

INFLUÊNCIA DO ATRITO E DA ESPESSURA DA CAMADA DE REVESTIMENTO EM COMPONENTES SUBMETIDOS A TENSÕES DE CONTATO

Duarte E. N.

Universidade Federal de Uberlândia

endumarte@mecanica.com.br

Oliveira S. A. G.

Universidade Federal de Uberlândia

sgoulart@mecanica.ufu.br

Resumo. *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 por 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 indentador 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 foi utilizado na validação do modelo proposto. Os resultados foram utilizados para se investigar a influência que há na posição de ocorrência dos máximos valores da tensão equivalente de von Mises e da primeira tensão principal (pontos críticos), sempre que se variam os seguintes parâmetros:*

i) a espessura da camada de revestimento; ii) o coeficiente de atrito entre o revestimento e o indentador. Os resultados obtidos mostram que a posição dos pontos críticos e conseqüentemente os mecanismos de falha são influenciados pelos dois parâmetros analisados. Verificou-se um deslocamento da posição do ponto crítico para a tensão de von Mises da interface do revestimento em direção à superfície de contato, à medida que se aumentam ou o coeficiente de atrito ou a espessura de camada, mantendo-se os demais parâmetros constantes, para os revestimentos dúteis, em bronze e aço. Para o revestimento frágil, observou-se que o ponto crítico ocorre sempre na superfície de contato.

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

1. 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).

Alguns estudos se fizeram no sentido de se encontrar um método mais adequado para se estudar este problema. Oliveira (1996), 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) desenvolveram uma análise sobre indentação e tensões residuais, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Duarte, E. N. (2003), 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 von 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. Os carregamentos normal e tangencial foram considerados e três tipos diferentes de revestimentos foram utilizados: Bronze, Carbetto de Silício (SiC) e aço. Este último, para a validação do modelo proposto. Considerou-se a lei do atrito de Coulomb entre a superfície de contato e o indentador cilíndrico. A interface do revestimento com o substrato foi assumida perfeita, isto é, sem descontinuidades.

2. 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 indentador, **2** para o substrato e **3** para o revestimento. R é o raio do indentador 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.

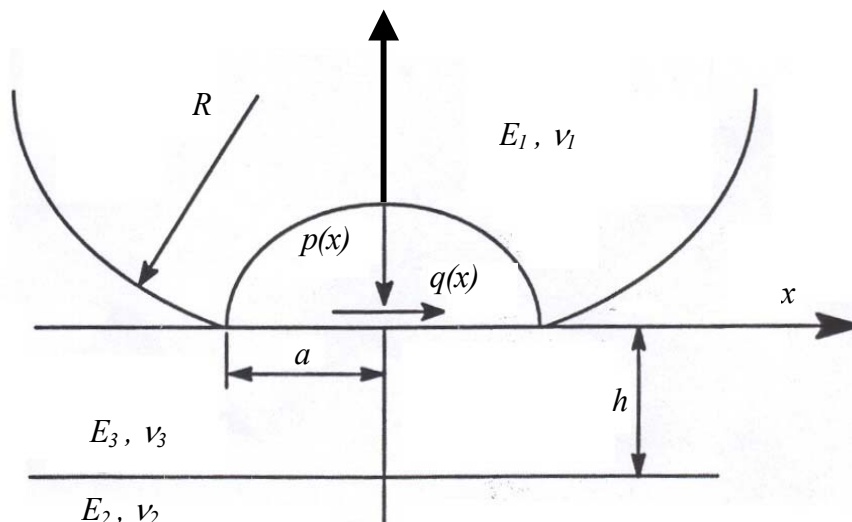


Figura 1: Representação esquemática do semiplano revestido sujeito a um carregamento de contato aplicado por um indentador cilíndrico elástico.

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 von 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.

