



Simulação Numérica do Ensaio Vickers em Materiais com Características Frágeis

Danilo Amorim da Silva

amorim8silva@yahoo.com.br

Universidade Federal de São João del Rei. Praça Frei Orlando, 170, Departamento de Engenharia Mecânica -
Centro, São João del Rei (MG) - Brasil. CEP: 36307-352.

Marcelo Gonçalves Pereira

marcelo08@yahoo.com.br

Avelino Manuel da Silva Dias

avelino@ufsj.edu.br

Sergio Augusto Araújo da gama Cerqueira

sergioc@ufsj.edu.br

RESUMO: *Este trabalho apresenta os resultados da análise numérica dos testes de dureza Vickers através de um modelo com elementos tridimensionais utilizando-se um código comercial de elementos finitos, MARC™. Ensaios de indentação são amplamente utilizados para a determinação da dureza superficial em diferentes materiais. Diversos pesquisadores têm desenvolvido novas técnicas baseadas nos resultados destes ensaios para avaliação de propriedades mecânicas como, por exemplo, a tenacidade à fratura. Foram estudados dois materiais com características frágeis, o carboneto de tungstênio com 6% de cobalto e o óxido de alumínio. Por fim, são apresentados os resultados numéricos obtidos para a dureza superficial, que se mostraram próximos à faixa de valores experimentais presentes na literatura especializada, assim como a representação do campo de tensões durante o ciclo de indentação.*

Palavras-chave: *Análise de Tensões, Elementos Finitos, Dureza vickers.*

1. INTRODUÇÃO

O ensaio Vickers é amplamente utilizado na caracterização da dureza superficial em diferentes classes de materiais. Devido a sua versatilidade, nas últimas décadas este ensaio tem sido também utilizado para avaliar características mecânicas como, por exemplo, o módulo de Young (E), a tenacidade à fratura (K_{IC}), e uma curva de tensão *versus* deformação do comportamento elasto-plástico sob compressão.

Entretanto, a utilização desta técnica de indentação para a avaliação das propriedades mecânicas e os resultados obtidos ainda são questionados no meio científico^(1, 2). Em função das restrições à análise dos ensaios de indentação, o uso de uma técnica numérica capaz de avaliar os campos de tensões e de deformações durante o ciclo de indentação pode auxiliar em uma interpretação mais segura deste ensaio. Há alguns anos esta metodologia numérica começou a ser estudada através de modelos discretos de elementos finitos para avaliar o comportamento de diferentes materiais sob o ensaio de indentação.^(3, 4)

O método dos elementos finitos (MEF), vem sendo amplamente utilizado para simular e resolver inúmeros problemas não lineares nas áreas de instabilidade estrutural, de sistemas dinâmicos, termo-fluidodinâmicos, eletromagnéticos e de conformação mecânica. Neste trabalho, o MEF é empregado para avaliar os campos de tensões e deformações durante o ciclo de indentação para dois diferentes materiais, o carboneto de tungstênio com 6% de cobalto (WC-6Co) e o óxido de alumínio (Al_2O_3).

2. METODOLOGIA

O ensaio de dureza consiste na penetração de um indentador, considerado rígido, na superfície de uma amostra do material a ser avaliado.⁽⁵⁾ A Figura (1) ilustra um penetrador piramidal de diamante para o ensaio de dureza Vickers.

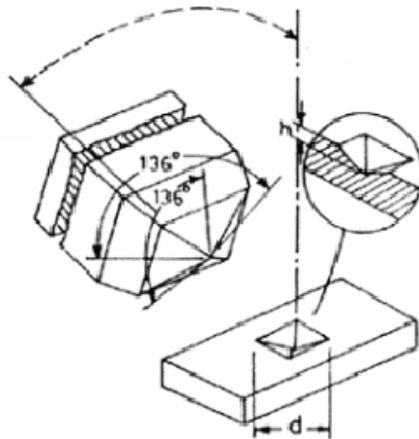


Figura 1. Ilustração do indentador Vickers⁽⁶⁾

A impressão resultante do indentador pode ser observada por um microscópio e o valor da dureza é determinado pela Equação (1), sendo a carga (F) em newtons e o diâmetro médio (d) calculado a partir do comprimento das duas diagonais da impressão, em metros.⁽¹⁾

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

Neste estudo, a simulação numérica do ensaio de indentação foi realizada utilizando-se elementos tridimensionais isoparamétricos. Aproveitou-se a simetria do problema em relação a $\frac{1}{4}$ de sua geometria, para reduzir o esforço computacional. ⁽⁶⁾

