

ESTUDO DAS TENSÕES RADIAIS E CISALHANTES DECORRENTES DE UM ENSAIO DE MICROINDENTAÇÃO EM MATERIAL MULTICAMADA COM AUXÍLIO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Fábio Raffael Felice Neto, fabioraf@hotmail.com
Henara Lillian Costa Murray, ltm-henara@ufu.br
Sonia Aparecida Goulart de Oliveira, sgoulart@mecanica.ufu.br

Resumo: O trabalho tem por objetivo determinar, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), a posição e a magnitude das tensões radiais e cisalhantes decorrentes de um ensaio de microindentação em um material multicamada. O material multicamada possui um substrato de aço baixo carbono (ABNT 1020), uma camada intermediária de Nitreto de Cromo (CrN) e uma camada mais externa de Diamond-like Carbon (DLC). Foram simuladas diferentes combinações de espessuras para as camadas, baseadas nas possibilidades de fabricação.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos, Microindentação, material multicamada

1. INTRODUÇÃO

Os revestimentos tribológicos são uma forma eficiente de se melhorar as propriedades de um componente na região do contato (HOLMBERG, 2009). Com a modernização dos processos de fabricação, menores são os custos para aplicar esses revestimentos em componentes de custo relativamente baixo, popularizando sua utilização. Quando aplicados sobre substratos de baixa dureza, os revestimentos tribológicos precisam acompanhar as deformações sofridas pelo substrato e isto pode levar ao colapso do revestimento. Para retardar o aparecimento de trincas e por conseguinte a falha do revestimento, se faz necessário um estudo acerca das tensões envolvidas no momento do contato.

Uma forma de se determinar propriedades mecânicas dos revestimentos tribológicos é o ensaio de microindentação, onde um indentador de geometria definida pressiona a superfície do corpo de prova feito do material multicamada e deste ensaio se pode mensurar dados de carregamento *versus* profundidade de indentação. A partir da inclinação de uma reta tangente a curva do ensaio de descarregamento é possível determinar a dureza da camada intermediária. (OLIVER e PHARR, 2003)

Os revestimentos tribológicos são regiões de elevada energia e costumam apresentar defeitos devido a sua deposição e também falhas por abertura de trincas radiais e delaminação, causadas pelo acúmulo de tensões normais e cisalhantes nas interfaces entre as camadas e na superfície do componente. Geralmente é depositada uma camada intermediária destinada ao suporte mecânico do revestimento tribológico e é então interessante que os pontos de máxima tensão ocorram justamente longe das interfaces, dentro dessa camada intermediária.

Para analisar a posição e a magnitude das tensões ao longo do corpo de prova é interessante a utilização do MEF, pois este permite a visualização dos campos de tensão em todo o volume, além de ser um método robusto para este tipo de ensaio que exige grande precisão nos parâmetros de entrada. (BOHME *et.al.*, 2007, DAO *et.al.*, 2001)

Este trabalho tem por objetivo propor um modelo em MEF de um ensaio de microindentação em um material multicamada composto por um substrato de aço baixo carbono (ABNT 1020), uma camada de CrN e uma camada de DLC. Em todas as simulações os materiais das camadas foram considerados isotrópicos e elástico-lineares e o substrato foi modelado isotrópico elasto-plástico. O modelo permite a análise das posições e intensidades das tensões radiais e de cisalhantes e a partir dessa análise objetiva-se propor uma combinação dessas espessuras das camadas que retarde o aparecimento de trincas e a falha do componente.

Para garantir a robustez das simulações foi feita uma validação do método pela comparação da dureza obtida experimentalmente por Lara *et.al.* (2012) com a obtida numericamente, em ensaio com os mesmos parâmetros de entrada.

Os resultados indicam que para retardar o aparecimento das trincas superficiais advindas de tensões radiais e a delaminação decorrente das tensões cisalhantes a espessura da camada intermediária deve ser maior e que existe uma proporção ideal entre as espessuras.

2. METODOLOGIA

O modelo geométrico foi criado na interface CAD do *software* STAMPAK®, segundo o experimento proposto por Lara *et. al.*(2012). Para otimizar a simulação foi utilizado um modelo axissimétrico com fator de escala 10^3 . O indentedor tem raio de ponta de 200 μm , o substrato é espesso o suficiente para que a espessura não influencie o ensaio e existem apoios estáticos na parte inferior e no lado contrário ao indentedor, funcionando como a fixação do corpo de prova na máquina de ensaio de microindentação. A figura 1 representa o modelo proposto com e sem malha.