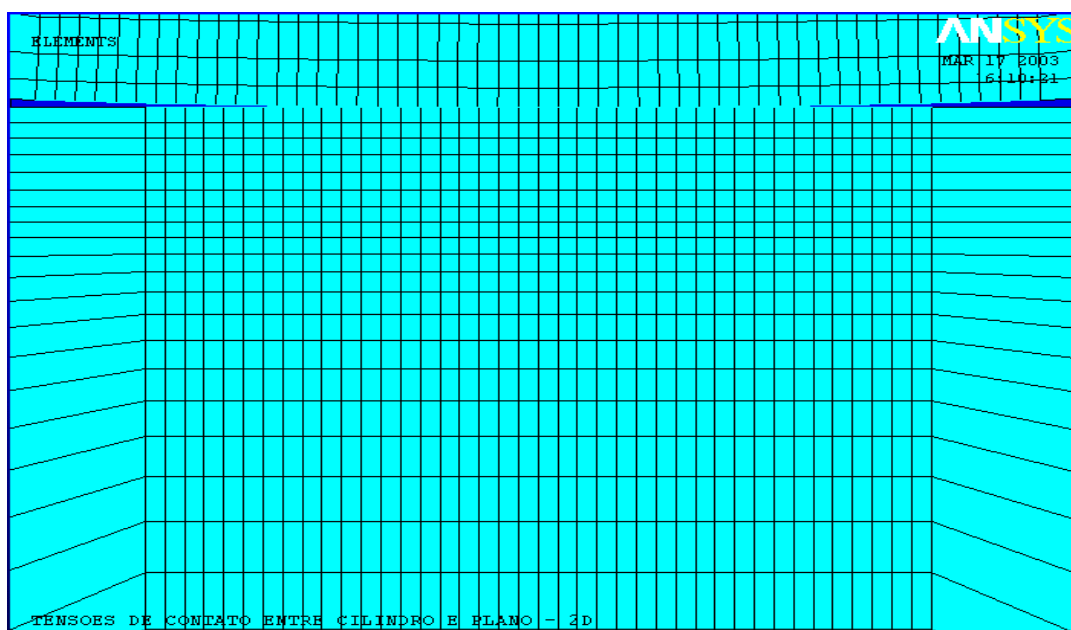


Figura 2 – Densidade de malha mais adequada à região de contato.

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, 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 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.

3. 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 indentador após a aplicação da força tangencial, um coeficiente de atrito de 0,6 foi simulado nas superfícies de contato do indentador e do plano revestido. Adotou-se um raio de 5 mm para o cilindro indentador, 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 1 traz as propriedades mecânicas assumidas para os materiais utilizados.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos 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

4. VALIDAÇÃO DO MODELO

Alguns estudos foram realizados com o objetivo de se determinar o campo de tensões de contato resultante da indentação em corpos revestidos com uma camada fina. Um destes, Oliveira e Bower (1996), donde se obteve uma solução analítica, foi utilizado na validação deste trabalho.

Na figura 3 estão os resultados obtidos para o cálculo das tensões σ_x e σ_y ao longo do eixo OY de aplicação da carga normal, através de toda a espessura da camada de revestimento. Nestes cálculos foram utilizados o modelo em elementos finitos aqui proposto e a solução analítica obtida por Oliveira e Bower (1996). Estes resultados foram obtidos para um substrato em aço revestido do mesmo material, com uma espessura de camada $h/a = 0,8127$ e $\mu = 0$.

Como se vê na Tabela 2 e nas Figuras 4(a) e 4(b), não há significativas oscilações nos resultados, sejam para σ_{eqv} ou para σ_1 , ao se variar a espessura h . Isto sugere uma convergência destes valores obtidos para o caso do aço como revestimento de um substrato do mesmo material para aqueles resultados obtidos quando o material é homogêneo em aço.

Tabela 2 – Resultados obtidos do MEF para a maior e menor espessura de revestimento em aço e $\mu = 0,2$, em um substrato do mesmo material (os valores das tensões estão em MPa).

a (mm)	h (mm)	h/a	P_o (MPa)	$(\sigma_1)_{max}$	$(\sigma_1)_{max}/P_o$	$(\sigma_{eqv})_{max}$	$(\sigma_{eqv})_{max}/P_o$
0,0788	0,032	0,4061	862,96	350,35	0,405986	558,36	0,647029
0,0788	0,224	2,8426	862,67	349,67	0,405335	558,52	0,647432

