

ANÁLISE DO ENSAIO VICKERS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.

A.M.S. Dias

Departamento de Mecânica – Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).
Praça Frei Orlando, 170 - SJdRei - MG - Brasil - CEP.: 36307-904 – 032-3379-2600.
avelino@ufs.edu.br

P.J. Modenesi, G. C. Godoy, P.R. Cetlin.

Departamento de Eng. Metalúrgica - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).
Rua Espírito Santo, 35 - Sala 104, Centro - Belo Horizonte - MG – Brasil.
modenesi@demet.ufmg.br

Resumo. Neste trabalho é apresentada a análise numérica dos ensaios de indentação Vickers, utilizando-se um modelo tridimensional, através do código comercial de elementos finitos MARC™, que se mostra promissor para a análise de problemas onde ocorrem processos de fratura. Os resultados numéricos de dureza superficial apresentaram-se compatíveis com valores experimentais, assim como a variação da carga com o deslocamento durante o ciclo de indentação. A partir do campo das tensões normais principais máximas, procurou-se melhor identificar os mecanismos de nucleação de trincas que ocorrem nestes ensaios em amostras de carboneto de tungstênio com 6% de cobalto.

Palavras chave: Elementos Finitos, Ensaio Vickers , Metal Duro, Fratura.

1. Introdução.

Os ensaios de indentação têm sido amplamente utilizados para determinação da dureza superficial em diferentes materiais (Souza, 2000). Devido à grande versatilidade destes ensaios, numerosos trabalhos têm sido desenvolvidos neste campo, estudando-se novas metodologias e aplicações para estes ensaios. Recentes trabalhos têm sido propostos para utilizar os ensaios de indentação como ferramenta capaz de avaliar características mecânicas como o módulo de Young (E), a tenacidade à fratura (K_{IC}) e uma possível curva de fluxo do comportamento elasto-plástico destes materiais, Zeng & Chiu (2001).

Entretanto, a implementação das metodologias de indentação para a avaliação das propriedades mecânicas e os resultados que têm sido obtidos ainda ocasionam dúvidas no meio científico (Ponton & Rawlings, 1989; Szutkowska, 1999). Estas dúvidas são mais intensas quando se pretende avaliar as características mecânicas de materiais que, apesar de serem considerados como frágeis, apresentam um certo comportamento dúctil como por exemplo os carbonetos de tungstênio com cobalto, Laugier (1985). Estes materiais são utilizados principalmente na fabricação de ferramentas de corte, nas quais se deseja uma grande dureza superficial aliada a grandes resistências à compressão e ao desgaste, Trent (1994). Devido às suas peculiares características mecânicas, estes carbonetos são difíceis de serem analisados através dos ensaios mecânicos convencionais. Por isso, numerosos trabalhos utilizando testes não convencionais têm sido desenvolvidos para avaliar suas propriedades mecânicas, principalmente para a avaliação da tenacidade à fratura (Shetty et al., 1985; Densley & Hirth, 1998; Schubert et al., 1998). Entre estes testes, os ensaios de indentação Vickers têm se destacado para avaliação da tenacidade à fratura do WC-Co. Porém, esta técnica

apresenta algumas limitações e complicações na avaliação da tenacidade, das quais se destaca a diversidade de equações experimentais encontradas na literatura que utilizam dois possíveis modelos para os mecanismos de nucleação e propagação de trincas, Fig. (1). As trincas radiais superficiais que ocorrem num ensaio de indentação Vickers em um WC-Co podem ser formadas a partir do sistema de nucleação e propagação de trincas superficiais Palmqvist, Niihara et al. (1982).

Em função destas limitações nas análise dos ensaios experimentais de indentação Vickers e as diferentes equações semi-empíricas encontradas na literatura para avaliação da tenacidade à fratura em carbonetos de tungstênio com cobalto, o uso de uma técnica numérica capaz de avaliar os campos de tensões e de deformações durante o ciclo do ensaio Vickers pode auxiliar em uma interpretação mais segura deste teste. Na década passada, esta metodologia começou a ser estudada através de modelos discretos de elementos finitos para avaliar o comportamento de diferentes materiais sob ensaio de indentação (Laursen & Simo, 1992; Marx & Balke, 1997; Niezgoda & Matachowsky, 1998). Contudo, também esta metodologia tem apresentado problemas, principalmente devido às limitações computacionais e à utilização de critérios capazes de identificar numericamente os mecanismos de nucleação e propagação de trincas.

