

## ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM SÓLIDOS REVESTIDOS E TEXTURIZADOS

Isabela Costa Salmen Evangelista, Universidade Federal de Uberlândia, isabelacostasalmen@gmail.com

Sonia Aparecida Goulart de Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, sgoulart@ufu.br

Henara Lillian Costa Murray, Universidade Federal do Rio Grande, ltm-henara@ufu.br

**Resumo:** *Materiais multicamadas são frequentemente utilizados para melhorar as propriedades tribológicas de regiões de contato. Estudos sugerem que introduzir texturizações superficiais específicas nesses componentes, não só mantem um baixo coeficiente de atrito, como também prolongam substancialmente a vida útil do revestimento. Diferentes testes tribológicos comprovam a eficiência da texturização superficial nos aspectos de desgaste e atrito, mas pouco é conhecido sobre o comportamento dos campos de tensão e deformação desses materiais. Devido a complexidade destas análises, os métodos numéricos auxiliam na previsão e estudo desses comportamentos. Este trabalho tem como objetivo analisar os campos de tensão e deformação, através do Método de Elementos Finitos, de um sólido revestido e texturizado superficialmente com bolsos circulares, e avaliar a influência dos parâmetros geométricos neste comportamento. O material será composto por uma camada de nitreto de cromo, recoberto por uma camada de DLC, e um substrato de aço baixo carbono ABNT 1020. Serão realizadas simulações de indentação com a superfície revestida, com e sem a texturização, para avaliação da transição de comportamento entre eles. A texturização será composta por bolsos circulares com diâmetro e profundidades variadas e densidade de área texturizada mantida entre 20 e 30%. Nas simulações será utilizado o Método de Elementos Finitos Explícito, com auxílio do software STAMPACK®.*

**Palavras-chave:** *texturização superficial, materiais multicamadas, campos de tensão e deformação, Método de Elementos Finitos*

### 1. INTRODUÇÃO

Os revestimentos são frequentemente utilizados para melhorar as propriedades tribológicas de componentes em contato. A mecânica do contato apresenta diversas análises, analíticas e numéricas, para contato elasto-plástico para superfícies revestidas. Um objetivo comum destes estudos tem sido a investigação dos efeitos do coeficiente de atrito, espessura do revestimento e propriedades mecânicas sobre a tensão de contato e os campos de deformação. No entanto, os estudos anteriores, foram em sua vasta maioria, realizados para sólidos com superfícies planas, portanto, sabe-se muito pouco sobre o papel das características geométricas da texturização superficial sobre o comportamento dos campos de tensão e deformação de componentes revestidos e texturizados (Gong; Komvopoulos, 2003).

A partir dos anos 90, a texturização superficial apareceu como uma opção viável para superfícies utilizadas na engenharia, apresentando melhoras significativas na capacidade de suportar cargas, na resistência ao desgaste e coeficiente de atrito em componentes mecânicos (Etsion, 2005).

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da texturização superficial de sólidos revestidos nos campos de tensão e deformação, através de ensaios simulados pelo Método de Elementos Finitos, devido ao contato normal de uma esfera rígida contra a superfície, simulando um ensaio de indentação instrumentada.

A amostra será composta de um substrato de aço de baixo carbono ABNT 1020 revestido com uma camada de CrN (nitreto de cromo), recoberta por outra de DLC (diamond-like carbon), e apresentará em sua superfície uma texturização composta de bolsos circulares igualmente espessados, com uma densidade de área texturizada entre 20-30%. Os bolsos terão seu diâmetro variando entre 200 e 300  $\mu\text{m}$ , e profundidades entre 5 a 30  $\mu\text{m}$ .

### 2. REVESTIMENTOS TRIBOLÓGICOS

Para otimizar propriedades de componentes mecânicos, revestimentos são frequentemente utilizados para proteger os componentes sujeitos a tensões de contato, melhorar seu desempenho tribológico e a funcionalidade das superfícies em interação. Filmes duros, como os compostos de diamond-like carbon (DLC), tem sido bastante estudados por apresentar propriedades próximas as do diamante, e podem ser obtidos com processos tecnológicos mais simples. O DLC apresenta elevada dureza, é inerte quimicamente, possui baixo atrito e baixo coeficiente de expansão térmica e alta condutividade térmica (Ding et. al, 2010).

