



PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE VALIDAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA PRENSAGEM DO POLITETRAFLUORETILENO (PTFE)

Matheus Furlan^{1*}, Caiuã C. de Melo³, 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

3 - Simulation Americas, RHI Magnesita - Contagem, MG

matheusfurlan@estudante.ufscar.br

RESUMO

O politetrafluoretileno (PTFE) é um polímero que apresenta diversas características de interesse, como tribológicas, estabilidade química e alta temperatura de fusão cristalina. Isso permite sua utilização em ambientes corrosivos e em sistemas de vedação. Porém, esse material apresenta uma alta viscosidade no seu estado fundido, inviabilizando o uso de rotas de processamento comuns para termoplásticos, como injeção e extrusão. Para isso, recorre-se à prensagem de pó seguida de sinterização, procedimento frequentemente utilizado em pós cerâmicos e metálicos. A etapa de prensagem do pó influencia significativamente as propriedades do compacto verde e do produto final. A simulação computacional do processo de prensagem é de extrema importância para a melhoria do produto final e para o projeto do ferramental envolvido. Para a obtenção de resultados representativos do processo de prensagem são necessários modelos numéricos capazes de prever as grandes deformações permanentes no pó, que é frequentemente considerado como um meio contínuo para simulações pelo método dos elementos finitos. Estas deformações representam desde o empacotamento dos grânulos e a própria deformação volumétrica dos mesmos, que por sua vez, são resultantes de combinações de tensões normais e cisalhantes. Neste trabalho, a robustez do modelo computacional foi verificada a partir de um procedimento de validação experimental, já utilizado para a modelagem computacional de um pó de alumina. Tal procedimento é composto por duas etapas, sendo a primeira uma prensagem uniaxial (PU) em ferramental metálico composto por matriz de cavidade cilíndrica, pistões instrumentados com sensores axiais de pressão e célula de carga axial acoplada à matriz. A segunda etapa é uma prensagem isostática (PI) do compacto verde obtido na PU. O gradiente heterogêneo de densidades obtido na etapa de PU, devido a fenômenos tribológicos, é diminuído consideravelmente na etapa de PI. Com isso, as regiões menos densas apresentam uma deformação volumétrica resultante maior quando comparada às das regiões mais densas, gerando um compacto com perfil similar ao de um tronco de cone. Uma tensão nominal de ~43,3 MPa foi aplicada na etapa de PU, enquanto a PI foi aplicada em quatro passos, com pressões de 20, 25, 30 e 40 MPa, sendo a geometria do compacto verde medida entre os passos. As simulações computacionais das etapas foram realizadas no software AbaqusTM com o modelo de material de Drucker-Prager/Cap e seus parâmetros extraídos da literatura. Os resultados foram confrontados, havendo uma alta correspondência entre os valores experimentais e teóricos, exceto para a pressão no sensor do pistão inferior, que apresentou uma discrepância de 14% ao final da etapa de PU.

Palavras-chave: PTFE; prensagem de pó; simulação computacional; procedimento de validação.

INTRODUÇÃO

O processo de prensagem de pó seguido de sinterização é uma rota de processamento comum em materiais cerâmicos e na metalurgia do pó. No caso do politetrafluoretileno (PTFE), apesar de ser considerado um termoplástico, a adoção dessa rota faz-se necessária devido à alta viscosidade do material em estado fundido, dificultando processos de extrusão e injeção.

A prensagem uniaxial (PU) em matriz rígida é o processo mais utilizado para a conformação do PTFE, mas pode ser também realizado em prensagem isostática (PI) (em matriz flexível), ambos em temperatura ambiente⁽¹⁾. O compacto verde resultante da prensagem é inserido em um forno e submetido a sinterização. O estudo e simulação da prensagem do pó de PTFE via Método dos Elementos Finitos (MEF) pode evitar a propagação de defeitos e imperfeições no produto final. Neste contexto, a identificação de modelos constitutivos para representar a prensagem do material em pó é de extrema importância. O modelo de Drucker-Prager/Cap (DPC) é comumente utilizado para simular a prensagem de materiais granulares e consiste em um modelo de plasticidade com múltiplas superfícies de escoamento (*i.e.* superfícies de Drucker-Prager, de transição e Cap) e uma curva de encruamento⁽³⁾, como apresentado na Figura 1.

