

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EXTRUSÃO HIDROSTÁTICA DE ACRÍLICO (PMMA)

André Luiz de Moraes Costa, andre.costa@ufs.br¹

Luiz Henrique Bispo Carvalho, henrique-sabbath@hotmail.com¹

Douglas Bressan Riffel, dbr.ufs@gmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe
Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon s/n, São Cristóvão, Sergipe, CEP 49100-000

Resumo: Neste trabalho foi realizado um conjunto de simulações numéricas por elementos finitos da extrusão hidrostática de acrílico (polimetil-metacrilato PMMA) usando o programa comercial DEFORM 3D. As simulações foram feitas para duas velocidades do punção e quatro coeficientes de atrito com temperatura inicial de 90 °C. Foram avaliados os perfis de tensão no interior do container e a temperatura na zona de deformação ao longo do processo. A melhor correlação com a pressão de extrusão experimental foi obtida com coeficiente de atrito $\mu \approx 0,30$ na interface entre o material e a matriz. A temperatura do material no interior da matriz apresentou um perfil característico e depende do coeficiente de atrito e da velocidade, sendo o máximo aumento encontrado de 8 °C para a velocidade do punção de 10 mm/min.

Palavras-chave: elementos finitos, modelagem computacional, extrusão hidrostática de polímero

1. INTRODUÇÃO

Polimetil-metacrilato (PMMA), popularmente chamado de acrílico, é um material termoplástico transparente e rígido na temperatura ambiente, frequentemente usado na forma de placas como uma alternativa mais leve e resistente ao choque que o vidro (Wikipedia, 2017). Os processos de manufatura mais comuns são baseados na moldagem de uma massa acrílica em temperaturas acima da temperatura de transição vítrea T_g , que normalmente está acima de 105°C e depende da composição química do material. Entretanto, placas e chapas de acrílico de mais alta qualidade são obtidas por *cell casting*, i.e, a fundição de acrílico líquido ainda não polimerizado (monômeros MMA mais plastificante) entre placas de vidro polidas (Groover, 2010).

A resistência mecânica de placas fundidas é maior do que a dos produtos moldados devido sua maior massa molecular. Usualmente as placas são cortadas e coladas para obtenção de componentes ou termo-moldadas acima de T_g para obtenção de curvaturas e dobras. A conformação de acrílico no estado sólido, ou seja, em temperaturas abaixo de T_g , não é um processo usual, mas pode ser uma alternativa para produção de componentes de formas complexas a partir das chapas fundidas de alta resistência mecânica. A extrusão de polímeros no estado sólido (SSE) é um método muito estudado para obtenção de polímeros altamente orientados (Beygelzimer e Beloshenko, 2004) e compreende a extrusão direta convencional e a extrusão hidrostática, que é interessante porque restringe o atrito apenas à zona de deformação.

Hope et al. (1980) realizaram a extrusão hidrostática de barras cilíndricas de PMMA na temperatura de 90°C e diferentes razões de extrusão R na matriz cônica, como mostrado na figura 1. A matriz tem semi-ângulo $\alpha = 15^\circ$ e diâmetro de abertura $d_f = 7$ mm. Com a variação do diâmetro inicial d_o foram feitos experimentos com $R = 2,5, 2,75, 3,0$ e $3,5$ sob várias velocidades do extrudado variando entre 0,5 e 100 mm/min. Estes autores encontraram que a pressão de extrusão aumentou com a razão de extrusão e com a velocidade do extrudado. O melhor resultado em termos de integridade do extrudado foi obtido para $R = 3,0$. Utilizando um critério de deformação que leva em conta a influência da pressão, Hope et al. (1980) estimaram o coeficiente de atrito de Coulomb $\mu \approx 0,2$.

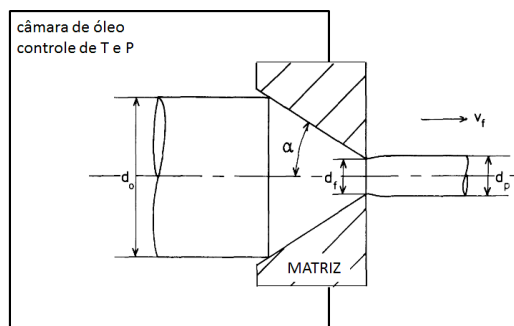


Figura 1. Esquema de extrusão hidrostática usado por Hope et al. (1980).

Inoue et al. (1981) também realizaram a extrusão hidrostática do PMMA, mas com semi-ângulos de cone $\alpha = 20^\circ$ e 45° , temperaturas de 50, 80 e 100°C , e razões de extrusão entre 1,3 e 2,5. Estes autores encontraram resultados semelhantes àqueles de Hope et. al. (1980) para o aumento da pressão com a razão de extrusão. Em adição, eles avaliaram a temperatura do material na saída da matriz, e encontraram um aumento de temperatura ΔT entre 10 e 20°C para a temperatura inicial $T_0 = 80^\circ\text{C}$, dependendo da razão de extrusão.