Para obtenção de uma combinação de alta resistência ao desgaste, elevada dureza e baixo atrito, é necessário a introdução de camadas multi funcionais. Estruturas multicamadas geralmente apresentam distribuições de tensão menos severas que materiais com apenas uma camada de revestimentos, para mesma dureza e mesma razão de dureza entre o revestimento e o substrato (Djabella, 1993). Quando o substrato possui dureza bastante inferior ao revestimento, camadas com propriedades intermediárias devem ser introduzidas para melhor adesão do revestimento e suavização da transição

de propriedades, para que não haja formação de trincas devido as grandes deformações, como mostrado na Fig. (1) (Lara, 2012).

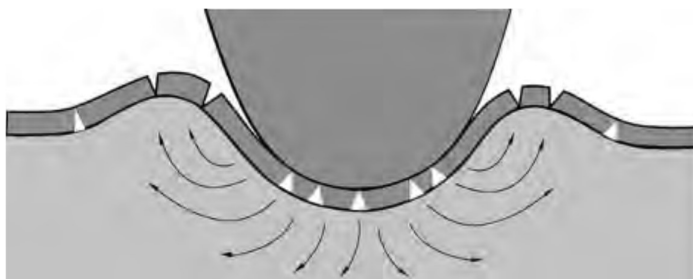


Figura 1: Fratura de um revestimento duro em um substrato macio ocorre na área de contato e suas extremidades (Holmberg; Matthews, 2009)

Um fator importante que também deve ser levado em consideração na análise de revestimentos é a adesividade entre os revestimentos e entre o revestimento e o substrato. Essa adesividade é dependente da afinidade química entre os materiais, a forma com que foram depositados, e a geometria da superfície na qual foram depositados. Esta propriedade é de bastante importância, pois ela não depende apenas de fatores químicos, pois regiões de interface podem sofrer maiores tensões e falhar primeiro, independente das forças de ligação. E a delaminação do revestimento é bastante crítica do ponto de vista tribológico, porque além de retirar a proteção do componente, partículas do revestimento podem penetrar no contato, atuando como abrasivos e tornando o desgaste mais severo (Felice Neto, 2012).

### 3. TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL

Através da utilização de revestimentos com elevada dureza e baixo coeficiente de atrito, consegue-se geralmente uma melhora do desempenho e da funcionalidade tribológica de superfícies em contato. Diversas análises teóricas e numéricas realizadas anteriormente analisam o efeito da espessura e das propriedades dos revestimentos no comportamento dos campos de tensão e deformação atuantes no revestimento e no substrato. Contudo, é pouco conhecida a influência da texturização superficial no comportamento mecânico de componentes texturizados (Gong; Komvopoulos, 2004).

Além da melhora do comportamento tribológico, a texturização superficial é utilizada em outras aplicações, como modificações nas superfícies de rolos de laminação para melhorar o acabamento das chapas produzidas, redução do atrito estático em discos rígidos de gravação magnética, orientação de grãos abrasivos em ferramentas de corte, favorecimento da integração do tecido em próteses de articulações, melhoria da aparência estética dos produtos, controle das forças de arrasto em aplicações aerodinâmicas, aumento da transferência de calor e controle de tensões superficiais (Costa, 2005).

Diferentes tipos de texturas são produzidos para diversas aplicações, e os parâmetros de geometria do padrão utilizado, suas dimensões e sua distribuição ao longo da superfície produzem diferentes comportamentos tribológicos em relação a atrito e desgaste, podendo melhorar ou piorar seu comportamento de acordo com a configuração escolhida.

A texturização mais utilizada em aplicações tribológicas é a de bolsos circulares, como apresentada na Fig. (2), pois apresenta bom comportamento e não é tão complexa de ser obtida. Esta geometria garante melhoria no comportamento tribológico, e atua aprisionando partículas de desgaste em seus bolsos, eliminando-os da interface de contato, diminuindo o desgaste, e desempenha também a função de reservatório de lubrificante, sendo capaz de alimentar a interface de contato.