A amostra ensaiada foi modelada como sendo um cubo circular plano utilizando-se elementos cúbicos de 8 nós para o Al_2O_3 e elementos cúbicos de 20 nós para o WC-6Co, contendo 4752 elementos para ambos os materiais estudados, com 21845 nós para o WC-6Co e 5715 nós para a Al_2O_3 . A Figura (2) apresenta a malha utilizada para os modelos numéricos ensaiados. Nessa análise, os materiais estudados foram considerados isotrópicos e homogêneos. Na discretização do modelo optou-se por uma malha mais refinada na área de contato com o indentador. Esta amostra possui restrição ao deslocamento na direção da indentação (eixo z) como condição de contorno da base. Nas demais direções foram aplicadas às condições de contorno relativas à simetria do problema. ^(7, 8) O indentador piramidal Vickers com ângulo de abertura entre as faces opostas de 136° e foi modelado como uma placa rígida penetrando na amostra plana.

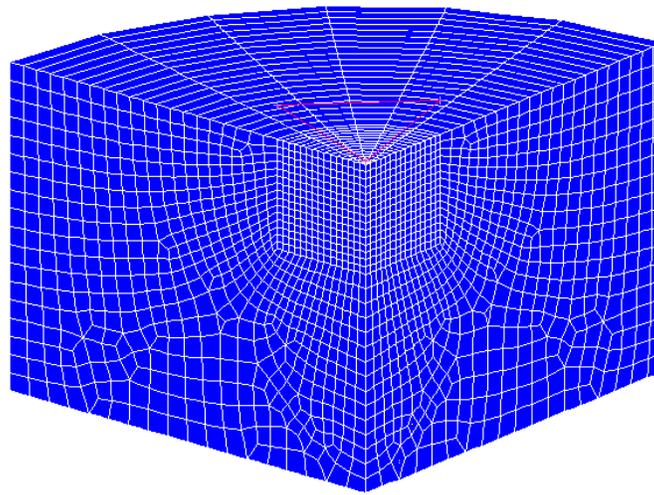


Figura 2. Malha do modelo numérico para simulação do ensaio Vickers.

O ensaio Vickers apresenta uma particularidade muito importante do ponto de vista da simulação numérica, pois o valor da dureza superficial independe da carga aplicada e pode ser considerado como proporcional à razão entre a força e a área da impressão do indentador. Por isso, foi possível fazer a análise numérica da aplicação da carga do indentador rígido na amostra ensaiada através do seu deslocamento prescrito, permitindo um melhor controle numérico durante o ciclo de indentação. Utilizaram-se 30 interações nas fases de carregamento e de descarregamento para o modelo do WC-6Co, enquanto para o Al_2O_3 foram utilizadas 300 interações em ambas as fases.

Para representar o comportamento mecânico elasto-plástico do material estudado sob compressão, segundo a curva de fluxo da Equação (2), foram utilizados os valores obtidos na literatura para ensaios experimentais de nanoindentação para cada um dos materiais analisados.

$$\sigma_e = B + A \varepsilon_e^m \dot{\varepsilon}_e^n \quad (2)$$

Nessa equação, (σ_e) a tensão efetiva, (ε_e) a deformação efetiva, $(\dot{\varepsilon}_e)$ a velocidade de deformação efetiva, (m) o coeficiente de encruamento e (n) o coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação. A Tabela (1) relaciona os valores experimentais adotados para definir a curva de fluxo,

assim como os valores do módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), limite de escoamento (σ_y), limite de ruptura transversal a tração (σ_{TR}).⁽⁶⁾

Tabela 1. Propriedades Mecânicas do Al_2O_3 e $WC-6Co$ ^(6,9)

	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_{TR} (MPa)	A	m
Al_2O_3	370	0,22	400	300	15830	0,396
WC-6Co	619.5	0,28	5760	3750	18060	0,244

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na simulação dos ensaios de indentação com penetradores piramidais, utilizou-se o modelo conforme a Figura (2), sendo incorporada uma curva de fluxo elasto-plástica para caracterizar o comportamento mecânico do material.

Foram ensaiados os modelos do WC-6Co e do Al_2O_3 e, após o ciclo do ensaio, carregamento e descarregamento, obtiveram-se o campos de tensões conforme Figura (3) e Figura (4).

