

# VALIDAÇÃO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UM ENSAIO DE MICROINDENTAÇÃO DE MATERIAL MULTICAMADAS<sup>1</sup>

Fábio Raffael Felice Neto<sup>2</sup>  
Sonia Aparecida Goulart de Oliveira<sup>3</sup>  
Henara Lillian Costa<sup>4</sup>  
José Daniel Biasoli de Mello<sup>5</sup>

## Resumo

O trabalho tem por objetivo validar um modelo de Método dos Elementos Finitos (MEF) para um ensaio de microindentação em material multicamadas, composto por um substrato de aço baixo carbono ABNT 1020, uma camada de nitreto de cromo (CrN) e uma camada de Diamond-like Carbon (DLC). O critério de comparação para a validação do modelo é um ensaio experimental feito nos mesmos parâmetros do numérico. Foi também analisada a influência da profundidade de indentação na resposta do ensaio, utilizando o Método dos Elementos Finitos Explícito, com o auxílio do software Stampack®.

**Palavras-chave:** Método dos Elementos Finitos; Microindentação; Revestimentos.

## VALIDATION OF A FINITE ELEMENT METHOD MODEL OF A MICROINDENTATION EXPERIMENT IN MULTILAYERED MATERIALS

## Abstract

This paper aims to validate a Finite Element Method (FEM) model for a microindentation in a multilayered material, composed of a low carbon steel ABNT 1020 substrate, a chromium nitride (CrN) layer and a Diamond-like carbon (DLC) layer. The comparison for the validation of the model is an experimental work using the same parameters. It was also analyzed the effect of the indentation depth on the test response, using the Explicit Finite Element Method, with the software STAMPACK®.

**Key words:** Finite Element method; Microindentation; Coatings.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia.

<sup>3</sup> Doutora em Engenharia Mecânica, Professora Associada III da Universidade Federal de Uberlândia.

<sup>4</sup> Doutora em Engenharia Mecânica, Professora Adjunta IV da Universidade Federal de Uberlândia.

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, Professor titular emérito da Universidade Federal de Uberlândia.

## 1 INTRODUÇÃO

Para melhorar o desempenho e a vida de componentes mecânicos, é crescente a utilização de revestimentos tribológicos. Segundo Holmberg e Matthews,<sup>(1)</sup> revestimentos tribológicos devem ser finos o suficiente para alterar o contato tribológico mas sem influenciar as propriedades do componente como uma camada independente de material.

O estudo de materiais multicamadas é muito importante para componentes com substrato macio, que podem sofrer deformações e causar tensões que o revestimento não seja capaz de suportar e sofrer colapso, diferentemente dos componentes que possuem substrato duro, que são bem menos suscetíveis a falha. Uma das formas de se mensurar as propriedades de revestimentos tribológicos é o ensaio de microindentação, onde um indentador de geometria definida pressiona o corpo de prova feito do material multicamada e gera uma curva Carregamento vs. Profundidade de indentação. A partir dessa curva, pode-se obter propriedades dos materiais dos revestimentos e também determinar mecanismos de falha.

A falha nos revestimentos pode ocorrer de três formas básicas: *i.* tipo 1, onde a abertura da trinca é gerada por esforços normais; *ii.* tipo 2, onde as trincas se abrem por cisalhamento, gerado por esforços cisalhantes e *iii.* tipo 3, onde ocorre o rasgamento do material. Estas falhas tendem a ocorrer nas interfaces entre as multicamadas, tanto pela falha de adesividade entre as diferentes camadas, como também pela concentração de tensões que pode ocorrer nessas interfaces.

Um estudo tribológico sobre materiais multicamadas demanda um controle muito preciso sobre condições de ensaio e uma forma interessante e precisa de se fazer este tipo de estudo é usando o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é um método numérico que busca resultados aproximados por meio de equações diferenciais. Consiste basicamente na discretização de um corpo contínuo em um número determinado de elementos que são interconectados por equações de interpolação e regidos por equações de campo. A partir das condições de contorno são calculados os resultados para cada elemento, levando em consideração a interação entre eles, existindo por fim resultados nodais e de todo o corpo analisado. Existem diversas ferramentas para aplicar o MEF. Neste estudo foi utilizado o *software* Stampack®, que conta com uma interface CAD e utiliza o MEF explícito. Esse tipo de modelo considera forças de inércia e trabalha com um passo de tempo determinado, que desenvolve a solução em etapas, garantindo a análise de todo o processo, característica importante no estudo de deformações. Este passo de tempo é calculado em função do tamanho do menor elemento.<sup>(2)</sup>

