

Simulação do ensaio de indentação em filmes finos com o uso de modelos de trinca difusa

Dias, A.M.S.^I; Sotani, P.F.B.^{II}; Godoy, G.C.^{III};

^I Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av. Senador Salgado Filho, s/n – Campus Universitário – Natal – RN, CEP. 59.078-900.

e-mail: avelino.dias@ct.ufrn.br

^{II} Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei.

e-mail: paulasotani@yahoo.com.br

^{III} Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG, Belo Horizonte – MG – Brasil.

e-mail: gcgodoys@demet.ufmg.br

RESUMO

O objetivo principal do presente trabalho foi simular através de modelos de elementos finitos o ciclo do ensaio de indentação com penetradores esféricos em um sistema composto de recobrimento superficial fino depositado em um substrato metálico. Recentes trabalhos propõem a utilização dos ensaios de indentação (nanoindentação) como uma ferramenta capaz de avaliar características mecânicas de filmes finos, assim como avaliar possíveis falhas em sistemas que conjugam recobrimentos de alta dureza (recobrimentos tribológicos) com substratos metálicos de aço em serviço, em solicitações tribológicas. Entretanto, a implementação da técnica de indentação para a avaliação do comportamento destes sistemas e os seus resultados obtidos ocasionam dúvidas no meio científico. Em função destas incertezas na análise do ensaio de indentação, o uso de uma metodologia 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. Todavia, a utilização da metodologia numérica para avaliar o ensaio de indentação em recobrimentos superficiais finos também tem apresentado problemas principalmente devido à dificuldade na implementação de critérios de falhas, especialmente na avaliação do comportamento da interface entre o recobrimento e o substrato. Finalmente, para estudar os mecanismos de nucleação e crescimento de trincas que ocorrem nestes filmes sob ensaio de indentação utilizou-se um modelo numérico de trinca difusa.

Palavras-chaves: Indentação, Elementos Finitos, Fratura, Trinca Difusa.

Simulation of indentation testing in thin films using numerical cracking models

ABSTRACT

The aim of the present study was simulate the cycle of indentation test with spherical indenters in a system composed of thin surface coating deposited on a metallic substrate through PVD process by finite element models. Recent studies suggest that the indentation technique could be used as a tool to evaluate mechanical properties of thin films, as well as to determinate the fracture process in systems that combine high hardness coatings, like stainless steel substrates, in tribological applications. However, the implementation of this technique to evaluate the behaviour of these systems and their results, have still been doubts in the scientific community. Because of these uncertainties in the analysis of indentation test, the use a numerical methodology capable of evaluating the fields of stresses and deformation during the indentation cycle can help in a more secure interpretation of this testing. Nevertheless, the use of the numerical methodology to evaluate the indentation test in thin surface coatings also has had problems mainly due to the difficulty in implementing failures models, especially in determinating the behaviour for the interface between the coating and the substrate. Finally, it was used a numerical cracking model to study the mechanisms of nucleation and growth of cracks that occur in these films during indentation test.

Keywords: Indentation Testing, Finite Element, Fracture, Cracking Model.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o uso de recobrimentos superficiais finos resistentes ao desgaste tem sido uma prática comum na tentativa de melhorar o comportamento superficial de diferentes sistemas tribológicos. O crescente interesse por tais revestimentos resultou em um incremento dos estudos nesta área, dentre as quais, a utilização do ensaio de indentação instrumentada com penetradores esféricos, cônicos e piramidais, com o intuito de avaliar as características mecânicas de filmes, bem como sua adesão ao substrato [1-4].

Através da simulação do contato entre uma esfera carregada contra uma superfície plana tem se avaliado a interação entre estas duas superfícies quando elas estão pressionadas uma contra a outra sob carregamento normal desenvolvido durante a indentação [3]. Neste sentido, a simulação do ensaio de dureza Brinell que consiste em comprimir lentamente um indentador esférico de diâmetro D , sobre uma superfície plana, polida e limpa de uma amostra do material a ser estudado através da aplicação de uma carga F , conforme ilustrado na Figura 1 tem sido objeto de estudos. A compressão da carga F provoca uma impressão permanente na amostra com o formato de uma calota esférica de diâmetro d , a qual é medida por intermédio de um microscópio óptico após o ensaio [5]. Entretanto, a implementação desta técnica de indentação para a avaliação das propriedades mecânicas e os seus resultados obtidos ainda gera dúvidas no meio científico, principalmente, quando se pretende avaliar o comportamento mecânico de filmes finos [1, 6].