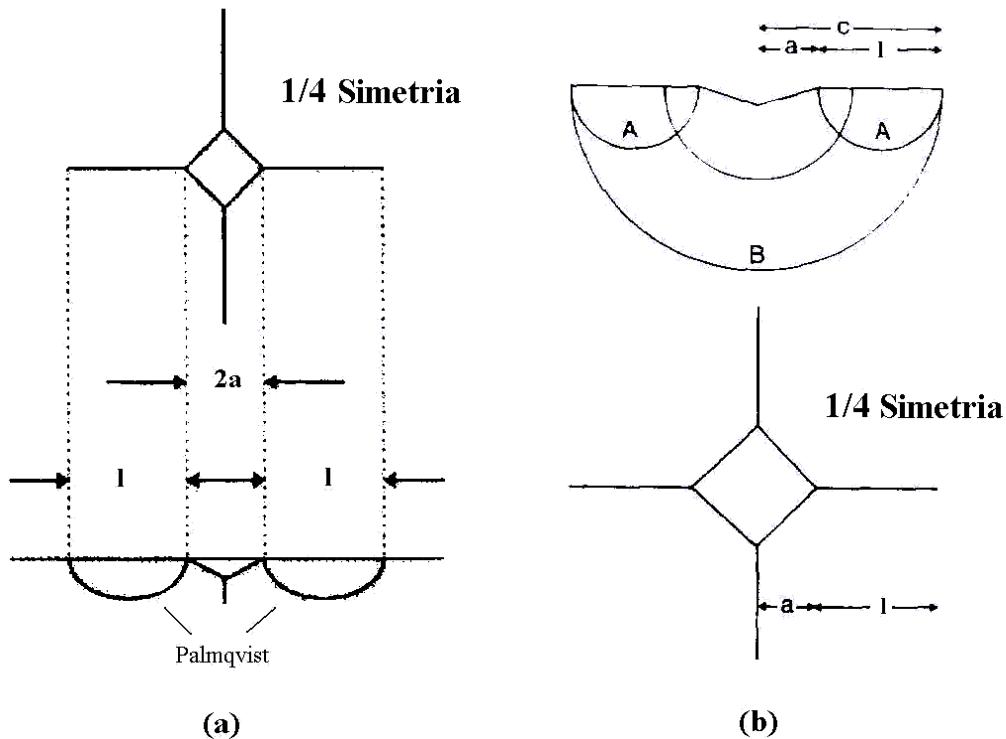


Figura 1. Comparação dos modelos geométricos de trincas radiais Palmqvist: (a) Niihara et al. (1982); (b) Laugier (1985).

No presente trabalho, são apresentadas simulações numéricas dos ensaios de indentação Vickers através de modelos discretos tridimensionais de elementos finitos, utilizando-se o código comercial de elementos finitos MARC™ (2001), para análise numérica de uma amostra de carboneto de tungstênio com 6% de cobalto (WC-6Co). Este pacote comercial mostrou-se capaz de realizar análises numéricas de problemas onde ocorrem grandes gradientes de deformações e de tensões e em análises onde ocorre não linearidade do material, Dias et al. (2002). Esta simulação dos ensaios de indentação foi motivada pela dificuldade de se visualizar experimentalmente os campos de tensões e deformações que ocorrem no carregamento e, principalmente, no descarregamento do ensaio. Estes campos de tensões e de deformações podem ser responsáveis pela nucleação e propagação de trincas e, por isso, diversos estudos têm sido feitos tentando identificar os mecanismos de nucleação e propagação de trincas durante estes ensaios Vickers. Por fim, são apresentados e

analisados os campos de tensões obtidos nestas simulações, assim como o comportamento global da carga em função do deslocamento, durante o ciclo do ensaio, e de sua dureza, os quais são comparados com valores experimentais obtidos a partir de ensaios de dureza com penetradores piramidais Vickers em uma amostra de uma pastilha de ferramenta de corte (K10) de carboneto de tungstênio com cobalto.

2. Experimentos.

Realizou-se ensaios de dureza Vickers em uma pastilha de ferramenta de corte de um carboneto de tungstênio contendo 6% de cobalto (WC-6Co), utilizando uma máquina de ensaio de dureza *Heckert* e um indentador piramidal de base quadrada de diamante, com ângulo de abertura entre as faces de 136°. Os principais objetivos destes experimentos foram de determinar a dureza superficial da amostra de WC-6Co e verificar as características deste ensaios de dureza para melhor representá-lo a partir de um modelo numérico.

