

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRENSAGEM UNIAXIAL DO PTFE

Rodrigo Bresciani Canto^{1,2}, Nicolas Schmitt², Jonas de Carvalho¹, René Billardon²

¹ Universidade de São Paulo – EESC, Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos - SP, Brasil,

² LMT-Cachan, CNRS (UMR 8535), 61 Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France. canto@sc.usp.br, schmitt@lmt.ens-cachan.fr, prjonas@sc.usp.br, billardon@lmt.ens-cachan.fr

Resumo. *O presente trabalho apresenta a modelagem computacional do processo de prensagem uniaxial do PTFE (politetrafluoretileno) com o objetivo de prever a distribuição de densidades na peça compactada. O método dos elementos finitos é utilizado na modelagem computacional, e o comportamento mecânico do polimérico é simulado pelo modelo de Drucker-Prager/cap, implementado no programa comercial ABAQUS®. Os parâmetros desse modelo são identificados por ensaios experimentais de compactação hidrostática e ensaios experimentais triaxiais originais. **Palavras-chave:** prensagem, pó de PTFE, elementos finitos, ensaios triaxiais.*

1. INTRODUÇÃO

O politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente pelo nome de TEFLON, apresenta excelentes propriedades autolubrificantes, resistência mecânica e estabilidade química, fatos que o torna bastante utilizado em diversos setores, como os da indústria química, automotiva e aeronáutica. O material é um polímero termoplástico, mas a sua elevada viscosidade no estado fundido ($\sim 10^{11}$ Pa . s)⁽¹⁾ dificulta o seu processamento pelos métodos convencionais de injeção⁽²⁾. Dessa forma, o processamento do PTFE é realizado principalmente por processos de prensagem do pó – forma em que o material é polimerizado – seguido de sinterização e, quando necessário, processos complementares de usinagem.

A escolha do tipo de processo de prensagem, os níveis de pressão aplicados na peça e o projeto otimizado do molde são fatores de extrema importância para se obter um produto de alta qualidade e mínimo custo. Comumente são utilizados dois tipos de processos na indústria, sendo que o mais empregado é o processo de prensagem em matrizes rígidas. Este processo consiste no confinamento do pó em uma matriz, geralmente metálica, e a prensagem se dá pela atuação de um pistão. Este processo produz peças com formas e geometrias simples e bem definidas (que adquirem a forma da cavidade do molde), porém com uma certa heterogeneidade de distribuição de densidades e de propriedades mecânicas induzidas, a qual pode resultar em defeitos e distorções durante a sinterização, bem como resistência mecânica inferior em regiões de baixa compactação. Por outro lado, uma maior homogeneidade de densidades pode ser obtida pelo processo de prensagem isostática. Neste processo utiliza-se de um molde constituído de diversas partes, sendo a principal parte uma matriz elastomérica flexível. A cavidade da matriz elastomérica é preenchida pelo pó e é posteriormente selada. A superfície externa da matriz elastomérica é comprimida por um fluido pressurizado de forma gradual pela ação de uma prensa isostática. Entretanto, a geometria desejada da peça final é difícil de ser alcançada neste processo e o projeto de um molde otimizado é normalmente realizado por tentativa-erro.

Atualmente, independentemente do processo utilizado, boa parte dos produtos em PTFE são compactados e sinterizados em peças de dimensões maiores e a geometria final do produto é obtida por usinagem após sinterização. As operações de usinagem exigidas em um produto em PTFE variam desde pequenas correções de dimensões até grandes cortes no material, que geralmente se

devem às limitações nos processos de prensagem e/ou às deformações induzidas pela sinterização, muitas vezes difíceis de serem previstas no projeto do molde.

Neste contexto, a modelagem do processo de prensagem de pós é uma ferramenta bastante útil para a melhoria das principais etapas do processo de fabricação, como por exemplo, a otimização do conceito, formas e dimensões do molde para a redução do sobrematerial de usinagem, a melhoria da distribuição de densidades e a adequação dos níveis de pressão necessários durante o processo de compactação. Além disso, a simulação do processo de prensagem pode ser utilizada como base para a simulação do processo de sinterização. Parâmetros como distribuição de densidades e deformações residuais na peça compactada têm um papel fundamental nas deformações de sinterização assim como nas propriedades mecânicas do produto final.