Para o projeto de matrizes de extrusão de peças de acrílico de formas complexas a partir de placas fundidas é interessante utilizar a simulação numérica por elementos finitos, a fim de conhecer o perfil de temperatura e de tensões internas no material. Como uma primeira abordagem para validar simulações de extrusão de PMMA, neste trabalho são apresentados resultados da simulação de extrusão hidrostática de PMMA usando modelagem 3D.

2. MODELO COMPUTACIONAL

Foram realizadas simulações de extrusão hidrostática de acrílico usando o software comercial de elementos finitos DEFORM 3D nos modos deformação e transferência de calor. As simulações foram modeladas para 1/8 do volume das peças devido à simetria radial do problema com uma malha de 10000 elementos (Fig. 2). As dimensões da matriz e do material foram tomadas do trabalho de Hope et al. (1980) anteriormente citado, com a razão de extrusão $R = 3,0$.

Para simular o ambiente de óleo pressurizado da extrusão hidrostática foram modelados um punção colado ao material e um container com coeficiente de atrito no contato com o material igual a zero. A força externa F foi imposta ao punção com duas velocidades $v_0 = 1,0$, e 10 mm/min . O coeficiente de atrito de cisalhamento m na interface entre o material e matriz variou entre 0,1 e 0,5.

O material foi modelado como elasto-viscoplástico isotrópico usando o critério de escoamento de Von Mises. O módulo elástico foi $E = 3.3 \text{ GPa}$ e o coeficiente de Poisson $\nu = 0,45$. As curvas tensão-deformação para o PMMA sob várias taxas de deformação $\dot{\epsilon}$ são mostradas na Fig. 3, e foram retiradas dos trabalhos experimentais de Hope et. al. (1980) e Richeton et al. (2006) para $T_0 = 90^\circ\text{C}$ e 115°C , respectivamente. O DEFORM interpola e extrapola as curvas, de maneira que o modelo constitutivo do material não precisa ser especificado. Todas as ferramentas foram modeladas como rígidas.

A temperatura inicial das ferramentas e do material foi $T_0 = 90^\circ\text{C}$. O coeficiente de transferência de calor entre as ferramentas e o material foi de $11,0 \text{ N/s/mm}^\circ\text{C}$. A condutividade térmica do PMMA foi $\kappa = 0,19 \text{ W/(m }^\circ\text{C)}$ e o calor específico foi $c_v = 1,47 \text{ kJ/(kg }^\circ\text{C)}$.

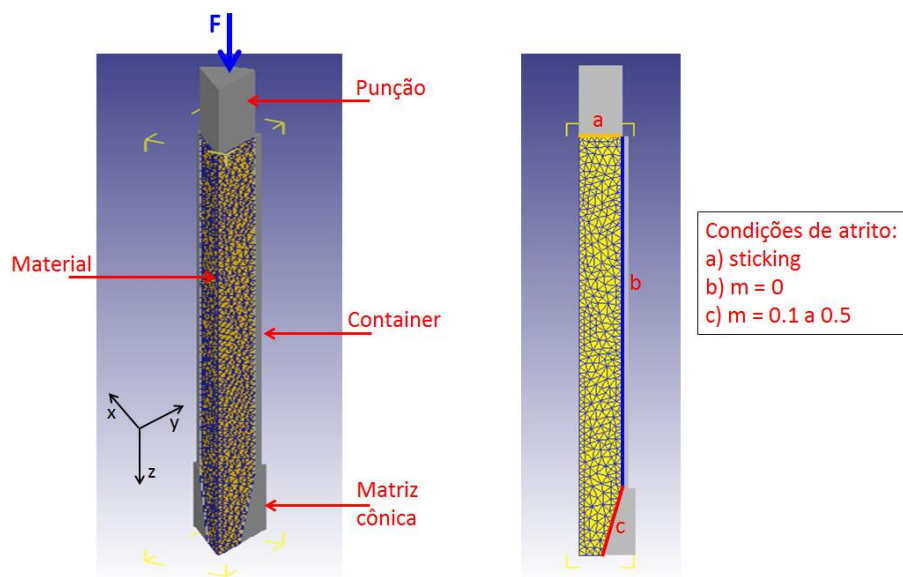


Figura 2. Modelo geométrico e condições de atrito usados nas simulações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente verificamos se o modelo da simulação representa a condição de pressão hidrostática. Para isso, tomamos ponto fixo P1 no interior do material da simulação com $v_0 = 1,0 \text{ mm/min}$ e registramos a evolução das tensões internas σ_x , σ_y , σ_z ao longo do processo. Figura 4 mostra o gráfico de tensão x tempo onde se observa o comportamento hidrostático compressivo com $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$, e também que as tensões aumentam até um valor que permanece constante até o fim do processo.

Também na Fig. 4 têm-se os mapas de tensões no tempo indicado pela linha amarela dos gráficos. Observa-se que as tensões são iguais no interior do container e se modificam no cone da matriz devido à deformação, com a tensão compressiva aumentando nas direções x e y e diminuindo na direção de extrusão z.