Os procedimentos experimentais seguiram as orientações da norma DIN50133 (1972). Além disto, a superfície da amostra foi preparada utilizando-se um polimento seletivo, visando a obtenção de uma amostra espelhada e sem tensões residuais superficiais. Nestes experimentos, foram usadas duas cargas, uma de 294N e outra de 612,5N. Estas cargas foram lentamente aplicadas na superfície da amostra com uma velocidade de penetração entre cerca de 0,001mm/s a 0,02mm/s, por meio de um pistão, e mantidas durante 30 segundos, depois da qual foram retiradas e a impressão foi observada com um microscópio, Souza (2000). Os resultados experimentais obtidos serviram de base para validação do comportamento global desta análise numérica.

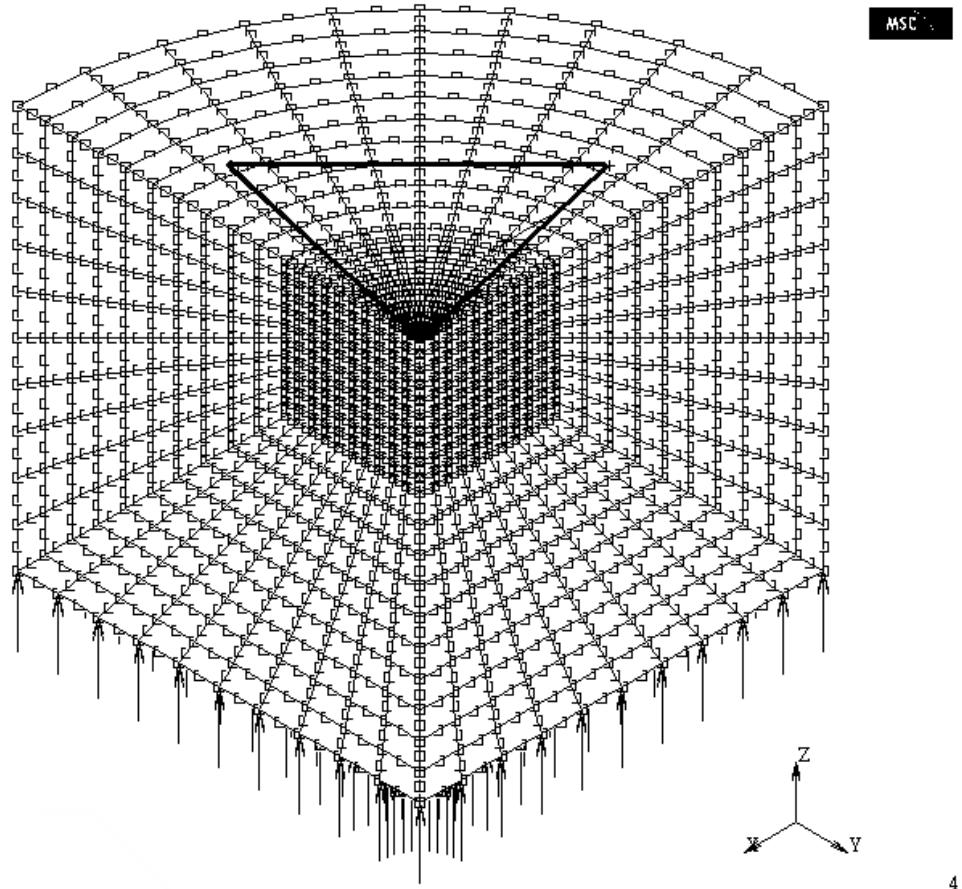
3. Modelo numérico do ensaio de indentação Vickers.

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. Esta particularidade também foi observada nos experimentos realizados. Por isso, é possível fazer a análise numérica da aplicação da carga do indentador rígido na amostra ensaiada através do seu deslocamento, permitindo um melhor controle numérico durante o ciclo de indentação. Desta forma, adotou-se um deslocamento prescrito de 0,02mm, sendo que este valor está de acordo com os deslocamentos obtidos nos testes experimentais Vickers em uma amostra de WC-6Co. Por fim, a velocidade de penetração utilizada no modelo numérico foi de 0,01mm/s na descida e de 0,02mm/s na subida do indentador. Também, com o objetivo de diminuir o esforço computacional, foi considerado somente um quarto de simetria do problema, Fig. (1).

