



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA Prensagem UNIAXIAL DO POLITETRAFLUORETILENO (PTFE) CONSIDERANDO A DEPENDÊNCIA DO TEMPO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO

Lucas A. Fernandes^{1*}, Matheus Furlan¹, Salvino M. Macêdo¹,
Vinicius F. Sciuti², Rodrigo B. Canto^{1,2}

1 - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Universidade Federal de São Carlos

2 - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos
lucas.fernandes@estudante.ufscar.br

RESUMO

O politetrafluoretileno (PTFE) é um polímero com diversas aplicações devido a sua alta estabilidade química, excelentes propriedades tribológicas e alta resistência mecânica, mesmo quando utilizado em temperaturas extremas para polímeros. O PTFE apresenta alta viscosidade no estado fundido, o que torna seu processamento peculiar para polímeros, sendo este, composto pela prensagem a frio de grânulos deste material, seja ela isostática ou uniaxial, seguida de sinterização. Durante a prensagem uniaxial, pode-se atingir estados de tensão no pó nos quais os efeitos viscosos se tornam relevantes, sendo importante modelar o comportamento viscoso do PTFE durante a prensagem. Porém, a modelagem computacional desse processo é uma tarefa complexa e se mostra necessária a determinação dos parâmetros do material através de métodos experimentais para que o modelo computacional seja calibrado. No presente trabalho, foram realizados ensaios de prensagem uniaxial com três diferentes níveis de prensagem (10, 20 e 40 MPa), finalizados com patamares de deslocamento do pistão para estudar a relaxação de tensões nas três condições de carregamento. Os experimentos foram modelados no software AbaqusTM, e foi utilizado o modelo de material Drucker-Prager/Cap (DP-CAP) com a lei viscoplástica do tipo Singh-Mitchell. Os parâmetros da parte elasto-plástica do modelo foram retirados da literatura. Embora o modelo DP-CAP seja comumente utilizado para simular a prensagem de pós quando o efeito do tempo no comportamento mecânico é desprezível, modelos que levam em conta estes efeitos existem, porém são escassos na literatura. Os parâmetros da lei viscoplástica foram identificados com auxílio da análise comparativa entre resultados experimentais e numéricos. Os resultados simulados das curvas de força no pistão ao longo do tempo foram comparados com os das curvas experimentais, sendo os parâmetros de Singh-Mitchell variados até que se atingiu uma correspondência satisfatória. Dessa forma, conclui-se que o modelo de DP-CAP, com a incorporação da lei viscoplástica do tipo Singh-Mitchell, foi adequado para descrever o comportamento do fenômeno de relaxação de tensões para os três níveis de prensagem estudados.

Palavras-chaves: Prensagem, Relaxação, Singh-Mitchell, PTFE, Simulação Computacional

INTRODUÇÃO

A alta viscosidade do politetrafluoretileno (PTFE) no estado fundido dificulta sua conformação através dos processos mais comuns para polímeros termoplásticos, como extrusão e injeção⁽¹⁾, tornando a prensagem seguida de sinterização, a alternativa mais usual para esse material. O estudo da prensagem do pó de PTFE via Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se mostrado uma importante ferramenta para a otimização dos parâmetros de processamento. Para isso, é vital a identificação de modelos constitutivos que descrevam o comportamento mecânico do pó durante a prensagem, como a aplicação do modelo de plasticidade de Drucker-Prager/CAP (DP-CAP) para descrever o fenômeno de densificação do pó durante o processo⁽¹⁾,

Materiais granulares submetidos a uma tensão compressiva tendem a apresentar comportamento dependente do tempo, como fluência e relaxação de tensões⁽²⁾. A inserção de tais fenômenos no modelo constitutivo do material permite uma melhor representação do real carregamento ao qual o pó é submetido durante a prensagem. Modelos viscoplásticos como o de Singh-Mitchell (Equação A), são comumente utilizados para simular tais fenômenos.

$$\frac{d\varepsilon_{cr}}{dt} = A \cdot \exp(\alpha \cdot \bar{\sigma}_{cr}) \cdot \left(\frac{t_1}{t}\right)^m \quad (A)$$

sendo, $\frac{d\varepsilon_{cr}}{dt}$, a taxa de deformação referente aos efeitos viscoplásticos, $\bar{\sigma}_{cr}$, a tensão efetiva responsável por esta deformação, t, o tempo total e A, α , m e t_1 , parâmetros constitutivos do material.

