

Análise reológica de misturas de PSAI com resíduos de espuma rígida de poliuretano

Ricardo Pedro Bom

Dr., Professor do Departamento de Eng. Mecânica, CCT/UDESC
Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais

Joinville, SC, Brasil
dem2rpb@joinville.udesc.br

Resumo

Neste trabalho foi determinada a viscosidade do poliestireno alto impacto (PSAI) puro e de misturas com resíduos de espuma rígida de poliuretano (PUR), por meio de ensaios de Índice de Fluides (IF), para taxas de cisalhamento compreendidas entre 3 e 20 s⁻¹ a temperatura de 200°C. Utilizando equações que descrevem o fluxo em canais circulares e a partir das medidas de fluxo de massa (IF), calculou-se a taxa de cisalhamento, a tensão de cisalhamento e a viscosidade para o PSAI puro a 200°C com cargas de 2,12; 3,77 e 4,97 Kg. Para a transformação de IF em vazão volumétrica foi determinada a massa específica do PSAI puro a 23°C. A curva reológica do PSAI 495 F a 200°C com IF de 8,9 (g/10min) obtida por intermédio da equação Cross-WLF foi utilizada como padrão e junto com os resultados calculados a partir dos experimentos determinando-se o índice de correção de Bagley (e). O índice de escoamento (n) para realizar a correção de Rabinovitsch foi determinado a partir da curva tensão de cisalhamento na parede versus vazão. Aplicando os valores médios dos índices de correções nas equações, foi possível calcular a tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e a viscosidade. Os resultados dos cálculos, com e sem a aplicação dos parâmetros de correção (e, n), foram representados graficamente juntos com a curva reológica padrão do PSAI obtendo-se valores coerentes. O mesmo procedimento foi aplicado para o PSAI com 5, 10, 15, 22, 30 e 40% de PUR com uma carga de 4,97 Kg e utilizando os mesmos valores de (e, n) foi possível descrever a variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento para as diferentes composições.

Palavras-chave: índice de fluides, fluxo de massa, poliestireno, poliuretano.

Abstract

In this study the viscosity of pure high impact polystyrene (HIPS) and mixtures with rigid foam residues of polyurethane (PUR) was determined, through Melt Flow Index experiments (MFI), for shear rates between 3 and 20 s⁻¹ at a temperature of 200°C. Using equations that describe the flow in circular channels, and mass flow measures (MFI), the shear rate, the shear stress and the viscosity were calculated for pure HIPS at 200°C, with loads of 2,12; 3,77 and 4,97 Kg. The specific mass of pure HIPS at 23°C was determined for MFI's transformation in volumetric flow. The rheologic curve of HIPS 495 F at 200°C with MFI of 8,9 (g/10min), obtained through the Cross-WLF equation, was used as standard, and with the calculated results from the experiments, the correction index of Bagley (e) was determined. The flow index (n) used to make the Rabinovitsch's correction was determined from shear stress curve in the wall versus flow. Applying the average values of the correction indexes in the equations, it was possible to calculate the shear stress, the shear rate and the viscosity. The results of calculations, with and without the correction parameters (e, n), were represented graphically together with the standard rheologic HIPS curve, obtaining coherent values. Applying the same above procedure for HIPS with 5, 10, 15, 22, 30 and 40% of PUR with a load of 4,97 Kg and considering the same correction index of Bagley and of flow index, it was possible to describe the variation of the viscosity related to the shear rate for different compositions.

Key words: melt flow index, mass flow, polystyrene, polyurethane.

1. Introdução

A técnica de determinação do Índice de Fluidez (IF) é largamente utilizada na indústria de transformação com o objetivo de realizar o controle de qualidade da matéria prima recebida ou produzida (Castro *et al.*, 2001; G.F.P., 1980a; Navarro, 1993). Normalmente um produto é homologado na indústria a partir de normas internas, sendo que tais procedimentos incluem o nome do fabricante, o nome e o tipo do material, e a variação máxima do IF aceita para os diferentes lotes. A literatura correlaciona ainda o IF com a variação da massa molar para polímeros lineares e ramificados (G.F.P., 1980a). Alguns pesquisadores procuraram validar os resultados obtidos do IF por meio de equações que descrevem o fluxo em canais circulares para se obter a viscosidade do polímero (Agassant *et al.*, 1996; Castro *et al.*, 2001; Deterre e Froyer, 1997; G.F.P., 1980b; Navarro, 1993). A questão da relação entre comprimento e diâmetro do canal foi largamente estudada por Bagley (Agassant *et al.*, 1996; G.F.P., 1980b). Esta relação influencia diretamente nos resultados de IF, pois existem os efeitos produzidos pelas linhas de fluxo na entrada do canal e a expansão na saída (Agassant *et al.*, 1996; G.F.P., 1980b). Portanto, a partir de medidas de IF pode-se determinar os parâmetros reológicos de um polímero para uma dada condição (Agassant *et al.*, 1996; Castro *et al.*, 2001; Deterre e Froyer, 1997; G. F. P., 1980b), de perda de carga e a temperatura constante. Deve-se considerar que as medidas de IF são normalizadas e apresentam taxas de cisalhamento muito baixas se comparadas com os valores utilizados no processo de moldagem por injeção (Agassant *et al.*, 1996). É conhecido que a viscosidade de um polímero depende fortemente de sua configuração, ou seja, da arquitetura molecular, da massa molecular e do índice de dispersão das macromoléculas (G.F.P., 1980a), além de suas propriedades viscoelásticas. O IF como descrito na literatura é sensível a diversos parâmetros correlacionados ao polímero, sendo assim, a técnica pode ser utilizada para determinar uma região do domínio reológico de um dado polímero.

