

## COMPÓSITOS PEAD/BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: INFLUÊNCIA DO PROCESSAMENTO E FONTE DE PEAD

### HDPE/SUGARCANE BAGASSE COMPOSITES: INFLUENCE OF PROCESSING AND HDPE SOURCE

Karolina V. de S. Coelho<sup>1</sup>  
Jackson Cesar Lopes de Santana<sup>2</sup>  
Daniele Cruz Bastos<sup>3</sup>  
Elaine Vidal Dias Gomes Líbano<sup>4</sup>  
Patricia Soares da Costa Pereira<sup>5</sup>

**Resumo:** Neste trabalho, compósitos poliméricos foram produzidos utilizando como matriz polietileno de duas fontes diferentes, o polietileno de alta densidade virgem (PEAD<sub>v</sub>) e o pós-consumo (PEAD<sub>pc</sub>), e como carga, fibras de bagaço de cana-de-açúcar (BCA). Para testar a influência do tipo de processamento, compósitos PEAD<sub>v</sub>/Fibra e PEAD<sub>pc</sub>/Fibra na proporção 90/10 (porcentagem mássica) foram processados em dois equipamentos diferentes: extrusora mono-rosca e extrusora dupla-rosca co-rotatória. Após os processamentos, corpos de prova foram obtidos por compressão e caracterizados por análises de densidade, dureza shore D, índice de fluidez (MFI), absorção de umidade, análise termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial. Os resultados mostram que é possível reduzir a quantidade de polímero oriundo do petróleo, com a inserção de 10 % de um resíduo, que é o bagaço de cana-de-açúcar, sendo os melhores resultados obtidos para compósitos utilizando o 90 % do polímero virgem em extrusora dupla-rosca.

**Palavras-chave:** PEAD; compósitos; processamento.

**Abstract:** In this work, polymeric composites were produced using as matrix polyethylene from two different sources, virgin high-density polyethylene (HDPE<sub>v</sub>) and post-consumption (HDPE<sub>pc</sub>), and as cargo, sugarcane bagasse fibers. To test the influence of the processing type, HDPE<sub>v</sub> / Fiber and HDPE<sub>pc</sub> / Fiber composites in the ratio 90/10 (mass percentage) were processed in two different equipment: single screw extruder and co-rotating twin screw extruder. After processing, specimens were obtained by compression and characterized by analyses of density, shore D hardness, fluidity index (MFI), moisture absorption, thermogravimetric analysis and differential exploratory calorimetry. The results show that it is possible to reduce the amount of polymer from petroleum by inserting 10% of a residue, which is sugarcane bagasse, and the best results were obtained for composites using 90 % of the virgin polymer in twin screw extruder.

**Keywords:** HDPE; composites; processing.

<sup>1</sup> Mestranda em Ciência e Tecnologia de Materiais, Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Brasil. E-mail: coelhok818@gmail.com.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia de Materiais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: jackson.jcls@gmail.com.

<sup>3</sup> Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: danielbastosuezo@gmail.com.

<sup>4</sup> Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: elainevdg@yahoo.com.br.

<sup>5</sup> Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: patyscp@gmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Polietileno de alta densidade (PEAD)

O polietileno de alta densidade (PEAD) foi introduzido comercialmente na década de 50, e atualmente é o quarto termoplástico mais vendido e a segunda resina mais reciclada do mundo (OLIVEIRA, 2018; SCHINAZI, 2016).

Estruturalmente, o polietileno é formado por unidades de etileno, que se repetem muitas vezes. Todos os carbonos se apresentam na forma de hibridização  $sp^3$  e, portanto, o ângulo entre as ligações C-C é de  $109,5^\circ$ . Tal configuração confere ao polietileno a capacidade de formar cristais e, por este motivo, o material é classificado como semicristalino (MARCKZAC, 1991; SOLOMONS; FRYHLE; SNYDER, 2016).

O PEAD vem tornando-se um dos plásticos mais consumidos no mercado nacional, devido à sua crescente utilização, principalmente no setor de embalagens de rápido descarte. Sua presença nos RSU é estimada em torno de 30% do total dos resíduos plásticos rígidos descartados, perdendo o primeiro lugar apenas para o PET (60%) (COSTA *et al.*, 2016; ZHANG; ZHANG, 2018).

A reutilização de materiais plásticos pós-consumo é tema de grande importância, não somente pela sua possível contribuição econômica dentro de um processo produtivo, como também devido à redução do impacto ambiental gerado pela quantidade de resíduo produzido pela sociedade, portanto, existe uma tendência geral ao aproveitamento desses resíduos considerando-se o imenso valor potencial dos materiais processados e as implicações dos desperdícios e poluição (CESTARI *et al.*, 2017; EL-FATTAH *et al.*, 2015; HUYSVELD *et al.*, 2019).

