

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE MICROINDENTAÇÃO VICKERS NO VIDRO

Vinicius Carvalho Teles, Universidade Federal de Uberlândia, telesv88@gmail.com

Sonia Aparecida Goulart Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, goulart@ufu.br

Washington Martins da Silva Junior, Universidade Federal de Uberlândia, washington.martins@ufu.br

Resumo: O método de superposição de eventos é um meio alternativo para estudar o desgaste abrasivo que permite alcançar os mecanismos de desgaste em laboratório. Nesta técnica, utiliza-se um esclerômetro linear instrumentado com um penetrador Vickers que realiza múltiplos riscos e ou indentações para simular os eventos gerados pela interação entre abrasivo e superfície de acordo com a dinâmica da partícula, deslizamento e rolamento, respectivamente. O objetivo deste trabalho é desenvolver e validar um modelo que simule a penetração de um indentador Vickers no vidro com a formação de trincas. Para isso foi utilizado o software Abaqus com Concrete Damaged Plasticity. Para validar o modelo, foram realizados ensaios experimentais de microdureza instrumentada para diversas cargas. Os resultados mostraram que o modelo apresentou boa conformidade com os resultados experimentais, principalmente quanto ao formato da impressão de dureza com diferenças menores que 7,5 %. O comprimento das trincas radiais apresentaram diferenças de até 30 %. Este resultado pode estar relacionado à simplicidade do modelo quanto à formação das trincas, que considera apenas a tensão principal máxima de tração.

Palavras-chave: vidro, simulação, microdureza instrumentada, indentador Vickers, superposição de eventos.

1. INTRODUÇÃO

Ao utilizar um esclerômetro retilíneo instrumentado, da Silva (2008) deu início ao estudo das interações múltiplas. No qual, estudou o efeito da interação de sulcos/riscos e de microindentações no aço ferramenta e no vidro. Seus resultados mostraram que a quantidade de eventos e a proximidade ou índice de superposição é de grande importância na perda de massa e no mecanismo de desgaste na abrasão (da Silva, de Mello, 2009; da Silva, Costa, de Mello, 2011). . Nessa técnica, o mecanismo de indentações múltiplas, decorrente do rolamento de partículas, foi representado por uma sequência de indentações com penetrador padrão Vickers, em posições aleatórias. Os resultados de superposição de eventos no vidro mostraram que, para baixas cargas, o mecanismo de microindentação pode ocasionar na deformação plástica da superfície. Porém, independente da carga, eventos muito próximos um do outro acarretam na falha frágil do material, ou seja, ocorre a transição dútil/frágil (da Silva, 2008).

O método de elementos finitos tem sido utilizado para estudar ensaios de microdureza e nanodureza em materiais dúcteis e frágeis (Zeng, Giannakopoulos, Rowcliffe, 1995; Zhang, Subhash, 2001; Wan et al., 2010). Os modelos apresentados por (Zhang, Subhash, 2001; Wan et al., 2010) foram capazes de simular os efeitos, na impressão de dureza, do aparecimento de microtrincas durante o ciclo de indentação em materiais com características frágeis.

O objetivo deste trabalho é desenvolver e validar um modelo em elementos finitos (MEF) de uma indentação Vickers no vidro utilizando o software Abaqus e o *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). O modelo será validado comparando-se as curvas de força-deslocamento, $p-h$, obtidas experimentalmente e por MEF.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Os corpos de prova foram fabricados de vidro sodo-cálcico, material com comportamento tipicamente frágil. As dimensões dos corpos de prova são 50 x 30 x 6 mm. A composição química dos corpos de prova foi estimada pela técnica de Sistema de Energia Dispersiva (EDS) acoplada a um equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A composição química deste vidro foi estimada em: SiO₂ 75,24 % mol; Na₂CO₃ 10,84 % mol; CaO 7,80 % mol; Al₂O₃ 0,3 % mol e MgO 5,82 % mol. A composição química estimada é próxima a da literatura (Hagan, Van Der Zwaag, 1984, Le Houérou et al., 2003).

