

5

CAPÍTULO

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A VALIDAÇÃO DO MODELO

As hipóteses simplificadoras inerentes ao método dos elementos finitos, bem como erros oriundos dos algoritmos numéricos e das simplificações na geometria e no modelo físico proposto, podem, associados, levar a resultados que se distanciam muito da realidade. Por essa razão, há que se adotar procedimentos que possam mensurar o quão distantes estão esses resultados dos valores esperados, possibilitando uma validação do modelo adotado.

O primeiro passo no sentido dessa validação foi dado por meio de uma simulação numérica para um corpo de prova sem revestimento, homogêneo, sujeito apenas à aplicação de uma força normal de 100N. Esses resultados foram comparados àqueles obtidos pelo método analítico, calculados sobre o eixo y de aplicação da carga, conforme mostrado na Figura 5.1.

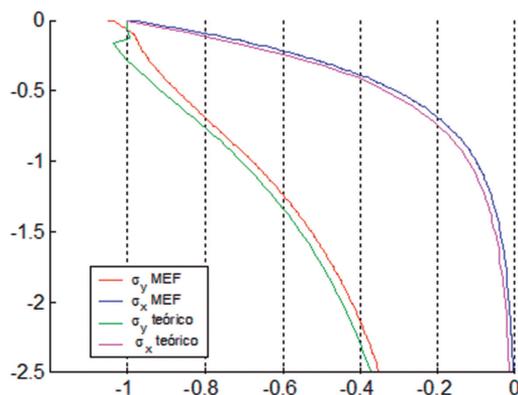


Figura 5.1 Cálculo de σ_x e σ_y ao longo do eixo de aplicação da carga normal, OY.

Deve-se ressaltar que nos resultados apresentados na Figura 5.1 as tensões $\sigma_x = -861,3\text{MPa}$ e $\sigma_y = -905,77\text{MPa}$ deveriam possuir valores iguais, de acordo com os resultados analíticos, na superfície do contato. No entanto, eles diferem pontualmente do valor teórico, que é de $863,762\text{MPa}$, aproximadamente de $0,28$ e $4,86$ pontos percentuais, respectivamente. As Figuras 5.3 a 5.9 trazem outras confrontações com os resultados obtidos analiticamente por contornos e cálculos ao longo de um determinado caminho, para o caso do material homogêneo e não homogêneo. Como a análise é feita apenas no limite elástico, estes altos valores de tensão são apenas teóricos, uma vez que não se “permitiu” que houvesse escoamento do material. A utilização do aço como revestimento de um substrato do mesmo material tornou possível a verificação da ocorrência ou não de um comportamento semelhante ao caso do material homogêneo em aço. Isso foi feito utilizando a maior e a menor espessura de revestimento dentro do espectro de valores utilizados para o estudo da influência desse parâmetro no campo de tensões.

Como se vê na Tabela 5.1 e nas Figuras 5.9 e 5.10, não há significativas oscilações nos resultados, sejam para σ_{eqv} ou para σ_1 , ao se variar a espessura h . Isso sugere uma convergência desses valores obtidos para o caso do aço como revestimento de um substrato do mesmo material para os resultados obtidos quando o material é homogêneo em aço.

Tabela 5.1 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 | h | h/a | P_o | $(\sigma_1)_{\text{max}}$ | $(\sigma_1)_{\text{max}}/P_o$ | $(\sigma_{\text{eqv}})_{\text{max}}$ | $(\sigma_{\text{eqv}})_{\text{max}}/P_o$ |
|--------|-------|--------|--------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--|
| 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 |

Nos contornos de σ_{eqv} das Figuras 5.2a e 5.2b a seguir, é possível uma melhor visualização desses resultados:

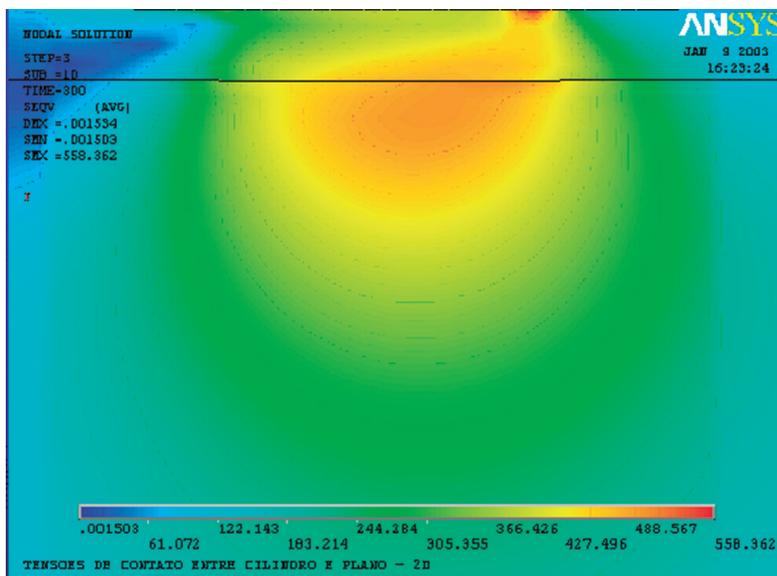


Figura 5.2a Contorno da tensão equivalente de von Mises para o caso de um substrato em aço revestido do mesmo material. (Menor espessura – $h = 0.032\text{mm}$ e $\mu = 0,2$).

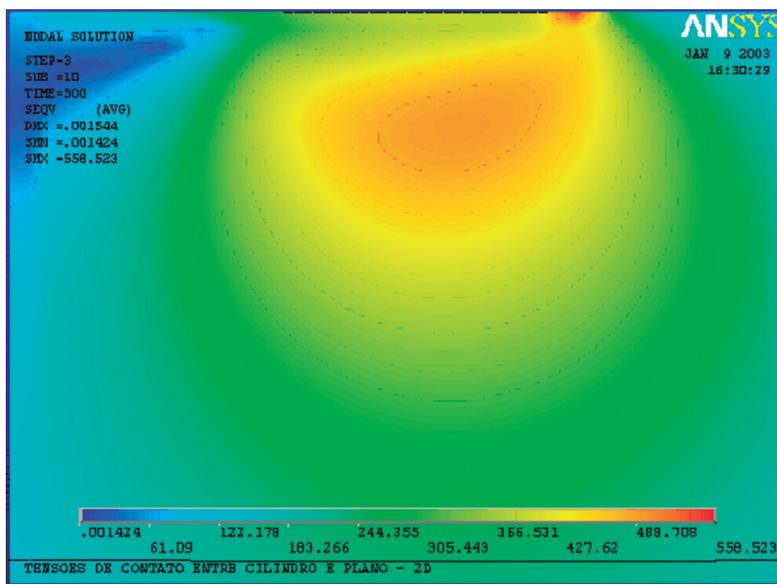


Figura 5.2b Contorno da tensão equivalente de von Mises para o caso de um substrato em aço revestido do mesmo material. (Maior espessura – $h = 0.224\text{mm}$ e $\mu = 0,2$).

Em sequência, utilizaram-se os resultados obtidos em um método analítico-numérico para este mesmo problema, isto é, o caso de um cilindro sobre um plano revestido sujeito aos carregamentos normal e tangencial, distribuídos sobre uma largura de contato, como pode ser visto, mais detalhadamente, em Oliveira (1996 – p.11-13).

Ainda que as condições de contorno dessa referência não tenham sido impostas exatamente como neste modelo proposto, que simula uma situação real de um indentador cilíndrico em um plano revestido, com as simplificações supracitadas, todas as demais hipóteses assumidas na obtenção da solução analítica também vão de encontro ao mesmo problema físico em estudo, utilizando-se de um método de resolução diferente do utilizado neste estudo (MEF).

As Figuras 5.3 e 5.4, a seguir, mostram os contornos da primeira tensão principal para o caso de um substrato em aço revestido do mesmo material, obtidos pelo MEF e por Oliveira (1996), respectivamente:

Uma confrontação entre os resultados analíticos e aqueles obtidos pelo MEF é realizada a seguir, nas formas de contornos da tensão equivalente de von Mises (Figuras 5.5 e 5.6) e da primeira tensão principal (Figuras 5.7 e 5.8). Estes quatro resultados, agora, referem-se ao caso de um substrato em aço revestido por SiC, com espessura $h = 0.064$ mm e $\mu = 0.5$.

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

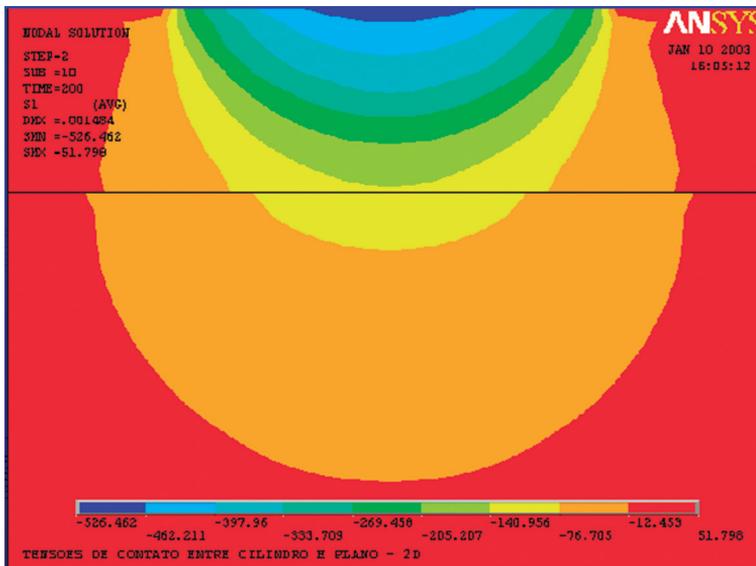


Figura 5.3 Contorno da primeira tensão principal para o caso de um substrato em aço revestido do mesmo material. ($h = 0.064$ mm e $\mu = 0.0$), obtido pelo MEF.

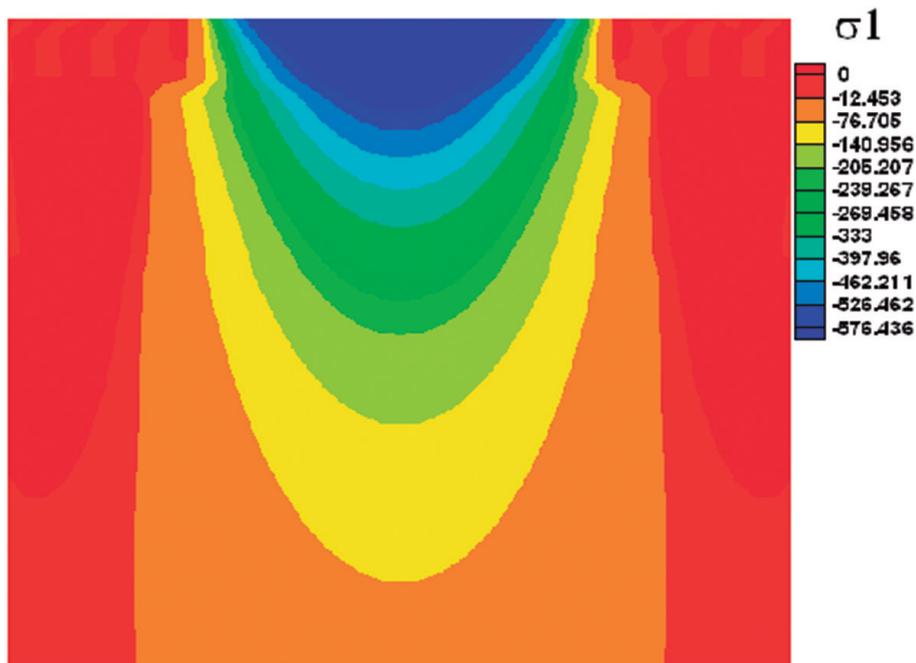


Figura 5.4 Contorno da primeira tensão principal para o caso de um substrato em aço revestido do mesmo material ($h=0.064\text{mm}$ e $\mu = 0.0$), obtido analiticamente por Oliveira (1996).

