

Comportamento reológico de blendas de polietilenos de fonte renovável em baixas e altas taxas de deformação

D. M. G. Freitas*; A. D. B. Oliveira; P. Agrawal; T. J. A. de Mélo

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, 58429-900, Campina Grande, PB.

(recebido em 24/03/2019; aceito em 23/05/2019)

danielmullerufca@gmail.com

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento reológico de blendas de polietilenos de fonte renovável (BioPEAD/BioPELBD), em baixas e altas taxas de deformação. Foram investigados os efeitos da concentração de BioPELBD e da taxa de cisalhamento no inchamento do extrudado e em instabilidades de fluxo. Em todas as composições analisadas houve o aumento do inchamento do extrudado com o aumento da taxa de cisalhamento. Para o BioPELBD puro e as blendas com teor mais elevado de BioPELBD, o inchamento foi atenuado pelo surgimento de instabilidades de fluxo do tipo pele de cação, gruda desliza e fratura grosseira do fundido. O inchamento do extrudado corroborou com o coeficiente de amortecimento ($\tan \delta$), onde o BioPELBD, que exibe comportamento mais elástico, apresenta maior inchamento do extrudado.

Palavras-chave: Biopolietileno; reologia; blendas poliméricas; instabilidades de fluxo; inchamento do extrudado

Abstract:

The aim of this work is to study the rheological behavior of bio-based polyethylene blends (BioHDPE/BioLLDPE) at low and high shear rates. The effect of BioLLDPE concentration and of the shear rate on the die swell and flow instabilities was investigated. For all the compositions analyzed there was an increase in the die swell with the increase in the shear rate. For the pure BioLLDPE and the blends with higher BioLLDPE content, the die swell was attenuated by the appearance of flow instabilities of the sharkskin type, stick-slip, and gross melt fracture. The die swell corroborated with the damping factor ($\tan \delta$) where the BioLLDPE, which exhibits more elastic behavior, presents greater die swell.

Keywords: Biopolyethylene; rheology; polymer blends; flow instabilities; die swell

Introdução

Entre os polímeros convencionais ou commodities, o polietileno (PE) é o que apresenta maior diversidade em relação à estrutura molecular, podendo apresentar ramificações longas e curtas, variada massa molar e distribuição de massa molar, que afetam a densidade, as propriedades e o seu comportamento reológico no estado fundido. Em virtude destas características estruturais, vários produtos plásticos podem ser obtidos pela transformação do polietileno por meio de técnicas de processamento utilizadas na indústria de plásticos, tais como extrusão, injeção e sopro [1]. Os polietilenos também são utilizados na forma de misturas (blendas poliméricas) entre eles ou com outros polímeros, isto possibilita diversas combinações, cujo objetivo é obter propriedades diferenciadas. Blendas poliméricas de polietileno de alta densidade e polietileno linear de baixa densidade (PEAD/PELBD) têm grande interesse científico e industrial, pois o PELBD possui excelente resistência química, resistência à tração e dureza, no entanto apresenta dificuldade de processamento, que pode ser atenuada com a adição do

PEAD, que tem boa compatibilidade com o PELBD. As vantagens da mistura de PEAD/PELBD incluem, por exemplo, melhorias nas propriedades mecânicas, ópticas e reológicas [2].

Liu, Wang [3] estudaram as propriedades reológicas das blendas de PELBD com PEAD e com polietileno de baixa densidade (PEBD). O comportamento dinâmico e estacionário foi avaliado no reômetro de placas paralelas. Os resultados mostraram que a dependência da composição na viscosidade em cisalhamento zero, no tempo de relaxação e na frequência característica das misturas para o sistema PELBD/PEAD, apresentou uma variação linear em toda a faixa de concentração, indicando miscibilidade desse sistema. Já para o sistema de PELBD/PEBD a dependência da composição na viscosidade de cisalhamento zero apresentou um desvio da regra de aditividade. O tempo de relaxação característico e a frequência característica apresentaram uma variação acentuada com as pequenas quantidades de PELBD nas misturas, indicando também separação de fases.