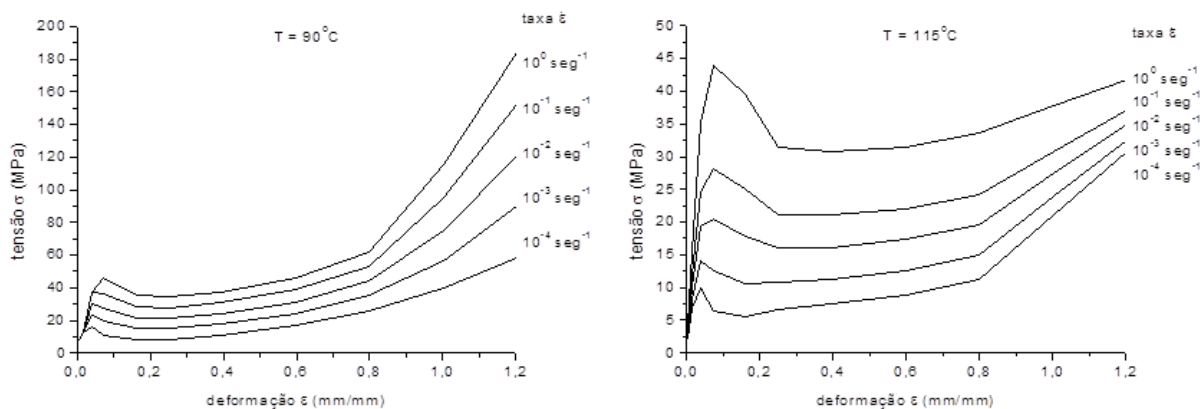


Figura 3. Curvas tensão-deformação usadas nas simulações. Dados retirados de Hope et al. (1980) e Richeton et al. (2006).

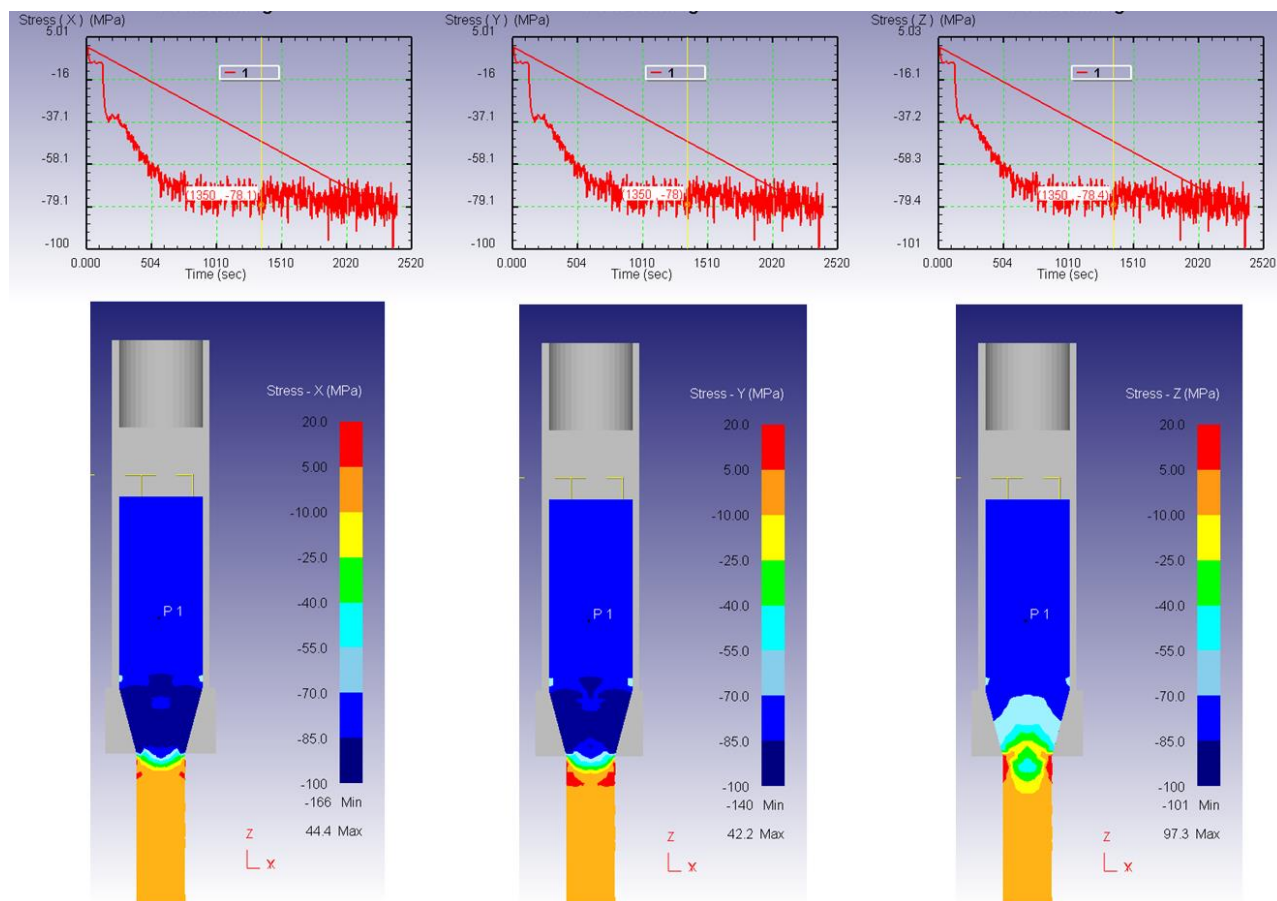


Figura 4. Gráficos da evolução das tensões σ_x , σ_y , σ_z no ponto P1, e mapas de tensão correspondentes. Imagens da simulação para $v_0 = 1,0$ mm/min e $m = 0,3$.