A amostra de WC-6Co foi modelada como sendo uma placa circular plana, utilizando-se elementos tridimensionais hexaédricos de vinte nós, Fig. (2). Considerou-se esta liga como sendo um material isotrópico, homogêneo, módulo de Young de 619,5GPa e coeficiente de Poisson de 0,28, Trent (1994). Na discretização deste modelo, utilizou-se 3000 elementos e 13261 nós, sendo que na área de contato com o indentador optou-se por uma malha mais refinada. Esta placa possui restrição ao deslocamento na direção da indentação (eixo z) como condição de contorno da base. Nas direções dos eixos x e y, foram aplicadas as condições de contorno relativas à simetria do problema (Zhang & Subhash, 2001; Dias et al., 2003). O indentador piramidal Vickers com ângulo de abertura entre as faces opostas de 136° e foi modelado como uma casca rígida penetrando na placa circular plana.

Para representar o comportamento mecânico elasto-plástico do WC-6Co, segundo a curva de fluxo da Eq. (1), foram utilizados os valores obtidos na literatura para ensaios experimentais de indentação com esta liga. σ_e , ε_e , ε'_e , m e n são, respectivamente, a tensão efetiva, deformação efetiva, velocidade de deformação efetiva, coeficiente de encruamento e coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação. A Tab.(1) ilustra os valores experimentais adotados para

definir a curva de fluxo, assim como os valores do limite de escoamento (σ_y), limite de ruptura transversal (σ_{TR}) e o fator de intensidade de tensões crítico (K_{IC}) para a amostra analisada (Trent, 1994; Zeng & Chiu, 2001).



4

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

$$\sigma_e = B + A \varepsilon_e^m \dot{\varepsilon}_e^n \quad (1)$$

Tabela 1. Propriedades mecânicas do WC-6Co (Trent, 1994; Zeng & Chiu, 2001).

σ_{TR} (MPa)	σ_y (MPa)	A (MPa)	B (MPa)	n	m	K_{IC} (MN/m ^{3/2})
2300	5760	18060	0	0	0,244	10,0

4. Resultados.

Tabela 2 apresenta os dados experimentais obtidos nos ensaios de dureza realizados na amostra de carboneto de tungstênio com 6% de cobalto. Inicialmente, verifica-se a proporcionalidade entre a força e a área da impressão do indentador, importante característica do ensaio Vickers. A Fig. (3), ilustra as trincas radiais superficiais obtidas nestes ensaios de indentação. A relação entre o comprimento destas trincas sobre a metade da diagonal da impressão do indentador (l/a) encontra-se dentro da faixa de $0,25 \leq l/a \leq 2,5$, caracterizando-as como trincas radiais superficiais do tipo Palmqvist (Niihara et al., 1982; Ponton e Rawlings, 1989; Szutkowska, 1999).

Tabela 2. Dados experimentais obtidos na análise de uma amostra de WC-6Co.

Carga (N)	Dureza (GPa)	Comp. Diagonal ($2a$)	Comp. médio da trinca radial (l)	l/a
612,5	17,66	126,4 μ	80,20 μ	1,27
		139,3 μ	88,60 μ	1,27
294	18,03	89,6 μ	33,80 μ	0,75
		87,6 μ	18,10 μ	0,41

