

1

INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos de matriz polimérica surgiram, na sua vertente estrutural, em meados do século XX. O desafio permanente que estes materiais colocam à imaginação, acarretou o incentivo à pesquisa, que desenvolveu aplicações cada vez mais exigentes. Assim, como o desempenho já foi testado e aprovado (sendo mesmo superior ao de estruturas metálicas convencionais), e as normas industriais relativas a estes materiais estão cada vez mais estabelecidas, aplicações usando materiais compósitos de matriz polimérica tendem a aumentar cada vez mais. As elevadas resistência e rigidez específicas continuam a ser a combinação que lança os materiais compósitos para novas áreas. No entanto, a grande capacidade de amortecimento e o baixo coeficiente de expansão térmica são características que podem ser adaptadas para aplicações específicas. Os compósitos avançados reduzem os problemas de fadiga e dão uma maior flexibilidade de concepção e fabricação, o que pode reduzir significativamente o número de peças necessárias. Algumas vantagens dos materiais compósitos são a resistência a temperaturas extremas, corrosão e desgaste, especialmente em aplicações industriais. Estas características podem conduzir a custos mais baixos de ciclo de vida do produto. Apesar de não serem classificados de compósitos avançados, os materiais compósitos surgem com um potencial de crescimento muito elevado nos próximos anos.

Os avanços tecnológicos dos últimos anos permitiram diminuir custos de matérias-primas e de processamento, sendo a garantia de poder-se usufruir mais plenamente das vantagens dos materiais compósitos no século XXI. Prevê-se que estes materiais, para além de continuarem a ter uma aplicação privilegiada em mercados avançados (militar, espacial e aeronáutico), substituam também, de forma crescente, os materiais tradicionais em aplicações mais comuns de engenharia (como a construção civil - pontes, reforço e reabilitação de pontes e os transportes - automóvel todo em material compósito). Finalmente, espera-se que contribuam para resolver problemas específicos em algumas novas e importantes aplicações

de mercado, como o na elaboração de próteses. Em função de recentes desenvolvimentos tecnológicos, será interessante seguir, nos próximos anos, o crescimento das aplicações dos compósitos têxteis estruturais (utilizando pré-formas), das peças processadas por injeção de termoendurecíveis (RTM) e dos compósitos de matriz termoplástica reforçada com fibras longas. O uso de fibras longas e a maior facilidade de reciclagem contribuíram decisivamente para o crescimento sustentado dos compósitos de matriz termoplástica nos mercados de grande consumo. Será especialmente interessante verificar se as expectativas que atualmente existem sobre a utilização em grande escala de materiais termoplásticos de origem natural, aliados as variedades reforçadas, bem como de fibras naturais serão ou não validadas pelo mercado. Ainda no domínio das matrizes termoplásticas espera-se o aparecimento e uma grande difusão em diversos mercados, particularmente na indústria automobilística, aeronáutica e de emprego de nanocompósitos. A obtenção de estruturas inteligentes será um dos aspectos onde os materiais compósitos vão se impor neste milênio.

Para terminar, deve ser realçado o desafio permanente que estes materiais colocam à imaginação e, conseqüentemente, à investigação e desenvolvimento, o que os posiciona como materiais de elevado potencial de aplicação. Neste trabalho serão estudados os materiais compósitos de matriz polimérica, e reforçados com fibras de vidro curtas.

A caracterização reológica de polímeros fundidos e soluções em escoamentos elongacionais ainda é um desafio. Em escoamentos deste tipo, onde há a presença de extensão, como nos processos industriais de extrusão e de moldagem por injeção, as medidas das propriedades cisalhantes não são suficientes para descrever o comportamento do escoamento, fazendo-se necessária a obtenção de outras propriedades do material como a viscosidade elongacional. A viscosidade cisalhante dos polímeros apresenta um comportamento pseudoplástico, ou seja, a viscosidade cisalhante decai com o aumento da taxa de cisalhamento. Este comportamento é característico de diversos polímeros fundidos. Além disso, a viscosidade elongacional aparente é ordens de grandeza superior à viscosidade cisalhante. Um parâmetro utilizado para avaliar essa relação entre a viscosidade elongacional aparente e a viscosidade cisalhante é a razão de Trouton, definida como a razão entre a viscosidade elongacional aparente e a viscosidade cisalhante, ou seja, $Tr = \frac{\eta_E}{\eta_S}$.

