



Avaliação da influência das tensões residuais no comportamento termomecânico de compósitos modelo bifásicos fabricados por prensagem de pó

Igor P. Zago¹, Mateus Furlan¹, Ricardo A. Angélico², Rodrigo B. Canto^{1,3}

1 - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

2 - Departamento de Engenharia Aeronáutica, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos.

3 - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA), Universidade Federal de São Carlos.

ipzago@estudante.ufscar.br

RESUMO

Componentes cerâmicos fabricados por prensagem de pó, por vezes, combinam fases com geometrias e propriedades distintas que podem levar ao trincamento da peça durante etapas de prensagem e sinterização. A diferença entre os coeficientes de expansão térmica (CET) das fases constituintes do material induz tensões no material quando submetido a uma variação de temperatura, sendo que a distribuição dessas tensões depende das propriedades e distribuição das fases, assim como das tensões residuais do processamento. Técnicas experimentais permitem avaliar o comportamento termomecânico macroscópico, sendo que uma melhor compreensão dos fenômenos requer uma avaliação in-situ. Nesse contexto, materiais modelo podem ser desenvolvidos para ressaltar fenômenos de interesse, possibilitando uma melhor compreensão dos mecanismos de deformação e comportamento termomecânico. O presente artigo visa avaliar a influência das tensões residuais do processo de prensagem e na susceptibilidade ao trincamento quando um corpo de prova é submetido a uma variação de temperatura. A configuração investigada consiste em um Volume Elementar Representativo (VER) de um pó de alumina contendo esferas metálicas de aço inox, onde é modelado os arredores de uma inclusão dispersa no meio. Considera-se que o corpo de prova é fabricado pelo processo de prensagem uniaxial em uma matriz metálica a temperatura ambiente. O modelo de Drucker-Prager/Cap foi utilizado para simular a prensagem do pó. Foi utilizado um modelo axissimétrico com elementos lineares e a simulação foi conduzida no software AbaqusTM. A simulação foi realizada em três etapas: (i) prensagem uniaxial por controle de deslocamento, (ii) liberação de restrições decorrentes do descarregamento mecânico, (iii) variação da temperatura do sistema. O modelo permitiu avaliar as possíveis regiões mais propensas ao trincamento. Os resultados da simulação permitiram estabelecer uma primeira configuração a ser avaliada experimentalmente como perspectiva em trabalhos futuros.

Palavras-chave: *prensagem de pó; simulação computacional; comportamento termomecânico; material modelo.*

INTRODUÇÃO

Um dos principais métodos de fabricação de componentes cerâmicos é a prensagem de pó, sendo a principal metodologia utilizada a prensagem uniaxial de simples ação^(1,2). Esse processo é utilizado por sua alta produtividade, entretanto, deixa um gradiente de densidades no compacto verde que pode prejudicar etapas seguintes de processamento, como a sinterização⁽¹⁻⁴⁾.

Componentes cerâmicos podem ser fabricados por prensagem para produção de compactos com mais de uma fase, isso é, um compacto verde com agregados ou fases distintas

entre si. Além disso, esse processo também pode ser utilizado para a produção de compósitos cerâmicos ou ainda em prensagem de pós com componentes rígidos dispersos⁽⁵⁾. Nesses casos, as diferentes fases presentes no material podem induzir um gradiente de densidades mais complexo no compacto verde durante a etapa de prensagem. Além disso, em caso de diferença entre os coeficientes de expansão térmica das fases, tensões de origem térmica surgirão durante o processo de sinterização para além daquelas que já existem pela diferença de densificação, o que pode deixar o material mais susceptível ao trincamento.

O comportamento termomecânico de sistemas multifásicos vem sendo estudado em diversas frentes desde o século passado^(6, 7). De modo a facilitar a visualização de fenômenos de interesse e simplificar os sistemas estudados, muitos desses trabalhos fazem o uso de compósitos modelo, isso é, sistemas multifásicos idealizados em geometria, materiais e condições para viabilizar um estudo⁽⁷⁻⁹⁾. Assim, no presente trabalho é também utilizada essa estratégia. Na Figura 1 é mostrada uma representação do estudo proposto nesse artigo.