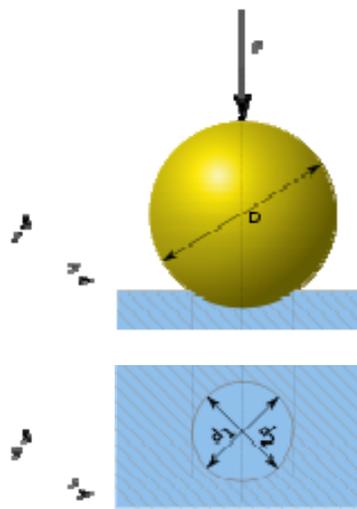


Figura 1: Ilustração esquemática do ensaio de dureza Brinell.

Também é importante destacar que em ensaios experimentais de indentação com penetradores esféricos surgem fissuras radiais e circunferenciais ao redor da impressão do indentador na superfície do filme fino, conforme Figura 2. Nesta figura é mostrada a vista de topo da impressão de um penetrador esférico na superfície de um conjugado duplex recoberto com revestimento ternário de Nitreto de Cromo-Alumínio (CrAlN), depositado pelo processo de deposição a plasma (PVD) em um substrato de aço inoxidável nitretado a plasma, sendo possível visualizar as trincas circulares superficiais ao redor da impressão do penetrador [7].

Sob tensões de contacto, falhas em sistemas que conjugam recobrimentos de alta dureza (recobrimentos tribológicos) com substratos de baixa dureza (aço carbono, por exemplo) raramente acontecem por desgaste convencional. Porém, estas falhas podem ocorrer por delaminação do recobrimento do substrato (falha adesiva), ou fratura do recobrimento (falha coesiva) ou, ainda, por fratura subsuperficial (falha do substrato). Segundo Sun *et al.* [1], para evitar estas falhas de sistemas compostos de revestimento e substrato, tem sido essencial determinar a distribuição espacial das tensões que levam à ocorrência de deformações plásticas, assim como determinar a região onde se dá o início e o desenvolvimento desta zona plástica.

Em função das limitações experimentais 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 do teste [6]. Por isso, este trabalho teve o objetivo de avaliar numericamente o contato de penetradores esféricos (Brinell) rígidos em sistemas recobertos por CrAlN, com diferentes espessuras, durante o ensaio de indentação. Nesta simulação do ensaio de indentação, também foram avaliadas as regiões críticas a fratura que surgem nestes compósitos de revestimento e substrato através de uma relação constitutiva linear-frágil com a incorporação de um modelo numérico de trinca difusa

[8]. Esta relação constitutiva foi usada para representar o comportamento frágil do recobrimento e para estudar os mecanismos de falhas adesiva, coesiva e subsuperficial que podem ocorrer nestes filmes durante o ensaio de indentação. A simulação proposta utilizou o método de elementos finitos através do código comercial MARC™ [9].

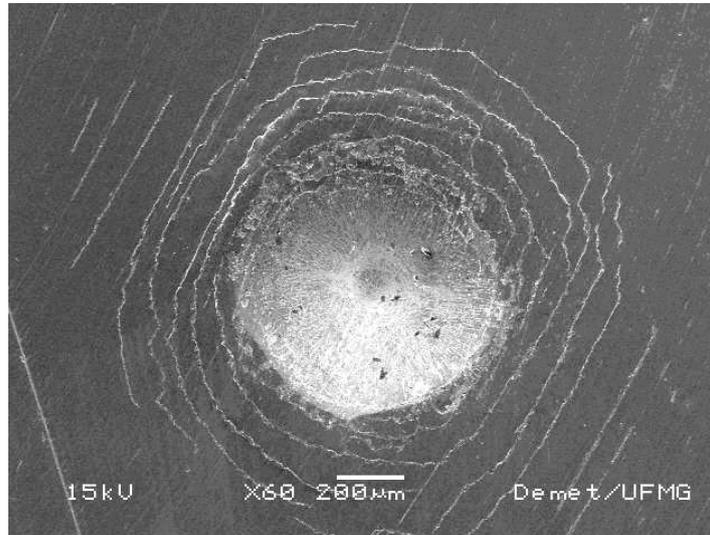


Figura 2: Fissuras circunferenciais ao redor de impressão de um penetrador esférico na superfície de uma amostra de recobrimento CrAlN duplex [7].

