

ANÁLISE NUMÉRICA DO ENSAIO BRINELL EM FILMES FINOS COM A INCORPORAÇÃO DE COEFICIENTE DE ATRITO

Rodrigo Araújo¹, rodrigoaraujodivi@hotmail.com
Avelino Manuel da Silva Dias¹, avelino009@yahoo.com.br
Cristina Geralda Durães Godoy², godoy@uaigiga.com.br

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, Praça Frei Orlando, 170 São João Del-Rei, MG, CEP: 36307-352

²Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Rua Espírito Santo, 35, Belo Horizonte, CEP: 30160-030

Resumo: A demanda por componentes mais resistentes ao desgaste e à corrosão tem promovido um interesse na engenharia de superfícies, desenvolvendo processos para melhoria das propriedades tribológicas de materiais. O uso de recobrimentos superficiais finos cerâmicos tem sido uma opção utilizada para melhorar as propriedades tribológicas do sistema filme/substrato. Contudo, torna-se necessário o uso de ensaios para avaliação do comportamento destes filmes e da sua interface com o substrato. Estas análises requerem o uso de equipamentos sofisticados e de mão de obra especializada. Contudo, com o avanço dos sistemas computacionais, a utilização da análise numérica para solucionar inúmeros problemas tecnológicos tem sido cada vez mais freqüente e, atualmente, permite sua implementação a baixos custos operacionais. Propõe-se neste trabalho, através de um solver comercial de Elementos Finitos MARC™, simular o ensaio de indentação com penetrador esférico em conjugados composto de substrato metálico e filme cerâmico com diferentes espessuras. Porém a utilização desta técnica para avaliar o ensaio de indentação em recobrimentos superficiais finos, tem apresentado problemas principalmente na obtenção das propriedades mecânicas para a interface. O objetivo principal deste trabalho foi de simular o comportamento do conjugado submetido ao ensaio de indentação com penetrador esférico considerando o atrito no contato entre o indentador e a amostra ensaiada.

Palavras-chave: ensaio de indentação, filmes finos, elementos finitos, coeficiente de atrito.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de melhorar as propriedades tribológicas, como a resistência superficial à oxidação e ao desgaste, tem impulsionado avanços na área de engenharia de superfícies. Esta área da engenharia trata da tecnologia de preparação e modificação de superfícies para cumprir funções específicas dentro de certas aplicações. Nesta vertente, uma das opções mais utilizadas para melhorar as propriedades tribológicas é o uso de revestimentos cerâmicos. Contudo, é necessário avaliar as características mecânicas destes recobrimentos e da sua interface com o substrato. Uma das metodologias empregadas para avaliar estas propriedades mecânicas destes conjugados tem sido o ensaio de indentação instrumentada. Devido à sua versatilidade, numerosos trabalhos foram desenvolvidos neste campo, estudando-se novas metodologias e aplicações para estes ensaios. Recentes trabalhos propõem a utilização dos ensaios de indentação como uma ferramenta capaz de avaliar características mecânicas além da dureza superficial, o módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), tenacidade à fratura (K_{IC}) e uma possível curva de tensão em função da deformação do comportamento elastoplástico sob compressão (Zeng e Chiu, 2001, Lee, *et al* 2005, Dias e Godoy, 2010).

O ensaio de indentação instrumentada é realizado através de um equipamento de precisão que permite monitorar por meio de sensores as variações da profundidade de penetração (h) do indentador em função da carga aplicada (P). A Fig. (1) mostra um comportamento típico desta curva $P \times h$, assim como, três importantes parâmetros que devem ser determinadas neste procedimento: a carga máxima de indentação (P_{max}); a profundidade máxima de penetração (h_{max}); e, o coeficiente de rigidez elástica ($S = dP/dh$). A exatidão na obtenção destes três parâmetros influencia na determinação de valores exatos de dureza e do módulo de elasticidade. Entretanto, a implementação desta técnica de indentação para a avaliação das propriedades mecânicas e os seus resultados obtidos ainda ocasionam dúvidas. Segundo a literatura,

estes problemas são mais intensos quando se pretende avaliar o comportamento mecânico de filmes finos depositados em substratos macios (Fischer-Cripps, 2006). Para a realização do ensaio de indentação instrumentada necessita-se de durômetros de alta precisão capazes de monitorar baixíssimas cargas e sensíveis deformações para avaliar com confiabilidade as propriedades mecânicas utilizando grandezas em micro e nano escalas (Huang e Pelegri, 2007). Em função destas limitações na 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. Nas últimas décadas, 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 (Sun *et al*, 1995; Souza *et al*, 2001; Antunes *et al*, 2006; Dias *et al*, 2006; Dias e Godoy, 2010).