A lei de Singh-Mitchell foi desenvolvida originalmente para descrever o fenômeno de fluência em materiais granulares sob compressão. O trabalho de Lacerda⁽³⁾ mostrou uma correlação entre os fenômenos de fluência e relaxação de tensões, quando aplicados em materiais granulares, e a validade das leis viscoplásticas para ambos os fenômenos. No presente artigo, foram determinados os parâmetros de Singh-Mitchell para a relaxação de tensões em um pó de PTFE em ensaios de prensagem uniaxial com um patamar de deslocamento na tensão máxima de prensagem. Os melhores valores destes parâmetros foram encontrados com a calibração do modelo de elementos finitos, utilizando o software AbaqusTM para o modelo computacional e o software de otimização iSightTM para estimar os valores dos parâmetros.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material utilizado

Foi utilizado o pó comercial de PTFE Teflon 807-N, fornecido pela Dupont (atual Chermors). Após polimerizado, esse material passa por um processo de peletização para a obtenção de grânulos arredondados, auxiliando na prensagem devido a sua maior fluidez, com tamanho médio de partícula da ordem de 600 μm , grau de cristalinidade de aproximadamente 90% e porosidade de cerca de 60%^(1,4,5).

Procedimento experimental

As prensagens uniaxiais de ação simples foram realizadas em uma matriz metálica cilíndrica com cavidade de 30 mm de diâmetro. Os experimentos foram realizados em uma máquina de ensaio universal modelo MTS Exceed E44.304. Em todos os ensaios, foram utilizados 45 g de PTFE, o que correspondeu a uma altura do pó solto de 61,55 mm e densidade aparente inicial de 1,034 g/cm³. Os valores de força no atuador foram obtidos através da célula

de carga axial da máquina de ensaios e o deslocamento vertical foi obtido através de um transdutor de deslocamento variável linear (LVDT).

Foram realizados três ensaios com diferentes níveis máximos de prensagem, todos com taxa de deslocamento do atuador igual a 1 mm/min. Os valores máximos de força e deslocamento aplicados em cada ensaio podem ser vistos na Tabela 1. As etapas de prensagem em todos os ensaios foram seguidas de um patamar de deslocamento de 300 s, em que a diminuição da força no atuador foi utilizada para a análise do fenômeno de relaxação.

Tabela 1: Dados dos ensaios de prensagem uniaxial..

Tensão axial nominal máxima na prensagem	Força aplicada [kN]	Deslocamento máximo do pistão [mm]
10 MPa	7,51	30,93
20 MPa	14,13	32,73
40 MPa	28,30	33,74

Modelo de elementos finitos

Para simular a prensagem do pó de PTFE, foi criado um modelo axissimétrico no software AbaqusTM. Os pistões e a matriz metálica foram representados por superfícies rígidas, já que as deformações de tais componentes são desprezíveis em relação à deformação do pó. Para representar o pó, utilizaram-se 465 elementos do tipo quadrilátero bilinear com 4 nós, integração reduzida e “*hour-glass control*”, opção que fornece uma rigidez adicional nas regiões mais sensíveis da malha, evitando assim distorções excessivas.

Como modelo constitutivo do pó, utilizou-se o modelo linear elástico e o modelo de plasticidade de DP-CAP com encruamento da superfície do CAP. O comportamento dependente do tempo foi representado pela lei viscoplástica de Singh-Mitchell, já implementada no AbaqusTM. Os parâmetros de DP-CAP para o pó de PTFE foram identificados por Canto⁽¹⁾ e Frédy⁽⁶⁾, os valores do semi eixo (R) da superfície elíptica do CAP e inclinação da superfície de Drucker-Prager (β) foram aumentados para melhorar a sensibilidade do modelo aos efeitos viscoplásticos. A curva de encruamento da superfície CAP foi extraída de Gamboni et al.⁽⁴⁾.