Pérez, Rojo [4] estudaram o comportamento reológico do sistema PELBD/PEBD. A partir dos resultados da viscosidade, verificaram que as blendas são miscíveis no estado fundido para todas as composições, exceto para a composição contendo 52,5% de PEBD. Misturas com elevado teor de PELBD, apresentaram instabilidade de fluxo do tipo pele de cação (*sharkskin*) para taxas de cisalhamento mais altas.

Chen, Zou [5] utilizaram o polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno linear de baixa densidade (PELBD) e o polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) para o estudo reológico de suas blendas. As blendas PEBD/PEUAPM e PELBD/PEUAPM foram preparadas em misturador interno nas composições (100/0; 90/10; 80/20; 70/30 e 60/40). A partir dos resultados reológicos, observou-se que as blendas PEBD/PEUAPM são miscíveis no estado fundido. Já para as blendas PELBD/PEUAPM, as propriedades reológicas apresentaram um sistema com separação de fases.

Siriprumpoonthum, Nobukawa [1] analisaram as propriedades reológicas do polietileno linear de baixa densidade (PELBD) e do polietileno de baixa densidade (PEBD), e de suas blendas, após um processamento a altas temperatura, sem adição de estabilizante térmico. A mudança estrutural altera significativamente as propriedades reológicas, embora haja poucas ou nenhuma alteração nos pesos moleculares e suas distribuições e nos números de ligações duplas e de cadeia curta. Os resultados mostraram também um aumento na viscosidade de cisalhamento zero do PELBD, mesmo sem nenhum aumento do peso molecular médio ponderado, a partir da modificação térmica. Os autores observaram a presença de fratura bruta da fusão (GMF) durante a extrusão capilar, mesmo com baixas taxas de cisalhamento, possivelmente causadas pelo alto estresse de alongamento na entrada da matriz.

Desde 2010, a Braskem, petroquímica brasileira, comercializa o polietileno verde (biopolietileno). O adjetivo verde é usado para indicar que o etileno usado como matéria-prima para sintetizar o polietileno verde é derivado da cana-de-açúcar. Segundo a Braskem, para cada tonelada de polietileno verde produzido, 2,5 toneladas de CO₂ são capturadas da atmosfera e permanecem sequestradas para todo o ciclo de vida do plástico. Durante sua combustão, o CO₂ liberado para a atmosfera será novamente capturado pela cana-de-açúcar na próxima safra, mantendo assim o equilíbrio de CO₂ na natureza. Além de ser um material ecológico, o Bio-PE apresenta as mesmas propriedades técnicas e processabilidade da resina feita a partir de fontes fósseis. Assim, processar o plástico verde não requer novos investimentos em equipamentos ou ajustes técnicos [6].

Na literatura não foram encontrados estudos reológicos desenvolvidos com blendas de polietilenos de fonte renovável (biopolietilenos) como o biopolietileno de alta densidade (BioPEAD) e biopolietileno linear de baixa densidade (BioPELBD), sintetizados a partir de

insumos de biomassa. Apesar do BioPEAD e do BioPELBD apresentarem teoricamente características estruturais similares aos obtidos a partir de insumos de fontes fósseis, há necessidade de investigar o comportamento reológico de suas misturas sob diferentes condições de deformação.

Portanto, com base no exposto, esta pesquisa tem como objetivo principal o estudo do comportamento reológico no estado fundido de blendas de BioPEAD/BioPELBD, em baixas e altas taxas de deformação. Também, por reometria capilar, e com auxílio de um microscópio óptico, foram feitas medidas dos diâmetros dos extrudados para avaliar o inchamento do extrudado e o aparecimento de instabilidades de fluxo (defeitos superficiais) em diferentes taxas de deformação.

Materiais e Métodos

Materiais

Polietileno de alta densidade verde SHA7260 (BioPEAD), I'm Green®, com IF= 20g/10min (medido a 190°C com carga de 2,16 Kg), fornecido pela Braskem. Este polímero foi desenvolvido para o seguimento de injeção, contendo 94% no mínimo de carbono renovável, determinado conforme ASTM D6866.