### 1.2 Fibras de bagaço de cana-de-açúcar

A fibra do bagaço de cana-de-açúcar (BCA), um subproduto originário dessa planta, recebe o nome científico de *Saccharum officinarum*. Foi introduzida no Brasil no século XVI, sendo o açúcar, um dos primeiros produtos a ser exportado. Atualmente, o açúcar e o etanol são importantes produtos obtidos a partir da cana, gerando grandes quantidades de resíduos após sua produção. É um dos recursos renováveis com maior potencial energético. No Brasil, existem mais de trezentas usinas de açúcar e álcool que processam quase 400 milhões de toneladas de cana por ano. Cada tonelada de cana produz em média 140 kg de bagaço, dos quais 90% são usados para produzir energia térmica e elétrica na usina durante o processo produtivo (CANDIDO, 2014; FERREIRA *et al.*, 2019; FLORENTINO *et al.*, 2014).

A composição do BCA consiste em 50% de água, 45% de fibras, 2- 3% de sólidos solúveis e 2-3% de sólidos insolúveis. Do ponto de vista morfológico, o bagaço possui: 50% de fibras, 30% de parênquimas, 15% de vasos e 5% de epidermes. Do ponto de vista químico, o bagaço de cana-de-açúcar é composto por celulose, hemiceluloses, lignina, cinzas e extrativos, com composições descritas na Tabela 1 (OLIVEIRA, 2018).

Tabela 1 – Composição química do bagaço de cana-de-açúcar.

Componentes (%)	Bagaço de cana-de-açúcar (in natura)
Celulose	46,86 ± 0,22
Hemicelulose	27,50 ± 0,14
Lignina total	26,27 ± 0,71
Cinzas	1,61 ± 0,02
Extrativos	
<b>Balanco total</b>	<b>102,24 ± 0,44</b>

Fonte: (AGUILAR et al., 2002).

O bagaço e a palha da cana são resíduos da agroindústria que geralmente são queimados nas usinas de açúcar e etanol para produzir calor e energia. O desenvolvimento de novas alternativas de reaproveitamento amplia as opções de agregação de valor, contribuindo para a redução dos impactos negativos gerados ao ambiente (LIGOWSKI; SANTOS; FUJIWARA, 2015; VALLEJOS *et al.*, 2015).

Tem sido relatado o uso do bagaço de cana nas indústrias como matéria prima para o desenvolvimento de diversos processos, dos quais incluem a geração de energia, produção de celulose e papel. (CANDIDO, 2014; CESTARI *et al.*, 2018; OLIVEIRA, 2018). Uma nova opção está sendo indicada para o uso desses resíduos: o processamento de novos materiais compósitos devido as suas características ecológicas e renovável (CHERIAN *et al.*, 2010).

### 1.3 Materiais compósitos

A conscientização da sociedade firmada no conceito de desenvolvimento sustentável exige a produção de materiais ecológicos de baixo custo e consumo de energia reduzida. Buscam-se produtos capazes de satisfazer requisitos fundamentais como a conservação de recursos naturais não renováveis e a manutenção de um ambiente saudável (LIGOWSKI; SANTOS; FUJIWARA, 2015; SAMARIHA; HEMMASI; GHASEMI, 2015).

Nesse contexto, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais como as fibras do bagaço de cana-de-açúcar, ganham destaque, pois as fibras utilizadas como reforço são materiais que apresentam vantagens tais como, baixo custo, são originados da própria natureza, podem apresentar elevado desempenho, baixa densidade, provenientes de fonte renovável, baixa abrasividade aos equipamentos de processamento e não são tóxicas (MOKHOTHU; JOHN, 2015; OLIVEIRA, 2018).

Vários métodos de produção têm sido usados na obtenção de compósitos poliméricos, tais como, o processo de extrusão e o misturador termocinético de alta intensidade (RUCH *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2007; LUZ *et al.*, 2008). Em se tratando de compósitos de matriz termoplástica o processo de extrusão vem sendo o mais reportado em artigos científicos e utilizado industrialmente. As extrusoras podem ser constituídas de uma ou múltiplas roscas (STEVENS; COVAS, 1995). As extrusoras de rosca única (mono-rosca) apresentam as vantagens de possuir baixo custo de instalação e manutenção do equipamento e operação simples. São adequadas para

trabalhos mais simples como: fusão, plastificação e descarregamento do fundido para a produção de cabos, chapas, mangueiras, filmes, tubos, etc. A extrusora dupla-rosca é mais adequada para a produção de materiais multicomponentes tais como blendas e compósitos devido ao maior cisalhamento gerado e por promover uma melhor mistura entre os componentes presentes na formulação.

Tendo em vista que as propriedades dos compósitos possam ser influenciadas pelas condições de processamento, este trabalho teve como objetivo obter compósitos de fibra de bagaço de cana-de-açúcar e PEAD virgem e pós-consumo, usando duas extrusoras diferentes: mono-rosca e dupla-rosca.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Obtenção do PEAD

O PEAD virgem foi gentilmente cedido pela empresa BRASKEM e o PEAD pós-consumo pela empresa de reciclagem Peterlu, Seropédica, Rio de Janeiro. Os materiais foram utilizados como recebidos.

### 2.2 Obtenção das fibras bagaço de cana-de-açúcar (BCA)

O bagaço de cana-de-açúcar in natura (BCA) foi gentilmente cedido pela HC Sucoquímica, Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil.