2 METODOLOGIA

Na simulação do ensaio com indentador esférico, considerado rígido, aproveitou-se a simetria do problema e modelou o mesmo utilizando elementos bidimensionais axis-simétricos, reduzindo o custo computacional. Uma vez que, nos ensaios experimentais, o deslocamento do indentador é aplicado a uma pequena velocidade de penetração e o comportamento da carga em função do deslocamento é obtido através de um sensor no equipamento [3, 6] Por isso, simulou-se o ciclo de indentação, carregamento e descarregamento do ensaio, através do deslocamento prescrito do indentador, permitindo-se, assim, um melhor controle numérico no início e durante a simulação do ciclo de indentação [6, 8]. Além desse melhor numérico, o ensaio foi executado em duas fases, uma de descida do indentador, seguido de sua subida, completando-se o ciclo. Considerou-se também que os sistemas estudados possuíam perfeita aderência entre o filme e o substrato [4]. Por fim, segundo a literatura, desconsiderou-se o coeficiente de atrito entre o indentador e a amostra, pois este atrito parece não influenciar os resultados numéricos obtidos [1-4, 10].

O indentador foi modelado com uma casca circular rígida que penetra na amostra dos sistemas a serem estudados. Como condições de contorno do problema, o modelo possuiu restrição ao deslocamento na sua base e restrição ao deslocamento radial dos nós que estão localizados no eixo de axis-simetria [1, 4]. Foram simulados os ensaios com penetradores esféricos de dois diferentes diâmetros, conforme Tabela 1. Nesta tabela também se encontram as características dos modelos numéricos dos diferentes compósitos de recobrimentos de Nitreto de Cromo com Alumínio (CrAlN) depositados em substrato metálico de alta resistência (aço AISI 4140). Estes recobrimentos tem sido objeto de estudo pela equipe de tribologia e nanotecnologia do Projeto de Pesquisa PRONEX UFMG-UFSJ-CDTN [11].

Tabela 1: Características dos modelos numéricos analisados, sendo D_{ind} o diâmetro do penetrador esférico e t a espessura do filme.

Sistema	D_{ind}	Malha no substrato	Malha no filme	(t)
AISI 4140	0,4 mm	7500 elementos	Sem filme	
Filme CrAlN Substrato AISI 4140	0,4 mm	7500 elementos	945 elementos	3,0 μm
			1890 elementos	6,0 μm
	1,0 mm	7500 elementos	945 elementos	3,0 μm
			1890 elementos	6,0 μm

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 uma malha mais refinada

nesta região, Figura 3. Na análise incremental do problema, para a simulação da amostra sem recobrimento, foram adotados duzentos incrementos para representar a descida do indentedor e cem para sua subida, completando-se o ciclo de indentação. Para os demais sistemas, foram utilizados mil incrementos na descida do indentedor e duzentos na etapa de descarregamento do ensaio.

Os materiais estudados, filme e substrato, foram considerados isotrópicos e homogêneos. Para representar o comportamento elasto-plástico sob compressão destes materiais, adotou-se a curva de fluxo da Equação (1). Nesta σ_e , ϵ_e , n e σ_o são, respectivamente, a tensão efetiva, a deformação efetiva, o coeficiente de encruamento e o limite de escoamento. A Tabela 2 ilustra os valores experimentais do módulo de Young e do coeficiente de Poisson (ν), assim como, os valores obtidos a partir da combinação do procedimento experimental e o numérico para definir a curva de fluxo, conforme proposto por Dias e Godoy [6].

$$\sigma_e : \max\left[\left(K \epsilon_e^n \right), \sigma_o \right] \tag{1}$$

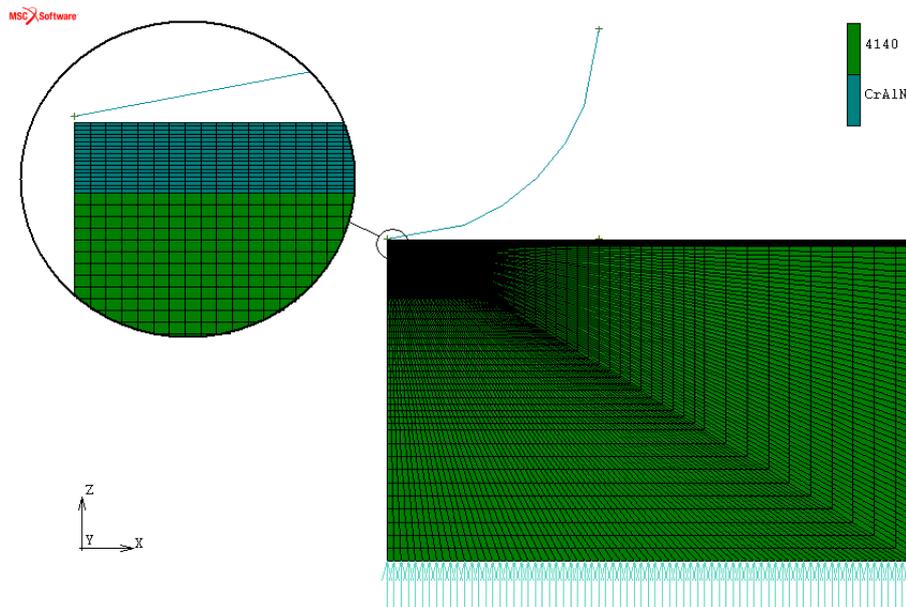


Figura 3: Modelo numérico do ensaio Brinell no sistema filme/substrato (CrAlN/AISI 4140).