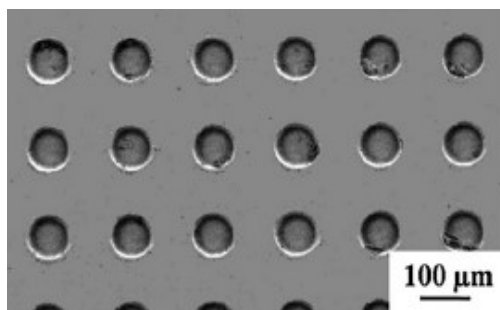


Figura 2: Superfície texturizada com bolsos circulares (Pfleging, 2015)

O comportamento tribológico das superfícies texturizadas está sendo bastante estudado atualmente do ponto de vista de comportamento de lubrificação, atrito e de desgaste (Costa, 2014, Etsion, 2005), mas ainda há poucos estudos sobre

os comportamentos dos campos de tensão e deformação desses sólidos, e como isto afeta o comportamento e a vida útil do componente.

#### 4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O Método de Elementos Finitos é uma técnica de análise numérica para obtenção de resultados aproximados a partir da solução de equações diferenciais. Para problemas em que as soluções analíticas são de alta complexidade, ou inviáveis, as soluções numéricas são amplamente utilizadas.

O MEF consiste na discretização do corpo em um conjunto finito de regiões interconectadas, denominadas elementos. Cada elemento é composto por um determinado número de pontos, denominados nós, e ao conjunto dos elementos utilizados dá-se o nome de malha. Uma vez definidos os elementos e seus respectivos nós, no interior de cada elemento são admitidas soluções aproximadas para as variáveis de campo, expressas como funções arbitrárias dos valores que as incógnitas assumem nos nós, e a qualidade da resposta está atrelada ao número de elementos e equações utilizadas.

Uma vantagem oferecida pelo método é o controle sobre os parâmetros de entrada, que podem ser variados facilmente, diferentemente de ensaios experimentais, mas como desvantagem há a dificuldade de obtenção de todas as propriedades necessárias e as imperfeições e descontinuidades do material não são consideradas.

##### 4.1. Validação do Modelo

O modelo foi gerado utilizando a texturização mais utilizada no mercado afim de torná-lo representativo em relação aos estudos já desenvolvidos acerca do tema. Foram realizadas simplificações na geometria para garantir um custo computacional não muito elevado, mas assegurando que nenhum dos parâmetros da geometria e resultado fossem prejudicados.

Para a validação e calibração do modelo, serão realizados ensaios de indentação instrumentada. Os ensaios serão utilizados para calibrar o modelo, através da curva gerada de Carregamento *versus* Profundidade de indentação, uma vez que durante o experimento, o equipamento aplica uma carga no indentador, e no modelo numérico em Elementos Finitos utilizado, será aplicado o deslocamento no indentador, correspondente a respectiva carga utilizada.

O modelo utilizado será uma amostra de aço de baixo carbono ABNT 1020, texturizada com bolsos circulares de diâmetro de 300  $\mu\text{m}$  e profundidade de 30  $\mu\text{m}$ , sem aplicação prévia de revestimento, visto que o experimento será realizado no Laboratório de Tribologia e Materiais, da Universidade Federal de Uberlândia, onde não é possível realizar esse procedimento de revestimento. Os bolsos serão distribuídos ao longo da superfície com uma densidade de texturização de aproximadamente 25%, e para o ensaio de indentação será utilizado um indentador esférico rígido de 1,5 mm de diâmetro, como pode ser visto esquematizado no modelo numérico em Elementos Finitos na Fig. (3).