Polietileno linear de baixa densidade verde SLL318 (BioPELBD), I'm Green®, com IF=2,7g/10min (medido a 190°C com carga de 2,16Kg), fornecido pela Braskem. Este polímero foi desenvolvido para aplicação em extrusão de filmes, contendo 87% no mínimo de fonte renovável, determinado conforme ASTM D6866.

Preparação das Blendas de BioPEAD/BioPELBD

As misturas de BioPEAD com o BioPELBD foram realizadas em extrusora dupla-roscas corrotacional modular, modelo ZSK 18mm (L/D=40) da Coperion-Werner & Pfleiderer. As condições de processamento para todas as blendas, inclusive para os polímeros BioPEAD e BioPELBD, foram: taxa de alimentação dos materiais na extrusora de 5kg/h, velocidade das roscas de 250rpm, perfil de temperatura em todas as zonas da extrusora de 200°C e rosca configurada para misturas, contendo elementos dispersivos e distributivos, conforme esquema da Figura 1.

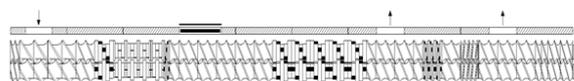


Figura 1. Configuração da rosca da extrusora contendo elementos dispersivos e distributivos.

Este material foi granulado em um picotador acoplado na própria extrusora. As composições das blendas BioPEAD/BioPELBD encontram-se na Tabela 1.

Comportamento Reológico em Regime Permanente e Oscilatório (Baixas Taxas de Deformação)

O comportamento reológico dos polímeros BioPEAD e BioPELBD e das blendas

BioPEAD/BioPELBD no regime permanente de cisalhamento em baixas taxas de deformação (cisalhamento) foi avaliado por meio em um reômetro Anton Paar Physica MCR301 (50N), sob atmosfera de ar. A geometria de ensaio foi a de placas paralelas, com diâmetro de 25mm e distância entre placas (*gap*) de 1mm, sendo o intervalo de taxa de cisalhamento avaliado entre $0,01s^{-1}$ e $10s^{-1}$ em regime permanente na temperatura de $200^{\circ}C$. No modo oscilatório o comportamento viscoelástico dos polímeros e das blendas foi avaliado em frequências de oscilação de 0,1rad/s a 600rad/s, com amplitude de deformação aplicada dentro do regime viscoelástico linear, em temperatura de $200^{\circ}C$.

Tabela 1. Composições das blendas de biopolietilenos.

Composição	BioPEAD(%)	BioPELBD(%)
BioPEAD(100)	100	0
BioPEAD/BioPELBD (90/10)	90	10
BioPEAD/BioPELBD (80/20)	80	20
BioPEAD/BioPELBD (70/30)	70	30
BioPEAD/BioPELBD (60/40)	60	40
BioPEAD/BioPELBD (50/50)	50	50
BioPEAD/BioPELBD (40/60)	40	60
BioPEAD/BioPELBD (30/70)	30	70
BioPEAD/BioPELBD (20/80)	20	80
BioPEAD/BioPELBD (10/90)	10	90
BioPELBD (100)	0	100

Comportamento Reológico em Reômetro Capilar (Altas Taxas de Deformação)

Os ensaios de reometria capilar, utilizados para avaliar o comportamento reológico dos polímeros BioPEAD e BioPELBD e das blendas BioPEAD/BioPELBD em altas taxas de deformação (cisalhamento), foram realizados em Reômetro Capilar SR20 da CEAST, em temperatura de $200^{\circ}C$, capilar ($L/D=30$) com diâmetro de 1mm e comprimento de 30mm, e com taxa de deformação variando de $100s^{-1}$ a $3.000s^{-1}$ Para cada taxa de deformação, os extrudados foram resfriados rapidamente em água gelada e posteriormente analisados por microscopia óptica para avaliar os efeitos das composições no inchamento do extrudado e instabilidade do fluxo das blendas.

