

# **AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS UTILIZANDO AS FREQUÊNCIAS NATURAIS E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

**Koje Daniel Vasconcelos Mishina**

**José Felício da Silva**

**Seyyed Said Dana**

Universidade Federal da Paraíba, Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,  
Cep 58059-900, João Pessoa – PB – Brasil – e-mail: [felicio@funape.ufpb.br](mailto:felicio@funape.ufpb.br)

## **Resumo**

O presente trabalho propõe uma metodologia para avaliar a integridade de estruturas com base na resposta dinâmica representada pelas frequências naturais e Redes Neurais. A resposta dinâmica de uma estrutura é modificada a partir da presença de falhas na mesma, desta forma foi possível avaliar a integridade estrutural através da comparação entre a resposta dinâmica de uma estrutura com falha e sem falha. Utilizou-se o toolbox de Redes Neurais do Matlab 4.0 como ferramenta para identificar e quantificar o estágio de dano em que se encontrava a estrutura. O trabalho inclui a construção do modelo experimental que permitiu comparar as frequências teóricas e experimentais, bem como ajustar os parâmetros do modelo. A eficiência da metodologia empregada é mostrada através de gráficos que comparam as saídas desejadas (teóricas) e saídas obtidas através da Rede Neural.

**Palavras-chave:** Estrutura, Integridade, Frequências Naturais, Rede Neural

## **1. INTRODUÇÃO**

A sociedade mostra-se mais consciente e exigente no que se refere aos fatores de segurança, confiabilidade e qualidade. Com base nesta preocupação que é reflexo do desenvolvimento natural da nação, surge a necessidade de uma ação mais efetiva no que se refere a um programa de monitoramento e supervisão de estruturas com base em novas técnicas de detecção de falhas. O objetivo deste programa é estender à vida útil das estruturas; dando um suporte necessário para elaboração de um plano de manutenção preventiva, que venha a evitar catástrofes e altos custos provenientes de grandes perdas humanas e de materiais. Freire et al. (1994) apresentaram alguns exemplos recentes de monitoramento de estruturas civis com extensômetros de resistência elétrica e transdutores de deslocamento para mostrar como testes simples e econômicos possibilitam um melhor conhecimento da resposta sob carregamentos reais. Freire et al. (1994) propõem uma terminologia teórica básica para ser usada em Avaliação de Integridade Estrutural (AIE) de equipamentos e estruturas. Ghaboussi et al. (1992) utilizou as RNA na detecção de danos em estruturas. Doebling et al. (1996) identificou danos em estruturas e sistemas mecânicos em função da característica da resposta dinâmica. Kaminski (1997), projetou um sistema de diagnóstico de falhas estruturais baseado em medidas de vibração e RNA. Alves (1997), utilizou as frequências naturais e RNA para detecção de defeitos em estruturas. Cunha et al. (1998) realizou um trabalho de identificação de danos em estruturas usando RNA.

## 2. DESCRIÇÃO DO MODELO

Na escolha do modelo levou-se em consideração uma estrutura que representasse um maior número de casos possíveis, que fosse de fácil construção e que permitisse modificar a resposta dinâmica da estrutura em função da rigidez. A forma da construção desta estrutura possibilitou analisar a integridade de cada grau de liberdade separadamente. Neste trabalho procurou-se canalizar as atenções para avaliar a integridade estrutural do primeiro grau de liberdade.

O modelo em estudo representa um sistema de dois graus de liberdade, onde o primeiro grau é constituído de quatro lâminas (Kawasa) de aço inox, graduadas e com 12” (polegadas) de comprimento. As mesmas estão engastadas em uma das extremidades, enquanto as outras extremidades (superiores) estão fixas a uma massa ( $m_1$ ). O segundo grau de liberdade é representado pela lâmina 5 (Kawasa) também de aço inox, graduada e com 6” (polegadas) de comprimento (Fig. 1). As lâminas por serem graduadas facilitaram o deslocamento da massa sobre a mesma, permitindo desta forma um maior dinamismo na variação de rigidez da estrutura e conseqüentemente uma maior facilidade na obtenção dos dados para treinamento. A fixação da massa sobre as lâminas é feita através de parafusos allen (nº4). As massas foram fabricadas a partir de chapas de aço 1020 e tem os respectivos pesos:  $m_1 = 2,983$  kg e  $m_2 = 0,10910$  kg.