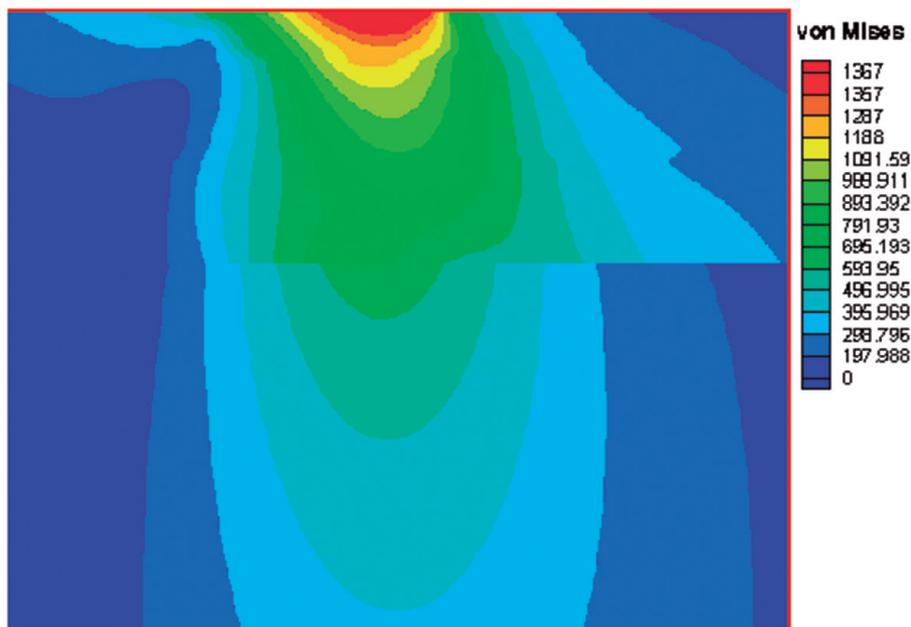


Figura 5.5 Contornos da tensão de von Mises obtidos por Oliveira (1996).

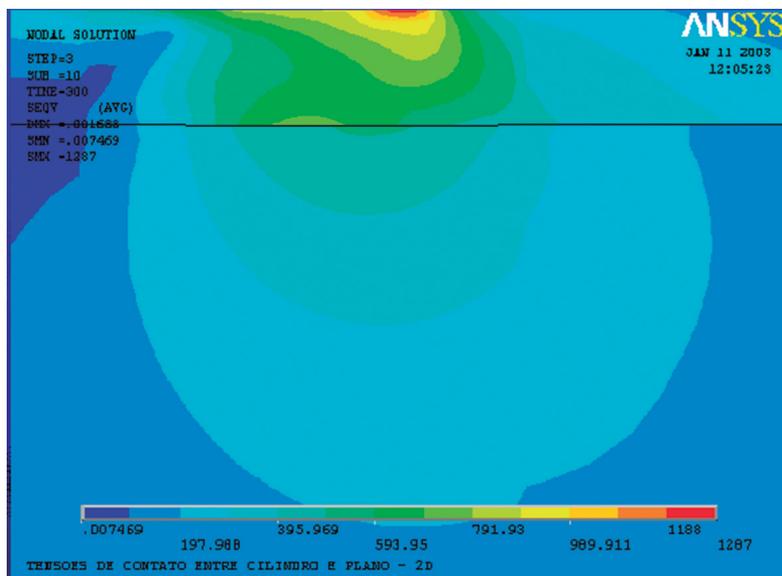


Figura 5.6 Contornos da tensão de von Mises, obtidos pelo MEF, em Mpa.

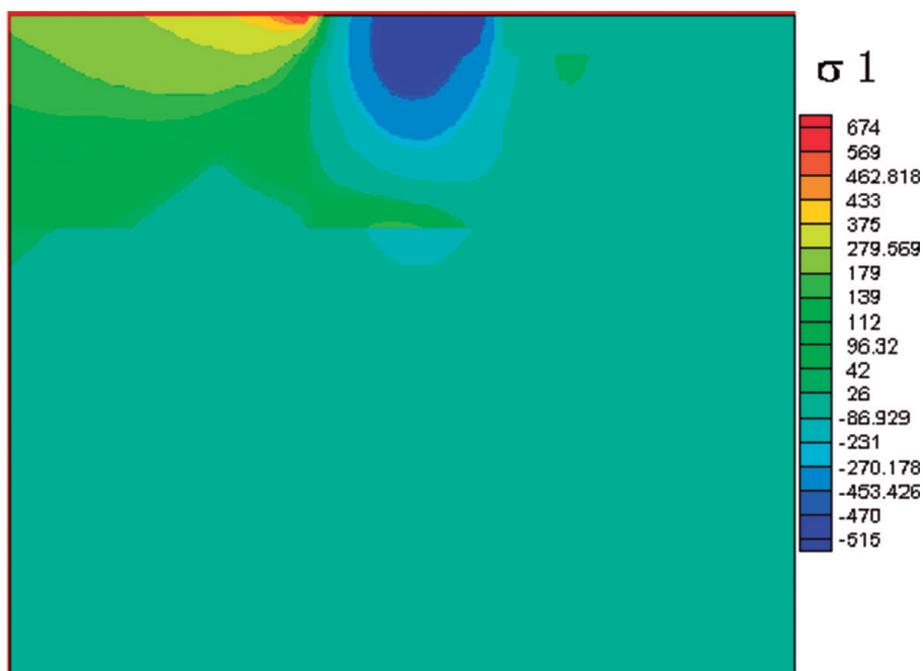


Figura 5.7 Contornos da tensão σ_1 obtidos por Oliveira (1996), para o caso de um substrato em aço revestido por SiC ($h = 0.064$ e $\mu = 0.5$).

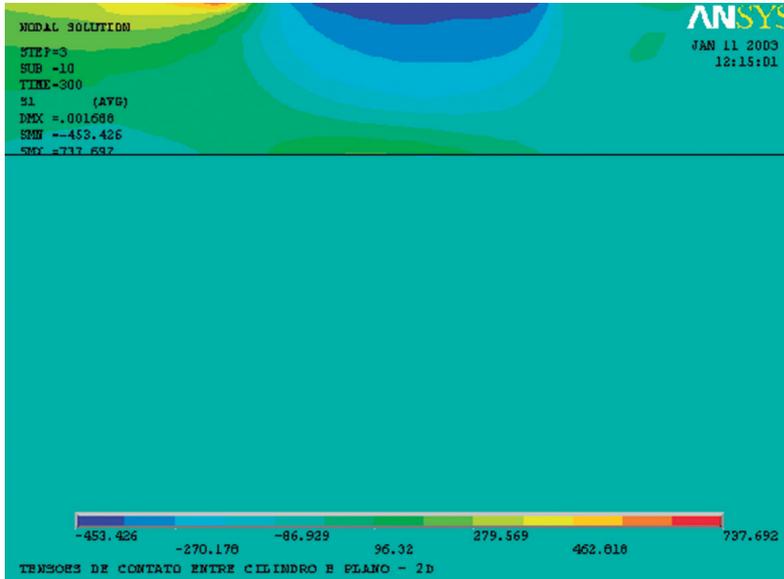


Figura 5.8 Contornos da primeira tensão principal para o caso de um substrato em aço revestido por SiC ($h=0.064\text{mm}$ e $\mu = 0.5$), obtidos em simulação numérica, pelo MEF.

Os contornos mostrados nas figuras anteriores permitem enxergar os resultados globais para o modelo como um todo e conferir as similaridades dos resultados obtidos analiticamente e aqueles obtidos pelo MEF. Entretanto, especificamente em relação a σ_1 , ocorre um fenômeno que evidencia uma das discrepâncias fundamentais entre os resultados dos dois métodos: ao descrever as condições de contorno em seu modelo, Oliveira (1996 – p.10) tem como uma de suas suposições a de que $\sigma_{xy} = \sigma_{xx} = 0$, quando calculados sobre o eixo horizontal x , na região exterior à largura do contato. Isso faz com que não seja possível se detectar a existência de σ_1 maior que zero na saída do contato, quando μ é nulo (ver Figura 5.4), isto é, quando não há força tangencial aplicada sobre o indentedor cilíndrico, conforme se observa nos resultados obtidos pelo MEF, na Figura 5.9:

É realmente interessante que, nessas circunstâncias, havendo somente a aplicação de uma força de compressão sobre o indentedor, 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 desse fenômeno em relação às propriedades mecânicas do material do revestimento.

Esse comportamento tribológico já foi investigado e confirmado experimentalmente, em alguns casos e para certos materiais.

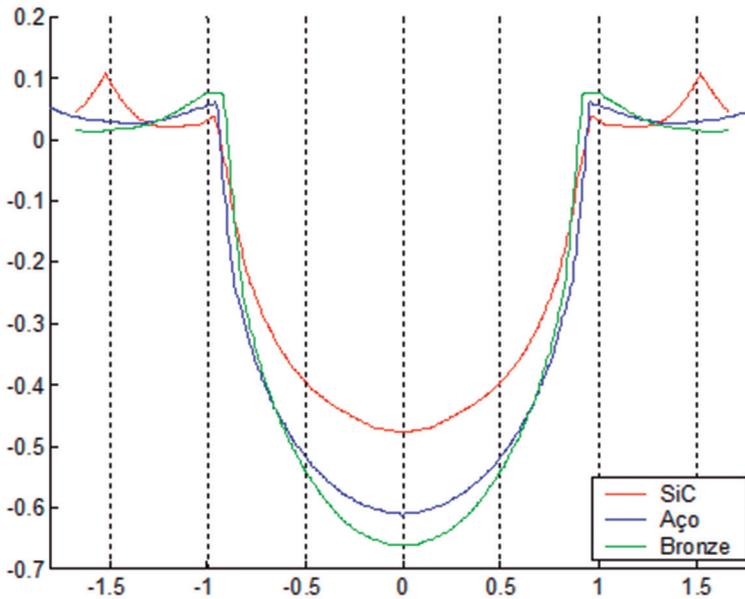


Figura 5.9 Cálculo de σ_1 sobre a linha que contém a superfície de contato, utilizando o MEF.

G. Pintaúde (2002) descreve esse comportamento através de uma impressão de dureza Vickers convencional HV, por meio de imagens obtidas em interferometria laser (Figura 5.10), para uma profundidade máxima de penetração de $3 \mu\text{m}$ em aço AISI 52100 trefilado. Nestas imagens, pode-se observar a formação de bordas (“piling-up”) devido à atuação de tensões que tendem a tracionar o material no sentido oposto àquele da indentação.

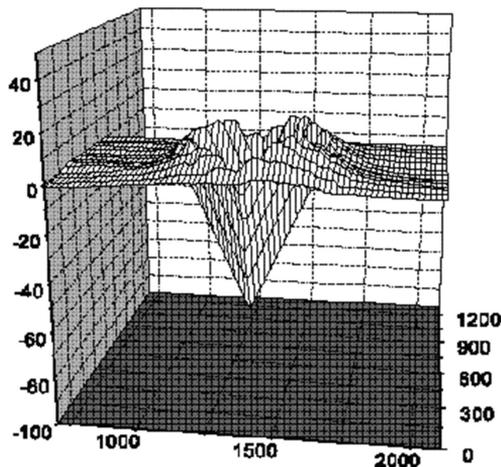


Figura 5.10 Formação de bordas obtidas em interferometria laser, segundo Pintaúde (2002).