2. MATERIAIS

O PTFE faz parte do grupo dos fluoropolímeros ou polímeros fluorados, cuja característica principal é a alta estabilidade química que permite sua aplicação em meios corrosivos que degradam outros polímeros convencionais⁽³⁾. Tal propriedade resulta da força de ligação dos átomos de flúor e carbono e a proteção quase que total da cadeia de carbono pelos átomos de flúor⁽⁴⁾. O PTFE apresenta uma temperatura de fusão alta ($\sim 330\text{ }^{\circ}\text{C}$) que lhe confere uma boa resistência mecânica a elevadas temperaturas de trabalho (até 260°C)⁽⁵⁾. A resistência do material pode ainda ser alterada com adição de outros componentes, comumente denominados de “cargas” - como por exemplo fibras de carbono e/ou pós metálicos - que propiciam características mais apropriadas, tais como melhorias na resistência ao desgaste, ductilidade ou rigidez dependendo da aplicação desejada. As desvantagens na utilização do PTFE na indústria de polímeros estão no custo relativamente elevado da matéria-prima e dos processos de fabricação⁽⁴⁾.

Quanto a sua forma, o material pode ser um pó fino com partículas de dimensões da ordem 10^{-6} m , que se aglomeram facilmente no manuseio ou mesmo no transporte, tornando difícil o preenchimento uniforme dos moldes e limitando sua aplicação em prensagem em matrizes rígidas. O material pode também ser encontrado na forma de pequenos grãos ou aglomerados de partículas com dimensões da ordem de $5 \times 10^{-4}\text{ m}$, que lhe confere maior fluência para o preenchimento dos moldes, tornando viável sua aplicação em processos que exigem maior uniformidade no preenchimento inicial do molde, como é o caso da prensagem isostática.

O material em estudo neste trabalho é o PTFE puro em forma granulada com densidade aparente de $0,86\text{ g/cm}^3$. A granulometria do material foi obtida por peneiramento de três amostras de 100 g do material. Na Figura 1 são mostrados foto do pó polimérico e o gráfico da sua distribuição granulométrica.

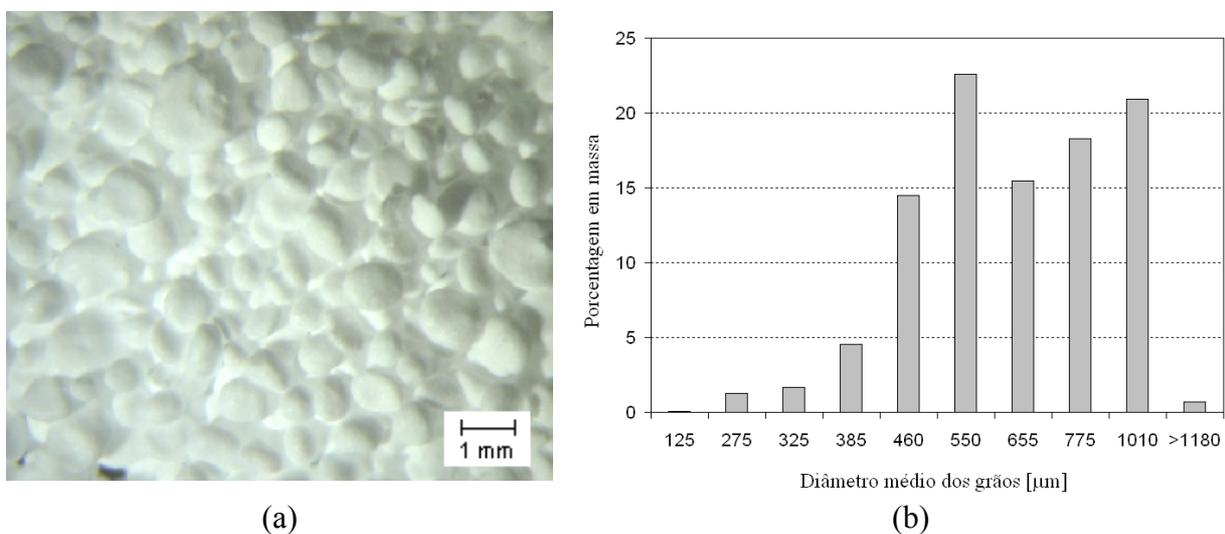


Figura 1. (a) Foto e (b) distribuição granulométrica do PTFE estudado

3. MODELAGEM DO PROCESSO DE Prensagem UNIAXIAL

3.1 Estudo de caso

O estudo de caso utilizado neste trabalho é o da prensagem uniaxial em matriz rígida de um cilindro em PTFE. A modelagem do processo foi realizada utilizando-se o método dos elementos finitos, o modelo geométrico é apresentado na Figura 2 e foi desenvolvido no programa ABAQUS®.