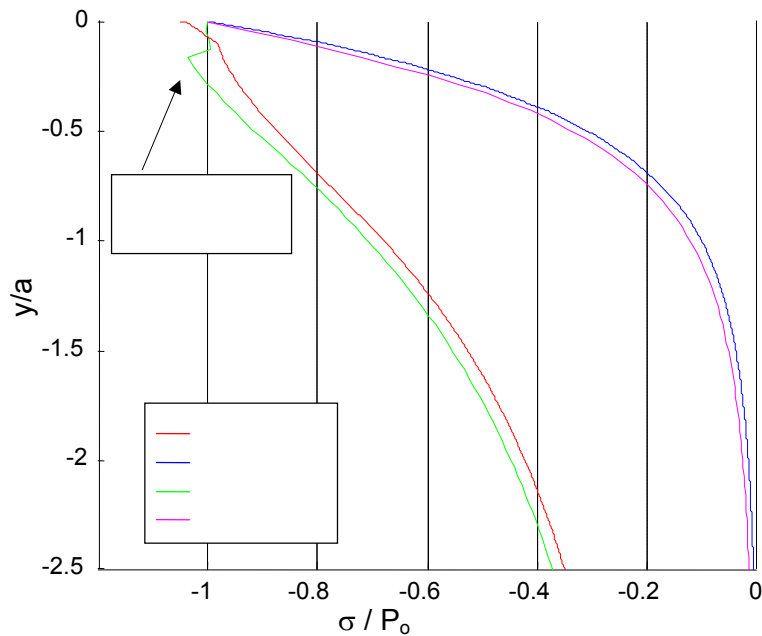


Figura 3: Cálculo das tensões ao longo de OY.

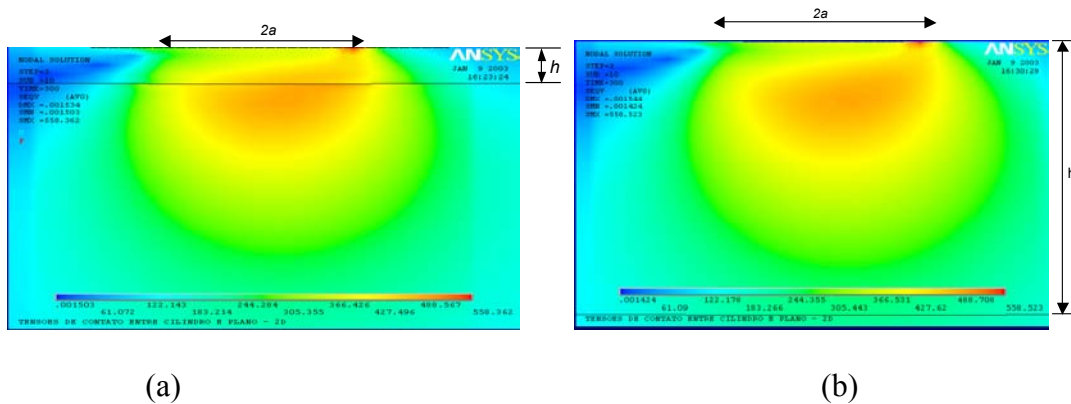
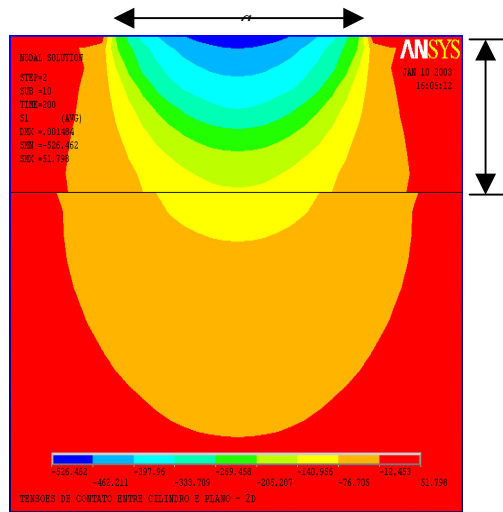
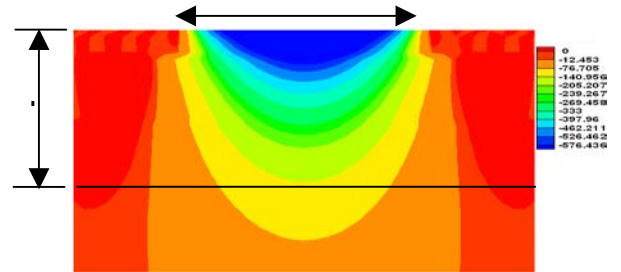


Figura 4 – Contorno da tensão equivalente de von Mises para um substrato em aço revestido do mesmo material. $\mu = 0,2$. (a) - $h = 0,032\text{mm}$ e (b) - $h = 0,224\text{mm}$. Resultados obtidos pelo MEF.