O termo “piling-up” foi utilizado pela primeira vez por Nurbury e Samuel (1928) para designar morfologias de impressão de dureza Brinell. Mais recentemente, Pintaúde (2002) incorporou a denominação “formação de bordas” para designar esse fenômeno.

Diversos pesquisadores propuseram que fossem criados parâmetros para a previsão da ocorrência da formação de bordas em ensaios de dureza, como Zeng et al. (1996), Giannakopoulos e Suresh (1999) e Alcalá et al. (2000).

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”. Essa afirmação aponta no sentido de se concluir que a ocorrência das tensões σ_1 positivas, encontradas neste trabalho para essa mesma região, é coerente com os resultados experimentais obtidos pelos autores referenciados.

5.2 A INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE REVESTIMENTO NOS RESULTADOS MÁXIMOS DAS TENSÕES

Uma análise dos resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) será feita agora, plotando-se os valores máximos das tensões σ_{eqv} e σ_1 versus (h/a) , respectivamente nas Figuras 5.11 e 5.12, 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.

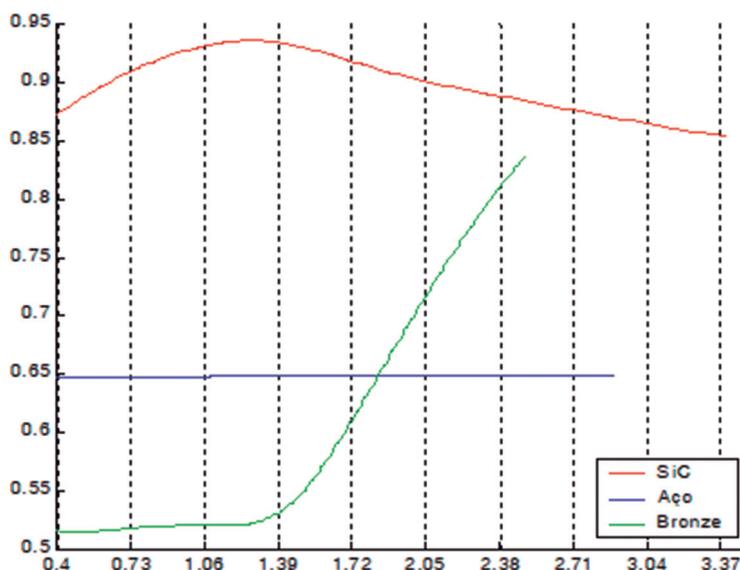


Figura 5.11 Tensões equivalentes máximas versus h/a .

Como se vê na Figura 5.11, não há influência da espessura do revestimento de aço para o substrato do mesmo material no valor da tensão equivalente, como seria de se esperar para o material homogêneo em aço, o que não ocorre para os outros dois revestimentos.

No caso do revestimento em bronze, torna-se evidente, a partir dos resultados acima, 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 desse valor acarretarão maiores valores da tensão equivalente de von Mises. Isso é indesejável, uma vez que será esse o parâmetro preponderante na avaliação de um eventual desencadeamento do mecanismo de falha para o caso dos revestimentos metálicos, como o bronze.

Também é possível observar que, no caso do revestimento em cerâmica, a primeira tensão principal é mínima (Figura 5.12), nessa mesma espessura, isto é, 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, esse resultado conduz a uma constatação importante: a de que há uma espessura ótima de revestimento nessas circunstâncias, em que um valor inferior ou maior a esse não implementará uma proteção adequada ao substrato:

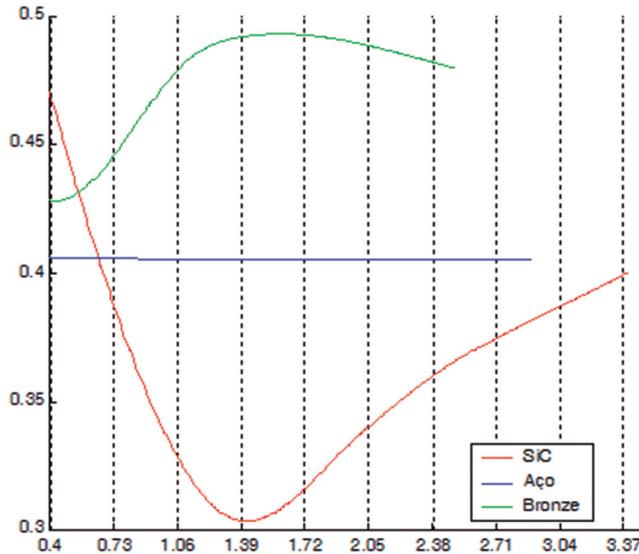


Figura 5.12 Tensões σ_1 máximas versus h/a .

5.3 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ATRITO NOS RESULTADOS MÁXIMOS DAS TENSÕES

Dado o procedimento realizado na Seção 5.2, uma análise semelhante se fará necessária, mas dessa vez, mantendo-se constante a espessura h do revestimento

em 0,064mm e variando-se o coeficiente de atrito μ , conforme pode ser observado na Figura 5.13.

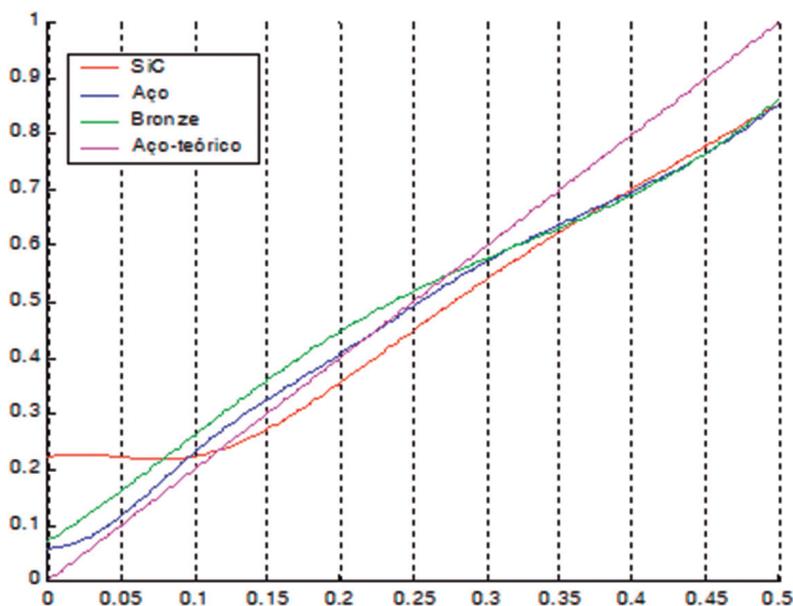


Figura 5.13 Tensões σ_1 máximas versus μ .

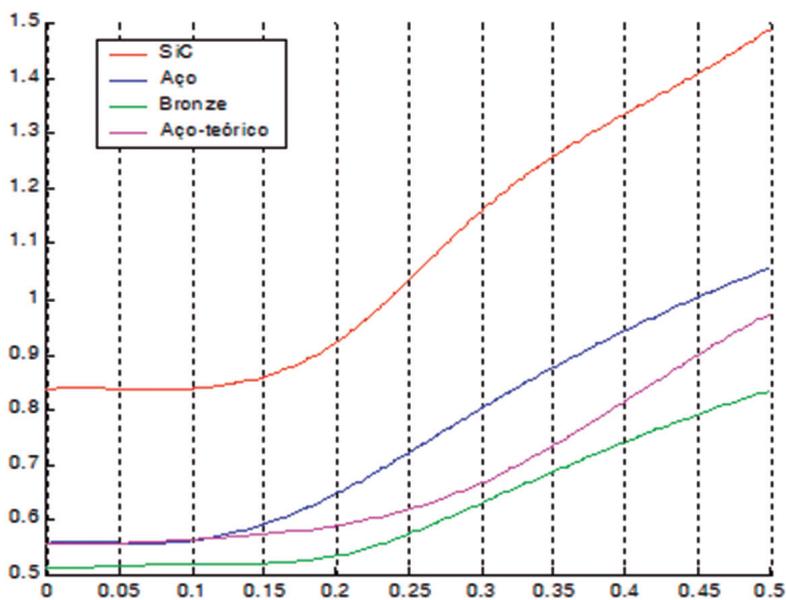


Figura 5.14 Tensões equivalentes σ_{eqv} máximas versus μ .

Pode-se observar com certa clareza na Figura 5.14 que, para um coeficiente de atrito inferior a 0.15, não há acréscimo significativo na tensão equivalente de von Mises, seja para o revestimento frágil, seja para o revestimento dúctil.

Incrementos consideráveis na tensão equivalente de von 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% 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 5.13, que valores do coeficiente de atrito inferiores a 0.1 não possuem influência que seja relevante no acréscimo desse parâmetro. Isto indica que somente após a força tangencial atingir cerca de 10% da força normal é que se pode esperar incrementos consideráveis na primeira tensão principal para o revestimento frágil.

Em que pese não se ter adotado a primeira tensão principal como parâmetro importante na análise dos mecanismos de falha do revestimento dúctil, vale observar que o comportamento acima observado para o revestimento frágil não ocorre para o revestimento em bronze, tampouco para o material homogêneo em aço, em relação a esse parâmetro, ao se variar o atrito.

A Figura 5.13 demonstra que, à exceção do revestimento em SiC, o material homogêneo em aço e o revestido por bronze possuem influência crescente, desde o atrito zero, sobre o crescimento dos resultados da primeira tensão principal, quando se acresce o atrito, mantendo constante o valor da espessura de revestimento.

Entretanto, como já foi dito, não é esse parâmetro, (σ_1 o adotado para se observar os prováveis mecanismos de falha quando o revestimento é o bronze ou quando o material é homogêneo em aço).

5.4 ESTUDO DOS PROVÁVEIS MECANISMOS DE FALHA

Procede-se, nesta seção, a uma análise dos prováveis mecanismos de falha para o caso do revestimento frágil, SiC, do revestimento dúctil, bronze e do material homogêneo em aço, em uma linha de contato deslizante de um sólido sujeito a uma pressão de contato. Não se fará aqui um cálculo rigoroso das condições necessárias para que se inicie uma trinca no substrato ou no revestimento do sólido, pois foge do escopo deste trabalho. Para resultados mais rigorosos nesse sentido, referir-se a Oliveira (1996).

Enquanto as tensões trativas são as principais motivadoras dos microtrincamentos nos materiais frágeis, nos materiais dúcteis do substrato ou do revestimento é o processo de deformação plástica que induzirá à formação de trincas interfaciais decorrentes da interação de discordâncias (HONEYCOMBE, 1985).

Os principais modos de falha, trativas ou compressivas, estão nas Tabelas 5.2 e 5.3, a seguir:

Tabela 5.2 Falhas trativas para revestimentos finos (RICKERBY, 1991)

| Revestimento | Substrato | Mecanismo de falha |
|--------------|-----------|--|
| Frágil | Dúctil | Trincamento no revestimento |
| Dúctil | Frágil | Início de perda de aderência no substrato |
| Dúctil | Dúctil | Formação de fendas na interface revestimento/substrato |
| Frágil | Frágil | Início de perda de aderência na interface (revestimento tenaz) ou perda de aderência interfacial por trincamento do revestimento |

Tabela 5.3 Falhas compressivas para revestimentos finos (RICKERBY, 1991)

| Revestimento | Substrato | Mecanismo de falha |
|---------------|-----------|---|
| Frágil | Dúctil | Propagação de flambagem no revestimento |
| Dúctil/frágil | Frágil | Formação de fendas no revestimento |
| Dúctil | Dúctil | Não há perda de aderência |

Na interface, quando ocorre mecanismos de falhas, eles são denominados “adesivos” e os que ocorrem no interior do revestimento ou do substrato são chamados de “coesivos”. Esses mecanismos se dão por microtrincamentos, deformação plástica ou perda de aderência, segundo Komvopoulos (1988).