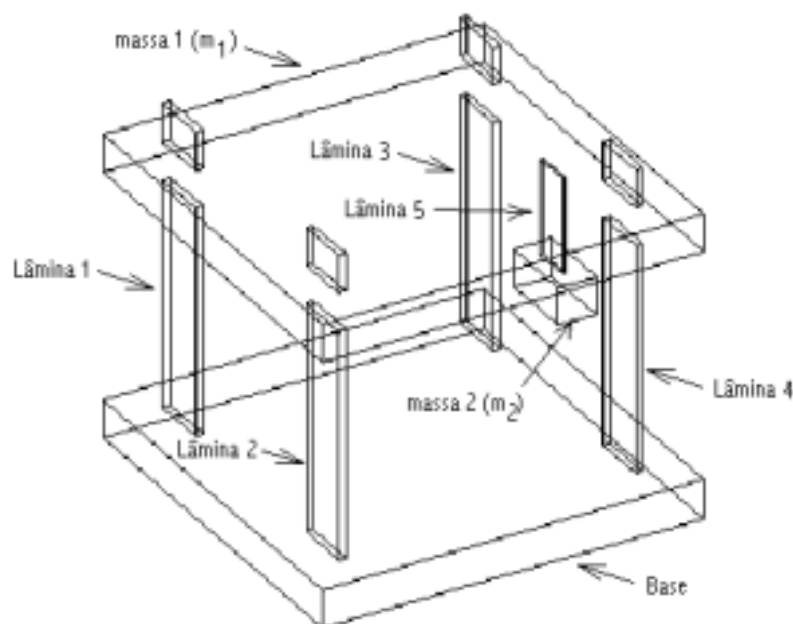


Figura 1 – Sistema de 2 graus de liberdade

## 3. MODELAMENTO MATEMÁTICO

A resposta dinâmica está diretamente associada a integridade da estrutura, e a mesma é modificada em função dos parâmetros: massa, amortecimento e rigidez. Considerando que a massa dificilmente é modificada e que o amortecimento tem uma parcela de influência pequena em relação a rigidez. Foi possível associar a integridade estrutural com a variação da rigidez.

Fazendo o equilíbrio de forças sobre a lâmina 1 (Fig. 2), quando a mesma esta excitada por uma força (P), chega-se a seguinte representação (Thomson, 1978).

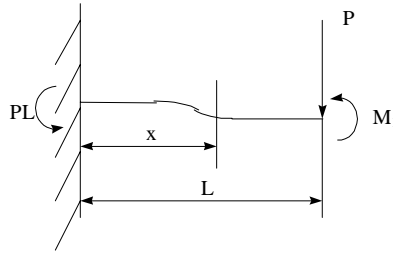


Figura 2 – Diagrama de corpo livre da lâmina 1

Fazendo o equilíbrio de forças sobre a lâmina 1, tem-se que a deflexão máxima ( $x=L$ ):

$$Y_1 = \frac{-PL^3}{12EI} \quad (1)$$

Onde:  $Y_1$  = Deflexão máxima;  
 $P$  = Carga aplicada;  
 $L$  = Comprimento útil da lâmina;  
 $E$  = Módulo de elasticidade;  
 $I$  = Momento de inércia

Através da Eq. (2), é possível relacionar a deflexão máxima com a rigidez.

$$K_1 = \frac{F}{Y_1} \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{F}{Y_1} \Rightarrow K_1 = \frac{12EIF}{PL^3} \Rightarrow K_1 = \frac{12EI}{L^3} \quad (3)$$

Desta forma, tem-se através da Eq. (3) que a rigidez varia inversamente proporcional ao comprimento da lâmina. Como o 1º grau de liberdade é formado por 4 lâminas que estão em paralelo, o valor da rigidez equivalente é dado pelo somatório da rigidez de cada lâmina separadamente, conforme a Eq. (4).

$$K_{eq} = \frac{12E_1I_1}{L_1^3} + \frac{12E_2I_2}{L_2^3} + \frac{12E_3I_3}{L_3^3} + \frac{12E_4I_4}{L_4^3} \quad (4)$$

Para cada lâmina foi feito o ajuste experimental do módulo de elasticidade através da regressão linear dos pontos obtidos no gráfico (Deformação x Tensão), onde o módulo de elasticidade ( $E$ ) é dado pela inclinação da reta. As cargas aplicadas para a obtenção das deformações foram baseadas no limite elástico do material (Aço Inox).

As secções das lâminas foram medidas separadamente através de um micrômetro de precisão para cálculo do momento de inércia ( $I$ ).

A frequência natural teórica para um sistema de 1 grau de liberdade é dada pela Eq.(5).

$$W = \sqrt{\frac{K_{eq}}{m}} \quad (5)$$

Através da modificação do comprimento útil das lâminas, foi possível simular vários níveis de falha na estrutura [0-50% de falha], permitindo a geração de um banco de dados para treinamento da RNA.

