

VALIDAÇÃO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UM ENSAIO DE MICROINDENTAÇÃO DE MATERIAL MULTICAMADAS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE STAMPACK®

Fábio Raffael Felice Neto; Sonia Aparecida Goulart de Oliveira; Henara Lillian Costa.

Com o intuito de reduzir custos e melhorar as propriedades de componentes mecânicos, crescente é a utilização de revestimentos com propriedades especiais que otimizem o funcionamento do componente. Estudos de materiais multicamadas já são bem avançados quando o substrato é um metal de alta dureza, como em ferramentas de corte, que já possuem ampla utilização dos mais diversos tipos de revestimentos. O aumento de estudos e a produção em massa desses revestimentos tornou o procedimento interessante também para componentes feitos de materiais mais comuns, como aços com baixo teor de carbono. Por serem materiais mais macios, a interação entre substrato e camadas é bastante diferente do substrato duro, demandando estudos mais aprofundados sobre o tema.

Uma forma eficiente de mensurar e trabalhar as propriedades de um material revestido é o ensaio de microindentação, onde um indentador de raio de ponta definido pressiona a superfície e são coletados os dados de tensão e deformação.

Este trabalho partiu de um modelo experimental de um ensaio de microindentação de um material composto por três camadas, um substrato de aço carbono ABNT 1020, uma camada de nitreto de cromo (CrN) com uma espessura de 1,44µm e uma camada de DLC com espessura de 1,15 µm. Além dos dados geométricos e de propriedade dos materiais retirados de LARA (2011), foram também utilizados os dados retirados do ensaio experimental.

Foi utilizado o *software* STAMPACK®, ferramenta para simulação em elementos finitos explícito, preferencialmente utilizado para situações onde ocorra deformação plástica. O método discretiza os corpos em um número finito de pontos e os une por meio de interpolações para garantir a continuidade. Especificamente no Método dos Elementos Finitos explícito, é calculado um passo de tempo conforme o tamanho do menor elemento. (ZIENKIEWICZ, 1991)

Para otimizar o processo, foi utilizado um modelo geométrico axissimétrico, com um fator de escala de 10^3 , com raio de ponta de 200µm e uma espessura do substrato grande o suficiente para não influenciar o ensaio (200µm). Foram colocados também dois apoios estáticos e indeformáveis, sendo um abaixo da peça ensaiada e outro na parte superior do lado contrário onde ocorre a indentação, para evitar deslocamento de corpo rígido. A malha possui 100 elementos para a ferramenta e para o primeiro apoio, 50 elementos para o segundo apoio, 4 x 200 elementos para as camadas e 15 x 200 elementos para o substrato. O modelo proposto é apresentado na Figura 1.

Inicialmente as condições de ensaio foram: deslocamento do indentador de 20% da espessura da primeira camada, ou seja, 0,2296 µm, atrito desprezível e velocidade de avanço do indentador de 0,1 m/s. Os apoios e o penetrador são considerados indeformáveis e as propriedades dos materiais compõem a tabela 1.

Tabela 1: Valores das propriedades utilizadas para cada material.

	E (GPa)	ν	Densidade (kg/m³)	Limite elástico (MPa)
DLC	220,38	0,30	2200	2000
CrN	307,20	0,25	2200	2000
Substrato	209,00	0,30	7800	345