Os parâmetros A e α da lei de Singh-Mitchell foram obtidos a partir do software de otimização iSightTM, com o algoritmo de otimização Hooke-Jeeves. As três curvas experimentais de relaxação foram adicionadas ao software e, de forma iterativa, os parâmetros ótimos para cada nível de prensagem foram encontrados comparando as curvas experimentais com as curvas obtidas por simulação. Em todas as simulações o parâmetro “m” foi fixado em zero.

RESULTADOS

Para cada nível de prensagem, as curvas experimentais foram comparadas com as curvas obtidas pelo MEF. Foi possível reproduzir a queda na força no atuador ao longo do tempo de relaxação, como pode ser observado na Figura 1.

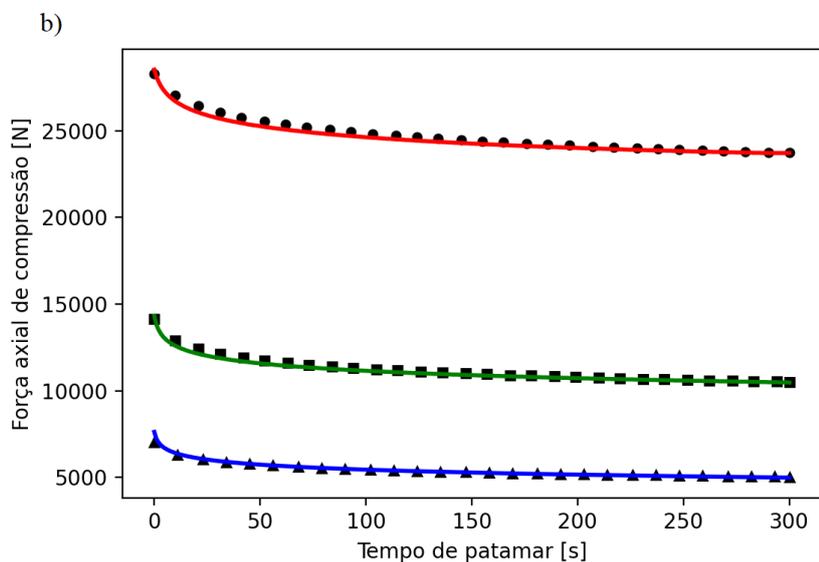
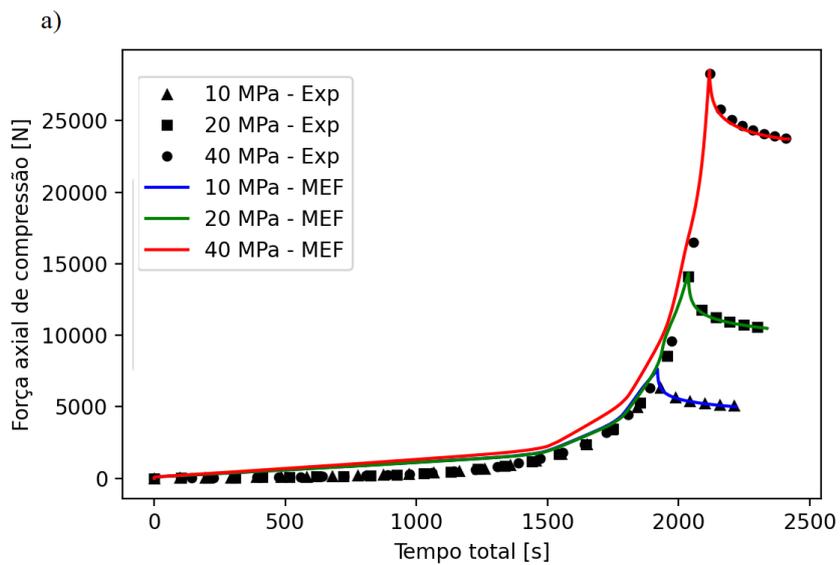


Figura 1 : Comparação entre as curvas obtidas via simulação pelo MEF com as curvas experimentais: a) carregamento completo e b) detalhe para a etapa do patamar de deslocamento (relaxação da carga aplicada).

Na Tabela 2 são mostrados os parâmetros de Singh-Mitchell encontrados para cada nível de prensagem estudado. A progressão observada dos parâmetros indica que o comportamento de relaxação do pó é dependente do nível de prensagem.

Tabela 2 : Parâmetros de Singh-Mitchell encontrados para os diferentes níveis de prensagem do PTFE.