O material multicamadas utilizado é composto por três camadas, um substrato de um aço comum, ABNT 1020, uma camada de nitreto de cromo (CrN) e uma camada mais externa de *Diamond-like Carbon* (DLC). Segundo Robertson<sup>(3)</sup> “o DLC é uma forma metaestável de carbono amorfo e pode apresentar hibridizações  $sp^3$ ,  $sp^2$  e  $sp^1$ ”. Para este estudo são interessantes as formas  $sp^3$  e  $sp^2$  que representam as estruturas alotrópicas do diamante e do grafite respectivamente. Dependendo da quantidade de cada uma dessas hibridizações o material apresenta propriedades diferentes, conferindo maiores características de lubrificação sólida como o carbono grafite ou de dureza do diamante.

Para garantir a validade do modelo em MEF é necessária uma validação frente a um modelo experimental, que neste estudo foi o ensaio de microindentação feito por Lara e De Mello.<sup>(4)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para gerar o modelo geométrico, foi utilizada a interface CAD do *software* Stampack®, segundo os experimentos feitos por Lara e De Mello.<sup>(4)</sup> A fim de otimizar a simulação, foi utilizado um modelo axissimétrico e com fator de escala  $10^3$ . O indentador tem raio de ponta de 200  $\mu\text{m}$ , o substrato possui espessura suficiente para não influenciar na indentação (200  $\mu\text{m}$ ) e existem apoios estáticos embaixo e no lado contrário ao indentador, funcionando como a inércia e fixação do corpo de prova na máquina de ensaio de microindentação. A camada de CrN possui 1,44  $\mu\text{m}$  de espessura e a de DLC 1,15  $\mu\text{m}$  de espessura.

Foi escolhida uma malha não estruturada para os componentes não deformáveis, com 100 elementos para o indentador e para o primeiro apoio (abaixo) e 50 elementos para o segundo apoio. O corpo de prova possui uma malha estruturada composta por elementos quadrados, sendo que o substrato possui 15 x 200 elementos e cada camada possui um maior número de elementos, 4 x 200, por ser a região de interesse do estudo. O modelo proposto é representado pela Figura 1.

