

Desenvolvimento e Validação de um Modelo em Elementos Finitos para Simulação do Ensaio de Macroindentação Instrumentada

Vitor Alberto Lemes Monteiro, Sônia Aparecida Goulart Oliveira.

*Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (FEMEC-CIMNE), vitoralbertoteles@hotmail.com

Palavras-chave

Macroindentação, elementos finitos, *pile-up*, *sink-in*, complacência

1. INTRODUÇÃO

Em diversas ocasiões, as características dos materiais de determinados componentes utilizados na indústria tais como constituição (ex.: composição química e processo de fabricação) e propriedades mecânicas (ex.: limite de escoamento, limite de resistência e dureza), por algum motivo, não são conhecidas. Este é o caso de muitas estruturas empregadas na indústria de óleo e gás, dutos e tubulações, que, em geral, utilizam aço. Este fato dificulta a avaliação da integridade estrutural dos componentes, levando à utilização de métodos de avaliação mais complexos e onerosos que, muitas vezes, incluem a interrupção da operação de máquinas, ocasionando queda nos rendimentos financeiros da produção.

O ensaio de macroindentação instrumentada é realizado de forma rápida e obtém-se, com boa aproximação, as propriedades mecânicas de tração dos materiais metálicos de equipamentos, com a grande vantagem de não ser necessária a retirada de amostras e, por esta razão, sem necessidade de interrupção dos equipamentos (Ramos Neto et al. 2004). O ensaio consiste na indentação controlada sobre a superfície do componente a ser ensaiado usando um penetrador, através do carregamento e do descarregamento em um mesmo ponto. Como resultado do ensaio, obtém-se a curva “força x deslocamento”. Quando o ensaio é realizado com o registro contínuo dos valores da força aplicada e da profundidade de penetração, por meio de sensores, dá-se o nome de indentação instrumentada (Vanlandingham, 2003). O ensaio é realizado usando um equipamento, que pode ser portátil, de macroindentação, como no exemplo da Figura 1.



Figura 1: **(a)** Determinação de propriedades mecânicas de tração *in situ* em um duto de escoamento de petróleo utilizando um macroindentador portátil (Franco, 2007). **(b)** Posicionamento do penetrador e do sensor de deslocamento sobre a amostra (Ferreira, 2010).

2. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O desenvolvimento de um modelo computacional que realize a simulação do ensaio de macroindentação instrumentada e retorne resultados precisos da curva “força x deslocamento” e outras características do ensaio é de extrema relevância. Pois, permite a identificação de possíveis erros e inadequações provenientes do ensaio experimental, direcionar estudos relacionados ao fenômeno de *pile-up* e *sink-in* (Rodríguez Pulecio, 2010) com diferentes condições impostas e a avaliar a complacência (Karthik et al., 2012) dos equipamentos utilizados em ensaios experimentais.

A Figura 2 mostra alguns detalhes do modelo desenvolvido para a simulação dos ensaios de macroindentação, como geometria da amostra, regiões de interesse e grau de refinamento da malha nessas regiões.

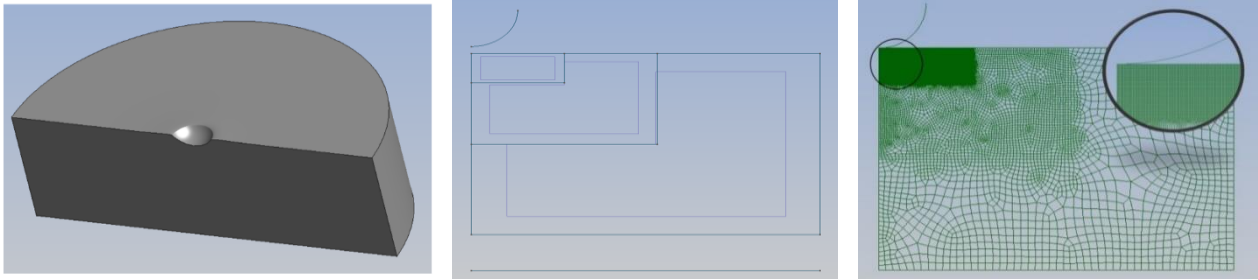


Figura 2: Detalhes do modelo. **(a)** Vista em corte da amostra no modelo computacional. **(b)** Representação 2D axissimétrica do indentedor, amostra e suas regiões e a base fixa do ensaio. **(c)** Detalhe do grau de refinamento nas regiões da amostra para o modelo.

