

Efeito da Forma do Indentador na Força e Geometria da Impressão de Dureza no Vidro

Vinicius Carvalho Teles*, Lucas dos Reis Heni Madeira, Sonia Aparecida Goulart de Oliveira, Washington Martins da Silva Junior.

*Laboratório de Tribologia e Materiais, telesv88@gmail.com

Palavras-chave

Simulação computacional, vidro sodo-cálcico, indentador piramidal, ângulo entre faces, abrasão.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem e o acabamento de vidros e outros materiais cerâmicos dependem do conhecimento do mecanismo de desgaste predominante que está ligado à resposta mecânica desse tipo de material a cada processo específico. Frequentemente, as transições dúcteis/frágeis são observadas alterando os parâmetros tribológicos dos processos de desgaste. A análise do comportamento do material durante a indentação fornece informações interessantes sobre a resistência à fratura dos materiais (Hutchings, 1992).

O objetivo deste trabalho é simular a indentação instrumentada com diferentes indentadores piramidais de base quadrada. Os parâmetros adotados nesta simulação (propriedades elástico-plásticas, coeficiente de atrito, parâmetro de dano, etc) foram obtidos experimentalmente. Este método foi amplamente validado por resultados experimentais. Este modelo será aplicado no estudo da transição dúctil / frágil e no da superposição de microindentação em materiais cerâmicos.

2. METODOLOGIA

As simulações foram realizadas no software Abaqus/explicito juntamente com *Concrete Damaged Plasticity*. Foi empregado o método de contato cinemático, sendo que o indentador rígido foi a superfície mestre e a superfície da amostra a superfície escrava. O modelo 3D consiste de um indentador piramidal de base quadrada e uma amostra cilíndrica nas dimensões: $H = 100 \mu\text{m}$ de altura por $R = 100 \mu\text{m}$ de raio. O ângulo α é o ângulo entre as faces. Com o intuito de minimizar o custo computacional, o modelo consiste de apenas 1/8 de todo o sistema indentador/amostra, como apresentado na Figura 1 (Zeng; Giannakopoulos; Rowcliffe, 1995).

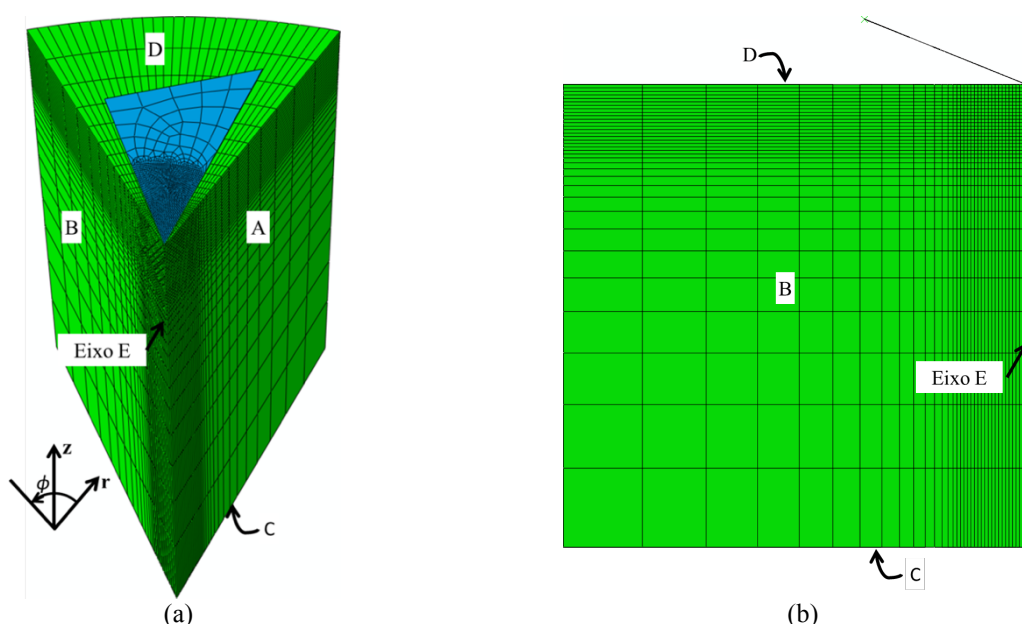


Figura 1: Geometria e malha da amostra e indentador utilizados na simulação. (a) Vista isométrica e (b) vista lateral.

