da massa polimérica e restringir a sua capacidade de expansão.

Segundo Perez et al. (2011), a dureza dos compósitos expandidos depende da matriz polimérica, da estrutura celular e/ou a presença de agentes de reforço [7]. A superfície (pele) do compósito celular apresenta maior dureza que seu interior por possuir mais massa polimérica condensada e menos células nessa região. Para medição da dureza na pele, foi necessário o uso de um durômetro com escala Shore A, visto que essa região é mais rígida, enquanto que, no núcleo, foi utilizado na escala Shore O (para o substrato celular). Os compósitos celulares produzidos com a FB possuem uma tendência de aumento na dureza, tanto na superfície, como em seu interior (núcleo). Esse fato está relacionado com a densidade e a baixa capacidade de expansão dos compósitos celulares com o aumento do teor da FB e, com isso, mais regiões físicas (polímero e fibra) e menos regiões gasosas (menos células) ocorrem e proporcionam maiores valores de dureza. Nos compósitos celulares produzidos com PM, observa-se pouca variação nos valores de

dureza no núcleo das amostras por estas possuírem uma morfologia celular e densidade semelhantes, quando comparadas à morfologia celular dos compósitos produzidos com a FB. Já na superfície, ocorre também uma tendência de aumento na dureza com o aumento do teor de pó de madeira.

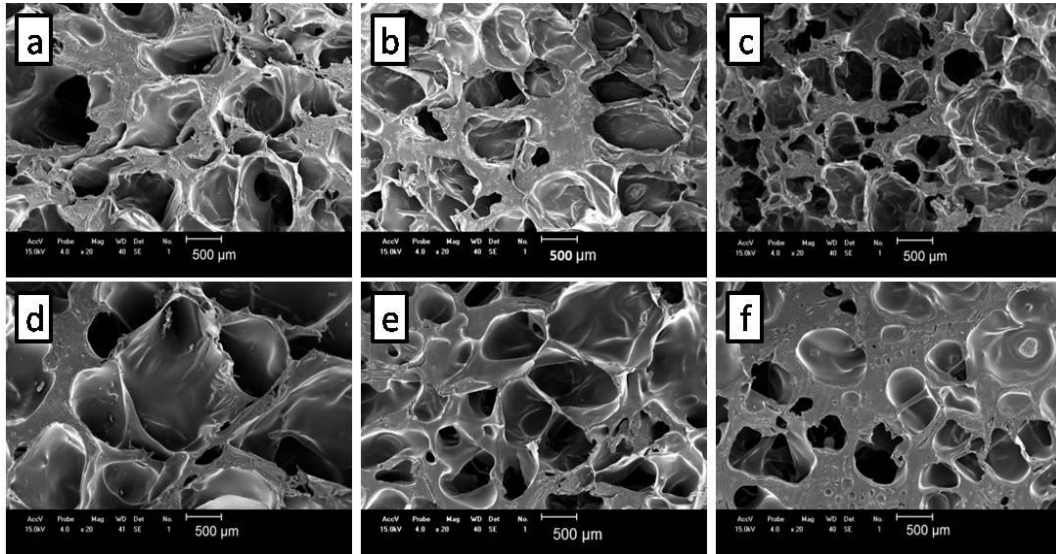


Figura 1: Micrografia de MEV do (a) e-EVA/PM 10, (b) e-EVA/PM 20, (c) e-EVA/PM 30, (d) e-EVA/FB 10, (e) e-EVA/FB 20, (f) e-EVA/FB 30.

A Figura 2a apresenta uma curva típica de resistência à compressão de espumas poliméricas, a Figura 2b ilustra o esquema das regiões de absorção de energia mecânica, por rasgamento ou tração, nos compósitos expandidos reforçados com fibras curtas (PM) e com fibras longas (FB).