Em sequência a isto, fez-se uso ainda dos resultados obtidos por Oliveira e Bower (1996) para este mesmo problema, desta feita para se obter os resultados dos contornos para a primeira tensão principal, conforme Figuras 5 (a) e 5 (b):



(a)

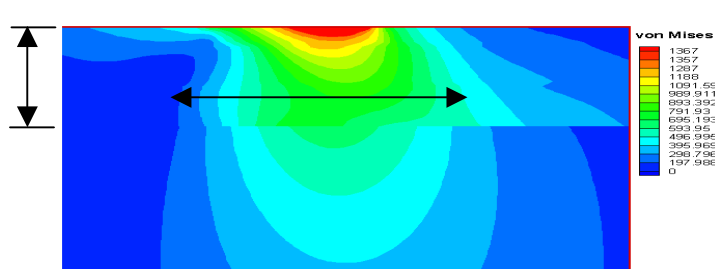


(b)

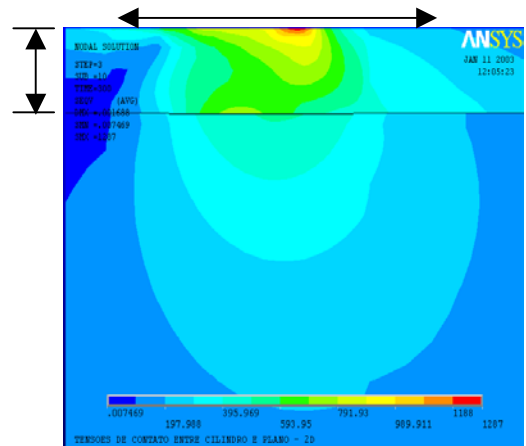
Figura 5 – Contorno da primeira tensão principal para o caso de um substrato em aço revestido do mesmo material, ($h = 0,064\text{mm}$ e $\mu = 0,0$), (a) obtido pelo MEF e (b) obtido analiticamente por Oliveira (1996).

Uma comparação entre os resultados analíticos e aqueles obtidos pelo MEF pode ser vista na forma de contornos da tensão equivalente de von Mises, Figuras 6(a) e 6(b). Estes resultados a seguir, referem-se ao caso de um substrato em aço revestido por SiC, com espessura $h = 0.064\text{ mm}$ e $\mu = 0.5$.

Os resultados analíticos foram calculados no Visual Fortran[®] 6.0 e plotados em Tecplot[®] 8.0, enquanto aqueles resultantes de simulação numérica foram obtidos do ANSYS[®], daí algumas diferenças implícitas na forma de apresentação de cada um, como segue:



(a)



(b)

Figura 6 – Contorno da tensão de von Mises para um substrato em aço revestido do mesmo material, ($h = 0,064\text{mm}$ e $\mu = 0,0$), (a) obtido por Oliveira (1996) e (b) obtido pelo MEF .

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 A Influência da Espessura de Camada do Revestimento no Campo de Tensões

5.1.1. 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.

Na Tabela 3, 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 da espessura de revestimento, os quais podem ser visualizados nos contornos das figuras 7 e 8, para a maior e menor espessuras:

Tabela 3 – Posição de ocorrência dos máximos valores da **primeira tensão principal**, (σ_1). Material do revestimento: **SiC**, para $\mu = 0,2$.

h/a	(σ_{1max}/Po)	Região de ocorrência da máxima tensão (σ_1)
0,444	0,4580	Superfície de contato
0,889	0,3553	Superfície de contato
1,391	0,3035	Superfície de contato
1,855	0,3264	Superfície de contato
2,424	0,3620	Superfície de contato
2,909	0,3823	Superfície de contato
3,394	0,4000	Superfície de contato

5.1.2. A tendência de deformação plástica no bronze

Na Tabela 4, a seguir, constam as regiões de ocorrências dos valores máximos da tensão equivalente de von Mises, obtidos pelo MEF, os quais podem ser visualizados nos contornos das figuras 15 e 16, para a maior e menor espessuras.