#### 4. OBTENÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA (EXPERIMENTAL)

Para a obtenção das frequências naturais experimentais, utilizou-se transdutores de resistência elétrica (strain-gauges), sistema de aquisição composto de ponte dinâmica e placa de aquisição. A estrutura foi excitada aleatoriamente, e o sinal de vibração foi gerado pelo strain-gauges e gravado na placa de aquisição. Posteriormente foi feito o tratamento off-line deste sinal, através do Software (Snap-Master) que baseia-se nas Transformadas de Fourier (FFT) para determinação das frequências naturais (Fig. 3).



Figura 3 – Diagrama de bloco para obtenção das frequências naturais

#### 5. COMPARAÇÃO ENTRE AS FREQUÊNCIAS TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS

O intervalo em estudo compreendeu entre 0 à 50% de falha na rigidez da estrutura. Como a rigidez é inversamente proporcional ao comprimento da lâmina, foi possível simular falhas estruturais modificando a resposta dinâmica em função do comprimento das lâminas. A Tabela 1, mostra o erro entre as frequências naturais teóricas e experimentais em função do percentual de falha na estrutura.

Tabela 1 – Relação entre as frequências experimentais e teóricas em função do percentual de falha na estrutura

Percentual de falha na estrutura	Frequência Experimental (Hz)	Frequência Teórica (Hz)	Erro percentual entre as frequências
0	11,54 ± 0,2	11,78	2,03
5	11,17 ± 0,2	11,49	2,78
10	10,87 ± 0,2	11,18	2,77
15	10,62 ± 0,2	10,87	2,30
20	10,37 ± 0,2	10,54	1,61
25	9,91 ± 0,2	10,21	2,93
30	9,62 ± 0,2	9,86	2,43
35	9,16 ± 0,2	9,50	3,57
40	8,96 ± 0,2	9,13	1,86
45	8,50 ± 0,2	8,74	2,74
50	8,20 ± 0,2	8,33	1,56

## 6. PRÉ-PROCESSAMENTO DAS ENTRADAS DA REDE NEURAL ARTIFICIAL

A RNA caberá o aprendizado da relação causa e efeito que existe entre a presença dos defeitos e a variação da resposta dinâmica de maneira que não será necessária a obtenção de uma equação que represente este comportamento da estrutura. Esta informação será repassada a RNA durante a fase de treinamento.

O pré-processamento das entradas da RNA pode melhorar de forma significativa a eficiência das mesmas (Kovács, 1997), podendo ser uma simples normalização ou até cálculos mais complexos, vai depender do problema em estudo. Neste trabalho especificamente, o vetor de entrada foi formado pelas frequências naturais experimentais normalizadas e o vetor de saída pelos respectivos níveis de falhas existentes na estrutura. A normalização das frequências naturais evitou problemas de saturação junto a função de transferência.

Tabela 2 – Relaciona a falha estrutural e as frequências naturais experimentais normalizadas

PERCENTUAL DE FALHA ESTRUTURAL	FREQUÊNCIAS NATURAIS NORMALIZADAS
0	1
5	0,96
10	0,94
15	0,92
20	0,89
25	0,85
30	0,83
35	0,79
40	0,77
45	0,73
50	0,71

## 7. ANÁLISES E RESULTADOS

Após o treinamento da RNA foi feito o teste de generalização com dados não pertencentes ao conjunto de treinamento, para efetivamente determinar a configuração mais adequada. Isto é conseguido através da comparação dos erros obtidos pelas diferentes RNA. É importante lembrar que todas as configurações testadas apresentaram convergência no treinamento, pois, caso isto não ocorra não teria sentido o teste de generalização.

Os parâmetros utilizados pela RNA, estão mostrados no Apêndice 1. Os resultados são apresentados na Fig. 4, através de um comparativo entre as saídas desejadas (teóricas) e as saídas obtidas pela RNA.