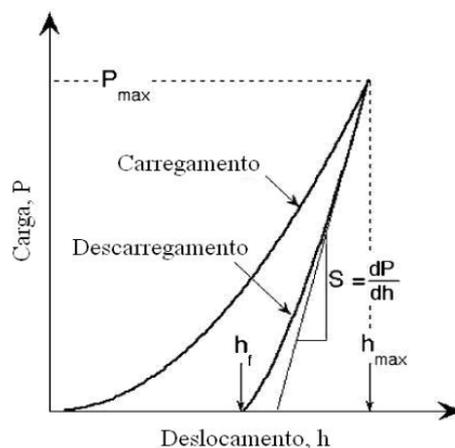


Figura 1. Ilustração esquemática de uma curva de carga do indentedor versus deslocamento mostrando parâmetros importantes de medição como o coeficiente de rigidez elástica (S) e a profundidade de penetração residual (h_r) (Oliver e Pharr, 2004).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se mostrado uma técnica numérica confiável para análise de tensões e deformações e para a simulação de diferentes problemas de engenharia. Este método tem sido largamente utilizado para simular e resolver inúmeros problemas não lineares nas áreas de instabilidade estrutural, de sistemas dinâmicos, sistemas fluidos, eletromagnéticos e de conformação mecânica. Porém, a utilização desta técnica numérica para avaliar o ensaio de indentação em recobrimentos superficiais finos, também tem apresentado problemas devido às limitações computacionais, à dificuldade na implementação de critérios de falhas, à dificuldade encontrada para a caracterização destes recobrimentos e, principalmente, na obtenção das propriedades mecânicas para a interface do recobrimento com o substrato.

Possíveis falhas em sistemas que conjugam recobrimentos de alta dureza (recobrimentos tribológicos) com substratos de baixa dureza em serviço, durante solicitações tribológicas, raramente acontecem por desgaste convencional, mas podem acontecer principalmente por delaminação do recobrimento do substrato (falha adesiva), ou fratura do recobrimento (falha coesiva) ou, ainda, por fratura sub-superficial (falha do substrato). Para estudar estas falhas de componentes conjugados torna-se essencial determinar a distribuição do campo de tensões que levam a ocorrência de deformações plásticas nestes conjugados, assim como determinar a região onde se dá o início e desenvolvimento desta zona plástica (Sun *et al*, 1995).

A simulação proposta neste trabalho utilizará modelos discretos através do Método dos Elementos Finitos (MEF), para reproduzir o ensaio de indentação esférico Brinell conforme representado na Fig. (2a). O conjugado estudado foi composto de um substrato metálico recoberto por um filme de cerâmico com diferentes espessuras. No procedimento numérico, avaliou-se a influência do atrito entre o indentedor e a superfície do filme, os efeitos da espessura do recobrimento, suas propriedades de elasticidade, de resistência mecânica e o desenvolvimento do campo de tensões e deformações. Através da simulação, pretendeu-se também, prever possíveis falhas em sistemas que conjugam recobrimentos de alta dureza com substrato de média dureza.

É importante destacar que em ensaios experimentais de indentação com penetradores esféricos podem surgir fissuras radiais e circunferenciais ao redor da impressão do indentedor na superfície do filme fino, Fig. (2b). Nesta figura é mostrada a vista de topo da impressão de um penetrador esférico na superfície de um conjugado duplex recoberto com revestimento (CrAlN), depositado por PAPVD em um substrato de aço inoxidável nitretado a plasma (Mancuso, 2005).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A simulação numérica realizada neste trabalho reproduziu através do método dos elementos finitos o ensaio de indentação instrumentada Brinell em um filme fino cerâmico depositado sobre um substrato metálico, utilizando o solver comercial MARCTM (2007). O ensaio foi modelado através de elementos axissimétricos o que diminuiu consideravelmente os esforços computacionais (Dias *et al*, 2010). Essa modelagem foi possível devido à simetria do

problema. O sistema estudo é composto por um substrato de aço liga AISI 4140 e recoberto por um filme de nitreto de cromo com alumínio (CrAlN) com espessuras de 3, 6 e 9 μm , cujas propriedades estão dispostas na Tab. (1).