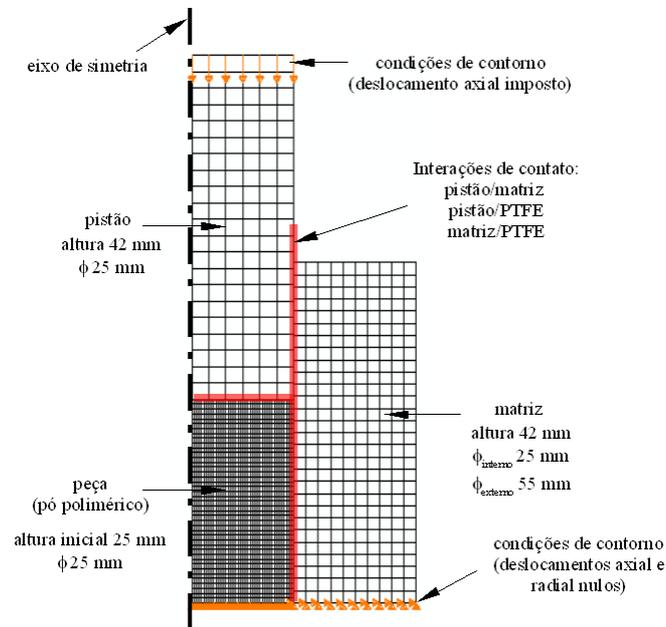


Figura 2. Modelo axissimétrico do dispositivo utilizado para a compactação

O modelo axissimétrico é composto por três estruturas: pistão, matriz e a peça (pó polimérico) a ser compactada a partir do pó polimérico. O pistão e a matriz foram modelados com elementos axissimétricos de 4 nós (cax4) com modelo linear elástico, sendo adotado o módulo de elasticidade $E = 200$ GPa e o coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ (aço). O pó de PTFE foi modelado utilizando-se 400 elementos axissimétricos de 8 nós (cax8). Nas interfaces das estruturas existem superfícies de contato modeladas utilizando os algoritmos tipo *small sliding* que são apropriados para este tipo de modelagem, onde as superfícies em contato permanecem planas durante a análise. Foi utilizado o modelo de atrito de Coulomb e os coeficientes de atrito adotados são de 0,15 para interface pistão/matriz e 0,1 para as interfaces pistão/PTFE e matriz/PTFE.

3.1 Ensaios Experimentais

A maior dificuldade para a modelagem do processo de prensagem do PTFE está na escolha de um modelo de material pertinente que represente a compactação do pó polimérico. Considerando-se o material como um meio contínuo, o modelo deve permitir grande variação volumétrica permanente e uma lei de encruamento não-linear, pois a resistência mecânica do material aumenta de forma exponencial a medida que é compactado. Para identificar um modelo deste tipo, diferentes tipos de ensaios mecânicos podem ser realizados em função dos fenômenos que se deseja estudar. Neste trabalho o modelo foi identificado a partir de um ensaio volumétrico em prensa isostática, de ensaios triaxiais verdadeiros originais e ensaio de compressão uniaxial simples.

O ensaio volumétrico permite obter o grau de compactação do material em função de uma pressão hidrostática aplicada⁽⁶⁾. Para isso foi utilizado uma prensa isostática e um molde flexível elastomérico. Neste ensaio o pó polimérico é inserido no molde flexível em forma de uma casca esférica e submetido a ação de uma prensa isostática. Para diferentes níveis de pressão do fluido da prensa o volume do material compactado é medido após o descarregamento, obtendo-se a deformação logarítmica plástica volumétrica ϵ_{vol}^{pl} , definida na Equação (1),

$$\varepsilon_{vol}^{pl} = \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (1)$$

onde V é o volume medido após compactação e V_0 o volume inicial do material. O ensaio volumétrico permite a obtenção da curva mostrada na Figura 3.

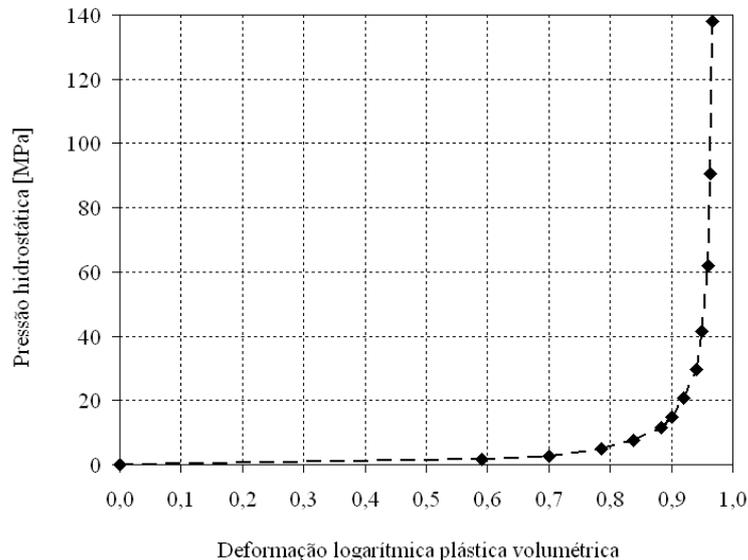


Figura 3. Ensaio volumétrico em prensa hidrostática: pressão do fluido da prensa em função da deformação permanente da massa de PTFE compactada (densidade inicial de $0,86 \text{ g/cm}^3$)