Um dos objetivos deste trabalho é realizar misturas de PSAI com o máximo de resíduos de PUR, determinar o efeito do aumento da concentração de PUR sobre o índice de fluidez e a partir destes valores calcular a viscosidade das misturas. O resíduo de PUR utilizado é proveniente da indústria Multibrás S.A. Eletrodomésticos, a qual utiliza espuma rígida de PUR como isolante térmico e componente estrutural de gabinetes e portas isoladas que compõem refrigeradores e frízeres. Como a espuma rígida de PUR é um termorrígido, um dos processos de reciclagem seria a incorporação do PUR como carga em polímeros termoplásticos. Seria interessante a partir desta incorporação se a mistura obtida pudesse ser aplicada em componentes dos produtos da linha branca.

2. Materiais e Métodos

O ensaio de IF foi realizado conforme norma ASTM D 1238-99 em um plastômetro Melt Flow CEAST 6841/48, temperatura de ensaio de 200°C e massas de 2,12; 3,77 e 4,97 Kg. Os materiais utilizados foram o Polystyrol 495 F, poliestireno de alto impacto (PSAI) da BASF e resíduos de espuma rígida de poliuretano, moídos e peneirados em malha 2 x 2 mm. Para carregar o PSAI com o resíduo de espuma rígida de PUR, as amostras foram preparadas em concentrações em massa e misturadas dentro de sacos plásticos. A mistura foi processada com uma extrusora monorosca e obteve-se o granulado. Em alguns casos foi necessário

adicionar em partes a espuma rígida e repassar o material na máquina extrusora. O granulado foi utilizado para os ensaios de IF. A massa específica do material foi determinada pelo processo de imersão e variação do volume, a temperatura de 23°C, onde foram utilizados corpos de prova obtidos pelo processo de injeção. Foi utilizada a curva reológica do PSAI com IF de 8,9 g/ 10min, obtidas a partir da equação de Cross-WLF, os parâmetros desta equação estão indicados mais adiante. Maiores detalhes sobre o método experimental podem ser obtidos na literatura (Luckmann, 2005).

2.1. Teoria

Na Figura 1 está representado o esquema de um reômetro capilar, os parâmetros construtivos de relevância são normalizados e estão indicados na figura.

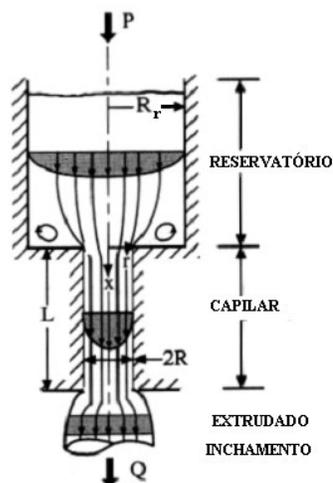


Figura 1: Reômetro capilar (Fonte: adaptado de Castro et al., 2001).

A tensão de cisalhamento na parede (τ_p) de um fluido escoando em um canal circular pode ser calculada a partir da Equação (1), para líquidos Newtonianos (Agassant *et al.*, 1996; Deterre e Froyer, 1997; G.F.P., 1980b). Para líquidos não Newtonianos deve-se levar em consideração a queda de pressão na entrada do capilar, o inchamento na saída do capilar e as linhas de fluxo.

$$\tau_p = \frac{\Delta P R}{2L} \quad (1)$$

Bagley foi o primeiro a demonstrar uma queda de pressão na entrada do capilar, fenômeno não observado em líquidos newtonianos. A queda da pressão na entrada foi interpretada como sendo devido a um prolongamento imaginário do comprimento do canal (Agassant *et al.*, 1996; G.F.P., 1980b), então, a tensão de cisalhamento é definida pela Equação (2), onde (τ) é a tensão de cisalhamento real, (ΔP) é a perda de carga no comprimento (L) do canal de raio (R) e o termo corretivo (e) pode variar entre 0 e 10 (G.F.P., 1980b). A relação $L/D \cong 4$ é pequena, segundo a literatura esta relação deveria estar entre 10 e 60 (G.F.P., 1980b) para atenuar os efeitos de queda de pressão na entrada do canal para obter linhas de fluxo totalmente desenvolvidas e minimizar o inchamento na saída (Agassant *et al.*, 1996).

$$\tau = \frac{\Delta P}{2 \left(\frac{L}{R} + e \right)} \quad (2)$$

Esta equação empírica foi contestada por outros pesquisadores, pois ela não considera os efeitos de saída, inchamento do material. Então, sugeriu-se que o termo corretivo fosse composto de uma parte dependente do canal e outra da deformação recuperada, ligando este último termo ao módulo de elasticidade em cisalhamento (G.F.P., 1980b). Entretanto, esta equação continua sendo usada em estudos realizados em simulação e em reometria capilar (Laun, 2003; Mitsoulis e Hatzikiriakos, 2003).

