



Análise Numérica da Tribocorrosão em Aço Carbono Estrutural: Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo Baseado em Elementos Finitos

Pedro Bampa Leme, PPGEM - Aeronáutica, EESC-USP, pedrobleme@usp.br
Marcelo Leite Ribeiro, SAA-EESC-USP, malribei@usp.br

RESUMO EXPANDIDO

O presente trabalho tem por objetivo a simulação do processo de tribocorrosão por meio do método dos elementos finitos. O modelo desenvolvido busca prever a perda de material decorrente da ação combinada de desgaste mecânico e corrosão, permitindo quantificar a degradação em diferentes condições de operação e comparar diretamente os resultados numéricos com dados experimentais.

A formulação proposta foi implementada em uma sub-rotina de material do tipo VUMAT, desenvolvida em Fortran e integrada ao software Abaqus/Explicit. Essa integração possibilitou a execução das simulações e a visualização da evolução dos campos de dano e da perda de material ao longo do tempo, representando de forma contínua o processo de deterioração.

Foram consideradas duas relações clássicas de degradação. A taxa de penetração da corrosão foi descrita com base no desenvolvimento da Lei de Faraday (Stansbury, 2000):

$$\text{CPR} [\mu\text{m/ano}] = 0.327 \cdot \frac{M \cdot i_{corr}}{m\rho} \quad (1)$$

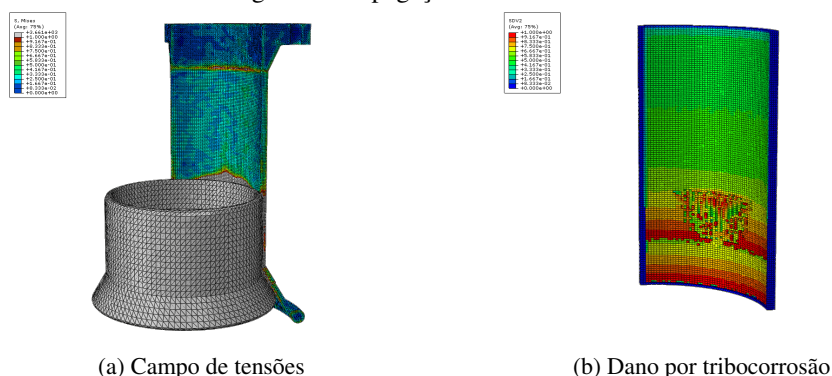
Já a remoção de material por desgaste foi modelada pela equação de Archard (Archard, 1953):

$$\frac{dV_w}{ds} = \frac{K \cdot F_N}{H} \quad (2)$$

A formulação numérica do algoritmo é estruturada a partir da mecânica do dano contínuo, na qual o volume de material degradado é convertido em um parâmetro escalar de dano, associado a cada elemento da malha (Lemaitre and Chaboche, 1990). Esse parâmetro reduz progressivamente as propriedades mecânicas do elemento e, ao atingir valor máximo, leva à sua remoção. Dessa forma, o modelo representa de maneira contínua e cumulativa a perda de rigidez e de massa do material.

A distribuição espacial do dano foi tratada com a estatística de Weibull, permitindo reproduzir padrões localizados (*pitting*) ou uniformes. Também foi considerado o efeito da proteção catódica em partes do modelo, em que a taxa de corrosão é afetada pela distância da aplicação de corrente na flange (componente superior da Figura 1a).

Figura 1: Propagação de dano na estrutura



Para reduzir a dependência da malha, adotou-se uma abordagem não local, na qual os parâmetros de evolução do dano são reavaliados com base na média ponderada dos elementos vizinhos (Ma et al., 2018). Essa técnica suaviza a resposta numérica e confere maior realismo físico aos resultados.

As simulações demonstraram a capacidade do modelo em prever a evolução da tribocorrosão. No caso apresentado (Figura 1), correspondente a um período de 30 anos, observou-se a propagação gradual do dano e a remoção contínua de



material. Foi possível visualizar a progressão dos campos de dano, quantificar a perda de massa e acompanhar a redução de rigidez estrutural ao longo do tempo. A integração da sub-rotina VUMAT ao Abaqus/Explicit mostrou-se robusta, fornecendo resultados consistentes e estabelecendo base sólida para futuras validações experimentais.

REFERÊNCIAS

- Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24:981–988.
- Lemaitre, J. and Chaboche, J.-L. (1990). *Mechanics of solid materials*. Cambridge University Press.
- Ma, S., Zhou, B., and Markert, B. (2018). Numerical simulation of the tissue differentiation and corrosion process of biodegradable magnesium implants during bone fracture healing. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 98:2223–2238.
- Stansbury, E. (2000). *Fundamentals of electrochemical corrosion*. ASM International.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado - Processo 88887.956458/2024-00.

RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.