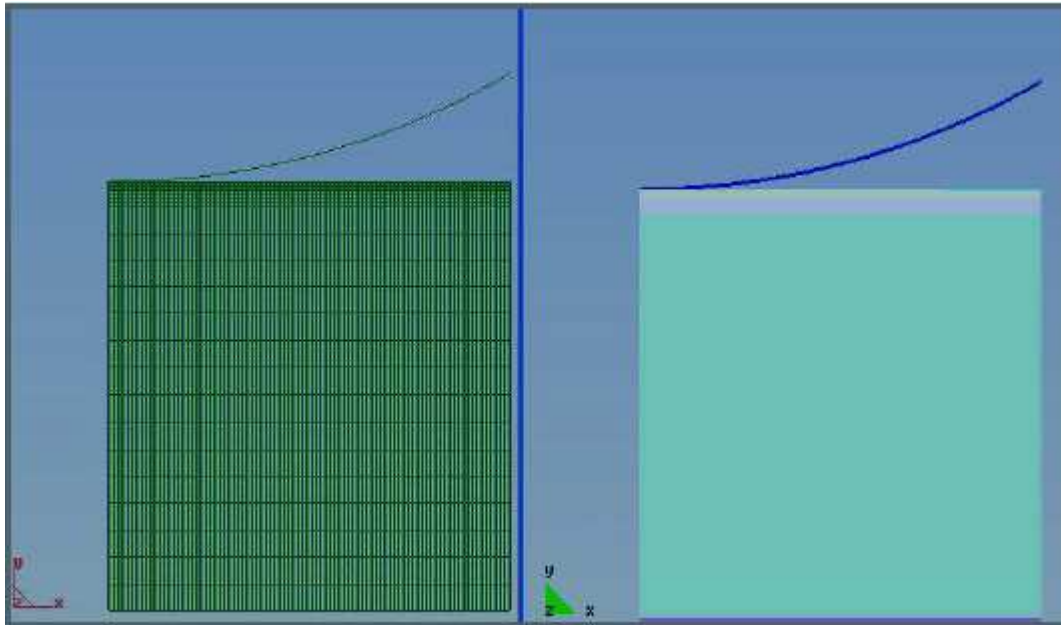


Figura 1. Efeito da presença de superfície na diretividade (Bies e Hansen, 2003).

O modelo proposto para validação possui espessura de CrN de 1,44 μm e 1,15 μm de espessura de DLC. Possui como parâmetros de entrada deslocamento do indentedor de 20% da espessura da camada mais externa, 0,2296 μm , atrito desprezível e velocidade de avanço do indentedor contra o corpo de prova de 0,1 m/s. Os apoios e o indentedor são corpos rígidos indeformáveis e as propriedades dos materiais do corpo de prova compõem a tabela 1.

Tabela 1. Valores das propriedades utilizadas para cada material.

	E (GPa)	ν	Densidade (kg/m^3)	Limite elástico (MPa)
DLC	220,38	0,30	2200	2000
CrN	307,20	0,25	2200	2000
DLC	209,00	0,30	7800	345

Além da simulação feita para a validação do modelo, foram feitas 49 simulações, com todas as combinações de espessuras decorrentes de 7 espessuras de CrN (0,72; 1,44; 1,80; 2,16; 2,52; 2,88 e 3,24 μm) e de DLC (0,58; 0,86; 1,15; 1,44; 1,72; 2,01; 2,30 μm). Os demais parâmetros das simulações foram mantidos inalterados. A partir dessas simulações foram traçados gráficos com as posições das tensões radiais e cisalhantes e a magnitude da tensão radial na superfície da amostra.

3. RESULTADOS

Seguindo a metodologia proposta por Oliver e Pharr (1992), foi obtida uma dureza de 18,1 GPa da camada de CrN para os dados retirados do ensaio experimental. O modelo proposto nas mesmas condições resultou numa dureza da camada intermediária de 18,6 GPa, ou seja, uma diferença de 2,69% entre o experimental e o modelo de MEF proposto.

A tensão radial é uma tensão normal cujo valor máximo ocorre próximo a interface entre a camada de CrN e o substrato. Um dos objetivos da otimização da espessura é fazer com que a máxima tensão radial ocorra afastada da interface, dentro da camada de suporte mecânico. A figura 2 mostra a posição da tensão radial máxima para cada um dos 49 ensaios relativa a interface entre o substrato e a camada de CrN (interface 2). A posição é negativa quando caminha para dentro da camada de CrN e positiva quando caminha para o substrato.