Para confirmar se as tensões são iguais em todo o volume do material no interior do container, foi avaliada a tensão máxima principal em nove pontos fixos como mostrado na Fig. 5. Nota-se que a tensão é a mesma em qualquer ponto do material durante todo o processo, não sofrendo influência da zona de deformação.

A tensão hidrostática cresce com o aumento da força necessária para provocar a deformação do material na matriz cônica como mostrado na Fig. 6. Então podemos analisar a evolução da tensão em conjunto com o aumento da força externa aplicada.

Para entender o perfil da curva de tensão hidrostática durante o processo foram considerados três pontos na entrada da zona de deformação como mostra a Fig. 7. Cada posição está indicada pela linha amarela nos gráficos de força. No início da extrusão o cone está preenchido por material não-deformado, de maneira que a força aumenta na medida em que material do container entra na zona de deformação. A força máxima é atingida após a extrusão de duas vezes o volume da zona de deformação. Isto é, somente após a extrusão do volume não-deformado inicial do cone e da extrusão do volume de material novo que “empurrou” este volume inicial. Assim, o patamar de tensão hidrostática é atingido quando o nível de deformação no cone entra em regime permanente.

Agora voltando à Fig. 6, podemos descrever a evolução da tensão hidrostática (ou força aplicada) pelos pontos A, B e C indicados na figura. Os perfis da evolução da tensão hidrostática no container e de força aplicada foram idênticos para todas as simulações. A tensão cresce até o ponto A onde ocorre uma estabilização momentânea devido provavelmente à acomodação elástica de todo o volume do material, a tensão volta a crescer até o ponto B, onde se observa uma inflexão devido ao *softening* após o escoamento característico da curva tensão-deformação do material. Então a tensão, como explicado acima, cresce até atingir o patamar no ponto C.

A Fig. 8(a) mostra a força aplicada em função do coeficiente de atrito para $v_0 = 10$ mm/min. A força máxima aumenta com o coeficiente de atrito de cisalhamento na interface matriz-material, com uma relação aproximadamente linear como mostrado na figura 8(b).

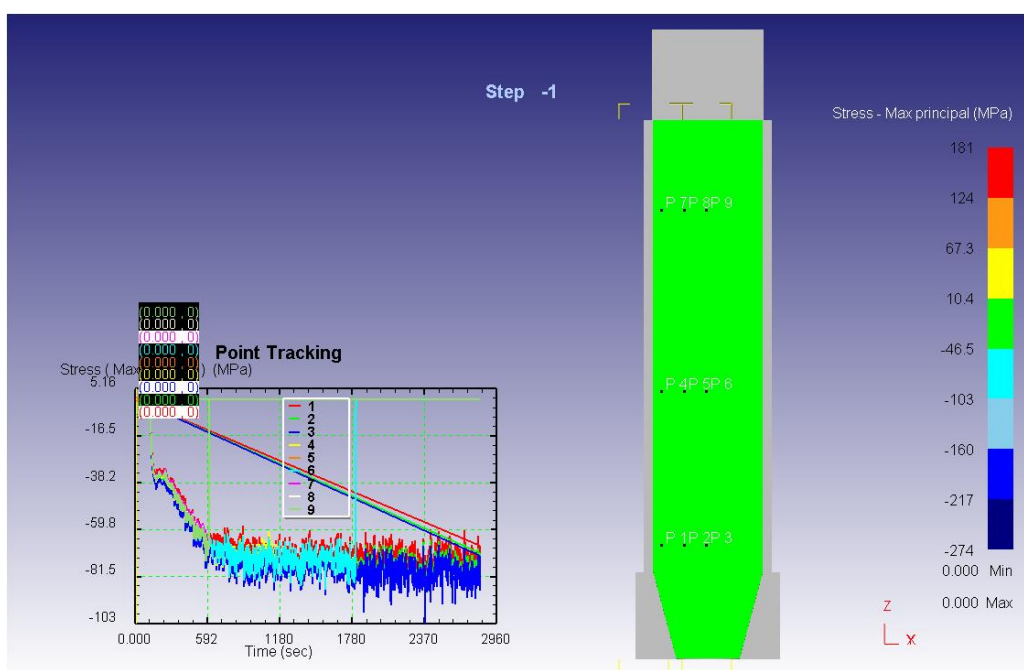


Figura 5. Evolução da tensão principal no interior do container nas nove posições indicadas. Simulação para $v_0 = 1,0$ mm/min e $m = 0,3$.