Os ensaios triaxiais verdadeiros foram realizados utilizando o dispositivo esquematizado na Figura 4. O dispositivo, adaptado da idéia inicialmente proposta por Pearce (1972)⁽⁷⁾, depois utilizado por Shima et Mimura (1986)⁽⁸⁾, Abou-Chedid (1993)⁽⁹⁾ et Gu et al. (2001)⁽¹⁰⁾, foi desenvolvido por Canto et al.⁽⁶⁾ no LMT-Cachan para ser acoplado numa máquina triaxial verdadeira que possui 6 atuadores, dois a dois alinhados perpendicularmente. O dispositivo é constituído por 6 blocos que se deslocam uns sobre os outros formando no interior uma cavidade paralelepípedica onde é depositado o material a ser ensaiado. Conseqüentemente o ensaio é realizado num corpo-de-prova paralelepípedico podendo-se variar as suas dimensões nas três direções independentemente. Além disso o dispositivo permite a aplicação de grandes deslocamentos ou grandes deformações no corpo-de-prova.

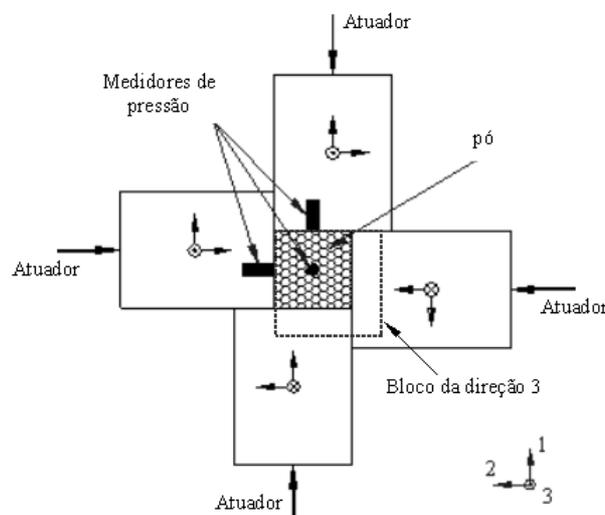


Figura 4. Esquema do dispositivo para ensaios triaxiais verdadeiros sob a ação de grandes deformações

O objetivo do ensaio triaxial foi traçar diferentes trajetetos de carregamento no plano meridiano dos invariantes de tensão, p vs. q . Neste plano, p é definido pela Equação (2) como sendo a tensão média definida em função do primeiro invariante das tensões (I_1), q é a tensão equivalente de von Mises dada pela Equação (3) em função do segundo invariante de tensões desviadoras (J_2) e σ_1 , σ_2 , σ_3 , são as tensões principais.

$$p = \frac{I_1}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2)$$

$$q = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (3)$$

Na Figura 7 são mostrados os resultados obtidos para três diferentes trajetetos de carregamento: ensaio hidrostático ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$), ensaio triaxial ($\epsilon_1 \neq \epsilon_2 \neq \epsilon_3$) e ensaio oedométrico ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$; $\epsilon_3 \neq 0$).

