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

Análise de sensibilidade dos campos de deslocamento ao ângulo de dilatância do modelo de Drucker-Prager em ensaios de flexão de compactos cerâmicos

Yasmin G. Beloto[1]; Igor M. Bonizio[2], Matheus Furlan[2], Rodrigo B. Canto[1,2] , Vinicius F. Sciuti [1,2]

1. Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar);
2. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Introdução

O aumento de volume por cisalhamento em compactos cerâmicos, conhecido como dilatância, é dificilmente caracterizado experimentalmente, pois a fragilidade do material inviabiliza o uso de *strain gauges*, tornando a Correlação de Imagens Digitais (CID) uma técnica mais apropriada para isso. No entanto, os ensaios de flexão em compactos verdes de alumina assistidos por CID mostraram que a dilatância permanece camuflada pelo ruído de medição, indicando que sua magnitude está abaixo da resolução experimental.

Objetivos

Avaliar, por meio de simulação em elementos finitos, a sensibilidade dos campos de deslocamento ao ângulo de dilatância do modelo Drucker-Prager em ensaio de flexão de compactos verdes para estimar a razão sinal-ruído mínima necessária para sua identificação experimental via CID.

Metodologia

Experimental

- Alumina prensada isostaticamente a 100 MPa, em moldes de poli(ácido láctico) (PLA) obtidos por manufatura aditiva;
- Corpos de prova (CDPs) de 80 x 30 x 15 mm³, com padrão aleatório de tons de cinza aplicados com tinta spray;
- Duas câmeras em faces opostas (lentes macro de 180 mm e 65 mm), sincronizadas com a máquina universal MTS™ Exceed E44.304, para a aquisição das imagens usadas na CID;
- CID com malha de elementos finitos triangulares de tamanho 1,1 mm no Correli (MATLAB).

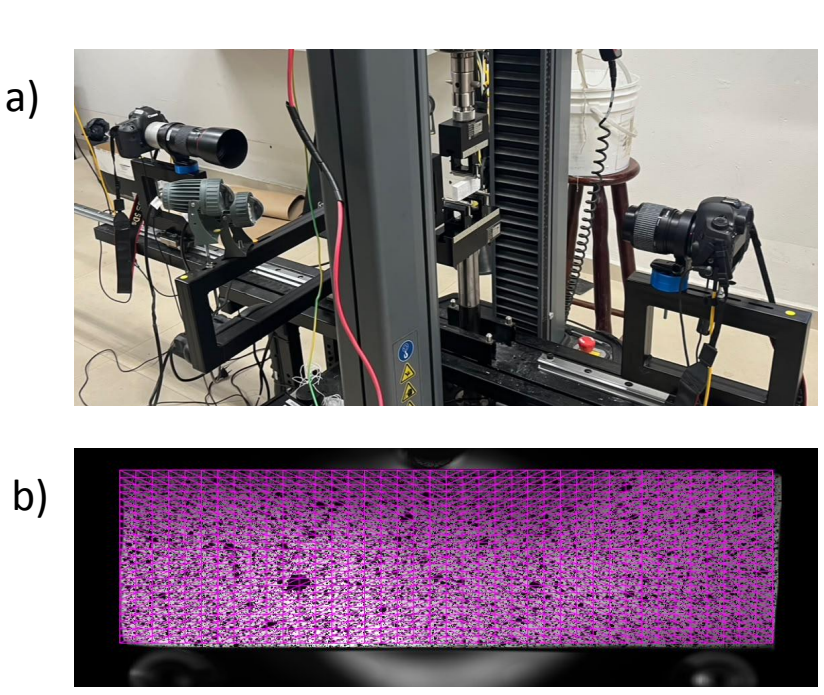


Figura 1. a) Montagem experimental utilizada nos ensaios; b) Malha utilizada para CID

Computacional

- Modelo em EF do ensaio via Abaqus™ com propriedades obtidas da literatura;
- Sensibilidade: diferenças finitas (+1%) nos cinco parâmetros: tanβ, tanψ, σy, E e ν;
- Correlação dos parâmetros, com auditoria de sinal-ruído frente ao ruído de correlação da CID (10^{-4} em deformação).