A taxa de cisalhamento foi definida para um líquido newtoniano escoando em um tubo circular (Agassant *et al.*, 1996; Castro *et al.*, 2001; Deterre e Froyer, 1997; G.F.P., 1980b), conforme Equação (3). Onde (Q) indica a vazão volumétrica, (R) o raio do tubo. Ao utilizar esta equação para líquidos não newtonianos deve-se tratá-la como taxa de cisalhamento aparente ($\dot{\gamma}_a$).

$$\dot{\gamma}_a = \frac{4 Q}{\pi R^3} \quad (3)$$

Para calcular a taxa de cisalhamento real ($\dot{\gamma}$) em função da tensão de cisalhamento para um polímero termoplástico com comportamento pseudoplástico, deve-se determinar a vazão dentro do um cilíndrico com escoamento isotérmico. A solução deste problema é dada pela Equação (4) que é conhecida pelo nome de equação de Rabinowitsch (Deterre *et al.*, 2003; G.F.P., 1980b; Manrich, 2005).

$$\dot{\gamma} = \frac{4 Q}{\pi R^3} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln \tau_p}{d \ln Q} \right) \quad (4)$$

Para se obter o valor de (n), conhecido por índice de pseudoplasticidade (Deterre *et al.*, 2003; Manrich, 2005) ou índice de escoamento (G.F.P., 1980b), é necessário realizar o máximo de ensaios para obter uma curva $\tau_p \times Q$ bem definida para se obter a derivada dos pontos ou o coeficiente angular médio da curva obtida. O valor de "n" é dado pela Equação (5) abaixo, esta equação nada mais é do que uma substituição de variável.

$$n = \frac{d \ln \tau_p}{d \ln Q} \quad (5)$$

A substituição da Equação (5) na Equação (4), resulta na Equação (6), que é a forma mais simples de representação da equação de Rabinovitsch. Para obter a taxa de cisalhamento real ($\dot{\gamma}$) é necessário utilizar o fator de correção de Rabinovitsch multiplicado pela taxa de cisalhamento aparente, conforme indicado na Equação (6).

$$\dot{\gamma} = \frac{3n+1}{4n} \dot{\gamma}_a \quad (6)$$

A viscosidade (η) para líquidos newtonianos é definida como o coeficiente angular da reta obtida entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Entretanto, para líquidos não newtonianos, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, devendo-se considerar então como viscosidade aparente (η_a) (Bom e Herrmann, 2000; Herrmann, 2001; Mitsoulis e Hatzikiriakos, 2003). A Equação (7) é que descreve a relação entre a tensão de cisalhamento na parede do capilar dividida pela taxa de cisalhamento aparente.

$$\eta_a = \frac{\tau_p}{\dot{\gamma}_a} \quad (7)$$

A relação entre a tensão de cisalhamento real (τ) e a taxa de cisalhamento real ($\dot{\gamma}$) permite calcular a viscosidade (η) para os líquidos não newtonianos, como indicado pela Equação (8).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (8)$$

Pode-se encontrar na literatura diversas equações que descrevem a variação da viscosidade (η) em função da variação da taxa de cisalhamento (real), as mais usuais são: a lei de potência, a lei de Cross, a lei de Carreau, o modelo de Yasuda, as equações exponenciais, o polinômio de Munstedt (Bom e Herrmann, 2000; Castro *et al.*, 2001; Deterre e Froyer, 1997; Herrmann, 2001; Laun, 2003; Luckmann, 2005; Mitsoulis e Hatzikiriakos, 2003), entre outras. O modelo de Cross-WLF, representado pela Equação (9), apresenta a vantagem de determinar a viscosidade limite (η_0) ou seja a viscosidade quando a taxa de cisalhamento tende a ser nula. Esta equação utiliza o índice (m) que varia de 0 a 1 e o tempo de relaxação do material (τ^*). Além do mais, para o polímero utilizado esta equação apresenta uma boa representação física da variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-m}} \quad (9)$$

A viscosidade dos polímeros fundidos muda com a variação da temperatura. A viscosidade limite é uma característica do polímero e é dada pela Equação (10) para cada temperatura. Assim, a variação da viscosidade limite (η_0) em função da temperatura absoluta pode ser descrita pela Equação (10) de William Landel e Ferry (WLF) (Herrmann, 2001; MPI, 2004). Onde D_1 , A_1 e A_2 são coeficientes de ajuste, T a temperatura em que se deseja o valor de η_0 e T^* é a temperatura de transição vítrea do polímero.