Microscopia Ótica (MO)

As análises por MO dos polímeros BioPEAD e BioPELBD e das blendas BioPEAD/BioPELBD, em cada taxa de deformação utilizada no reômetro capilar, foram realizadas com o auxílio de um microscópio ótico OPTON/3584. Por meio do programa ISCapture, foram realizadas as medidas dos diâmetros dos extrudados, e o inchamento do extrudado (B) foi calculado a partir da razão entre o diâmetro do extrudado (D_{ext}) com o diâmetro do capilar (D_{cap}), de acordo com a equação 1. A medida do diâmetro do extrudado dos polímeros BioPEAD e BioPELBD e das blendas BioPEAD/BioPELBD, foi realizada na saída do capilar após a solidificação rápida do extrudado em água gelada, portanto, nas medidas não foram considerados os efeitos

da contração provenientes da cristalização dos polímeros e da gravidade.

$$B = \frac{D_{ext}}{D_{cap}} \tag{1}$$

onde:

- B= inchamento do extrudado;
- D_{ext} = diâmetro do extrudado;
- D_{cap} = diâmetro do capilar

Resultados e Discussão

Comportamento Reológico em Regime Oscilatório

O coeficiente de amortecimento ($tg\delta$) é obtido pela razão entre o módulo de perda (G'') que representa o comportamento viscoso e o módulo de armazenamento (G') que representa o comportamento elástico. Valores elevados de $tg\delta$ em baixas frequências ($<1rad/s$) indicam que o material polimérico tem comportamento predominantemente viscoso, enquanto que se os valores de $tg\delta$ tenderem a zero, o comportamento é predominante elástico [5]. A Figura 2 apresenta as curvas de $tg\delta$ em função da frequência, para os biopolímeros (BioPEAD e BioPELBD) e suas blendas. Observa-se que o BioPELBD apresenta um menor valor de $tg\delta$ e uma menor dependência da frequência (em baixas frequências), indicando comportamento predominante elástico. A independência do $tg\delta$ da frequência também tem sido atribuída ao elevado grau de emaranhamento das cadeias do polímero [5]. É importante destacar que o BioPELBD apresenta ramificações do tipo buteno-1 e tem menor índice de fluidez e por conseguinte maior peso molecular do que o BioPEAD, portanto, implicando em maior grau de emaranhados moleculares. Para as blendas, observa-se que o aumento do teor de BioPELBD diminui os valores de $tg\delta$ em baixas frequências, indicando um aumento na elasticidade das mesmas, o que pode ser atribuído a presença do BioPELBD. Percebe-se que para o BioPEAD os valores de $tg\delta$ são elevados, indicando que o seu comportamento é predominantemente viscoso.

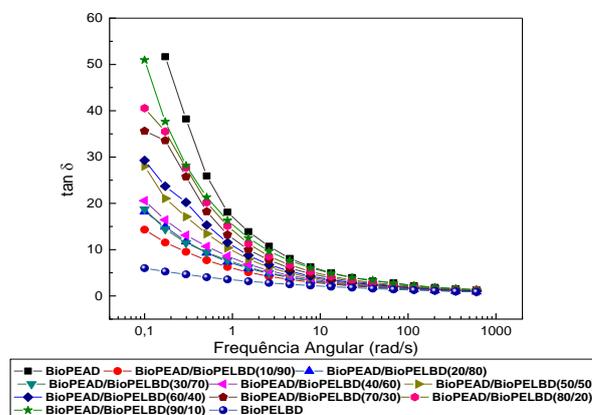


Figura 2. Coeficiente de amortecimento ($tg\delta$) em função da frequência angular para os polietilenos BioPEAD e BioPELBD e suas blendas.

Comportamento Reológico em Regime Permanente

A Figura 3 ilustra as curvas de fluxo dos polímeros BioPEAD e BioPELBD e das blendas. Os resultados demonstraram que os polímeros BioPEAD e BioPELBD e as blendas se comportam como um fluido não newtoniano com característica pseudoplástica, ou seja, a tensão aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento de forma não-linear.

