

Estudo numérico do campo de tensões de contato em componentes revestidos

Écio N. Duarte e Sonia A. G. Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica - UFU
Sala FEMEC-CIMNE - Bloco 1M
Campus Sta. Mônica, Uberlândia, MG CEP: 38400-902, Brasil
Tel.: 55 34 3239 4149; Fax: 55 34 3239-4282
e-mail: enduarte@mecanica.com.br, sgoulart@mecanica.ufu.br

Resumen

A utilização de corpos revestidos sujeitos a tensões de contato tem sido uma opção importante na redução do desgaste superficial em uma vasta gama de corpos sujeitos a um carregamento de contato. Nestas situações, mecanismos de falha ocorrem, geralmente, por três diferentes motivos: Escoamento plástico excessivo, fratura ou delaminação do revestimento do seu substrato. Neste trabalho, procedeu-se uma análise bidimensional da distribuição das tensões de contato que surgem quando um semiplano revestido é submetido a carregamentos normal e tangencial aplicados por um indentedor elástico e cilíndrico. O cálculo das tensões foi feito utilizando-se o Método dos Elementos Finitos. Considerou-se uma interface idealmente perfeita e contínua entre o substrato e o revestimento. Três tipos de materiais foram usados como revestimentos: bronze, cerâmica (SiC) e aço. Este último, utilizado na validação do modelo proposto. Os resultados foram utilizados para se investigar a influência na posição dos máximos valores da tensão de Mises e da primeira tensão principal, quando se variam os parâmetros: i) espessura da camada de revestimento; ii) coeficiente de atrito; iii) propriedades mecânicas do material.

Os resultados mostram que a posição dos pontos críticos é influenciada pelos dois primeiros parâmetros analisados. Verificou-se um deslocamento da posição do ponto crítico da interface do revestimento em direção à superfície de contato, enquanto se aumentam ou o coeficiente de atrito ou a espessura de camada, mantendo-se os demais parâmetros constantes, nos revestimentos dúteis - bronze e aço. Para o revestimento frágil (SiC), observou-se que o ponto crítico ocorre sempre na superfície de contato e que há uma espessura ótima de revestimento.

Palavras-chave: *Mecânica do contato, tensões de contato, revestimentos, elementos finitos.*

NUMERICAL ANALYSIS OF STRESS FIELD IN A COATED BODIES UNDER CONTACT LOAD

Summary

To coat mechanical components, that will be subjected to contact load, has been a procedure aiming the reduction of the wearing in the substrate. However, these components could fail, generally by: excessive plastic flow, fracture, or delamination of the coat from its substrate. In this work, perfect interface between layer and substrate was considered. We have done a two-dimensional analysis, using finite element method, of the stress distribution arising when a plane coated body is subjected to a contact load by an elastic cylindrical indenter. We consider normal and tangential force. Both, substrate and indenter were made of steel. Three different types of material were used as a coating: brass, ceramic and steel. The last one was used for validation. The results are used to investigate the influence in the field stress from layer thickness, properties of the coating materials and the friction coefficient that acts between the indenter and coating. The results show that there is an optimum thickness when the substrate is coated with ceramic. In this case, the substrate is more protected by the layer.

Keywords: *Contact mechanics, finite element method, coatings, indentation, tribology.*

INTRODUÇÃO

O emprego cada vez mais crescente de revestimentos em componentes mecânicos com o objetivo de melhorar suas performances aumentou ainda mais o interesse no estudo deste tipo de problema. Algumas técnicas de revestimento desenvolvidas nos últimos vinte anos, como as de deposições química e física de vapor (CVD e PVD), por permitirem um melhor controle de parâmetros como espessura de camada e coeficiente de atrito, trouxeram uma contribuição jamais vista neste tipo de aplicação, podendo ser útil na indústria de componentes em informática e até mesmo na reposição de órgãos humanos, Holmberg *et al.* (2002)².

Alguns estudos se fizeram no sentido de se encontrar um método mais adequado para se estudar este problema. Oliveira (1996)⁵, realizou um estudo acerca da mecânica da fratura, delaminação da camada de revestimento e do campo de tensões em um plano revestido, indentado por um cilindro rígido. Matzbender e de With (1999, 2000a)^{3/4} desenvolveram uma análise sobre indentação e tensões residuais, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Duarte, E. N. (2003)¹, também utilizando o MEF, fez um estudo do campo de tensões resultantes de uma indentação feita por um cilindro elástico em um plano revestido.

Neste trabalho, uma abordagem numérica deste tipo de problema de contato se fez através do MEF, objetivando-se a investigação da influência na posição de ocorrência dos máximos valores da tensão equivalente de Mises e da primeira tensão principal, quando se variam a espessura da camada de revestimento e o coeficiente de atrito entre o revestimento e o indentador.

Também foi investigada a influência das propriedades mecânicas dos materiais no campo de tensões de contato. Adotou-se a lei de atrito de Coulomb entre o revestimento e o substrato. Considerou-se uma interface perfeita entre o revestimento e o substrato, isto é, sem descontinuidades. Os resultados obtidos pelo modelo em EF foram validados pelo modelo analítico de Oliveira (1996)⁵.