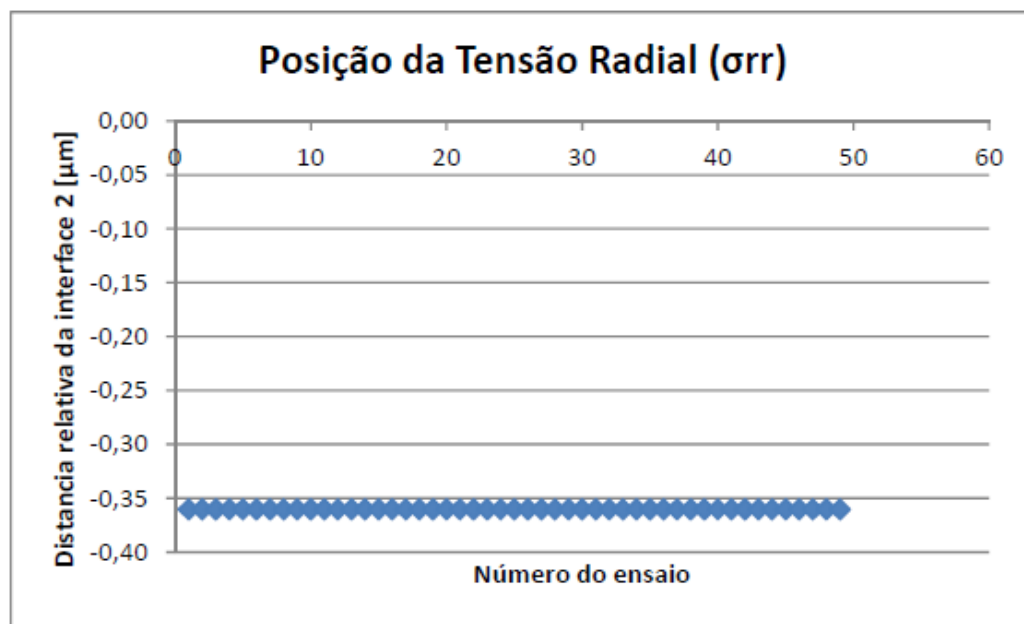


Figura 2. Gráfico da posição da tensão radial para cada simulação

A posição da tensão radial máxima muda conforme o ensaio se considerada a superfície como referência, porém a posição relativa a interface 2 permanece constante. Apesar da posição da tensão radial máxima não se alterar relativa a interface, essa tensão também é crítica na superfície, pois a camada depositada de DLC apresenta muitos defeitos e esta tensão normal tende a abri-los na forma de trincas superficiais radiais. Foram analisados os valores máximos da tensão radial apenas na camada de DLC e segundo a figura 3 a tensão radial de tração que ocorre após a indentação é de maior intensidade que a tensão radial de compressão que ocorre na indentação. Esse fenômeno mostra que as trincas radiais têm uma tendência de não ocorrer na região de indentação, pois a tensão é compressiva é contrária a sua abertura. Já na região após a indentação, a tensão radial trativa atua abrindo as trincas.

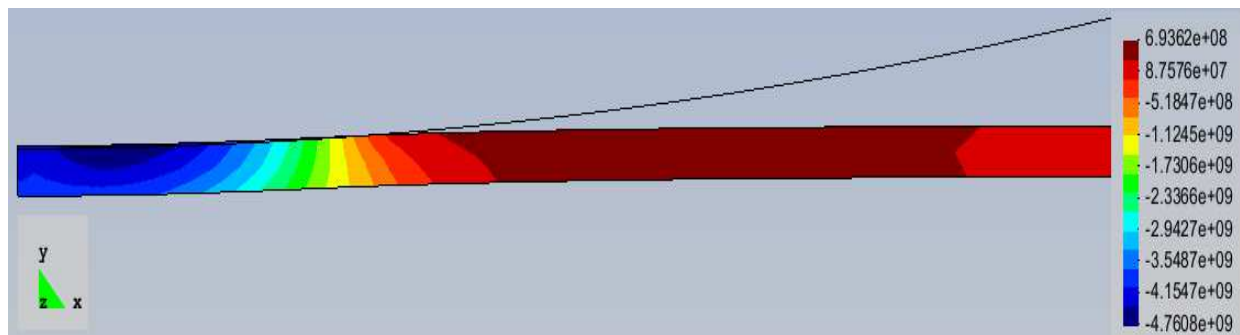


Figura 3. Distribuição das tensões radiais na camada de DLC.

As figuras de 4 a 10 mostram as tensões máximas radiais na camada de DLC para as sete variações de CrN e cada uma das espessuras da camada de DLC. O último ponto da figura 10 apresenta a menor tensão radial máxima na superfície (2,30 μm de DLC e 3,24 μm de CrN), porém é possível notar que a tensão radial máxima na superfície diminui conforme se aumenta as espessuras dos revestimentos, sendo mais sensível ao aumento da espessura da camada de CrN. Isto garante pequenas diferenças entre os resultados de tensão máxima radial na superfície para as diferentes camadas de DLC, contanto que se esteja utilizando uma camada mais espessa de CrN.

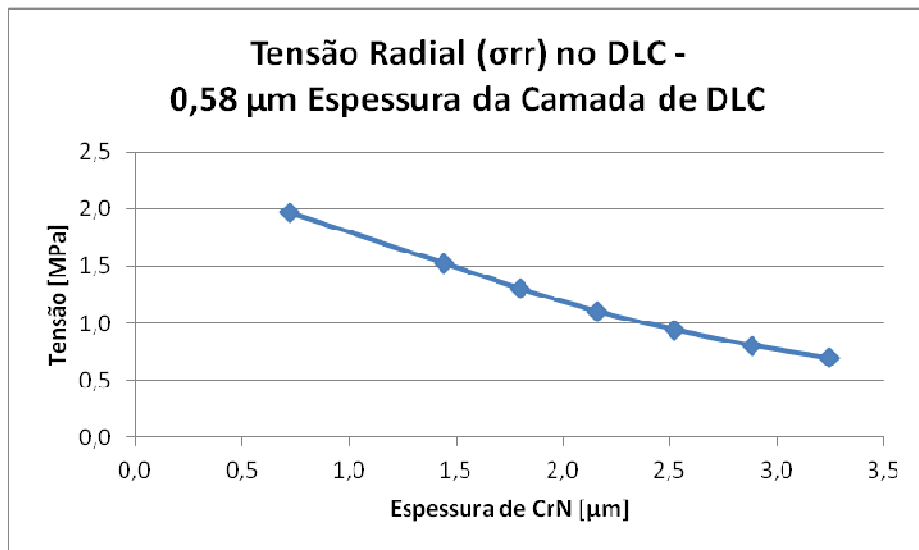


Figura 4. Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 0,58 μm da camada de DLC.