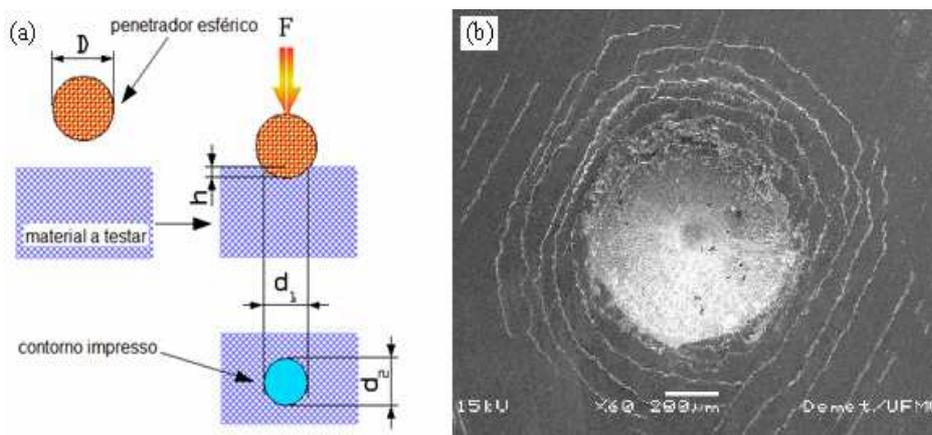


Figura 2. (a) Representação do ensaio de dureza Brinell, onde D é diâmetro do indentador, h é a profundidade de penetração, d é o diâmetro impresso na amostra e F é a força aplicada ao indentador. (b) Resultado da vista de cima de uma amostra ensaiada experimentalmente. Fissuras circunferenciais ao redor de impressão do penetrador esférico na superfície de recobrimento CrAlN (Mancuso, 2005).

Tabela 1. Propriedades mecânicas do substrato e recobrimento (Dias *et al*, 2010).

	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson
Substrato (Aço AISI4140)	238,00	0,29
Recobrimento (CrAlN)	350,00	0,22

Simulou-se o ciclo de indentação, carregamento e descarregamento através do deslocamento prescrito do indentador, permitindo assim um melhor controle numérico no início e durante a simulação do ensaio (Dias *et al*, 2006). Além desse controle numérico, o ensaio foi executado em duas fases, uma na descida do indentador, seguida de outra na subida do mesmo, completando-se o ciclo. Considerou-se que os sistemas estudados possuíam perfeita aderência entre o filme e o substrato o que significa que não houve escorregamento nesta interface (Huang e Pelegri, 2005). Também foi considerado a existência de atrito entre o indentador e a amostra.

O indentador foi modelado como uma superfície circular rígida que penetra na amostra considerada deformável. Como condições de contorno do problema, o modelo possui restrição ao deslocamento na sua base e restrição ao deslocamento radial dos nós que estão localizados no eixo de simetria. O diâmetro do indentador simulado foi de 400 μm e as características dos modelos numéricos encontram-se na Tab. (2). Os materiais estudados foram considerados isotrópicos, homogêneos e com comportamento elástico perfeitamente plástico.

Tabela 2. Características dos modelos numéricos analisados.

Conjugado	Malha do substrato (n° de elementos)	Malha do Filme (n° de elementos)	Espessura do filme (μm)
Filme CrAlN	7500	945	3
Substrato aço liga AISI 4140	7500	1890	6
	7500	2835	9