Inicialmente foi feita a trituração do bagaço em liquidificador, com água destilada, na proporção de 3:1. O bagaço foi seco a 105 °C, em estufa, por 24 horas, e depois triturado novamente em liquidificador por 10 minutos, a fim de separar as fibras.

### 2.3 Preparação dos materiais

Os materiais foram processados em diferentes equipamentos: mono-rosca e dupla-rosca utilizando 10% de BCA. Foi criada a seguinte legenda para utilização no trabalho:

PEAD<sub>VM</sub>/Fibra= Compósito utilizando PEAD virgem processado na mono-rosca;

PEAD<sub>VD</sub>/Fibra= Compósito utilizando PEAD virgem processado na dupla-rosca;

PEAD<sub>pcM</sub>/Fibra= Compósito utilizando PEAD pós-consumo processado na mono-rosca;

PEAD<sub>pcD</sub>/Fibra= Compósito utilizando PEAD pós-consumo processado na dupla-rosca.

#### 2.3.1 Processamento em extrusora mono-rosca

Os compósitos PEAD<sub>VM</sub>/Fibra e PEAD<sub>pcM</sub>/Fibra foram processados em extrusora mono-rosca de filmes planos modelo AX 1626 seguindo as seguintes condições de processamento: zonas de temperaturas de 160°C, 190°C e 200°C; velocidade da rosca de 32 rpm.

### 2.3.2 Preparação de compósitos em extrusora dupla-rosca

Os compósitos PEAD<sub>vD</sub>/Fibra e PEAD<sub>pcD</sub>/Fibra foram processadas em extrusora Teck Tril, modelo DCT 20-40(a) seguindo as seguintes condições de processamento: Zonas de temperatura de 70°C, 90 °C, 140 °C, 140 °C, 160 °C, 160 °C, 180 °C, 180 °C, 180 °C, 190 °C e 190 °C; velocidade das rosca de 70rpm.

## 2.4 Caracterização

### 2.4.1 Análise de Densidade

Os compósitos PEAD<sub>vm</sub>/Fibra, PEAD<sub>vD</sub>/Fibra, PEAD<sub>pcM</sub>/Fibra e PEAD<sub>pcD</sub>/Fibra foram caracterizados pelos ensaios de densidade utilizando-se o densímetro (modelo DSL 910- GEHAKA) de acordo com a norma (ASTM D792-2013) em cinco corpos de prova de cada amostra.

### 2.4.2 Análise de Dureza

Para a realização do ensaio de dureza, utilizou-se o durômetro shore D (Type GS 702). Os compósitos PEAD<sub>vm</sub>/Fibra, PEAD<sub>vD</sub>/Fibra, PEAD<sub>pcM</sub>/Fibra e PEAD<sub>pcD</sub>/Fibra foram avaliados de acordo com a norma (ASTM D2240-2010). Cada amostra teve analisado cinco pontos distintos em seus corpos de prova.

### 2.4.3 Análise do Índice de Fluidez (MFI)

O ensaio de MFI foi realizado nos compósitos PEAD<sub>vm</sub>/Fibra, PEAD<sub>vD</sub>/Fibra, PEAD<sub>pcM</sub>/Fibra e PEAD<sub>pcD</sub>/Fibra. Para a realização do mesmo foi utilizado o equipamento medidor de índice de fluidez (CEAST- Quick Index) de acordo com a norma (ASTM D1238-2002), a uma temperatura de 230 °C e carga de 2,16 Kg. Tendo sido coletados e posteriormente pesados em balança analítica (Marte AY220) cinco espécimes de cada amostra.

### 2.4.4 Absorção de Umidade

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme a norma (ASTM D-570- 98). Foram preparados corpos de prova feitos a partir de filmes prensados. Cada amostra foi mergulhada na água destilada em temperatura ambiente, durante um período de 24, 48 e 72 horas, tendo seu peso medido diariamente, após a secagem manual das amostras. Posteriormente, esse mesmo ensaio foi realizado durante 4 semanas consecutivas. A absorção de água foi então calculada conforme a equação 1:

$$WA (\%) = \left[ \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \right] \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

*WA*= Percentagem de absorção de água;

*m*<sub>1</sub>= Peso da amostra seca;

$m_2$  = Peso da amostra úmida.

### 2.4.5 Análise termogravimétrica (TGA)

A estabilidade térmica das fibras foi avaliada através de termogravimetria/termogravimetria derivativa (TG/DTG), em equipamento TA Instrument modelo Q500, realizada sob atmosfera de nitrogênio, entre 30-700 °C, a 10 °C/min. A temperatura de degradação inicial ( $T_{inicial}$ ), máxima ( $T_{máx}$ ) e final ( $T_{final}$ ), foram determinadas, assim como a presença de resíduo de queima.