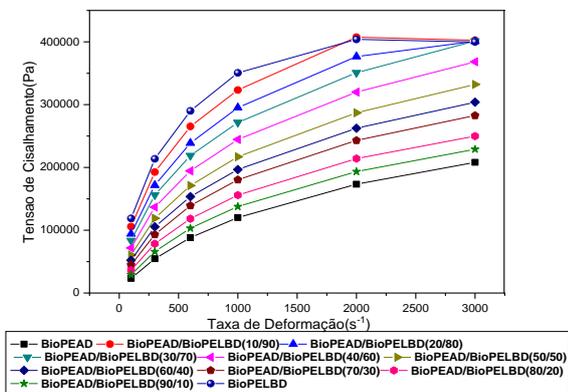


Figura 3. Curvas de fluxo obtidas por reometria capilar para os polietilenos BioPEAD e BioPELBD e suas blendas.

Tabela 2. Valores do índice da potência (n), índice de consistência (K) e do coeficiente de correlação (R²) obtidos para os polímeros BioPEAD e BioPELBD e para as blendas.

Composição	n	K (Pa.s ⁿ)	R ²
BioPEAD 100	0,642	1328	0,9880
BioPEAD/BioPELBD(90/10)	0,603	1994	0,9534
BioPEAD/BioPELBD(80/20)	0,565	2940	0,9757
BioPEAD/BioPELBD(70/30)	0,540	4060	0,9858
BioPEAD/BioPELBD(60/40)	0,516	5257	0,9872
BioPEAD/BioPELBD(50/50)	0,497	6623	0,9867
BioPEAD/BioPELBD(40/60)	0,478	8543	0,9858
BioPEAD/BioPELBD(30/70)	0,459	10853	0,9854
BioPEAD/BioPELBD(20/80)	0,431	14095	0,9857
BioPEAD/BioPELBD(10/90)	0,404	18273	0,9862
BioPELBD 100	0,364	25166	0,9227

Para analisar quantitativamente o grau de pseudoplasticidade dos polietilenos BioPEAD e BioPELBD e das blendas, foi utilizado o modelo da potência de Ostwald-de Waele [7], para ajustar os dados obtidos na Figura 3. Nos dados obtidos por meio do ajuste (Tabela 2), observa-se que o índice de consistência (K) aumenta com a adição de BioPELBD nas blendas, indicando aumento na consistência, ou seja, indiretamente na viscosidade. Com o aumento da concentração de BioPELBD ocorreu uma redução do índice da potência (n), ou seja, um aumento do grau de pseudoplasticidade das blendas, isto significa que o BioPELBD aumentou a dependência da viscosidade com a taxa de cisalhamento, o que é importante para o processamento destes materiais em altas taxas de cisalhamento, geralmente utilizadas em equipamentos como extrusoras e injetoras. Os valores obtidos para “n” são semelhantes aqueles relatados por Vlachopoulos & Strutt [8] para o PE que é entre 0,3 <n > 0,6. O coeficiente

de correlação (R²) apresentou valores relativamente da unidade, demonstrando bom ajuste dos dados experimentais com o modelo da lei da potência.

Para investigar o comportamento da viscosidade em função de amplo espectro da taxa de deformação, foram construídas as curvas de viscosidade com os dados obtidos nos reômetros rotacional e capilar, conforme ilustrado na Figura 4. Observa-se nesta figura que houve boa concordância entre os dados medidos nos dois equipamentos (em baixas e altas taxas de deformação), e que as blendas apresentam comportamento intermediário ao dos polímeros puros.

Na região de platô (em baixas taxas de deformação, entre 0,01s⁻¹ e 10s⁻¹), o BioPEAD apresenta o comportamento de um fluido Newtoniano, onde a viscosidade independe da taxa de deformação, enquanto o BioPELBD apresenta um comportamento pseudoplástico (decréscimo da viscosidade com o aumento da taxa de deformação). A viscosidade das blendas aumenta com o teor de BioPELBD, pois o ele é mais viscoso que o BioPEAD, devido ao seu índice de fluidez ser cerca de 10 vezes menor. Em taxas de deformação acima de 100s⁻¹, a viscosidade das blendas tende a se aproximar, o que pode estar relacionado à maior orientação das cadeias poliméricas no sentido do fluxo e/ou ao aumento da temperatura devido à dissipação viscosa gerada pelo atrito entre os polímeros e a parede do capilar.