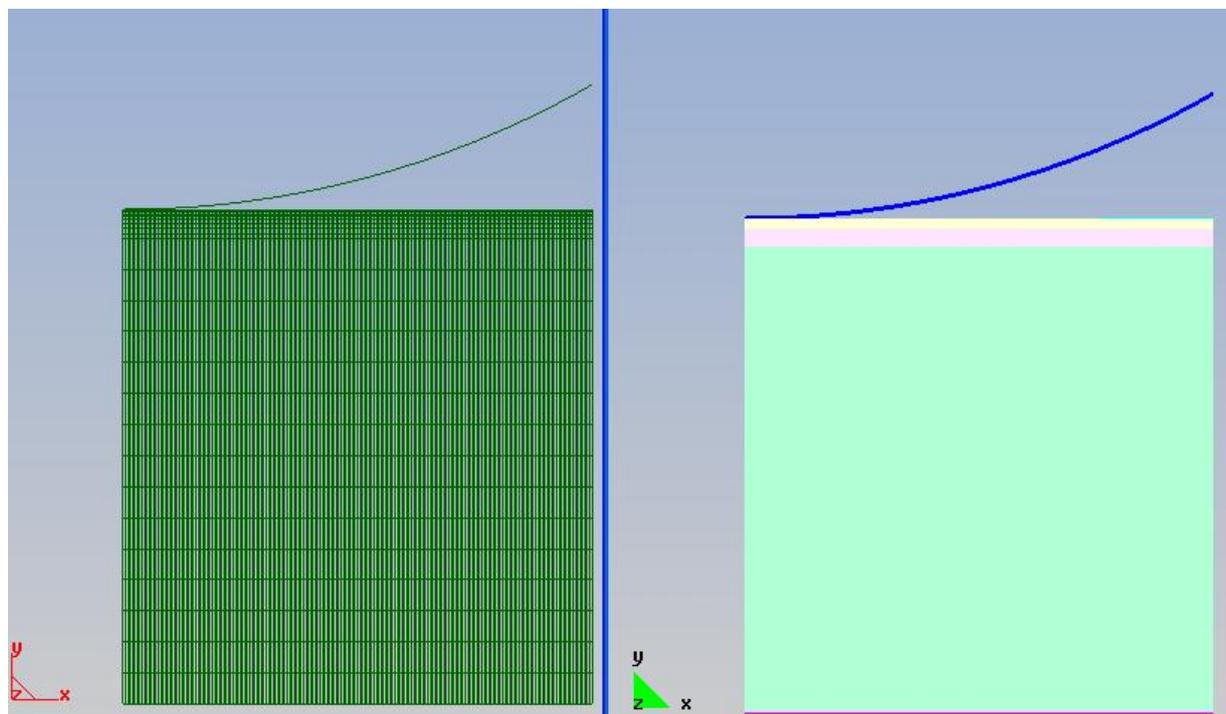


Figura 1. Representação do modelo com e sem malha.

As condições de contorno são: deslocamento do indentador de 20% da espessura da camada de DLC, equivalente a 0,2296  $\mu\text{m}$ ; atrito considerado desprezível e a velocidade de avanço do indentador contra o corpo de material multicamadas de 0,1m/s. Os apoios e o indentador são corpos rígidos indeformáveis e as propriedades dos materiais do corpo de prova compõe a Tabela 1.

Tabela 1. Valor das propriedades utilizadas para cada material<sup>(4)</sup>

	E(GPa)	$\nu$	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Limite elástico (MPa)
DLC	220,38	0,30	2200	2000
CrN	307,20	0,25	2200	2000
Substrato	209,00	0,30	7800	345

Para comparar os resultados numéricos e experimentais, foi utilizado o perfil da curva de descarregamento do ensaio de microindentação, que trabalhada matematicamente com as equações propostas por Oliver e Pharr,<sup>(5)</sup> fornece o valor da dureza. Este valor é obtido utilizando-se o coeficiente angular de uma reta tangente à curva de descarregamento, partindo do valor máximo da força até um valor 20% menor, conforme a Figura 2. Para este cálculo, foi utilizado um algoritmo em linguagem MatLab<sup>®</sup> que traça essa reta por meio de dois pontos, um situado no máximo da curva de descarregamento e outro 20% abaixo. Neste algoritmo foram implementadas também as equações 1,2 e 3.

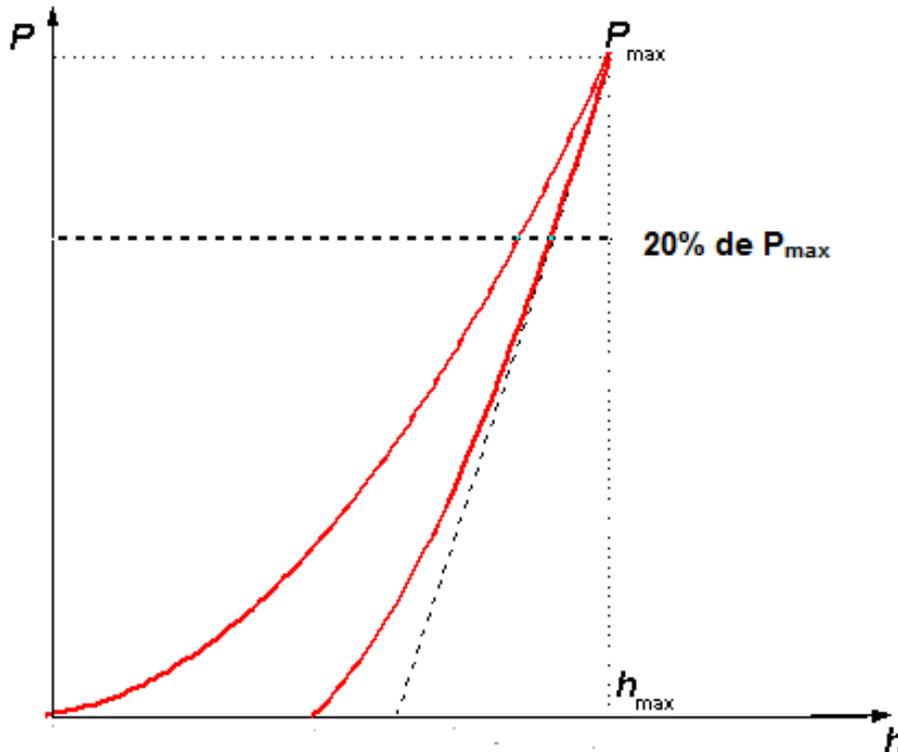


Figura 2. Curva de carregamento e descarregamento do ensaio

$$E_{ef} = \frac{1}{\left(\frac{1-\nu^2}{E}\right) + \left(\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)} \quad (1)$$

$$A = \left(\frac{S}{\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right)E_{ef}}\right)^2 \quad (2)$$

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (3)$$

Onde:

$E_{ef}$  - Módulo de elasticidade efetivo.

