



ATUALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE DANOS BASEADA EM DADOS EXPERIMENTAIS DE VIGAS COM CONDIÇÕES DE APOIO LIVRE-LIVRE

Marília Marcy

Iviane Cunha e Santos

José Luís Vital de Brito

Graciela Nora Doz

mariliamarcy@unb.br

iviane.santos@aluno.unb.br

jlbrito@unb.br

graciela@unb.br

Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil

Andrea Brasiliano

andreabrasiliano@gmail.com

Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/PB, Brasil

Resumo. *Este artigo descreve o emprego das técnicas de atualização e identificação de danos implementados em pacotes de softwares comerciais, visando o monitoramento do comportamento global de vigas intactas e danificadas. Como referência do processo de atualização dos modelos numéricos, foi utilizada a análise experimental de vigas de aço sob condições de apoio livre-livre, das quais foram obtidos os registros de acelerações e estimadas suas propriedades dinâmicas. A fim de identificar danos no modelo experimental, utilizou-se a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNAs), especificamente, Self Organizing Maps (SOM) e métodos de atualização do modelo numérico. Finalmente, pretende-se neste artigo avaliar a capacidade de prever a integridade estrutural por meio dos métodos de atualização e identificação de danos utilizando os dados das respostas dinâmicas.*

Palavras Chave: *Elementos Finitos, Dinâmica Estrutural, Otimização, Identificação de Dano, Redes Neurais Artificiais*

1 INTRODUÇÃO

A atual exigência por estruturas que possam atingir maior eficiência de serviço, o uso de novos materiais bem como a preocupação com o desempenho e a degradação de estruturas mais antigas, têm impulsionado o desenvolvimento de novos métodos capazes de acompanhar o desempenho funcional, observar e controlar possíveis vibrações excessivas, localizar e quantificar danos estruturais.

Atualmente, existem vários métodos capazes de compor sistemas de monitoramento estrutural. No entanto, alguns necessitam de um modelo numérico fielmente construído e que represente o comportamento da estrutura. Deste modo, técnicas de atualização de modelo são essenciais para a obtenção de bons resultados.

Neste contexto, este artigo descreve o emprego das técnicas de atualização e identificação de danos, implementados em pacotes de softwares comerciais, visando o monitoramento do comportamento global de vigas intactas e danificadas.

Como referência do processo de atualização dos modelos numéricos, foi utilizada a análise experimental de vigas sob condições de apoio livre-livre, das quais foram obtidos os registros de acelerações e estimadas suas propriedades dinâmicas (Brasiliano, 2005).

A fim de identificar e localizar danos no modelo experimental, utilizou-se a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNAs), especificamente, Self Organizing Maps (SOM) com o algoritmo LVQ. Assim, considerando que as frequências naturais de vibração sofrem alterações em função do estado físico da estrutura (Adams *et al.* 1978) e que, para um desempenho adequado, a rede passa por duas principais fases de processamento, o treinamento e o teste, as frequências dos modelos numéricos e experimentais foram fornecidas como dados de entrada de cada fase, respectivamente. Realizou-se também a atualização dos modelos numéricos com base nos dados experimentais danificados visando a identificação de danos por meio dos processos de otimização.

Finalmente, pretende-se neste artigo avaliar a capacidade de avaliar a integridade estrutural por meio dos métodos de atualização e identificação de danos utilizando os dados das respostas dinâmicas.

2 ATUALIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A grande maioria das técnicas de avaliação de estruturas vem utilizando a modelagem numérica, que com o desenvolvimento das novas tecnologias computacionais, como o método de elementos finitos (MEF) na década de 1960 com Clough (1960) e nas décadas seguintes com Zienkiewicz e Cheung (1967), possibilitou que muitos problemas complexos pudessem ser resolvidos com aproximações, simplificações ou suposições mais refinadas, reduzindo bastante os obstáculos computacionais.

No entanto, os modelos numéricos não irão possuir um nível adequado de confiabilidade se os resultados obtidos distinguirem dos resultados experimentais. Desse modo, a atualização do modelo permite superar este problema, constituindo uma ferramenta muito útil na representação numérica das estruturas já que proporciona uma melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais, levando desta forma a uma modelagem mais precisa da mesma.

A atualização do modelo numérico é um procedimento para determinar os parâmetros de incertezas de um modelo inicial com base em resultados experimentais, visando atingir o modelo atualizado mais apropriado. No entanto, o sucesso da atualização depende de alguns fatores como, por exemplo, modelo numérico bem concebido, testes experimentais controlados, capacidade de integração entre os dados experimentais e numéricos, entre outros.