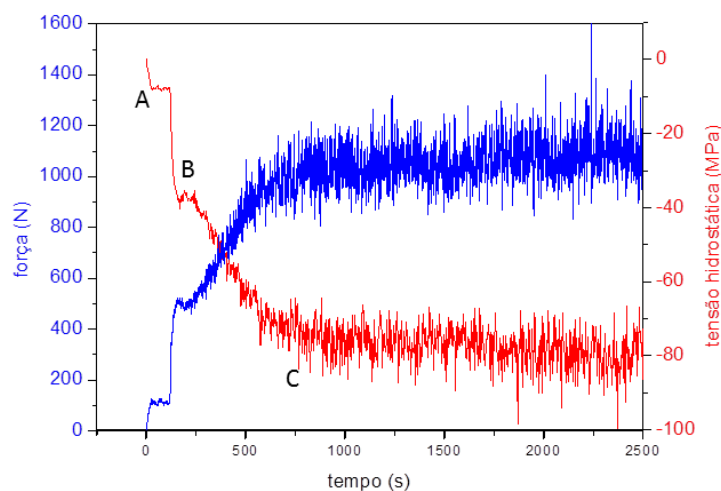


Figura 6. Força externa aplicada versus tensão hidrostática no container para $v_0 = 1,0$ mm/min e $m = 0,3$.

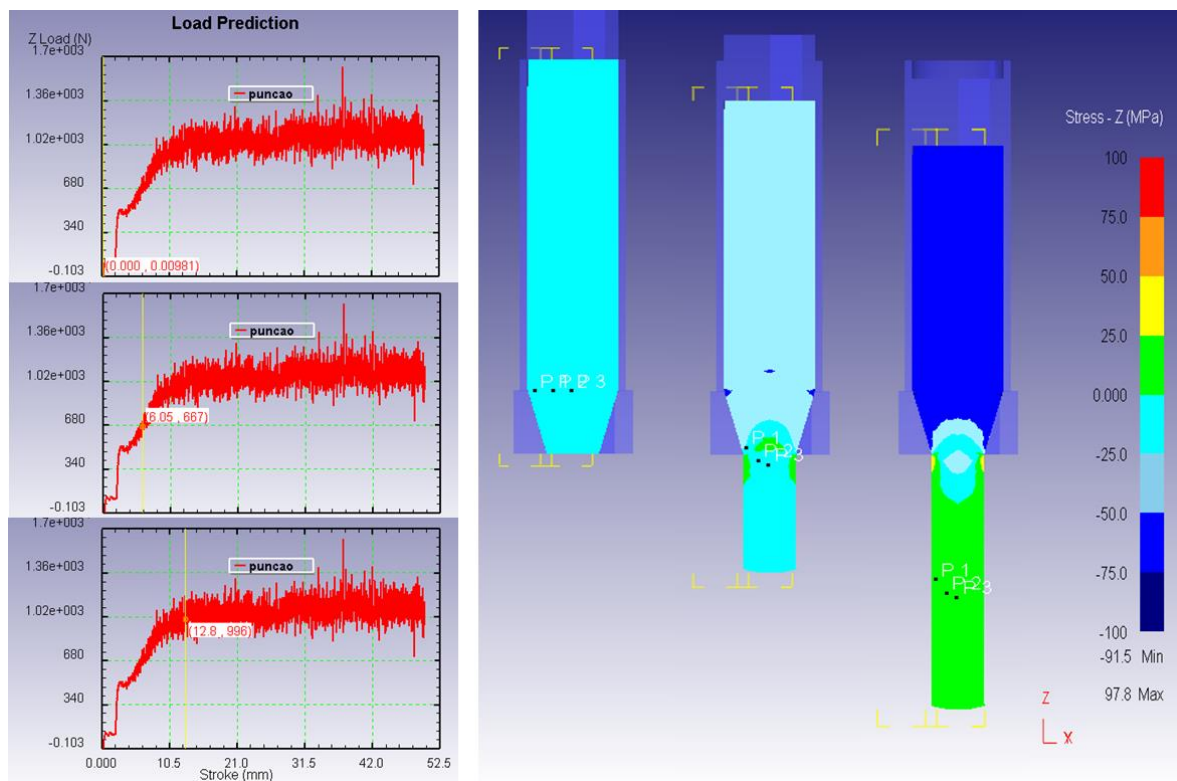


Figura 7. Gráfico de força e movimentação de material durante o início da extrusão com $v_0 = 1,0$ mm/min e $m = 0,3$.