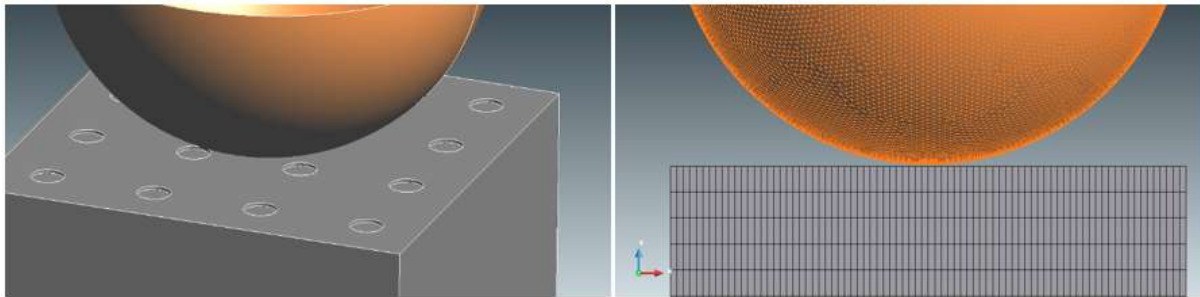


Figura 3: Modelo 3D da superfície texturizada e o indentador esférico

##### 4.2. Planejamento Experimental das Simulações Numéricas

A partir dos aspectos mais importantes levantados na literatura, para investigar o efeito da geometria da texturização superficial nos campos de tensão e deformação de um sólido revestido e texturizado, serão construídos modelos 3D em aço de baixo carbono ABNT 1020, com texturização superficial composta por bolsos circulares variando de 200 a 300  $\mu\text{m}$  de diâmetro, e profundidades variando entre 5 e 30  $\mu\text{m}$  e com densidade de área texturizada constante de 20 a 30%. Ainda no modelo, em algumas análises será utilizado um revestimento de nitreto de cromo (CrN), recoberto por uma camada de DLC. Desta maneira, será possível verificar a influência de cada parâmetro da geometria e do revestimento no comportamento mecânico da superfície texturizada.

Para construção do modelo, serão definidas as áreas de maior interesse a serem analisadas e modelos simplificados, que não alterem a validade dos resultados, para garantir um custo computacional otimizado, viabilizando a realização de um grande número de ensaios utilizando diferentes parâmetros.

Para garantir a realização de diferentes simulações com parâmetros variados, será feito um planejamento experimental variando as dimensões da geometria, para verificar a influência de cada parâmetro no comportamento da superfície.

## 5. CONCLUSÕES

Considerando os bons resultados obtidos experimentalmente em testes realizados com amostras texturizadas (Braun et. al, 2014, Ding et. al, 2010), espera-se que a mudança da distribuição dos campos de tensões e deformações não seja prejudicial ao componente, inviabilizando sua utilização, mesmo considerando um contato mais severo, sem lubrificação.

Espera-se, ao decorrer do desenvolvimento do trabalho, que a texturização superficial possa ser melhor compreendida em aspectos como vantagens, limitações e parâmetros geométricos, e que o conhecimento sobre como ela influencia nas distribuições de tensão e deformação possa auxiliar no aprimoramento da utilização deste recurso.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica e a CAPES pelo suporte financeiro.

## 7. REFERÊNCIAS

- Braun, D.; Greiner, C.; Schneider, J.; Gumbsch, P. “Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication”. Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2014.
- Costa, H. L. “Modification of Surface Topography: Manufacturing Methods and Applications”. PhD Thesis. University of Cambridge, 2005.
- Costa, H. L., Hutchings, I. M. “Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes”. Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Tribology, 2014.
- Ding, Q.; Wang, L.; Wang, Y.; Wang, S. C.; Hu L.; Xue Q. “Improved Tribological Behavior of DLC Films Under Water Lubrication by Surface Texturing”. Tribol Lett, Springer, 2010.
- Djabella, H.; Arnell R. D. “Finite element comparative study of elastic stresses in single, double layer and multilayered coated systems”. Thin Solid Films, Manchester, 1993.
- Etsion, I. “State of the Art in Laser Surface Texturing”. Dept. of Mechanical Engineering, Technion, Haifa, Israel, 2005.
- Felice Neto, F. R. “Simulação de microindentação de material multicamada pelo método dos elementos finitos”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- Gong, Z.-Q., Komvopoulos, K., “Effect of Surface Patterning on Contact Deformation of Elastic-Plastic Layered Media”. Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2003.
- Gong, Z.-Q., Komvopoulos, K. “Mechanical and Thermomechanical Elastic-Plastic Contact Analysis of Layered Media with Patterned Surfaces. Department of Mechanical Engineering”. University of California, Berkeley, 2004.
- Holmberg, K.; Matthews, A., “Coatings Tribology – Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering”. Elsevier tribology series, 2nd edition, Amsterdam, 2009.
- Lara, L. O. C., de Mello, J. D. B. “Influence of layer thickness on hardness and scratch resistance of Si-DLC/CrN coatings”. Tribology (Leeds. Print), 2012.
- Pfleging, W.; Kumari, R.; Besser, H.; Scharnweber, T.; Majumdar, J. D. “Laser surface textured titanium alloy (Ti-6Al-4V) – Part I – Surface characterization”. Applied Surface Science, Elsevier, 2015.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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