O processo de atualização de modelos a ser empregado neste trabalho segue o fluxograma proposto na Fig. 1, onde λ_{NUM} e ϕ_{NUM} são respectivamente a frequência e o modo de vibração obtidos numericamente, e λ_{EXP} e ϕ_{EXP} são a frequência e o modo de vibração experimental, M e K são respectivamente a matriz de massa e a matriz rigidez do modelo inicial da estrutura e M_{NOVO} e K_{NOVO} são a matriz de massa e a matriz rigidez do modelo numérico atualizado.



Figura 1: Processo de atualização dos modelos numéricos da viga

O processo de atualização apresenta duas fases distintas: a atualização manual e a automática. O princípio básico dos dois processos é o mesmo e consiste em alterar o modelo numérico com o objetivo de obter um novo modelo com comportamento mais próximo do experimental. A diferença está no processo de alteração do modelo, um manual e o outro por meio dos métodos de otimização.

A atualização manual (*Manual Update*) é um processo onde se realizam mudanças de forma no modelo, parâmetros que descrevem a geometria e o material. O método trabalha com erros não quantitativos, como configurações de malhas, tipos de elementos e parâmetros estruturais. A atualização automática (*Automatic Update*), por outro lado, é feita de forma iterativa, onde os parâmetros quantitativos do sistema são alterados por uma rotina computacional. Os erros nos dados geométricos, materiais, rigidez etc. são analisados e a decisão de convergência é automática, e dependerá da tolerância da função objetivo definida no pré-processamento.

Antes da atualização automática realiza-se um pré-processamento, que consiste em uma análise de sensibilidade onde um conjunto de parâmetros a serem atualizados na atualização automática são definidos. Assim, o modelo atualizado manualmente é então submetido a dois processos: pré-processamento, ou análise de sensibilidade, onde se define os parâmetros a serem atualizados, e a atualização automática propriamente dita, onde a rotina computacional refina os parâmetros iterativamente.

Os parâmetros de correlação entre modos de vibração numéricos e experimentais a serem utilizados neste trabalho são o Índice de Confiança Modal MAC para a comparação entre os modos de vibração, e o índice FER Porcentagem de Variação da Frequência.

2.1 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros

O cálculo da sensibilidade estrutural consiste na avaliação da alteração das variáveis de resposta em função da variação das variáveis de projeto. Desse modo, a sensibilidade associada com o parâmetro de projeto selecionado é calculada, permitindo assim selecionar os parâmetros mais sensíveis, que serão utilizados no processo de atualização.

Segundo Mottershead e Friswell (1993), a análise de sensibilidade também é capaz de identificar o sentido da variação do parâmetro de atualização, determinando se esta é diretamente ou inversamente proporcional à variação da variável de estado ou da função objetivo. De tal modo, na análise de sensibilidade calcula-se o coeficiente de sensibilidade S_c definido como a correlação entre a derivada das variáveis de estado ou da função objetivo e a derivada das variáveis de projeto ou parâmetro de atualização, definido conforme Eq. (1) e Eq. (2):

$$\delta_z = S_c \cdot \delta_A \quad (1)$$

$$S_c = \frac{\delta_z}{\delta_A} = \frac{Z_m - Z}{A_m - A} \quad (2)$$

onde, $\delta_A = A_m - A$ representa a alteração nos parâmetros de projeto utilizados na atualização (A e A_m); $\delta_z = Z_m - Z$ representa a alteração nas variáveis de estado ou função objetivo (Z e Z_m).

2.2 Índice de Confiança Modal – MAC

Segundo Allemang (2003), o desenvolvimento histórico do Índice de Confiança Modal - MAC foi originado a partir da necessidade de um indicador que garantisse a qualidade dos vetores modais experimentais estimados a partir de funções de resposta de frequências medidas. A função do índice MAC é fornecer uma medida da consistência ou do grau de linearidade entre as estimativas de um vetor modal, proporcionando um fator de confiança adicional na avaliação modal.

O índice MAC proporciona um método de comparação entre as estimativas de vetores modais provenientes de diferentes fontes como numérico e experimental. Assim, podemos utilizá-lo para comparar os vetores modais obtidos por meio de uma análise de elementos finitos aos vetores determinados experimentalmente.