Foi definido um sistema de coordenadas cilíndricas r , ϕ e z , como apresentado na Figura 1. Os nós das superfícies A e B podem se mover apenas em seus respectivos planos. Os nós da superfície C não se movimentam em z e os nós do eixo E não podem se mover nas direções r e ϕ . A superfície D é onde ocorre o contato entre indentador e amostra, desta forma possui os elementos de contato (Zeng; Giannakopoulos; Rowcliffe, 1995).

Com o objetivo de aumentar a exatidão do modelo, a densidade de elementos foi aumentada próximo a região de contato entre o indentador e amostra. O raio e a altura da região mais densa é de 15 μm . Após uma análise de convergência da malha, a malha da amostra possui 72.112 elementos com 82.264 nós.

O indentador utilizado nos ensaios experimentais era de diamante com módulo de elasticidade de 1140 GPa, 16 vezes maior que do vidro sodo cálcico. Assim, neste trabalho, o indentador foi modelado como uma casca rígida, ou seja, não sofre deformação. O elemento utilizado para representar o indentador foi o R3D4, composto de quatro nós, bilinear, rígido e quadrilateral. A amostra foi composta de elementos do tipo C3D8R, que possuem oito nós, linear, integração reduzida e com controle de hourglass.

A simulação foi dividida em duas partes: carregamento e descarregamento. Foi empregado um controle de deslocamento do indentador. A velocidade de descida do indentador foi 120 $\mu\text{m/ms}$ e de subida foi de 72 $\mu\text{m/ms}$. As velocidades utilizadas garantiram um teste quase estático, onde pode-se desprezar efeitos de inércia.

As propriedades elasto-plásticas foram definidas pela técnica desenvolvida por (Zeng; Chiu, 2001). A Tabela 1 apresenta os valores das propriedades elasto-plásticas do vidro utilizadas no modelo de elementos finitos desenvolvido nesse trabalho, bem como a densidade do mesmo.

Tabela 1: Propriedades mecânicas do vidro sodo-cálcico.

E (GPa)	ρ (g/cm ³)	σ_{yc} (MPa)	n	Kc (MPa.m ^{1/2})	σ_t (MPa)	ν
69	2,44	2150	0,5	0,75	300	0,23

Com o intuito de avaliar o efeito do ângulo α , na curva força por deslocamento (p-h), tensões remanescentes e na transição dúctil/frágil foi realizada simulações com os ângulos: 81°, 75°, 68° (padrão Vickers), 60° e 55°. Foi avaliado para a profundidade de indentação de 1,38 μm .

O modelo para os ângulos de 81°, 75° e 68° é semelhante ao já apresentado. Por apresentar uma área de contato menor, o modelo com ângulo 60° e 55° precisou ser refinado. O número de elementos e nós para α igual a 60° foi 111.321 elementos e 117.856 nós. Para α igual a 55° foi de 258.704 elementos e 247.689 nós.

3. RESULTADOS

A Figura 2 mostra as curvas força por deslocamento para diferentes valores de α .

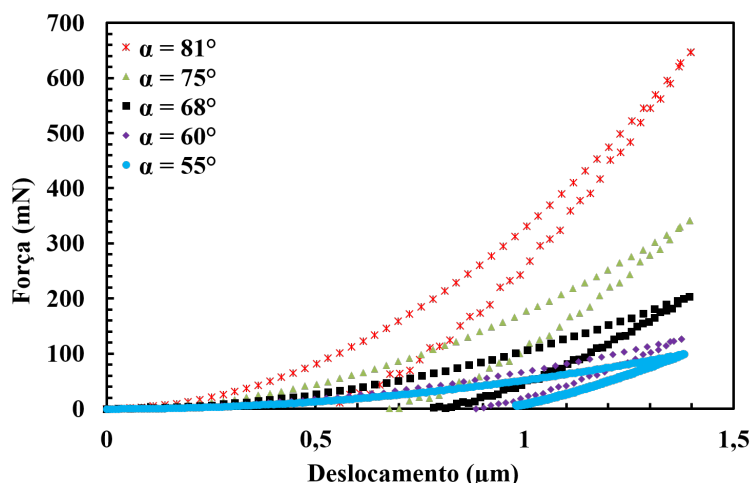


Figura 2: Curva força por deslocamento para diferentes ângulos de abertura do indentador. Profundidade de indentação 1,38 μm .

Ao aumentar o ângulo de abertura α aumenta-se a força máxima para a mesma profundidade de indentação, este resultado está condizente com a literatura (Briscoet; Sebastian; Adams, 1994; Jang; Pharr, 2008). Este resultado é devido a maior área de contato entre indentador e amostra. A área de contato, A_p , em função da profundidade de indentação para indentadores piramidais de base quadrada (idealmente perfeitos) é dada pela Eq. (1).

$$A_p = 4h_c^2 \tan^2 \alpha \quad (1)$$

Como pode ser visto na Eq. (1), a força de indentação máxima é função do quadrado da tangente do ângulo de abertura do indentador e do quadrado da profundidade de indentação.