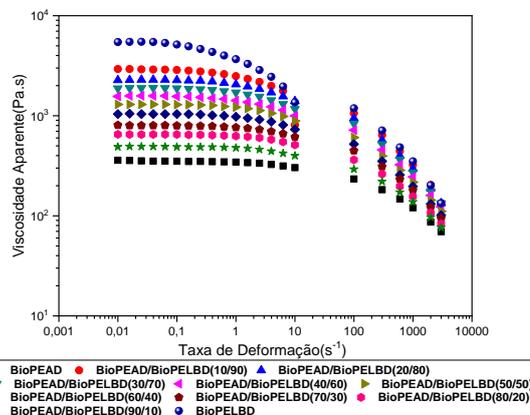


Figura 4. Curvas de viscosidade obtidas por reometria rotacional placa-placa e reometria capilar para os polietilenos BioPEAD e BioPELBD e suas blendas.

Avaliação do inchamento do extrudado e instabilidades de fluxo

Por meio do microscópio óptico (MO), foram realizadas medidas da secção transversal (diâmetro) e também análises da superfície dos extrudados obtidos por reometria capilar. Os valores do inchamento do extrudado (B) obtidos para as taxas de deformação estudadas encontram-se na Tabela 3. Foram avaliados o inchamento do extrudado e as instabilidades de fluxo dos polietilenos BioPEAD e BioELBD e das blendas na saída do capilar. O inchamento do extrudado (B) e as instabilidades de fluxo podem ocorrer na extrusão de polímeros fundidos na saída da matriz comprometendo a qualidade do produto final, sendo importante a sua

análise. Estes fenômenos são resultantes do comportamento elástico do polímero, condições de processamento e geometria de fluxo [9].

Tabela 3. Valores para o inchamento do extrudado (B) em centímetros (cm), para os polietilenos BioPEAD e BioPELBD e das blendas em várias taxas de deformação.

Composições / Taxa(s ⁻¹)	INCHAMENTO DO EXTRUDADO (B)					
	100	300	600	1000	2000	3000
BioPEAD 100	0,51	0,87	1,001	1,182	1,628	1,674
BioPEAD/BioPELBD(90/10)	0,598	0,893	1,14	1,265	1,538	1,883
BioPEAD/BioPELBD(80/20)	0,746	0,911	1,221	1,359	1,778	1,901
BioPEAD/BioPELBD(70/30)	0,615	1,048	1,336	1,557	1,624	1,83
BioPEAD/BioPELBD(60/40)	0,662	1,121	1,43	1,517	1,754	1,853
BioPEAD/BioPELBD(50/50)	0,773	1,268	1,458	1,668	1,833	1,796*
BioPEAD/BioPELBD(40/60)	1,002	1,46	1,646	1,605	1,656*	1,770*
BioPEAD/BioPELBD(30/70)	1,006	1,325	1,481	1,568*	1,628*	1,657*
BioPEAD/BioPELBD(20/80)	1,007	1,292	1,501	1,392*	1,474*	1,661*
BioPEAD/BioPELBD(10/90)	1,038	1,367	1,380*	1,416*	1,512*	1,745*
BioPELBD 100	1,295	1,435	1,500*	1,502*	1,736*	1,804*

