

ASPECTOS RELEVANTES DA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE ESTRUTURAS SUJEITAS A CONTROLE PASSIVO E ATIVO DE VIBRAÇÕES

Leandro Rodrigues Cunha, LMEst, leandrorcunha@mestrado.ufu.br

Núbia dos Santos Saad, LMEst, nubia@ufu.br

Domingos Alves Rade, LMEst, domingos@ufu.br

Resumo. Este trabalho versa sobre aspectos importantes da análise de confiabilidade de estruturas sujeitas a controle ativo e passivo de vibrações, com ênfase na aplicação dos métodos de confiabilidade de primeira ordem (FORM, First Order Reliability Method) e segunda ordem (SORM, Second Order Reliability Method). Três técnicas de controle são avaliadas: controle ativo empregando atuadores piezelétricos; controle passivo por absorvedores dinâmicos de vibrações e controle passivo baseado em atuadores piezelétricos conectados a circuitos shunt ressonantes. Para cada caso, são definidas funções de estado limite que descrevem limites operacionais e/ou requisitos de projeto, cuja avaliação é baseada em respostas obtidas por meio de modelos de elementos finitos das estruturas analisadas. Para cada uma das técnicas de controle, aplicações numéricas dos métodos FORM e SORM são realizadas considerando como estrutura principal uma treliça plana. Para efeito de avaliação da precisão das estimativas de confiabilidade fornecidas por estes métodos, foram também utilizadas Simulações de Monte Carlo. A partir dos resultados, são discutidas as características específicas observadas para cada técnica de controle. Em específico, para duas delas foram identificados domínios de segurança e de falha de formas atípicas, em cujos casos, fica inviabilizado o uso dos métodos FORM e SORM. De modo geral, os resultados confirmam a importância e a conveniência de se aplicarem os métodos de análise de confiabilidade a estruturas sujeitas a procedimentos de controle de vibrações.

Palavras chave: Confiabilidade estrutural, Métodos FORM e SORM, Simulação de Monte Carlo, Controle ativo de vibrações, Controle passivo de vibrações.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo destina-se a resumir o que foi desenvolvido na dissertação de mestrado de Cunha (2013), na qual o autor trata da análise de confiabilidade de uma treliça plana sujeita a controle ativo por um atuador do tipo *stack* de pastilhas piezelétricas e sujeita a controle passivo utilizando um absorvedor dinâmico de vibrações (ADV) e o mesmo dispositivo *stack* em circuito shunt ressonante; totalizando três casos distintos analisados.

Sabe-se que a grande maioria dos sistemas em engenharia, particularmente os sistemas estruturais, está sujeita a incertezas. Muitas das variáveis desse tipo de sistema não podem ser consideradas como determinísticas. Elas têm uma natureza estocástica, e em grande parte dos casos são modeladas segundo distribuições de probabilidade padronizadas (Haldar e Mahadevan, 2000; Melchers, 1987). Dessa maneira, o estudo realizado utilizou conceitos de confiabilidade empregados em estruturas controladas passiva e ativamente.

Funções de estado limite foram definidas de maneira a caracterizar um requisito do projeto de controladores, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, com restrições relacionadas aos limites operacionais desse tipo de sistema. Torna-se indispensável avaliar a probabilidade desse tipo de sistema satisfazer os objetivos de controle, dadas as funções de densidade probabilidade para um conjunto de variáveis incertas.

2. MÉTODOS DE ANÁLISE CONFIABILIDADE

Os métodos para análise de confiabilidade estudados nesse trabalho foram: o método de confiabilidade de primeira ordem (FORM), o método de confiabilidade de segunda ordem (SORM) e a Simulação de Monte Carlo (MCS). Os dois primeiros partem do princípio da menor distância entre um sistema de coordenadas normalizado e a função de estado limite. As Equações (1) e (2) definem tal função:

$$g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0, \quad (1)$$

$$D_f = \{\mathbf{X} \mid g(\mathbf{X}) \leq 0\}, \quad (2.a)$$

$$D_s = \{\mathbf{X} \mid g(\mathbf{X}) > 0\}, \quad (2.b)$$

nas quais $\mathbf{X}$ é um vetor com n variáveis aleatórias, e D_f e D_s são os domínios de falha e de segurança, respectivamente. Essas variáveis consideradas como incertezas são modeladas de acordo com funções densidade probabilidade de distribuições de probabilidade já conhecidas, como normal e lognormal. A Figura (1) mostra esquemas dos métodos FORM e MCS.