O comportamento elasto-plástico, em compressão, do material será descrito segundo a Eq. (1), essa equação representa o comportamento tensão-deformação de cerâmicos mais realista (Sánchez-González et al., 2007).

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon < \frac{\sigma_{yc}}{E} \\ \sigma_{yc} \left(\frac{E}{\sigma_{yc}} \right)^n \varepsilon^n, & \varepsilon \geq \frac{\sigma_{yc}}{E} \end{cases} \quad (1)$$

Sendo σ a tensão equivalente; E módulo de elasticidade; ε deformação; σ_{yc} tensão de escoamento em compressão; e n é o coeficiente de encruamento.

2.2. Propriedades Elasto-Plásticas do Vidro

A microdureza Vickers foi realizada em um microdurômetro Shimadzu HMV Micro Hardness Tester com as cargas de 0,098 N até 4,9 N. O tempo de permanência da carga foi de 15 segundos e foram realizados três testes para cada carga. Este ensaio foi realizado para avaliar a dureza, o comprimento da diagonal da impressão e o comprimento das trincas (em casos onde elas aparecem).

Os resultados obtidos nos ensaios de microdureza também foram utilizados para validar o modelo de simulação de indentação. Onde foi comparada a dimensão da impressão de dureza e comprimento das trincas radiais.

Os ensaios de dureza instrumentada foram realizados para determinar as propriedades elasto-plásticas do material.

Os ensaios de dureza instrumentada foram realizados no Laboratório Nanotech de Tribologia da UFMG. O equipamento utilizado foi um Shimadzu DUH-211 com penetrador padrão Vickers. As forças utilizadas foram de 200 mN até 825 mN. Tempo de permanência da força foi de 5 segundos e foram realizados cinco testes para cada condição. A velocidade de carregamento para cada carga foi diferente, porém, seguindo o recomendado pelo manual do equipamento. As velocidades assim como as forças utilizadas são especificadas na Tab. (1).

Tabela 1: Velocidade de carregamento na dureza instrumentada.

Força (mN)	Velocidade ($\mu\text{m/s}$)
200	5,04
375	5,04
585	8,82
825	17,65

O limite de escoamento, σ_{yc} , e o coeficiente de encruamento, n , foram estimados pelo método de ajuste de curva desenvolvido por (Giannakopoulos, Larsson, Vestergaard, 1994) e aperfeiçoado por (Zeng, Chiu, 2001). As equações são de fácil empregabilidade, resultam em valor único de σ_{yc} e n e apresentaram resultados consistentes para diversos tipos de materiais, inclusive o vidro (Zeng, Chiu, 2001).

O método consiste em encontrar os melhores valores de θ , E e h que ajusta a Eq. (2) ao início da fase de descarregamento da curva $p-h$ experimental (Zeng, Chiu, 2001). Os autores definiram $\theta = \sigma_{yc}/\sigma_u$, onde σ_u é a tensão para uma deformação plástica de 29%. O valor da constante θ está entre zero e um ($0 \leq \theta \leq 1$), onde para $\theta = 1$ é um material elástico perfeitamente plástico e $\theta = 0$ é um material perfeitamente elástico. A variável h é o deslocamento na qual o indentador deixa de tocar a amostra ao final da fase de descarregamento (Zeng, Chiu, 2001).

$$P = (1 - \theta)f(v)Eh^2 + 2\theta \sqrt{\frac{24,56}{\pi}} \frac{E}{1 - v^2} h_c(h - h_c) \quad (2)$$

Onde P (mN) é a força; h (μm) a profundidade de indentação; $f(v)$ é dado pela Eq. (3) (Zeng, Chiu, 2001).

$$f(v) = \frac{2,189(1 - 0,21v - 0,01v^2 - 0,41v^3)}{1 - v^2} \quad (3)$$

O limite de escoamento, σ_c , é estimado substituindo os valores encontrados anteriormente na Eq. (4). A Eq. (4) descreve a fase de carregamento da curva $p-h$ para indentador Vickers (Giannakopoulos, Larsson, Vestergaard, 1994; Zeng, Chiu, 2001).

$$P = Ch^2 = \frac{1,06h^2}{(\tan 22^\circ)^2} \left(1 + \frac{\sigma_u}{\sigma_{yc}} \right) \left(1 + \ln \left(\frac{E \tan 22^\circ}{3\sigma_{yc}} \right) \right) \sigma_{yc} h^2 \quad (4)$$

Onde C (GPa) é uma constante do material.