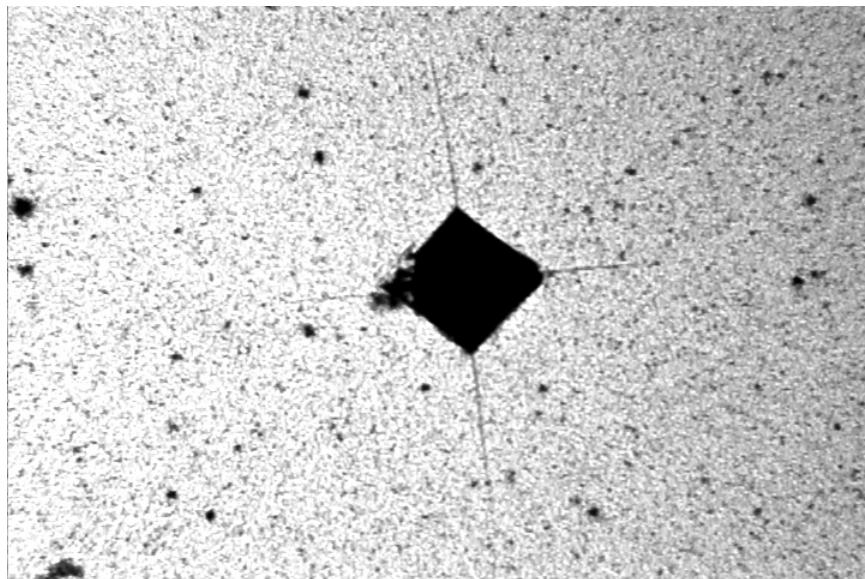


Figura 3. Trincas radiais em um ensaio de dureza Vickers com carga de 612,5N, em uma amostra de WC-6Co.

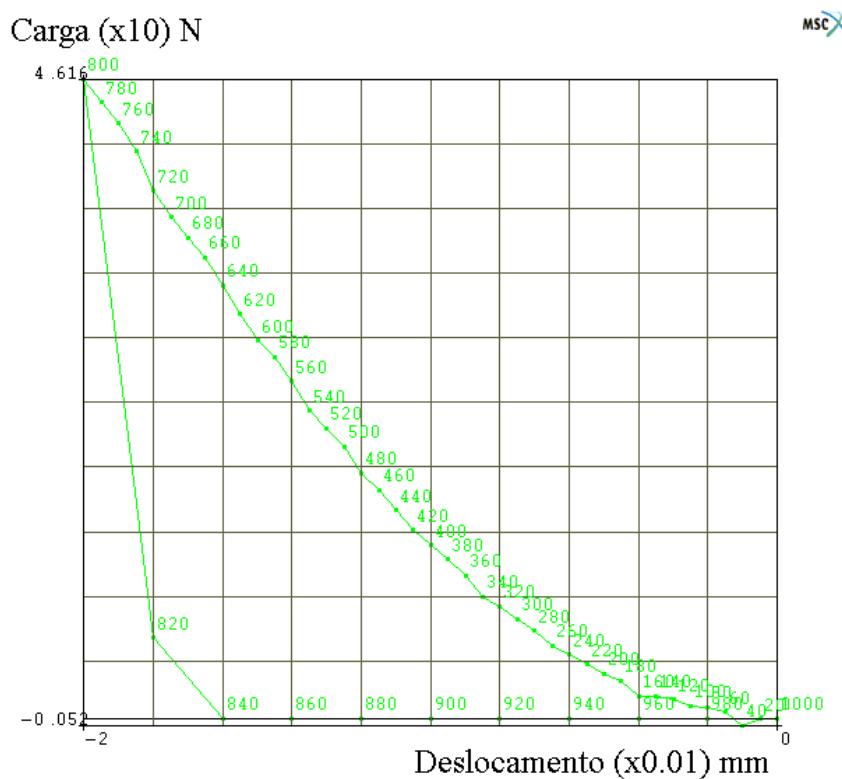


Figura 4. Curva de carga *versus* deslocamento da simulação do ensaio Vickers em WC-6Co.

O valor da dureza superficial obtido a partir da análise numérica no WC-6Co foi de 18,63GPa, apresentando uma diferença de 3,5% em relação aos valores experimentais. Portanto, esta simulação numérica, utilizando modelos discretos tridimensionais, parece representar bem o comportamento global dos ensaios de indentação. Figura (4) mostra o gráfico do comportamento global da carga do indentador *versus* seu deslocamento. Este gráfico também se mostra compatível com curvas similares encontradas na literatura para os ensaios de indentação Vickers em materiais frágeis (Marx & Balke, 1997; Zhang & Subhash, 2001; Zeng & Chiu, 2001). Analisando-se esta curva da carregamento durante o ciclo do ensaio, verifica-se que a amostra de carboneto de tungstênio com 6% de cobalto apresenta uma pequena deformação plástica no descarregamento e esta parece ser a responsável pelo aparecimento do campo de tensões residuais e, consequentemente, pela nucleação e propagação de trincas, durante a fase de descarregamento do ciclo de indentação.

Figura (5) ilustra a distribuição prevista numericamente das tensões principais máximas após o ciclo de indentação. Esta distribuição de tensões mostra-se compatível com os resultados de outros trabalhos numéricos, indicando um grande gradiente de tensões de tração existente na direção da diagonal do indentador e sugere a nucleação e propagação de trincas do tipo Palmqvist, pois o seu máximo valor é maior que o limite a ruptura transversal do WC-6Co (σ_{TR}), Tab. (1).