Tabela 2: Propriedades mecânicas adotadas nos sistemas estudados [6, 12].

Material	E (GPa)	ν	σ_o (MPa)	K (MPa)	n
AISI 4140	238	0,29	565	2.230	0,228
Filme CrAlN	350	0,22	3.790	10.615	0,229

Para incorporar ao modelo numérico alguns mecanismos para análise de processos de fratura foi utilizada uma relação constitutiva baseada nos modelos clássicos da mecânica dos meios contínuos através de uma curva de tensão versus deformação conhecida como modelo de bimodularidade ou trinca difusa [9, 12]. O CrAlN apresenta um comportamento que pode ser modelado por esta relação de bimodularidade, ou seja, este material apresenta uma baixa resistência à tração, porém possui boa resistência à compressão, podendo, inclusive, sofrer deformações plásticas, com endurecimento sob compressão. Este modelo não foi aplicado no aço AISI 4140, pois este substrato metálico possui boa ductilidade sob tração, não apresentando fissuras durante o ensaio Brinell.

Para esforços de tração, o modelo de trinca difusa admite um comportamento elástico até o limite de ruptura (σ_{cr}). Após alcançar este limite, admite-se o trincamento (caracterizado pela deformação de trincamento) do material na direção normal à tensão principal máxima. Após a formação da primeira trinca, o material passa a ter um comportamento ortotrópico. O modelo permite a formação de, no máximo, três trincas perpendiculares entre si, caso as tensões normais principais excedam o limite de ruptura do material. Ele também permite a incorporação de um comportamento de decréscimo na resistência da estrutura após a

formação das primeiras trincas através de um parâmetro de amolecimento do módulo de elasticidade (E_s). Este parâmetro, o qual pode ser determinado a partir das características do material e da geometria da malha utilizada, impede que a tensão de tração do modelo numérico em um ponto trincado tenda rapidamente a zero, após a tensão normal máxima ter alcançado seu limite de ruptura [8-9, 11]. A partir de inúmeras análises numéricas para a calibração do E_s , verificou-se que este parâmetro pode ser estimado como sendo cinco milésimos do módulo de elasticidade do filme CrAlN [4]. Por fim, o limite de ruptura ou máxima tensão de tração crítica (σ_{cr}) para este recobrimento foi considerado como sendo igual a 3000 MPa [4, 12].

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 mostra os valores numéricos obtidos da carga de indentação para os diferentes sistemas simulados. A profundidade de penetração do indentador foi de, no máximo, a metade da espessura do recobrimento. A relação entre a profundidade de penetração e a espessura do filme (h_{max}/t) adotada se encontra de acordo com os valores experimentais utilizados em estudos de caracterização de filmes finos através de ensaios de indentação [7].

Tabela 3: Comparação da carga no indentador para os diferentes sistemas simulados. Nesta, D_{ind} é o diâmetro do indentador, t é a espessura do filme e h_{max} é a profundidade máxima de penetração utilizada.

Sistema	D_{ind}	t	h_{max}	Simulação	Carga	Obs.:
AISI 4140 (sem filme)	0,4 mm	0,0 μm	3,0 μm	(I)	104,0 N	
CrAlN – AISI 4140 (filme – substrato)	0,4 mm	6,0 μm	3,0 μm	(II)	110,3 N	Incorporação do modelo de trinca difusa no filme
			3,0 μm	(III)	109,6 N	
	1,0 mm	6,0 μm	1,5 μm	(IV)	70,9 N	
			3,0 μm	(V)	138,8 N	
			1,5 μm	(VI)	91,2 N	
			3,0 μm	(VII)	89,5 N	

Inicialmente, comparando o resultado da carga de indentação da simulação (I) com o da simulação (II), verifica-se que a carga foi maior em um sistema recoberto com um filme fino duro (110,3 N) do que quando aplicada diretamente no aço AISI 4140 (104 N). E, ainda, foi possível verificar que para uma mesma profundidade de penetração, quanto maior a espessura do filme, maior o valor da carga de indentação. Este aumento da carga pode indicar uma melhoria nas propriedades tribológicas do sistema com o aumento da espessura do filme. Contudo essa variação em sistemas recobertos não se mostrou muito significativa, uma vez que houve um ganho de dois pontos percentuais na carga de indentação quando se comparou a simulação (VI), com filme de 6,0 μm , com a simulação (VII) com filme de 3,0 μm , submetidos a mesma profundidade de penetração ($h_{max} = 1,5 \mu\text{m}$).