Tensão axial nominal máxima na prensagem	Parâmetros de Singh-Mitchell	
	A [seg ⁻¹]	α [MPa ⁻¹]
10 MPa	$5,0 \times 10^{-8}$	1,86
20 MPa	$1,7 \times 10^{-7}$	1,7
40 MPa	$2,5 \times 10^{-6}$	0,45

CONCLUSÕES

O fenômeno de relaxação de tensões no pó prensado uniaxialmente, caracterizado pela redução da força registrada no atuador ao final da prensagem, foi reproduzido de forma satisfatória pelo método dos elementos finitos. Comprovou-se a aplicabilidade da lei de Singh-Mitchell para descrever o fenômeno de relaxação de tensões durante a prensagem. O software iSight™ foi eficaz na otimização dos parâmetros da lei de Singh-Mitchell.

Para trabalhos futuros, será estudada a aplicação de outros modelos viscoplásticos implementados no software Abaqus™, assim como, a dependência dos efeitos viscosos com a taxa de deformação e a relação entre parâmetros constitutivos do material e o nível de prensagem aplicado.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também o apoio financeiro e institucional da Pró-Reitoria de Extensão da UFSCar e EMBRAPPII (projeto nº 0198878/2020-17) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento através dos processos 2018/02801-4, 2020/08077-6 e 2021/14452-7.

REFERÊNCIAS

1. CANTO, R. B.. Estudo teórico e experimental dos processos de compactação e sinterização do politetrafluoretileno (PTFE). 2007. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil/École Normale Supérieure de Cachan, França.
2. LADE, P. V.; NAM J.; LIGGIO Jr.; C. D.. Stress relaxation behavior in Virginia Beach sand. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 52. p. 813-835. 2015.
3. LACERDA, W. A. Stress relaxation and creep effects in soil deformation. 1972. Tese de Doutorado. University of California, EUA.
4. GAMBONI, O. C.; RIUL, C.; BILLARDON, R.; BOSE FILHO, W. W.; SCHIMITT, N.; CANTO, R. B.. On the formation of defects induced by air trapping during cold pressing of PTFE powder. *Polymer*, v. 82, p. 75-86, 2016.
5. MELO, C. C.; MACÊDO, S.; SCIUTI V. F.; CANTO, R. B. A novel mechanical test for the stress relaxation analysis of polymers. *Polymer Testing*, v. 73, p. 276-283, 2019.
6. FRÉDY, C. Modeling of the mechanical behavior of polytetrafluoroethylene (PTFE) compounds during their compaction at room temperature. 2015. Tese de Doutorado. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.

NUMERICAL SIMULATION OF UNIAXIAL PRESSING OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE (PTFE) CONSIDERING A TIME- DEPENDENT MECHANICAL BEHAVIOR

ABSTRACT

Polytetrafluoroethylene (PTFE) is a polymer with many applications due to its high chemical stability, excellent tribological properties and high mechanical strength, even at extreme temperatures for polymers. PTFE has a high viscosity in the molten state, which makes its processing peculiar among polymers. The PTFE powder is cold pressed, followed by sintering. During uniaxial pressing, the powder can reach stress states where viscous effects become relevant for the pressing. However, the computational modeling of this process is complex, requiring identification and calibration of the material parameters through experimental methods. Here in, uniaxial pressing tests were carried out with three different uniaxial pressing limits (10, 20 and 40 MPa), followed by a period of zero displacement of the piston to study the stress relaxation. The tests were modeled in AbaqusTM software, and the Drucker-Prager/Cap (DPC) material model was used with the Singh-Mitchell viscoplastic law. The parameters of the elasto-plastic portion of the model were taken from the literature. The parameters of the viscoplastic law were identified from the comparative analysis among experimental and numerical results. The computational results force in the piston over time were compared with the experimental data, with the Singh-Mitchell parameters being varied until it reaches a satisfactory correspondence. To conclude, the Drucker-Prager/Cap model combined with the Singh-Mitchell viscoplastic law was adequate to describe the behavior of the stress relaxation phenomena for the three pressing conditions.

Keywords: powder pressing, stress relaxation, Singh-Mitchell, PTFE, numerical simulation