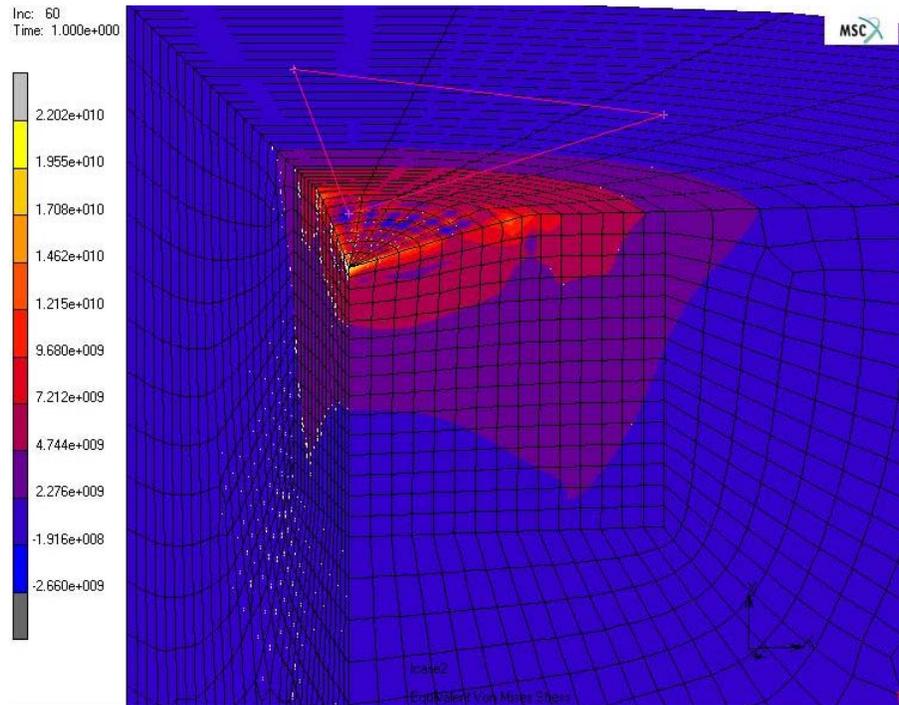


Figura 3. Representação numérica do campo de tensões de Von Mises (Pa) do WC-6Co

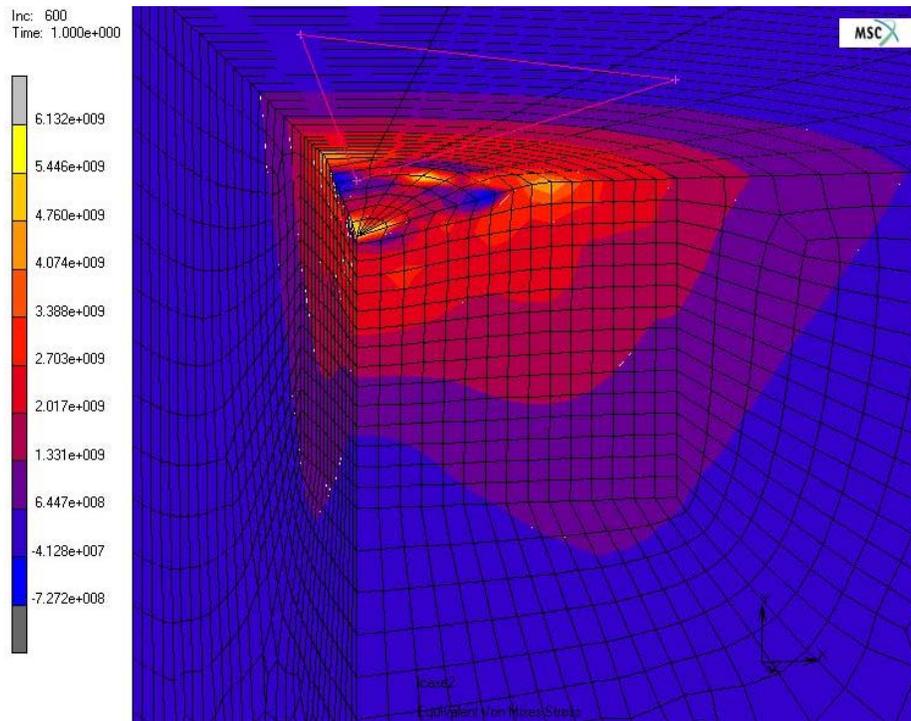


Figura 4. Representação numérica do campo de tensões de Von Mises (Pa) do Al_2O_3

Os campos de tensões ilustrados acima, mostram que para uma mesma profundidade de indentação, no WC-6Co ocorreu tensões maiores comparados aos valores da alumina. Isso se deve ao fato do carboneto apresentar uma resistência mecânica maior. Os valores de tensões na região de indentação podem indicar uma maior tendência a propagação de trincas, já que em ambos os materiais, as tensões ultrapassaram o limite de ruptura, conforme Tabela (1).