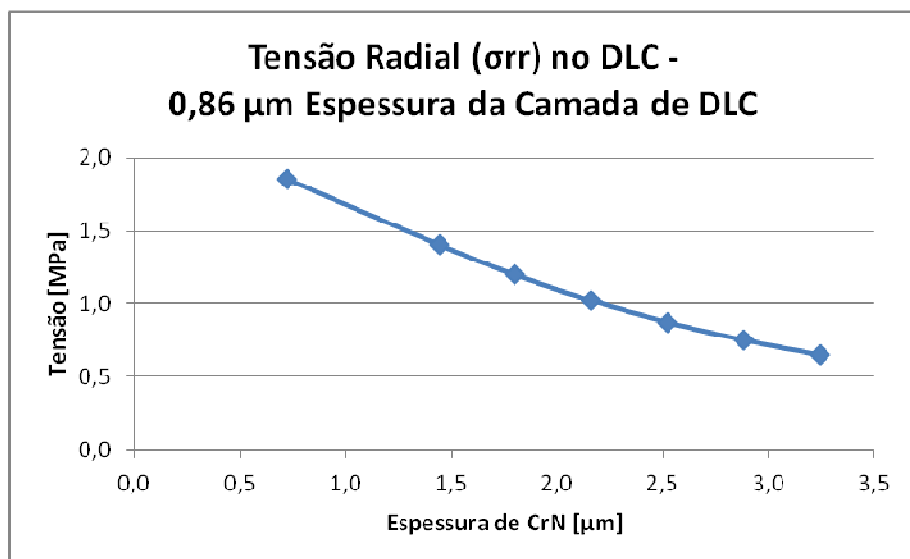


Figura 5. Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 0,86 μm da camada de DLC.

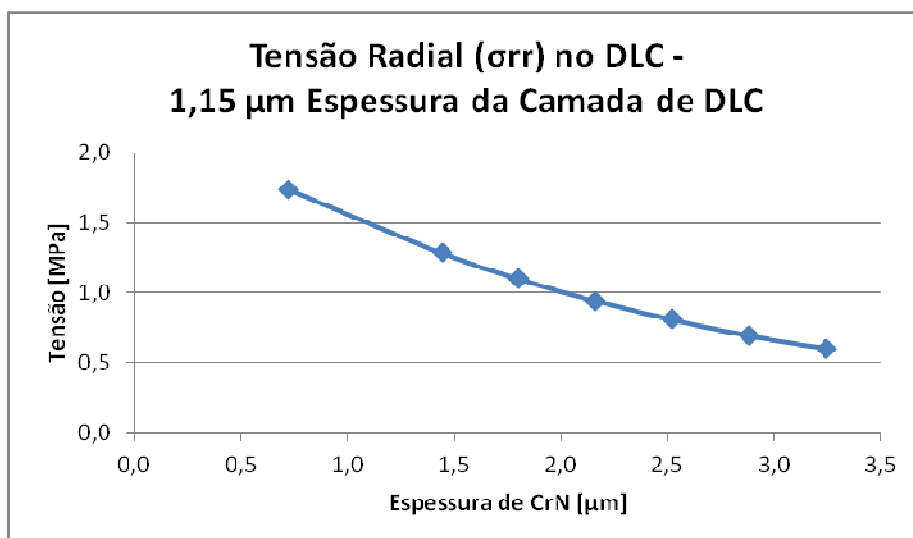


Figura 6. Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,15 μm da camada de DLC.

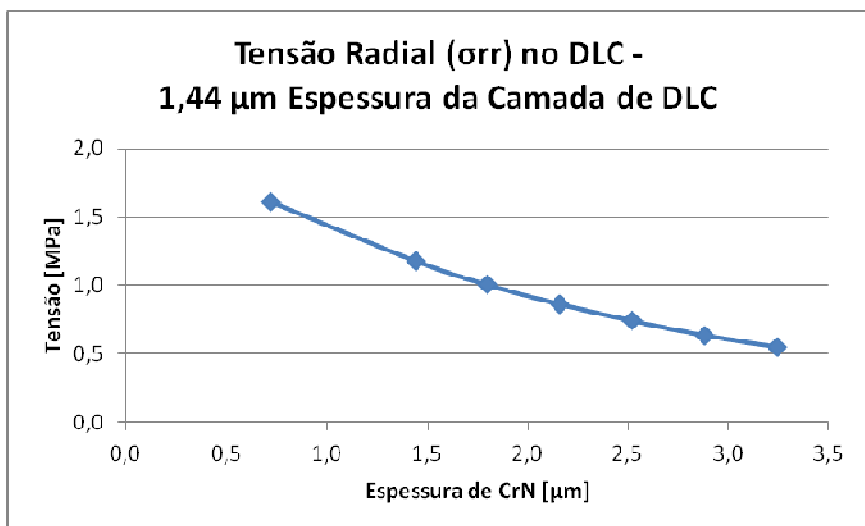


Figura 7. Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,44 μm da camada de DLC.