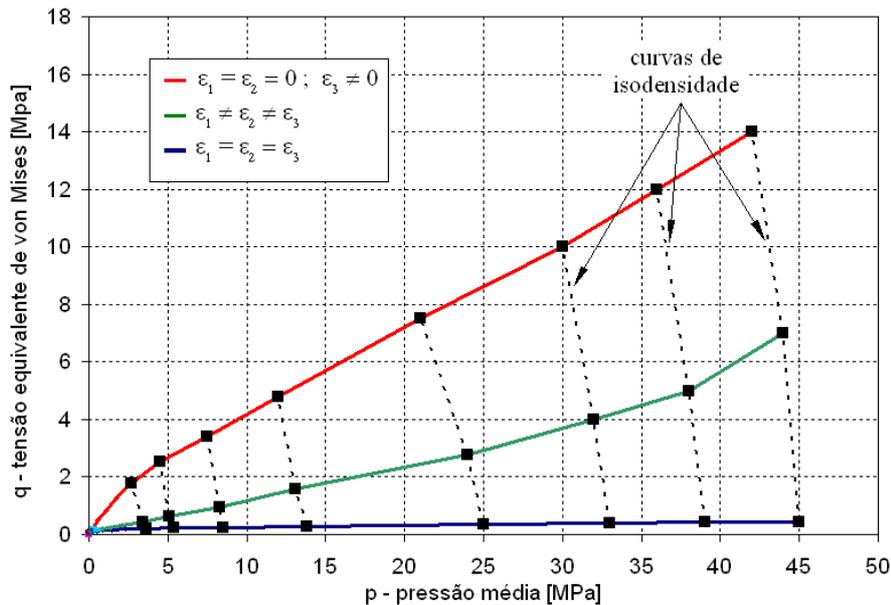


Figura 5. Trajetetos de carregamento e curvas de isodensidades de diferentes ensaios triaxiais verdadeiros traçados no plano meridional p vs. q

O volume do corpo-de-prova é obtido em função dos deslocamentos dos atuadores para cada instante dos ensaios, possibilitando traçar para os três trajetetos pontos de mesma densidade. Analisando tais pontos, conclui-se que um modelo elíptico tipo *cap* pode ser ajustado às curvas de isodensidades. O modelo de Drucker-Prager/*cap* implementado no programa ABAQUS® foi escolhido e é descrito a seguir.

3.3. Modelo de *Drucker-Prager/cap*

O modelo de material de Drucker-Prager/*cap* é mostrado no plano meridional (p vs. q) do espaço das tensões na Figura 6. A superfície de plastificação do modelo é formada por dois segmentos principais⁽¹¹⁾: uma superfície de plastificação por cisalhamento (F_s) e outra superfície elíptica tipo *cap* (F_c) que intercepta o eixo das tensões hidrostáticas. A superfície *cap* possibilita um mecanismo de encruamento que representa a compactação do material.

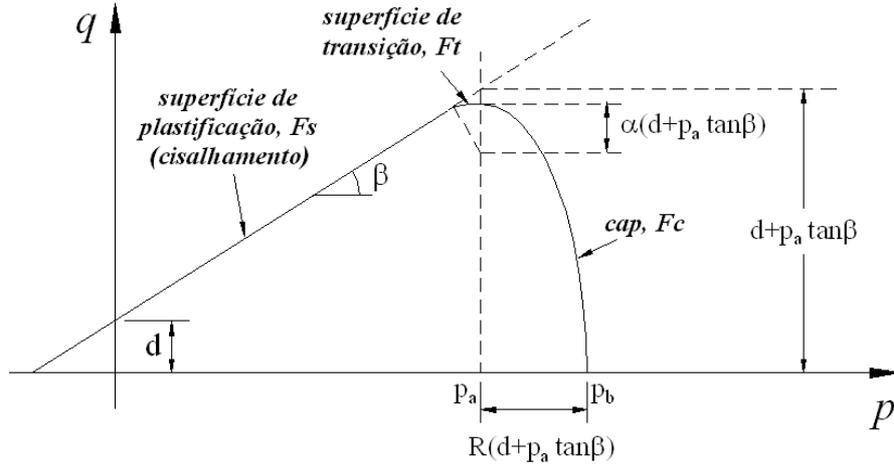


Figura 6. Modelo modificado de Drucker-Prager/cap: superfícies de plastificação no plano meridional ⁽¹¹⁾

Na Equação (4) é mostrado o critério de Drucker-Prager representado na Figura 6 pela superfície F_s , onde p e q foram definidos anteriormente respectivamente pela Equação (2) e Equação (3). O parâmetro β é o ângulo de atrito interno e d é a coesão do material.

$$F_s = q - p \operatorname{tg}(\beta) - d = 0 \quad (4)$$

A superfície cap é escrita na Equação (5), onde R é um parâmetro do material que controla sua forma, p_a é um parâmetro de evolução que representa o ponto de transição entre encruamento/amolecimento e é definido na Equação (6). O parâmetro α é um número pequeno (tipicamente entre 0,01 e 0,05) usado para definir a superfície de transição (F_t) dada pela Equação (7). A lei de encruamento/amolecimento é definida por uma função que relaciona a tensão hidrostática de escoamento na compressão (p_b) com a deformação plástica volumétrica.

$$F_c = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[\frac{R q}{(1 + \alpha - \alpha / \cos(\beta))} \right]^2} - R(d + p_a \operatorname{tg}(\beta)) = 0 \quad (5)$$

$$p_a = \frac{p_b - R d}{1 + R \operatorname{tg}(\beta)} \quad (6)$$

$$F_t = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[q - \left(1 - \frac{\alpha}{\cos(\beta)} \right) (d + p_a \operatorname{tg}(\beta)) \right]^2} - \alpha (d + p_a \operatorname{tg}(\beta)) = 0 \quad (7)$$