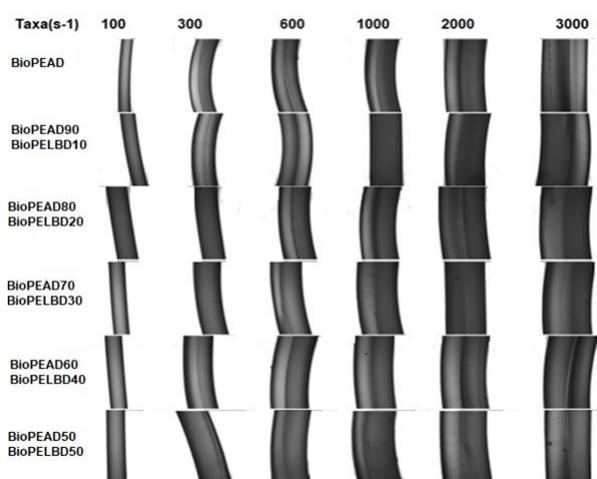


Figura 5. Microscopias ópticas (M.O) dos extrudados dos polietilenos BioPEAD e BioPELBD e suas blendas, com ampliação de 4X.

Pode-se verificar, a partir dos valores da Tabela 3 e as imagens de MO nas Figuras 5 e 6, que o BioPELBD apresenta maior inchamento do extrudado do que o BioPEAD em todas as taxas de deformação medidas, isto ocorre devido ao BioPELBD ser mais elástico, conforme observado nas curvas de tgδ em função da frequência angular (Figura 2). Além disso, o BioPELBD possui menor índice de fluidez, por conseguinte maior peso molecular e viscosidade e, conseqüentemente, maior grau de emaranhados moleculares. Para as blendas de BioPEAD e BioPELBD, em baixas taxas de deformação, quando a concentração de BioPEAD aumenta, o inchamento do extrudado (B) tende a diminuir, ocorrendo uma contração a partir da blenda 50/50, que pode estar associada à cristalização dos polietilenos e do efeito gravitacional na saída do capilar. Em altas taxas de deformação, as blendas ricas em BioPEAD incham mais que as blendas ricas em BioPELBD, o que pode estar relacionado a ausência de instabilidades de fluxo[10]. Já para as blendas com maiores concentrações de BioPELBD, observa-se por meio das imagens de MO, a presença de instabilidades de fluxo (em destaque), do tipo pele de cação (*sharkskin*), gruda-desliza (*stick-slip*) e fratura grosseira do fundido (*Gross Melt Fracture-GMF*) que se apresentam como

concorrentes do inchamento, provavelmente pelo fato de que a dissipação de energia que ocorre por meio da fratura do fundido, diminui o potencial de inchamento para as blendas.

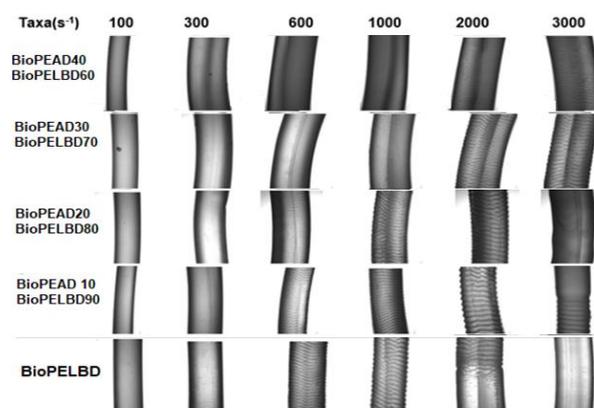


Figura 6. Microscopias ópticas (M.O) dos extrudados dos polietilenos BioPEAD e BioPELBD e suas blendas, com ampliação de 4X.

Na Figura 7, estão apresentados os comportamentos do inchamento do extrudado (B) em função da taxa de deformação.

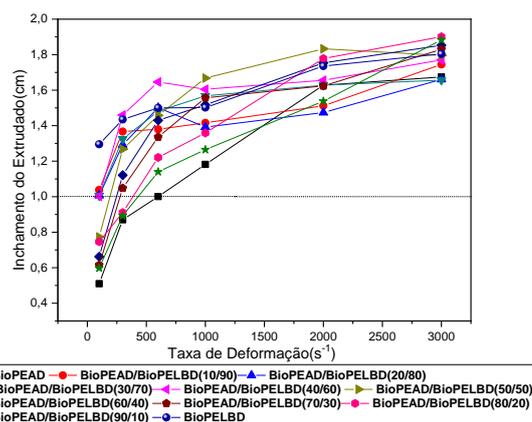


Figura 7. Inchamento do extrudado versus Taxa de deformação dos polietilenos BioPEAD e BioPELBD e suas blendas.