$E, E_2$  - Módulo de elasticidade da camada e do indentador.

$\nu, \nu_2$  - Coeficiente de Poisson da camada e do indentador.

$A$  - Área de contato.

S – Rigidez de Contato (inclinação da reta)  
 $P_{max}$  – Carga máxima no ensaio.  
H – Dureza (GPa)

Foi analisada também a influência da profundidade de indentação na resposta do ensaio. Foram feitos modelos cuja única diferença é a profundidade de indentação, que teve valores de 10, 20, 30, 40 e 50% da espessura da camada mais externa.

### 3 RESULTADOS

Feitas as simulações, é possível revolucionar o modelo 180°, a fim de melhorar a visualização dos resultados. Toda a deformação plástica é absorvida pelo substrato, conforme mostra a Figura 3.

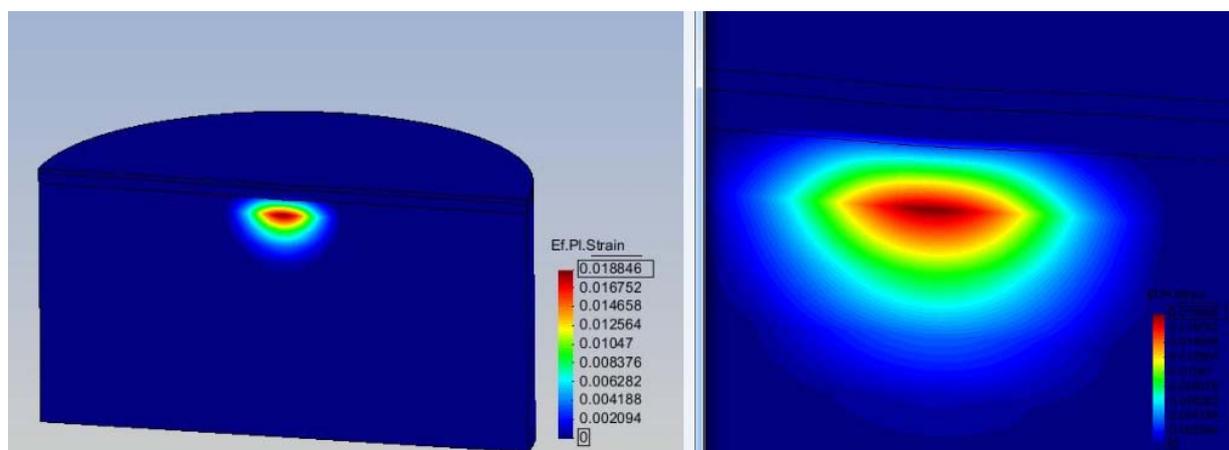


Figura 3. Deformação plástica efetiva.

A Figura 4 mostra as tensões equivalentes de Von Mises, evidenciando que as tensões geradas pela deformação do substrato e as provenientes do indentador estão concentradas na região do revestimento.

A Figura 5 representa as tensões radiais, uma vez que nos mecanismos de falha da estrutura, a falha por abertura da trinca ocorrerá pelas tensões radiais, (note na Figura 5 que a escala de cores muda exatamente no centro da figura, pelo fato do ensaio numérico ter sido feito axissimétrico e depois revolucionado, o que ocasiona diferença na direção dos vetores). Esta figura mostra que as maiores tensões ocorrem na superfície e na interface entre a camada de CrN e o substrato.

A Figura 6 mostra a distribuição de tensões cisalhantes. Esta figura sugere que a delaminação ou destacamento irá ocorrer preferencialmente na interface entre o DLC e o CrN.