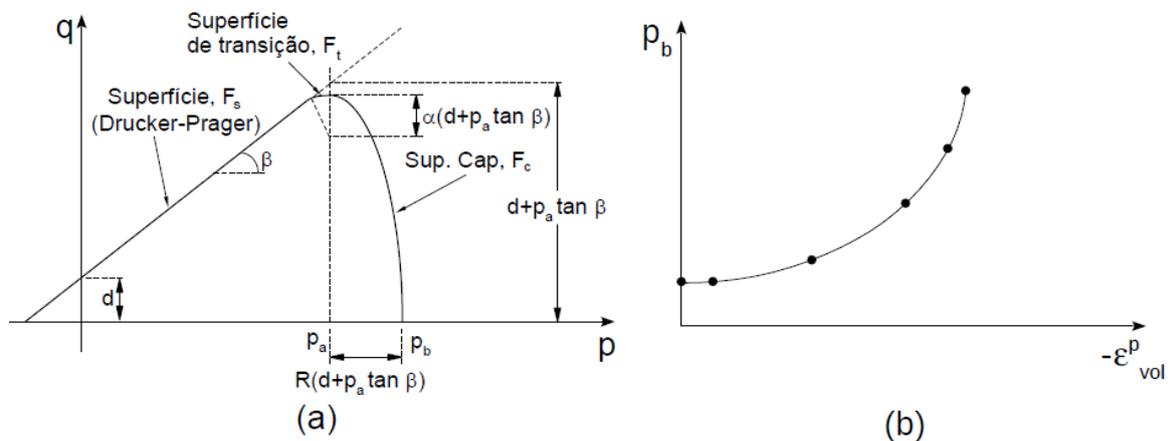


Figura 1 : Representação esquemática do modelo de DPC implementado no AbaqusTM: (a) superfície de escoamento e seus parâmetros, (b) curva associada à lei de encruamento.

A superfície de falha Drucker-Prager, F_s , é definida por uma reta e representa o comportamento dilatante do material⁽⁸⁾. Já a superfície Cap, F_c , é definida por uma elipse e representa o comportamento de adensamento do material. Essa superfície evolui conforme a lei de encruamento (Figura 1(b)). A superfície de transição, F_t , tem apenas função numérica de suavizar a transição entre superfícies.

Para a identificação e calibração do modelo de DPC, são necessários diferentes experimentos com diferentes trajetórias de cargas. Usualmente são utilizados ensaios de compressão simples, compressão diametral (ensaio brasileiro), ensaios edométricos, isostáticos e triaxiais⁽²⁾. Validações e verificações são necessárias para garantir que a simulação represente de forma satisfatória o problema físico. Para este fim, foi reproduzido, em um pó comercial de PTFE, o procedimento de validação já utilizado em alumina atomizada por Melo *et. al*⁽⁴⁾.

MATERIAIS E MÉTODOS

O PTFE utilizado é uma grade comercial, Teflon 807-N, fornecido pela DuPont. Esta grade é atualmente comercializada pela Chemours com o código 807N X. Essa resina passa por um processo após a polimerização que forma pellets arredondados com boa fluidez, chamados de grânulos, com tamanho médio da ordem de 600 μm com grau de cristalinidade de $\sim 90\%$ e porosidade de 60%^(2,6).

Procedimento experimental

O procedimento experimental consiste em duas etapas: prensagem uniaxial (PU) com uma matriz rígida, seguida de prensagem isostática (PI) (Figura 2). O atrito entre o pó e as partes metálicas dificulta a compactação, causando um gradiente de densidade ao longo da peça. Na etapa posterior, regiões menos compactadas apresentam maior deformação volumétrica, ou seja, a parte superior do compacto (mais densa) se compacta menos que a parte inferior (menos densa), resultando em compacto verde com uma forma irregular, que se aproxima de um tronco de um cone.

