



I Simpósio Gaúcho de Engenharia Aeroespacial e Mecânica
9 e 10 de novembro de 2022, Santa Maria, RS, Brasil

ANÁLISE NUMÉRICA DA INDENTAÇÃO DE MATERIAIS REVESTIDOS

Pedro Henrique Casarin Camardelo

UFSM Av. Roraima nº 1000 Cidade Universitária Bairro - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-900
pedro.camardelo@gmail.com.

Bruno Leonardo Schuster

ITA Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, São José dos Campos - SP, 12228-900
brunoleonardoschuster@hotmail.com.

Tiago dos Santos

UFSM Av. Roraima nº 1000 Cidade Universitária Bairro - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-900
tsantos.mec@gmail.com.

Resumo. O ensaio de indentação possui grande importância na caracterização mecânica de materiais de engenharia. O objetivo do presente trabalho foi produzir um modelo para realização de análise numérica da indentação de corpos de prova com revestimento, assim como a realização de diversas análises visando compreender o comportamento apresentado a partir de variações em determinados parâmetros dos materiais. As simulações foram realizadas utilizando o método dos elementos finitos, empregando o software comercial Abaqus, onde um modelo computacional de análise de corpos de prova sem revestimento foi utilizado como base para a produção do modelo utilizado no trabalho. A partir da modificação desse modelo para permitir a análise de corpos revestidos e validação dele foram realizadas variações paramétricas nas propriedades dos materiais. As principais variações realizadas foram no módulo de elasticidade e na tensão de escoamento do revestimento. Com os resultados obtidos, foram feitas discussões, assim como comparações com simulações similares presentes em um artigo de referência.

Palavras-chave: Elementos finitos, indentação mecânica, revestimento, caracterização mecânica.

1. INTRODUÇÃO

Um teste de indentação consiste em pressionar um indentador em um corpo de prova com uma carga pré-determinada e mensurar a profundidade de penetração obtida, visando obter dados das propriedades mecânicas dos materiais do corpo de prova. Os indentadores utilizados nesses testes possuem formas variadas, sendo os mais comuns os de geometria esférica (Brinell), cônica (Rockwell) e piramidal (Vickers).

De acordo com Gamonpilas *et al.* (2003), ensaios de indentação vêm sendo muito utilizados para determinar propriedades de substratos e de revestimentos finos. Para obter propriedades do revestimento a partir de métodos de indentação, é necessário que não ocorra comportamento plástico no substrato, visto que esse comportamento teria influência nas propriedades obtidas. De acordo com Tunvist *et al.* (2002), é comum utilizar um limite de indentação de um décimo da espessura do revestimento

para evitar que a curva de indentação seja afetada pela deformação do substrato.

No presente trabalho, um modelo computacional de análise de indentação de materiais revestidos será produzido, e serão realizadas algumas variações paramétricas com objetivo de compreender o comportamento do substrato e do revestimento e verificar a validade dessa hipótese utilizada.

2. MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional foi produzido no *software* Abaqus, onde o modelo proposto por Schuster (2022) foi utilizado como base. Ele consiste em um cilindro e um indentador cônico com simetria axissimétrica cuja representação bidimensional pode ser observada na Fig 1.



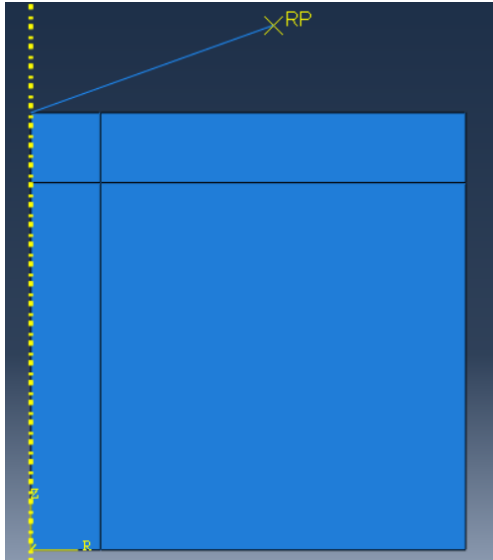


Figura 1. Modelo utilizado como base.