A solução analítico-numérica para o problema em estudo, conforme Figura 1, foi obtida por Oliveira e Bower (1996)⁵. Nesta solução, com o objetivo de facilitar a análise, algumas hipóteses simplificadoras são adotadas na construção do modelo proposto. Uma delas é a de assumir que a distribuição de pressão, $p(x)$, não é afetada pelos esforços tangenciais que atuam entre o cilindro e o plano semi-infinito, composto por revestimento e substrato. O primeiro passo no sentido de se resolver o problema de contato, então, é calcular os deslocamentos e o campo de tensões no semi-espaço revestido, devidos aos esforços normais $p(x)$ e tangenciais $q(x)$, atuando na sua superfície. Este problema específico foi resolvido por Gupta *et al.*(1973).

Os deslocamentos e o campo de tensões devem satisfazer às seguintes condições de contorno, em $y=0$ e para $-a < x < a$:

$$\begin{aligned} u_y(x) &= \Delta - x^2/2R, \\ \sigma_y(x) &< 0, \tau_{xy}(x) = \mu \cdot \sigma_y(x), \end{aligned} \quad (1)$$

e para $-a > x > a$:

$$\begin{aligned} u_y(x) &< \Delta - x^2/2R \\ \tau_{xy}(x) &= \sigma_y(x) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

, onde Δ é a profundidade de penetração do indentador no semi-plano infinito.

Os resultados, então, para as condições de contorno acima, são expressos em termos de uma função de tensão de Airy, a qual deve satisfazer à equação bi harmônica a seguir:

$$\nabla^4 \psi = 0 \quad (3)$$

Disto resultam as seguintes equações:

$$\sigma_{11} = \psi_{,22} \qquad \sigma_{22} = \psi_{,11} \qquad \sigma_{22} = \psi_{,12} \qquad (4)$$

Considerando-se ainda as condições de que, tanto os deslocamentos (u_x , u_y) quanto às tensões devem ser contínuos na interface do revestimento e substrato, em $y = h$, isto, então, conduz a um sistema de seis equações, em termos da transformada de Fourier da distribuição de tensão na superfície de contato. Uma vez resolvida a transformada de Fourier, o campo de tensões é obtido das equações (2).

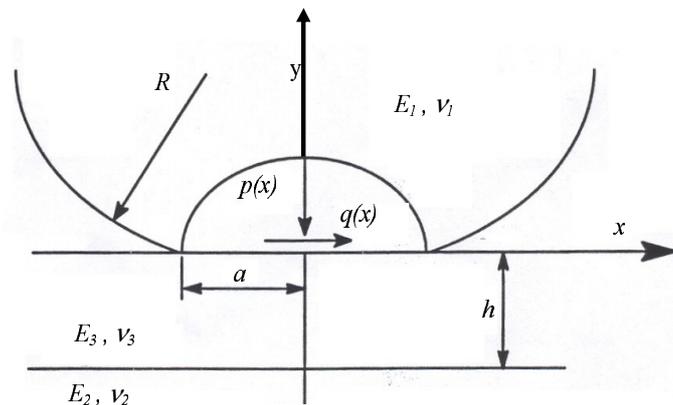


Figura 1. Representação esquemática do semiplano revestido sujeito a um carregamento de contato aplicado por um indetador cilíndrico elástico

O MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

A Figura 1 mostra um desenho esquemático deste problema de contato, onde se define também o sistema de coordenadas. E_i e ν_i são as constantes elásticas de cada material. Os índices na figura indicam: **1** para o indetador, **2** para o substrato e **3** para o revestimento. R é o raio do indetador cilíndrico, h é a espessura do revestimento e a , a semilargura de contato entre o cilindro e o sólido. $p(x)$ e $q(x)$ são, respectivamente, as distribuições dos carregamentos normal e tangencial, atuantes na região do contato.

Um modelo bidimensional em elementos finitos foi utilizado para se calcular a primeira tensão principal que pode estar associada com o mecanismo de fratura frágil, além da tensão equivalente de Mises, usualmente um parâmetro utilizado para se avaliar a posição inicial de deformação plástica. Após uma análise cuidadosa da densidade de malha adequada para a região do contato e suas proximidades, o modelo foi discretizado utilizando-se uma malha estruturada em elementos finitos. Nesta região de maior densidade de elementos, o tamanho dos menores elementos é da ordem de 1/16 vezes a espessura do revestimento.

A Figura 2 mostra em detalhes a malha desta região. PLANE 42 foi utilizado como elemento estrutural. CONTA 172 e TARGE 169 foram utilizados como o par de contatos do ANSYS® em sua versão 6.0. A área do modelo em elementos finitos delimitada para se descrever a configuração do plano foi de 15x25 mm.