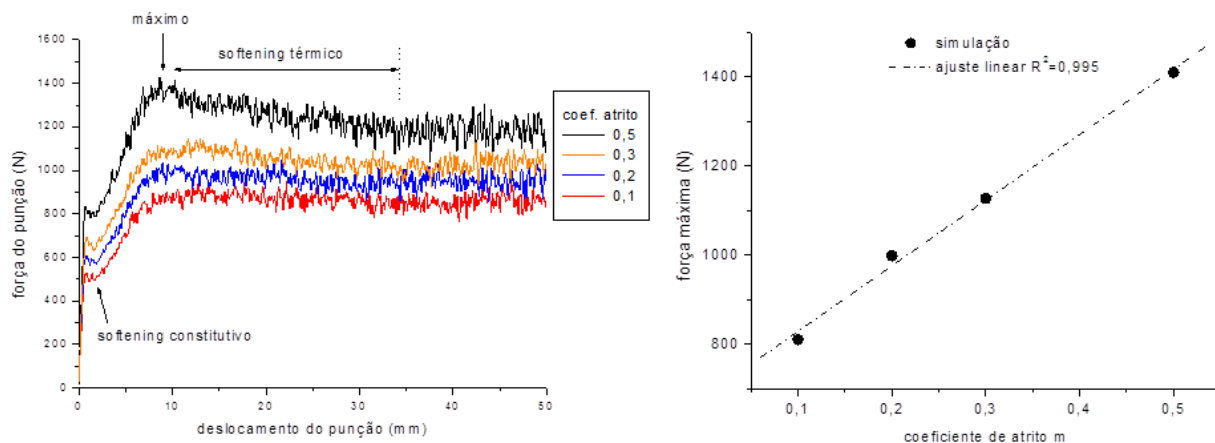


Figura 8. (a) Gráfico de força em função do coeficiente de atrito durante a extrusão com $v_0 = 30,0$ mm/min, (b) Correlação entre força máxima e coeficiente de atrito.

A Fig. 9 compara os dados de tensão hidrostática obtidos nas simulações com os valores de pressão hidrostática medidos por Hope et al. (1980). A melhor aproximação foi para coeficiente de atrito de cisalhamento $m = 0,5$. Considerando o critério de deformação plástica de Von Mises, no qual o coeficiente de atrito de Coulomb vale $\mu = 0,58m$ (Helman e Cetlin, 1993), chega-se a $\mu \approx 0,30$ como previsão computacional para o atrito na interface material-matriz durante a extrusão hidrostática. Modelos teóricos de Hope et al. (1980) e Inoue et al. (1981) preveem $\mu \leq 0,20$. A diferença na previsão de μ está principalmente relacionada ao critério de deformação plástica utilizada, à realidade não-isotrópica do material, e a possíveis variações locais do coeficiente de atrito com a temperatura.

É interessante notar na Fig. 8(a) que, especialmente para altos coeficientes de atrito, após atingir o máximo a força cai continuamente por um tempo. Esse *softening* é atribuído ao aumento de temperatura que é mais excessivo com maior atrito e altas velocidades. Figura 10 mostra a evolução da temperatura durante a extrusão para $v_0 = 1,0$ mm/min e $m = 0,3$. A temperatura aumenta na zona de deformação crescendo a partir de um anel (com diâmetro menor que o diâmetro de saída) localizado um pouco acima do plano da abertura. Em nosso laboratório esse perfil foi chamado de “cara de coruja”.

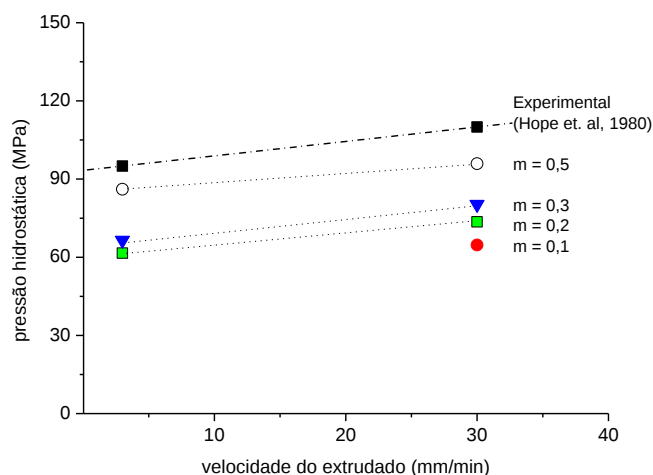


Figura 9. Comparação entre tensão hidrostática das simulações e pressão hidrostática experimental medida por Hope et al. (1980).

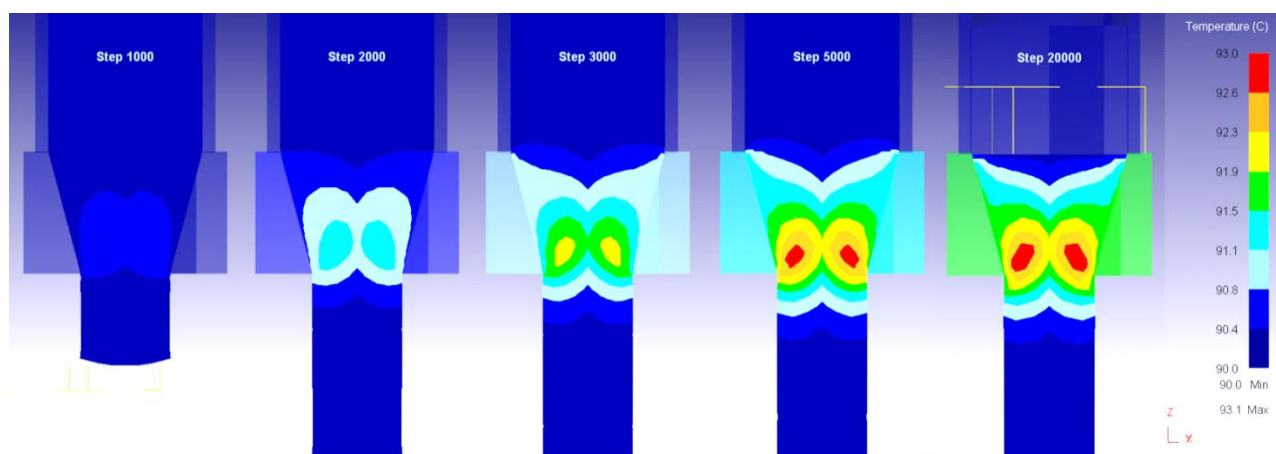


Figura 10. Perfil de temperatura na zona de deformação ao longo da extrusão para $v_0 = 1,0$ mm/min e $m = 0,3$.