Resultados e Discussão

Seis simulações por configuração (referência mais cinco perturbações de +1%) alimentam, por diferenças finitas, a Hessiana ponderada que fornece o Limite Inferior de Cramér-Rao (CRLB) de cada parâmetro. No regime de fluxo plástico associativo (ψ = β = 63°), todos os parâmetros são identificáveis, exceto ν: tanβ 5 %, tanψ 14 %, σy 48 %, E 60 % e ν 316 %. No regime não-associativo (ψ = 10°), compatível com o nulo experimental de dilatação, o CRLB de tanψ sobe para 202%. A razão está no sinal-ruído: ψ só é sentido pela deformação volumétrica, e a perturbação gera sinal de 10^{-7} a 10^{-6}, de 100 a 1000 vezes abaixo do ruído da CID (10^{-4}). Apenas 0,5 a 0,7% dos pontos superam o ruído, sob o punção. Com ψ = 10°, o sinal fica 13 vezes abaixo, sem nenhum ponto detectável.
O modelo prevê EVOL médio de $-1{,}4\cdot10^{-3}$, 14 vezes o ruído, mas a CID não mediu variação volumétrica antes da fratura. A dilatação real é muito menor que a prevista pelo fluxo associativo, indicando ψ ≪ β.

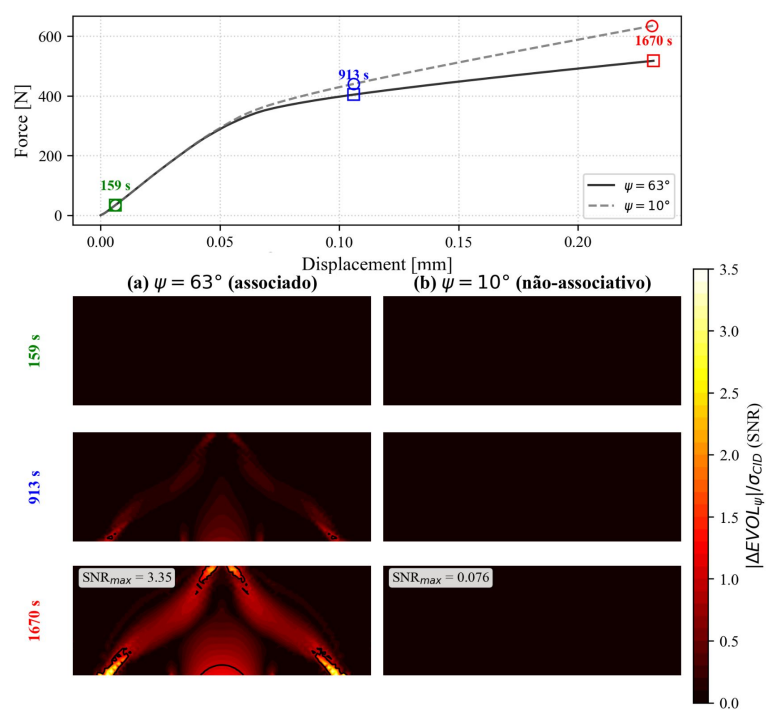


Figura 2. Sensibilidade da deformação volumétrica a tanψ, em unidades do ruído da CID (σ = 10^{-4}), em três instantes de carga: (a) regime associado (ψ = β = 63°); (b) regime não-associativo (ψ = 10°). Tracejado: SNR = 1. No associado, o sinal supera o ruído apenas sob a punção. No não-associativo, permanece abaixo do ruído em todos os instantes.

Conclusões

A análise de CRLB mostra que o ensaio de flexão três pontos com DIC, como realizado, não permite identificar o ângulo de dilatância ψ do pó de alumina: a única condição identificável seria o regime associativo (ψ = β = 63°, CRLB 14 %), descartado pela ausência de variação volumétrica antes da fratura, enquanto, no regime não-associativo compatível com o experimento (ψ = 10°) a incerteza mínima colapsa (CRLB 202 %). Trata-se, portanto, de uma limitação intrínseca do ensaio, e não do procedimento *Finite Element Model Updating* (FEMU): o carregamento de flexão não excita o escoamento volumétrico plástico que ψ governa, de modo que sua identificação exigiria ensaios com confinamento ou compressão significativa.

Referências e Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2025/17947-8