5.4.1 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. Essa 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, mas 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. Isso 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.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5, constam as regiões de ocorrências dos valores máximos obtidos pelo MEF para a primeira tensão principal (σ_1), com seus respectivos valores dimensionalizados em relação à máxima pressão P_0 , para cada caso estudado. Seja em função da variação do atrito, seja em função da variação da espessura de revestimento:

Tabela 5.4 Posição de ocorrência dos valores máximos 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 |

Tabela 5.5 Posição de ocorrência dos valores máximos da primeira tensão principal, (σ_1). Material do revestimento: SiC, para $h = 0.064\text{mm}$

| μ | (σ_{1max}/Po) | Região de ocorrência da máxima tensão (σ_1) |
|-------|----------------------|--|
| 0.00 | 0.22285 | Superfície de contato |
| 0.05 | 0.22292 | Interface do revestimento |
| 0.10 | 0.22325 | Interface do revestimento |
| 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 |

Nas Tabelas 5.6 e 5.7, constam as regiões de ocorrências dos valores máximos da tensão equivalente de von Mises, obtidos pelo MEF:

Tabela 5.6 Posição de ocorrência dos valores máximos da tensão equivalente de von Mises. Material do revestimento: Bronze, para $\mu = 0.2$

| h/a | $(\sigma_{eqv})_{max}/Po$ | Região de ocorrência da máxima tensão (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 |

Tabela 5.7 Posição de ocorrência dos valores máximos da tensão equivalente de von Mises. Material do revestimento: Bronze, para $h = 0.064$ mm

| μ | $(\sigma_{eqv})_{max} / P_0$ | Região de ocorrência da máxima tensão (σ_{eqv}) |
|-------|------------------------------|--|
| 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 |

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), são apresentados na Tabela 5.8 somente os resultados referentes ao estudo da influência da variação do coeficiente de atrito.

Tabela 5.8 Posição de ocorrência dos valores máximos da tensão equivalente de von Mises. Material do revestimento: aço, para $h = 0.064$ mm

| μ | $(\sigma_{eqv max} / P_0)$ | Local de ocorrência da máxima tensão (σ_{eqv}) |
|-------|----------------------------|---|
| 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 |

5.5 CÁLCULOS DAS TENSÕES FEITOS AO LONGO DAS PRINCIPAIS REGIÕES DE INTERESSE

Os cálculos da tensão equivalente de von Mises e da primeira tensão principal foram feitos, primordialmente, em duas regiões:

- na interface do revestimento e do substrato;
- na superfície de contato dos sólidos;

Esses cálculos foram feitos para os três revestimentos (incluindo o revestimento em aço do substrato do mesmo material) e plotados no mesmo gráfico, ainda que os critérios para análise dos mecanismos de falha sejam diferentes para os materiais dúcteis e frágeis.

Também foram feitos os cálculos de σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{xy} ao longo do eixo de aplicação da força normal (OY) para os diferentes materiais, mas plotados em gráficos diferentes.

Estes gráficos estão divididos nas três regiões de interesse, já citadas anteriormente, conforme se vê a seguir:

5.5.1 Cálculo de σ_1

Região do cálculo: interface do revestimento com o substrato.

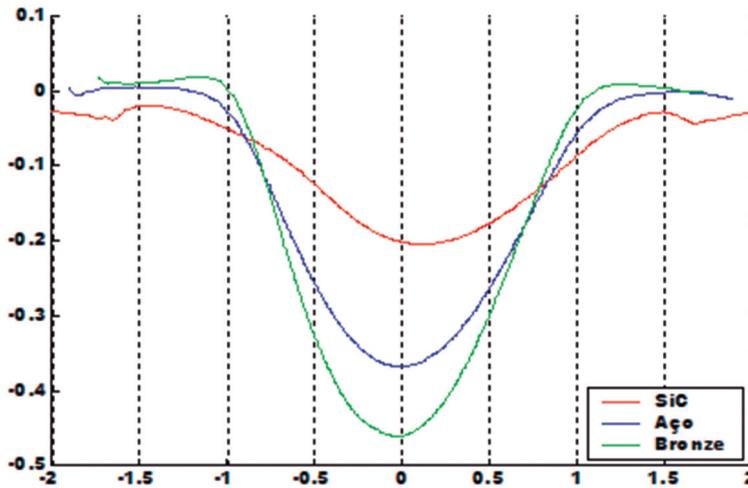


Figura 5.15 Cálculo de σ_1 ao longo da interface do revestimento com o substrato para uma espessura de revestimento $h=0.032\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

Os resultados de σ_1 plotados nas Figuras 5.15 e 5.16 foram calculados na interface do revestimento com o substrato com o objetivo de se observar mais atentamente a influência de uma maior ou menor espessura de revestimento neste parâmetro, propiciando maiores subsídios à análise procedida no item 5.2, agora restrita à região da interface. Ainda que σ_1 seja o parâmetro mais importante na deflagração do mecanismo de falha no revestimento frágil, foram calculados simultaneamente esses resultados para o aço e o bronze, para efeito de comparação.

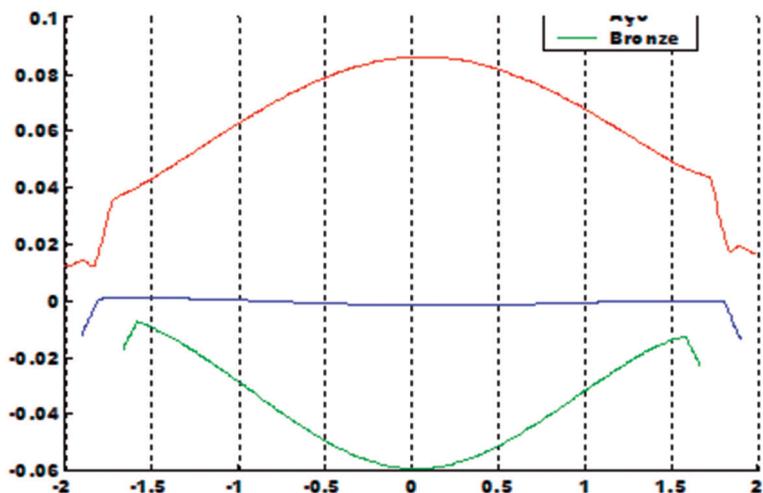


Figura 5.16 Cálculo de σ_1 ao longo da interface do revestimento com o substrato para uma espessura de revestimento $h=0.224\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

Pode-se observar que não há tensões trativas no caso da menor espessura do revestimento frágil nessa região de interface e aquelas que existem são baixas e ocorrem para o maior valor de espessura de revestimento. Conforme pode-se observar na Tabela 5.4, a região de ocorrência de máxima tensão trativa, nessas circunstâncias, é a superfície de contato.

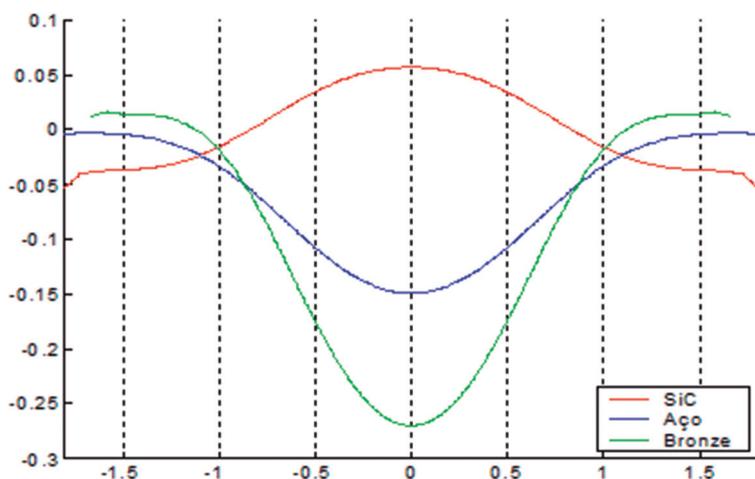


Figura 5.17 Cálculo de σ_1 ao longo da interface do revestimento e substrato para um coeficiente de atrito $\mu = 0.0$ e $h = 0.064\text{mm}$.

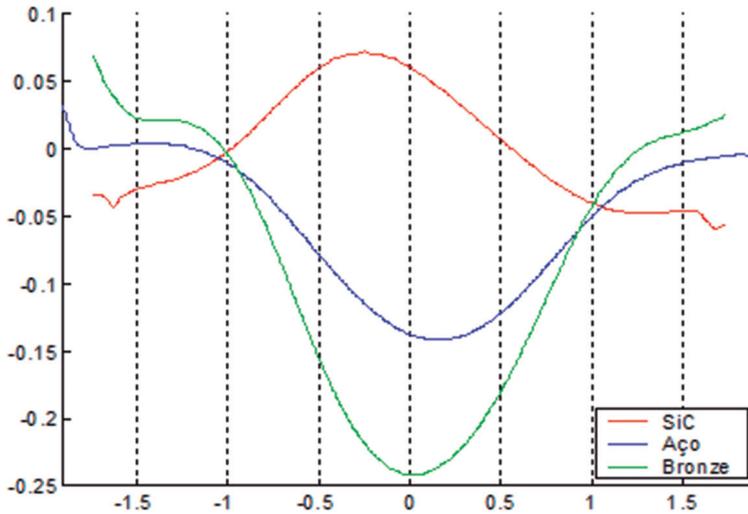


Figura 5.18 Cálculo de σ_1 ao longo da interface do revestimento e substrato para um coeficiente de atrito $\mu = 0.50$ e $h = 0.064\text{mm}$.

De acordo com os resultados da Figura 4.17, também nessas circunstâncias, de maior e menor atrito, a região de ocorrência de máxima tensão trativa é na superfície do contato, ainda que os resultados referentes ao caso de maior atrito sejam superiores àqueles do caso de menor atrito na região da interface e ligeiramente deslocados para a esquerda do eixo central de aplicação da carga normal, que é o sentido de aplicação da força tangencial sobre o cilindro indentador.

Nas Figuras 5.19 e 5.20 estão os cálculos ao longo de outra região do modelo:

- Região do cálculo: superfície de contato dos sólidos:

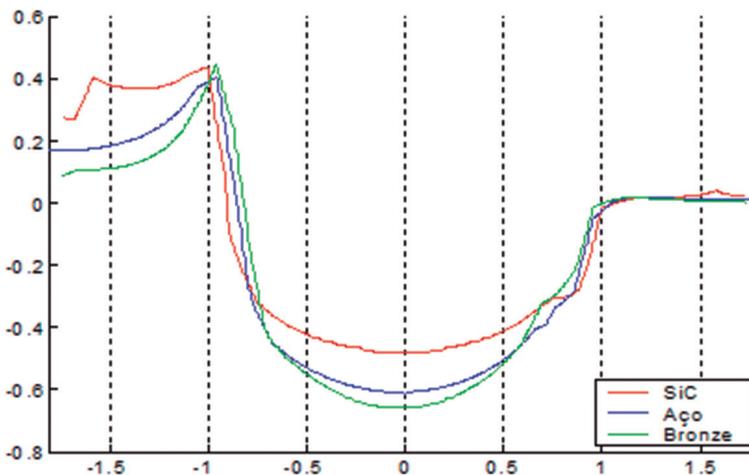


Figura 5.19 Cálculo de σ_1 ao longo da superfície de contato para o caso da menor espessura de revestimento, $h = 0.032\text{ mm}$ e $\mu = 0.2$.