Tabela 4 – Pontos de máximos da **tensão de von Mises**. Revestimento: **Bronze**, $\mu = 0,2$.

h/a	$(\sigma_{eqv})_{max}/Po$	<i>Região de ocorrência da máxima tensão</i> (σ_{eqv})
0,37	0,56020	Interface do revestimento
0,74	0,53464	Interface do revestimento
1,07	0,50866	Interior do revestimento
1,42	0,50977	Interior do revestimento
1,78	0,50796	Interior do revestimento
2,13	0,50446	Interior do revestimento
2,49	0,50086	Interior do revestimento

Os contornos a seguir 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 SiC e da tensão equivalente de von Mises (σ_{eqv}) para o revestimento em bronze e para o material homogêneo em aço. Seja para σ_1 ou para σ_{eqv} , os casos da maior e menor espessuras e do maior e menor atritos, estão aqui disponíveis, nesta ordem, respectivamente:

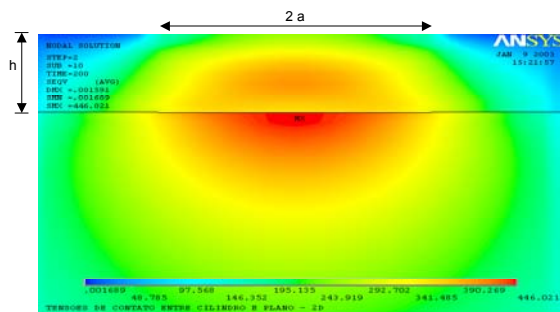


Figura 7 – Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $\mu = 0,0$ e $h = 0,064$ mm

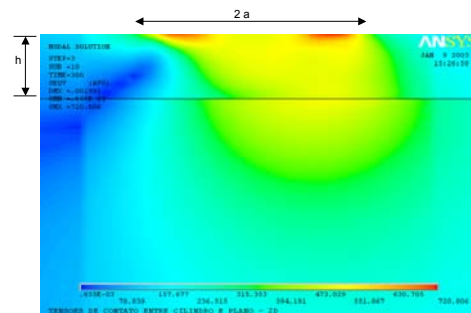


Figura 8 – Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $\mu = 0,50$ e $h = 0,064$ mm.

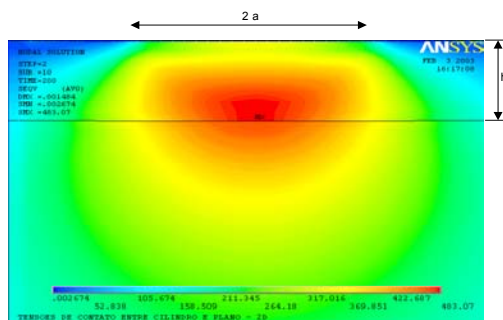


Figura 9 – Contorno de σ_{eqv} para o material homogêneo em aço, com $\mu = 0$ e $h = 0,064$ mm

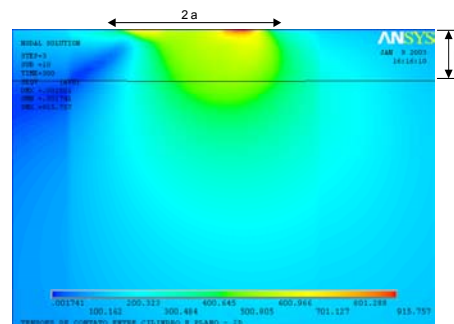


Figura 10 – Contorno de σ_{eqv} para o material homogêneo em aço, $\mu = 0,5$ e $h = 0,064$ mm.

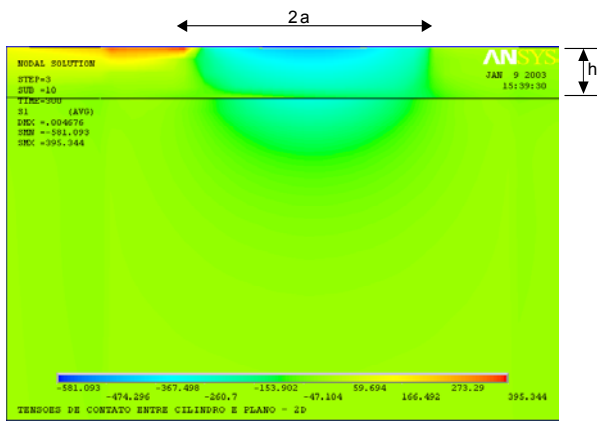


Figura 11 – Contorno de σ_1 para o SiC como revestimento, com $h=0,032$ mm e $\mu = 0,2$).