Com o intuito de se obter uma melhor distribuição do campo de tensões e de deformações na região do contato do indentador e na interface do recobrimento com o substrato, utilizou-se uma malha mais refinada nestas regiões, conforme Fig. (3), onde também são evidenciadas as condições de contorno. Na análise incremental do problema para a fase de carregamento foram adotados 300 incrementos e mais 100 para a fase de descarregamento, totalizando 400 incrementos. As dimensões da amostra foram de 0,3 mm de altura, incluindo a espessura do recobrimento, e de 0,5 mm de comprimento. Foram utilizados elementos de quatro nós, com dimensões de 0,33 x 1,33 μm para a região mais refinada da malha. Realizaram-se ensaios com três diferentes profundidades de penetração, a saber, 10%, 25% e 50% do valor da espessura do recobrimento. Também foi avaliada a influência do coeficiente de atrito entre o indentador e a superfície do recobrimento, através dos resultados de carga máxima de indentação. Adotaram-se quatro valores para o coeficiente de atrito: 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4. No ensaio experimental de indentação, a superfície da amostra se apresenta com

acabamento superficial de polimento, favorecendo o deslizamento entre a superfície e o indentedor. Por isso, utilizou-se baixos valores de coeficiente de atrito no presente estudo.

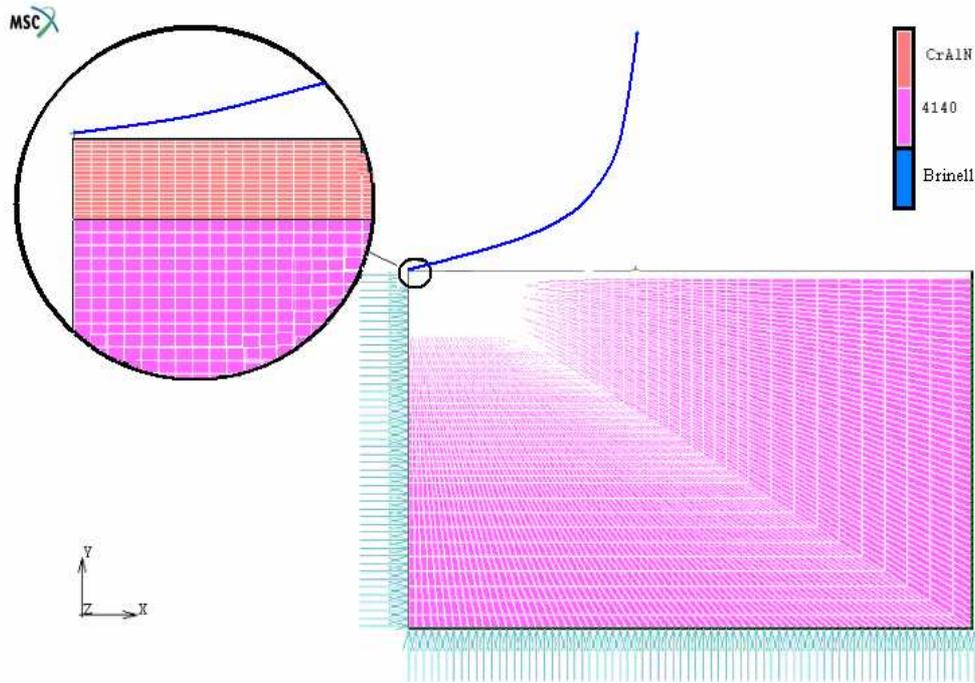


Figura 3. Modelo Numérico do ensaio Brinell em uma amostra do conjugado filme / substrato (CrAlN / AISI 4140).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras (4), (5) e (6) apresentam os resultados numéricos obtidos para diferentes conjugados simulados, considerando os diversos valores de coeficiente de atrito entre o indentedor e a superfície do filme. As profundidades de penetração variaram entre 10% até a metade da espessura do filme.

