

INTRODUÇÃO

GENERALIDADES

Há um crescente interesse no uso de materiais com revestimentos em componentes mecânicos em diversas áreas que vão desde ferramentas na produção industrial, passando por componentes na indústria computacional e instrumentos de precisão, até a reposição de órgãos humanos. Novas técnicas de revestimento, desenvolvidas nas últimas três décadas, possibilitam uma vasta gama de superfícies revestidas com diferentes tipos de materiais, particularmente por deposição química de vapor (CVD) e por deposição física de vapor (PVD). Essas técnicas permitem uma deposição de material com um bom controle dos parâmetros relativos ao revestimento, tais como espessura de camada e rugosidade, em uma faixa de temperatura que pode ir de 1000 graus Celsius até a temperatura ambiente.

O objetivo de se revestir uma superfície de contato com um material duro, como as cerâmicas, é o de minimizar a probabilidade de ocorrência de escoamento plástico no substrato dúctil. Tem-se alcançado com frequência esse objetivo, por exemplo, em eixos cerâmicos, utilizados em altas temperaturas ou ferramentas de corte cerâmicas. Entretanto, as altas durezas desses materiais são obtidas ao custo de uma baixa resistência à fratura. Isso faz com que a fratura se torne o mecanismo de falha dominante em várias situações práticas (OLIVEIRA, 1996).

O estado de tensão próximo à região de contato é predominantemente compressivo. Por esse motivo, a fratura se inicia em regiões de tensões trativas um pouco mais distantes da região do contato. Isso pode ser resolvido aplicando-se um revestimento duro sobre um substrato dúctil, minimizando as chances de ocorrer escoamento plástico no contato e, simultaneamente, possibilitando ao componente suportar tensões trativas em regiões mais distantes da região de contato.

Alguns materiais, como nitreto de titânio (TiN), carbetto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3), além de suas combinações em multicamadas, têm sido utilizados com grande sucesso como revestimentos, tendo, inclusive, reduzido o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste em uma ou duas ordens de grandezas de acordo com Holmberg et al. (2002).

Parâmetros relacionados à macrogeometria do contato e da topografia já se encontram bem definidos em vários trabalhos, mas não aqueles que descrevem a fricção e o desgaste superficial no contato entre superfícies revestidas. Isso também reforça a necessidade de maiores investigações sobre esses aspectos do problema de contato. Neste trabalho, é feito um estudo da influência do atrito no campo de tensões de contato. Entretanto, a interface do revestimento, aqui, será considerada perfeita, ou seja, sem descontinuidades de qualquer natureza.

Importa ressaltar, ainda, alguns estudos feitos com a finalidade de encontrar um método útil para mensurar a resistência à fratura ou para determinar o campo de tensões em materiais revestidos, importantes na determinação dos prováveis mecanismos de falha. Oliveira e Bower (1996) publicaram uma análise de fratura e de laminação em revestimentos finos elásticos em um semiplano infinito e rígido, sujeito a um contato deslizante e pressionado por um indentador cilíndrico elástico.

Holmberg et al. (2002) desenvolveram um modelo tridimensional em elementos finitos para calcular a distribuição da primeira tensão principal em uma superfície de aço revestida com TiN, sob a ação de um riscador composto de uma esfera de diamante em movimento, com carga crescente.

Matzbender e de With (1999, 2000 a, b, c) realizaram uma excelente análise do campo de tensões de contato, das tensões residuais e ainda determinaram a resistência à fratura do sistema formado pelo contato entre um indentador de diamante deslizando sobre uma superfície de vidro com revestimento sol-gel.

Um estudo da utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) na determinação de campos de tensões em corpos revestidos tendo como indentador uma esfera rígida sujeita a uma carga normal pode ser encontrado em Medeiros (1996).

Apesar de não ser do escopo deste trabalho o estudo quantitativo dos parâmetros pertinentes à mecânica da fratura, há um interesse na investigação dos prováveis micromecanismos de falha e das principais regiões onde esses mecanismos poderão ocorrer. Nesta dissertação, os resultados são obtidos por simulações

implementadas através do Método dos Elementos Finitos e são analisados, principalmente, com respeito à primeira tensão principal (σ_1) e à tensão equivalente de von Mises (σ_{eqv}). Esses parâmetros são geralmente utilizados nos estudos desta área para caracterizar deformação e eventos de falha. A tensão equivalente de von Mises (σ_{eqv}) foi utilizada por ser comumente empregada na compreensão de fenômenos como o da plasticidade dos metais, sendo, portanto, aplicável ao corpo homogêneo em aço e ao bronze como revestimento. E a primeira tensão principal (σ_1) foi utilizada por estar associada aos mecanismos de falha dos materiais frágeis – como o SiC.