2.1. Comparação com trabalhos da literatura

Um dos trabalhos utilizados para validação do modelo com a análise dos resultados foi o artigo de Karthik et al. (2012). Os autores do trabalho apresentaram resultados para as amostras de Aço 9Cr-1Mo e de Aço Inoxidável AISI 316, portanto, apenas esses dois materiais foram abordados no presente trabalho.

Inserindo as mesmas condições de operação, propriedades e forças de indentação do artigo no modelo feito no software Stampack®, pôde-se realizar a comparação representada pelas Figuras 3 e 4. As curvas obtidas de simulação das amostras de Aço 9Cr-1Mo e Aço Inox AISI 316 apresentam comportamento semelhante aos resultados do artigo de Karthik et al. (2012) e pontos importantes foram utilizados para a comparação, como complacência do equipamento, fenômenos de *pile-up* e *sink-in* e fator de atrito.

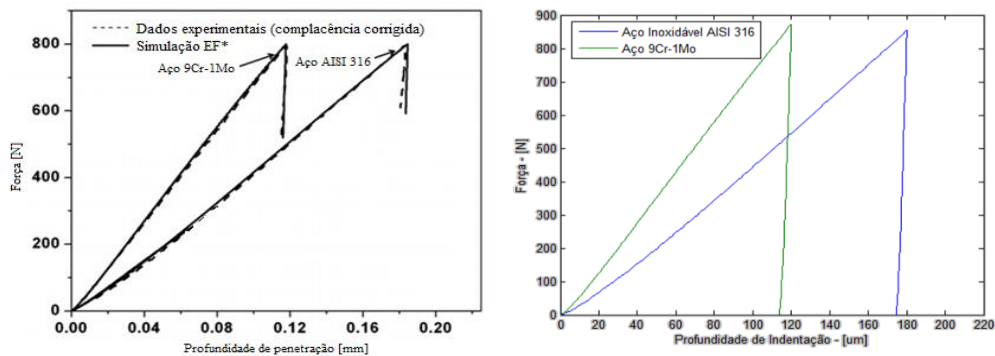


Figura 3: Comparação de resultados obtidos experimentalmente e de simulação. **(a)** Resultados obtidos por Karthik et al. (2012). **(b)** Resultados obtidos através do modelo desenvolvido no presente trabalho.

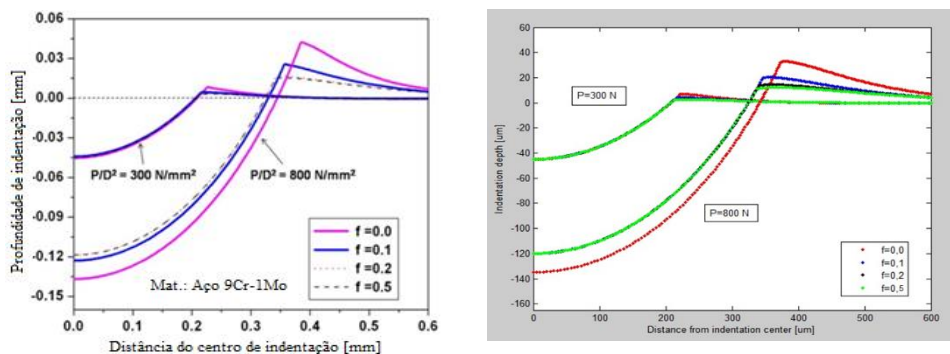


Figura 4: Perfis de indentação para diferentes coeficientes de atrito na condição carregada para o aço 9Cr-1Mo. O eixo vertical corresponde ao eixo de simetria da simulação (Centro de Indentação). Onde F/D^2 é a relação de força sobre diâmetro ao quadrado e a variável f é o coeficiente de atrito. **(a)** Resultado obtido por Karthik et al. (2012); **(b)** Resultado obtido através do modelo computacional do presente trabalho.

2.2. Comparação com Resultados de Ensaios Experimentais

Nicolosi (2015) realizou ensaios experimentais com amostras de alguns tipos de aço (denominados de A a G, na Figura 5), dentre eles o aço 9Cr-1Mo, que foi utilizado no presente trabalho para comparação com os resultados obtidos pelo modelo computacional. Essa comparação foi feita utilizando a relação de energias de deformação envolvidas durante o processo de macroindentação (Ferreira, 2010). Utilizou-se dois diâmetros de penetradores e manteve-se a relação F/D^2 (força por diâmetro ao quadrado) constante. A Figura 5 apresenta os resultados experimentais obtidos por Nicolosi (2015) e os resultados obtidos por simulação.