Por outro lado, constatou-se que quanto maior o raio do indentador, para uma mesma profundidade de penetração, maior a carga no indentador, devido ao aumento do contato entre o penetrador e a amostra.

Uma outra observação importante obtida na análise preliminar destes dados foi que o modelo numérico com a incorporação da relação constitutiva de trinca difusa, simulação (III), apresentou uma carga inferior (109,6 N) àquela obtida sem o uso deste modelo de trinca difusa (110,3 N), simulação (II). Ou seja, no modelo com trinca difusa, ocorreu o trincamento de elementos acarretando uma redistribuição nos campos de tensões, diminuindo a resistência mecânica do sistema.

Estes resultados mostraram que as análises numéricas representam bem o comportamento destes ensaios em sistemas compostos de substrato metálico recobertos por filmes finos duros. Neste trabalho, o substrato metálico foi modelado através de uma relação constitutiva elastoplástica, representado pela curva de potência da Equação (1). Além disso, foi possível incorporar uma relação constitutiva de trinca difusa para representar o comportamento frágil do filme cerâmico. Este modelo de trinca difusa avalia o mecanismo de nucleação e crescimento de trincas na estrutura através da incorporação da deformação equivalente de trincamento (ε_{ecr}) no modelo numérico [8, 13]. Esta deformação equivalente pode ser obtida através da determinação da deformação de trincamento ($\varepsilon_{i,cr}$) para cada uma das três direções principais ($i = 1, 2, 3$), de acordo com a Equação (2). Os elementos ou regiões que apresentaram nucleação e crescimento de trincas foram identificados através da distribuição desta deformação equivalente.

$$\varepsilon_{ecr} = \left[(\varepsilon_{1cr})^2 + (\varepsilon_{2cr})^2 + (\varepsilon_{3cr})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

A Figura 4 ilustra a distribuição numérica para a deformação equivalente de trincamento (ϵ_{ecr}) em um corte radial na região de indentação após o ensaio Brinell para o sistema CrAlN-AISI 4140 da simulação (IV), cujo filme possui espessura de 3,0 μm . Nesta simulação, utilizou o penetrador com diâmetro de 0,4 mm e uma profundidade de penetração de 1,5 μm que corresponde a metade da espessura do recobrimento, conforme Tabela 3.

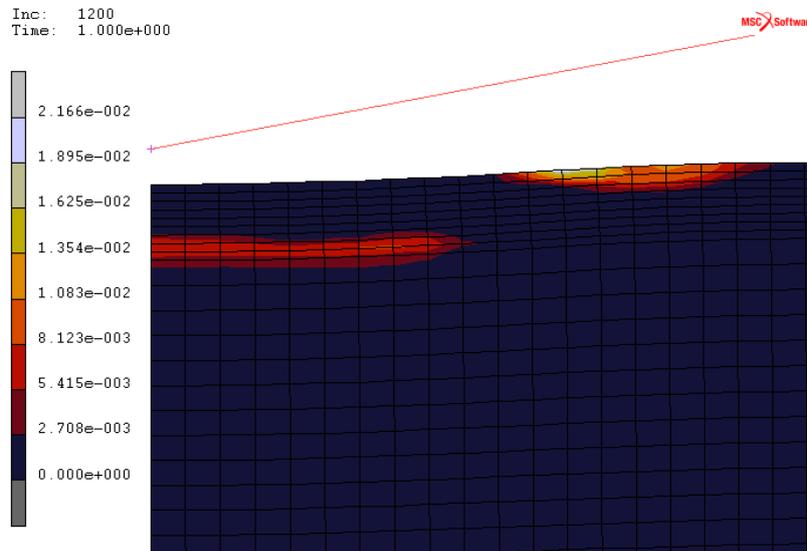


Figura 4: Distribuição numérica da deformação de trincamento na região de indentação do ensaio Brinell ($D_{ind} = 0,4 \text{ mm}$) no conjugado com filme de 3,0 μm de espessura da simulação (IV).