Na simulação das condições de contato, alguns parâmetros foram utilizados para se calcular a distribuição de tensões. Uma vez assumido o comportamento elástico em todo o modelo, três passos de carga consecutivos foram adotados na fase de solução do problema. No primeiro deles, aplicou-se um pequeno deslocamento, da ordem de 0,0005 mm, com o objetivo de se garantir o contato dos corpos, evitando-se o deslocamento de corpo rígido,

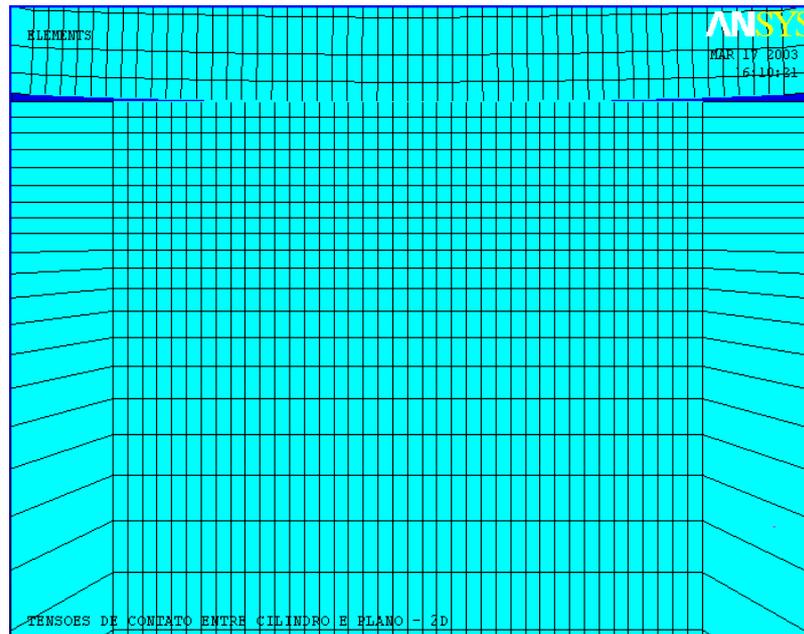


Figura 2. Densidade de malha mais adequada à região de contato

durante esta fase inicial da análise. Fez-se então o cálculo e foram salvos os resultados. No segundo passo de carga, após ser retirado o pequeno deslocamento no eixo y e implementado no passo anterior, uma carga normal de 100 N foi aplicada no ponto mais superior do indentedor cilíndrico. Novamente, os cálculos foram feitos e salvos. No terceiro passo, uma força tangencial foi aplicada no mesmo ponto, os cálculos foram feitos e novamente salvos.

PARÂMETROS UTILIZADOS

A análise se fez através dos cálculos para sete diferentes valores da força tangencial para que se obtivesse uma simulação da mudança no coeficiente de atrito, quais sejam: zero, 5 N, 10 N, 20 N, 30 N, 40 N e 50 N. Objetivando-se evitar o rolamento do indentedor após a aplicação da força tangencial, um coeficiente de atrito de 0,6 foi simulado nas superfícies de contato do indentedor e do plano revestido. Adotou-se um raio de 5 mm para o cilindro indentedor, em aço, sendo três os diferentes tipos de revestimentos: Carbetto de Silício (SiC), Bronze e Aço, tendo sido este último utilizado para melhor analisar a influência dos revestimentos, além de ter sido empregado em um dos procedimentos de validação do modelo.

Mantida constante a força tangencial e, por conseguinte, o coeficiente de atrito, a fim de se estudar a influência da espessura da camada de revestimento, resolveu-se o problema para sete diferentes espessuras de revestimento: 0,032, 0,064, 0,096, 0,128, 0,160, 0,192 e 0,224 mm. A Tabela I traz as propriedades mecânicas assumidas para os materiais utilizados.

Material	Razão de Poisson (ν)	Módulo de Young (E)
Aço	0,3	210 GPa
SiC	0,2	450 GPa
Bronze	0,35	111 GPa

Tabela I. Propriedades mecânicas dos materiais utilizados

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Influência da Espessura de Camada do Revestimento no Campo de Tensões

A Tendência de Fratura no Revestimento Cerâmico – SiC

A determinação da região do sólido que está sujeita à máxima tensão trativa, (σ_1), é fundamental na obtenção das condições necessárias para o início de uma fratura frágil no revestimento ou no substrato. Esta região pode ocorrer, basicamente, em três posições: i) na superfície do revestimento, imediatamente abaixo do indentador, dentro da região do contato; ii) na superfície do revestimento, porém, cerca de duas vezes a espessura do revestimento antes ou após o contato; iii) na interface revestimento/substrato, na linha central da pressão de contato. Em todos os casos, a tensão trativa no substrato em aço é negligenciada. Isto sugere que será mais comum que uma fratura se inicie através de uma trinca na superfície do contato ou de uma trinca exatamente sobre a interface revestimento/substrato (ver Tabela II).

h/a	σ_{1max}/Po
0,444	0,4580
0,889	0,3553
1,391	0,3035
1,855	0,3264
2,424	0,3620
2,909	0,3823
3,394	0,4000

Tabela II. Máximos valores da **primeira tensão principal**, (σ_1). Material: **SiC**, para $\mu = 0,2$

Os resultados obtidos pelo MEF indicam que, para um coeficiente de atrito de 0,2, e um revestimento cerâmico (SiC), os valores máximos para a primeira tensão principal, (σ_1), ocorreram sempre na superfície de contato. Independente do valor da espessura de revestimento utilizada, dentro do espectro infracitado de valores estudados neste trabalho.