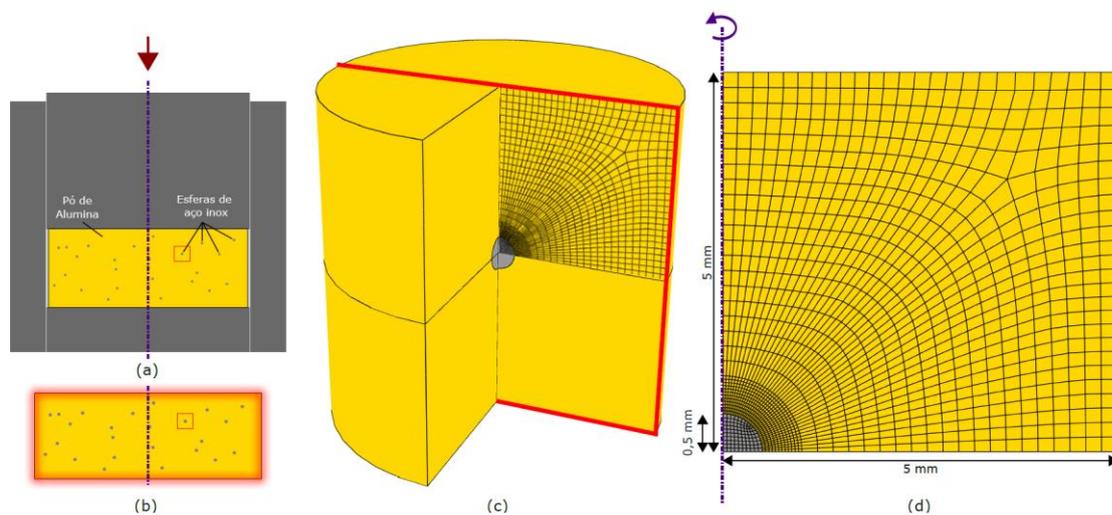


Figura 1: Compósito modelo com inclusões esféricas: (a) prensagem de um compósito modelo; (b) variação de temperatura do compacto. Metodologia de análise utilizada para simular o comportamento do sistema proposto: (c) volume elementar representativo do sistema; (d) região simulada e malha de elementos finitos.

Modelos computacionais baseados no método dos elementos finitos podem ser utilizados para o estudo do comportamento de componentes fabricados por prensagem de pós cerâmicos constituídos por mais de uma fase⁽³⁻⁵⁾. Nesse trabalho é proposta a simulação de um Volume Elementar Representativo (VER) de um compósito modelo onde é realizada a prensagem de um pó de alumina contendo esferas de aço inoxidável em seu interior e a subsequente variação de temperatura desse sistema após a extração. Os materiais utilizados foram selecionados de modo a evidenciar os fenômenos de interesse, uma vez que esse estudo visa avaliar o fenômeno do comportamento mecânico resultante da interação entre as fases. Os resultados da simulação viabilizaram observar a densificação do sistema, assim como a distribuição das tensões resultantes na região analisada.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material modelo do presente estudo consiste em um compósito bifásico cuja fase contínua é alumina – não sinterizada – e a fase dispersa são inclusões esféricas de aço inoxidável. A geometria inicial da região simulada é um cilindro com 5 mm de raio e 5 mm de altura. A inclusão de raio 0,5 mm é posicionada no centroide do VER. O material modelo é

obtido via processo de prensagem uniaxial de simples ação por controle de deslocamento atingindo uma tensão nominal de prensagem de 30 MPa. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades mecânicas e termomecânicas dos materiais. Nesse estudo, as propriedades são assumidas independentes da temperatura. Considera-se que o módulo elástico da alumina é função da densidade.

A prensagem da alumina aqui utilizada foi estudada experimental e computacionalmente por Melo, e pode ser representada pelo modelo de compactação de Druger-Prager/Cap com um ângulo de atrito interno de 63.3° e a excentricidade da superfície Cap como 0,75. A curva de encruamento da superfície Cap (*Hardening law*) foi definida a partir de um ajuste exponencial como proposto por Melo⁽³⁾. As propriedades do aço inoxidável foram obtidas da literatura^(1, 10).

Tabela 1 - Propriedades dos materiais utilizadas no trabalho.