A viscosidade elongacional aparente (η_E) é usualmente medida em escoamentos elongacionais uniaxiais, onde uma amostra de fluido é esticado mantendo-se constante a taxa de deformação elongacional ou a tensão

elongacional da amostra de fluido. Um método comumente utilizado para determinar a viscosidade elongacional é através do reômetro capilar, onde o fluido escoar a partir de um barril para um capilar. No ponto de entrada do fluido no capilar há um aumento significativo da velocidade e do alongamento do fluido o que contribui para uma queda de pressão extra na entrada do capilar. Com essa queda de pressão na entrada é possível estimar a viscosidade elongacional. É importante ressaltar a existência de um componente cisalhante no escoamento, adicionado à extensão. Esta técnica do cálculo da viscosidade elongacional a partir do escoamento na entrada do capilar fornece um valor médio de viscosidade elongacional supondo um regime permanente [12].

Apesar da importância dos parâmetros que caracterizam o fluido em escoamentos elongacionais, as técnicas de medidas elongacionais não são tão desenvolvidas quanto as técnicas para a medição das propriedades cisalhantes. Isto ocorre principalmente devido à grande dificuldade em obter um escoamento puramente elongacional em regime permanente, [5]. Técnicas variadas têm sido desenvolvidas para obter uma viscosidade elongacional aparente. Um dos métodos mais utilizados é o que adota o uso de escoamento na entrada de capilares. A vantagem deste método está na facilidade de obter medidas de queda de pressão ao longo do escoamento. Neste método, a viscosidade elongacional é obtida através de medidas de queda de pressão e vazão na entrada do capilar. Cogswell [4] e Binding [1] foram os primeiros a desenvolver esta técnica e desde então muitos autores vêm discutindo e aprimorando esses métodos. No entanto, esses métodos não avaliam a razão de Trouton em baixas taxas de deformação elongacional em consequência da cinemática do escoamento.

Escoamentos em contração abrupta têm sido amplamente analisados experimental e numericamente através de simulações empregando o método dos elementos finitos. [17] apresentou resultados destas análises em que a viscosidade da entrada (definida pela queda de pressão na entrada dividida pela taxa de deformação cisalhante) é altamente dependente da geometria utilizada para a avaliação da viscosidade elongacional permanente, da razão L/D e do modelo utilizado para descrever a viscosidade. Assim é proposta, e testada com sucesso, uma "correção efetiva do comprimento de entrada" na avaliação da viscosidade elongacional a baixas taxas de deformação. Essa proposta de correção do comprimento de entrada é uma forma de aprimorar a avaliação da viscosidade elongacional a partir de dados experimentais obtidos em reômetros capilares. [7] apresentou uma generalização do método de medição da viscosidade elongacional utilizando

capilares semi-hiperbólicos. Os autores confirmam que um escoamento puramente elongacional é produzido com esta geometria supondo a condição de deslizamento na parede. Resultados numéricos obtidos foram comparados com os resultados previstos pela equação constitutiva e os resultados encontrados estavam de acordo para uma ampla faixa de taxas de deformação elongacionais. [6] utilizou capilares semi-hiperbólicos convergentes com diferentes razões entre os raios de entrada e saída para analisar o comportamento da viscosidade elongacional dos polímeros. Assim, o aumento da razão entre os raios de entrada e saída do fluido implica um aumento da viscosidade elongacional, e este efeito decresce suavemente com o aumento da taxa de deformação elongacional.