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[\frac{-A_1 (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad (10)$$

O Índice de Fluidez (IF) é uma medida de fluxo de massa que pode ser convertida em vazão volumétrica (Q) através de um coeficiente de conversão de unidades (K') e da massa específica do material (Navarro, 1993), conforme indicado pela Equação (11).

$$IF = K' \rho Q \quad (11)$$

3. Resultados e Discussão

Os corpos de prova (CP) com diferentes concentrações (C) de resíduos de espuma rígida de PUR foram injetados com parâmetros de injeção semelhantes, tais como, tempo de injeção igual a 5 s, pressão de injeção de 60 até 75 bar, tempo de recalque de 2 s, pressão de recalque de 15 bar e tempo de resfriamento de 35 s. Os resultados experimentais das massas específicas (ρ), determinadas para os diferentes corpos de prova, estão representados na Figura 2. Para o PSAI puro, a massa específica está coerente com o valor indicado pelo fabricante do polímero, demonstrando que o procedimento experimental realizado permite obter resultados comparáveis. O mesmo valor pode ser obtido pelo prolongamento da reta média, para concentração nula conforme indicado na Figura 2. À medida que a concentração de espuma rígida aumenta, a massa específica aumenta. Uma aproximação linear foi realizada para descrever este comportamento, as barras de erro representam o desvio padrão das medidas. Dispersões maiores podem ter origem na repetibilidade do processo de moldagem por injeção ou em flutuações de concentração devido a problemas locais de homogeneização.

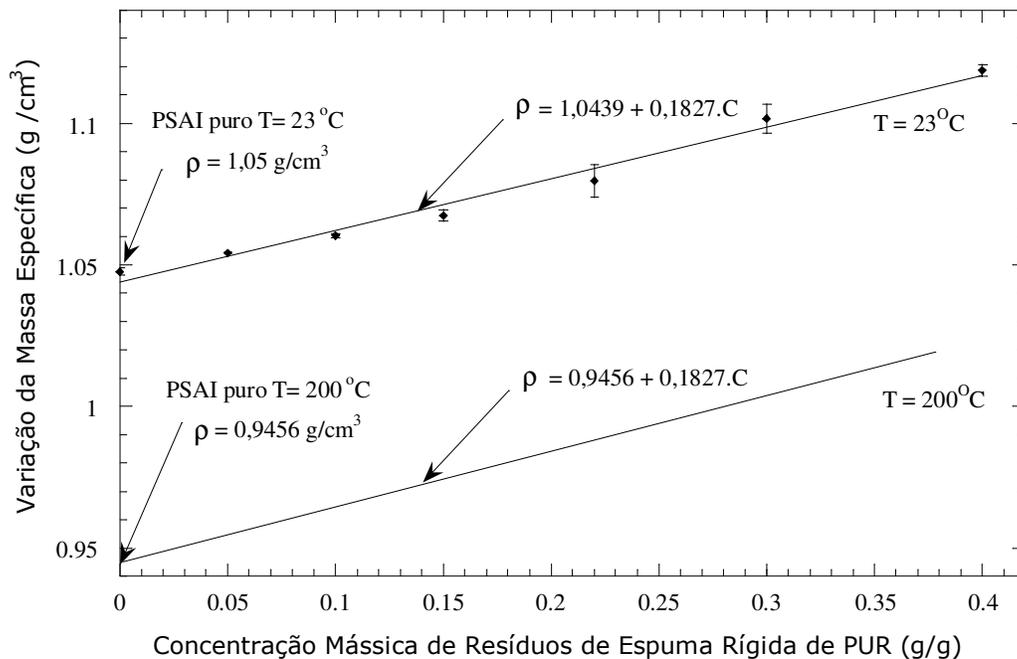


Figura 2. Variação da massa específica (ρ) em função da variação da concentração em massa de resíduos de espuma rígida de poliuretano (C) dentro da matriz de PSAI.

Da curva PVT do PSAI (MPI, 2004) foi determinado que a massa específica à temperatura de 200°C é aproximadamente 0,9456 g/cm³, a pressão no reservatório é muito baixa na ordem de 0,3 MPa (Deterre e Froyer, 1997), para a massa de 2,120 Kg, esta pressão não interfere significativamente no valor da massa específica. Admitindo como hipótese que o comportamento da variação da massa específica a 200°C será semelhante ao verificado a 23°C, ou seja, com mesmo coeficiente angular. Deve-se ter o cuidado de observar que cada ponto desta curva é uma concentração única, não se deve fazer referência à variação da massa específica em função da variação da temperatura, cujo ângulo seria completamente diferente e fugiria da hipótese realizada. (Figura 2, curva inferior). Então, a massa específica da mistura pode ser representada pela Equação (11), onde (C) representa a concentração em massa de PU na mistura.