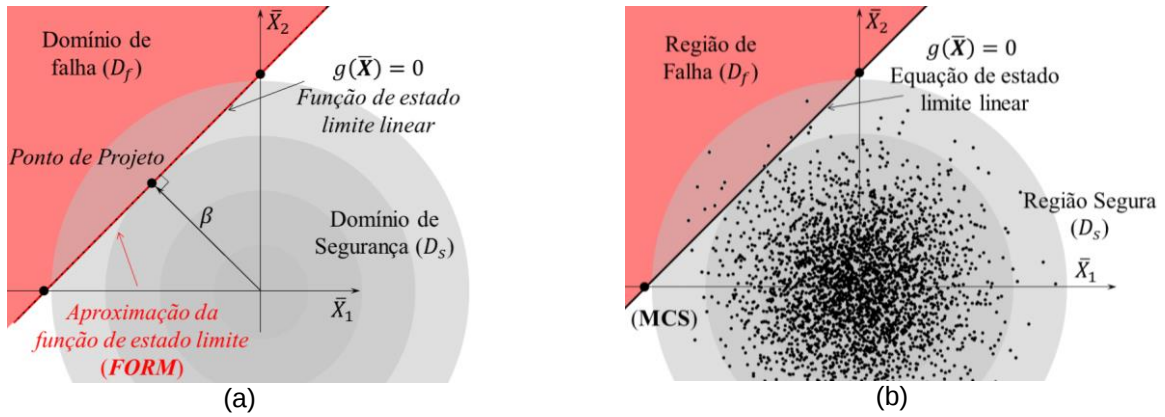


Figura 1. Esquemas do Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (a) e da Simulação de Monte Carlo (b).

De maneira resumida, os métodos *FORM* e *SORM* aproximam a função de estado limite por uma reta e por uma curva quadrática, respectivamente, e resolvem um problema de otimização para encontrar a menor distância, índice de confiabilidade, sujeito à função de estado limite igual a zero como restrição. Já a Simulação de Monte Carlo considera a amostragem das variáveis aleatórias de acordo com distribuições de probabilidade.

Nesse trabalho, não são detalhados os métodos de confiabilidade utilizados. Mais detalhes podem ser encontrados em (Cunha, 2013; Haldar e Mahadevan, 2000; Melchers, 1987).

3. EXEMPLOS NUMÉRICOS

A Figura (2) mostra os exemplos numéricos utilizados no trabalho de Cunha (2013). Foi adotado um modelo de elementos finitos do qual foram extraídas as matrizes de massa e rigidez para obtenção da equação de movimento para análise de respostas no domínio do tempo e da frequência (Kwon e Bang, 1997). Além disso, a Fig. (2.a) mostra a treliça plana com nós e elementos numerados, engastada nos nós 1 e 2. As Figuras (1.b), (1.c) e (1.d) esquematizam os sistemas de controle utilizados: controle ativo por *stack* piezelétrico, controle passivo por *ADVs* e controle passivo por *stack* piezelétrico em circuito *shunt*, respectivamente, cujas modelagens foram baseadas nos fundamentos apresentados por: Leo (2007), Den Hartog (1956) e Hagood e Von Flotow (1991).