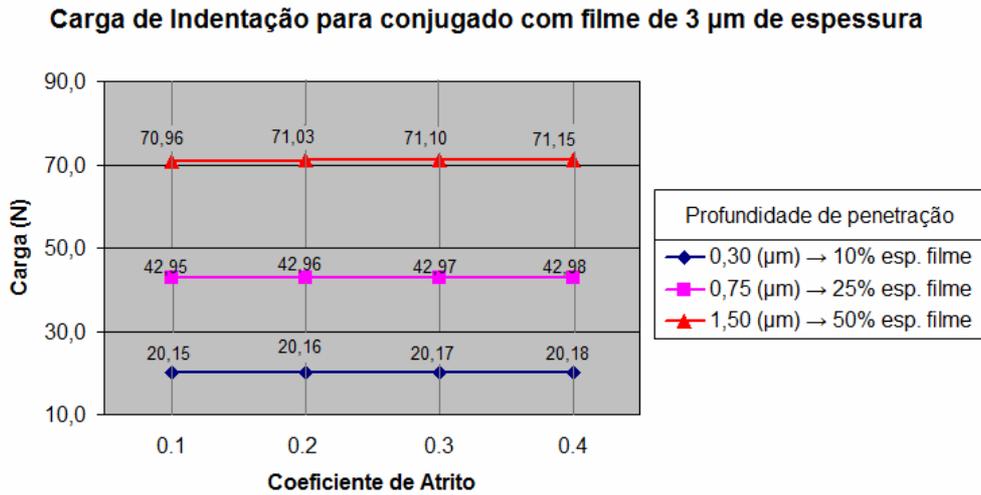


Figura 4. Gráfico da carga de indentação em função do coeficiente de atrito entre o indentedor e a superfície do filme com três µm de espessura.

Inicialmente os resultados mostraram que o atrito entre o indentedor e a superfície do filme apresenta pouca influência na carga de indentação, como observado no trabalho de Huang e Pelegri (2005). A variação máxima foi para o sistema com recobrimento de 9,0 µm e profundidade de penetração de metade da espessura do filme, onde a carga variou de 145,14 N para 145,78 N (0,44%) quando o coeficiente de atrito varia de 0,1 para 0,4.

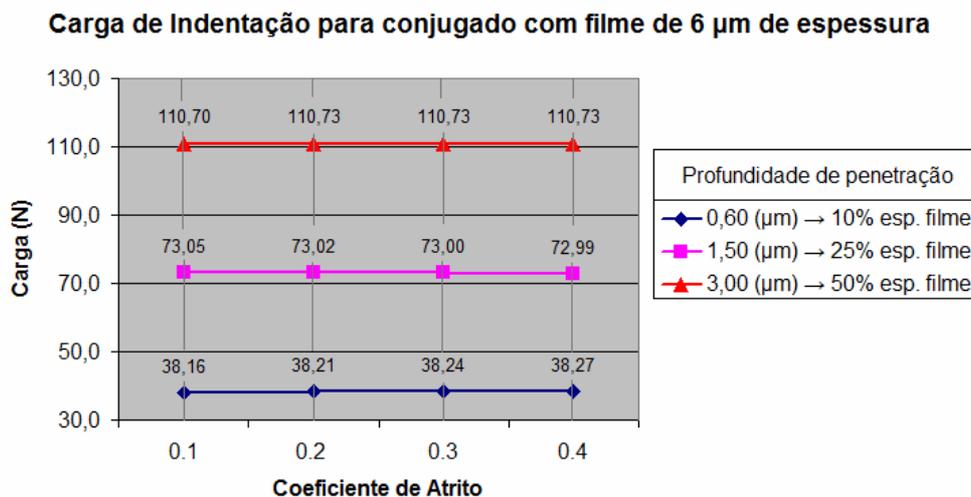


Figura 5. Gráfico da carga de indentação em função do coeficiente de atrito entre o indentador e a superfície do filme com seis μm de espessura.

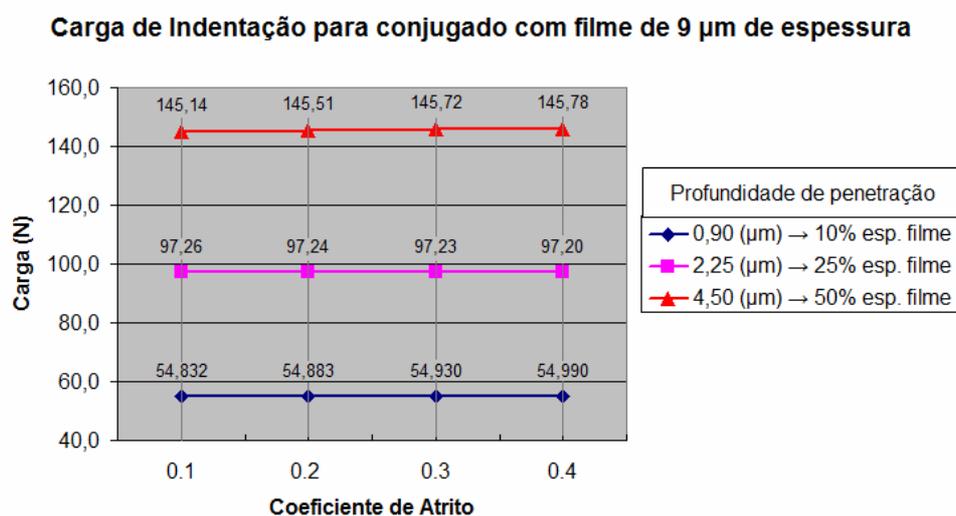


Figura 6. Gráfico da carga de indentação em função do coeficiente de atrito entre o indentador e a superfície do filme com nove μm de espessura.