$$\rho = 0,945 + 0,1827 \times C \quad (11)$$

Durante os ensaios de IF foi observado que o fluxo de massa de um mesmo experimento aumentava à medida que o êmbolo descia. O procedimento foi verificado várias vezes a fim de eliminar qualquer possibilidade de falta de homogeneização da temperatura sobre o volume de material depositado no reservatório do aparelho de IF. Entretanto, vale ressaltar que os valores determinados para o IF foram obtidos conforme estabelece a norma. Na seqüência deste trabalho será realizada a conversão dos resultados de IF em viscosidade. Os resultados dos ensaios normalizados estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de Índice de Fluidez para o PSAI puro e misturas com PUR

Massa da Carga (g)	Concentração de PUR (g/g)						
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,22	0,30	0,40
	Índice de Fluidez (g/10 min)						
2.123,82	1,9295						
3.773,00	4,5480						
4.966,58	8,0710	7,7920	6,8620	5,2470	4,7530	2,7570	2,3630

A partir dos pontos da Tabela 1 foi construído o gráfico da Figura 3 que representa a variação do índice de fluidez em função da carga para o PSAI puro e em função da concentração de PUR, com carga constante. O Ensaio foi realizado a temperatura de 200°C.

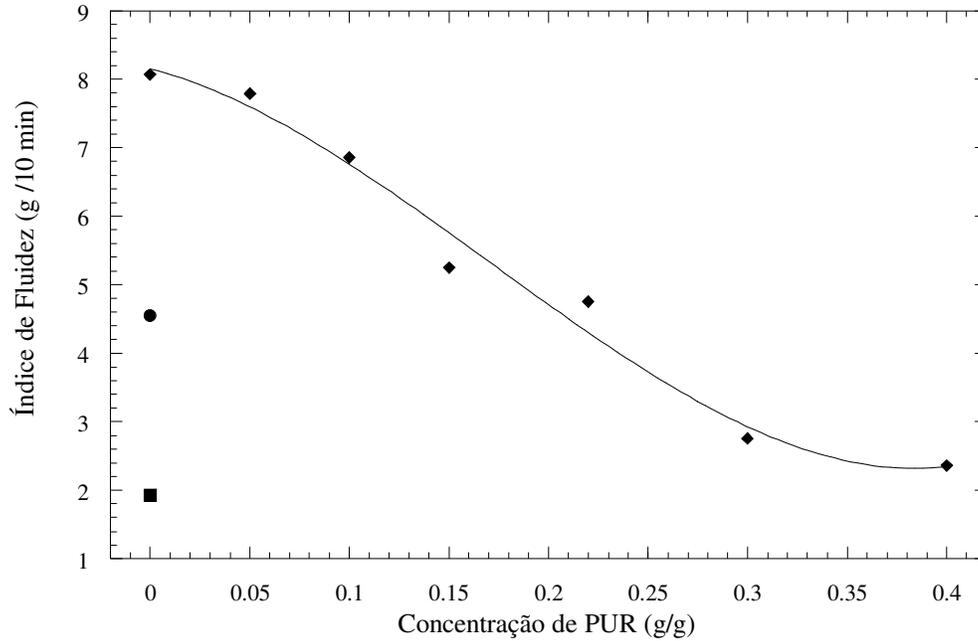


Figura 3. Variação do Índice de Fluidez em função da carga (2,16; 3,18 e 5 kg para $c=0\%$) e da concentração em massa de PUR, $T=200^{\circ}\text{C}$.

Como pode ser observada para o PSAI puro, a fluidez aumenta com o aumento da massa da carga. Para as misturas o comportamento verificado é oposto, com o aumento da concentração de PUR a fluidez do sistema diminui, ou seja, a viscosidade das misturas tende a aumentar com o incremento de PUR.

A solução da Equação 9 por meio dos parâmetros do PSAI 495 F indicados na Tabela 2 (MPI, 2004), permitiu determinar o valor da viscosidade limite na temperatura de 200°C , o valor calculado foi de $\eta_0=5.307,86$ Pa.s. Entrando com (η_0) e os demais parâmetros da Tabela 2 na Equação 9 e 10 e utilizando um domínio da taxa de cisalhamento compreendido entre 1 e 4.10^5 s^{-1} pode-se estabelecer a curva reológica completa do PSAI puro que foi representada na Figura 5.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas Equações 9 e 10, para uma temperatura de 200°C (473,15 K).

M	τ^* (Pa)	D_1 (Pa.s)	T^* (K)	T (K)	A_1	A_2 (K)
0,2437	42.499,6	$1,81389. 10^{11}$	373,15	473,15	26,298	51,6

O cálculo da tensão de cisalhamento na parede foi realizado utilizando a Equação (1), com os seguintes parâmetros, $R = 0,104775$ cm, $L = 0,8$ cm, sendo a pressão calculada em função da massa das cargas indicadas na Tabela 1.