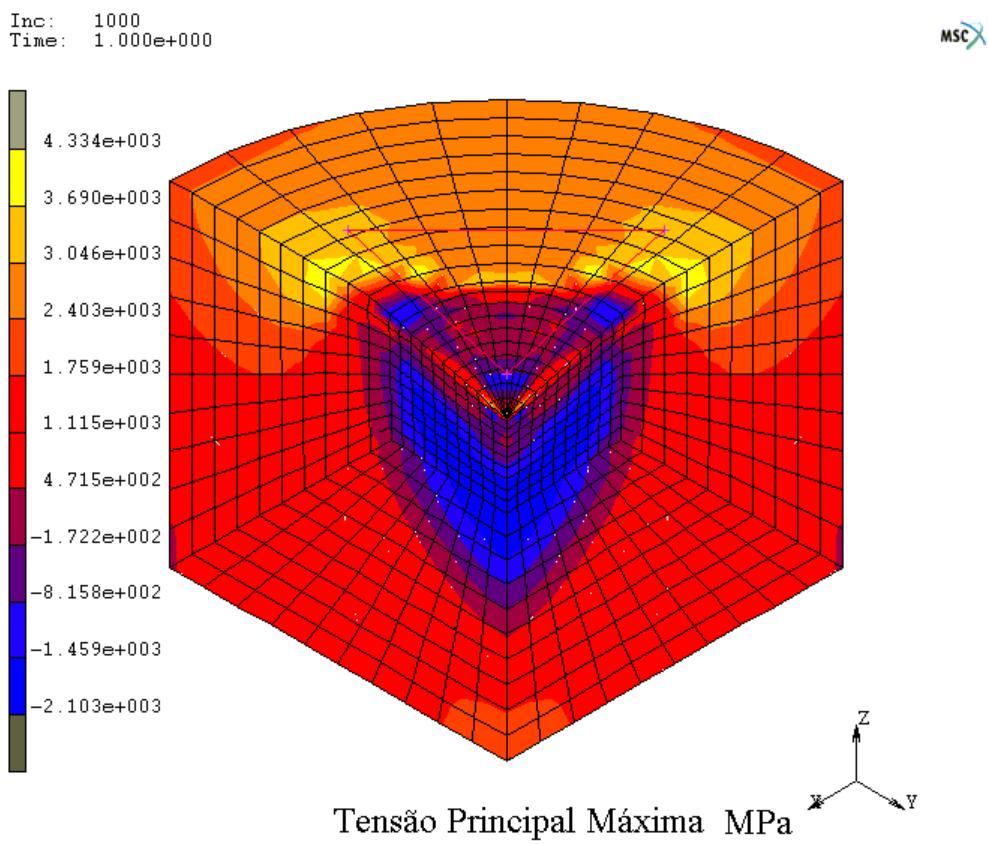


Figura 5. Distribuição das tensões principais máximas após o ciclo de indentação.

5. Conclusões.

As análises tridimensionais mostraram que a simulação numérica utilizando modelos discretos para representar os ensaios de indentação Vickers apresentam bons resultados para o seu comportamento global e para alguns aspectos qualitativos dos campos de tensões.

Neste trabalho, não foi possível obter resultados adequados para avaliação da nucleação e propagação de trincas durante as simulações em uma liga de WC-6Co. Apesar dos resultados obtidos indicarem a possibilidade da nucleação e propagação de trincas radiais superficiais Palmqvist durante o ciclo do ensaio, Fig. (5), a falta de parâmetros confiáveis para se calcular o valor do dano crítico para estas ligas impendem um maior avanço nestas análises. Alternativamente pode-se utilizar como critério para avaliação da nucleação e propagação de trincas o fator de intensidade de tensões crítico (K_{IC}) nestas análises.

Apesar destas dificuldades a utilização desta ferramenta numérica para avaliação do comportamento dos ensaios de indentaçāo tem-se mostrado promissora (Zhang & Subhash, 2001; Dias et al., 2003).

6. Agradecimentos.

Os autores agradecem ao suporte financeiro provido pelas agências de fomento à pesquisa CAPES/PICDT e FAPEMIG.