Propriedade	Aço inoxidável	Alumina
Módulo elástico [GPa]	200	1 - 2,74
Coefficiente de Poisson [-]	0,3	0,13
Coefficiente de expansão térmica [$10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]	19	6

Modelo

As simulações foram realizadas para um modelo axissimétrico no software AbaqusTM com elementos finitos quadrilaterais de aproximação linear (CAX4). Na Figura 1 é mostrada a região do VER simulada. A simulação do material modelo ocorre em três etapas como pode ser observado na Figura 2: (i) prensagem, (ii) remoção das restrições decorrentes do descarregamento mecânico da prensagem, e (iii) variação de temperatura. Na etapa (i), é aplicado um deslocamento vertical na face superior até atingir uma tensão nominal vertical de 30 MPa. As demais superfícies, lateral e inferior, têm os deslocamentos restritos nas direções horizontal e vertical, respectivamente. Na etapa (ii), primeiro a face superior e depois a face lateral, passam a não possuir restrições de deslocamento, representando o descarregamento e extração do compósito modelo, respectivamente. Por fim, na etapa (iii), o VER é submetido a uma variação de temperatura de $900 \text{ }^\circ\text{C}$, a partir de um estado inicial de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

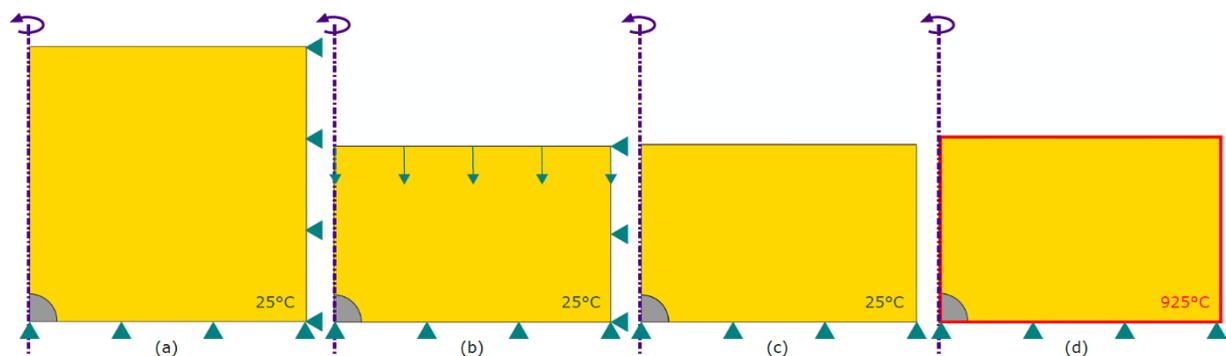


Figura 2: Etapas da simulação: (a) início da simulação; (b) prensagem; (c) liberação das restrições de deslocamento por efeito do descarregamento mecânico axial e posteriormente radial; (d) variação de temperatura.

Superfícies de contato entre a matriz e a inclusão são definidas. A condição de contato normal é definida como rígida (*Hard contact*), permitindo separação após o contato. O comportamento tangencial é de Coulomb com coeficiente de atrito de 0,25. Utilizam-se as propriedades conforme descritas na Tabela 1 para a inclusão e a matriz. Para a alumina é definida a evolução do módulo elástico em função da deformação volumétrica. Utiliza-se uma sub-rotina para a criação do campo de densidades do material (ρ) em função da deformação volumétrica de acordo com:

$$\rho = \rho_0 e^{\varepsilon_{vol}} \quad (A)$$

sendo, $\rho_0 = 1,38$, a densidade aparente do pó e, ε_{vol} a deformação plástica volumétrica.

RESULTADOS

Durante a prensagem tem-se uma densificação heterogênea da matriz pela presença da inclusão esférica, sendo a região logo acima da inclusão a mais densificada e a região à direita da inclusão a menos densificada. Na Figura 3 é mostrado o campo de densidades para a região simulada após a extração, sendo a altura final da região simulada igual a 3,26 mm.