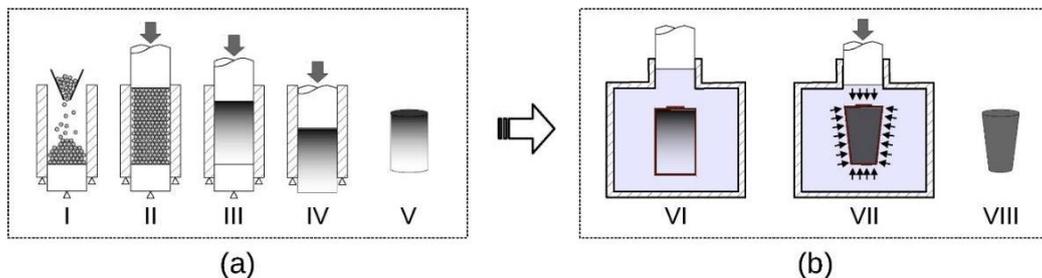


Figura 2 : Etapas do procedimento experimental: (a) prensagem uniaxial (PU) e (b) prensagem isostática (PI). Adaptado de Melo *et. al*⁽⁴⁾.

A compactação uniaxial foi realizada em uma máquina de ensaio universal INSTRON-5500R. Como o PTFE apresenta um baixo coeficiente de atrito, foi utilizada uma matriz rígida com uma alta razão altura/diâmetro, maximizando os efeitos de perda de carga ao longo da matriz. A altura inicial do pó foi de 464 mm em um diâmetro de 50 mm, resultando em uma densidade aparente de 933 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. A etapa de carregamento foi executada com velocidade de 5 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ até uma carga nominal de 85 kN ($\sim 43,3$ MPa), seguido por descarregamento a 1 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Foram utilizados pistões com sensores de pressão axiais e uma célula de carga axial acoplada à matriz para medir a reação da força de atrito.

Os ensaios foram realizados em uma prensa isostática AIP CP360. Cada ensaio atingiu um nível de pressão: 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa e 40 MPa, o qual foi mantido por um minuto antes do descarregamento lento, evitando a quebra do CDP devido ao ar aprisionado⁽⁶⁾. O perfil final foi traçado com a medição do comprimento e do diâmetro ao longo de 20 pontos utilizando um paquímetro.

Simulação em elementos finitos

Os parâmetros do modelo de DPC utilizados para representar o pó de PTFE foram identificados por Frédy⁽³⁾. Esse modelo permite a evolução dos parâmetros elastoplásticos em função do nível de compactação. Os ensaios de PU e de PI foram simulados com um modelo axissimétrico. O pó, a matriz e os pistões foram simulados como estruturas deformáveis. Para economia de custo computacional, a célula de carga axial acoplada à matriz não foi inserida no modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais foram comparados com o MEF. Os dados provenientes dos sensores nos pistões, célula de carga, deslocamento e força da máquina de ensaio apresentaram boa concordância com a simulação numérica. Na Tabela 1 é apresentada a comparação do deslocamento, força na célula de carga e pressão nos pistões no ponto de carregamento máximo.

Tabela 1 : Comparação dos resultados experimentais e via MEF no ponto de carregamento máximo.

	Experimental	MEF	Desvio Percentual
Deslocamento [mm]	265,2	267,4	0,83%
Força célula de carga axial acoplada à matriz [kN]	55,6	59,7	7,4%
Pistão superior [MPa]	37,2	39,2	5,4%
Pistão inferior [MPa]	17,2	14,8	- 14%

Na Figura 3 é apresentada a comparação entre o perfil obtido experimentalmente e via MEF para todas as pressões após a PI e a diferença absoluta.