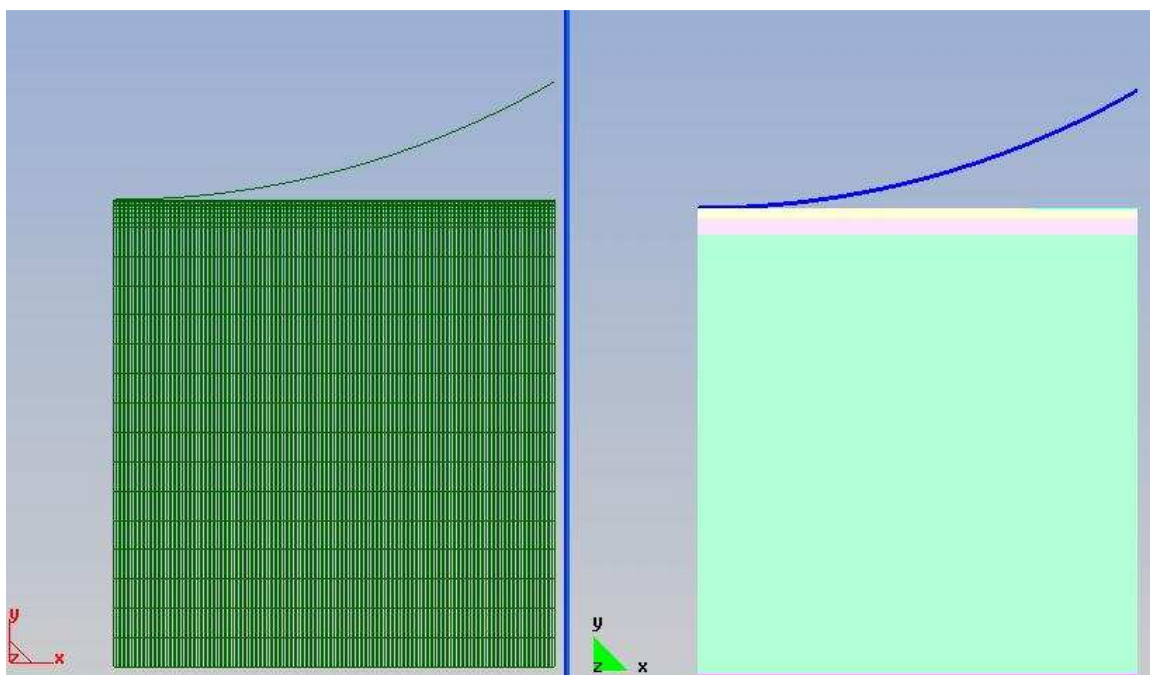


Figura 1: Representação do modelo com e sem a malha

A forma encontrada para comparar os resultados obtidos experimentalmente e numericamente foi o perfil da curva de descarregamento juntamente com o valor da dureza que pode ser calculada utilizando o modelo proposto por Oliver e Pharr (1992, 2004), utilizando o coeficiente angular de uma reta tangente a curva de descarregamento, partindo do valor máximo da força até um valor de força 20% menor, conforme mostrado na Figura 2. Para este cálculo, foi utilizado um algoritmo em linguagem MatLab® 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.

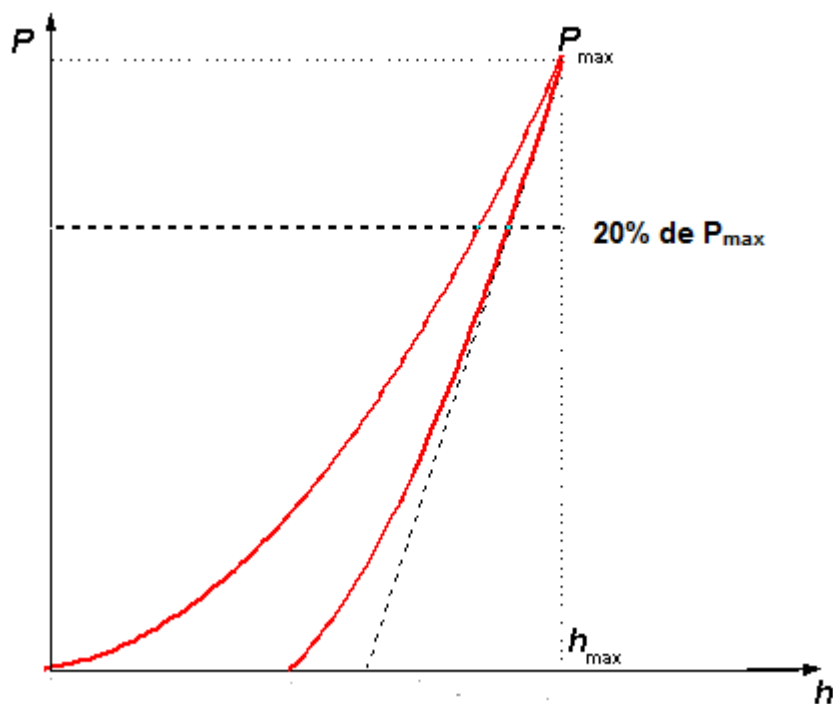


Figura 2: Curva de Descarregamento do ensaio

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

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

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

Onde:

