

SOBRE A DETECÇÃO DE DANO BASEADA EM VIBRAÇÃO: UMA ABORDAGEM DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

DUARTE, João Gabriel da Costa de Souza¹;

ZAGO, João Gabriel²;

BARBIRATO, João Carlos Cordeiro³.

¹ Graduando, UFAL, Maceió-AL (joao.duarte@ctec.ufal.br).

² Doutorando, UFSC, Florianópolis-SC (joao.zago@posgrad.ufsc.br).

³ Doutor, UFAL, Maceió-AL (jccb@ctec.ufal.br).

Resumo. À medida que a tecnologia avança, estruturas civis tornam-se mais leves e esbeltas. Com projetos estruturais mais ousados e complexos, clássicos e novos materiais são frequentemente submetidos a cargas dinâmicas advindas de rajadas de vento, abalos sísmicos e ocupação humana. Para garantir alto nível de confiança, mitigar falhas e assegurar a segurança em estruturas sob tais condições, é necessário implementar um sistema de Monitoramento de Saúde Estrutural com a finalidade de verificar adequadamente a integridade estrutural e mitigar eventuais acidentes. Técnicas de Aprendizado de Máquina combinadas com Análise Modal podem ser utilizadas para o propósito supracitado. Elas permitem detecção rápida e em tempo-real quando submetidas aos conjuntos de dados apropriados e à devida calibração de seus hiperparâmetros. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional capaz de executar a detecção, localização e quantificação de danos estruturais, baseando-se nos parâmetros modais do sistema estrutural e utilizando Florestas Aleatórias. Diversas treliças de aço, danificadas e intactas, foram simuladas computacionalmente, para gerar o conjunto de dados sintéticos para alimentar o algoritmo de Florestas Aleatórias e também estudar a performance estatística do modelo. Resultados mostram que as Florestas Aleatórias são capazes de detectar com precisão o dano presente nas treliças estudadas.

Palavras-chave: Monitoramento de Saúde Estrutural, Análise Modal, Método da Variação da Flexibilidade Modal, Aprendizado de Máquina, Análise Matricial de Estruturas

1 INTRODUÇÃO

Na contemporaneidade, os seres humanos são altamente dependentes de sistemas estruturais, elétricos e mecânicos, como aeronaves, pontes, usinas de geração de energia, fabricação de semicondutores e edifícios. Tais sistemas são complexos e geralmente não são facilmente substituídos devido a fatores econômicos, logísticos e construtivos. Assim sendo, tecnologias de monitoramento tornam-se necessárias para assegurar a confiabilidade de tais sistemas e possibilitar o prolongamento da vida útil de serviço deles. Além disso, é possível aplicar essas tecnologias para o estudo de novos materiais cujo as propriedades físicas não são completamente conhecidas, a partir da análise de sua degradação a longo prazo.

Ainda, técnicas de monitoramento podem ser utilizadas para o desenvolvimento otimizado de projetos estruturais, permitindo menor custo a partir do conhecimento do comportamento estrutural e mecânico a longo prazo para condições ocupacionais e ambientais previamente determinadas. Dessa forma, torna-se possível reduzir as margens de segurança e a quantidade de material necessário na execução do projeto.

Devido a importância econômica e social dos sistemas supracitados, o monitoramento é um fator imprescindível, pois a detecção de dano pode prevenir falhas e colapsos com grande antecedência, prevenindo catástrofes e reduzindo custos.

Os métodos de monitoramento são categorizados da seguinte forma (RYTTER, 1993):

- Nível 1 - Detecção: fornece indicação que o dano está presente na estrutura;
- Nível 2 - Localização: oferece informação a respeito da localização do dano;
- Nível 3 - Mensuramento: provê indicação da severidade do dano;
- Nível 4 - Consequência: fornece informação a respeito da atual condição de segurança da estrutura.

A execução de um procedimento de monitoramento de saúde estrutural baseado em vibração refere-se ao processo de detecção, localização e quantificação de dano em estruturas aeroespaciais, civis ou mecânicas e envolve:

1. Observação do comportamento dinâmico da estrutura no decorrer do tempo;
2. Extração das características modais sensíveis a dano a partir dos dados coletados;
3. Análise, através de modelos estatísticos, das características modais para determinar o estado atual de saúde do sistema estudado.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um programa computacional capaz de efetuar Análise Modal com a finalidade de fornecer dados para os algoritmos de Aprendizado de Máquina, que posteriormente é utilizado para detectar, localizar e mensurar o dano em elementos estruturais de treliça feitos em aço.

3 METODOLOGIA

Utilizando Python, Análise Matricial de Estruturas e Scikit-Learn, foi criado um programa computacional capaz de realizar Análise Modal, detecção, localização e quantificação de dano estrutural em estruturas planas do tipo treliça.