A tendência de deformação plástica no bronze

Os valores máximos da tensão equivalente de Mises, obtidos pelo MEF, para h/a de 0,37 e 0,74 ocorreram na interface do revestimento. Para os cinco outros valores de revestimento figurados na Tabela III, a região de ocorrência da máxima tensão de Mises foi sempre no interior do revestimento.

h/a	$(\sigma_{eqv})_{max}/Po$
0,37	0,56020
0,74	0,53464
1,07	0,50866
1,42	0,50977
1,78	0,50796
2,13	0,50446
2,49	0,50086

Tabela III. Máximos valores da **tensão de Mises**, (σ_{eqv}). Material : **Bronze**, para $\mu = 0,2$

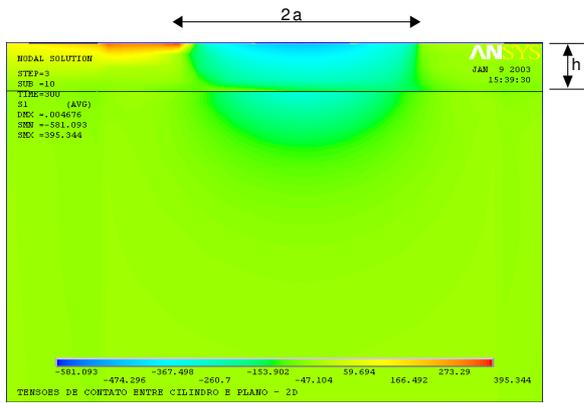


Figura 3. Contorno de σ para o SiC como revestimento, com $h=0,032$ mm e $\mu=0,2$

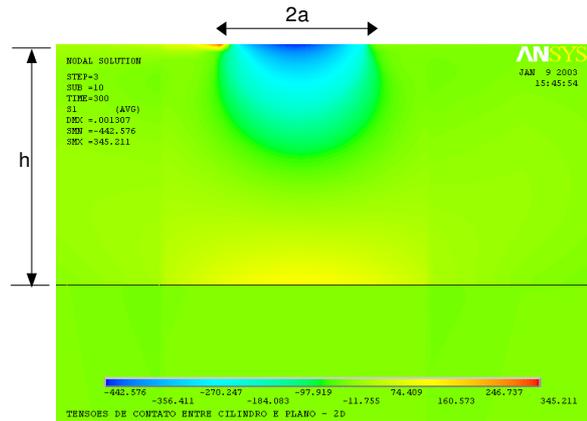


Figura 4. Contorno de σ para o SiC como revestimento, com $h=0,224$ mm e $\mu=0,2$

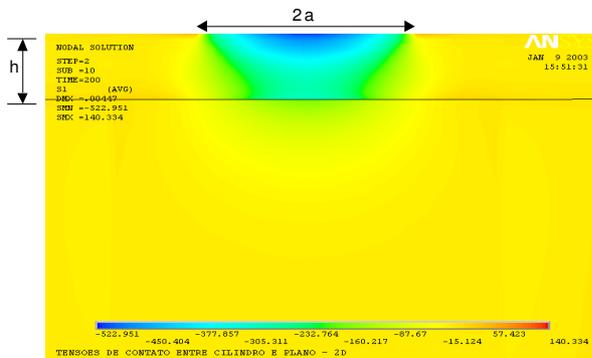


Figura 5. Contorno de σ para o SiC como revestimento, com $\mu=0,0$ e $h=0,064$ mm

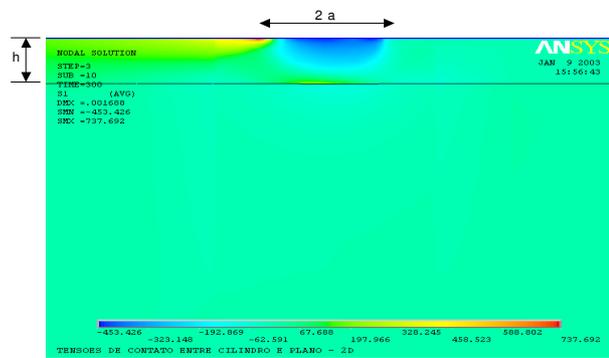


Figura 6. Contorno de σ para o SiC como revestimento, com $\mu=0,50$ e $h=0,064$ mm

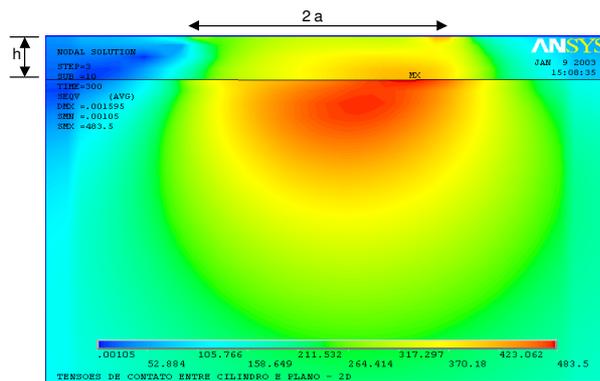


Figura 7. Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $h=0,032$ mm e $\mu=0,2$