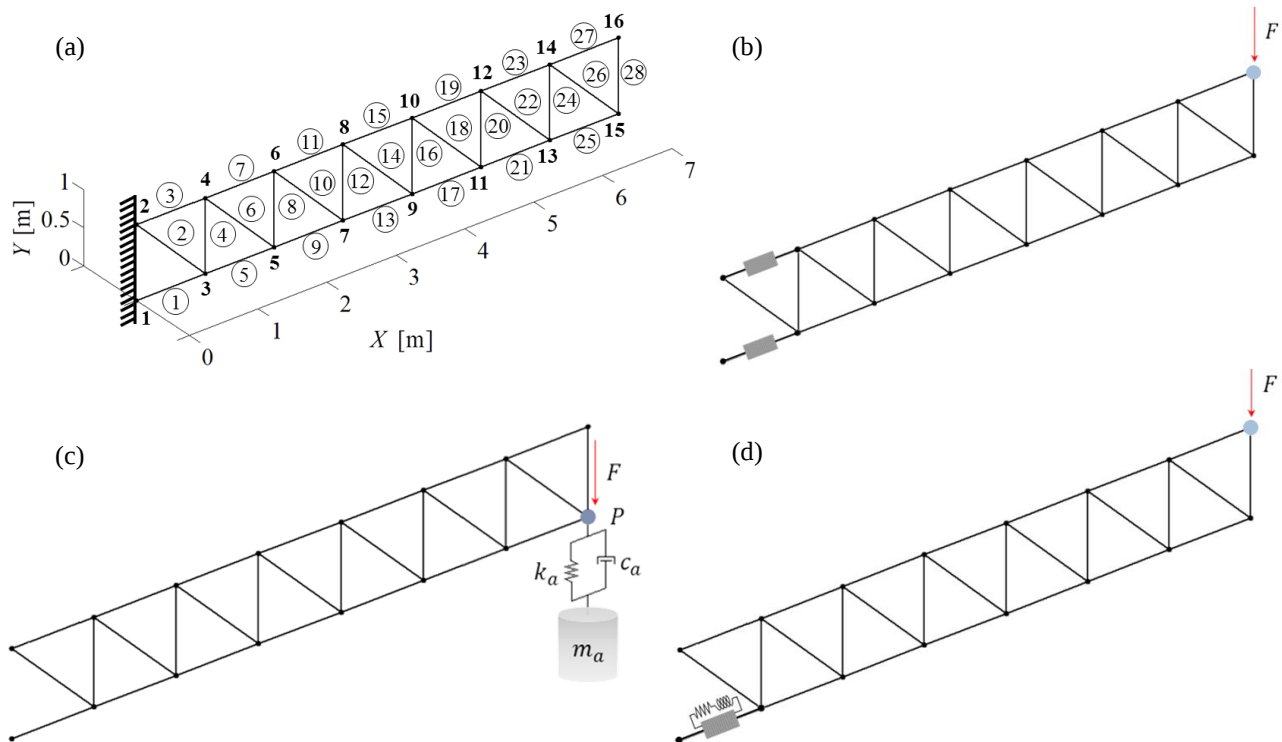


Figura 2. Estrutura utilizada para exemplo numérico (a), casos estudados 1 (b), 2 (c) e 3 (d).

Para o caso 1, foram consideradas sete variáveis aleatórias. Já para os casos 2 e 3, foram consideradas três e duas variáveis aleatórias, respectivamente. Para o caso 2, devido à convergência do método *FORM* para outro valor diferente do encontrado pela *MCS*, também foram efetuadas análises considerando somente duas variáveis aleatórias.

As incertezas que afetam os parâmetros físicos e geométricos do sistema são modeladas de acordo com funções de densidade probabilidade normais (*Gaussianas*). O método de confiabilidade de primeira ordem (*FORM*), o método de confiabilidade de segunda ordem (*SORM*) e Simulações de Monte Carlo são usados para avaliar a confiabilidade para cada função de estado limite, bem como avaliar a precisão e o esforço computacional referentes a cada método.

4. RESULTADOS

As Figuras (3.a), (3.b) e (3.c) mostram funções de estado limite atípicas para o caso 2, no qual as variáveis massa, amortecimento e rigidez foram consideradas aleatórias. Já nas Figuras (3.d) e (3.e), domínios de falha e segurança atípicos foram encontrados para o caso 3, no qual as variáveis indutância e resistência elétricas do circuito *shunt* foram consideradas aleatórias.