3.1 Localização do Dano

Um classificador supervisionado foi implementado utilizando a classe *Random Forest Classifier* da biblioteca Scikit-Learn com a finalidade de localizar o dano presente em elementos estruturais de treliças feitas em aço. O classificador é definido segundo a Eq. (1):

$$f: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m \mid y = f(X_1) \quad (1)$$

em que n é a dimensão do espaço vetorial, m é a dimensão das possíveis classes, X_1 é o vetor de características de entrada e y representa o elemento associado com a maior probabilidade de haver dano.

3.2 Quantificação do Dano

Um algoritmo regressor foi implementado utilizando a classe *Random Forest Regressor* da biblioteca Scikit-Learn com a finalidade de quantificar o dano presente em elementos estruturais de treliças feitas em aço. O regressor é definido segundo a Eq. (2):

$$f: \mathfrak{R}^k \rightarrow \mathfrak{R} \mid y = f(X_2) \quad (2)$$

sendo k é a dimensão do espaço vetorial, X_2 é o vetor de características e y representa o dano previsto a partir do elemento estrutural de entrada do modelo.

3.3 Método da Variação da Flexibilidade Modal

Para criar o conjunto de treinamento para o algoritmo de Aprendizado de Máquina, o Método da Variação da Flexibilidade Modal foi utilizado. Nessa abordagem, a matriz de flexibilidade modal é definida como o inverso da matriz de rigidez da estrutura. O dano é detectado comparando a matriz de flexibilidade da estrutura intacta com a matriz de flexibilidade da estrutura danificada. O dano irá surgir nos elementos com maiores diferenças na flexibilidade (CARRILLO, 2004).

A equação do movimento para um sistema dinâmico linear em sua forma matricial é descrita na Eq. (3), em que $\{F(t)\}$ é o vetor de forças, $[M]$, $[C]$, $[K]$ são, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura. Essas matrizes são montadas a partir do Método da Rigidez Direta. Além disso, $\{a\}$, $\{v\}$, $\{x\}$ são, respectivamente, os vetores aceleração, velocidade e posição. As frequências naturais e os modos de vibração são encontrados através da resolução do problema de vibração-livre não-amortecida, descrito pela Eq. (4). Este problema também é conhecido como problema de autovalor e autovetor.

$$[M]\{a\} + [C]\{v\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

$$[M]\{a\} + [K]\{x\} = 0 \quad (4)$$

A Eq. (5) e Eq. (6), expressam, respectivamente, as matrizes de flexibilidade e de rigidez da estrutura em termos dos modos de vibração da estrutura.

$$[f] = \sum_{i=1}^{GDL} \frac{1}{w_i^2} \{\phi\}_i \{\phi\}_i^T \quad (5)$$

$$[K] = [M] \left(\sum_{i=1}^{GDL} w_i^2 \{\phi\}_i \{\phi\}_i^T \right) [M] \quad (6)$$

sendo GDL o número de graus de liberdade da estrutura, $\{\phi\}_i$ é o i -ésimo modo de vibração normalizado e w_i a i -ésima frequência natural. Utilizando a Eq. (7), é possível encontrar a variação da matriz de flexibilidade da estrutura, em que $[f]$ é a matriz de flexibilidade da estrutura intacta, enquanto $[f^D]$ é a matriz de flexibilidade da estrutura danificada. Esta técnica é considerada nível 3, pois é capaz de detectar, localizar e mensurar o dano.

$$[\Delta f] = [f] - [f^D] \quad (7)$$

Cada coluna da matriz $[\Delta f]$ representa a variação da flexibilidade nodais devido a uma força unitária no respectivo grau de liberdade. Para cada grau de liberdade j , define-se ξ_j como o valor máximo absoluto da variação da flexibilidade correspondente àquela coluna. Isto é:

$$\xi_j = \max([\Delta f_j]) \quad (8)$$

3.4 Modelo Estrutural e Modelo de Dados para treinamento

Utilizou-se o modelo estrutural mostrado na Fig. 1 para os estudos realizados neste trabalho. Todos os 128 elementos da treliça são iguais e todos os 60 nós são rígidos. A Tabela 1 mostra as propriedades físicas e geométricas do elemento de treliça utilizado na modelagem computacional. A Eq. (9) representa os vetores utilizados para treinar o modelo de Floresta Aleatória. As dez primeiras frequências naturais da estrutura e todas as variações de flexibilidade ξ_j foram utilizadas para o treinamento.

Tabela 1. Propriedades geométricas e físicas do modelo estrutural estudado. Fonte: Autores (2022).