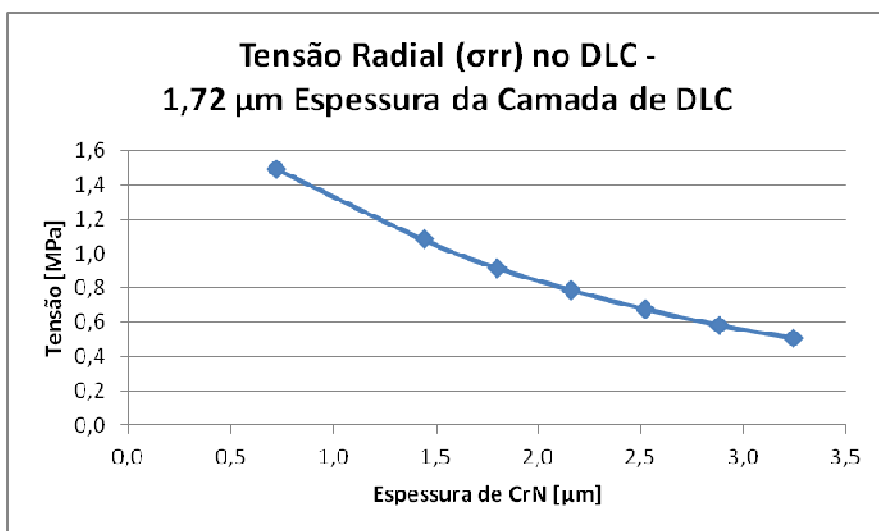


Figura 8. Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,72 μm da camada de DLC.

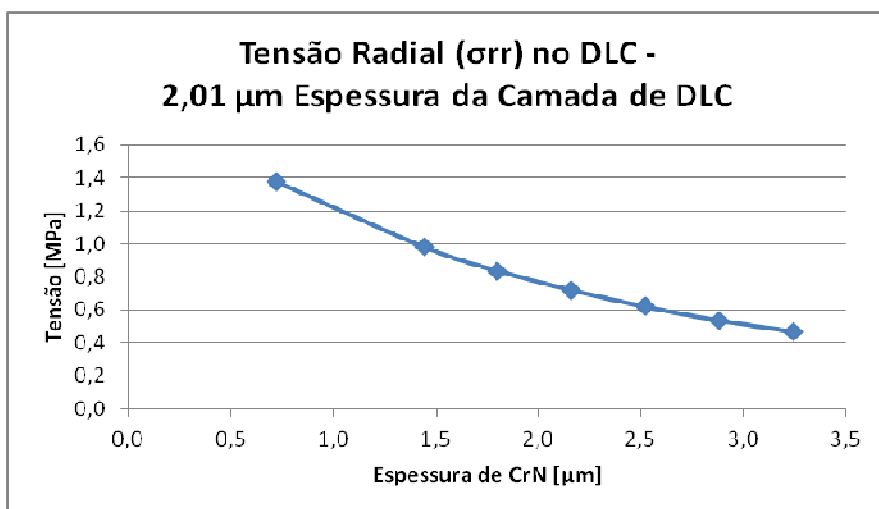


Figura 9. Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 2,01 μm da camada de DLC.

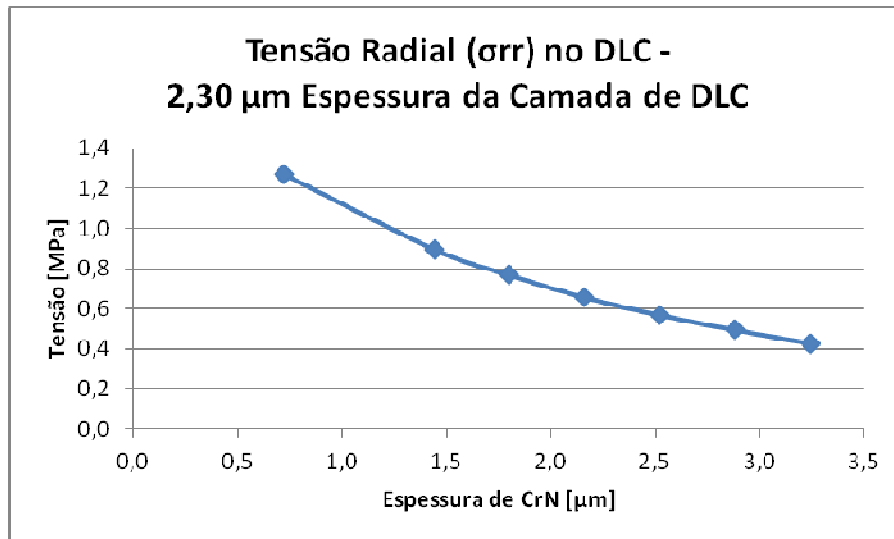


Figura 10. Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 2,30 μm da camada de DLC.