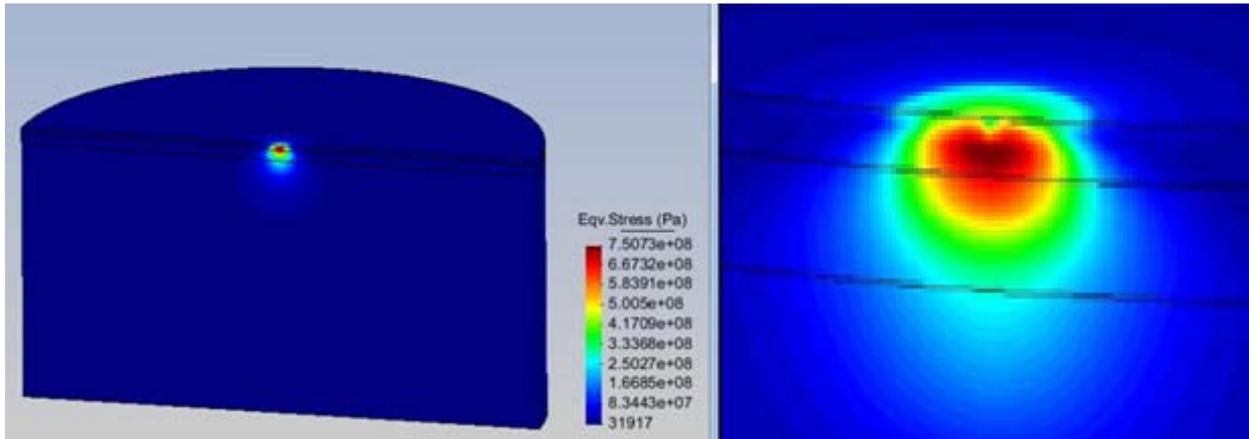


Figura 4. Tensão equivalente de Von Mises.

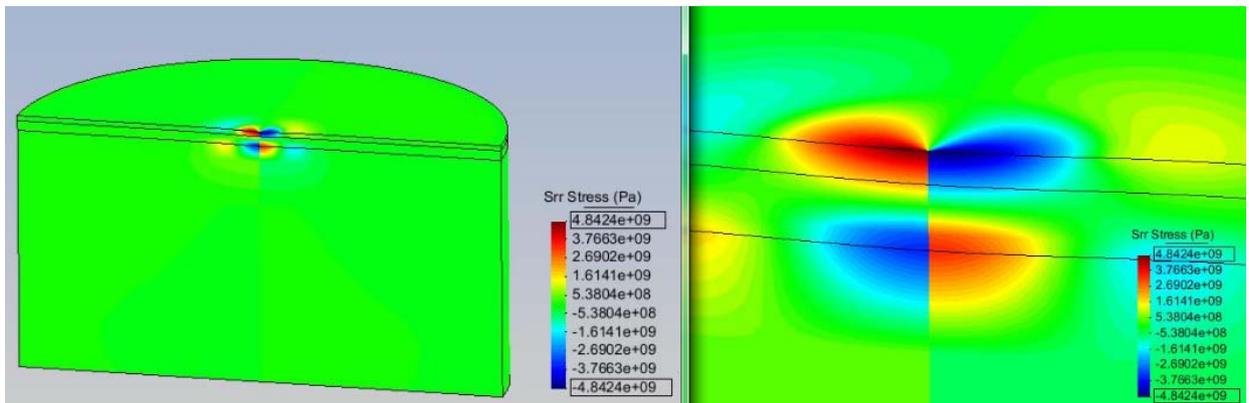


Figura 5. Tensões radiais.