### 2.4.6 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi feita em equipamento TA modelo Q1000. As amostras foram analisadas segundo os seguintes ciclos: no primeiro ciclo a amostra foi aquecida de 0 °C até 200 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, deixando o material a 200 °C por 2 minutos, sob atmosfera de nitrogênio; no segundo ciclo foi feito um resfriamento a uma taxa de 10 °C/min, até 0 °C; em seguida, foi feito um segundo ciclo de aquecimento nas mesmas condições do inicial (exceto pelo tempo em espera de 2 minutos a 200 °C); por fim foi feito um segundo ciclo de resfriamento nas mesmas condições do primeiro ciclo de resfriamento.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Densidade, Dureza Shore D e MFI

A Tabela 2 apresenta os resultados de densidade, dureza e MFI dos compósitos PEAD<sub>vM</sub>/Fibra, PEAD<sub>vD</sub>/Fibra, PEAD<sub>pcM</sub>/Fibra e PEAD<sub>pcD</sub>/Fibra reforçados com BCA obtidos por diferentes formas de processamento: mono-rosca e dupla-rosca.

Tabela 2 – Resultados de densidade, dureza e MFI dos compósitos.

Amostras	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza Shore D	MFI (g/10min)
PEAD <sub>vM</sub> /Fibra	0,97± 0,10	75,40±1,41	0,25±0,01
PEAD <sub>vD</sub> /Fibra	0,95±0,07	74,61±1,34	0,25±0,01
PEAD <sub>pcM</sub> /Fibra	1,07±0,12	78,23±1,89	1,11 ±0,05
PEAD <sub>pcD</sub> /Fibra	0,94±0,16	92,04±1,22	1,25±0,07

Fonte: Os autores.

O tipo de processamento não afetou significativamente as propriedades de densidade e dureza dos compósitos obtidos com PEAD<sub>v</sub> e BCA. Considerando os compósitos obtidos com PEAD<sub>pc</sub> e BCA as propriedades de densidade e dureza foram afetadas pelo tipo de processamento.

Houve uma redução de aproximadamente 12 % na densidade dos compósitos de PEAD<sub>pc</sub> obtidos através do processamento na dupla-rosca. Com relação a dureza shore D houve um aumento de 18 % sugerindo que uma possível interação esteja ocorrendo

entre o PEAD e o BCA, comportamento este que pode ser atribuído a melhor homogeneidade provocada pelo processamento na dupla-rosca, que promove uma melhoria no empacotamento das cadeias celulósicas tornando-as mais difíceis de serem rompidas pelo penetrador do durômetro (ALBANO; SANCHEZ; ISMAYEL, 1998; LUCAS; SOARES; MONTEIRO, 2001; D'ALMEIDA *et al.*, 2003).

O MFI dos compósitos de PEAD<sub>v</sub> e BCA não foi afetado pelo tipo de processamento, porém o MFI dos compósitos com PEAD<sub>pc</sub> apresentou um comportamento diferente. Os compósitos de PEAD<sub>pc</sub> obtidos na dupla-rosca apresentaram um aumento no MFI de 12,6 % com relação ao material obtido na mono-rosca. Considerando o tipo de PEAD, verificou-se que os compósitos obtidos com PEAD<sub>pc</sub> apresentaram um aumento de até 400 % com relação aos compósitos obtidos com o PEAD<sub>v</sub> provavelmente devido à cisão de cadeias do PEAD<sub>pc</sub>.

### 3.2 Absorção de Umidade

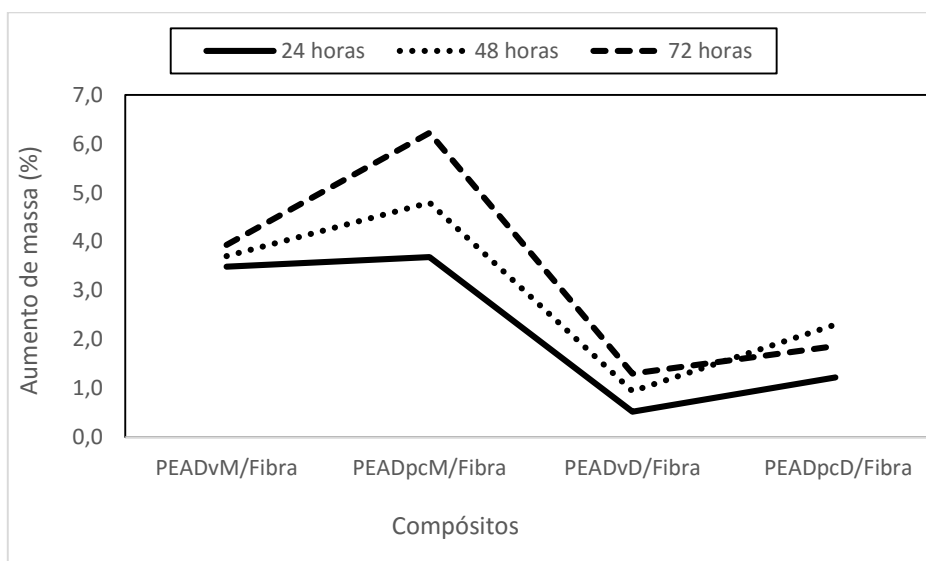
A absorção de água dos materiais é uma característica importante que determina a aplicação final da utilização destes materiais, uma vez que pode levar a uma diminuição em algumas das propriedades do material. Em geral, os plásticos são resistentes a umidade. No entanto, os materiais lignocelulósicos consistem basicamente em polissacarídeos (celulose e hemicelulose) e lignina. Tais materiais tendem a absorver bastante umidade por possuírem moléculas altamente polares, devido a presença de grande número de hidroxilas e carbonilas em sua composição (CARASCHI, 1997). Além disso, estes materiais lignocelulósicos podem alterar as suas dimensões com a umidade, porque a parede celular destes materiais contém grupos hidroxila ou outros grupos contendo oxigênio, assim estes grupos interagem com a água através de ligações de hidrogênio (DE PAOLI *et al.*, 2007).