O ângulo do indutor é de $70,3^\circ$, escolhido para representar um indutor Vickers. As partições são utilizadas para permitir um refinamento da malha mais próxima ao contato. A partir desse modelo, foram realizadas modificações de modo a permitir a inserção de revestimento no corpo de prova. Na Fig. 2, o modelo produzido pode ser observado.

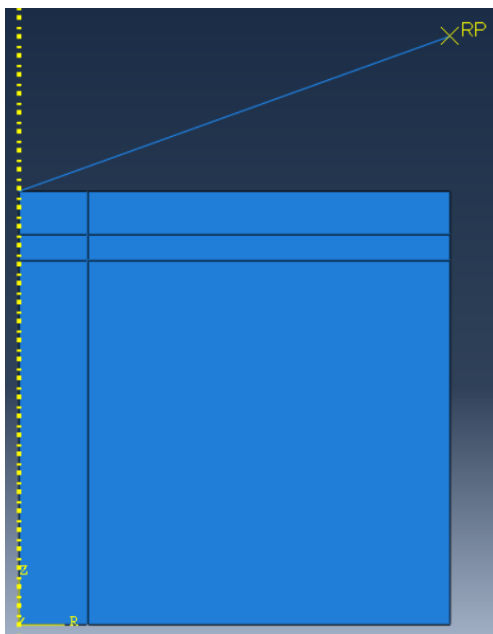


Figura 2. Modelo modificado.

A principal mudança foi a adição de uma linha para dividir o substrato do revestimento, permitindo a seleção de materiais diferentes para cada parte. Com o modelo produzido, foi realizada uma análise de convergência para determinar a malha que seria utilizada para as simulações. Foram utilizados 142 elementos RAX2 para o indutor e 2266 elementos CAX4 para o corpo de prova.

Após a análise de convergência, foram realizadas variações paramétricas na razão entre os módulos de elasticidade do revestimento e do substrato ($0,5 \leq E_c/E_s \leq 2$) e na razão entre a tensão de escoamento do revestimento e o módulo de elasticidade do substrato ($0,001 \leq \sigma_c/E_s \leq 0,05$). Para simplificar a análise inicial, o coeficiente de Poisson de ambos os materiais foi mantido em 0,3, o módulo de elasticidade do substrato foi mantido em 200GPa e a tensão de escoamento do substrato foi mantida em 530Mpa. Para todos os casos, foi mantida uma indentação de um décimo da espessura do revestimento, visando obter resultados que permitam verificar a validade da regra citada por Tunvist *et al* (2002).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na fig. 3, fig. 4, fig. 5 e fig. 6 os resultados obtidos podem ser observados.

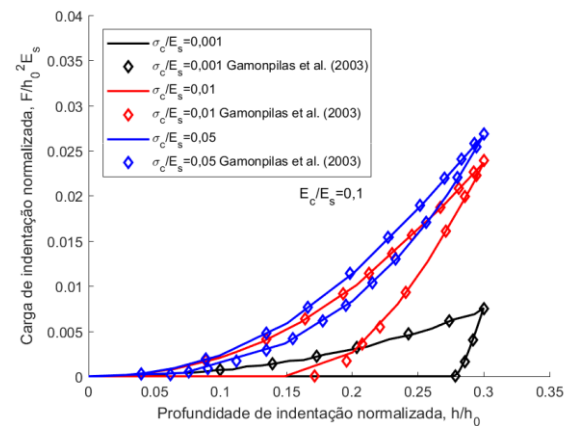


Figura 3. Efeito da variação da razão σ_c/E_s para $E_c/E_s = 0,1$.