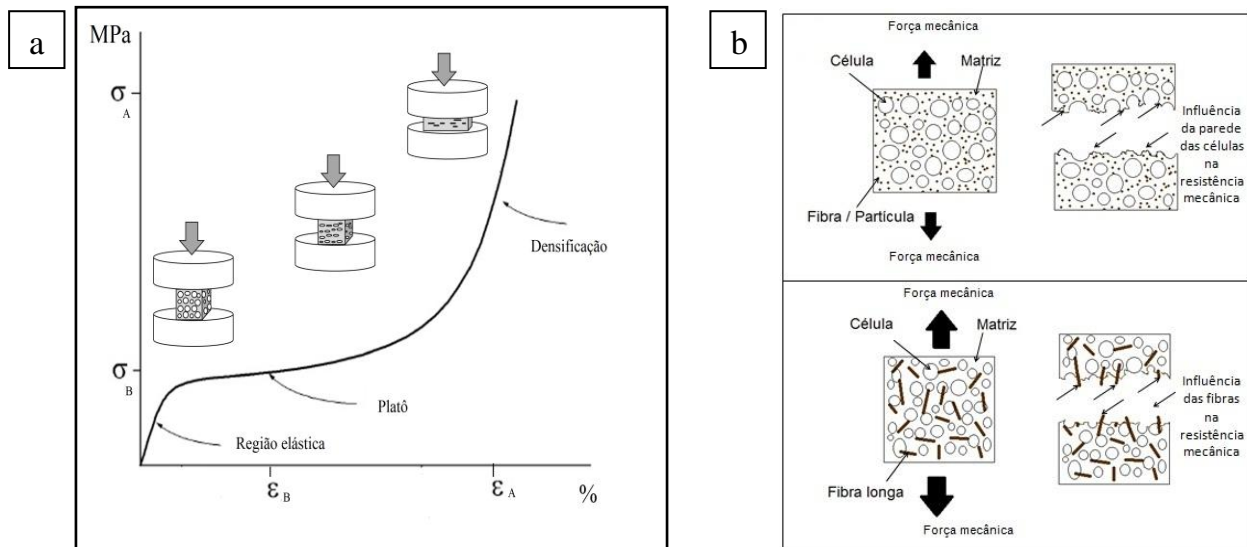


Figura 2: (a) Ilustração de uma curva típica de resistência à compressão de espumas e (b) regiões de absorção de energia mecânica em compósitos expandidos reforçados com partículas e fibras.

O ensaio de resistência à compressão avalia a força requerida para comprimir uma amostra a 30 e 75% da espessura inicial. O aumento no teor de carga, tanto com PM como FB, provoca aumento na resistência à compressão devido à influência da carga na formação de maior densidade de células e de menor tamanho (nucleação das células no compósito), o que pode ter influenciado na maior resistência à compressão dos compósitos expandidos com maiores teores de carga.

Em geral, há a existência de três fases distintas que ocorrem no ensaio de resistência à compressão: [I] inicialmente, há uma região de deformação elástica, na qual as arestas das células do compósito expandido sofrem flexão ou flambagem elástica, da qual se recuperam totalmente quando da retirada da carga, não ocorrendo à ruptura do material; [II] se a sollicitação aumenta, as arestas e membranas começam a sofrer colapso plástico, as células começam a desaparecer enquanto os elementos individualizados e a espuma se adensam rapidamente. Essa fase é caracterizada por um longo platô na curva tensão-deformação, no qual a espuma se deforma significativamente sem praticamente nenhum

aumento de tensão; [III] na terceira fase, comumente denominada de região de adensamento, a tensão aumenta rapidamente sem que haja grande incremento de deformação, uma vez que, como grande parte das células colapsou, o próprio material do polímero base começa a ser comprimido, o que provoca o aumento rápido da resistência da espuma.

Em geral, nas amostras analisadas, a tensão por compressão em 30% está relacionada com a deformação nas regiões I e II, conforme apresentado na Figura 2, e está associada à deformação reversível. A tensão nesse ponto é fortemente dependente da morfologia das células, como tamanho e densidade de células. Na Tabela 1, observa-se que as amostras com PM apresentaram maiores valores de tensão por compressão a 30% do que as amostras com FB, por possuírem maior quantidade de células e de menor tamanho.