O índice de confiança modal é uma técnica que utiliza as amplitudes dos modos de vibração experimentais e numéricos nos pontos onde foram colocados os sensores na realização do experimento. O índice MAC é definido conforme

$$MAC_{gh} = \frac{|\phi_g^T \phi_h|^2}{(\phi_h^T \phi_h)(\phi_g^T \phi_g)} \quad):$$

$$MAC_{gh} = \frac{|\phi_g^T \phi_h|^2}{(\phi_h^T \phi_h)(\phi_g^T \phi_g)} \quad (3)$$

onde, ϕ_h é o vetor do modo de vibração h obtido numericamente e ϕ_g é o vetor do modo de vibração g obtido experimentalmente. O índice MAC pode variar 0 a 1, sendo que o valor 1 indica correlação completa entre os dois modos comparados, e o valor 0 indica que um modo é completamente independente do outro.

2.3 Diferença Absoluta entre Frequências – FER

A correlação entre as frequências naturais é definida pelo índice FER. Assim, para o modo experimental g e um modo numérico h , o índice é dado pela Eq. (4):

$$FER_{gh} = \frac{\lambda_h - \lambda_g}{\lambda_g} \quad (4)$$

onde, λ_h representa a frequência natural numérica do modo h e λ_g representa a frequência experimental do modo g .

2.4 Critério de Correlação e Função Objetivo

Os coeficientes de correlação calculados baseiam-se na discrepância entre o valor numérico e experimental das respostas. As seguintes funções de correlação foram utilizadas no trabalho para compor a função objetivo utilizada no processo de atualização automática ou otimização dos parâmetros, e estão disponíveis no software FEMTools.

As contribuições das várias respostas são ponderadas utilizando uma função de peso C_{R_i} .

Diferença relativa absoluta entre frequências (CC_{ABS}) definida pela Eq. (5), onde N é o número de frequências.

$$CC_{ABS} = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_i}; \quad C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (5)$$

Valores médios MAC (CC_{MAC}) definida pela Eq. (6), onde N é o número de MAC.

$$CC_{MAC} = 1 - \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \cdot MAC_i; \quad C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (6)$$

Diferença absoluta entre deslocamentos modais (CC_{MDISP}) definida pela Eq. (7), onde N é o número de deslocamentos modais.

$$CC_{MDISP} = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \cdot \frac{|\Delta\Phi_i|}{\Phi_i}; \quad C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (7)$$

Diferença absoluta entre a participação das massas (CC_{MASS}) definida pela Eq. (8), onde N é o número de massa ativa.

$$CC_{MASS} = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \cdot \frac{|\Delta m_i|}{m_i}; \quad C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (8)$$

Assim a função objetivo foi definida como sendo a Diferenças Totais Ponderadas (CC_{TOTAL}) dada pela Eq. (9):

$$CC_{TOTAL} = CC_{ABS} + CC_{MAC} + CC_{MDISP} + CC_{MASS} \quad (9)$$

Durante o processo de otimização automática foi utilizado como critério de convergência uma diferença percentual absoluta dos valores de CC_{TOTAL} de $1E-15$.

3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As redes neurais artificiais (RNAs) são sistemas paralelos e distribuídos, formados por unidades básicas interligadas, chamadas de neurônios artificiais (Braga, 2011), com a capacidade de armazenar informações, reconhecer, classificar padrões e fazer previsões.

Trata-se de uma técnica inserida dentre as várias metodologias existentes para a solução de problemas de Inteligência Artificial, baseada no ajuste de conjuntos de dados (ajuste de pesos), tornando-a capaz de aprender, por meio de experiências (treinamento), e generalizar comportamentos de um determinado problema.

As RNAs podem se classificar, de maneira geral e simplificada, quanto à forma de aprendizado, às funções de ativação usadas em seu interior e com relação a arquitetura. Deste modo, neste trabalho utilizou-se a rede tipo *Self Organizing Maps* (SOM), com o algoritmo LVQ (*Learning Vector Quantization*), uma RNA auto organizável, porém com a supervisão do referido algoritmo.

3.1 *Selfs Organizing Maps* (SOM) com algoritmo LVQ

Os *Self Organizing Maps* (SOM) classificam-se como um tipo de Redes Neurais (RNAs) por aprendizado não supervisionado, formadas por algoritmos que buscam associar padrões ou características significativas em conjuntos de dados de entrada, sem a presença de um agente controlador externo.

Inspirado no funcionamento do sistema neural humano, o SOM tem como unidades básicas neurônios artificiais que, a partir de formulação matemática e um treinamento, desenvolvem a capacidade de relacionar características semelhantes, a fim de gerar classes de dados ou clusters.