Foi feita também a análise da posição da tensão cisalhante que, em interfaces, tende a arrancar material por delaminação. Nas simulações feitas o valor máximo desta componente de tensão ocorre próximo à interface entre a camada de DLC e a camada de CrN (interface 1). Esta situação é bastante crítica, pois a falha ocorrerá preferencialmente na interface, delaminando partes da camada de DLC. A otimização das espessuras visa também concentrar a tensão cisalhante máxima na camada de CrN, que é destinada ao suporte mecânico.

As figuras de 11 à 17 mostram as posições das tensões cisalhantes máximas relativas à interface 1. O valor será positivo quando o valor máximo da tensão cisalhante caminhar para dentro da camada de CrN e negativo em direção a camada de DLC, ou seja, uma tensão máxima localizada dentro da camada de DLC terá distância relativa negativa.

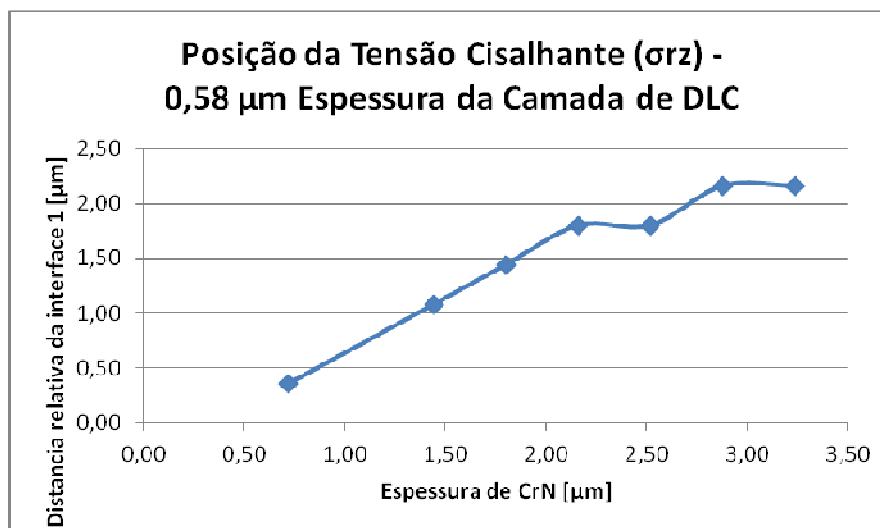


Figura 11. Posição da tensão cisalhante máxima para as 7 variações de CrN e espessura de 0,58 μm da camada de DLC.

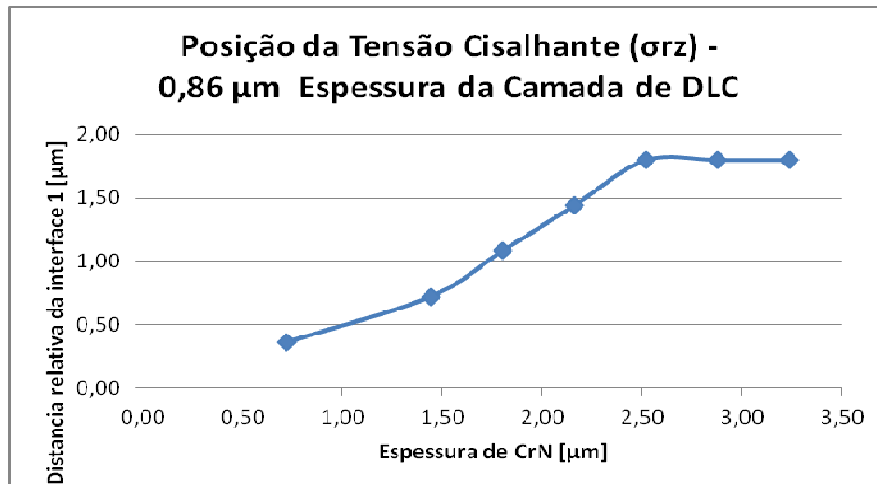


Figura 11. Posição da tensão cisalhante máxima para as 7 variações de CrN e espessura de 0,86 μm da camada de DLC.

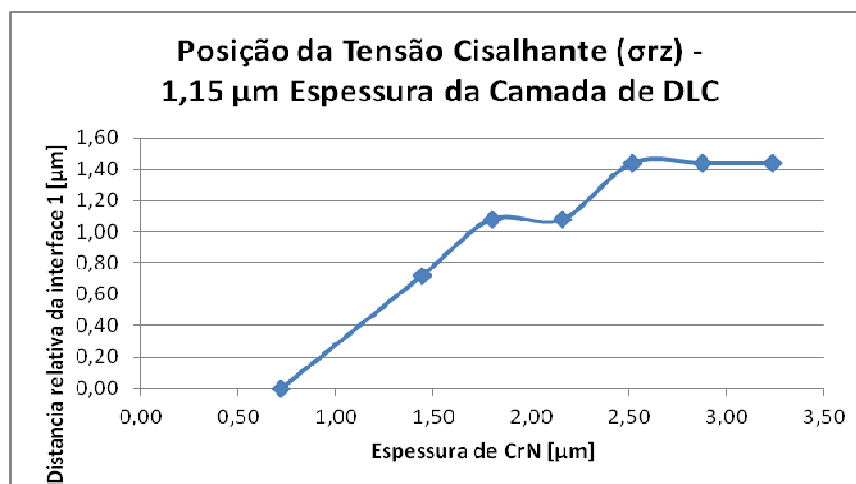


Figura 11. Posição da tensão cisalhante máxima para as 7 variações de CrN e espessura de 1,15 μm da camada de DLC.