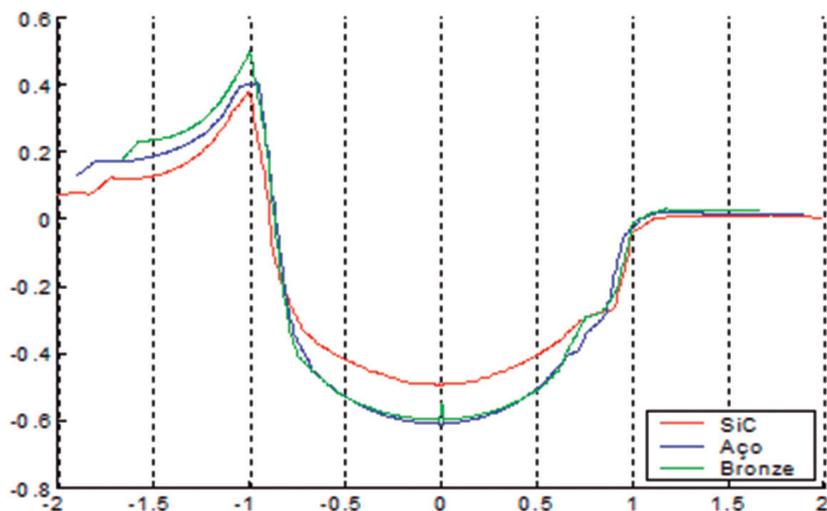


Figura 5.20 Cálculo de σ_1 ao longo da superfície de contato para o caso da maior espessura de revestimento, $h=0.224$ mm e $\mu = 0.2$.

Os cálculos das figuras anteriores deixam claro que a região da entrada na largura do contato é crítica em se tratando de tensões trativas para o revestimento cerâmico, especialmente no caso da espessura mínima de revestimento, que possui uma faixa maior de ocorrência dessas tensões. Ocorre que, sendo um percurso de ocorrência de altos gradientes de σ_1 , é provável que os valores calculados estarão tão mais próximos da realidade quanto mais refinada for a malha naquela região, o que poderia ser procedido de acordo com a relação desejada para o custo computacional *versus* benefício pretendido.

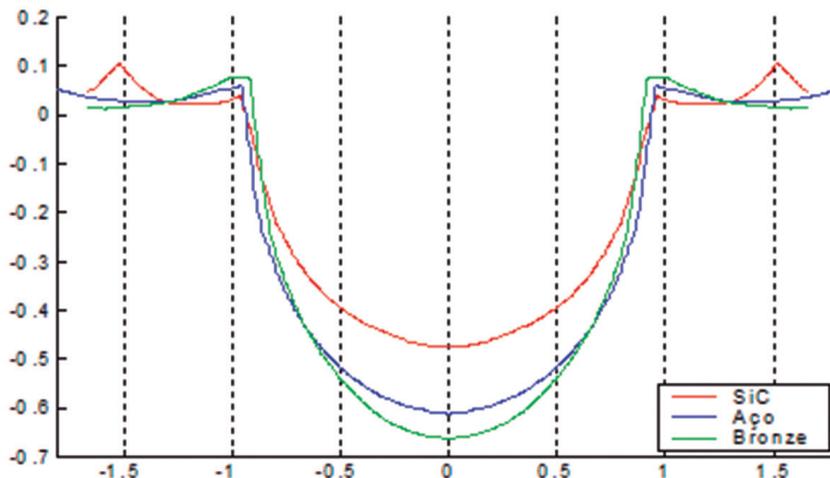


Figura 5.21 Cálculo de σ_1 ao longo da superfície de contato para um coeficiente de atrito.

Em relação aos demais revestimentos, percebem-se resultados tão superiores para as tensões trativas quanto mais dúctil for o material. Entretanto, como se sabe, serão as tensões de von Mises as mais importantes na análise dos mecanismos de falhas para estes materiais, nas quais deve-se deter um pouco mais adiante.

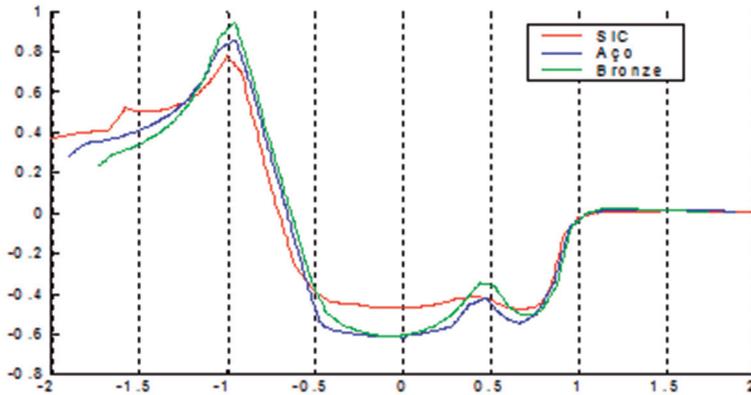


Figura 5.22 Cálculo de σ_1 ao longo da superfície de contato para um coeficiente de atrito $\mu = 0.50$ e $h = 0.064\text{mm}$.

Como se sabe a partir da Tabela 5.5, nas circunstâncias em que se variam os valores do coeficiente de atrito, do menor para o maior, para o revestimento em SiC, a região de ocorrência dos valores máximos das tensões trativas é na superfície de contato dos sólidos, em que se inserem os gráficos das Figuras 5.21 e 5.22 acima. O caso do menor valor do coeficiente de atrito já foi discutido na Seção 5.1. Mas vale ressaltar aqui, que, em virtude dos altos gradientes de σ_1 que são desenvolvidos na entrada da largura do contato, propiciam-se as condições para que se desenvolvam ali os mecanismos de falhas associados às condições de altas tensões trativas para o revestimento frágil.

Em que pesem serem superiores os valores desse parâmetro para os revestimentos dúcteis, como já se disse, não será a primeira tensão principal o objeto de principal importância no estudo dos mecanismos de falhas para estes revestimentos.

5.5.2 Cálculo de σ_{eqv}

- Região do cálculo: interface do revestimento e substrato:

Os resultados expressos nas figuras anteriores indicam que o bronze é um revestimento que “protege” melhor do que o aço o substrato ao ser submetido às condições de contorno deste problema. Como há uma força tangencial relativamente pequena atuando sobre o indetador de forma a promover um coeficiente de atrito

igual a 0,2, o valor da máxima tensão equivalente de von Mises ocorre deslocado para a direita, no sentido oposto àquele da aplicação da força tangencial.

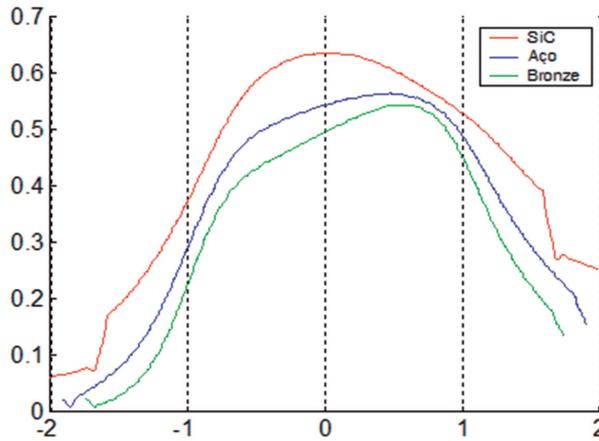


Figura 5.23 Cálculo de σ_{eqv} ao longo da interface do revestimento e substrato para uma espessura de revestimento $h = 0.032\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

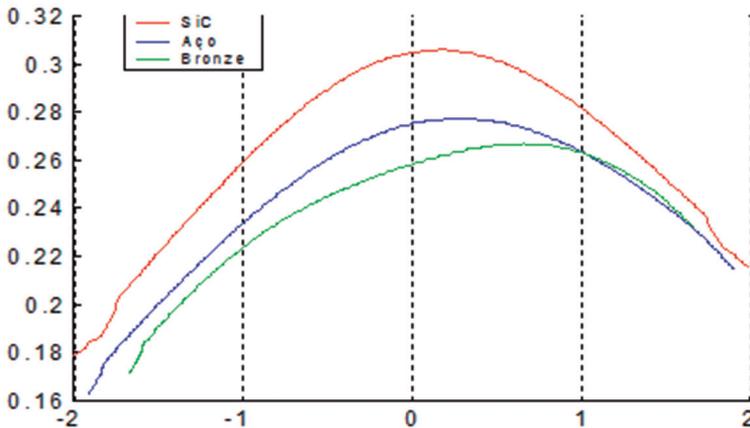


Figura 5.24 Cálculo de σ_{eqv} ao longo da interface do revestimento e substrato para uma espessura de revestimento $h = 0.224\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

A Tabela 5.6 indica a interface como sendo o percurso de ocorrência da máxima tensão equivalente para o revestimento em bronze. É possível se observar na Figura 5.24 que, após a saída do contato, o valor de σ_{eqv} do revestimento em bronze é sensivelmente superior ao revestimento em aço (material homogêneo), indicando uma certa tendência de comportamento semelhante ao do corpo em aço homogêneo, após a saída do contato (onde $x/a=1$):

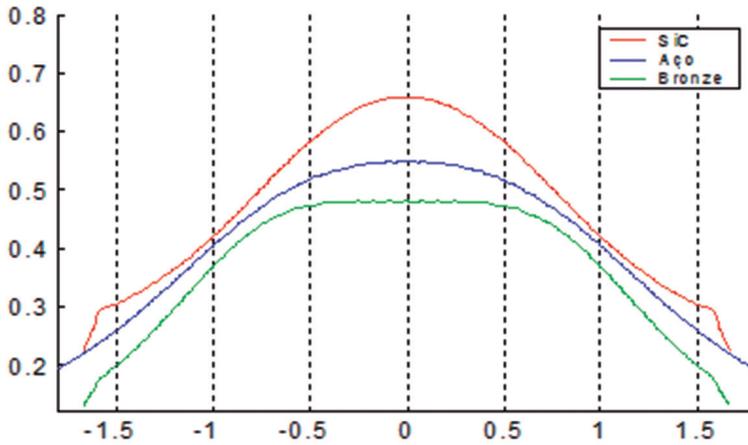


Figura 5.25 Cálculo de σ_{eqv} ao longo da interface do revestimento e substrato, para um coeficiente de atrito $\mu = 0.0$ e $h = 0.064\text{mm}$.

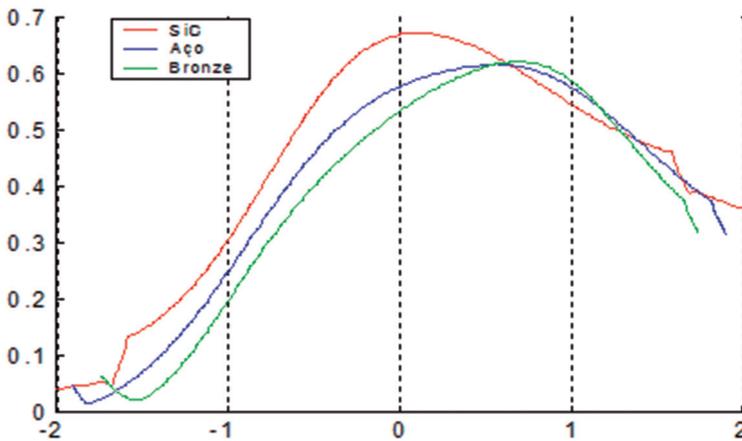


Figura 5.26 Cálculo de σ_{eqv} ao longo da interface do revestimento e substrato, para um coeficiente de atrito $\mu = 0.50$ e $h = 0.064\text{mm}$.