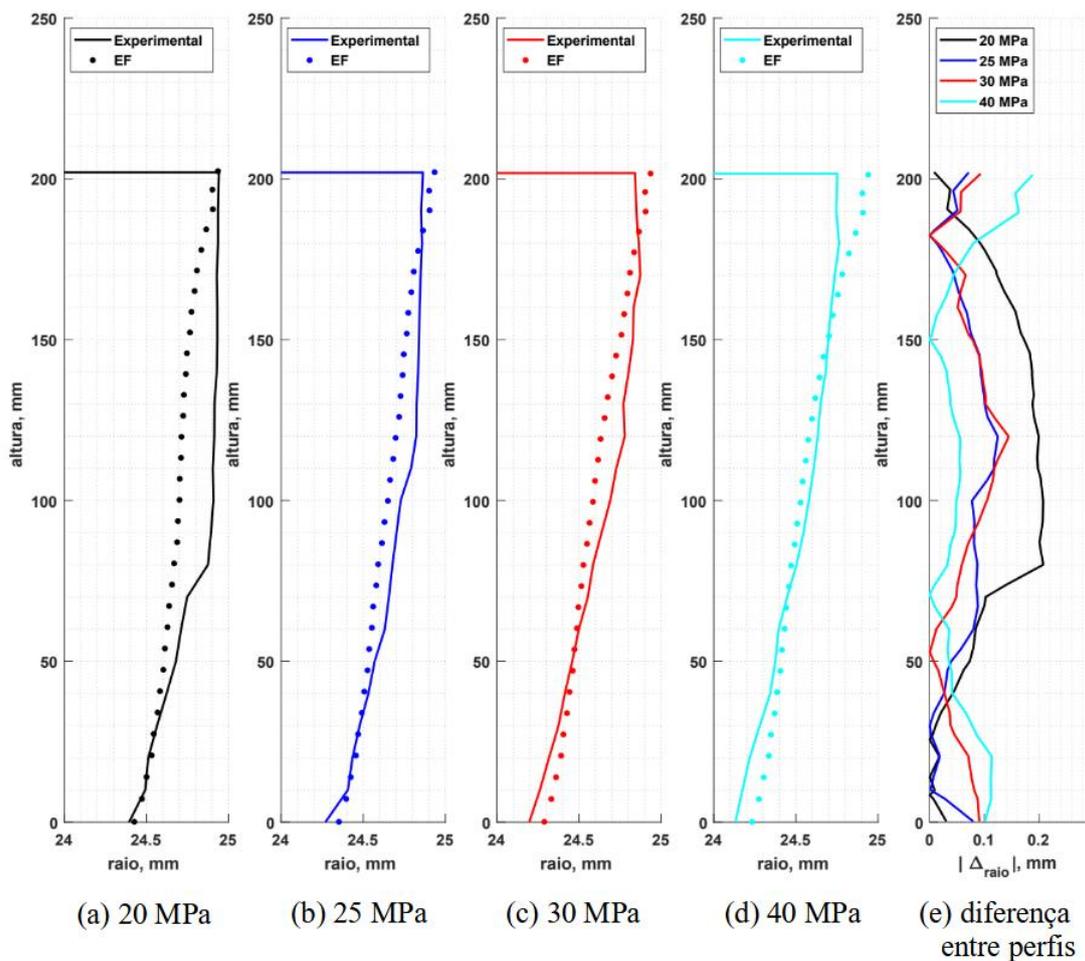


Figura 3 : Comparação do perfil experimental com EF após a PI para as pressões de: (a) 20 MPa, (b) 25 MPa, (c) 30 MPa, (d) 40 MPa e (e) a diferença absoluta.

De maneira geral, houve uma boa concordância entre os perfis para as diferentes pressões estudadas. A maior diferença observada foi de aproximadamente 0,2 mm após a PI a 20 MPa, na altura de aproximadamente 80 mm, e na região superior do CDP após a PI de 40 MPa.