Para o cálculo da taxa de cisalhamento aparente, foi utilizado inicialmente a Equação (11) para transformar o IF em vazão volumétrica (Q), em seguida, foi utilizada a Equação 3. A viscosidade aparente foi determinada pela Equação (7). Os resultados destes cálculos estão indicados na Figura (5) e correspondem aos pontos que estão acima da curva reológica do PSAI. Como podem ser observados, os

pontos estão deslocados para cima da curva reológica. Para se fazer a correção foi realizado o seguinte procedimento.

Para se obter a taxa de cisalhamento real, foi realizada a curva $\tau_r \times Q$ conforme indicado pela Figura (4), com o objetivo de se determinar o valor de (n).

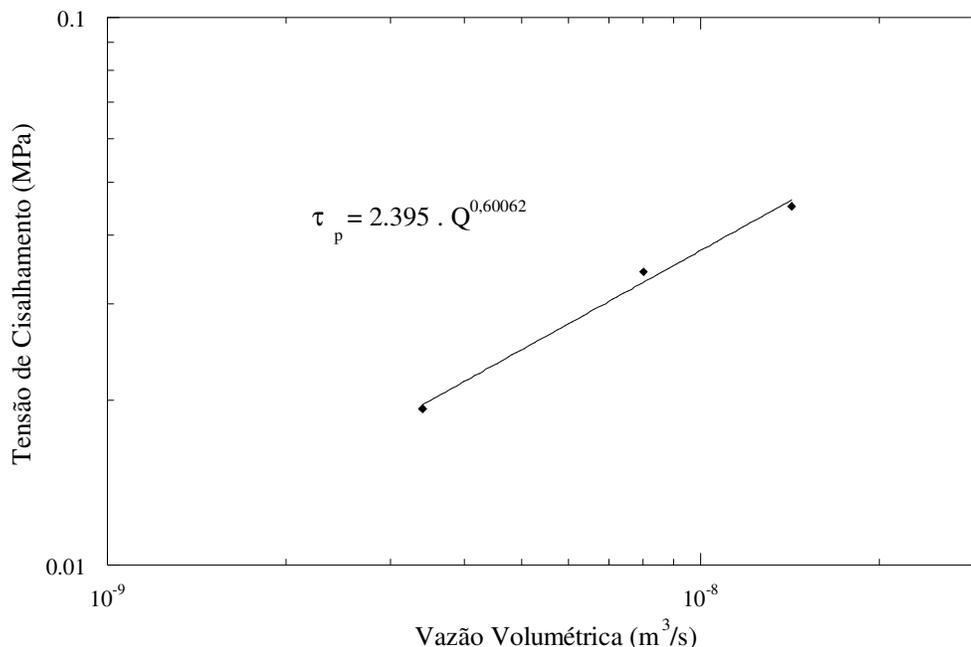


Figura 4. Tensão de cisalhamento na parede em função de vazão volumétrica de extrudado.

O coeficiente angular obtido na curva desta figura é o índice de escoamento do polímero em questão, sendo igual a $n=0,6$ e pode ser obtido pela Equação (5). Inserindo este valor na Equação (4), determina-se o valor da taxa de cisalhamento real.

O procedimento para se realizar a correção da curva da viscosidade em função da taxa de cisalhamento determinada a partir dos ensaios de IF, como ilustrado na Figura 5, é realizado da seguinte forma: Com os valores das taxas de cisalhamento real ($\dot{\gamma}$) calculadas pela Equação 4, determina-se a viscosidade a partir das Equações (9) e (10). Utilizando a Equação 8 obtêm-se a tensão de cisalhamento real (τ), inserindo este valor na Equação (2) e substituindo os devidos parâmetros experimentais na equação, o resultado é a determinação do coeficiente de Bagley (e).

Foi observado que, para a determinação do erro, utilizam-se somente os pontos para o PSAI puro. O resultado obtido foi o seguinte: quando a massa foi de 2,12382 Kg, o valor de (e), correção de Bagley, foi igual a 2,7162; para 3,77300 Kg igual a 2,9313 e para 4,96658 Kg igual a 2,5372. Considerando as variações experimentais, foi adotado o valor médio de 2,7282 para efeito de correção, sendo que este valor está dentro do intervalo previsto na literatura. Após a correção, a viscosidade do PSAI foi determinada pela Equação (8). Na mesma Figura 5, em escala ampliada, está representada a correção realizada com o valor médio. Como podem ser observados os pontos experimentais ficaram praticamente sobrepostos a curva reológica para o PSAI puro, indicando que nesta região do gráfico o efeito da queda de pressão na entrada é

praticamente o mesmo para as pressões impostas. E portanto, pode-se atribuir um valor constante na correção.