Fazendo uma analogia a partículas abrasivas, este resultado mostra que ao aplicar a mesma força, partículas abrasivas mais angulosas ou afiadas penetram mais profundamente que partículas abrasivas arredondadas. Este fenômeno é especialmente preocupante em se tratando de superfícies revestidas com filmes finos e duros (PVD, CVD, DLC etc.), pois mesmo em baixas cargas as partículas angulosas podem penetrar até a região próxima à interface revestimento/substrato. Se essa região possuir alto volume de defeitos é provável a ocorrência de mecanismos de desgaste do tipo frágil, tais como microtrincamento ou destacamento do revestimento (Teles; de Mello; Silva, 2017).

O perfil da impressão de dureza remanescente para diferentes ângulos de abertura do indentador é mostrado na Figura 3.

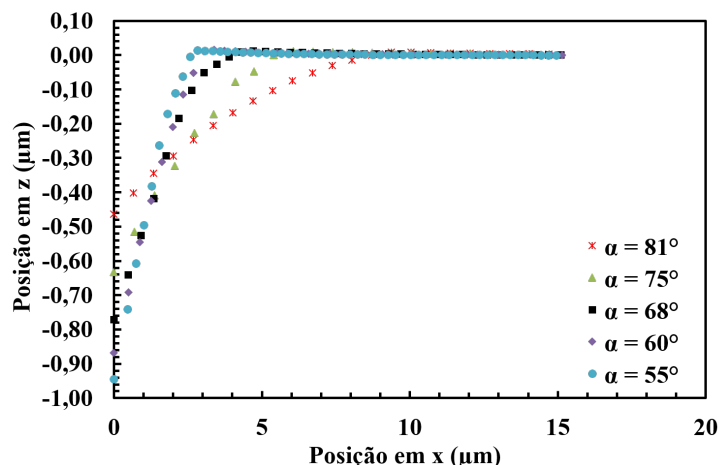


Figura 3: Diagonal de indentação remanescente em função do ângulo de abertura da partícula.

A Figura 3 mostra que as partículas angulosas deixam uma impressão de dureza remanescente mais profunda, porém menor em comprimento comparado as partículas com ângulo maior. A maior profundidade remanescente para indentador anguloso pode estar relacionado com a maior deformação plástica equivalente proporcionada por esses indentadores. A deformação plástica equivalente aumenta exponencialmente ao diminuir o ângulo de abertura do indentador, indo de 10 % para $\alpha = 81^\circ$ até, aproximadamente, 120 % para 55° .

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões, obtidas com a metodologia e o modelo de elementos finitos desenvolvidos, são descritas a seguir.

Ao variar o ângulo de abertura do indentador piramidal de base quadrada pôde-se concluir que ao aumentar a área de contato (aumentar o ângulo de abertura) aumenta-se, exponencialmente, a força requerida para se chegar à mesma profundidade de indentação.

O valor da deformação plástica remanescente aumenta com a diminuição do ângulo entre faces, o que altera significativamente a profundidade e a forma da impressão de dureza remanescente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Briscoet, B. J.; Sebastian, K. S.; Adams, M. J. The effect of indenter geometry on the elastic response to indentation. *Journal Physics D: Applied Physics*, v. 27, p. 1156–1162, 1994.
- Hutchings IM. Ductile-brittle transitions and wear maps for the erosion and abrasion of brittle materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1992; 25: A212.
- Jang, J. IL; Pharr, G. M. Influence of indenter angle on cracking in Si and Ge during nanoindentation. *Acta Materialia*, v. 56, n. 16, p. 4458–4469, 2008.
- Teles, V. C.; de Mello, J. D. B.; da Silva, W. M. Abrasive wear of multilayered/gradient CrAlSiN PVD coatings: Effect of interface roughness and of superficial flaws. *Wear*, v. 376–377, p. 1691–1701, 15 abr. 2017.
- Zeng, K.; Giannakopoulos, A. E.; Rowcliffe, D. J. Vickers Indentations in Glass II. Comparison of Finite Element Analysis and Experiments. *Acta Metallurgica et Materialia*, v. 43, n. 5, p. 1945–1954, 1995.
- Zeng, K.; Chiu, C. H. An analysis of load-penetration curves from instrumented indentation. *Acta Materialia*, v. 49, n. 17, p. 3539–3551, 2001.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.