Esta Figura 4 mostra uma região crítica na sua superfície ao redor da impressão do indentador com características semelhantes às fissuras radiais e circunferenciais que ocorrem nesta mesma região durante os ensaios experimentais semelhante ao mostrado na Figura 2. Também foi possível visualizar que a interface entre o filme e o substrato se mostra crítica do ponto de vista da distribuição numérica da deformação de trincamento, indicando uma possível falha adesiva. Este resultado mostrou que o sistema simulado desta figura pode sofrer uma delaminação durante um ensaio experimental Brinell com as mesmas características da implementada nesta simulação numérica. O comportamento da deformação de trincamento durante o ciclo do ensaio está apresentado nos dois últimos gráficos mostrados no presente trabalho.

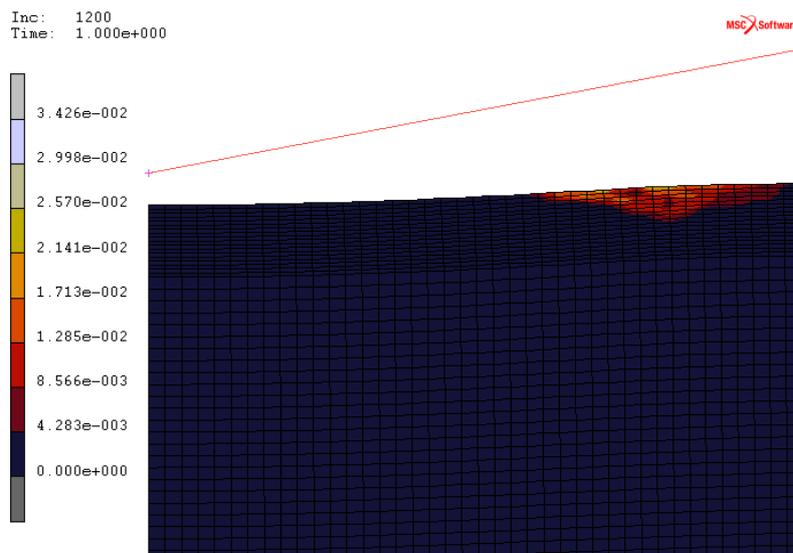


Figura 5: Distribuição numérica da deformação de trincamento na região de indentação do ensaio Brinell ($D_{ind} = 0,4 \text{ mm}$) no conjugado com filme de 6,0 μm da simulação (III).

A Figura 5 ilustra o comportamento da deformação equivalente de trincamento (ϵ_{ecr}) na região de indentação após o ensaio Brinell para o sistema CrAlN-AISI 4140, simulação (III), com filme de 6 μm de espessura. Os resultados numéricos também identificam que a sua superfície se mostra crítica do ponto de vista desta deformação de trincamento. Entretanto, este sistema não apresenta indícios de uma delaminação na interface entre o filme e o substrato. Tal fato indicou que, quando submetido a um ensaio experimental Brinell com características similares, este sistema com filme de maior espessura pode apresentar uma menor tendência de apresentar uma possível delaminação. Sun *et al.* (1995) também mostraram que, do ponto de vista do campo de deformações plásticas, compósitos com maiores espessuras no recobrimento tendem a apresentar uma melhor resposta contra uma possível delaminação [1].

Nos demais sistemas estudados, utilizando-se penetrador com diâmetro de 1,0 mm, também foi possível identificar que a superfície das amostras continuou sendo crítica do ponto de vista da deformação de trincamento. Todavia, comparando-se os resultados numéricos desta deformação entre os sistemas com diferentes diâmetros do indentador, pode dizer que a utilização de penetradores de menores diâmetros se mostra mais conveniente para avaliar a delaminação do recobrimento em ensaios experimentais.