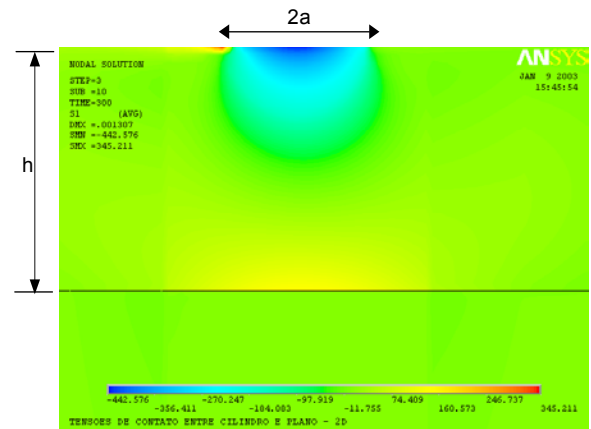


Figura 12 – Contorno de σ_1 para o SiC como revestimento, com $h=0,224$ mm e $\mu = 0,2$.

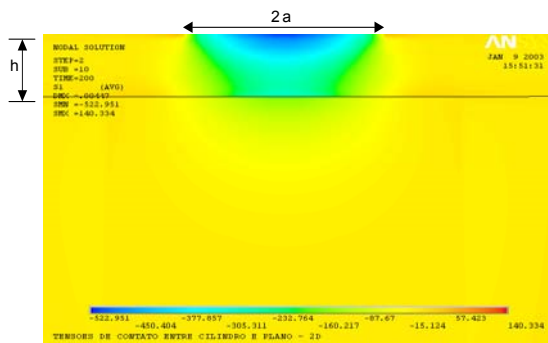


Figura 13 – Contorno de σ_1 para o SiC como revestimento, com $\mu = 0,0$ e $h=0,064$ mm

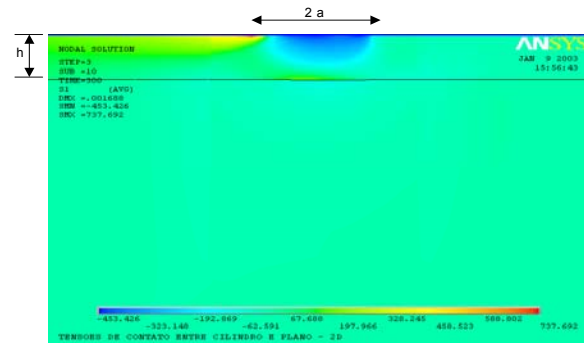


Figura 14 – Contorno de σ_1 para o SiC como revestimento, com $\mu = 0,50$ e $h=0,064$ mm.

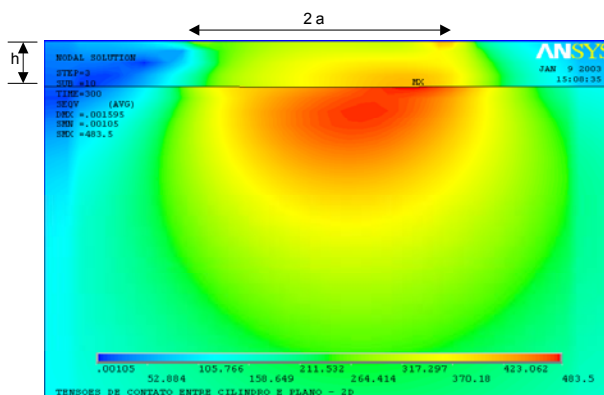


Figura 15 – Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $h=0,032$ mm e $\mu = 0,2$.

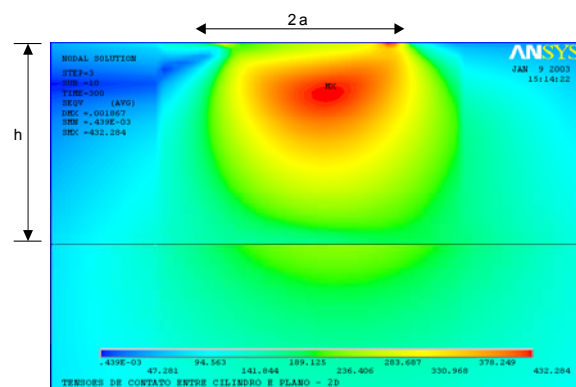


Figura 16 – Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $h=0,224$ mm e $\mu = 0,2$.