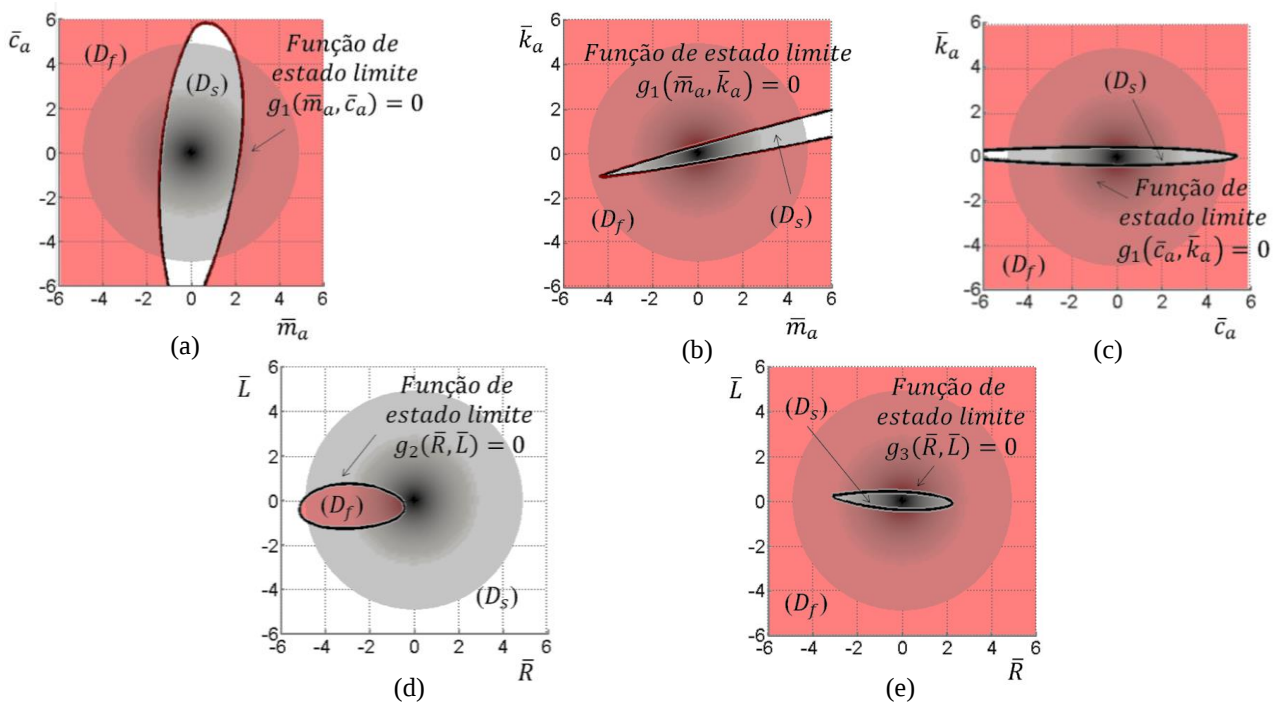


Figura 3. Funções de estado limite atípicas encontradas para caso 2, (a), (b) e (c) e para caso 3, (d) e (e).

De acordo com resultados apresentados por Cunha (2013), os métodos *FORM* e *SORM* aproximaram bem os valores das probabilidades de falha quando a função de estado limite é linear ou levemente não linear. Para casos de elevada curvatura e, conseqüentemente, elevada não linearidade, os métodos *FORM* e *SORM* não obtiveram resultados próximos dos encontrados pela Simulação de Monte Carlo.

Registra-se, também, a descoberta de funções de estado limite atípicas nas quais o domínio de segurança é cercado pelo domínio de falha, Fig. (3.a), (3.b), (3.c) e (3.e). Isso acontece devido à consideração de valores ótimos para os parâmetros aleatórios no modelo médio. No caso da Figura (3.d) nota-se também o inverso, em que o domínio de falha é cercado pelo domínio de segurança. Nesse caso, trata-se de um ponto de máximo e, como se deseja obter valores mínimos para essa função de estado limite, o inverso acontece com esses domínios.

Apesar de uma semelhança com funções de estado limite não lineares, o método *SORM*, embora apresentar maior proximidade com o resultado em relação ao método *FORM*, não consegue aproximar satisfatoriamente a confiabilidade desse sistema com presença dessas funções atípicas. Dessa maneira, torna-se necessário o uso da *MCS*, mesmo para modelos de alta complexidade e, conseqüentemente, alto custo computacional.