A variação do aumento de massa apresentou uma mesma tendência independentemente do tipo de PEAD (virgem ou pós-consumo) ou do processamento (mono-rosca ou dupla-rosca). De maneira geral, todos os compósitos apresentaram um aumento do teor de massa à medida que o tempo de análise aumentou exceto o compósito PEAD<sub>pc</sub>D/Fibra que apresentou uma diminuição do teor de massa no tempo de 72 horas, apresentando um valor de aumento de massa inferior ao tempo de 48 horas. O compósito PEAD<sub>v</sub>D/Fibra mostrou menor absorção de água do que os demais, no mesmo período, provavelmente devido a maior homogeneidade provocada pelo processamento na dupla-rosca o que ocasiona a diminuição de espaços vazios na interface fibra-matriz.

De maneira contrária, o compósito PEAD<sub>pc</sub>M/Fibra apresentou a maior umidade absorvida, provavelmente em decorrência da degradação do PEAD<sub>pc</sub> durante seu processamento e do tipo de equipamento utilizado (mono-rosca) que promove uma má homogeneização devido ao baixo cisalhamento (KURUVILLA *et al.*, 1999; SILVA, 2009). Além disso, a grande higroscopicidade da fibra faz com que haja formação de espaços vazios na interface fibra-matriz promovendo o aumento da absorção de umidade.

A Figura 1 ilustra a quantidade de água absorvida pelos compósitos de PEAD virgem e pós-consumo e o BCA.

Figura 1 - Absorção de água dos compósitos de PEAD<sub>v</sub> e do PEAD<sub>pc</sub>.



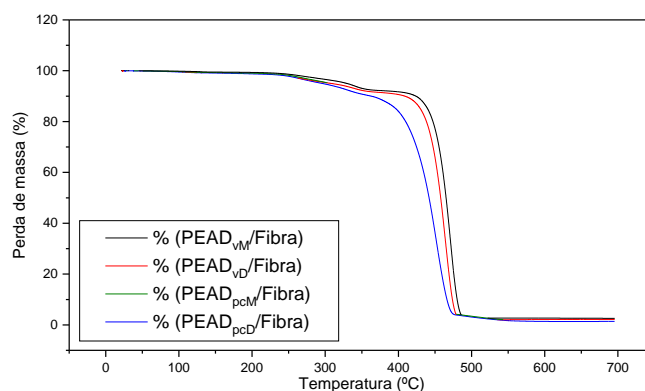
Fonte: Os autores.

### 3.3 Análise termogravimétrica (TGA)

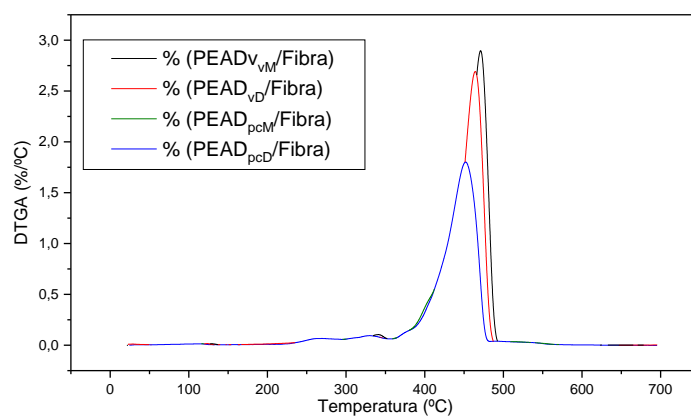
As características de estabilidade térmica dos compósitos foram analisadas por termogravimetria (TGA). As Figuras 2 e 3 mostram as curvas de TGA e DTGA obtidas na avaliação da estabilidade térmica dos materiais estudados.

Foi possível verificar que os compósitos obtidos com o polímero virgem na extrusora mono e dupla-rosca apresentaram um perfil de degradação térmica bastante semelhante, o que demonstra que degradam praticamente da mesma forma. Os materiais obtidos com o PEAD pós-consumo nos dois tipos de extrusora também mostraram a mesma tendência. Observou-se duas etapas de degradação, na primeira ocorre à decomposição das fibras entre 260 e 360°C e na segunda etapa ocorre a decomposição do PEAD entre 360 e 500°C (WATASHI, 2011).



Figura 2 - Curvas de TGA dos compósitos de PEAD<sub>v</sub> e do PEAD<sub>pc</sub>.