Ao se observar as Tabelas 5.7 (bronze) e 5.8 (aço) e as condições estudadas nas Figuras 5.24 e 5.25, percebe-se que o material homogêneo em aço, bem como o revestimento em bronze, possui uma tendência de deslocamento do ponto de máxima tensão equivalente da interface em direção à superfície de contato dos corpos à medida que se vai aumentando o valor do coeficiente de atrito.

Ambas as Tabelas 5.7 e 5.8 apontam também para as mesmas regiões de ocorrência das máximas tensões equivalentes: interface do revestimento para o menor atrito e superfície de contato para o maior atrito. Isso confirma a real im-

portância dos cálculos no percurso descrito pelas Figuras 5.24 e 5.25 na análise dos mecanismos de falha para esses materiais.

- Região do cálculo: superfície de contato dos sólidos:

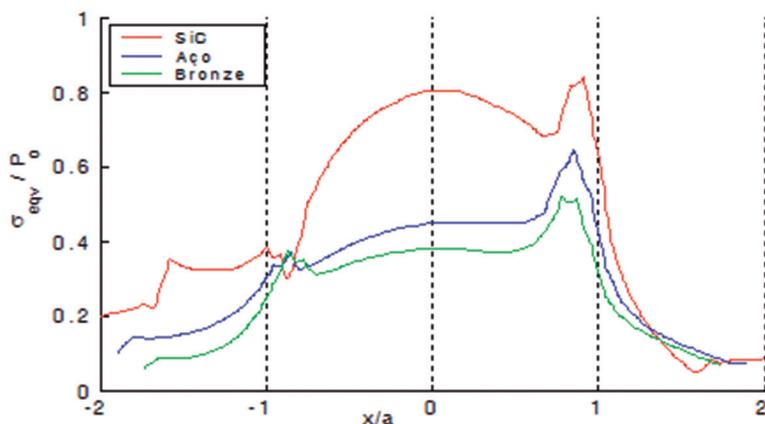


Figura 5.27 Cálculo de σ_{eqv} ao longo da superfície de contato dos sólidos para uma espessura de revestimento $h=0.032\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

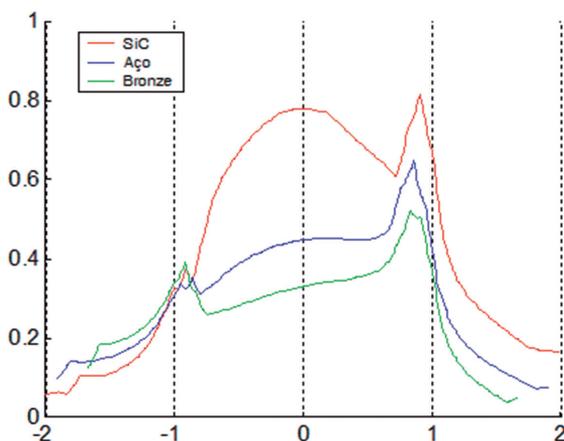


Figura 5.28 Cálculo de σ_{eqv} ao longo da superfície de contato dos sólidos para uma espessura de revestimento $h=0.224\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

A influência da espessura do revestimento nos resultados obtidos para a tensão equivalente de von Mises calculada sobre a superfície de contato, como se vê nas Figuras 5.26 e 5.27, não parece ser importante. Entretanto, chama a atenção

os fortes gradientes na entrada do contato ($x/a = -1$) e, principalmente, na saída do contato ($x/a = 1$). Isso pode remeter a uma interpretação interessante sob a óptica da transferência de energia: essa transferência sobre a superfície de contato parece se dar de uma forma muito menos suave que as regiões inferiores à superfície de contato, como o interior do revestimento e a interface do revestimento com o substrato, cujos gradientes são bem mais suaves (ver Figuras 5.23 a 5.26).

Ainda que a Tabela 5.6 indique que a máxima tensão equivalente para o revestimento em bronze ocorra na interface do revestimento com o substrato para a menor espessura de revestimento e no interior do revestimento para o caso da maior espessura do revestimento, essa constatação parece interessante no que tange ao aspecto de transferência de energia de um corpo ao outro. Sobretudo ao se analisar o caso do material homogêneo em aço cuja ocorrência da máxima tensão equivalente se dá justamente na superfície de contato dos dois corpos (Tabela 5.8).

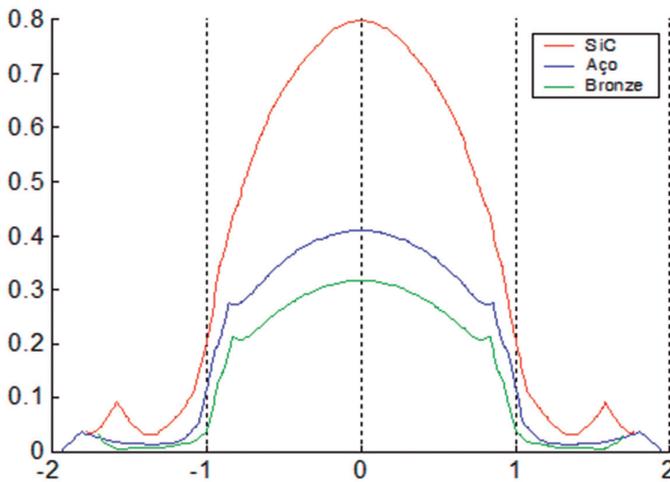


Figura 5.29 Cálculo de σ_{eqv} ao longo da superfície de contato dos corpos, para um coeficiente de atrito $\mu = 0.0$ e $h = 0.064\text{mm}$.

Relativamente à Figura 5.29, observa-se que os maiores valores da tensão equivalente se encontram dentro da largura de contatos, mas sem que os resultados fora dessa região sejam nulos.

Quanto ao caso em que o coeficiente de atrito é igual 0.5, na Figura 5.30, percebe-se que o bronze tem uma característica de proteção à superfície melhor que os demais revestimentos.

Vale ressaltar também os importantes gradientes desse parâmetro na entrada da região do contato, $x/a = -1$, e, sobretudo, na saída do contato, $x/a = 1$, indicando uma posição de risco de falha.

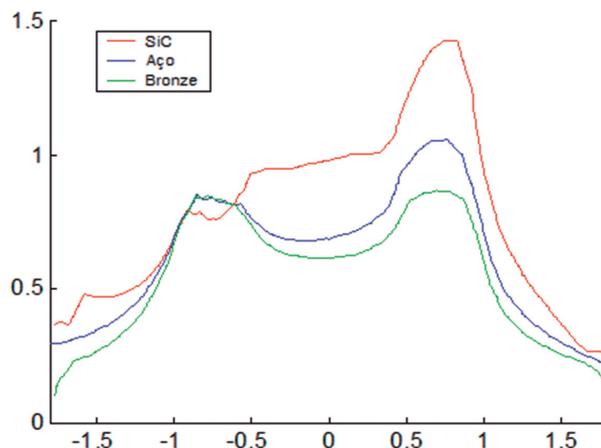


Figura 5.30 Cálculo de σ_{eqv} ao longo da superfície de contato dos corpos, para um coeficiente de atrito $\mu = 0.50$ e $h = 0.064\text{mm}$.

5.6 RESULTADOS OBTIDOS NA FORMA DE CONTORNOS DA TENSÃO EQUIVALENTE E DA PRIMEIRA TENSÃO PRINCIPAL

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 disponíveis a seguir, nesta ordem, respectivamente:

5.6.1 Cálculo de σ_1

A comparação dos resultados obtidos nas Figuras 5.31 e 5.32 indicam que um aumento na espessura do revestimento cerâmico SiC, nas condições acima resulta na ocorrência de uma região próxima à interface do revestimento e substrato, onde há tensões trativas que poderão ser importantes em um mecanismo de falha que pode resultar numa perda de aderência interfacial. Outra constatação mais importante ainda que as tensões trativas na interface é a ocorrência do máximo valor de σ_1 na superfície de contato (ver Tabela 5.4), em maior valor ainda, curiosamente, para a menor espessura que para a maior espessura desse revestimento.

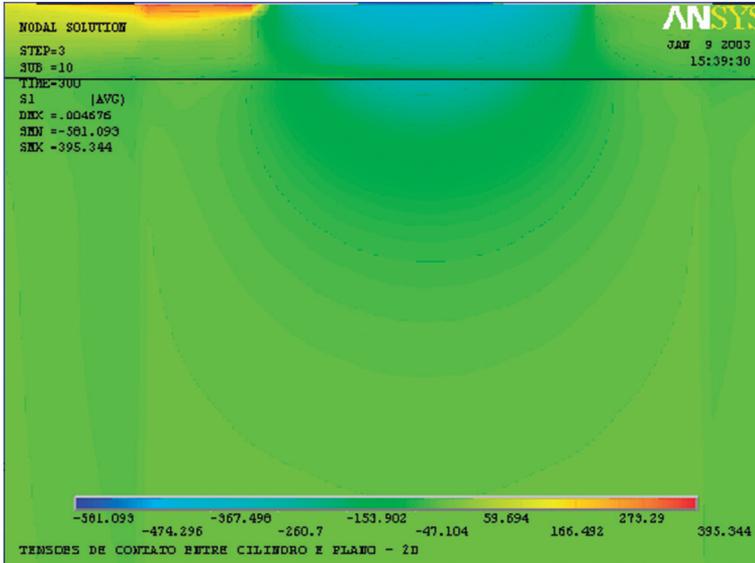


Figura 5.31 Contorno de σ_1 para o SiC como revestimento, com $h=0.032\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

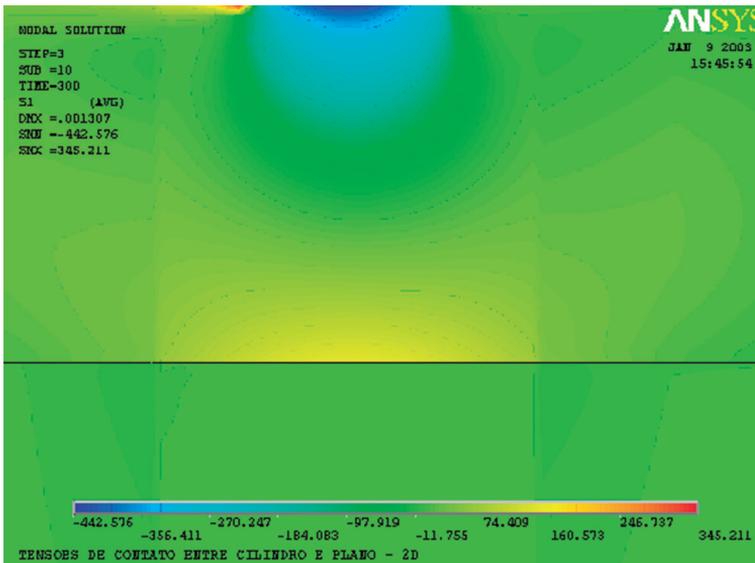


Figura 5.32 Contorno de σ_1 para o SiC como revestimento, com $h=0.224\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

A propósito das Figuras 5.33 e 5.34 a seguir, pode-se visualizar também, para o caso do maior atrito, a mesma região anteriormente descrita de tensões tratativas nas proximidades da interface do revestimento. Entretanto, são de valores bem maiores os resultados que ocorrem na superfície de contato (Figura 5.32), corroborando os registros desses resultados na Tabela 5.5:

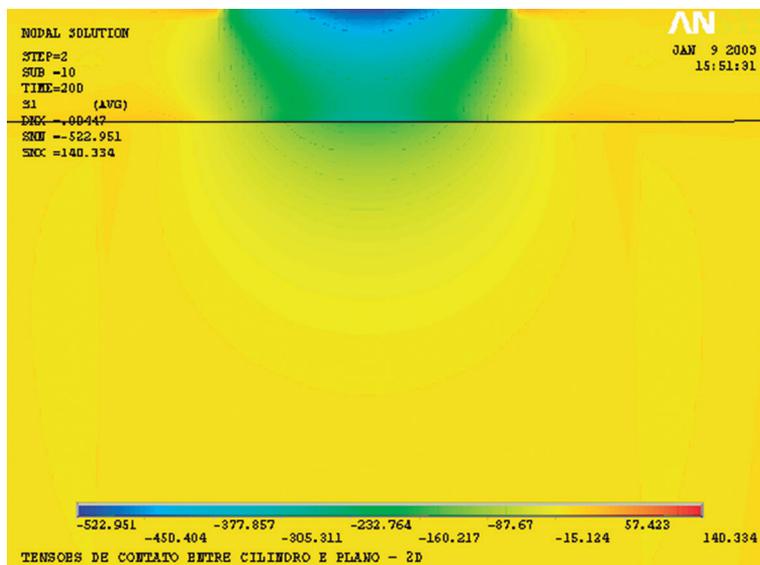


Figura 5.33 Contorno de σ_1 para o SiC como revestimento, com $\mu = 0.0$ e $h=0.064\text{mm}$.

