cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Identificação de Parâmetros Constitutivos de Compacto Verde de Alumina via Correlação de Imagens Digitais e Método dos Elementos Finitos

Igor M. Bonizio[1]; Matheus P. Cardoso[1]; Caiuã C. Melo[3]; Vinicius F. Sciuti[2]; Rodrigo B. Canto[1,2]

1. Universidade Federal de São Carlos – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM)
2. Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa)
3. Siemens Digital Industries Software, São Paulo, Brasil

Introdução

Prever defeitos na prensagem e na extração de peças cerâmicas exige conhecer o comportamento mecânico do compacto verde, um material frágil e difícil de instrumentação (1). O ensaio brasileiro, assistido por Correlação de Imagens Digitais (CID), fornece campos de deslocamento ricos o bastante que possibilitam calibrar um modelo elastoplástico por atualização de elementos finitos, o FEMU (2,3).

Objetivos

Identificar os parâmetros elásticos, de Drucker-Prager e de encruamento de um compacto verde de alumina a partir de um único ensaio brasileiro cíclico, e avaliar a confiabilidade dos parâmetros encontrados.

Metodologia

O disco de alumina foi conformado por prensagem uniaxial de cerca de 10 MPa em dupla ação, seguida de prensagem isostática a 100 MPa, e ensaiado em quatro ciclos de carga até a ruptura (Fig. 1). Duas câmeras acompanharam as faces opostas e a CID foi usada para medir os deslocamentos com a mesma malha nas duas faces (incerteza de 0,2 a 0,4 µm). Essa malha, extrudada na espessura, forma o modelo 3D no ABAQUS™, que recebe os deslocamentos medidos na região dos contatos. O modelo de material utilizado foi o de Drucker-Prager linear, com encruamento de Hockett-Sherby.

A técnica de atualização do modelo de elementos finitos (FEMU) ajusta os oito parâmetros à força e aos campos, com cada resíduo ponderado por sua incerteza. O resultado é comparado com o caso em que o ângulo de atrito interno (β) é fixado em um valor da literatura (1).

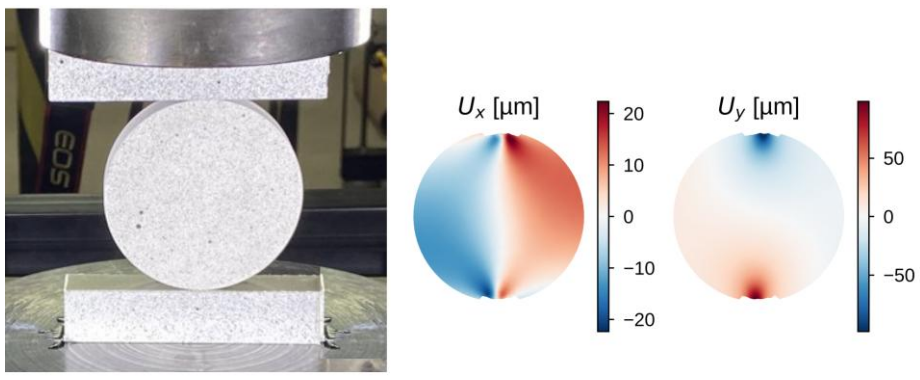


Figura 1. Ensaio brasileiro (D = 64,3 mm; t = 19,0 mm) e deslocamentos medidos por CID na face frontal, no 3º pico de carga (1189 N), descontada a translação média.

Resultados e Discussão

Partindo dos valores de Melo et al. (1), o FEMU com os oito parâmetros livres leva a um conjunto de parâmetros com baixa sensibilidade à tensão normal média, com β ≈ 6° (Tabela 1). Impor β = 55° dobra o erro de força, de 44 para 79 N RMS (Fig. 2) e aumenta o erro de campo na frente de 2,0 para 2,7 µm (Fig. 3). O conjunto livre escoa cedo e satura rápido ($\sigma_\infty \approx 4{,}6$ MPa), enquanto o β fixo encrua até ~12 MPa (Fig. 4).

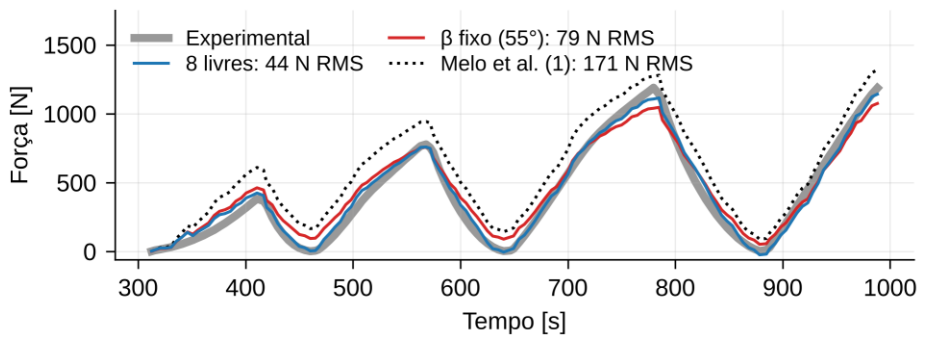


Figura 2. Força medida e simulada, com o erro RMS de cada.