Embora o absorvedor dinâmico de vibrações tenha uma grande aplicabilidade, para a sua sintonização ideal são necessários valores precisos de massa, amortecimento e rigidez. Investigando-se as variáveis resistência e indutância do circuito ressonante considerado, verifica-se que, assim como o *ADV*, esse dispositivo é muito sensível aos seus parâmetros de sintonização, ficando clara a aleatoriedade dessas variáveis e mostrando que valores ótimos resultam em funções de estado limite peculiares com envolvimento de domínios.

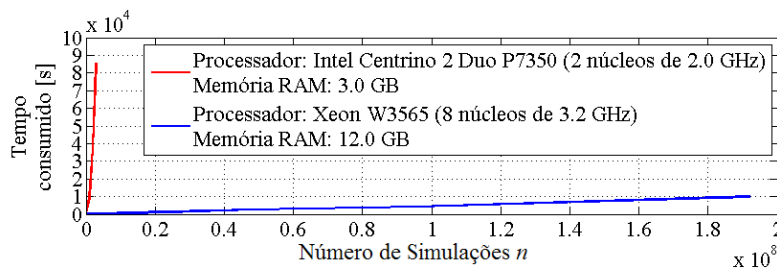


Figura 4. Comparação entre computadores utilizados para cálculo de acordo com custo computacional.

A Figura 4 mostra um comparativo de tempo consumido, durante a execução da Simulação de Monte Carlo, entre dois computadores durante a validação dos algoritmos programados para a análise de confiabilidade. Nota-se que o computador de maior velocidade, maior quantidade de núcleos e maior memória RAM forneceu resultados com menor tempo consumido. Embora o custo computacional em relação ao tempo consumido tenha sido menor, o seu investimento inicial é maior.

5. CONCLUSÕES

Constatou-se que as Simulações de Monte Carlo para essas *LSFs* apresentaram considerável custo computacional para um baixo número de amostras, enquanto os métodos *FORM* e *SORM* estimaram, com baixo erro relativo, a probabilidade de falha para duas funções de estado limite. Mesmo com um computador de última geração destinado a simulações, o ganho computacional para a *MCS* não foi tão elevado quando comparado aos métodos de confiabilidade de primeira e segunda ordens.

Sem dúvida, a Simulação de Monte Carlo (*MCS*) é o método mais confiável e de maior facilidade de implementação. Além disso, se o modelo usado para representar o fenômeno analisado for fiel às suas características mais sensíveis, e as distribuições de probabilidade representarem fidedignamente a aleatoriedade das variáveis incertas, pode-se dizer que, após a convergência, são obtidas soluções exatas. Porém, situações mais complexas podem requerer modelos com elevados números de graus de liberdade, o que exige um alto custo computacional. Nesse caso, torna-se viável o uso de métodos aproximados para estimação da probabilidade de falha como *FORM* e *SORM*. Há que se considerar, contudo, que com a evolução extremamente rápida da informática, pode-se prever que microcomputadores futuros sejam capazes de calcular modelos com alta complexidade, em tempos razoáveis.

É possível concluir que, no momento atual, cada método de confiabilidade tem suas vantagens e desvantagens que devem ser analisadas diante do tipo do problema e dos recursos disponíveis. Assim, cabe ao projetista selecionar o melhor método para obtenção da melhor solução.

6. REFERÊNCIAS

- Cunha, L.R., 2013, “Análise da Confiabilidade de Estruturas sujeitas a Controle Passivo e Ativo de Vibrações”, Uberlândia, 2013, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 78 f.
- Den Hartog, J.P., 1956, “Mechanical Vibrations”, New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 366 p.
- Hagood, N.W., Von Flotow, A., 1991, “Damping Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks, *Journal of Sound and Vibration*, n. 146, pp. 243-268.
- Haldar, A., Mahadevan, S., 2000, “Probability, Reliability and Statistical Method in Engineering Design”, New York: John Wiley & Sons, Inc., 304 p.
- Kwon, Y.W., Bang, H., 1997, “The Finite Element Method using MATLAB”. New York: CRC Press, 519 p.
- Leo, D.J., 2007, “Engineering Analysis of Smart Material Systems”, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 556 p.
- Melchers, R.E., 1987, “Structural Reliability: Analysis and Prediction”, 1. Ed., London, U.K.: Ellis Horwood Limited, 400 p.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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