Os resultados também mostraram que a carga aplicada pelo indentador foi maior em um sistema recoberto com um filme de maior espessura do que a aplicada com mesma profundidade em um recobrimento menos espesso. Esta situação pode ser observada quando se compara o resultado da carga de indentação do ensaio realizado no recobrimento com espessura de 3 μm e com profundidade de penetração de 1,5 μm (50% espessura), a carga de 71,06 N, com o resultado obtido para o filme de 6 μm e com a mesma profundidade de penetração 1,5 μm (25% da espessura), onde a carga foi de 73,01 N. Este aumento da carga pode indicar um aumento nas propriedades tribológicas do conjugado. Contudo, essa variação em sistemas recobertos não pareceu ser muito significativa, pois houve um ganho de apenas 2,7% para um recobrimento com o dobro da espessura.

A Figura (7) ilustra a distribuição numérica para o campo de tensões na região de indentação após o ensaio Brinell para o sistema CrAlN-AISI 4140, com filme de 3 μm e uma profundidade de penetração de 25% da espessura do filme. A superfície do filme apresentou uma região crítica ao redor da impressão do indentador com características semelhantes às fissuras radiais e circunferenciais que ocorreram nesta região nas investigações de Mancuso (2005), durante os ensaios experimentais como observado na Fig. (2b). Também foi possível visualizar que a interface entre o recobrimento e o substrato se mostrou crítica do ponto de vista da deformação, apresentando uma possível falha adesiva. Segundo Sun *et al* (1995), este resultado indicou que este conjugado pode sofrer uma delaminação do filme durante um ensaio experimental Brinell com características similares a implementada nesta simulação numérica.

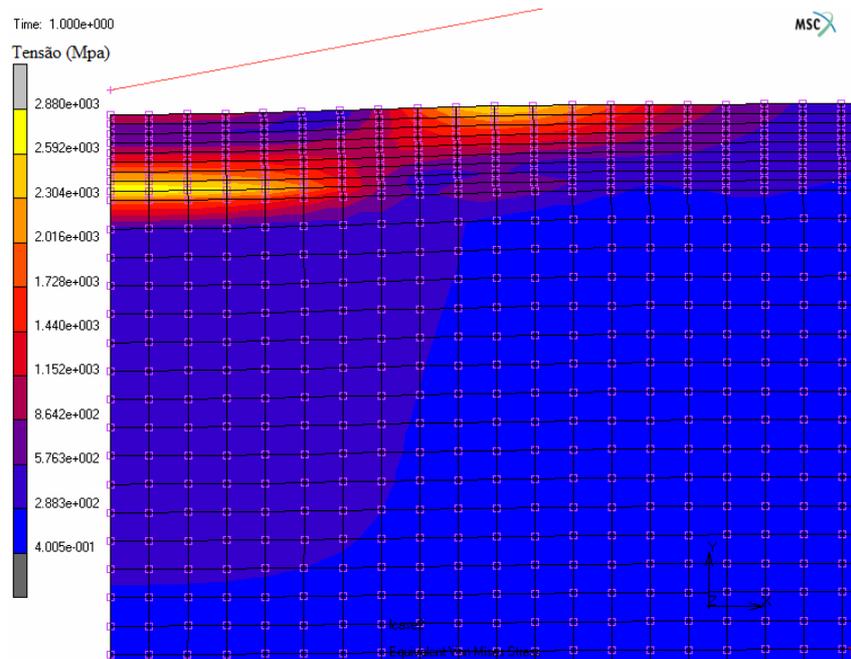


Figura 7. Distribuição numérica para campo de tensões na região de indentação do ensaio Brinell no conjugado com filme de 3,0 μm de espessura e profundidade de penetração de 25% espessura (0,75 μm).