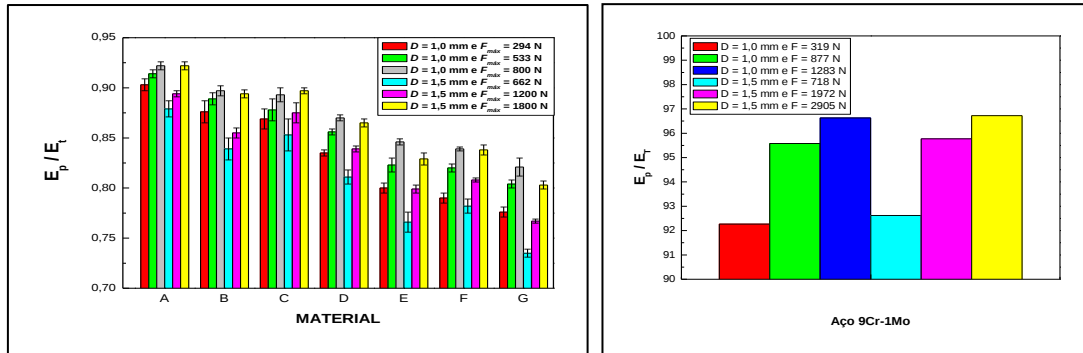


Figura 5: (a) Relação de energias de deformação para diferentes materiais ensaiados por Nicolosi (2015). (b) Resultado obtido por simulação do Aço 9Cr-1Mo.

Para cada material ensaiado por Nicolosi (2015), observou-se um padrão no comportamento de todos os materiais: para um mesmo diâmetro de penetrador, à medida que a força é aumentada, a relação de energia de deformação (E_p/E_t) também é aumentada. A relação E_p/E_t do Aço 9Cr-1Mo foi calculada e mantida nas simulações do modelo computacional a fim de avaliar-se as energias de deformação. Através dos resultados, mostrado na Fig. 5, verifica-se, para as simulações feitas com o mesmo diâmetro do indentedor, que, com o aumento da força, há o aumento da relação E_p/E_t . Além disso, ao variar-se o diâmetro (de 1,0 mm para 1,5 mm), evidencia-se que há certa diferença entre os resultados da simulação e os resultados experimentais de Nicolosi (2015). Porém, como esta diferença foi observada apenas nos resultados experimentais, pode haver alguma influência da área de contato sob o penetrador nos resultados dos ensaios quando se aumenta a força e o diâmetro.

3. CONCLUSÃO

Considera-se, portanto, que o modelo para a simulação do ensaio de macroindentação instrumentada realizado no software Stampack® é válido e reproduz bem o ensaio experimental para aços, permitindo a simulação do ensaio para estudo dos parâmetros inseridos no software e suas influências nos resultados, possibilita avaliar o comportamento dos fenômenos de *pile-up* e *sink-in* e estudar a complacência de equipamentos de ensaios experimentais.

Observou-se, com as simulações, que o coeficiente de atrito é um fator de grande influência nos resultados. Porém, na realização de ensaios com elevada força aplicada (ex.: acima de 60 N, para a liga Fe-Mn-Cu-C), coeficientes de atrito acima de 0,3 não exercem influência significativa no comportamento do ensaio.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto.

5. REFERÊNCIAS

- Ferreira, F.M.; “Avaliação Tribomecânica via Esclerometria Retilínea e Indentação Instrumentada do Aço ABNT 8550”. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- Franco, S.D. “Avaliação de Propriedades Mecânicas In Situ Através de Macroindentação Instrumentada – Parte II”. *Uberlândia: Laboratório de Tribologia e Materiais – FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia*. Relatório. 2007. 124 p.
- Karthik, V.; Visweswaran, P.; Bhushan, A.; Pawaskar, D. N.; K.V. Kasiviswanathan, K. V.; Jayakumar, T.; RAJ, B.; “Finite element analysis of spherical indentation to study pile-up/sink-in phenomena in steels and experimental validation”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 54, 2012, p. 74-83.
- Nicolosi, E.R. “Avaliação de Métodos Analíticos para Determinação de Propriedades Mecânicas de Aços Via Ensaio de Macroindentação Instrumentada”. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015, 308 p.
- Ramos Neto, F.F.; Filho, B.G.S.; Paes, M.T.P.; Franco, S.D.; “Gradientes de Propriedades Mecânicas em Estruturas de Condução de Petróleo”, In: *14º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- Rodríguez Pulecio, S.A. “Modelamento do Ensaio de Indentação Instrumentada Usando Elementos Finitos e Análise Dimensional – Análise de Unicidade, Variações Experimentais, Atrito e Geometria e Deformações do Indentador”. *Tese de Doutorado*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010, p. 44-47.
- Vanlandingham, M.R. “Review of Instrumented Indentation”. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. v. 108, n° 4, 2003, p. 249-265.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.