3.4. Identificação do modelo de Drucker-Prager/cap

Considerando-se o estudo de caso deste trabalho e ainda os problemas mais comuns da indústria de fabricação de peças em PTFE, nota-se que os trajetos de carregamentos esperados possuem parcela hidrostática (p) muito mais intensa que a parcela desviadora (q). Sendo assim a superfície cap exerce uma maior importância nos resultados da modelagem quando comparada com a superfície de Drucker-Prager. Dessa forma, não houve a necessidade de se identificar o parâmetro β e este foi adotado como sendo igual a 30° . Por outro lado, levando-se em conta que sob pressão

hidrostática nula o material em pó apresenta resistência desprezível ao cisalhamento, o valor da coesão foi escolhido como sendo um valor baixo ($d = 0,1$ MPa) já que não pode ser nulo, caso contrário o modelo apresentaria problemas numéricos.

A medida que a superfície de plastificação *cap* encrua, esta representa níveis de consolidação ou compactação do material, assumindo-se a hipótese de que níveis de compactação iguais correspondem a estados do material com densidades iguais, pode-se considerar a superfície *cap* como uma curva de isodensidades quando traçada no plano q vs. p . Assim os parâmetros α e R podem ser ajustados aos pontos de isodensidade da Figura 5, e adotando-se os valores de $\alpha = 0,02$ e $R=0,6$ a curva *cap* se ajusta bem aos diferentes níveis de compactação conforme mostrado na Figura 7.

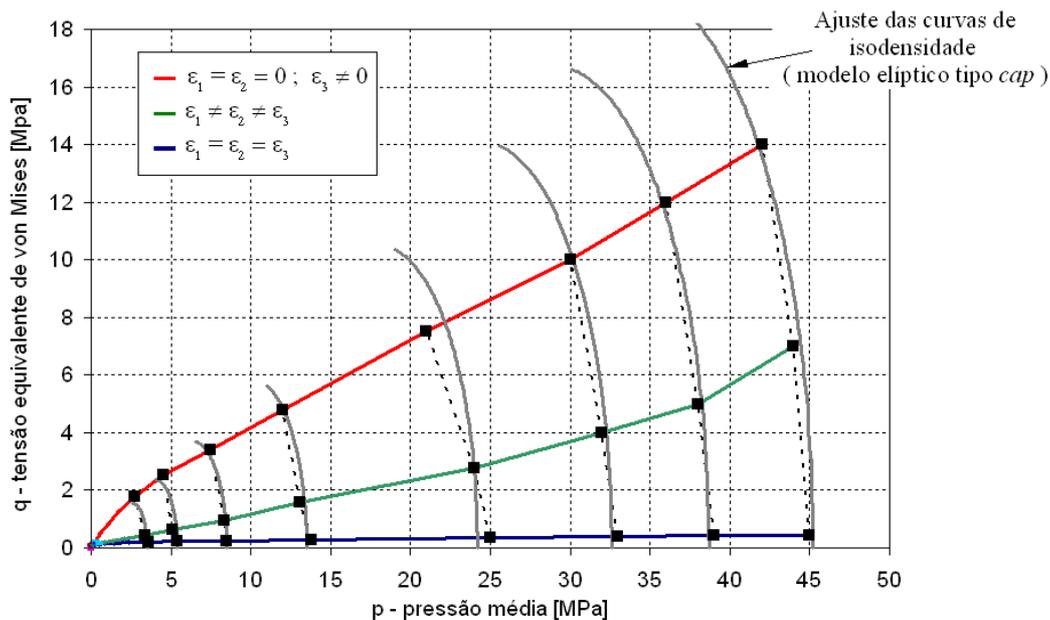


Figura 7. Trajetos de carregamento e curvas de isodensidades ajustadas pelo modelo de *Drucker-Prager/cap*

É importante notar que o ajuste dos valores de R e α foi realizado considerando-se os valores de β e d anteriormente definidos, pois estes últimos também entram na formulação da superfície *cap* (ver Equações 5, 6 e 7). A lei de encruamento da superfície *cap* tem como parâmetro de entrada a curva obtida do ensaio volumétrico apresentada na Figura 3.