E_{ef} - Módulo de elasticidade efetivo.

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

ν, ν_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)

Outro ponto interessante de estudo é a profundidade de penetração do indentador, que na literatura é recomendada como sendo entre 10 e 20% da espessura da camada de DLC. Foram simulados modelos cuja única diferença é o deslocamento do indentador, de 10, 20, 30, 40 e 50%. Os resultados de dureza são representados na Tabela 2 e o erro com relação à dureza determinada experimentalmente é mostrado na Figura 3, onde observa-se que para o penetrador modelado (Rockwell), profundidades de penetração de até 30% da espessura da camada podem ser utilizadas sem que grandes erros ocorram na medição da dureza.

Tabela 2: Valores obtidos de Dureza para os deslocamentos utilizados.

	Dureza (GPa)	Erro (experimental como referência) [%]
Experimental (20%)	18,1464	
10%	18,8700	3,8347
20%	18,6478	2,6888
30%	17,6752	2,6659
40%	16,8552	7,6605
50%	10,7051	69,5117

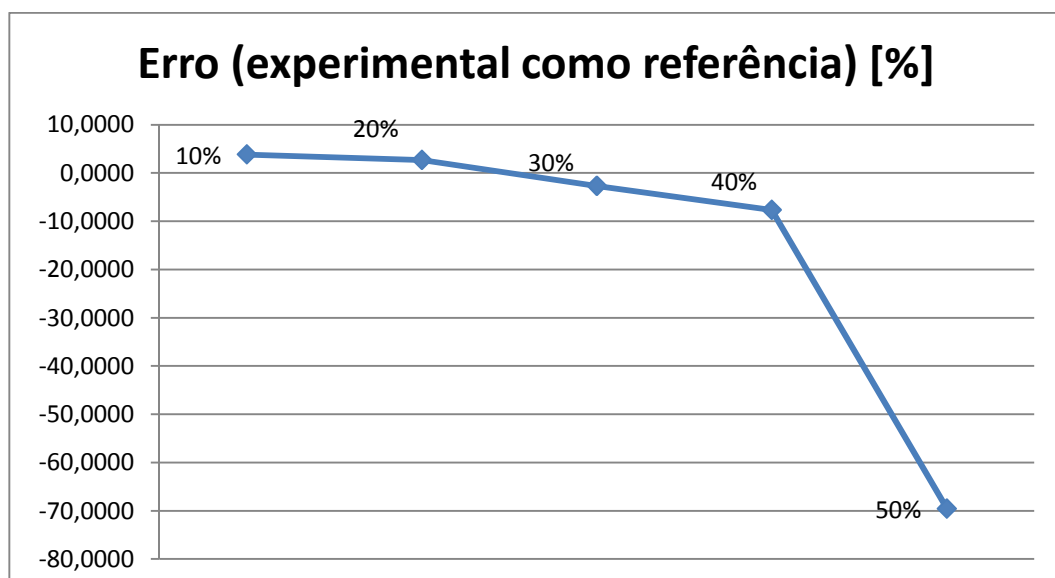


Figura 3: Gráfico representativo dos erros quando comparado ao ensaio experimental

É possível fazer a revolução do modelo calculado para uma melhor representação gráfica e análise de resultados. A Figura 4 mostra a tensão equivalente de Von Mises e a Figura 5 representa a deformação plástica efetiva. Pode ser observado que a deformação plástica ocorre apenas no substrato macio.