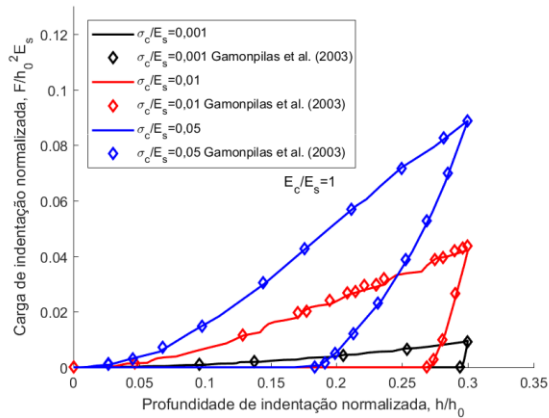


Figura 4. Efeito da variação da razão σ_c/E_s para $E_c/E_s = 1$.

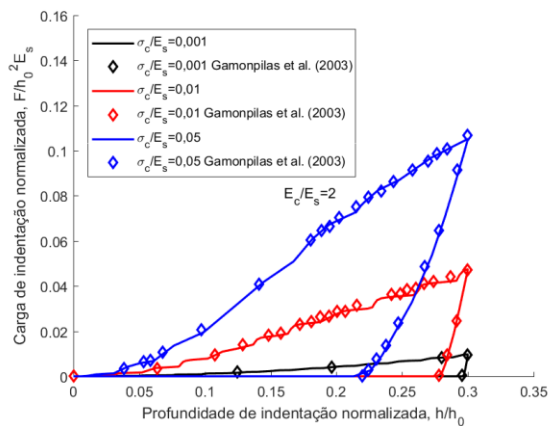


Figura 5. Efeito da variação da razão σ_c/E_s para $E_c/E_s = 2$.

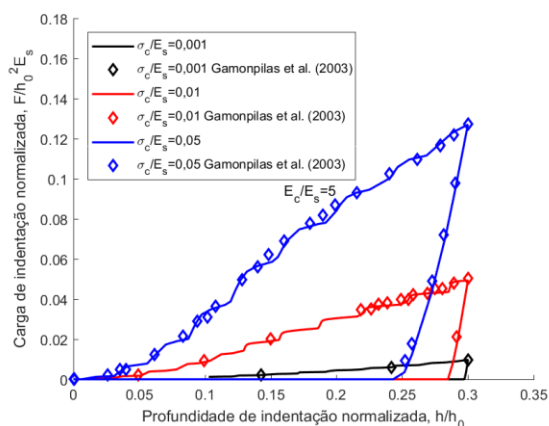


Figura 6. Efeito da variação da razão σ_c/E_s para $E_c/E_s = 5$.

Nota-se que conforme a razão E_c/E_s foi sendo aumentada, foi ocorrendo uma inflexão da curva de carregando, comportamento que não é comum para materiais não revestidos. Isso indica que a regra de indentação inferior a um décimo da espessura do revestimento não pode ser aplicada em todos os casos, visto que nas análises realizadas houve influência da deformação plástica do substrato. Ao comparar os dados obtidos no presente trabalho com os dados obtidos por Gamonpilas *et al.* (2003) nota-se grande concordância, o que aponta que o modelo produzido está apresentando resultados coerentes.

4 CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas, pode-se tomar como uma conclusão preliminar que a regra de considerar que indentações menores que um décimo da espessura do revestimento são suficientes para evitar influência do substrato na caracterização mecânica de revestimentos finos não pode ser aplicada para todos os casos. Para trabalhos futuros, a realização de mais análises com outras variações paramétricas pode ser realizada com o objetivo de identificar melhor em quais casos essa regra pode ser aplicada, assim como de determinar a profundidade limite para cada caso.

5. REFERÊNCIAS

GAMONPILAS, Chaiwut; BUSO, Esteban P. On the effect of substrate properties on the indentation behaviour of coated systems. *Materials Science and Engineering: A*, v. 380, n. 1-2, p. 52-61, 2004.

SCHUSTER, Bruno Leonardo. Análise numérica da indentação de materiais elastoplásticos. 2022.

TUNVISUT, K. et al. Determination of the mechanical properties of metallic thin films and substrates from indentation tests. *Philosophical Magazine A*, v. 82, n. 10, p. 2013-2029, 2002.