As propriedades cisalhantes e elongacionais do polipropileno reforçado com fibras de vidro curtas utilizando reômetros comerciais foram estudadas por [11]. A viscosidade complexa e em regime permanente dos compósitos encontradas são similares aos valores obtidos para a matriz do compósito, porém a regra de Cox-Merz, usada para obter uma relação entre as propriedades viscoelásticas lineares e a viscosidade [3] não foi verificada em altas taxas de deformação. A elasticidade do compósito encontrada é igual à da matriz do polipropileno. A viscosidade elongacional aparente foi obtida a partir da queda de pressão na entrada do capilar convergente planar, utilizando as análises propostas por Cogswell e Binding. A viscosidade elongacional do polipropileno encontrada é muito maior do que a viscosidade cisalhante obtida a baixas taxas de deformação, com uma razão de Trouton de aproximadamente 40, que decai rapidamente com o aumento da taxa de deformação elongacional. Esses valores de viscosidade elongacional aparente dos compósitos são muito semelhantes aos valores obtidos para a matriz, sendo este valor de viscosidade elongacional 35 e 5% maior para o polímero reforçado com 30 e 10% de fibra de vidros curtas respectivamente. Além disso, observa-se que contribuição elongacional da queda de pressão é superior à contribuição cisalhante da queda pressão. No entanto, não se deve desprezar essa parcela.

Em [12] é abordado um novo método simples, que combina valores experimentais da queda de pressão medidos em capilares semi-hiperbólicos, com simulações numéricas de escoamentos viscoelásticos, com o objetivo de avaliar os resultados para a viscosidade elongacional transiente. Um problema na utilização de capilares convergentes está associado ao histórico de deformação que cada partícula de fluido sofre quando escoar através de um capilar. O campo de velocidade em um experimento é bi-dimensional e cada componente da velocidade depende de mais de

uma variável espacial. Mesmo que as contribuições cisalhantes sejam levadas em conta, os elementos de fluido não estarão submetidos a taxas de deformação elongacional constantes na maioria dos escoamentos em geometrias convergentes. A única geometria em que é possível impor taxa de deformação elongacional constante no elemento de fluido é a geometria semi-hiperbólica. Utiliza-se o software Polyflow para estimar a viscosidade elongacional transiente uniaxial de LDPE (*Lower Density Polyethylene*) fundido. Os resultados da viscosidade elongacional transiente obtidos numericamente foram comparados com os resultados experimentais obtidos nos sofisticados reômetros RME (Rheometrics Meisser Elongational) e SER (Sentmanat Elongational Rheometer). Algumas desvantagens são evidenciadas quanto à utilização da condição de deslizamento na parede.

1.1

Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades cisalhantes e elongacionais do polipropileno reforçado com fibras de vidro a altas taxas de deformação elongacional. Além disso, simulações numéricas foram realizadas utilizando as equações constitutivas de Maxwell, Oldroyd-B e Phan Thien-Tanner para modelar o polipropileno puro. A caracterização reológica foi realizada utilizando o reômetro capilar ACER 2000. A partir dos dados obtidos no reômetro foram avaliados os parâmetros reológicos das equações constitutivas a serem utilizadas na simulação numérica, escolhidas para modelar o comportamento viscoelástico dos materiais. A simulação numérica foi realizada utilizando o programa comercial *Polyflow*. Os resultados numéricos foram comparados com os dados experimentais obtidos para avaliar a capacidade do modelo de descrever o comportamento da matriz.

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas distintas. A primeira etapa trata da caracterização reológica dos materiais quando são obtidas as viscosidades cisalhantes e elongacional dos materiais analisados. Na segunda etapa foi realizada a simulação numérica de um processo de extrusão simples, de um dos materiais caracterizados na etapa 1.

Inicialmente fez-se a caracterização reológica de um polímero fundido (polipropileno, de peso molecular entre 400000 e 500000 g/mol), que foi utilizado como matriz para os compósitos com fibras. Em seguida, foram feitas as caracterizações de dois diferentes compósitos, 10% e 30% (matriz + fibras de vidro).

Na segunda etapa realizou-se uma simulação numérica de um processo de extrusão simples, similar a uma contração axi-simétrica. Esta simulação será realizada com o programa comercial *Polyflow*, utilizando modelos constitutivos diferenciais já implementados no programa. Os parâmetros reológicos da simulação serão baseados nos dados obtidos experimentalmente na caracterização reológica. Os resultados deverão ser comparados com os experimentos realizados no reômetro capilar. Dessa forma, será avaliada a adequabilidade das equações constitutivas para descrever os materiais analisados. Apenas a matriz, ou seja o polipropileno puro será utilizado nas simulações, pois os modelos viscoelásticos existentes não preveem a presença das fibras de vidro.