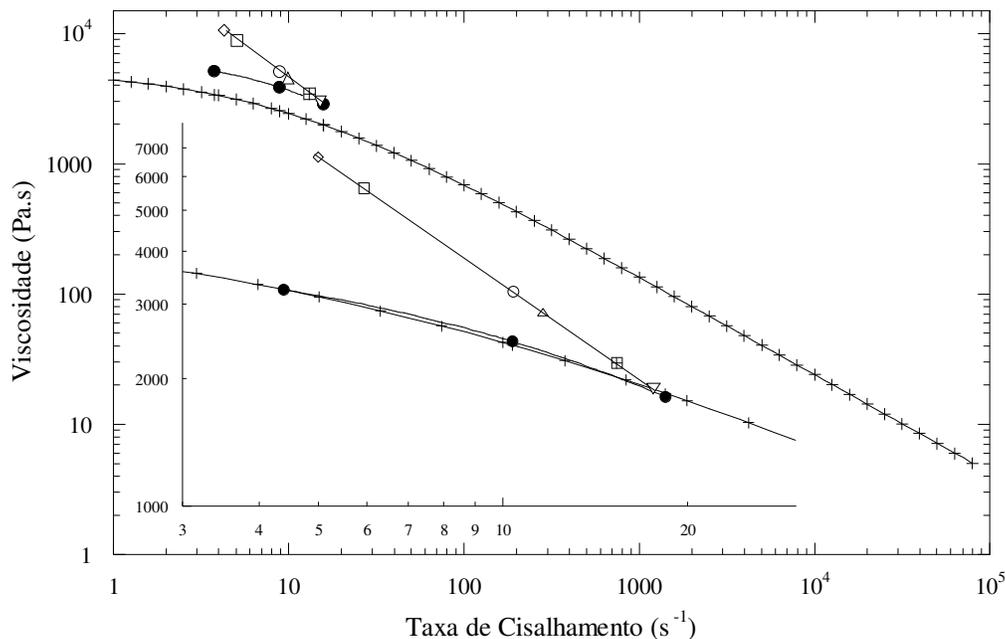


Figura 5. Variação da viscosidade em função da variação da taxa de cisalhamento para: (+) PSAI puro referência, (●) Valor determinado experimentalmente para o PSAI puro com três massas diferentes, (◇) 0,40 g/g, (□) 0,30 g/g, (○) 0,22 g/g, (△) 0,15 g/g, (⊞) 0,10 g/g, (▽) 0,05 g/g de PUR, para massa de 2,160 Kg.

Na Figura 6 estão indicadas três peças técnicas utilizadas no processo de fabricação de refrigeradores. Estas peças foram moldadas pelo processo de injeção. As concentrações foram de 0,05; 0,15 e 0,40 g/g de PUR. Como a viscosidade da mistura aumenta com o aumento da concentração de resíduos de PUR, foi necessário aumentar a pressão de injeção da máquina para conseguir moldar o produto sem defeitos. Como pode ser observado na figura existe uma forte mudança da coloração, ficando mais escuro com o acréscimo de PUR. A variação do módulo de elasticidade foi aproximadamente linear em função da concentração de PUR, de 1.850 a 2.650 MPa, respectivamente para $c=0\%$ e $c=40\%$ de PUR. A tensão máxima variou de 19,2 MPa para $c=0\%$, para 17,0 MPa para $c=15\%$ e voltou a aumentar gradativamente até 19,5 MPa para $c=40\%$ de PUR.

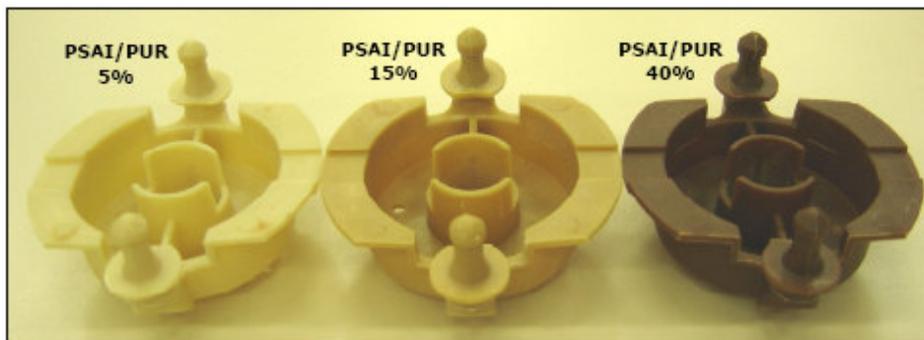


Figura 6. Peças técnicas moldadas pelo processo de injeção, misturas de 0,05; 0,15 e 0,40 g/g de PUR.

4. Conclusão

Por meio de equações que descrevem o comportamento reológico de polímeros fundido, foi possível determinar a viscosidade do PSAI puro e de misturas de PSAI com resíduos de espuma rígida de PUR a partir de medidas de Índice de Fluidez. Inicialmente, foi determinado o IF do material puro com diferentes cargas, em seguida o IF foi transformado em vazão volumétrica. Para isto, foi necessário determinar experimentalmente a massa específica do PSAI puro e das misturas, o resultado da massa específica para o material puro foi comparado com os resultados do fabricante e estavam coerentes.