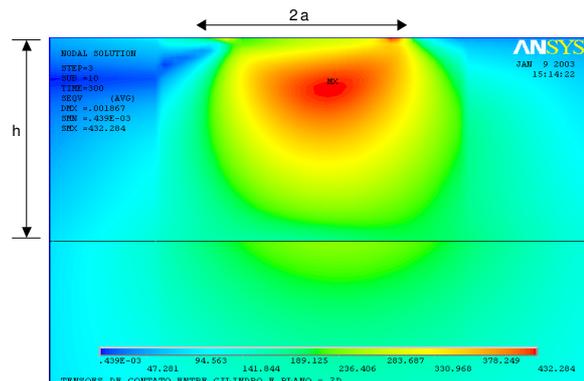


Figura 8. Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $h=0,224$ mm e $\mu=0,2$

Os contornos das Figuras 3 a 8 estão dispostos de forma a permitirem uma ilustração dos resultados do modelo como um todo para alguns casos. O objetivo é possibilitar uma análise da primeira tensão principal (σ_1) para o revestimento cerâmico, SiC, e da tensão equivalente de Mises (σ_{eqv}) para o revestimento em bronze. Para σ_1 , são mostrados os resultados em contornos para os casos da maior e menor espessuras e para o maior e menor atritos. Já a tensão equivalente de Mises, somente ilustram-se os resultados dos contornos para a maior e menor espessuras de revestimentos, tendo-se um valor de coeficiente de atrito constante e igual a 0,2.

Máximos valores da tensão de Mises e da primeira tensão principal

Uma análise dos resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) será feita agora, plotando-se os valores das tensões σ_{eqv} e σ_1 máximas “versus” (h/a), respectivamente nas Figuras 9 e 10, mantendo-se μ constante e igual a 0,2. O objetivo é o de se avaliar como foram afetados cada um destes parâmetros ao se variar a espessura de revestimento, para cada um dos materiais do revestimento.

Como se vê na Figura 9, não há influência da espessura do revestimento de aço no valor da tensão equivalente, para o substrato do mesmo material, como seria de se esperar para o material homogêneo em aço. Isto não ocorre para os outros dois revestimentos. No caso do revestimento em bronze, torna-se evidente que, para um valor de (h/a) inferior a 1,39, σ_{eqv} é praticamente constante, em torno de 0,52. Revestimentos com espessuras acima deste valor acarretarão maiores valores da tensão equivalente de Mises. Isto é indesejável, uma vez que será este o parâmetro preponderante na avaliação de um eventual desencadeamento do mecanismo de falha dos revestimentos metálicos, como o bronze.

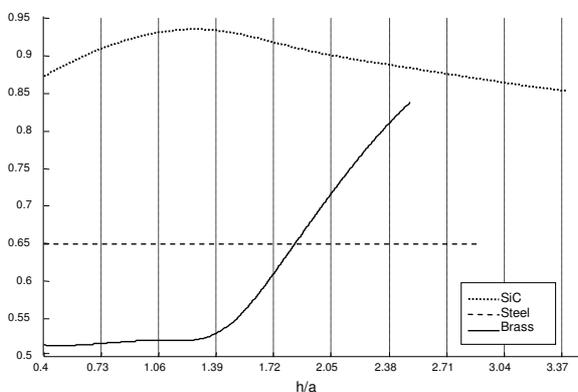


Figura 9. Máximos valores de Mises versus espessura de revestimento, para $\mu = 0.2$

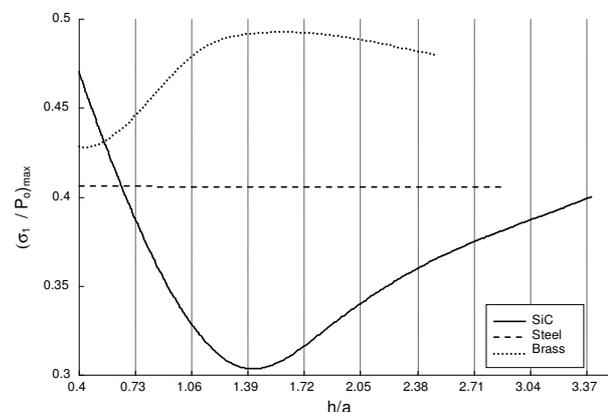


Figura 10. Máximos valores de Mises versus espessura de revestimento, para $\mu = 0.2$

Também é possível observar na Figura 10 que, no caso do revestimento em cerâmica, a primeira tensão principal é mínima para (h/a) igual a 1,39. Sendo σ_1 o parâmetro mais importante na avaliação do mecanismo de falha dos materiais frágeis, como a cerâmica, este resultado conduz a uma constatação importante: a de que há uma espessura ótima de revestimento nestas circunstâncias, onde um valor inferior ou maior a este não implementará uma proteção adequada ao substrato.