Os resultados numéricos de dureza superficial obtidos com as simulações propostas foram comparados com alguns valores encontrados na literatura especializada, como mostram as Tabelas (2) e (3).

Tabela 2. Comparação da dureza com valores encontrados na literatura (WC-6Co)

Fonte	Dureza - H (GPa)	Tipo de análise
Modelo proposto	21,09	Numérica
Trent (1984)	16,70 – 18,00	Experimental
Dias, et al. (2006)	15,50 – 18,03	Experimental

Tabela 3. Comparação da dureza com valores encontrados na literatura (Al_2O_3)

Fonte	Dureza – H (GPa)	Tipo de análise
Modelo proposto	14,36	Numérica
Matweb (2007)	13,65 – 20,85	Experimental
Ponton & Rawlings (1989)	14,96 – 19,06	Experimental

O valor encontrado de dureza para o WC-6Co apresenta um erro em torno de aproximadamente 17% comparado ao de dois autores mencionados na Tabela (2), mas segundo dados da Sandvik⁽¹⁰⁾ os valores de nanodureza para esse material estão em torno de 22GPa.

4. CONCLUSÃO

Para os modelos numéricos dos ensaios de indentação, os resultados obtidos para dureza superficial do carboneto de tungstênio com 6% de cobalto e do óxido de alumínio se mostraram próximos da faixa de dureza encontrada na literatura especializada. Esses resultados indicam que os modelos numéricos desenvolvidos são capazes de representar o comportamento global desses ensaios.

A partir desses modelos, pretende-se implementar modelos constitutivos baseados na mecânica clássica para avaliar os mecanismos de nucleação e crescimento de trincas que ocorrem em materiais com características frágeis submetidos ao ensaio de indentação.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à UFSJ (Universidade Federal de São João del Rei) pelo apoio financeiro e técnico. A todos os professores e alunos do grupo de pesquisa do Laboratório de Mecânica Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSJ.

6. REFERÊNCIAS

1. Ponton, C.B.; Rawlings, R.D. Vickers Indentation Fracture Toughness Test, Part 1: Application and Evaluation of Standardized Indentation Toughness Equations. *Materials Science and Technology*. v.5, p.961-976, 1989.
2. Schubert, W. D.; Neumeister, H.; Kingler, G.; Lux, B. Hardness to Toughness Relationship of Fine-grain WC-Co Hardmetals. *International Journal of Refractory Metals & Hard Metals*. 16, p.133-142, 1998.
3. Laursen, T.A., Simo, J.C., “A Study of the Mechanics of Microindentation Using Finite Elements”, *Journal of Materials Research*, v. 7, n. 3, pp. 618-626, 1992.
4. Dias, A. M. S.; Modenesi, P. J.; Godoy, C., “Computer Simulation of Stress Distribution During Vickers Hardness Testing of WC-6Co”. *Materials Research*, Vol. 9, No. 1, 73-76, 2006.
5. Souza, S.A., *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos*, Ed. Edgard Blücher LTD, 5th Ed., 2000, 286p.
6. Dias, A. M. S., 2004. “Análise Numérica do Processo de Fratura no Ensaio de Indentação Vickers em uma Liga de Carboneto de Tungstênio com Cobalto”, Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
7. Zhang, W., Subhash, G., 2001, “An Elastic-Plastic-Cracking Model for Finite Element Analysis of Indentation Cracking in Brittle Materials”, *International Journal of Solids and Structures*, 38, pp.5893-5913.
8. Dias, A.M.S., Modenesi, P.J., Cristina, G.C., Cetlin, P.R., 2005, “Análise Numérica do Ensaio de Indentação em WC-6Co”, *Revista Matéria*, v. 10, n. 1, pp. 101-110.
9. www.matweb.com, Material Type, Ceramics, Mechanical Properties de Aluminum Oxide, Alumina, 99,9 %, Al₂O₃.
10. Sandvik, 2000, “Manual do Fabricante”.

7. DIREITOS AUTORAIS

Danilo Amorim da Silva
amorim8silva@yahoo.com.br

Universidade Federal de São João del Rei. Praça Frei Orlando, 170, Departamento de Engenharia Mecânica -
Centro, São João del Rei (MG) - Brasil. CEP: 36307-352.

Marcelo Gonçalves Pereira

marcelo08@yahoo.com.br

Avelino Manuel da Silva Dias

avelino@ufsj.edu.br

Sergio Augusto Araújo da gama Cerqueira

sergioc@ufsj.edu.br