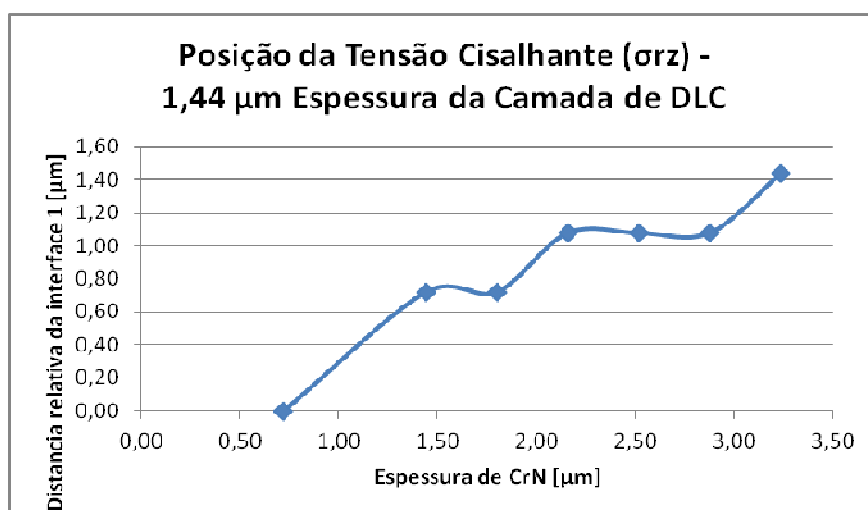


Figura 11. Posição da tensão cisalhante máxima para as 7 variações de CrN e espessura de 1,44 μm da camada de DLC.

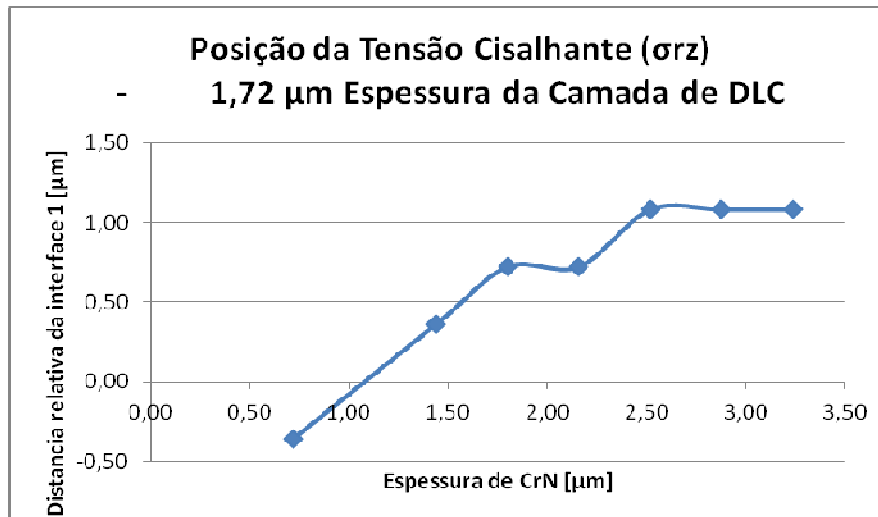


Figura 11. Posição da tensão cisalhante máxima para as 7 variações de CrN e espessura de 1,72 μm da camada de DLC.

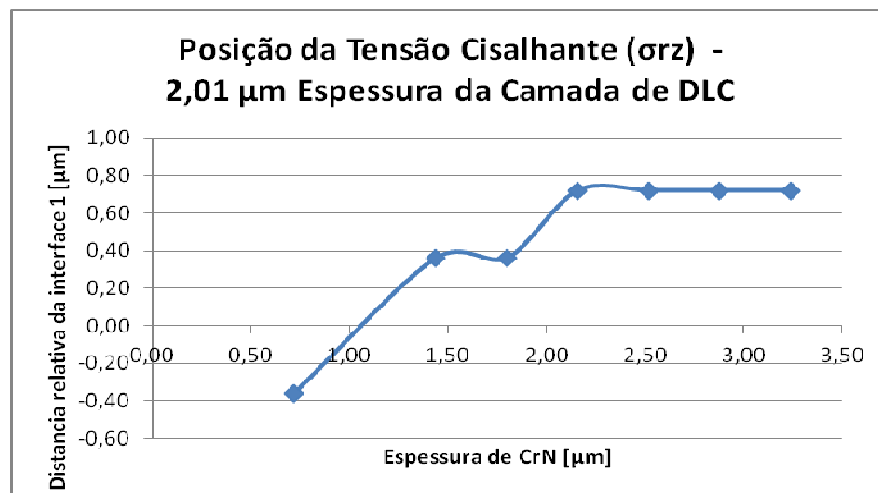


Figura 11. Posição da tensão cisalhante máxima para as 7 variações de CrN e espessura de 2,01 μm da camada de DLC.