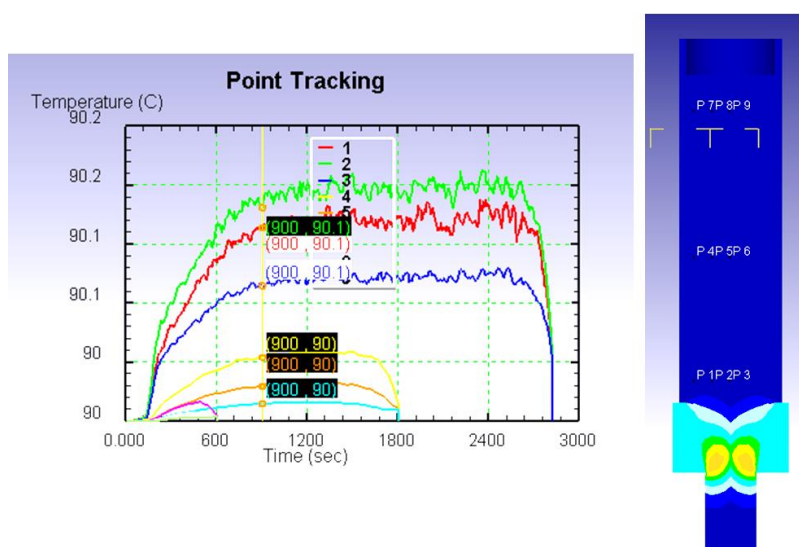


Figura 11. Perfil de temperatura em nove posições dentro do container durante a extrusão com $v_0 = 1,0$ mm/min e $m = 0,3$.

A Fig. 11 mostra a evolução de temperatura dentro do container em nove posições durante o processo. Observa-se que a temperatura varia muito pouco mesmo para o material localizado na entrada da zona de deformação. Assim, o material dentro do container pode ser considerado em temperatura constante aproximadamente igual à temperatura inicial.

A Fig. 12 mostra o perfil de temperatura de três porções do material indicadas pelos pontos P1, P2 e P3, em movimento durante a extrusão. A linha amarela nos gráficos indica as posições dos pontos mostradas nas imagens. Verifica-se que a temperatura é praticamente constante dentro do container e sobe exponencialmente ao longo da zona de deformação. A porção de material P2 que está na meia distância entre o centro e a superfície passa próximo ao ponto de máximo de temperatura, enquanto a porção central P3 sofre menos aumento de temperatura na zona de deformação. Após uma distância em torno de $1,5d_f$, o extrudado atinge a temperatura inicial do processo.