O objeto de estudo deste trabalho é composto de um plano revestido sujeito a um carregamento normal e a um tangencial, aplicados ambos a um indentador cilíndrico. O material do substrato, assim como o do indentador, é sempre o mesmo em todas as simulações feitas, isto é, o aço. Essa opção de material para o substrato se deve ao fato de que, em muitas situações práticas, tem-se como objetivo a associação das características de tenacidade do aço de que é composto um eixo, por exemplo, e da resistência ao desgaste de sua superfície endurecida por um processo mecânico, químico ou metalúrgico qualquer. Outro exemplo prático em que se insere esse problema é o de uma roda cilíndrica de uma locomotiva em contato com um trilho plano com uma superfície endurecida pelas inúmeras deformações plásticas após vários ciclos de vida útil. Ou, ainda, um rolo cilíndrico comprimido por forças no plano diametral, como em um rolamento.

Também se investigará aqui, através do Método dos Elementos Finitos, a influência do coeficiente de atrito no campo de tensões de contato entre o cilindro e o plano revestido, mantendo-se constante os demais parâmetros do modelo proposto. A Lei de Fricção de Coulomb foi adotada entre a superfície do plano revestido e o cilindro. As propriedades mecânicas dos materiais são de vital importância na performance tribológica. Em virtude disso, no presente estudo, os diferentes níveis de tensões desenvolvidas no contato entre um cilindro elástico como indentador de um plano revestido serão calculados para dois diferentes tipos de revestimento, quais sejam: carbetto de silício (SiC), bronze e também o plano homogêneo em aço.

A validação se faz, em uma primeira etapa, por meio da confrontação dos resultados obtidos nas simulações para um modelo de menor complexidade com os obtidos em uma indentação hertziana sem atrito, sem revestimento no plano e sem a aplicação da força tangencial no indentador cilíndrico. Em uma segunda etapa, uma vez validado o modelo supradescrito, considera-se a presença de atrito entre o penetrador e um substrato em aço revestido do mesmo material, com o objetivo de avaliar se o campo de tensões equivaleria ao de um corpo homogêneo do mesmo material. A solução analítica deste problema de contato de um cilindro e um plano revestido sujeito a carregamentos normal e tangencial obtida por

Oliveira e Bower (1996) foi utilizada na terceira das três etapas empregadas na validação do modelo aqui adotado, utilizando-se do código gentilmente cedido pelos autores.

Pôde-se perceber algumas pequenas divergências nos resultados de um e outro método devido, basicamente, a hipóteses simplificadoras no modelo físico e a diferenças em algumas condições de contorno que se tornam naturalmente divergentes uma vez que o método numérico simula uma situação de indentação que se aproxima da real. Um exemplo disso ocorre na forma de aplicação dos carregamentos normal e tangencial. No método analítico, admite-se uma distribuição de pressão, segundo Hertz, diretamente aplicada sobre o plano revestido, enquanto o método numérico utiliza três passos de aplicação de carga no topo do indentador cilíndrico (ver detalhes na Seção 4.3, no Capítulo 4, na etapa de solução do MEF).

Resultados obtidos em interferometria laser para impressões de dureza Vickers em Pintaúde (2002) foram gentilmente cedidos pelo autor para uma análise do fenômeno da formação de bordas decorrente da existência de tensões trativas em uma indentação com apenas um carregamento normal.

Pôde-se constatar, no estudo da influência da espessura de camada de revestimento, que, para o revestimento em SiC, há um valor ótimo para esse parâmetro. A metodologia para fazer esse estudo foi composta de simulações para sete valores diferentes de espessuras de camadas, mantendo o mesmo coeficiente de atrito.

O estudo da influência do atrito no campo de tensões também foi feito utilizando sete valores diferentes para a força tangencial, impondo uma espessura de revestimento constante para tal. O atrito entre as superfícies de contato foi simulado de tal sorte que não houvesse movimento relativo entre as superfícies, a não ser microdeslizamentos. Sendo assim, a análise se deu para um atrito estático, na iminência de haver um movimento relativo entre os corpos.

A análise dos prováveis mecanismos de falha, bem como das localizações de suas ocorrências, foi feita, como já mencionado, mediante o cálculo da primeira tensão principal e da tensão equivalente de von Mises nas principais regiões de interesse, tais como: a interface entre revestimento e plano, a superfície de contato entre cilindro e revestimento e ao longo do eixo de aplicação da carga normal. Foram observados também os contornos desses parâmetros no plano do sólido revestido.

Além deste capítulo, este trabalho apresenta outros seis capítulos, que abordam os seguintes temas:

O Capítulo 2 trata dos fundamentos teóricos referentes à Mecânica do Contato.

No Capítulo 3, os aspectos conceituais e teóricos do Método dos Elementos Finitos que sustentam este trabalho são abordados de forma sucinta.

O Capítulo 4 descreve detalhadamente a metodologia empregada na formulação do modelo de elementos finitos desta dissertação.

O Capítulo 5 dedica-se a apresentar os resultados das três etapas de validação do modelo adotadas, bem como de todos os resultados relativos aos objetivos previamente estipulados e suas respectivas discussões.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões mediante análise dos resultados obtidos para os objetivos estabelecidos a priori e traz as sugestões que poderiam contribuir com um eventual interesse na continuação deste trabalho.

Finalizando esta dissertação, o Capítulo 7 traz a relação das referências bibliográficas feitas neste trabalho, em ordem alfabética.