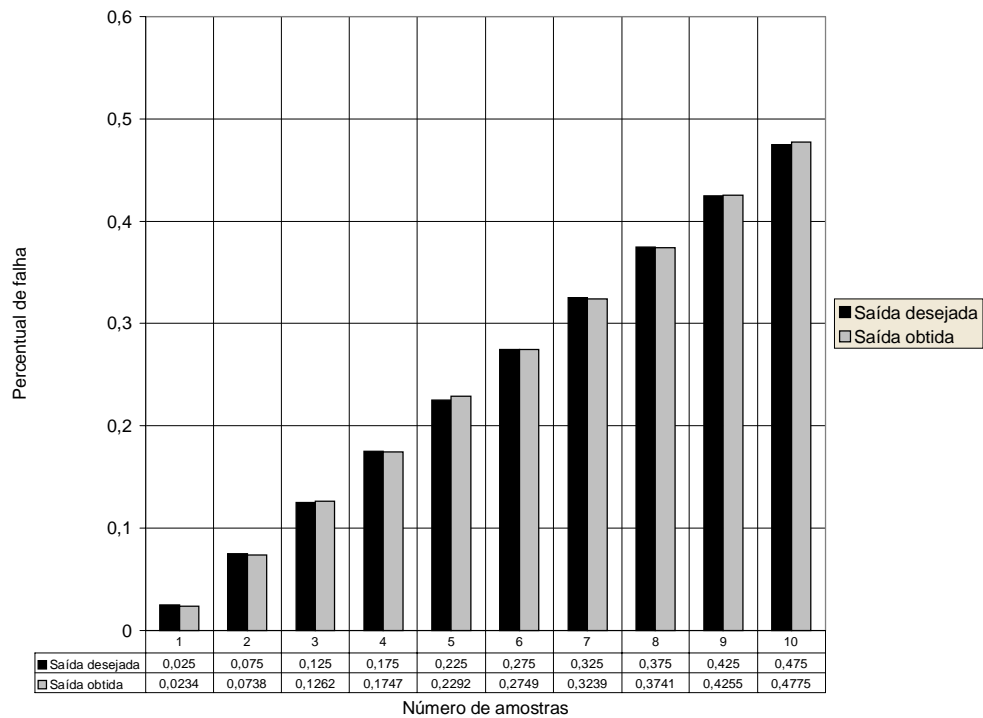


Figura 4 – Comparação das saídas desejadas e as saídas obtidas para 1 grau de liberdade

## 8. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos para o sistema com 1 grau de liberdade é possível afirmar que a metodologia utilizada é viável na avaliação de integridade de estruturas. Ou seja, a RNA conseguiu identificar o estágio de dano em que se encontrava a estrutura, em função da resposta dinâmica.

Os dados coletados podem ser utilizados na elaboração de um plano de manutenção preventiva, que permitirá fazer uma avaliação segura da viabilidade técnica e financeira para recapacitação desta estrutura.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. Alves, M. A. L. Utilização de frequências naturais e redes neurais artificiais para a detecção de defeitos em estruturas, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, 118 p., São Paulo, Brasil, 1997.
2. Chang, Kuo F. Structural Health Monitoring: A Summary Report on the First Stanford Workshop on Structural Health Monitoring, 1997.
3. Cunha, F. S., Silva, J. F., Paula, G. E., Freire, J.L. F., Identificação de Danos em Estruturas Usando Redes Neurais Artificiais, V Congresso de Engenharia Mecânica do Norte-Nordeste, ABCM, Fortaleza, Brasil, 1994.
4. Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M.B. and Shevitz, D. W., Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: a Literature Review. Los Alamos Report LA-13070-MS.

5. Freire, J. L. F., Castro, J.T.P., Otegui, J. L. et al. Aspectos Gerais da Avaliação de Integridade e Extensão de Vida de Estruturas e Equipamentos Industriais, Workshop-24 e 25/nov., Centro de Estudos em Integridade Estrutural, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 1994.
6. Freire, J. L. F., Castro, J.T.P., Vieira R. D. Avaliação de Integridade Estrutural e Monitoração de Estruturas Civas, Workshop, Centro de Estudos em Integridade Estrutural, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEFET-Rio e StrainLab Análises de Tensões Ltda, 1994.
7. Galvão, R. K. H. Curso sobre Processamento de Sinais Empregando Redes Neurais, ITA-Divisão Engenharia Eletrônica, Departamento Sistemas e Controle, p. 26-30 outubro, 1998.
8. Ghaboussi, X. Wu. J. & GARRET, J. H., Use of Neural Networks in Detection of Structural Damage, Computers & Structures, Vol. 42, No 4, p. 649-659, 1992.
9. Kaminski, P. C. Um sistema de diagnóstico de falhas estruturais baseado em redes neurais artificiais e frequências naturais, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, 139 p., São Paulo, Brasil, 1997.
10. Kovács, Z. L. O cérebro e a sua mente – Uma introdução a neurociência computacional. Edição Acadêmica, São Paulo – SP, Brasil, 1997.
11. Thomson, W. T. Teoria da Vibração com Aplicações, Editora Interciência Ltda, Rio de Janeiro, 1978.

## APÊNDICE 1

### Parâmetros utilizados pela Rede Neural Artificial

- Treinamento supervisionado;
- 3 camadas escondidas, com 5 neurônios em cada camada;
- A função de transferência logística;
- O algoritmo de treinamento utilizado foi o de retro-propagação dos erros;
- Outros parâmetros de treinamento foram:
  - Número de épocas para apresentação no display = 2;
  - Número máximo de épocas = 100;
  - Erro a ser atingido = 0,00001;
  - Valor do mínimo gradiente = 0,002;
  - Valor inicial para o momento = 0,001;
  - Fator de crescimento do momento = 4;
  - Fator de decrescimento do momento = 0,01;
  - Valor máximo para o momento = 1e5.