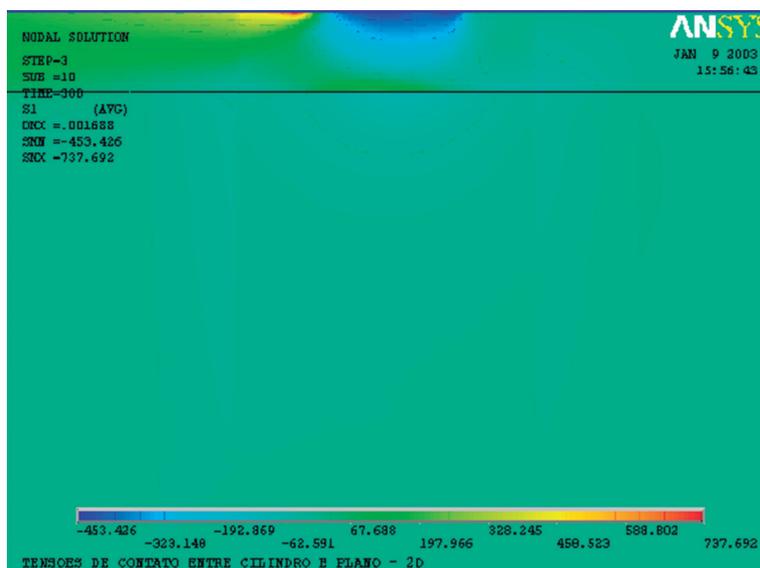


Figura 5.34 Contorno de σ_1 para o SiC como revestimento, com $\mu = 0.50$ e $h=0.064\text{mm}$.

5.6.2 Cálculo de σ_{eqv}

Material do revestimento: bronze.

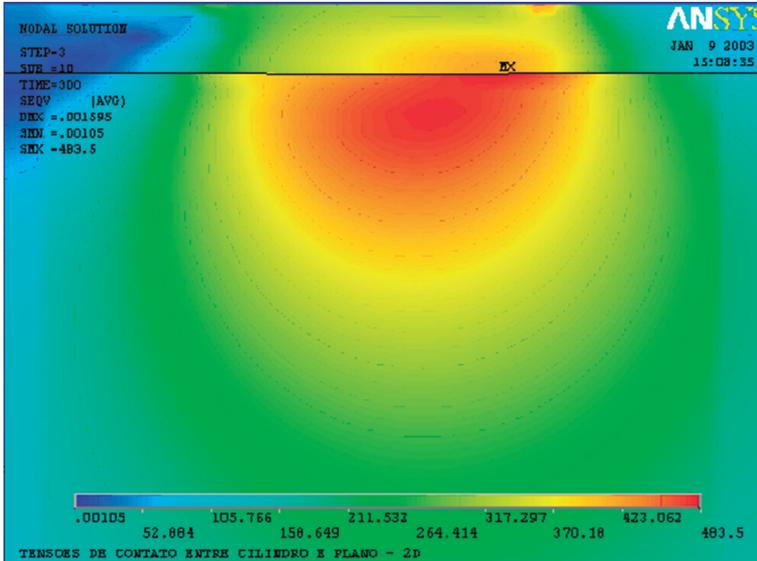


Figura 5.35 Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $h=0.032\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

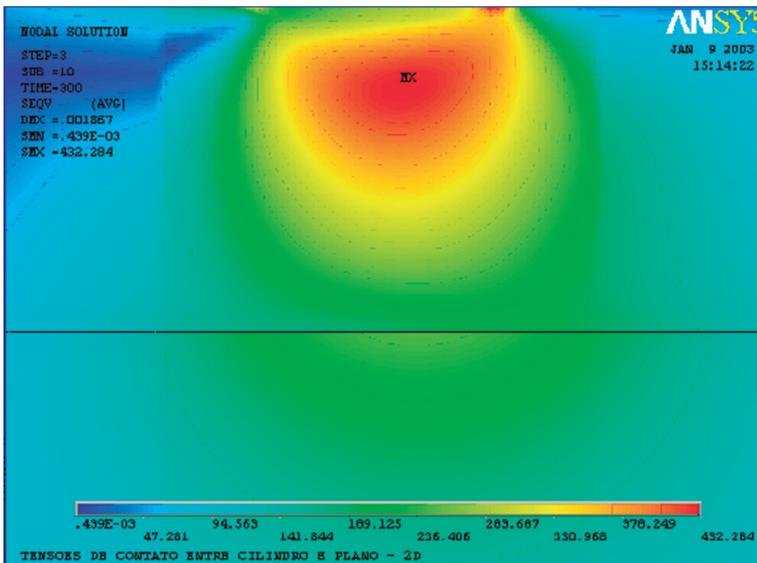


Figura 5.36 Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $h=0.224\text{mm}$ e $\mu = 0.2$.

O processo de deformação plástica que induzirá à formação de trincas decorrentes da interação de discordâncias pode ser avaliado pelo cálculo da tensão equivalente de von Mises, cujos contornos estão nas Figuras 5.35 a 5.38 (bronze) e em 5.39 a 5.40 para o aço.

Fica evidente nas Figuras 5.35 e 5.36 que um aumento na espessura do revestimento em bronze propicia um afastamento da região de altos valores de σ_{eqv} da interface do revestimento e substrato em direção ao interior do revestimento. Essa observação parece importante quando se tem em mente a importância de se proteger o substrato de danos indesejáveis.

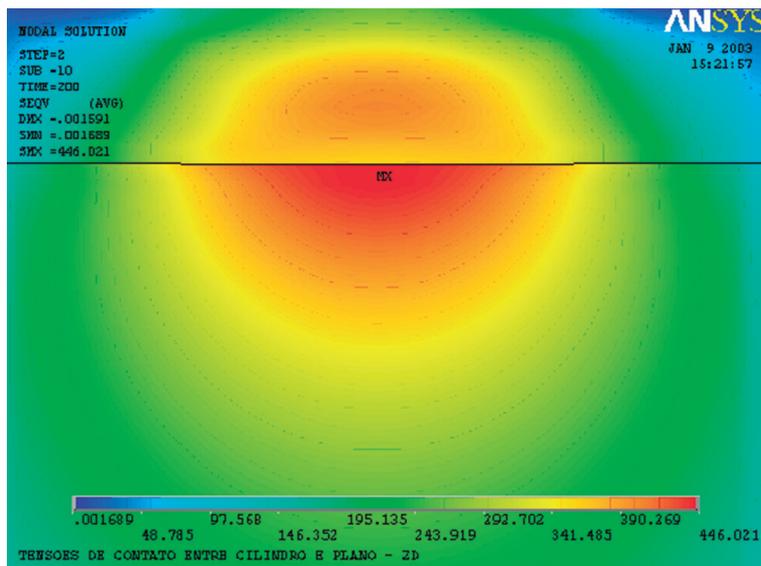


Figura 5.37 Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $\mu = 0.00$ e $h=0.064$ mm.

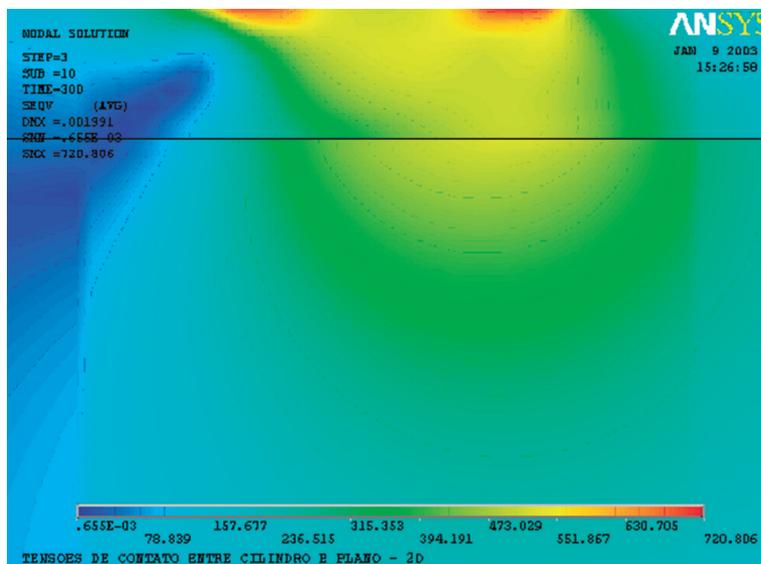


Figura 5.38 Contorno de σ_{eqv} para o bronze como revestimento, com $\mu = 0.50$ e $h=0.064$ mm.

Ainda relativamente ao revestimento em bronze, os resultados das Figuras 5.37 e 5.38 indicam que o revestimento em bronze é mais eficaz neste aspecto de proteção ao substrato quando há ocorrência de atrito (Figura 5.38, $\mu = 0.50$). Nesse último caso, percebe-se que a região de máxima tensão equivalente, que ocorria na interface do revestimento com o substrato para $\mu = 0$, agora passa a ser na superfície de contato dos sólidos.

- Material do revestimento: aço.

Embora em níveis de tensão equivalente mais elevados, o comportamento do aço em questão é similar ao do bronze uma vez que se constata que, para o menor atrito (Figura 5.39), a ocorrência da máxima tensão equivalente é na interface do revestimento com o substrato.

Para o maior atrito, entretanto, ainda que a região de ocorrência de máxima tensão equivalente, tanto para o revestimento em bronze quanto para o revestimento em aço, seja na superfície (Figura 5.40), há uma microrregião mais pronunciada na saída do contato do revestimento em aço e duas para o revestimento em bronze (na entrada e na saída do contato).