Ao utilizar a Eq. (1) para modelo elasto-plástico, o coeficiente de encruamento, n , pode ser calculado pela Eq. (5).

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{yc}}\right)}{\ln\left(\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right)} \quad (5)$$

2.3. Propriedades Elasto-Plásticas do Vidro

As análises por elementos finitos foram realizadas em software comercial Abaqus (Simulia, 2010). Foi utilizado o modelo *Concrete Damage Plasticity* (CDP), já implementado ao Abaqus para se trabalhar com concreto. Este modelo foi adaptado para o vidro, onde descarta-se algumas particularidades do concreto como: esmagamento sob compressão e efeitos da dilatação (Wan et al., 2010).

As simulações foram executadas no método explícito/dinâmico. As indentações foram realizadas de maneira quase-estática com o intuito de eliminar o efeito da inércia do indentedor. No método explícito/dinâmico o tempo computacional é definido pelo menor elemento do modelo, desta forma, foi utilizado um fator de escala de 1000 vezes para garantir resultados confiáveis e em um menor tempo computacional. Tempo de incremento foi definido automaticamente pelo software para garantir a estabilidade durante a simulação.

O modelo 3D, Fig. (1), consiste de um indentedor padrão Vickers (piramidal de base quadrada e ângulo entre as faces de 136°) e uma amostra cilíndrica nas dimensões: $H = 100 \mu\text{m}$ de altura por $R = 100 \mu\text{m}$ de raio. Foi simulado apenas 1/8 de todo o sistema indentedor/amostra (Zeng, Giannakopoulos, Rowcliffe, 1995; Casals, Alcalá, 2005; Pulecio, 2010).

Na Fig. (1) também pode ser visto, na região próxima ao indentedor, que a densidade de elementos é maior para propiciar melhores resultados. O menor elemento possui $0,64 \mu\text{m}$ de comprimento. O raio e a altura da região mais densa são de $15 \mu\text{m}$.

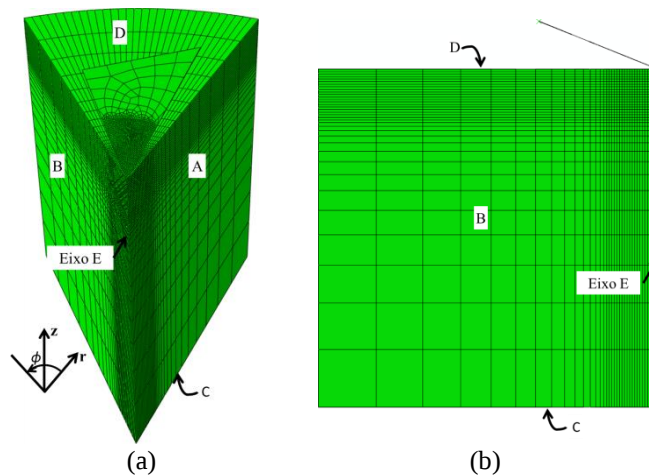


Figura 1: Geometria do corpo de prova e indentedor utilizados na simulação. Vista isométrica e (b) vista lateral

Para as condições de contorno, define-se um sistema de coordenadas cilíndricas r , ϕ e z , Fig. (2). Foi restringida a movimentação em ϕ para os nós nas superfícies A e B, a movimentação em z dos nós na superfície C e a movimentação em r e ϕ dos nós no eixo E. A superfície D é onde ocorre o contato entre indentedor e amostra, desta forma possui os elementos de contato (Zeng, Giannakopoulos, Rowcliffe, 1995; Casals, Alcalá, 2005; Pulecio, 2010).

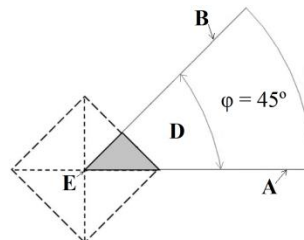


Figura 2: Modelo geométrico do indentedor Vickers, adaptado de Pulecio (2010). A figura apresenta a vista superior do sistema indentedor/amostra.