5.2 A influência do coeficiente de atrito no campo de tensões

5.2.1. A tendência de fratura no revestimento cerâmico – SiC

Na Tabela 5, 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, os quais podem ser visualizados nos contornos das figuras 13 e 14, para o maior e menor atrito.

Tabela 5 – Posição de ocorrência dos valores máximos da **primeira tensão principal**, (σ_1). Material do revestimento: **SiC**, para $h = 0,064$ mm.

μ	(σ_{1max}/Po)	<i>Região de ocorrência da máxima tensão (σ_1)</i>
0,00	0,22285	Superfície de contato
0,05	0,22292	Superfície de contato
0,10	0,22325	Superfície de contato
0,20	0,35531	Superfície de contato
0,30	0,54033	Superfície de contato
0,40	0,70272	Superfície de contato
0,50	0,85472	Superfície de contato

5.2.2. A tendência de deformação plástica no bronze e no aço

As Tabelas 6 e 7 trazem os valores máximos obtidos pelo MEF da **tensão equivalente de von Mises** para o bronze, que podem ser visualizados nos contornos das figuras 13 e 14, 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 7 os resultados referentes ao estudo da influência da variação do coeficiente de atrito, que também podem ser visualizados nos contornos das figuras 9 e 10, para o maior e menor atrito.

Tabela 6 – Posição de ocorrência dos valores máximos da **tensão equivalente de von Mises**. Material do revestimento: **Bronze**, para $h = 0,064$ mm.

μ	$(\sigma_{eqv})_{max}/Po$	<i>Região de ocorrência da máxima tensão (σ_{eqv})</i>
0,00	0,51587	Interface do revestimento
0,05	0,51741	Interface do revestimento
0,10	0,52115	Interface do revestimento
0,20	0,53464	Interface do revestimento
0,30	0,63036	Superfície de contato
0,40	0,74155	Superfície de contato
0,50	0,83516	Superfície de contato

Tabela 7 – Posição de ocorrência dos valores máximos da **tensão equivalente de von Mises**. Material do revestimento: **Aço**, para $h=0,064$ mm.

μ	$(\sigma_{eqv\ max}/Po)$	<i>Local de ocorrência da máxima tensão (σ_{eqv})</i>
0,00	0,55948	Interface do revestimento
0,05	0,56011	Centro do revestimento
0,10	0,56327	Centro do revestimento
0,20	0,64739	Superfície de contato
0,30	0,80177	Superfície de contato
0,40	0,94344	Superfície de contato
0,50	1,05711	Superfície de contato

6. 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%.

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 von 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 para o revestimento em **bronze**, quando o parâmetro de análise foi o coeficiente de atrito, os máximos valores da tensão equivalente de von 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 $\mu = 0,05$ e $\mu = 0,10$), até a saída do contato, (que ocorre para $\mu = 0,2$, $\mu = 0,30$, $\mu = 0,40$ e $\mu = 0,50$) entre o indentador e o plano revestido. Isto indica forte dependência entre a posição dos máximos valores da tensão equivalente de von 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.

7. REFERÊNCIAS

Duarte, E. N., 2003, “Análise do campo de tensões de contato em um substrato plano revestido“, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

Holmberg, K, A. Laukkanen, H. Ronkainen, K. Wallin and S.Varjus, 2002, “Modelling Stresses and Fracture in Thin Coatings”.6th International Tribology Conference – AUSTRIAS ’02.Perth, Australia.

Matzbender, J. e de With, G., 1999, “Sliding indentation, friction and fracture of a hybrid coating on glass”, Wear, 236, 355-359.

Matzbender, J. e de With, G., 2000a, “Cracking and residual stress in hybrid coatings on float glass,” Thin Solid Films, 359, 210--214.

Oliveira, S. A G e Bower, A F., 1996, “Failure mechanisms in coated solids under contact loading”, **Ph.D. thesis**, Brown University.

TITLE : INFLUENCE IN THE FIELD STRESS FROM LAYER THICKNESS AND THE FRICTION COEFFICIENT THAT ACTS BETWEEN THE CILINDRICAL INDENTER AND COATING

Duarte E. N.

Federal University of Uberlândia

endumarte@mecanica.com.br

Oliveira S. A. G.

Federal University of Uberlândia

sgoulart@mecanica.ufu.br

Abstract

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.*