Outro fenômeno que é mais facilmente analisado pelo método numérico é a falha por abertura da trinca, causada pelas tensões normais radiais, representadas na Figura 7 (note na Figura 7 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). Há também a delaminação (destacamento) que ocorre entre as camadas de CrN e de DLC, observado experimentalmente por LARA (2011). Isto se dá porque as tensões cisalhantes máximas, que podem levar a este destacamento se a adesividade entre as camadas não for adequada, ocorrem na interface entre o CrN e o DLC, conforme mostra a Figura 6.

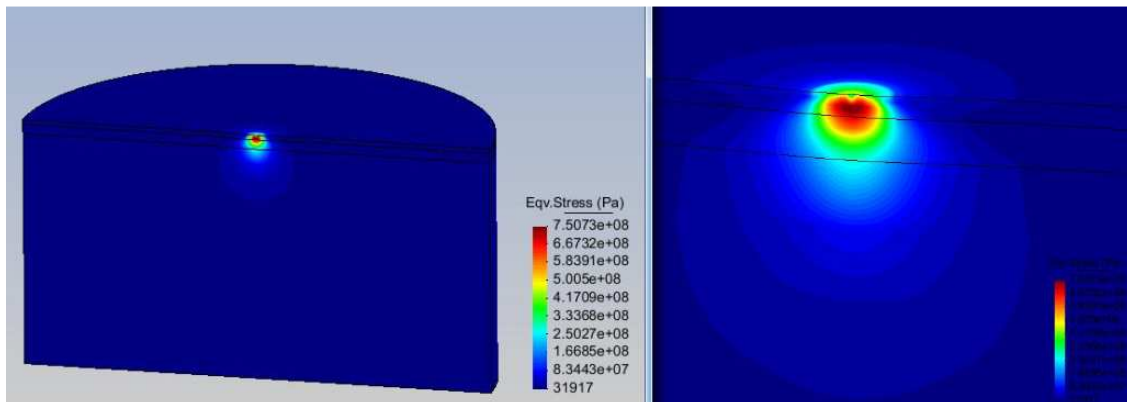


Figura 4: Tensão equivalente

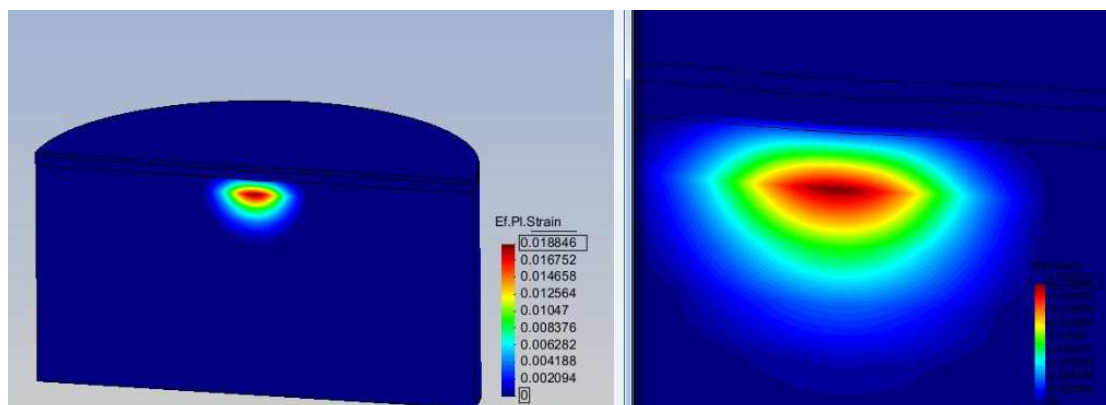


Figura 5: Deformação plástica efetiva

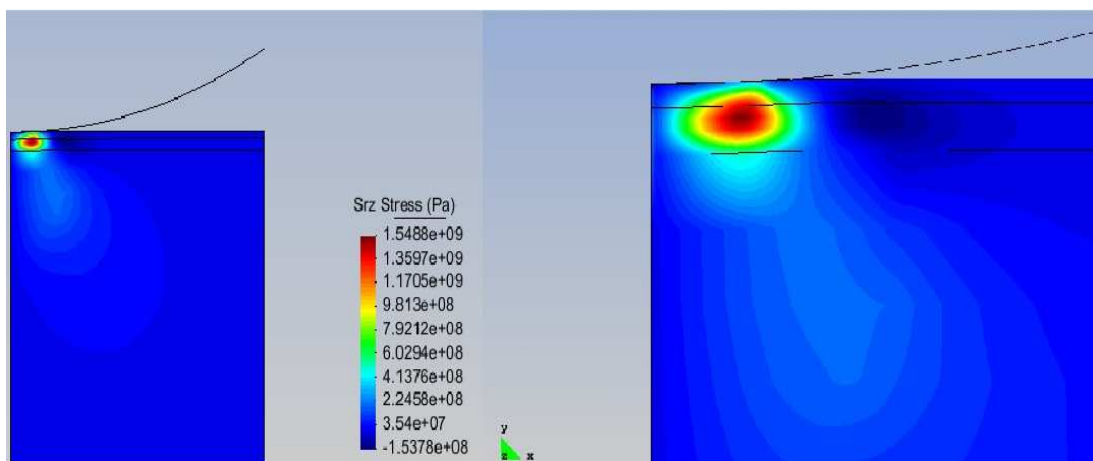


Figura 6: Tensão cisalhante

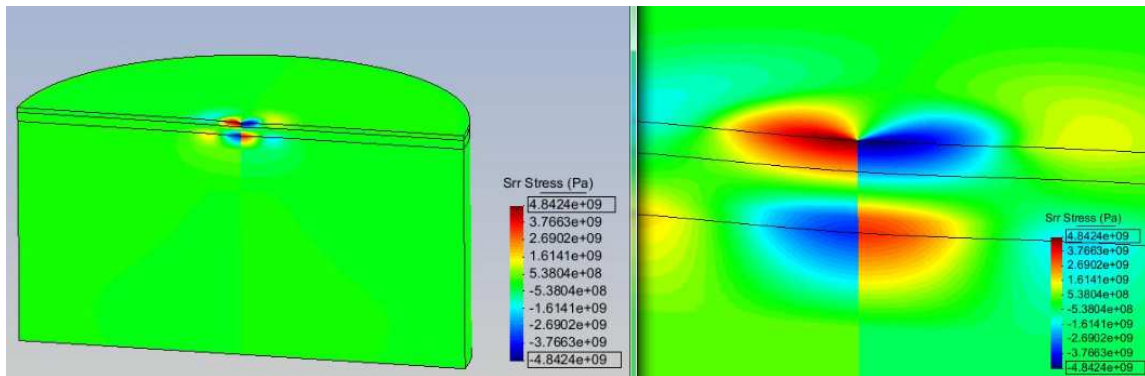


Figura 7: Tensões radiais

Considerando os erros obtidos, é seguro dizer que o modelo computacional do ensaio de microindentação em material multicamadas pelo Método dos Elementos Finitos Explícito convergiu. Este método pode então ser utilizado para otimizar os parâmetros de ensaio, bem como utilizar deslocamentos do indentador maiores, que demandam máquinas menos sofisticadas. É possível ainda testar novos parâmetros de projeto dos materiais multicamadas, como diferentes espessuras das camadas.

REFERÊNCIAS

- JOHNSON, K. L. **Contact mechanics**, Cambridge University Press Cambridge, UK, 1985.
 LARA, L. O. C. **Tribo revestimentos aplicados a industria de refrigeração**, 2011.
 OLIVEIRA, S. A. G. **Failure machanisms in coated solids under contact loading**, Brown University, 1996.
 OLIVER, W. C., PHARR, G. M. **Journal of Materials Research**, 1992.
 ZIENKIEWICZ, O. C. **The finite element method**, 3rd edition, McGraw-Hill Book Co., 1991.