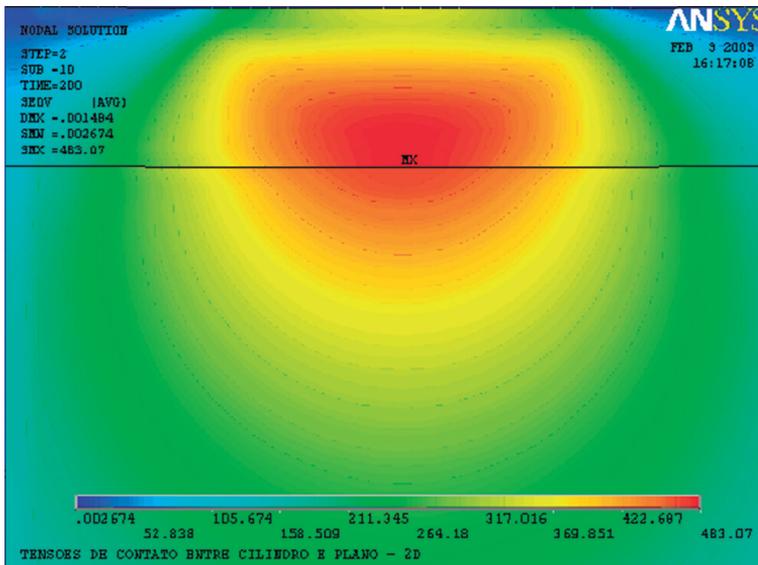


Figura 5.39 Contorno de σ_{eq} para o material homogêneo em aço, com $\mu = 0.00$ e $h = 0.064\text{m}$

As Figuras 5.2-a e 5.2-b já contemplam os resultados dos contornos para os casos da maior e menor espessuras de revestimento em aço de um substrato do mesmo material, em que se estudou o comportamento do modelo para o caso do material homogêneo em aço.

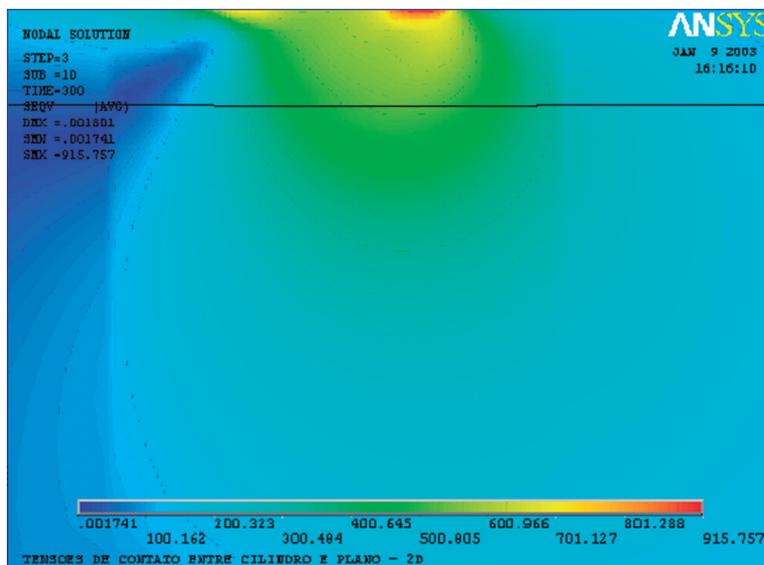


Figura 5.40 Contorno de σ_{eqv} para o material homogêneo em aço, com $\mu = 0.50$ e $h = 0.064m$.

5.7 A RELAÇÃO ENTRE A LARGURA DE CONTATO E A DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO PARA OS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS DO REVESTIMENTO

Com o objetivo de averiguar os resultados obtidos pelo MEF e estudar a relação entre a distribuição de pressão e a largura de contato, os gráficos desses dois parâmetros, referentes ao maior e ao menor atrito e à maior e menor espessura de revestimento, foram plotados nas Figuras 5.41 a 5.44:

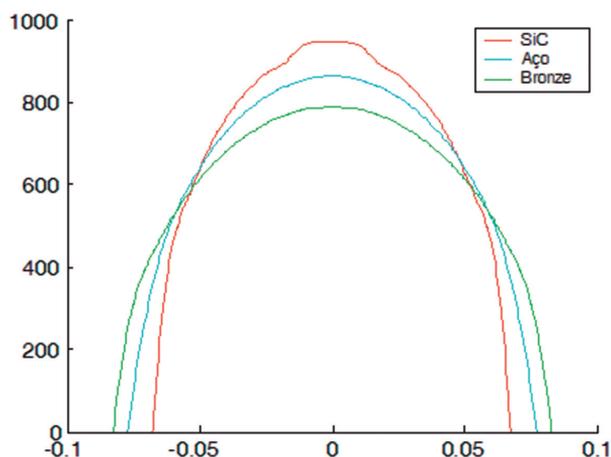


Figura 5.41 Distribuição de pressão ao longo do contato para os três revestimentos, para $\mu = 0$ e $h = 0.064$ mm.

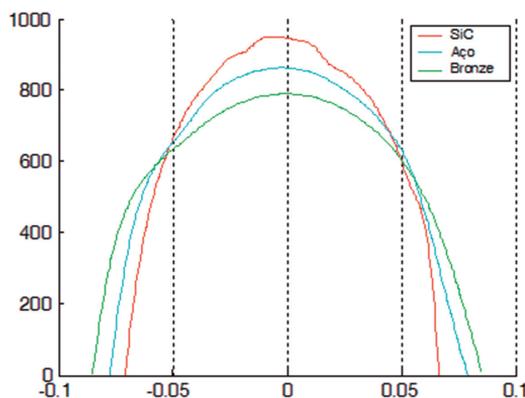


Figura 5.42 Distribuição de pressão ao longo do contato para os três revestimentos, sendo $\mu = 0.50$ e $h = 0.064$ mm.

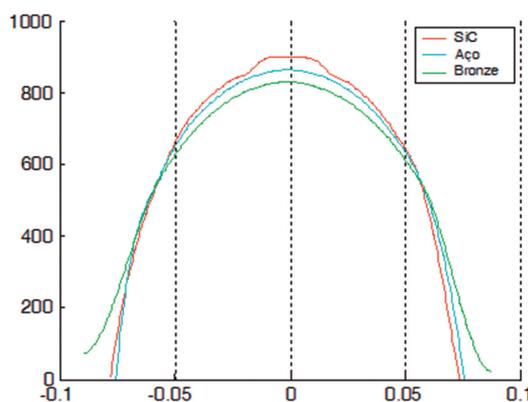


Figura 5.43 Distribuição de pressão ao longo do contato para os três revestimentos, sendo $h = 0.032$ mm e $\mu = 0.20$.

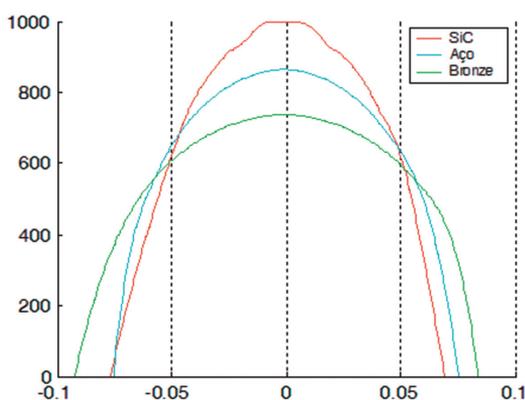


Figura 5.44 Distribuição de pressão ao longo do contato para os três revestimentos, sendo $h = 0.224$ mm e $\mu = 0.20$.

Da observação dos resultados obtidos pelo MEF e plotados nas Figuras 5.41 a 5.44, é imediata a constatação de que quanto maior o módulo de elasticidade do revestimento, menor a área de contato e mais altos os valores da pressão de contato. Ainda que as áreas abaixo de cada uma das três curvas devam ser todas constantes e numericamente iguais à carga de compressão concentrada sobre o indentedor cilíndrico, de 100 N, analiticamente obtida pela equação 5.7.1:

$$\int_{-a}^{+a} p(x) dx = 100 \quad (5.7.1)$$

Em que pese não se ter uma malha suficientemente refinada para se conseguir a sensibilidade necessária na detecção de uma relação mais ajustada entre a largura e a máxima pressão de contato (P_0) para os diferentes materiais do revestimento (variando-se espessura da camada e coeficiente de atrito), as Tabelas 5.9 a 5.12 trazem esses resultados obtidos pelo MEF:

- **Material do revestimento: SiC.**

Tabela 5.9 Pressão máxima de contato *versus* largura de contato, para cada espessura de revestimento. Resultados obtidos pelo MEF

| Espessura h do revestimento (mm) | Pressão máxima de contato (Mpa) | Largura de contato |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 0.032 | 900.48 | 0.1440 |
| 0.064 | 947.01 | 0.1440 |
| 0.096 | 972.82 | 0.1380 |
| 0.128 | 985.51 | 0.1380 |
| 0.160 | 992.31 | 0.1320 |
| 0.192 | 996.30 | 0.1320 |
| 0.224 | 997.39 | 0.1320 |

Tabela 5.10 Pressão máxima de contato *versus* largura de contato, para cada coeficiente de atrito. Resultados obtidos pelo MEF

| Coefficiente de atrito (μ) | Pressão máxima de contato (Mpa) | Largura de contato |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 0.0 | 947.08 | 0.1440 |
| 0.05 | 947.08 | 0.1440 |
| 0.10 | 947.07 | 0.1440 |
| 0.20 | 947.01 | 0.1440 |
| 0.30 | 947.62 | 0.1440 |
| 0.40 | 948.61 | 0.1440 |
| 0.50 | 949.49 | 0.1440 |

- Material do revestimento: bronze.

Tabela 5.11 Pressão máxima de contato *versus* largura de contato, para cada espessura de revestimento. Resultados obtidos pelo MEF

| Espessura h do revestimento (mm) | Pressão máxima de contato (Mpa) | Largura de contato |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 0.032 | 828.54 | 0.1725 |
| 0.064 | 789.92 | 0.1725 |
| 0.096 | 765.25 | 0.1800 |
| 0.128 | 751.40 | 0.1800 |
| 0.160 | 743.33 | 0.1800 |
| 0.192 | 738.35 | 0.1800 |
| 0.224 | 735.11 | 0.1800 |

Tabela 5.12 Pressão máxima de contato *versus* largura de contato, para cada espessura de revestimento. Resultados obtidos pelo MEF

| Coefficiente de atrito (μ) | Pressão máxima de contato (Mpa) | Largura de contato |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 0.0 | 790.10 | 0.1800 |
| 0.05 | 790.02 | 0.1725 |
| 0.10 | 789.92 | 0.1725 |
| 0.20 | 789.78 | 0.1725 |
| 0.30 | 789.75 | 0.1725 |
| 0.40 | 790.01 | 0.1725 |
| 0.50 | 790.09 | 0.1725 |

- Material do revestimento: aço.

Tabela 5.13 Pressão máxima de contato *versus* largura de contato, para cada espessura de revestimento. Resultados obtidos pelo MEF

| Espessura h do revestimento (mm) | Pressão máxima de contato (Mpa) | Largura de contato |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 0.032 | 862.96 | 0.07875 |
| 0.224 | 862.67 | 0.07875 |

Tabela 5.14 Pressão máxima de contato *versus* largura de contato, para cada espessura de revestimento. Resultados obtidos pelo MEF

| Coeficiente de atrito (μ) | Pressão máxima de contato (Mpa) | Largura de contato |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 0.0 | 863.4 | 0.07875 |
| 0.05 | 863.1 | 0.07875 |
| 0.10 | 862.9 | 0.07875 |
| 0.20 | 862.6 | 0.07875 |
| 0.30 | 862.5 | 0.07875 |
| 0.40 | 862.2 | 0.07875 |
| 0.50 | 863.1 | 0.07875 |

Os resultados nas tabelas anteriores indicam que há uma certa tendência nos revestimentos não homogêneos de variarem a pressão máxima de contato (P_0) ao serem alteradas as espessuras desses revestimentos. Isso não ocorre relativamente ao parâmetro do coeficiente de atrito. Entretanto, o material homogêneo em aço manteve sempre os mesmos valores da largura de contato, independentemente dos resultados obtidos para os máximos valores de P_0 , cujos resultados foram sempre muito próximos.