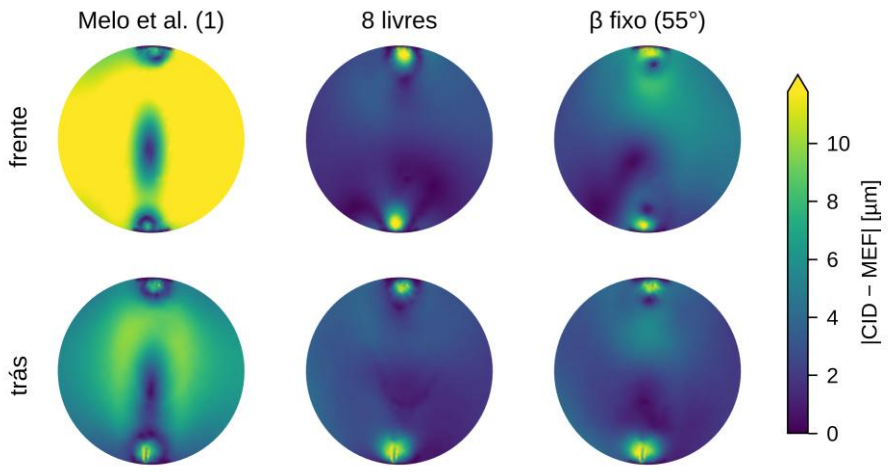


Figura 3. Resíduo |CID − MEF| no 3º pico de carga, frente e trás.

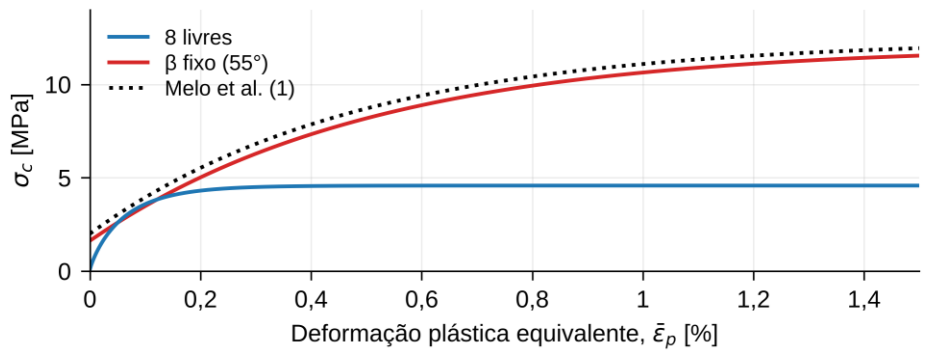


Figura 4. Lei de encruamento de Hockett-Sherby dos três conjuntos, na faixa de deformação medida no ensaio.

Tabela 1. Parâmetros efetivos (DP + HS). * Fixo no valor de (1).

Parâmetro	Melo (1)	8 livres	β fixo
E [MPa]	2500	**2372**	2064
ν	0,13	**0,158**	0,115
β [°]	55	**6,4**	55*
ψ [°]	55	**22,1**	30,2
σ_y [MPa]	2,0	**0,087**	1,62
σ_∞ [MPa]	12,4	**4,58**	12,06
b	207	**723**	205
n	1,0	**0,893**	1,007

Conclusões

O ensaio brasileiro com CID, isoladamente, não possibilita determinar β, pois o centro do disco percorre uma faixa estreita de pressão ($p \leq 0{,}4$ MPa). Com o modelo adotado, a identificação converge para baixa sensibilidade à tensão normal média, governada pelo ajuste da força. Os parâmetros obtidos são, portanto, efetivos, e o resíduo remanescente é atribuído ao contato, à trinca e ao dano, não representados no modelo.

Referências e Agradecimentos

(1) MELO, C. C. et al. Uniaxial compression test on ceramic green compact with bending consideration using digital image correlation. Powder Technology, v. 376, p. 136-148, 2020.

(2) MATHIEU, F. et al. Estimation of elastoplastic parameters via weighted FEMU and integrated-DIC. Experimental Mechanics, v. 55, p. 105-119, 2015.

(3) BONIZIO, I. M. Análise inversa para identificação de parâmetros do modelo de Drucker-Prager em compacto verde de alumina. Dissertação (Mestrado) – UFSCar, São Carlos, 2026.

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 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2026/11013-6.