Influência do coeficiente de atrito no campo de tensões

A tendência de fratura no revestimento cerâmico – SiC

Na Tabela IV, constam as regiões de ocorrências dos valores máximos obtidos pelo MEF para a primeira tensão principal, (σ_1), com seus respectivos valores adimensionalizados em relação à máxima pressão P , para cada caso estudado, em função da variação do coeficiente de atrito. Para todos os valores do coeficiente de atrito listados na Tabela IV, a região de ocorrência dos valores máximos da **primeira tensão principal**, (σ_1), foi sempre na superfície de contato. As Figuras 5 e 6 ilustram estes resultados para o maior e menor atrito.

μ	(σ_{1max}/Po)
0,00	0,22285
0,05	0,22292
0,10	0,22325
0,20	0,35531
0,30	0,54033
0,40	0,70272
0,50	0,85472

Tabela IV. Máximos valores de (σ_1) em função do atrito. Material: **SiC**, para $h = 0,064$ mm.

A tendência de deformação plástica no bronze e no aço

As Tabelas V e VI trazem os valores máximos obtidos pelo MEF da **tensão equivalente de Mises** para o bronze, que podem ser visualizados nos contornos das Figuras 7 e 8, para o maior e menor atrito. Mas, em virtude de não haver discrepâncias significativas nos resultados dos parâmetros importantes no processo de deflagração dos mecanismos de falha quando se varia a espessura do revestimento em aço para um substrato do mesmo material (**material homogêneo em aço**), somente constam na Tabela VI os resultados referentes ao estudo da influência da variação do coeficiente de atrito. Para os valores da Tabela V, a região de ocorrência da máxima tensão de Mises ficou na interface do revestimento para os quatro menores valores de atrito investigados. Para os três maiores coeficientes de atrito, entretanto, esta região deslocou-se para a superfície de contato.

μ	$(\sigma_{eqv})_{max} / Po$
0,00	0,51587
0,05	0,51741
0,10	0,52115
0,20	0,53464
0,30	0,63036
0,40	0,74155
0,50	0,83516

Tabela V. Máximos valores da **tensão de Mises**, (σ_{eqv}). Material: **Bronze**, para $h=0,064$ mm.

Vale ressaltar o nítido deslocamento do local de ocorrência da máxima tensão de Mises para s valores da Tabela VI da seguinte maneira: Para o atrito zero ocorre na interface do revestimento; para os valores de atrito de 0,05 e 0,10, ocorre no centro do revestimento e para os quatro maiores valores de atrito, já se encontra na superfície de contato. Isto evidencia uma inequívoca dependência da tensão equivalente de Mises com relação ao coeficiente atrito, como seria de se esperar.

μ	$(\sigma_{eqv}max / P_0)$
0,00	0,55948
0,05	0,56011
0,10	0,56327
0,20	0,64739
0,30	0,80177
0,40	0,94344
0,50	1,05711

Tabela VI. Máximos valores da **tensão de Mises**, (σ_{eqv}). Material: **Aço**, para $h=0,064\text{mm}$.

Máximos valores da tensão de Mises e da primeira tensão principal

As Figuras 11 e 12 mostram, respectivamente, a variação dos máximos valores da primeira tensão principal, (σ_1), e da tensão equivalente de Mises, (σ_{eqv}), em relação ao coeficiente de atrito, (μ). Em todos os casos, manteve-se um valor constante de espessura de revestimento, h/a , para cada material, que são: $h/a = 0,8889$ para o SiC, $h/a = 0,7420$ para o bronze e $h/a = 0,8127$ para o aço.

Incrementos consideráveis na tensão equivalente de Mises se dão após valores de 0,15 ou 0,20 para o coeficiente de atrito, indicando que, para valores de força tangencial inferiores a 15 por cento da força normal, a tensão equivalente não sofre influências relevantes.

Relativamente à primeira tensão principal, parâmetro aqui adotado como o mais importante na análise dos prováveis mecanismos de falha do revestimento frágil, é possível verificar na Figura 11 que valores do coeficiente de atrito inferiores a 0,1 não possuem influência tamanha que seja relevante no acréscimo desse parâmetro. Isto indica que, somente após a força tangencial atingir cerca de 10 por cento da força normal, é que se pode esperar incrementos consideráveis na primeira tensão principal, para o revestimento frágil.

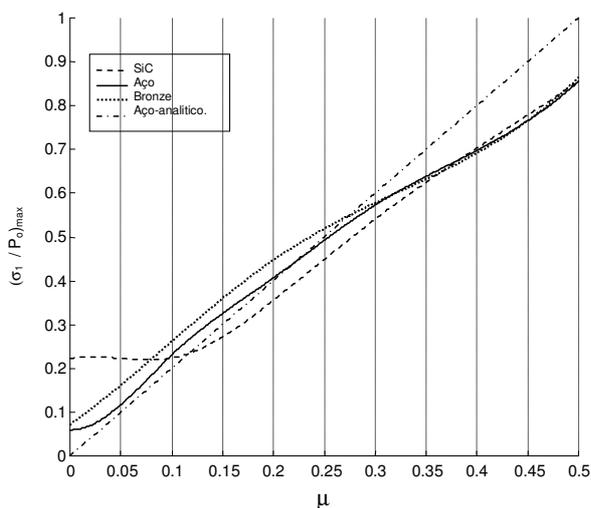


Figura 11. Variação dos máximos valores da primeira tensão principal, σ_1 , com μ , para h/a constante