A Figura 8 ilustra a distribuição numérica para o campo de tensões na região de indentação após o ensaio Brinell para o conjugado CrAIN-AISI 4140, com filme de 9 μm de espessura. Nesta simulação, também foi utilizada a profundidade de penetração de 25% da espessura do filme. Também foi possível identificar que a sua superfície se mostrou crítica do ponto de vista da deformação de trincamento. Entretanto, este conjugado não apresentou indícios de uma possível delaminação na interface entre o recobrimento e o substrato. Tal fato indicou que, quando submetido a um ensaio experimental Brinell com características similares, este conjugado com filme de maior espessura pode apresentar menor tendência à uma possível delaminação. Sun *et al* (1995), também mostraram que do ponto de vista das deformações plásticas, compósitos com maiores espessuras no recobrimento tendem a apresentar uma melhor resposta contra uma possível delaminação.

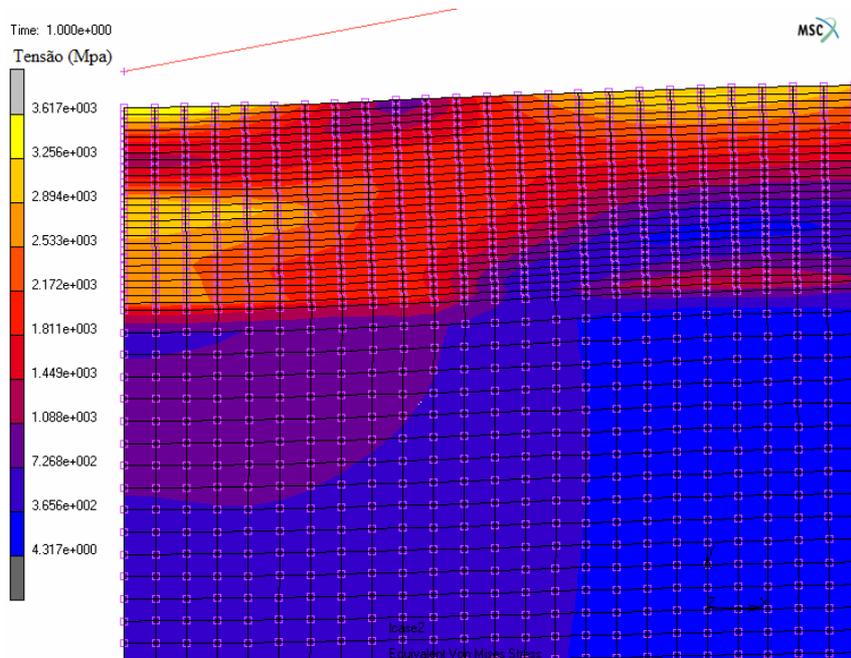


Figura 8. Distribuição numérica para o campo de tensões na região de indentação do ensaio Brinell no conjugado com filme de 9,0 μm de espessura e profundidade de penetração de 25% espessura (2,25 μm).

4. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados numéricos do ensaio de indentação com penetradores esféricos em diferentes recobrimentos superficiais, através do método de elementos finitos, foi possível concluir que do ponto de vista do comportamento global, os modelos conseguiram representar o ensaio de indentação em diferentes sistemas compostos por um filme duro (CrAlN), com diferentes espessuras, depositados em um substrato metálico (AISI 4140).

Em todas as situações simuladas, verificou-se que o atrito entre o indentador e a superfície do filme não apresentou influência significativa na carga de indentação. Esta análise também mostrou que filmes de maiores espessuras proporcionaram um aumento médio de 2,7 % na carga de indentação sob mesma profundidade de penetração em um conjugado com o dobro da espessura do filme.