7. Referências.

- Densley, J.M., Hirth J. P., "Fracture Toughness of a Nanoscale WC-Co Toll Steel", *Scripta Materialia*, 38 (1998), pp.239-244.
- Dias, A.M.S., Modenesi, P.J., Cristina, G.C., Cetlin, P.R., "Numerical Analysis of the Vickers Indentation Testing", Anais do 23º Congresso Ibero-Latino Americano de Engenharia Computacional, Giulianova, Teramo, Itália, (2002), CD-ROM.
- Dias, A.M.S., Modenesi, P.J., Cristina, G.C., Cetlin, P.R., "Análise Numérica dos Ensaios de Fratura em Metal Duro WC-Co", Anais do 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, Brasil, (2003), CD-ROM.
- DIN 50133, "Testing of Metallic Materials – Vickers hardness Testing", Deutschen Normen, 1972, 7p.
- Laugier, M. T., "Palmqvist Crack Extension and the Center-load Penny Crack Analogy", *J. American Ceramic Society*, 68 (1985), pp.51-52.
- Laursen, T. A., Simo, J. C., "A Study of the Mechanics of Micro-indentation Using Finite Elements", *J. Materials Research*, 7 (1992), pp.618-626.
- MARC, MSC., "Volume A: Theory and User Information", Version 2001.
- Marx, V., Balke, H., "A Critical Investigation of the Unloading Behaviour of Sharp Indentation", *Acta Materialia*, 45 (1997), pp.3791-3800.
- Niezgoda, T., Matachowsky, J., "Finite Element Simulation of Vickers Micro-indentation on Alumina Ceramics", *Ceramics International*, 24 (1998), pp.359-364.
- Niihara, K., Morena, R., Hasselman, D. P. H., "Evaluation of K_{IC} of Brittle Solids by the Indentation Method with Low Crack-to-Indent Ratios", *J. Materials Science Letters*, 1 (1982), pp.13-16.
- Ponton, C.B., Rawlings, R.D., "Vickers Indentation Fracture Toughness Test, Part II: Application and Evaluation of Standardized Indentation Toughness Equations", *Materials Science and Technology*, 5 (1989), pp.961-976.
- Schubert, W. D., Neumeister, H., Kinger, G., Lux, B., "Hardness to Toughness Relationship of Fine-grain WC-Co Hardmetals", *International Journal of Refractory Metals & Hard Metals*, 16 (1998), pp.133-142.
- Shetty, D. K., Wright, I. G., Miner, P. N., Clauer, A. H., "Indentation Fracture of WC-Co Cermets", *Journal of Materials Science*, 20 (1985), pp.1873-1882.
- Souza, S.A., "Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos", Ed. Edgard Blücher LTD, 5th Ed. (2000), 286p.
- Szutkowska, M., "Fracture Toughness Measurement of WC-Co Hardmetals by Indentation Method", *Journal of Advanced Materials*, 31 (1999), pp.3-7.

- Trent, E. M., "Metal Cutting", Butterworths & Co. LTD., 2nd Edition (1994), 245p.
- Zeng, K., Chiu, C., "An Analysis of Load-Penetration Curves from Instrumented Indentation", *Acta Materialia*, 49 (2001), pp.3539-3551.
- 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*, 38 (2001), pp.5893-5913.

Numerical Analyses of Vickers Indentation Testing by Finite Element Method.

A.M.S. Dias

Mechanical Department – Federal University of São João del-Rei (UFSJ).
 Frei Orlando Square, 170 – SJdRei – MG - Brazil – Postal Number.: 36307-904 – Phone Number
 0055-032-3379-2600.
avelino@ufsj.edu.br

P.J. Modenesi, G. C. Godoy, P.R. Cetlin.

Metallurgical Engineering Department – Federal University of Minas Gerais (UFMG).
 Espírito Santo Lane, 35 – Sala 104, downtown – Belo Horizonte – MG – Brazil.
modenesi@demet.ufmg.br

Abstract. This work aims to numerically analyse the Vickers indentation testing making use of a tridimensional model implemented through the commercial finite element code MARCTM, which is a promising numerical tool for fracture analysis. The numerical results of superficial hardness as well as the load-depth ($P-h$) relationship during an indentation cycle were found to agree well with experimental trends. Finally, the maximum principal stress field were used to identify the mechanism of nucleation of radial crack in tungsten Carbide with cobalt contents 6% by weight specimen during Vickers indentation.

Keywords: *Finite Element, Vickers Indentation, Hard Metal, Fracture.*