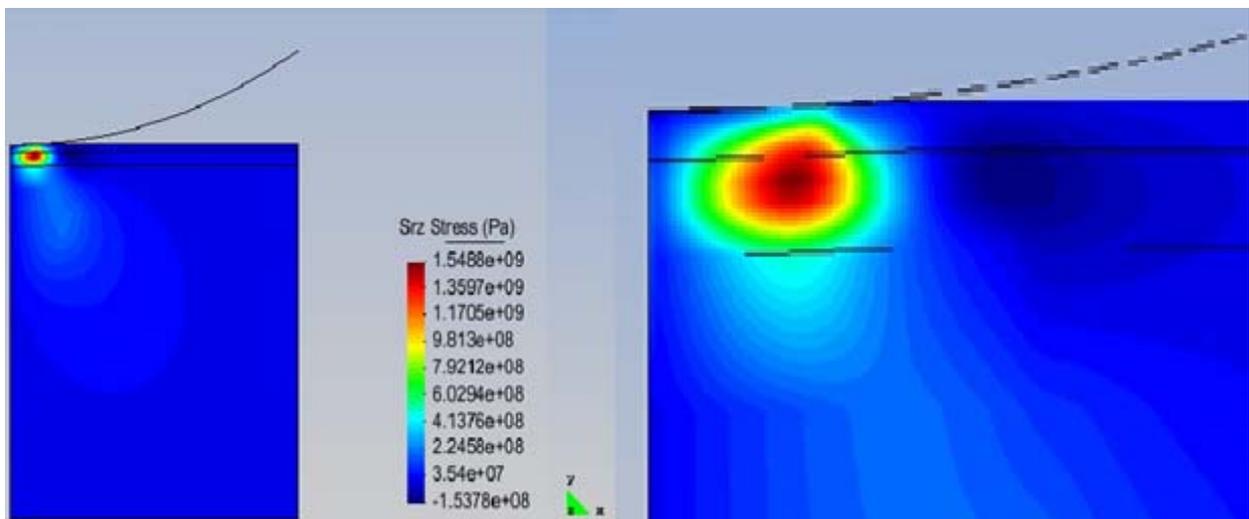


Figura 6. Tensão cisalhante.

Métodos numéricos permitem um grande controle sobre os parâmetros de ensaio e por isso é possível quantificar a influência do substrato na resposta do experimento, alterando somente a profundidade de indentação. Os resultados de dureza para o CrN, nas diferentes profundidades estão representados juntamente com a dureza retirada do ensaio experimental (indentador penetra 20% da espessura da camada mais externa) na Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores obtidos de dureza para os deslocamentos do punção utilizados

	<b>Dureza (GPa)</b>	<b>Erro (experimental como referência) [%]</b>
<b>Experimental (20%)</b>	18,1	
<b>10%</b>	18,9	4,23
<b>20%</b>	18,6	2,69
<b>30%</b>	17,7	2,26
<b>40%</b>	16,8	7,74
<b>50%</b>	10,7	69,16

#### 4 DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos pelo modelo de MEF, é clara a influência da profundidade de indentação na resposta do ensaio. Quanto maior a profundidade de indentação, maior será a influencia do substrato macio e, portanto, maior o erro relativo da dureza do CrN. Porém, estes resultados validam a profundidade de indentação utilizada por Lara e De Melo<sup>(4)</sup> em seus experimentos, que foi de 20%, uma vez que para uma profundidade de até 30% o erro observado é muito pequeno. Outro ponto a ser analisado é a falha pela delaminação que ocorre entre as camadas de DLC e CrN. A adesividade entre os materiais dada pela afinidade química pode não ser o fator predominante para determinar que a falha ocorra na interface, pois a tensão cisalhante ocorre exatamente nessa região, a tornando preferencial para a delaminação, como representado pela Figura 6.

A falha por abertura de trincas ocorre como representado pela Figura 5, pelas tensões radiais existentes, podendo ocasionar o fenômeno *pile-up*, que é o acúmulo de material na direção circunferencial, como uma onda de propagação ao redor do indentador.

#### 5 CONCLUSÃO

Decorrente do discutido, a profundidade de indentação pode ser utilizada até 30% da espessura da camada mais externa, quando em ensaios experimentais. Isto reduz a sofisticação no maquinário e instrumentação, que propicia menores custos sem que exista perda na qualidade dos resultados.

A delaminação que ocorre entre as camadas de DLC e o CrN não pode ser explicada somente por afinidade química, porque a tensão cisalhante ocorre justamente nessa interface, assim como a tensão radial que ocorre na interface entre o CrN e o substrato. É importante ressaltar que a tensão radial também ocorre na superfície.

Para otimizar o componente mecânico feito de um material multicamadas, afastando ou ao menos retardando as falhas, deve-se mudar a espessura das camadas de forma a deslocar as tensões relevantes (cisalhante, radial, equivalente) para pontos afastados da interface desses materiais.

#### Agradecimentos

O primeiro autor agradece o apoio da Fapemig pela bolsa de Mestrado fornecida como auxílio para execução deste trabalho e a Capes/Proex pelo financiamento à participação deste congresso.

## REFERÊNCIAS

- 1 HOLMBERG, K., MATTHEWS, A. Coating Tribology: contact mechanics, deposition techniques and application – 2nd ed. - Elsevier, 2009.
- 2 ZIENKIEWICZ, O. C. The finite element method, 3rd edition, McGraw-Hill Book Co., 1991.
- 3 ROBERTSON, J., Properties of diamond-like carbon. Surf. Coat. Technol., 50 (1992b) 185–203.
- 4 LARA, L. O. C. De Mello, J.D.B, INFLUENCE OF LAYER THICKNESS ON THE PROPERTIES OF MULTIFUNCTIONAL TRIBOLOGICAL COATINGS, Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis - ESDA2012, July 2-4, 2012, Nantes, France
- 5 OLIVER, W. C., PHARR, G. M. Journal of Materials Research, 1992.