Uma limitação do modelo de *Drucker-Prager/cap* para a modelagem proposta é a sua parcela elástica que é linear. Entretanto, os parâmetros elásticos foram identificados em ensaios de compressão simples em corpos-de-prova com diferentes níveis de compactação. Notou-se que estes parâmetros evoluem a medida que o material é compactado⁽⁶⁾. Mas, devido à limitação do modelo foram escolhidos parâmetros obtidos dos ensaios realizados com o material no nível mais alto de compactação ($E = 450$ MPa; $\nu = 0,485$)⁽⁶⁾.

4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O estudo de caso foi reproduzido experimentalmente para a validação do modelo utilizado na simulação do processo de prensagem do pó PTFE. Para isso o dispositivo composto por um cilindro e um pistão foi confeccionado em aço e foi acoplado numa máquina de ensaios uniaxiais (MTS com capacidade de 100 kN). Na Figura 8 são comparadas as curvas de carga vs. deslocamento do ensaio experimental com a curva obtida pela simulação. Nota-se uma boa coerência entre os resultados. Quanto às dimensões da peça compactada, a medida experimental para a altura final do cilindro foi de 9,58 mm enquanto que a altura obtida da simulação foi de 9,69 mm após o descarregamento.

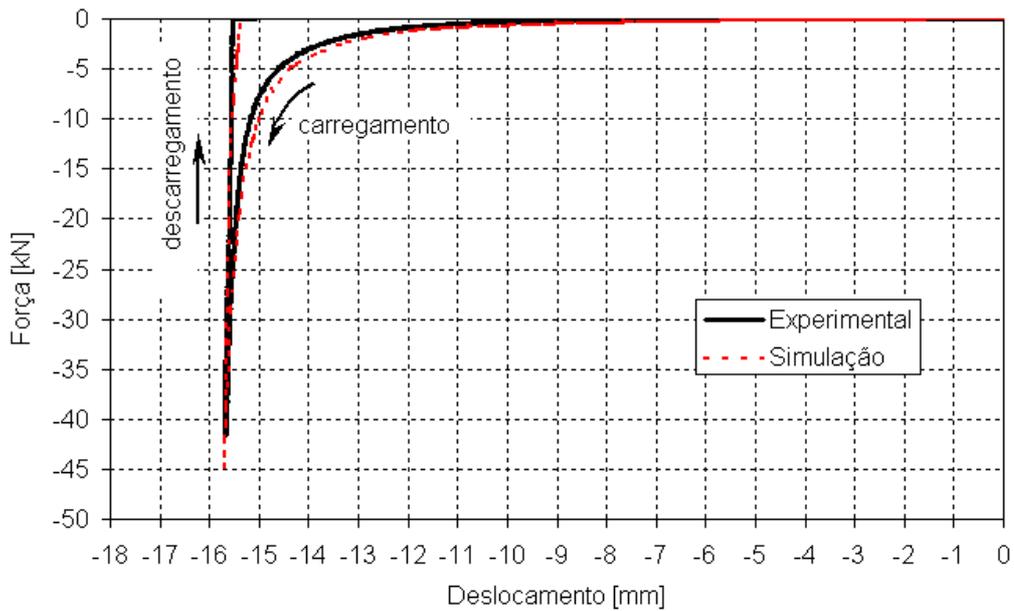


Figura 8. Comparação de resultados experimentais e teóricos: curvas de carga vs. deslocamento para o estudo de caso proposto

Neste estudo de caso, por se tratar de um processo de prensagem em matriz rígida o objetivo principal da simulação não está na previsão da geometria da peça compactada, mas sim de suas propriedades mecânicas. Um parâmetro importante que pode ser avaliado é a distribuição de densidades na peça compactada conforme ilustrado na Figura 9. O material polimérico foi compactado por uma tensão de aproximadamente 20 MPa (valor usualmente utilizado na indústria) correspondente à aplicação de 10 kN no pistão de seção cilíndrica com diâmetro de 25 mm. A diferença de densidades prevista na simulação é de 2,9 % relativas às regiões de maior e menor densidades.

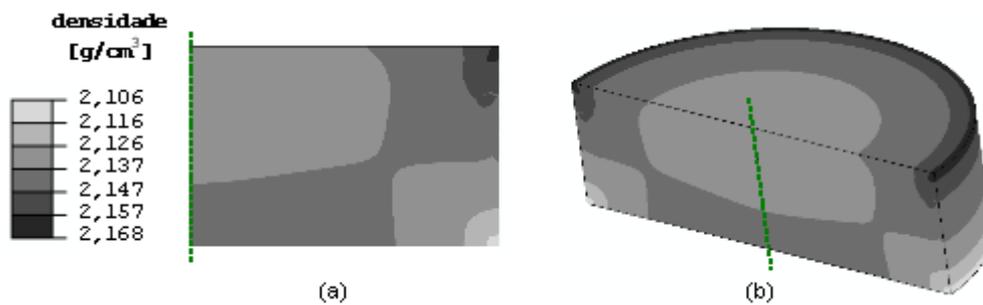


Figura 9. Isovalores de densidade da peça compactada por uma tensão nominal média de 20 MPa: (a) vista 2D da seção modelada (axissimétrica) (b) representação espacial (3D)