O indentedor foi modelado como uma casca rígida, ou seja, não sofre deformação. O elemento utilizando para representar o indentedor foi o “R3D4”, composto de quatro nós, 3D, bilinear, rígido e quadrilateral (Simulia, 2010). A

amostra foi composta de elementos do tipo “C3D8R”, que possuem oito nós, linear e integração reduzida (Simulia, 2010).

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

3. RESULTADOS

As curvas experimentais $p-h$ (força-deslocamento) de ensaio de dureza instrumentada com indentedor Vickers são apresentadas na Fig. (3).

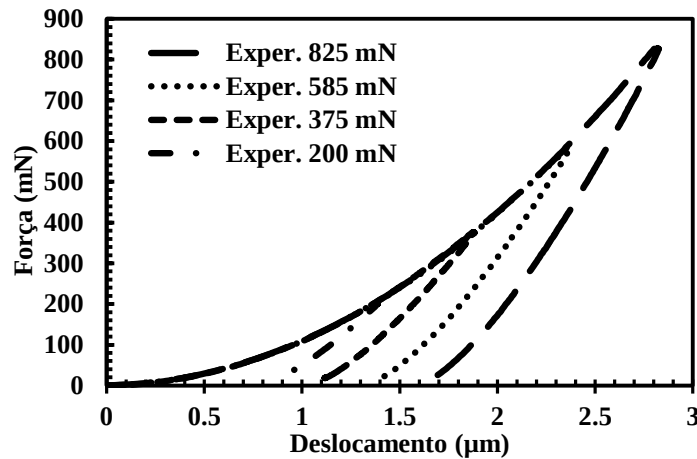


Figura 3: Curvas experimentais de força-deslocamento, $p-h$. Testes realizados com indentedor Vickers.

As curvas $p-h$ apresentaram o comportamento esperado com a literatura (Oliver, Pharr, 1992; Gong, Miao, Peng, 2004). A fase de carregamento obedece a Eq. (4) (Cook, Pharr, 1990; Giannakopoulos ;Larsson, 1997). Para o vidro estudado, o valor da constante C é igual a $106,78 \pm 1,51$ GPa com R^2 de 0,9998. Os autores Oliver e Pharr (1992) encontraram o valor de C igual a 99,2 GPa para uma força de 120 mN, uma diferença de 7 %. Para uma força de 40 N (Cook, Pharr, 1990), o valor da constante C foi de 48,6 GPa. Isto indica que o aparecimento de trincas pode influenciar, significativamente, na curva de carregamento (Cook, Pharr, 1990; Giannakopoulos, Larsson, 1997).

Segundo Oliver e Pharr (1992), a fase de descarregamento pode ser descrita pela Eq. (6).

$$P = B(h - h_r)^m \quad (6)$$

Onde B (mN/ μmm) e m são constantes relacionadas ao material; h_r (μm) é o deslocamento final após o descarregamento.

Para uma força de 120 mN, Oliver e Pharr (1992) encontraram para o vidro o valor da constante B sendo 0,0279 mN/ μmm e o expoente m igual a 1,38. Para o vidro estudado os valores encontrados são descritos na Tab. (2).

Tabela 2: Constantes relacionadas a fase de descarregamento.

Força (mN)	m	B (mN/ μmm^m)
200	$1,44 \pm 0,026$	$397,04 \pm 20,7$
375	$1,39 \pm 0,026$	$466,17 \pm 2,55$
575	$1,40 \pm 0,010$	$543,9 \pm 3,27$
825	$1,54 \pm 0,009$	$555,44 \pm 4,30$

Os valores das constantes C (fase de carregamento), B e m (fase de descarregamento) foram utilizados para caracterizar e validar as curvas obtidas pelo método de elementos finitos (MEF).

As propriedades plásticas do vidro foram obtidas a partir da técnica de ajuste de curva desenvolvida por (Giannakopoulos, Larsson, Vestergaard, 1994; Zeng, Chiu, 2001), Fig. (4a) mostra a curva de descarregamento e a curva de ajuste dos primeiros 30% da fase de descarregamento. A curva de ajuste para a fase de carregamento e a curva experimental são mostradas na Fig. (4b).