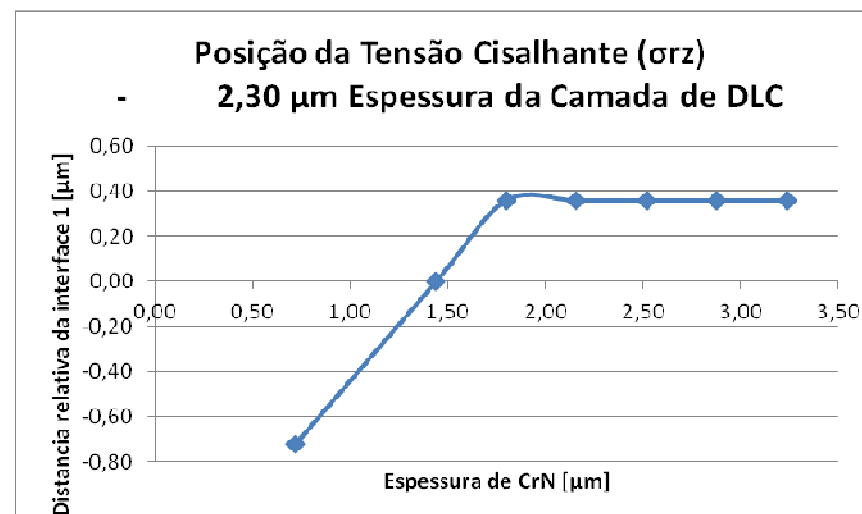


Figura 11. Posição da tensão cisalhante máxima para as 7 variações de CrN e espessura de 2,30 μm da camada de DLC.

É possível ver nos resultados uma tendência de estabilização da distância relativa após certo aumento da espessura da camada de CrN. Observa-se também que algumas configurações são muito críticas para o sistema, pois resultam na tensão máxima cisalhante dentro da camada de DLC, que é muito frágil.

As simulações 6 (0,58 μm DLC e 2,88 μm CrN) e 7 (0,58 μm DLC e 3,24 μm CrN) são as que apresentam tensão cisalhante máxima com maior distância da interface 1. As simulações que resultam na máxima tensão cisalhante mais distante da interface são para a camada mais fina de DLC com as maiores espessuras de CrN. Isso sugere que a camada de suporte mecânico deve ser proporcionalmente mais espessa que a camada mais externa para que a tensão máxima cisalhante ocorra mais distante da interface.

3. CONCLUSÕES

Primeiramente foi comprovada a robustez do método por meio da validação, onde foram comparadas as durezas da camada intermediária, calculada para um ensaio experimental e um numérico nas mesmas condições. A dureza obtida pelo ensaio experimental foi de 18,1 GPa e de 18,5 GPa para o modelo numérico, uma diferença de aproximadamente 2%.

Em relação a tensão radial máxima, temos que esta ocorre próxima a interface entre o CrN e o substrato e não altera sua distância relativa a essa interface quando se alteram as espessuras das camadas. Porém sua magnitude na superfície da camada de DLC diminui conforme se aumentam as espessuras, sendo mais sensível ao aumento da espessura da camada de CrN. Então todas as simulações feitas com a maior espessura de CrN apresentam resultados semelhantes.

A tensão cisalhante máxima ocorre próxima a interface entre as camadas de CrN e DLC e muda sua posição conforme a combinação de espessuras dos revestimentos que for escolhida. A espessura ideal é aquela onde a tensão cisalhante máxima ocorre mais distante da interface DLC/CrN em direção a camada de CrN, que é destinada ao suporte mecânico, que são as simulações 6 (0,58 μm DLC e 2,88 μm CrN) e 7 (0,58 μm DLC e 3,24 μm CrN). É importante salientar que após uma certa proporção entre as espessuras das camadas, a posição da tensão cisalhante máxima tende a ser constante, aumentando apenas sua magnitude. Isso sugere que para cada espessura da camada de DLC deve ser aplicada uma camada de CrN mais espessa diretamente proporcional.

Ao comparar os resultados da posição da tensão cisalhante máxima e a magnitude da tensão radial na superfície da camada de DLC, pode-se afirmar que, segundo os parâmetros deste trabalho, as espessuras ideais para as camadas de DLC e CrN são de 0,58 e 3,24 μm respectivamente.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FAPEMIG, CAPES e CNPq pelo auxílio para execução deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- BOHME, G.S., SOUZA, R.M., Análise por elementos finitos do contato em ensaios de indentação instrumentada, VIII Encontro de iniciação científica do LFS, Departamento de engenharia mecânica, escola politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.
- DAO, M., CHOLLACOP, N., VAN VLIET, K.J., VENKATESH, T.A., SURESH, S., Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation. Acta Materialia, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2001.
- HOLMBERG, K., MATTHEWS, A. Coating Tribology: contact mechanics, deposition techniques and application – 2nd ed. - Elsevier, 2009.
- 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
- OLIVER, W. C., PHARR, G. M. Journal of Materials Research, 1992.