A tensão por compressão a 75% está relacionada à influência da matriz e das fibras e, de acordo com o observado na Tabela 1, os compósitos produzidos com a FB possuem valores superiores de tensão por compressão a 75% quando comparados com os compósitos produzidos com o PM, em função da maior viscosidade dos compósitos, menor densificação (menor capacidade de expansão e maior densidade) e menor quantidade de células nos compósitos produzidos com a FB quando comparados com os compósitos produzidos com o PM.

Em geral, grande parte da absorção de energia (térmica e mecânica) é diretamente influenciada pela relação de tamanho de célula e tamanho de fibra. Quando o compósito celular é exposto à deformação mecânica, como por exemplo, tração ou rasgamento, a energia pode ser absorvida e dissipada por meio do efeito de *pull out* da fibra (arrancamento da fibra), fratura da matriz, fratura da fibra ou deslocamento da fibra na matriz na região da interface polímero-fibra.

Observa-se pela ilustração da Figura 2a, que nos compósitos expandidos, quando as células do compósito são grandes e as fibras (ou carga na forma de pó) são pequenas, elas ficam dispersas na parede da célula. Assim, a resistência mecânica do compósito é definida com base nas propriedades mecânicas da matriz polimérica, da espessura da parede das células e da força de adesão polímero-fibra. Nos compósitos em que as células são menores que as fibras utilizadas, as fibras se dispersam ao longo da estrutura celular do compósito, perfurando várias células, e a resistência mecânica é fortemente dependente das propriedades mecânicas da fibra e da força de ligação da interface polímero-fibra [6].

A resistência ao rasgamento em geral diminui com o aumento do teor de PM, em função da disposição do pó de madeira no contorno das células, o que facilita a ação mecânica do rasgo nestes compósitos. Já os compósitos produzidos com a FB, a resistência ao rasgamento tende a aumentar com o aumento do teor de fibra em função da baixa capacidade de expansão dos compósitos, e a existência de uma pobre estrutura celular (maior de concentração de matriz polimérica e fibra em relação ao número de células).

### Conclusão

A morfologia dos compósitos expandidos é fortemente dependente do teor e do formato do reforço vegetal utilizado. Em geral, o uso do PM nos compósitos proporciona nucleação das células (aumento da quantidade de células com aumento do teor de PM) enquanto o uso da FB restringe a capacidade de expansão dos compósitos, provavelmente em função do aumento da viscosidade e do emaranhamento da fibra restringir a capacidade de expansão do compósito. As propriedades mecânicas são dependentes da morfologia celular do compósito. A resistência à compressão e a dureza tendem a aumentar com o aumento do teor de ambas as fibras vegetais, enquanto a resistência ao rasgo diminui com o aumento do teor de PM e aumenta com o aumento do teor de FB.

### Referências

1. F. Mengelöglü; L. M. Matuana. *Journal of Vinyl & additive technology*, 2001, 7, 142-148.
2. G. M. Rizvi; R. P. Iliev; C. B. Park. *Journal of Cellular Plastics*, 2002, 38, 367-383.
3. O. Faruk; A. K. Bledzki; L. M. Matuana. *Macromolecular Materials Engineering*, 2007, 292, 113-127.
4. A. T. Farsheh; M. Talaeipour; A. H. Hemmasi; H. Khademislam; I. Ghasemi. *Bioresources*, 2011, 6, 841-852.
5. J. Zhang; G. M. Rizvi; C. B. Park. *Bioresources*, 2011, 6, 4979-4989.
6. S. Doroudiani; M. T. Kortschot. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2004, 17, 13-30.
7. M. A. R. Perez; R. D. Simoes; C. J. L. Constantino; J. A. Saja. *J of Appl Poly Sci*, 2011, 121, 2324-2330.