Os isovalores de densidades mostrados na Figura 9 não são variáveis de saída do programa ABAQUS® e foram obtidos a partir da deformação plástica volumétrica, conforme mostrado na Equação (8).

$$d = d_0 \exp(-\varepsilon_{vol}^{pl}) \quad (8)$$

onde d_0 é a densidade aparente do pó polimérico antes da compactação.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho aparece como primeira contribuição científica na modelagem numérica da prensagem de pós poliméricos, e foi possível constatar a viabilidade dessa modelagem na simulação computacional do processo de prensagem uniaxial do PTFE. Apesar dos resultados obtidos reproduzirem com fidelidade os esforços de reação do material durante o processo de prensagem, a distribuição de densidades na peça compactada não foi ainda validada experimentalmente, fato que sugere, como trabalho futuro, o desenvolvimento de uma técnica experimental para a avaliação da acuracidade do modelo em prever distribuição de densidades.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Tecnofluor Indústria e Comércio Ltda pelo material e informações fornecidas, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e a Escola de Engenharia de São Carlos no Brasil assim como à Ecole Normale Supérieure de Cachan na França pelo apoio à R. B. Canto.

7. REFERÊNCIAS

1. TERVOORT, T. A., VISJAGER, J. F., SMITH, P. Melt-processable poly(tetrafluoroethylene) – compounding, fillers and dyes. *Journal of Fluorine Chemistry*, 114, pp.133-137. 2002.
2. HAMBIR, S. S., JOG, J. P., NADKARNI, V. M., Strength development in powder processing of poly(tetrafluoroethylene). *Polymer Engineering and Science*, 34, 13, pp.1065-1069. 1994.
3. BONNET, Jean-François. Polymères fluorés. *Techniques de l'Ingénieur - AM3390*, 2004.
4. JAHIER, Daniel. Le PTFE (polytétrafluoroéthylène) : présentation et applications. *Publications CETIM*, 102p. 1992.
5. YAMAGUCHI, K., TAKACHI, M., HIRAKAWA, S., Deformation behavior of polytetrafluoroethylene films under tensile stress at various temperatures. *Journal of Applied Polymer Science*, 54, 11, p.1625-1630. 1994.
6. CANTO R. B., DE CARVALHO, J., SCHMITT, N., BILLARDON, R. Étude de la compaction d'une poudre polymérique sous chargements triaxiaux. In: *Colloque National MECAMAT - Approches multi-échelles en mécanique des matériaux.*, Aussois, França, 2006.
7. PEARCE, J. A. A New Triaxial Apparatus, In: G. T. Foulis, Henley on Thames. *Proceedings, Roscoe Memorial Symposium*, pp. 330-339. 1972.
8. SHIMA, S.; MIMURA, K., Densification behaviour of ceramic powder, *International Journal of Mechanical Sciences*, 28, 1, p.53-59. 1986.
9. ABOU-CHEDID, G. V. Experimental yield surface studies for the compaction of metal powder. *Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Materials Science and Engineering*, 136 p. 1993.
10. GU, C.; KIM, M.; ANAND, L. Constitutive equations for metal powders: Application to powder forming processes. *International Journal of Plasticity*, v.17, n.2, p.147-209. 2001.
11. HIBBITT, KARLSSON e SORENSEN. *ABAQUS user's Manual - Versão 6.1, v.2*. 2000.

SIMULATION OF THE UNIAXIAL PRESSING PROCESS OF PTFE POWDER

Rodrigo Bresciani Canto^{1,2}, Nicolas Schmitt², Jonas de Carvalho¹, René Billardon²

¹Universidade de São Paulo – EESC, Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos - SP, Brasil,

²LMT-Cachan, CNRS (UMR 8535), 61 Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France.
canto@sc.usp.br, schmitt@lmt.ens-cachan.fr, prjonas@sc.usp.br, billardon@lmt.ens-cachan.fr

***Abstract.** The objective of this paper is to present the finite element simulation of the uniaxial pressing process of PTFE powder in order to predict the distribution of the density within the compacted specimen. The Drucker-Prager/cap model implemented in the ABAQUS software is used to model the mechanical behaviour of the powder. The material parameters of this model are identified from hydrostatic and original triaxial tests.*

***Keywords:** Pressing process, PTFE powder, finite element simulation, triaxial tests.*