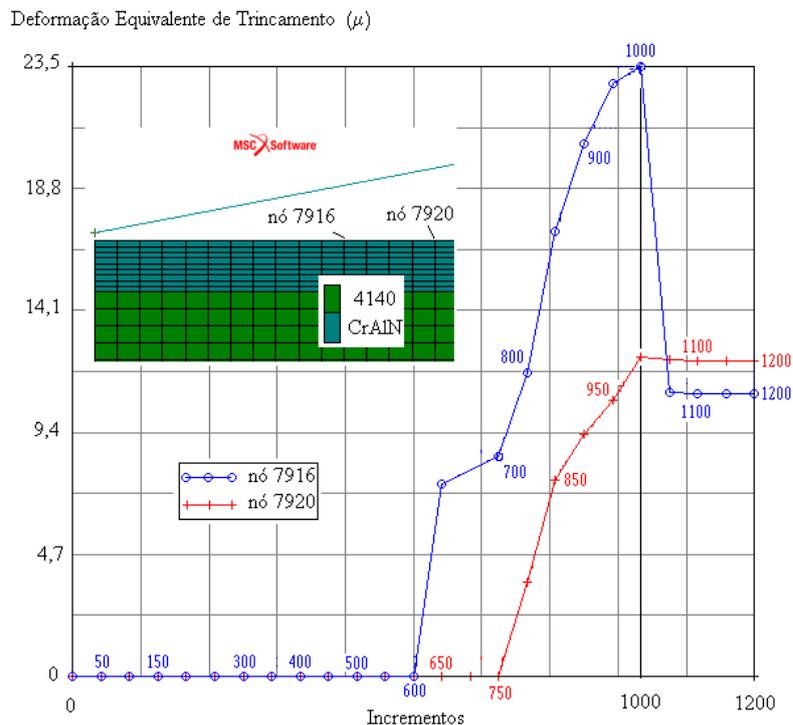


Figura 6: Evolução da deformação de trincamento durante o ciclo de indentação do ensaio Brinell ($D_{ind} = 0,4$ mm) no conjugado com filme de 3,0 μm na superfície da amostra da simulação (IV).

A Figura 6 apresenta a evolução da deformação de trincamento equivalente durante o ciclo de indentação do sistema da simulação (IV), conforme Tabela 3, para dois nós situados na superfície da amostra e próximos à região de contato com o penetrador esférico identificados como nó 7916 e nó 7920. Analisando o comportamento de ϵ_{ecr} ao longo do ensaio verifica-se que o trincamento na superfície da amostra ocorreu durante a fase de carregamento do ensaio e que este dano cresceu em função de uma maior profundidade de penetração do indentador. Conforme anteriormente citado, a extensão deste dano também depende do diâmetro do penetrador esférico. Estes resultados indicam que para analisar experimentalmente através dos ensaios de dureza Brinell falhas em sistemas tribológicos (delaminação ou fratura do recobrimento) feitos de sistemas compostos de revestimento de filmes finos de alta dureza em substratos metálicos, torna-se prudente utilizar indentadores esféricos de pequenos diâmetros penetrando até a metade da espessura do filme.

Por fim, a Figura 7 mostra a evolução desta ϵ_{ecr} durante o ciclo de indentação para dois nós situados na interface entre o recobrimento e o substrato na região abaixo do contato entre o penetrador e a amostra, identificados como nó 7298 e nó 7303. Avaliando o comportamento desta deformação ao longo do ensaio constata-se que o trincamento ocorreu durante a fase de descarregamento, provavelmente devido à acomodação do gradiente de tensões residuais que ocorre no ciclo de descarregamento dos ensaios de indentação. Este comportamento numérico dos mecanismos de nucleação e crescimento de trincas na

interface comprovou a dificuldade de se estudar a delaminação ou falha adesiva de compósitos de recobrimento e substrato durante os ensaios experimentais de indentação ou de risco [7].

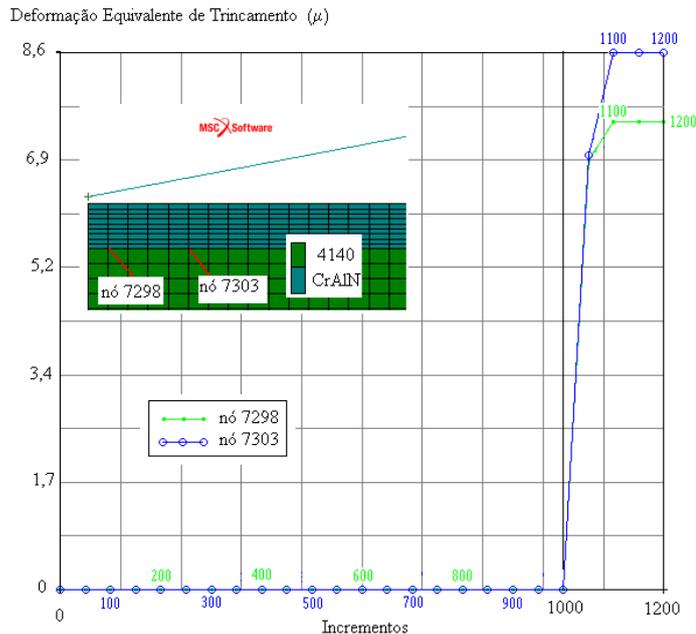


Figura 7: Evolução da deformação de trincamento durante o ciclo de indentação do ensaio Brinell ($D_{ind} = 0,4$ mm) no conjugado com filme de $3,0 \mu\text{m}$ na interface entre o filme e o substrato.