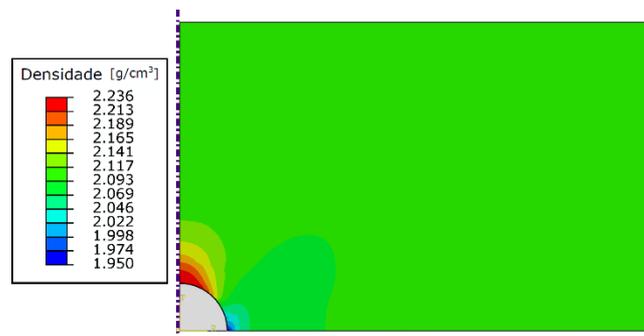


Figura 3: Campo de densidades após prensagem e descarregamento mecânico do compósito modelo.

Após a prensagem e descarregamento do compósito modelo, inclusão e matriz perdem contato em função da deformação plástica resultante do processo de prensagem na matriz e do retorno elástico dos materiais – o módulo de elasticidade da matriz é duas ordens de grandeza menor que o da inclusão. A separação máxima entre inclusão e matriz, após o processo de extração, é de 36 μm . Durante a etapa de variação de temperatura, o contato entre as fases é restabelecido em função da expansão mais acentuada da inclusão em relação à matriz. Na Figura 4 mostram-se os estágios, inicial (25 °C) e final (925 °C) de aquecimento e os campos de tensões resultantes da etapa de prensagem, descarregamento e da variação de temperatura. Após uma variação de temperatura de 521 °C, é iniciado o restabelecimento do contato entre as fases. Os resultados são apresentados para um sistema de coordenadas esférico com origem no centro da inclusão.

Após o retorno do contato entre as fases na etapa de variação de temperatura, foi notada uma redução da densidade em regiões da matriz, o que pode ser explicada pelo fenômeno de dilatância⁽⁴⁾. O modelo de Drucker-Prager/Cap consegue reproduzir esse fenômeno quando o estado de tensões atinge a superfície de Drucker-Prager.

Considerando idealmente que o contato entre inclusão e matriz fosse mantido durante todo processo, pela relação entre os coeficientes de expansão térmica das fases, seria esperado que com uma variação de temperatura positiva, ocorresse um aumento da magnitude das tensões

radiais compressivas, assim como das tensões ortorradiais trativas caso ambas as fases fossem lineares elásticas. O sistema simulado de fato apresenta esse comportamento, entretanto, de maneira atenuada, pois inicialmente não existe contato entre as fases, e após o restabelecimento de contato, o comportamento não-linear da matriz leva a uma modificação do resultado em razão da evolução das deformações permanentes e densificação da mesma.

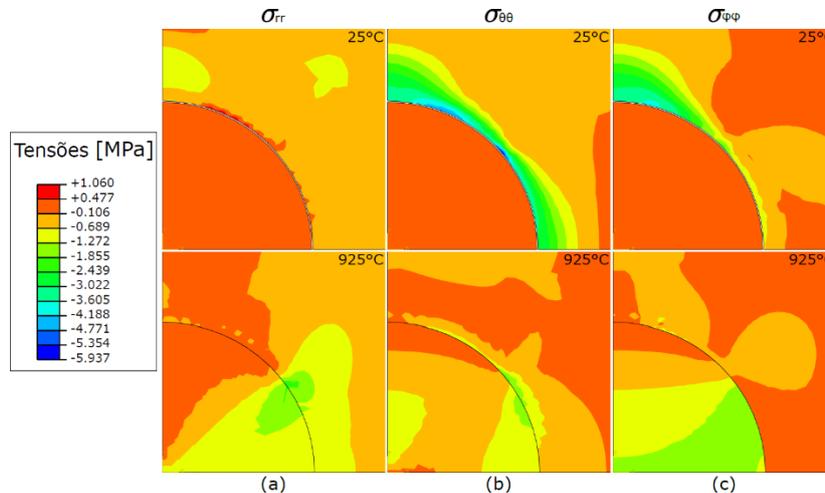


Figura 4: Tensões na região entre inclusão e matriz antes e após etapa de variação de temperatura: (a) tensões radiais; (b) tensões ortorradiais na direção θ ; (c) tensões ortorradiais na direção φ .