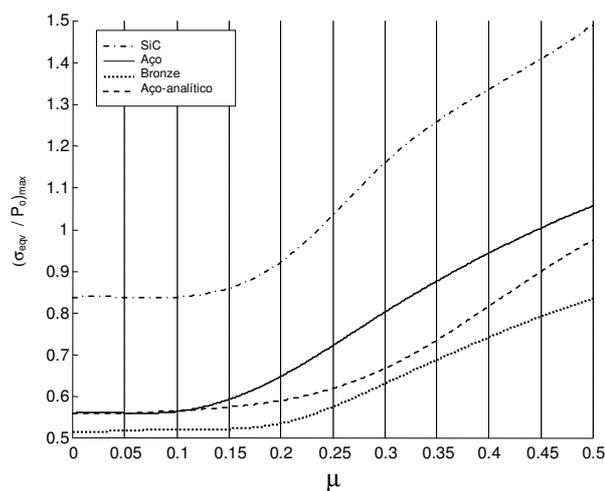


Figura 12. Variação dos máximos valores da tensão de Mises com μ , para h/a constante

Para uma espessura de revestimento constante e igual a 0,064 mm e valores do coeficiente de atrito entre 0,15 e 0,5, os máximos valores da primeira tensão principal dos revestimentos dúteis aumentam quase linearmente com o coeficiente de atrito, conforme Figura 11. Na Figura 12 pode-se observar que somente para valores superiores a 0,15 para o coeficiente de atrito, a tensão equivalente de Mises começa a aumentar. Assim, quando os valores do coeficiente de atrito são inferiores a 0,15, há uma pequena influência da força tangencial sobre σ_{eqv} , para todos os tipos diferentes de revestimentos, com $h/a = 0,8889$ para o SiC e 0,7420 para o bronze.

Entretanto, pode-se constatar o deslocamento do picos em σ_{eqv} em direção ao interior da camada, ao se aumentar tais espessuras de revestimentos e mantendo-se constante o valor do coeficiente de atrito em 0,2. Este comportamento corrobora a tese de que há uma dependência da tensão equivalente de Mises com relação à espessura do revestimento nas condições estudadas. Infere-se também daí, que o substrato poderá ser melhor protegido se uma espessura de revestimento for adequadamente estipulada.

Influência das propriedades mecânicas no campo de tensões

A distribuição de (σ_1) ao longo da superfície de contato é mostrada na Figura 13 a seguir. Estes resultados estão adimensionalizados em relação à máxima pressão P_0 e são para uma força normal de 100 N e uma força tangencial nula.

É realmente interessante que, nestas circunstâncias, havendo somente a aplicação de uma força de compressão sobre o indentador, ocorram tensões trativas na região exterior à região de contato. Esta ocorrência de σ_1 maior que zero, quando não há força tangencial, é mais destacada para o revestimento cerâmico e mais discreto para o aço e o bronze, o que demonstra uma dependência deste fenômeno em relação às propriedades mecânicas do material do revestimento.

Este comportamento já foi investigado e confirmado experimentalmente, em alguns casos e para certos materiais. Pintaúde,G.(2002)⁶ descreve este comportamento através de uma impressão de dureza Vickers convencional HV, por meio de imagens obtidas em interferometria laser (Figura 14), para uma profundidade máxima de penetração de 3 μm em aço AISI 52100 trefilado. Nestas imagens pode-se observar a formação de bordas (“piling-up”) devidas à atuação de tensões que tendem a tracionar o material no sentido oposto àquele da indentação. Esta observação empírica se faz principalmente para revestimentos cerâmicos, o que sugere que o referido fenômeno depende das propriedades dos materiais.

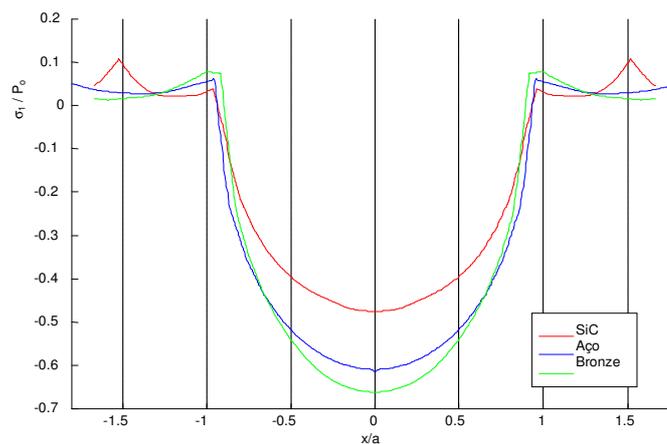


Figura 13. Primeira tensão principal (σ_1) ao longo da superfície de contato, utilizando o MEF