4 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados numéricos do ensaio de indentação com penetradores esféricos em diferentes sistemas tribológicos compostos de filme fino e substrato, através do método de elementos finitos, foi possível concluir que:

- do ponto de vista do comportamento global, os modelos conseguiram representar bem o ensaio de indentação em diferentes sistemas compostos por um filme duro (CrAlN), com diferentes espessuras, depositados em um substrato metálico de alta resistência (aço AISI 4140);
- esta análise global também mostrou que filmes de maiores espessuras proporcionaram um aumento de apenas 2% na carga de indentação em um sistema com o dobro da espessura do filme. Por outro lado, filmes mais espessos podem sofrer problemas de falha coesiva provenientes do processo de fabricação;
- em contrapartida, segundo os resultados numéricos da deformação de trincamento, filmes mais espessos apresentam uma menor possibilidade de delaminação na interface entre o filme e o substrato;
- o modelo numérico de trinca difusa para avaliação do comportamento frágil do filme sob tração foi capaz de simular a evolução do gradiente de deformações equivalente de trincamento durante o ciclo de indentação para os sistemas estudados;
- a análise de regiões superficiais críticas às fissuras do ponto de vista da deformação de trincamento se mostraram compatíveis com as fissuras obtidas experimentalmente nos ensaios de indentação com penetradores esféricos;
- também se iniciou um estudo dos processos de delaminação (falha adesiva) e fratura (falha coesiva) no recobrimento. Estes resultados indicaram a possibilidade da utilização da análise numérica na otimização da espessura do filme em função das propriedades mecânicas do sistema, evitando-se, desta forma, sua falha em serviço.
- existe ainda a necessidade de um maior aprofundamento na análise destes procedimentos numéricos para se introduzir um parâmetro capaz de modelar de forma mais realista a adesão entre o recobrimento e o substrato.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro provido pelas agências de fomento à pesquisa CNPq e FAPEMIG.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] SUN, Y., BLOYCE, A., BELL, T., “*Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Various TiN Coating/Substrate Systems under Normal Contact with a Rigid Sphere*”, *Thin Solid Films*, v. 271, pp. 122-131, 1995.
- [2] SOUZA, R.M., MUSTOE, G.G.W., MOORE, J.J., “*Finite Element Modelling of the Stresses, Fracture and Delamination During the Indentation of Hard Elastic Films on Elastic-Plastic Soft Substrates*”, *Thin Solid Films*, v. 392, pp. 65-74, 2001.
- [3] TRICHY, G.R., SCATTERGOOD, R.O., KOCH, C.C., MURTY, K.L., “*Ball indentation tests for a Zr-based bulk metallic glass*”, *Scripta Materialia*, v. 53, pp. 1461-1465, 2005.
- [4] SOTANI, P.F.B., DIAS, A.M.S., SILVA, V.R.V., GODOY, G.C., “*Simulação do Ensaio de Indentação em Filmes Finos com o Uso de Modelos de Trinca Difusa*”, In: *Proceedings of XXIX Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*, [CD-ROM], 2008.
- [5] SOUZA, S.A., “*Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos*”, Ed. Edgard Blücher LTD, 5th Ed., 2000.
- [6] DIAS, A.M.S., GODOY, G.C.D., “*Determination of Stress-strain Curve through Berkovich Indentation Testing*”, *Materials Science Forum*, [no prelo], 2009.
- [7] MANCOSU, R.D., “*Recobrimento tribológico Cr-N e nitretação a plasma para melhoria da resistência à erosão cavitacional de um aço carbono ABNT 1045: uma abordagem topográfica*”, Tese de D.Sc., PGEMM/UFMG, Brasil, 2005.
- [8] DIAS, A.M.S., MODENESI, P.J., GODOY, G.C., CETLIN, P.R., “*Análise numérica do ensaio de indentação em WC-6Co*”, *Revista Matéria*, v. 10, n. 1, pp. 101-110, 2005.
- [9] MscMARC, *Volume A: Theory and User Information*. Users Manual, 2007.
- [10] LARSSON, P., GIANNAKOPOULOS, A.E., “*Tensile stresses and their implication to cracking at pyramid indentation of pressure-sensitive hard metals and ceramics*”, *Materials Science and Engineering A*, v. 254, pp. 268-181, 1998.
- [11] GODOY, G.C. “*Dureza em Tempos de Nanotecnologia: Modificação Superficial para Melhoria de Desempenho de Componentes de Engenharia*”, In: Projeto de Pesquisa PRONEX FAPEMIG EDT 531/05, Brasil, 2008.
- [12] Matweb, www.matweb.com.br, acessado em julho de 2007.
- [13] 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, pp. 5893-5913, 2001.