Pode-se observar na Figura 7, que o inchamento do extrudado aumenta com o aumento da taxa de deformação e com a concentração de BioPELBD, isso pode estar relacionado com o fato de que com o aumento da taxa de deformação, o tempo de residência do fundido dentro da matriz diminui, aumentando a sua recuperação elástica fora da matriz e conseqüentemente o inchamento do extrudado, resultados parecidos foram relatados por Liang [11] para o sistema POM/EVA/PEAD.

Conclusões

A partir dos resultados obtidos quanto ao comportamento reológico, verificou-se que a viscosidade aparente obedeceu à regra da aditividade e a viscosidade e o grau de pseudoplasticidade variaram proporcionalmente com a concentração. O inchamento do extrudado aumentou com o aumento da taxa de deformação, no entanto não foi possível correlacionar a

concentração de BioPELBD com o inchamento do extrudado. Por microscopia óptica (MO), foi possível observar a presença de instabilidades de fluxo do tipo pele de cação (*sharkskin*), gruda-desliza (*stick-slip*) e fratura grosseira do fundido (*Gross Melt Fracture-GMF*), essas instabilidades foram observadas para blendas com elevados teores de BioPELBD e para o polímero puro BioPELBD.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da CAPES e CNPq e a empresa BRASKEM pelo fornecimento dos polímeros.

Referências

- [1] Siriprumpoonthum, M., Nobukawa, S., Satoh, Y., Sasaki, H., Yamaguchi, M. Effect of thermal modification on rheological properties of polyethylene blends. *Journal of Rheology*, 58, 449-65, 2014.
- [2] Passador, F. R., Ruvolo-Filho, A. C., Pessan, L. A. Effects of different compatibilizers on the rheological, thermomechanical, and morphological properties of HDPE/LLDPE blend-based nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 130, 1726-35, 2013.
- [3] Liu, C., Wang, J., He, J. Rheological and thermal properties of m-LLDPE blends with m-HDPE and LDPE. *Polymer*, 43, 3811-8, 2002.
- [4] Pérez, R., Rojo, E., Fernández, M., Leal, V., Lafuente, P., Santamaría, A. Basic and applied rheology of m-LLDPE/LDPE blends: Miscibility and processing features. *Polymer*, 46, 8045-53, 2005.
- [5] Chen, Y., Zou, H., Liang, M., Liu, P. Rheological, thermal, and morphological properties of low-density polyethylene/ultra-high-molecular-weight polyethylene and linear low-density polyethylene/ultra-high-molecular-weight polyethylene blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 129, 945-53, 2013.
- [6] Brito, G. F., Agrawal, P., Araújo, E. M., de Mélo, T. J. Polylactide/biopolyethylene bioblends. *Polímeros*, 22, 427-9, 2012.
- [7] Dealy, J., Larson, R. *Structure and Rheology of Molten Polymers: From Structure to Flow Behavior and Back Again* (Hanser, Munich, 2006). Google Scholar,
- [8] Vlachopoulos, J., Strutt, D. The role of rheology in polymer extrusion. *New Technology for Extrusion Conference Milan, Italy Nov2003*. p. 20-1.
- [9] Ariffin, A., Ariff, Z., Jikan, S. Evaluation on extrudate swell and melt fracture of polypropylene/kaolin composites at high shear stress. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30, 609-19, 2011.
- [10] El Kissi, N., Piau, J. Adhesion of linear low density polyethylene for flow regimes with sharkskin. *Journal of Rheology*, 38, 1447-63, 1994.
- [11] Liang, J.-Z. Melt die-swell behavior of polyoxymethylene blended with ethylene-vinyl acetate copolymer and high-density polyethylene. *Polymer Testing*, 68, 213-8, 2018.