No treinamento, fase essencial para o correto funcionamento do SOM, são fornecidos um grupo de dados diferente das informações utilizadas na fase do teste. O treinamento pode ser dividido, basicamente, em quatro etapas: inicialização, processo competitivo, cooperativo (conceito de vizinhança) e a adaptação. Inicialmente, são atribuídos valores aleatórios aos pesos e a rede é, então, inicializada. A fase de competição consiste em analisar, por meio de uma função predefinida e dos padrões de entrada, as saídas de cada neurônio, de modo que a unidade que apresenta o maior valor de ativação é declarado o neurônio vencedor, Fig.2.

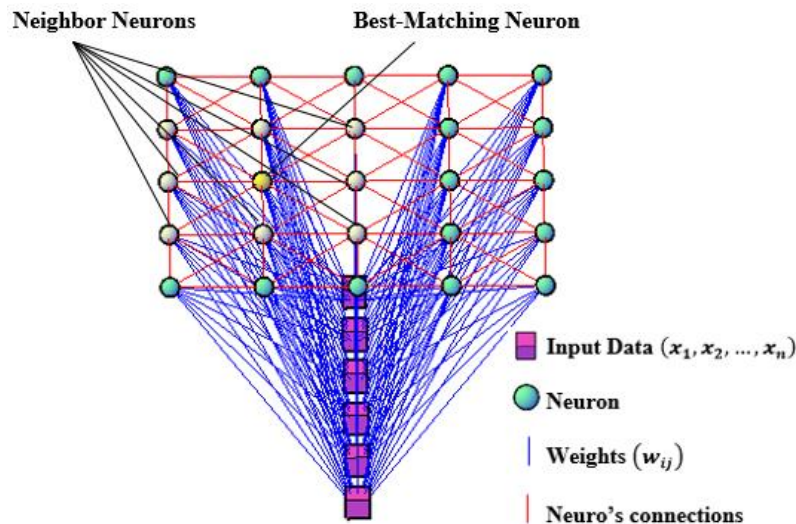


Figura 2: Esquema do SOM

Os padrões de entradas ($x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$) são introduzidos buscando uma associação de classes. Através dos pesos sinápticos ($w_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jn}]^T$) e das conexões entre os neurônios artificiais, o algoritmo de treinamento é inicializado, de modo que os dados são

agrupados em regiões do mapa, de acordo com as semelhanças existentes, como descreve o algoritmo a seguir (Haykin, 1999):

1. Inicialização: escolha dos pesos sinápticos de todos os neurônios $w_j(0)$ usualmente a inicialização é feita de modo aleatório;
2. Amostragem: Um vetor x é extraído do espaço de dados de entrada, que representa o padrão de ativação aplicado.
3. Determinação do neurônio vencedor: determina-se o neurônio vencedor (best-matching neuron) no tempo discreto n , por meio da mínima distância Euclidiana. Essa etapa corresponde ao processo de competição (Eq. 10);

$$i(x) = \operatorname{argmin} \|x - w_j\|, \text{ para } j = 1, 2, \dots, l \quad (10)$$

4. Atualização: os pesos sinápticos do neurônio vencedor e de seus vizinhos são atualizados, correspondendo ao processo adaptativo (Eq. 11);

$$w_j(n+1) = w_j(n) + \eta(n)h(n)(x(n) - w_j(n)) \quad (11)$$

Onde $\eta(n)$ e $h(n)$ correspondem à taxa de aprendizagem e a função de vizinhança, respectivamente.

Uma vez que o SOM foi treinado e, buscando um melhor desempenho da rede, é introduzido o algoritmo LVQ, que consiste e uma técnica de aprendizado supervisionada capaz de avaliar a classificação gerada pela rede para cada padrão. Deste modo, o algoritmo realiza um ajuste dos pesos para melhorar a classificação obtida (Eq. 12):

$$w_j(n+1) = \begin{cases} w_j(n) + \eta(n)(x(n) - w_j(n)), & \text{classe correta} \\ w_j(n) - \eta(n)(x(n) - w_j(n)), & \text{classe incorreta} \end{cases} \quad (12)$$

No contexto da identificação de danos estruturais, as RNAs vêm sendo utilizadas por vários pesquisadores, como por exemplo, Elkordy et al. (1993), Shu, J. and Zhang, Z. (2012), Meruane and Mahu (2014), entre outros.