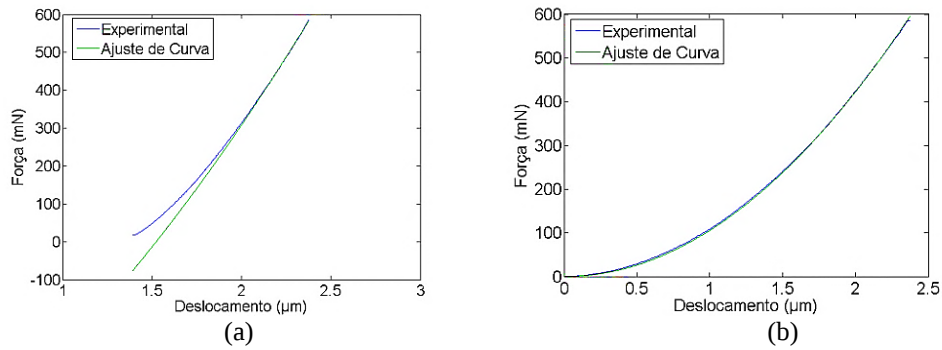


Figura 4: (a) Fase de descarregamento. (b) Fase de carregamento. Curva de dureza instrumentada obtida com penetrador Vickers e força de 585 mN.

O valor de módulo de elasticidade, limite de escoamento e coeficiente de encruamento encontrados da análise das curvas p - h experimentais são apresentados na Tab. (3).

Tabela 3: Dados elasto-plásticos do vidro obtidos pela técnica de (Giannakopoulos, Larsson, Vestergaard, 1994; Zeng, Chiu, 2001).

E (GPa)	σ_{yc} (GPa)	n
$68,78 \pm 1,20$	$2,079 \pm 0,035$	$0,503 \pm 0,023$

A Tabela 3 mostra que o valor do módulo de elasticidade encontrado pela técnica de ajuste de curva é próximo do valor da literatura, 70 GPa (Oliver, Pharr, 1992).

O valor do limite de escoamento, encontrados na literatura, estão entre 1,9 a 3 GPa e coeficiente de encruamento está entre 0,3 a 0,4. (Chiang, Marshall e Evans, 1982; Zeng, Giannakopoulos e Rowcliffe, 1995; Zeng e Chiu, 2001).

Ao avaliar a trinca de Hertz no vidro por simulações, Marimuthu et al. (2017) utilizaram o valor de 300 MPa para tensão de ruptura do vidro e obtiveram resultados coerentes com os encontrados em testes experimentais. Desta forma, neste trabalho, também foi adotado a tensão de ruptura do vidro em tração como sendo igual a 300 MPa.

Com relação aos resultados encontrados anteriormente e a literatura, definiu-se as propriedades elasto-plásticas do vidro descritas na Tab. (4).

Tabela 4: Parâmetros adotados na simulação de microindentações Vickers.

E (GPa)	ν	σ_c (MPa)	n	σ_t (MPa)
69	0,23	2080	0,5	300

3.1. Simulação de Microindentação Vickers

A Figura (5) mostra as curvas p - h obtidas por elementos finitos. A figura também faz uma comparação com os resultados experimentais dos ensaios de indentação instrumentada para diferentes forças de indentação.

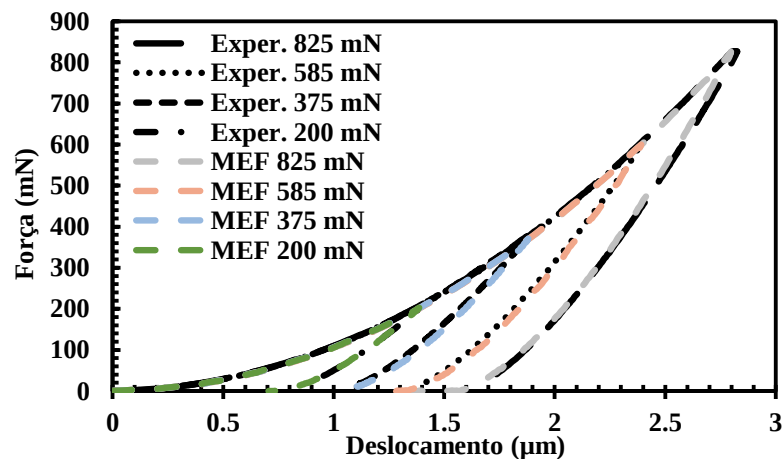


Figura 5: Comparação entre experimental e MEF de microindentações Vickers.