Fonte: Os autores.

Figura 3 - Curvas de DTGA dos compósitos de PEAD<sub>v</sub> e do PEAD<sub>pc</sub>.

Fonte: Os autores.

A Tabela 3 apresenta os valores de degradação térmica dos compósitos obtidos com o polímero virgem e o pós-consumo nos dois tipos de extrusora (mono e dupla-rosca).

Tabela 3 - Valores de degradação térmica dos compósitos de PEAD<sub>v</sub> e do PEAD<sub>pc</sub>.

Amstras	Tinicial (oC)	Tmáximo
PEAD <sub>vM</sub> / Fibra	327	471
PEAD <sub>vD</sub> / Fibra	323	464
PEAD <sub>pcM</sub> / Fibra	246	453
PEAD <sub>pcD</sub> / Fibra	245	452

Fonte: Os autores.

O compósito do polímero virgem obtido na extrusora mono-rosca (PEAD<sub>vM</sub>/Fibra)

apresentou uma temperatura inicial de degradação bem próxima a do compósito obtido na extrusora dupla-rosca (PEAD<sub>VD</sub>/Fibra) 327 e 323°C, respectivamente. A temperatura máxima de degradação se mostrou levemente superior para o material obtido na extrusora dupla-rosca (471°C). Os compósitos obtidos com o PEAD pós-consumo apresentaram valores de  $T_{inicial}$  e  $T_{máxima}$  praticamente iguais independentemente do tipo de processamento. Comparando os resultados obtidos nos dois tipos de processamentos, observa-se que o tipo de processamento não alterou a estabilidade térmica dos sistemas estudados. No geral, os materiais obtidos com o PEAD pós-consumo nos dois tipos de equipamentos utilizados apresentaram valores de degradação térmica inferiores aos verificados para o material virgem.

### 3.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Tabela 4 mostra os dados de temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ), temperatura de cristalização ocorrida durante o resfriamento ( $T_{cc}$ ) e do grau de cristalinidade ( $X_c$ ) obtidos por DSC para os compósitos preparados com o polímero virgem (PEAD<sub>v</sub>) e com o polímero pós-consumo (PEAD<sub>pc</sub>).

Tabela 4 - Propriedades térmicas dos compósitos de PEAD<sub>v</sub> e do PEAD<sub>pc</sub>.

Amostras	Tm1 (oC)	Tm2 (oC)	Tm3 (oC)	Tcc (oC)	Xc (%)
PEAD <sub>VM</sub> / Fibra	-	130	-	117	54
PEAD <sub>VD</sub> / Fibra	-	130	-	118	60
PEAD <sub>pcM</sub> / Fibra	113	125	162	114	37
PEAD <sub>pcD</sub> / Fibra	117	125	161	115	40

Fonte: Os autores.

É possível verificar na Tabela que os compósitos preparados com o PEAD virgem mostraram a presença de uma única  $T_m$ . De acordo com a literatura, a  $T_m$  do PEAD<sub>v</sub> varia entre 130 e 137°C, confirmando os resultados obtidos nesta análise (ESSABIR *et al.*, 2016; MARIANO, 2012; SARASINIA *et al.*, 2018;). Já os compósitos obtidos com o polímero pós-consumo apresentaram de três valores de  $T_m$  ( $T_{m1}$ ,  $T_{m2}$  e  $T_{m3}$ ). A  $T_m$  central ( $T_{m2}$ ) corresponde a  $T_m$  do PEAD (MARINI, 2008) e as outras duas ( $T_{m1}$  e  $T_{m3}$ ) correspondem possivelmente à presença de impurezas em decorrência da heterogeneidade do material. Segundo a literatura e dados da empresa fornecedora do PEAD<sub>pc</sub>, é possível que a  $T_{m1}$  possa ser atribuída ao poli[(etileno)-co-(acetato de vinila)] (EVA), polímero esse que é adicionado durante o processamento para aumentar a flexibilidade (ALPIRE-CHÁVEZ, 2007), enquanto que a  $T_{m3}$  pode corresponder ao polipropileno - PP (BILLMEYER, 1984; CANEVAROLO JUNIOR, 2004) material esse que pode ser encontrado misturado ao PEAD<sub>pc</sub> proveniente de sacolas plásticas descartados no lixo e que foi utilizado neste trabalho. Não foram observadas mudanças significativas na  $T_m$  e na  $T_{cc}$  dos compósitos com o polímero virgem obtidos utilizando

os dois tipos de extrusoras (mono e dupla-rosca). O mesmo foi verificado para os compósitos preparados com o polímero pós-consumo.

Os compósitos preparados com o polímero pós-consumo na extrusora mono-rosca e na dupla-rosca apresentaram valores de  $X_c$  inferiores aos obtidos para o polímero virgem nas mesmas condições. O compósito PEAD<sub>pcM</sub>/Fibra apresentou o  $X_c$  cerca de 31,5 % inferior ao obtido para o material PEAD<sub>VM</sub>/Fibra. O material processado na extrusora dupla-rosca com o polímero pós-consumo mostrou uma queda de 60 % no  $X_c$  em relação ao obtido com o PEAD virgem.