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)	210
Área de Seção Transversal (m)	$\pi * 10^{-2}$
Momento de Inércia (m^4)	$7,86 * 10^{-5}$
Densidade (kg/m ³)	7.850

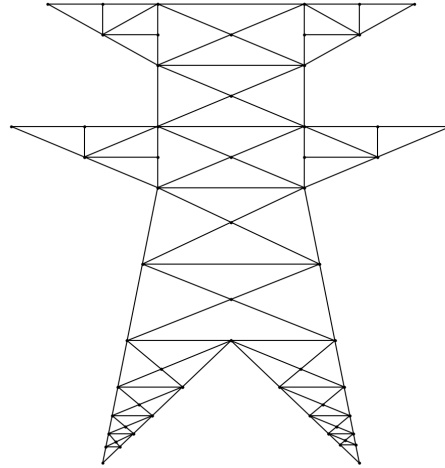


Figura 1. Modelo estrutural treliça estudada. Fonte: Autores (2022).

$$X_i = \{\Delta w_1, \Delta w_2, \dots, \Delta w_{10}, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{116}\} \quad (8)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para gerar os modelos danificados, todos os 128 elementos da treliça foram submetidos às funções de dano mostradas pela Fig. (2). O dano foi modelado como a redução do módulo de elasticidade do elemento. Cada função de dano foi discretizada em 200 pontos distintos, e cada elemento da estrutura submetido a um valor de dano por vez. Para cada função de dano, foi gerado um conjunto de treinamento com 25.600 instâncias, cada uma representando o i -ésimo elemento danificado e a j -ésima redução do módulo de elasticidade longitudinal.

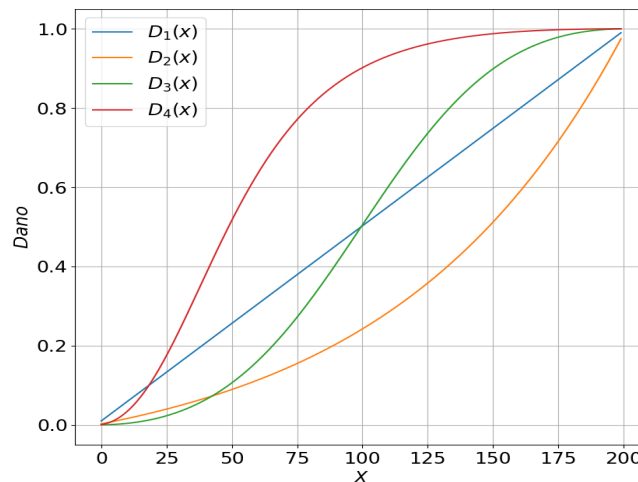


Figura 2. Funções de dano utilizadas para a geração de modelos danificados. Fonte: Autores (2022).

Um modelo de Florestas Aleatórias foi treinado utilizando 20.480 instâncias do conjunto de dados gerado pela função $D_1(x)$. Ainda sobre este conjunto, 5.120 instâncias foram utilizadas para efetuar o teste do modelo. Todas as 20.480 instâncias dos demais conjuntos de dados gerados pelas outras funções de dano foram utilizadas exclusivamente para testar o

modelo já treinado. A Tab. (2) mostra os resultados das métricas estatísticas utilizadas para averiguar a performance do modelo estatístico na tarefa de classificação, ou seja, localização do dano. Por outro lado, a Tab. (3) mostra o erro estatístico do modelo na tarefa de regressão, ou seja, a etapa de quantificação do dano.

Tabela 2. Acurácia, Precisão, Recall e F1 Score do modelo de Florestas Aleatórias para a tarefa de localização de dano estrutural avaliado nos quatro conjuntos de treinamento. Fonte: Autores (2022).

Métrica	$D_1(x)$	$D_2(x)$	$D_3(x)$	$D_4(x)$
Acurácia	0,9977	0,9944	0,9569	0.8753
Precisão	0,9978	0,9944	0,9669	0.9318
Recall	0,9977	0,9944	0,9569	0.8753
F1 Score	0,9977	0,9944	0.9567	0.8934

Tabela 3. Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado (WMAPE) do modelo de Florestas Aleatórias para a tarefa de quantificação de dano avaliado nos quatro conjuntos de treinamento. Fonte: Autores (2022).

Métrica	$D_1(x)$	$D_2(x)$	$D_3(x)$	$D_4(x)$
WMAPE (%)	1,459	0,845	1,699	3,470

5 CONCLUSÕES

Avaliando-se os resultados obtidos, é correto afirmar que as Florestas Aleatórias são capazes de detectar, localizar e quantificar o dano presente em estruturas planas com muitos graus de liberdade, a exemplo da estudada neste trabalho. O modelo computacional foi modulado como linear, elástico, isotrópico e homogêneo, e neste cenário, o modelo estatístico conseguiu executar com ótimo aproveitamento tais tarefas. Como as Florestas Aleatórias conseguem prever comportamentos lineares através de árvores de decisão, é seguro afirmar que não houve sobreajuste do modelo diante dos dados utilizados para efetuar o treinamento.

Mesmo utilizando somente o conjunto de dados $D_1(x)$ para treinamento, o modelo de Florestas Aleatórias conseguiu prever adequadamente o comportamento dos demais conjuntos de treinamento com diferentes distribuições, evidenciando a acertada utilização do modelo.

REFERÊNCIAS

- Carrillo, O.J.B., 2004. **Detecção de Dano a partir da resposta dinâmica da estrutura: um estudo analítico com aplicação a estruturas do tipo viga**. Dissertação de Mestrado, EESC-USP / Brasil.
- Rytter, A., 1993. **A. Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures**. Tese de Doutorado, Department. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University / Dinamarca.