Pode ser visto na Fig. (5), que houve boa concordância entre as curvas $p-h$ experimental e MEF. O valor da constante C , obtida por MEF, é igual a 104,84 GPa, uma diferença de 1,8 % em relação ao experimental que é igual a $106,78 \pm 1,51$ GPa. O valor das constantes B e m e os respectivos erros são apresentados na Tab. (4)

Tabela 4: Constantes relacionadas a fase de descarregamento encontradas por elementos finitos.

Força (mN)	m	Erro (%)	B (mN/ μm^m)	Erro (%)
200	1,50	3,88%	377,50	-4,92%
375	1,39	0,00%	466,10	-0,02%
575	1,41	0,46%	541,00	-0,53%
825	1,49	-2,92%	597,00	7,48%

Observa-se que o modelo em elementos finitos apresenta um erro menor que 7,5 %, o que indica que o modelo é semelhante ao experimental.

A comparação do raio das trincas radiais experimental e MEF podem ser visto na Fig. (6).

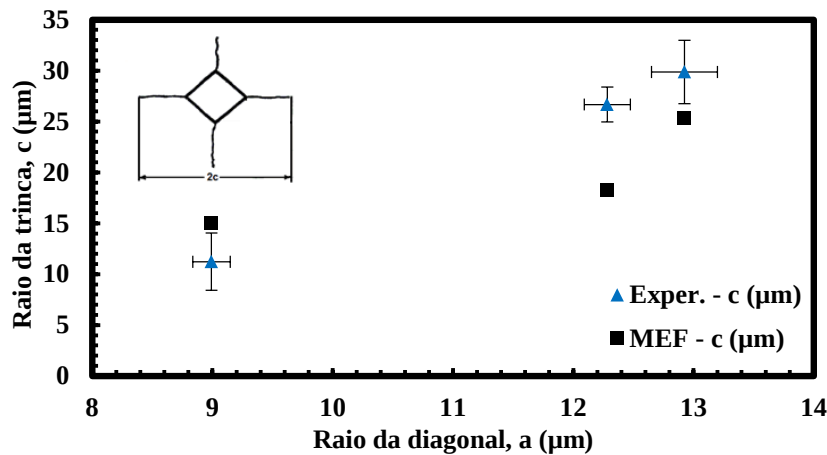


Figura 6: Comparação do raio das trincas radiais, c , experimental e MEF. Indentador Vickers.

Observa-se que ao utilizar o CDP implementado ao Abaqus, o valor do raio das trincas radiais apresentou um erro, em relação ao experimental, de aproximadamente 30%. Este resultado pode estar relacionado à complexidade da formação de trincas durante o processo de indentação. No modelo utilizado as trincas são formadas apenas por tensões de tração. As trincas de indentação surgem devido ao modo de misto de tração e cisalhamento. Parte dos erros também podem estar associados a equação que relaciona a tensão e abertura da trinca, que neste trabalho considera uma relação linear. Os valores adotados de tensão de ruptura e tenacidade à fratura, ambas encontrados na literatura, também podem estar influenciando nos erros.

4. CONCLUSÕES

Com a análise dos resultados pode-se concluir que:

Ao utilizar o Abaqus e o *Concrete Damage Plasticity* (CDP) foi possível simular o comportamento do vidro ao ser indentado por um penetrador Vickers. As simulações mostraram boa concordância com os ensaios experimentais principalmente quanto a tamanho da impressão de dureza Vickers, com erros menores que 7,5 %. As principais ressalvas são em relação ao comprimento das trincas radiais que apresentaram erros de até 30 % e no formato das trincas, que ao utilizar o CDP, não foi possível simular a nucleação das trincas laterais ou medianas.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES, FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro. Os autores também agradecem o Laboratório Nanotech de Tribologia da UFMG.