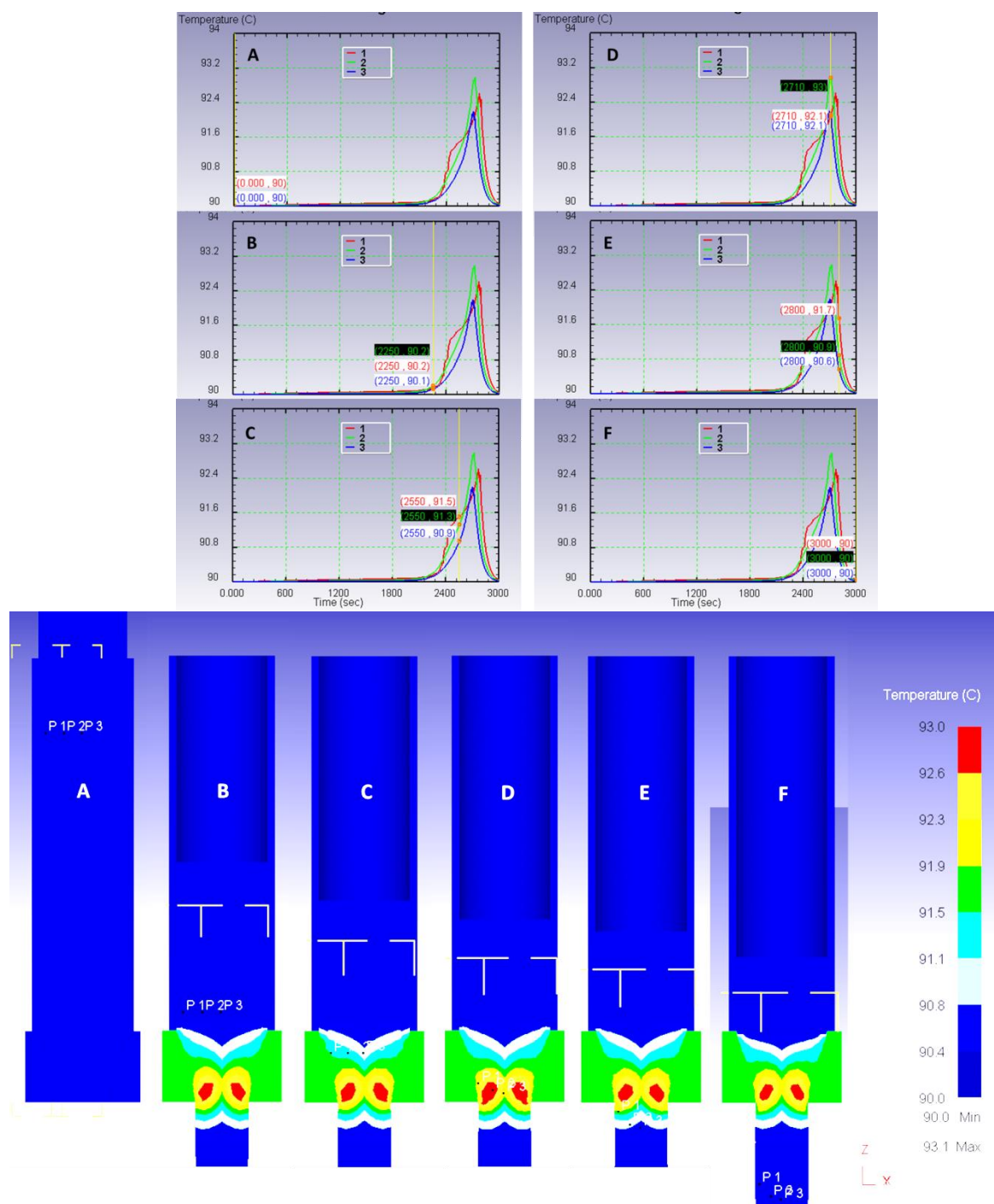


Figura 12. Perfil de temperatura de três porções do material indicadas pelos pontos P1, P2 e P3 em seis posições diferentes ao longo extrusão com $v_0 = 1,0$ mm/min e $m = 0,3$.

4. CONCLUSÃO

O modelo computacional da extrusão hidrostática forneceu interessantes observações da evolução de tensão e de temperatura no interior do material. Os resultados numéricos concordam com dados experimentais para um coeficiente de atrito de Coulomb $\mu \approx 0,30$. A força aplicada e tensão hidrostática aumentam até um ponto de máximo e permanecem constantes até o fim do processo. A temperatura aumentou apenas na zona de deformação apresentando um perfil característico. Este aumento de temperatura provoca uma redução gradual na força aplicada.

Um futuro trabalho envolve a análise dos perfis de tensões, deformações e taxas de deformação no interior da zona de deformação, além de outros aspectos como a expansão após a deformação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Beygelzimer, Y.E., Beloshenko, V.A., 2004, "Solid-state Extrusion", Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Vol. 11, pp. 850-865.
- Groover, M.P., 2010, "Fundamentals of Modern Manufacturing", Ed. Wiley, New Delhi, India, 3. ed.
- Helman, H., Cetlin, P.R., 1993, "Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais", Ed. Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, Brasil, 2. ed.
- Hope, P.S., Ward, I.M., Gibson, A.G., 1980, "The hydrostatic extrusion of polymethylmethacrylate". Journal of Materials Science, Vol. 15, pp. 2207-2220.
- Inoue, N., Nakayama, T., Ariyama, T., 1981, "Hydrostatic extrusion of amorphous polymers and properties of extrudates", Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics, Vol. 19:3, pp. 543-563.
- Richeton, J., Ahzi, S., Vecchio, K.S., Jiang, F.C., Adharapurapu, R.R., 2006, "Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield stress". International Journal of Solids and Structures, Vol. 43, pp 2318-2335.
- Wikipedia, 2017, "Poly(methyl methacrylate)". Disponível em:
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(methyl_methacrylate\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Poly(methyl_methacrylate))> . Acesso em 11mar2017.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

FEM SIMULATION OF HYDROSTATIC EXTRUSION OF ACRYLIC (PMMA)

André Luiz de Moraes Costa, andre.costa@ufs.br¹

Luiz Henrique Bispo Carvalho, henrique-sabbath@hotmail.com¹

Douglas Bressan Riffel, dbrufs@gmail.com¹

¹Department of Mechanical Engineering, Federal University of Sergipe
Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon s/n, São Cristóvão, Sergipe, Brazil, CEP 49100-000

Abstract: A set of numerical simulations of the hydrostatic extrusion of polymethyl-methacrylate was performed by using the FEM code DEFORM 3D. The initial temperature of tooling and workpiece was 90 °C, ram speeds were 0.1 and 10 mm/min with extrusion ratio $R=3.0$. These ranges of parameters were chosen in order to encompass the parameters found in previously mentioned experiments. The stress inside the container and the temperature in the deformation conical zone during processing were evaluated. The best correlation with experimental hydrostatic pressure was verified for a Coulomb friction coefficient at the material-die interface $\mu = 0.30$. The temperature increases in a characteristic "owl's face" profile and depends on the friction coefficient and ram speed. The maximum temperature increase was 8 °C for the ram speed equal to 10 mm/min.

Key-words: finite element method, computer modelling, polymer solid state extrusion.

RESPONSABILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.