A taxa de cisalhamento foi corrigida utilizando termo de correção de Rabinovitsch, o índice de escoamento (n) foi determinado experimentalmente como sugere a literatura, sendo o valor médio igual a 0,6. O termo de correção fez aumentar em 16,67% o valor da taxa de cisalhamento, deslocando a curva para a direita.

A tensão de cisalhamento foi corrigida utilizando o parâmetro de correção de Bagley (e), para isto, este parâmetro foi determinado com a ajuda da curva reológica obtida na bibliografia disponível. O valor médio foi de 2,728. Com esta correção a tensão de cisalhamento fica reduzida aproximadamente de 26,2%.

O IF das misturas foi determinado com carga constante, variando-se somente a concentração de PUR. O efeito do acréscimo de PUR na resina de PSAI foi de aumentar a viscosidade, este aumento ficou mais pronunciado com concentrações de PUR mais elevadas.

A viscosidade da mistura com 40% de PUR aumentou em aproximadamente 368% em relação ao PSAI puro, a taxa de cisalhamento corresponde a aproximadamente 27% do valor do PSAI puro e o IF representa cerca de 29% do valor inicial.

Foram injetadas várias peças técnicas com diferentes misturas, o material apresentou uma boa rigidez e a tensão máxima para a concentração de 0,15 g/g é 12% inferior ao PSAI puro, com 0,40 g/g a tensão máxima praticamente se iguala ao material puro.

Conforme os resultados apresentados no presente trabalho, a reciclagem de resíduos de poliuretano através da incorporação mecânica no polímero termoplástico PSAI é tecnicamente viável. A presente alternativa de reciclagem de PUR, apresenta a vantagem de poder ser realizada dentro da própria empresa geradora dos resíduos e de não depender da disponibilidade de resíduos para a continuidade do processo.

5. Referências

- AGASSANT, J. F.; AVENAS, P. O. SERGENT, J.P. ; VERGNES, B. e VINCENT, M. 1996. *La Mise en Forme des Matières Plastiques*. 3ª ed., TecDoc, Paris, 613 p.
- BOM, R. P. e HERRMANN, M. H. Análise Reológica Via Simulador de Fluxo. 2000. *In: Congresso Em Ciências de Materiais SULMAT2000*. Joinville, SC. 2000. p. 948-957
- CASTRO, A. G.; COVAS, J. A. e DIOGO, A. C. 2001. *Reologia e suas Aplicações Industriais*. Lisboa, Ed. Instituto Piaget, 462 p.
- DETERRE, R. e FROYER, G. 1997. *Introduction aux Matériaux Polymères*. Ed. Tec-Doc. Paris, 215 p.

- DETERRE, R.; MOUSSEAU, P. e SARDA, A. 2003. *Injection des polymères simulation optimisation et conception*. Paris, Ed. Tec-Doc, 352 p.
- GROUPE FRANCAIS D'ETUDES ET D'APPLICATIONS DES POLYMERES (G.F.P.). 1980a. *Initiation à la Chimie et à la Physico-Chimie Macromoléculaires*. Quelques Grands Polymeres Industriels. V.4, 542 p.
- GROUPE FRANCAIS D'ETUDES ET D'APPLICATIONS DES POLYMERES (G.F.P.). 1980b. *Initiation à la Chimie et à la Physico-Chimie Macromoléculaires*. Proprietes Physiques des Polymeres Mise em Oeuvre. V. 2: 388 p.
- HERRMANN, M.H. 2001. *Simulação Numérica do Processo de Injeção de Polímeros em Canais Circulares*. Joinville, SC. Dissertação de Mestrado. UDESC, 188 p.
- LAUN, H.M. 2003. Pressure Dependent Viscosity and Dissipative Heating in Capillary Rheometry of Polymer Melts. *Rheol Acta*, 42: p. 295-308.
- LUCKMANN, L. 2005. *Reciclagem de resíduos de espuma rígida de poliuretano através da incorporação em polímeros termoplásticos, ABS, PSAI e PS*. Joinville, SC. Dissertação de Mestrado. UDESC, 168 p.
- MANRICH, S. 2005. *Processamento de termoplásticos, rosca única, extrusão & matrizes, injeção & moldes*, São Paulo, Ed. Artliber, 431 p.
- MITSOULIS, E. e HATZIKIRIAKOS, S.G. 2003. Bagley Correction: the Effect of Contraction Angle and its Prediction. *Rheol Acta*, 42: 309-320 p.
- MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT 5.0 (MPI). 2004. Material Testing Overview, Moldflow Corporation, Wayland, MA, USA. Licença Whirlpool Corporation.
- NAVARRO, R.F. 1993. Relação entre o Índice de Fluidez e a Viscosidade Aparente de Polímeros Pseudoplásticos. In: 2^o Congresso Brasileiro de Polímeros, São Paulo, 1993. São Paulo. p 763-766.

Submissão: 25/06/2007
Aceite: 13/08/2007