6. REFERÊNCIAS

Chiang, S. S., Marshall, D. B., Evans, A. G. "The response of solids to elastic/plastic indentation. I. Stresses and residual stresses". *Journal of Applied Physics*, v. 53, n. 1, 1982, p. 298-311.

- Casals, O., Alcalá, J. “The duality in mechanical property extractions from Vickers and Berkovich instrumented indentation experiments”. *Acta Materialia*, v. 53, n. 13, 2005, p. 3545-3561.
- Cook, R. F., Pharr, G. M. “Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics”. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 73, n. 4, 1990, p. 787-817.
- da Silva, W. M. “Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas”. 2008. Teses de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- da Silva, W. M.; Costa, H. L.; de Mello, J. D. B. “Transitions in abrasive wear mechanisms: Effect of the superimposition of interactions”. *Wear*, v. 271, n. 5–6, 2011, p. 977-986.
- da Silva, W. M.; de Mello, J. D. B. “Using parallel scratches to simulate abrasive wear”. *Wear*, v. 267, n. 11, 2009, p. 1987-1997.
- Giannakopoulos, A. E., Larsson, P. L. “Analysis of pyramid indentation of pressure-sensitive hard metals and ceramics”. *Mechanics of Materials*, v. 25, n. 1, 1997, p. 1-35.
- Giannakopoulos, A. E., Larsson, P. L., Vestergaard, R. “Analysis of Vickers indentation”. *International Journal of Solids and Structures*, v. 31, n. 19, 1994, p. 2679-2708.
- Gong, J., Miao, H., Peng, Z. “On the contact area for nanoindentation tests with Berkovich indenter: case study on soda-lime glass”. *Materials Letters*, v. 58, n. 7–8, 2004, p. 1349-1353.
- Hagan, J. T., Van Der Zwaag, S. “Plastic processes in a range of soda-lime-silica glasses”. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 64, n. 1, 1984, p. 249-268.
- Le Houérou, V., Sangleboeuf, J. C., Dériano, S., Rouxel, T., Duisit, G. “Surface damage of soda–lime–silica glasses: indentation scratch behavior”. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 316, n. 1, 2003, p. 54-63.
- Marimuthu, K. P., Rickhey, F., Lee, J. H., Lee, H. “Spherical indentation for brittle fracture toughness evaluation by considering kinked-cone-crack”. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 37, n. 1, 2017, p. 381-391.
- Pulecio, S. A. R. “Modelamento do ensaio de indentação instrumentada usando elementos finitos e análise dimensional - análise de unicidade, variações experimentais, atrito e geometria e deformações do indentador”. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.
- Oliver, W. C., Pharr, G. M. “An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments”. *Journal of Materials Research*, v. 7, n. 06, p. 1564-1583, 1992.
- Sánchez-González, E., Meléndez-Martínez, J. J., Pajares, A., Miranda, P.; Guiberteau, F., Lawn, B. R. “Application of Hertzian Tests to Measure Stress–Strain Characteristics of Ceramics at Elevated Temperatures”. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 90, n. 1, 2007, p. 149-153.
- Simulia. “ABAQUS Manual de análises do usuário 6.10”. Providence, RI. 2010.
- Wan, H., Shen, Y., Chen, Q., Chen, Y. “A plastic damage model for finite element analysis of cracking of silicon under indentation”. *Journal of Materials Research*, v. 25, n. 11, 2010, p. 2224-2237.
- Zeng, K., Chiu, C. H. “An analysis of load–penetration curves from instrumented indentation”. *Acta Materialia*, v. 49, n. 17, 2001, p. 3539-3551.
- 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, 1995, p. 1945-1954.
- Zhang, W., Subhash, G. “An elastic–plastic–cracking model for finite element analysis of indentation cracking in brittle materials”. *International Journal of Solids and Structures*, v. 38, n. 34–35, 2001, p. 5893-5913.

7. DIREITOS AUTORAIS

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