De acordo com a Literatura, o grau de cristalinidade para o PEAD virgem varia entre 62-82 % (SILVA, 2016). A variação do  $X_c$  nos compósitos pode ser atribuída aos diferentes tipos de PEAD utilizados. O material pós-consumo pode receber em sua fabricação diferentes aditivos e/ou catalisadores que podem afetar o seu grau de cristalinidade. Pode-se inferir que as modificações observadas nos índices de cristalinidade nos compósitos com a fibra, sugerem que o processamento promoveu alterações na estrutura cristalina do PEAD (HILLIG *et al.*, 2008). Para confirmar tal afirmação, é necessário um estudo mais aprofundado da cinética de cristalização desses materiais e das variáveis termodinâmicas envolvidas no processo (SILVA, 2016).

#### 4 CONCLUSÃO

Em relação à Densidade e Dureza, nos compósitos PEAD<sub>v</sub>/Fibra, o tipo de processamento não afetou estas propriedades. Em relação aos compósitos PEAD<sub>pc</sub>/Fibra, a densidade foi reduzida em 12 % e a dureza foi reduzida em 18 % no processamento em dupla-rosca, comparado à mono-rosca. Tal comportamento pode ser explicado pela melhor interação fibra-matriz no processamento em dupla-rosca.

O MFI dos compósitos PEAD<sub>v</sub>/Fibra não foi afetado pelo tipo de processamento. O MFI dos compósitos PEAD<sub>pc</sub>/Fibra obtidos na dupla-rosca aumentou 12,6 % em relação ao obtido na mono-rosca, provavelmente devido a capacidade de dispersão e distribuição das fibras que, na dupla-rosca é mais efetiva.

Em relação à absorção de água, a variação do aumento de massa apresentou uma mesma tendência independente da origem do PEAD (virgem ou pós-consumo) ou do processamento (mono ou dupla-rosca). O compósito PEAD<sub>VD</sub>/Fibra mostrou menor absorção de água, provavelmente devido a maior homogeneidade. Em contrapartida, o compósito PEAD<sub>pcM</sub>/Fibra apresentou maior absorção de água.

O tipo de processamento não alterou a estabilidade térmica dos sistemas estudados. No geral, os compósitos obtidos com o PEAD pós-consumo apresentaram valores de degradação térmica inferiores aos verificados para o PEAD virgem.

Não foi observada mudança significativa na  $T_m$  e na  $T_{cc}$  dos compósitos obtidos tanto na mono como na dupla-rosca, independente do tipo de PEAD utilizado.

Entretanto, o  $X_c$  dos compósitos preparados com o PEAD pós-consumo foi inferior ao  $X_c$  dos compósitos obtidos com o polímero virgem. O material pós-consumo pode receber em sua fabricação diferentes aditivos e/ou catalisadores que podem afetar o seu grau de cristalinidade.

Os compósitos obtidos neste trabalho possuem boas propriedades físicas e térmicas, possibilitando uma redução de 10 % na utilização da matriz derivada de petróleo, através da inserção de um resíduo, que é a fibra de bagaço de cana-de-açúcar. Além disso, podem ser obtidos por processamento de extrusão, sendo os melhores resultados encontrados com o uso da extrusora dupla-rosca e o polímero virgem.

## REFERÊNCIAS

AGUILAR, R. *et al.* Kinetic study of the acid hydrolysis of sugarcane bagasse. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 4, p. 309-318, 2002.

ALBANO, C.; SANCHEZ, G.; ISMAYEL, A. Influence of a copolymer on the mechanical properties of a blend of PP and recycled and non-recycled HDPE. **Polymer Bulletin**, v. 41, n. 1, p. 91-98, 1998.

ALPIRE-CHÁVEZ, M. **Influência do carbonato de cálcio nas propriedades físicas de espumas de EVA**. 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D570 – 98: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. In: **Annual Book of ASTM**, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D792-13: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. In: **Annual Book of ASTM**, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2240-05: Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness. In: **Annual Book of ASTM**, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1238-01: Melt flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. In: **Annual Book of ASTM**, 2002.

BILLMEYER, F. W. **Textbook of Polymer Science**. Wiley, New York, 1984.

CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. 2014. 188 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2004.

CARASCHI, J. C. **Estudo das relações estrutura/propriedades de carboximetilcelulose obtida por derivatização de polpa de bagaço de cana-de-açúcar**. 1997. 188f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade de São Paulo, 1997.

CESTARI, S. P. *et al.* Advanced properties of composites of recycled high-density polyethylene and microfibers of sugarcane bagasse. **Journal of Composite Materials**, v. 52, n.7, p. 867-876, 2018.

CHERIAN, B. M. *et al.* Isolation of nanocellulose from pineapple leaf fibres by steam explosion. **Carbohydrate Polymers**, v. 81, n. 3, p. 720-725, 2010.

COSTA, H. M. *et al.* Análise térmica e propriedades mecânicas de resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD). **Revista Polímeros Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 26, p. 75-81, 2016.