CONCLUSÕES

A execução do procedimento de validação apresentou boa concordância em ambas as etapas, tanto uniaxial quanto isostática. Dessa maneira, é possível considerar que o modelo de DPC identificado por Frédy⁽³⁾ apresenta alto grau de confiabilidade para descrever diferentes trajetórias de carga. Os principais pontos de discordâncias são: a diferença percentual de 14% para a célula de carga axial que apoia a matriz e 7,4% para o pistão inferior, ambos no ponto de carregamento máximo. Isso indica que as condições tribológicas simuladas representam parcialmente a transferência de carga, pela força de atrito entre pó e matriz, ao longo da altura do compacto verde.

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 ao apoio institucional referente aos processos 2018/25419-8, 2020/08077-6 e 2021/14452-7, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

REFERÊNCIAS

1. JAHIER, Daniel. **Le PTFE (polytétrafluoréthylène): présentation et applications**. Centre technique des industries mécaniques, 1992.
2. CANTO, Rodrigo Bresciani et al. **Estudo teórico e experimental dos processos de compactação e sinterização do politetrafluoretileno (PTFE)**. 2007. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil/École Normale Supérieure de Cachan, França.
3. FRÉDY, Carole. **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.
4. MELO, C. C. et al. A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 38, n. 8, p. 2928-2936, 2018.
5. HIBBITT, Karlsson. Sorensen, Inc. ABAQUS theory manual. 2000.
6. GAMBONI, Otavio C. et al. On the formation of defects induced by air trapping during cold pressing of PTFE powder. **Polymer**, v. 82, p. 75-86, 2016.
7. HIBBITT, Karlsson. Sorensen, Inc. ABAQUS theory manual. 2000.
8. REYNOLDS, Osborne. LVII. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. With experimental illustrations. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 20, n. 127, p. 469-481, 1885.

EXPERIMENTAL PROCEDURE FOR VALIDATION OF A NUMERICAL MODEL FOR PRESSING POLYTETRAFLUOROETHYLENE (PTFE)

ABSTRACT

Polytetrafluoroethylene (PTFE) is an industry interesting polymer because of its low friction coefficient against any material, chemical stability and high melting temperature. These characteristics justify PTFE use in corrosion ambient and sealing systems. However, this polymer shows very high viscosity when melted, which makes usual processes such as extrusion and injection molding impracticable. Alternatively, uniaxial and isostatic pressing followed by sintering is used during PTFE parts manufacturing. After pressing, the resulting part is called green compact. The defects caused during pressing take an important whole in the final part because they are not corrected during sintering. This shows that well knowledge and the numerical simulation of the pressing step are essential for the manufacturing of PTFE parts and the project of the pressing tools. The PTFE powder is considered a continuum and homogeneous medium in the computational model that applies the Finite Element Methods. The characteristics related to the number of voids are represented by the properties of the elastic and plastic models. The inelastic deformation is mainly referred to as volumetric strain and packing of the granules caused by the combination of volumetric and shearing stresses. In this work, the reliability of the computational model was verified following a new experimental validation procedure. The procedure follows two steps, closed die uniaxial pressing in metallic tools, such as cylindrical cavity die, pistons axially equipped with pressure sensors and a load cell to register axial loads at the die. The second step is the isostatic pressing of the uniaxial pressed green compact. The density gradient along the height of the green compact results from the friction forces between the powder and the inner die wall. Also, denser regions are less susceptible to stresses during isostatic pressing than the less dense ones. The result after the validation procedure is a part with a conical shape that illustrates the density gradient in the green compact. The uniaxial step was carried out until ~43,3 MPa stress was achieved. The green compact was isostatically pressed at different pressures, such as 20, 25, 30 and 40 MPa. The shape of the compact was recorded after each isostatic pressing by measurements of diameter at different height positions. Both steps were simulated numerically by the use of AbaqusTM FEM software. For this purpose, the Drucker-Prager/Cap plasticity model was implemented with the parameters provided in the literature. The green compact shape obtained experimentally and numerically were compared, showing a high concordance. The main discrepancy was found for the pressure on the bottom piston, about 14% at maximum load during uniaxial pressing.

Keywords: PTFE, powder pressing, numerical simulation, validation procedure