De acordo com os resultados numéricos para o campo de tensões, Fig. (7) e Fig. (8), filmes mais espessos apresentam uma menor possibilidade de delaminação do recobrimento. Contudo existe ainda a necessidade de um maior aprofundamento na análise destes procedimentos numéricos para se introduzir um parâmetro capaz de modelar de forma mais representativa a adesão entre o recobrimento e o substrato.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFSJ (Universidade Federal de São João del Rei- MG) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Antunes, J. M., Menezes, L. F., Fernandes, J. V., 2006, "3-dimensional Numerical Simulation of Vickers Indentation Testing", *International Journal of Solids and Structures*, 43, pp. 784-806.
- Dias, A. M. S., Modenesi, P. J., Cristina, G. C., 2006, "Computer Simulation of Stress Distribution During Vickers Hardness Testing of WC-6Co", *Materials Research*, v. 9, n. 1, pp. 73-76.
- Dias, A. M. S., Godoy, G. C. D., Modenesi, P. J., 2010, "Análise Numérica do Ensaio de Indentação em Materiais com Comportamento Frágil", *Revista Matéria*, Vol. 15, n. 1, pp 69-83.
- Dias, A. M. S., Godoy, G. C. D., 2010, "Determination of Stress-Strain Curve through Berkovich Indentation Testing" *Materials Science Forum*, Vols. 636-637, pp 1186-1193.
- Fischer-Cripps, A. C., 2006, "Critical Review of Analysis and Interpretation of Nanoindentation Test Data", *Surface & Coatings Technology*, 200, pp.4153-4165.
- Huang, X., Pelegri, A. A., 2005, "Mechanical characterization of thin film materials with nanoindentation measurements and FE analysis", *Journal of Composite Materials*, 40, pp 1393-1407.
- Huang, X., Pelegri, A. A., 2007, "Finite element analysis on nanoindentation with friction contact at the film/substrate interface", *Composites Science and Technology*, 67, pp 1311-1319.
- Lee, H., Lee, J. H., Pharr, G. M., 2005, "A Numerical Approach to Spherical Indentation Techniques for Material Property Evaluation", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, pp. 2073-2069.
- Mancosu, R. D., 2005, "Recobrimento Tribológico Cr-N e Nitretação a Plasma para Melhoria da Resistência à Erosão Cavitação de um Aço Carbono ABNT 1045: Uma Abordagem Topográfica", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Oliver, W. C., Pharr, G. M., 2004, "Measurement of hardness and Elastic modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and refinements to methodology", *Journal of Materials Research*, 19, p3-20.
- Souza, R. M., Mustoe, G. G. W., Moore, J. J., 2001, "Finite Element Modeling of the Stresses, Fracture and Delamination During the Indentation of Hard Elastic Films on Elastic-Plastic Soft Substrates", *Thin Solid Films*, 392, pp. 65-74.
- Sun, Y., Bloyce, A., Bell, T., 1995, "Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Various TiN Coating/Substrate Systems under Normal Contact with a Rigid Sphere", *Thin Solid Films*, 271, pp 122-131.
- Zeng, K., Chiu, C-h., 2001, "An Analysis of Load-Penetration Curves from Instrumented Indentation", *Acta Materialia*, 49, pp 3539-3551.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

NUMERICAL ANALYSIS OF BRINELL HARDNESS TESTING IN THIN FILMS WITH FRICTION COEFFICIENT

Rodrigo Araújo¹, rodrigoaraujodivi@hotmail.com
Avelino Manuel da Silva Dias¹, avelino009@yahoo.com.br
Cristina Geralda Durães Godoy², godoy@uaigiga.com.br

¹Mechanical Engineering Department, Federal University of São João Del-Rei, Frei Orlando Square, 170, São João Del-Rei, MG, CEP: 36307-352

²Metallurgical Engineering Department, Federal University of Minas Gerais, Espírito Santo Street, 35, Belo Horizonte, CEP: 30160-030

Abstract. *The demand for components more resistant to wear and corrosion has promoted an interest in surface engineering to developing processes to improve the tribological properties of materials. The use of thin ceramic surface coatings have been an option used to obtain high tribological properties of the system film/substrate. Although, it is necessary to use mechanical testing to evaluate the behaviour of these films and their interface with the substrate. These testing require a considerable cost in sophisticated equipment and specialised works. However, with the advance of computer systems, the use of numerical analysis to solve many technological problems have been increasingly frequent and now allows its implementation with low operating costs. It is proposed in this paper, using the commercial Finite Element solver MARC™, to simulate the indentation test with spherical indenter in the system composed of metallic substrate and ceramic film with different thickness. However, the use of this numerical technique to evaluate the indentation testing in thin surface coatings, has presented problems especially with the mechanical properties for the interface. The goal of this study was to simulate the behaviour of the indentation testing using spherical indenter with the friction coefficient between the sample and an indenter.*

Keywords: *Indentation Testing, Thin Film, Finite Element, Friction Coefficient.*