CONCLUSÕES

O presente artigo é uma investigação inicial acerca do comportamento termomecânico de um compósito modelo de alumina com esferas de aço inoxidável produzido a partir de um processo de prensagem uniaxial de simples ação. As simulações computacionais permitem concluir que a retomada de contato entre a inclusão e a matriz na etapa de variação de temperatura leva a variação de tensões na interface entre os materiais que pode culminar no aparecimento de trincas. No modelo simulado, as tensões de origem térmica não se mostraram tão significativas em magnitude devido ao surgimento de uma folga entre as fases nas etapas anteriores. Contudo, é importante ressaltar que em temperaturas de sinterização haveria uma contração da matriz que intensificaria a variação das tensões, aumentando as chances de ocorrer danificação do material, o que deve ser investigado em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Proc. 140250/2020-4. Os autores agradecem também ao apoio 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. CALLISTER, William D. & RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 1940. v. 8.
2. ZIPSE, H. **Finite-element simulation of the die pressing and sintering of a ceramic component**. Journal of the European Ceramic Society, v. 17, n. 14, p. 1707–1713, 1997.
3. DE MELO, Caiuã Caldeira. **Computational modeling of Rubber Multiaxial Pressing applied to ceramic materials**. 2021. 96 f. 2021.

4. MONTILHA, F. S.; ROCCO, F. O.; MELO, C. C.; SCIUTI, V. F. & CANTO, R. B. **Identification of dilatancy in green compacted ceramic powder via digital image correlation.** Powder Technology, v. 330, n. May, p. 471–476, 2018.
5. KIM, K. T. & PARK, H. **Effect of ceramic ball inclusion on densification of metal powder compact.** Materials Science and Engineering A, v. 282, n. 1–2, p. 29–37, 2000.
6. SELSING, J. **Internal Stresses in Ceramics.** Journal of the American Ceramic Society, v. 44, n. 8, p. 419–419, 1961.
7. DAVIDGE, R W & GREEN, T D. **The Strength of Two-Phase Ceramic/Glass Materials.** Journal of Materials Science, v. 3, p. 629–634, 1968.
8. TESSIER-DOYEN, N.; GLANDUS, J. C. & HUGER, M. **Untypical Young's modulus evolution of model refractories at high temperature.** Journal of the European Ceramic Society, v. 26, n. 3, p. 289–295, 2006.
9. JOLIFF, Y.; ABSI, J.; HUGER, M. & GLANDUS, J. C. **Experimental and numerical study of the thermomechanical behaviour of refractory model materials.** Journal of the European Ceramic Society, v. 27, n. 2–3, p. 1513–1520, 2007.
10. SHRIVASTAVA, A. LAMBADE, V. & CHAUDHURI, P. **Measurement of Thermal Expansion for Stainless Steel 304, Copper, Aluminium & Brass by Push Rod Dilatometry.** 2020.

Influence of residual stresses in the thermomechanical behaviour of a biphasic composite model material fabricated via powder pressing

ABSTRACT

Ceramic components manufactured by powder pressing sometimes combine phases with different geometries and properties, leading to component cracking during pressing and sintering steps. The difference between the Coefficients of Thermal Expansion (CTE) of the material constituents induces stress when submitted to a temperature variation. The distribution of these stresses depends on the phase properties and distribution and the residual stresses of the material processing. Experimental techniques allow the evaluation of the thermomechanical behaviour of such systems, being that a better understanding of the phenomena requires an in-situ evaluation. In this context, model materials can be designed to highlight phenomena of interest, enabling a better understanding of their deformation mechanisms and thermomechanical behaviour. This article aims to evaluate the influence of residual stresses in the pressing process and the susceptibility to cracking when a specimen is heated up after pressing. The investigated configuration consists of a Representative Volume Element (RVE) of an alumina powder containing stainless steel metallic spheres, where the surroundings of an inclusion dispersed in the medium is modelled. The specimen evaluated is manufactured by a single-action uniaxial pressing process in a metallic pressing die at room temperature. The Drucker-Prager/Cap model was used to simulate powder pressing. An axisymmetric model was developed and simulated in AbaqusTM software. A mesh with linear quadrilateral finite elements was used. The simulation comprehends three steps: (i) pressing by displacement control, (ii) release of restrictions imposed by the pressing, and (iii) temperature variation of the system. The model allows obtaining possible regions most prone to cracking. The simulation results allow the first configuration to be evaluated experimentally as a perspective in future works.

Keywords: powder pressing; computer simulation; thermomechanical behaviour; model materials.