D'ALMEIDA, A.L.F.S. *et al.* Acetilação da fibra de bucha (*Luffa cylindrica*). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.15, n. 1 p. 59 -62, 2005.

DE PAOLI, M. A. *et al.* Polyamide-6/vegetal fiber composite prepared by extrusion and injection molding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n.12, p. 2404-2411, 2007.

EL-FATTAH, A. A. *et al.* The effect of sugarcane bagasse fiber on the properties of recycled high density polyethylene. **Journal of Composite Materials**, v. 49, n. 26, p. 3251-3262, 2015.

ESSABIR, H. *et al.* Mechanical and thermal properties of hybrid composites: Oil-palm fiber/clay reinforced high density polyethylene. **Mechanics of Materials**, 98, p. 36 – 43, 2016.

FERREIRA, G. F. *et al.* Tuning sugarcane bagasse biochar into a potential carbon black substitute for polyethylene composites. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, n. 8, p. 1735-1745, 2019.

FLORENTINO, W. M. *et al.* Caracterização morfológica e mecânica do compósito de PP reforçado com fibras de bagaço de cana. **Cadernos UniFOA**, v. 9, n. 2, p. 33-37, 2014.

HILLIG, É. *et al.* Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (PEAD) e serragem da indústria moveleira. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 299-310, 2008.

HUYSVELD, S. *et al.* Advancing circular economy benefit indicators and application on open-loop recycling of mixed and contaminated plastic waste fractions. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 1-13. 2019.

KURUVILLA, J. *et al.*; A review on sisal fiber reinforced polymer composites. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 367-379, 1999.

LIGOWSKI, E.; SANTOS, B. C.; FUJIWARA, S. T. Materiais compósitos a base de fibras da cana-de-açúcar e polímeros reciclados obtidos através da técnica de extrusão. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 25, n. 1, p. 70-75, 2015.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. **Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica**. Editora E-papers, 2001.

LUZ, S. M. *et al.* Cellulose and cellulignin from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites: Effect of acetylation on mechanical and thermal properties. **Composites: Part A**, v.39, p. 1362-1369, 2008.

MARCKZAC, R. J. **Polímeros como materiais de engenharia**. Porto Alegre: Blucher, 1991.

MARIANO, D. M. **Desenvolvimento de compósitos e/ou nanocompósitos de polietileno de alta densidade com argila organofílica via extrusão**. 2012. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Polímeros) - Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2012.

MARINI, J. **Desenvolvimento e caracterização de filmes tubulares de nanocompósitos de PEAD/EVA/argila organofílica**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

MOKHOTHU, T. H.; JOHN, M. J. Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v. 131, n. p. 337-354, 2015.

OLIVEIRA, O. C. **Avaliação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e modificada para aplicação em compósitos**. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2018.

RUCH, J. *et al.* Transformação Direta Facilita Moldagem de Plásticos Reforçados com Fibras Naturais. **Plástico Industrial**, v. 68, p. 44-63, 2004.

SANTOS, P. A. *et al.* Polyamide-6/vegetal fiber composite prepared by extrusion an injection molded. **Composites Part A: Ciência Aplicada e Manufatura**, v. 38, p. 2404-2411, 2007.

SAMARIHA, A.; HEMMASI, A. H.; GHASEMI, I. Effect of nanoclay contents on properties, of bagasse flour/ reprocessed high density polyethylene/ nanoclay composites. **Maderas. Ciencia y tecnologia**, v. 17, n. 3, p. 637-646, 2015.

SARASINIA, F. *et al.* Effect of basalt fibre hybridisation and sizing removal on mechanical and thermal properties of hemp fibre reinforced HDPE composites. **Composite Structures**, v. 188, p. 394-406, 2018.

SCHINAZI, G. **Compósitos de polietileno de alta densidade reforçados por nanopartículas de  $\text{In}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$** . 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e em Processos Químicos e Metalúrgicos) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, E.A. **Desenvolvimento e caracterização de blendas de polímeros biodegradáveis e polipirrol**. 2009. 107 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, E.F. **Processamento e Caracterização de Compósitos de PEAD reforçados com Biomassa de Casca e Torta de Pinhão Manso**. 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) - Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, Rio de Janeiro, 2016.

SOLOMONS, T. W. G; FRYHLE, C. B.; SNYDER, S. A. **Organic Chemistry**. 12. ed.

Nova Jersey: Wiley, 2016.

STEVENS, M. J.; COVAS, J. **Extruder Principles and Operation**. 2nd. ed. New Delhi:India, Springer, 1995.

VALLEJOS, M. E. *et al.* Kinetic study of the extraction of hemicellulosic carbohydrates from sugarcane bagasse by hot water treatment. **Industrial Crops and Products**, v. 67, p. 1-6, 2015.

WATASHI, C. H. **Preparação e caracterização da casca da banana prata particulada para aplicação como reforço em compósito de matriz de PEAD**. 2011. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ZHANG, J. P.; ZHANG, F. S. Recycling waste polyethylene film for amphoteric superabsorbent resin synthesis. **Chemical Engineering Journal**, v. 331, p. 169-176, 2018.