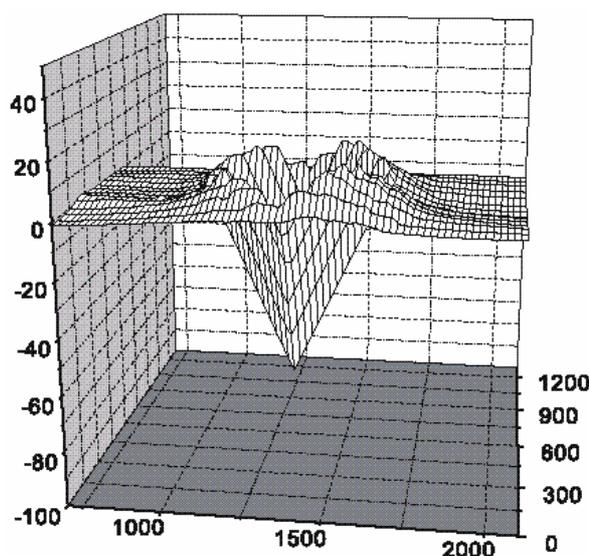


Figura 14. Piling-up, segundo Pintaúde, G. (2002)⁶. Obtida de uma impressão de dureza Vickers para aço AISI 52100

De acordo com Stelmashenko *et al.* (1993):

“... o campo de deslocamentos, segundo a direção em que há escoamento plástico de material para a formação das bordas em um ensaio de dureza, gera um armazenamento local de material, resultando em tensões compressivas elásticas que são compensadas por tensões de tração para fora deste campo”.

Esta afirmação aponta no sentido de se concluir que a ocorrência das tensões σ_1 positivas, encontradas neste trabalho, para esta mesma região, está coerente com os resultados experimentais obtidos pelos autores acima referenciados.

CONCLUSÕES

Um modelo em MEF foi desenvolvido para estudar o campo de tensões de contato o contato entre um cilindro e um plano revestido, tendo sido utilizado para simular diferentes condições. As tensões no modelo proposto foram observadas dentro da região de limite elástico.

A validação foi feita na região mais crítica do modelo e apresentou resultados razoáveis. Para este caso de validação, a maior discrepância dos resultados foi de 6%, em relação ao modelo analítico de Oliveira (1996)⁵.

No caso do revestimento cerâmico (SiC), seja para valores de h/a entre 0,444 e 3,394, seja para valores de μ entre 0,0 e 0,50, e nas condições adotadas, a posição de ocorrência do máximo valor da primeira tensão principal foi sempre na saída do contato entre o cilindro e o plano revestido.

No caso do revestimento em **bronze**, para valores de h/a situados entre 0,37 e 2,49, nas condições adotadas, os máximos valores da tensão equivalente de Mises ocorreram, para as duas menores espessuras de revestimento simuladas, no centro da interface do substrato e do revestimento, indicando que, para estas espessuras, não houve suficiente proteção do substrato pelo revestimento. Entretanto, para valores de espessuras simulados maiores que estes, os máximos ocorreram dentro da camada de revestimento.

Ainda em relação ao revestimento em **bronze**, quando o parâmetro de análise foi o coeficiente de atrito, os máximos valores da tensão equivalente de Mises ocorreram na saída

do contato, para os três maiores valores de μ simulados (0, 0,05 e 0,10). No entanto, para os outros quatro valores do coeficiente de atrito simulados (0,2, 0,3, 0,4 e 0,5), os máximos ocorreram no centro da interface do revestimento com o substrato, indicando má performance do material de revestimento, na proteção do revestimento, para estas situações.

Para o material homogêneo em **aço**, há um deslocamento do ponto de máxima tensão equivalente do ponto central da interface do revestimento (que ocorre para $\mu=0$) passando pelo centro do que seria o revestimento em aço de um substrato do mesmo material (que ocorre para $\mu=0,10$), até a saída do contato, (que ocorre para $\mu=0,20$, $\mu=0,30$, $\mu=0,40$ e $\mu=0,5$) entre o indentador e o plano revestido. Isto indica forte dependência entre a posição dos máximos valores da tensão equivalente de Mises e o coeficiente de atrito, o qual "puxa" o provável ponto onde ocorrerá o início de plastificação para a superfície de contato, à medida que se aumentam as forças tangenciais, isto é, o coeficiente de atrito, neste estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 E.N. Duarte, "Análise do campo de tensões de contato em um substrato plano revestido", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, (2003).
- 2 K. Holmberg, A. Laukkanen, H. Ronkainen, K. Wallin e S.Varjus, "Modelling Stresses and Fracture in Thin Coatings". 6th International Tribology Conference – AUSTRIB '02, Perth, Australia, (2002).
- 3 J. Malzbender e G. de With, "Sliding indentation, friction and fracture of a hybrid coating on glass", *Wear*, Vol. **236**, pp. 355-359, (1999).
- 4 J. Malzbender e G. de With, "Cracking and residual stress in hybrid coatings on float glass," *Thin Solid Films*, Vol. **359**, N° 2, pp. 210–214, (2000).
- 5 S.A.G. Oliveira e A.F. Bower, "Failure mechanisms in coated solids under contact loading", Ph.D. thesis, Brown University, (1996).
- 6 G. Pintaúde, "Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza", Escola politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, (2002).