4 METODOLOGIA

Duas vigas metálicas com condições de contorno livre-livre, com e sem regiões danificadas foram ensaiadas a fim de se obter suas acelerações, estimar suas propriedades dinâmicas (Brasiliano, 2005) e, assim, realizar a atualização e a otimização dos seus modelos numéricos, bem como a identificação dos seus danos estruturais.

Neste contexto, as primeiras etapas do trabalho consistiram em processar os dados experimentais dos referidos modelos no *software* comercial ARTeMIS Modal 4.0, tendo como sequência a construção de modelos numéricos, bem como a atualização e a otimização nos *softwares* ANSYS e FemTools, respectivamente.

Considerando a necessidade de treinar as RNAs para a identificação de danos contidos na viga, foram construídos modelos numéricos da viga intacta e contendo diferentes cenários de dano.

Além da identificação de danos por meio das Redes Neurais Artificiais (RNAs), buscou-se também fazer esta mesma análise por meio da otimização dos modelos.

Assim, este estudo foi realizado em duas partes principais, uma análise experimental e outra numérica.

4.1 Análise Experimental

As vigas de perfis de aço com seção transversal U (Perfil U 101,6 x 4,67 - ASTM – A36), cujas propriedades encontram-se na Tab. 1 e Fig. 3, foram discretizadas em 33 elementos de 0,0653m de comprimento, suas acelerações foram medidas nos seus 34 nós (Brasiliano, 2005).

Tabela 1: Propriedades dos Materiais

Propriedades	Valores
Momento de Inércia (I)	1,03E-07 m ⁴
Módulo de Elasticidade (E)	2,07E+11 N/m ²
Densidade do Aço	7850 Kg/m ³
Comprimento	2,155m

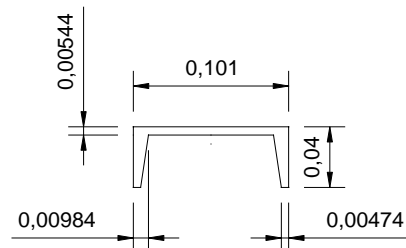
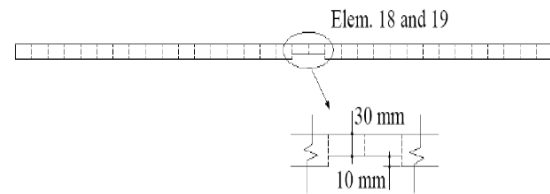


Figura 3: Seção transversal (m)

A primeira viga ensaiada, a qual será referida como Viga 1 Fig. 4 a), apresentava todos os elementos com mesma área e inércia, igual a $10,533 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ e $13,026 \times 10^{-8} \text{ m}^4$, respectivamente. Já a Viga 2 apresentava um corte de 10 mm na seção transversal dos elementos 18 e 19 Fig. 4 b), representando uma redução de 50,8% e 10,4% nas inércia e área da seção transversal, respectivamente.



a)



b)

Figura 4: Detalhes do Ensaio Experimental a) Viga 1 e b) Esquema da Viga 2. Fonte: (Brasiliano, 2005)

Para a realização dos ensaios, as vigas foram colocadas sobre dois pilares de concreto armado, com peso de aproximadamente 2 KN cada, e apoiadas sobre espumas a fim de simular a condição de contorno livre-livre, Fig. 4 a).

Foram utilizados sete acelerômetros piezelétricos da Bruel Kjaer, com massa 20g, aproximadamente, e $4,8\text{pC/ms}^{-2}$ de sensibilidade. A frequência de amostragem foi igual a 3.000 Hz e cada registro foi adquirido durante 3s.

O teste foi dividido em dez etapas (E1, E2, ... E10), como mostrado na Tab. 2, em que um conjunto de quatro acelerômetros permaneceu na mesma posição (acelerômetros de referência) e um conjunto de três acelerômetros foi movido em cada configuração (acelerômetros móveis). Por meio de um martelo, a excitação foi aplicada sempre no mesmo ponto.

Tabela 2: Posição dos acelerômetros em cada etapa.

Etapas	Acelerômetros móveis	Acelerômetros de referência
E1	2, 3 e 4	
E2	4, 5 e 7	
E3	8,9 e 10	
E4	11, 12 e 13	
E5	14, 15 e 17	
E6	18,20 e 21	1, 16, 19 e 34
E7	22, 23 e 24	
E8	25, 26 e 27	
E9	28, 29 e 30	
E10	31, 32 e 33	

A Fig. 5 apresenta os pontos de medição dos ensaios e a localização dos acelerômetros de referência.

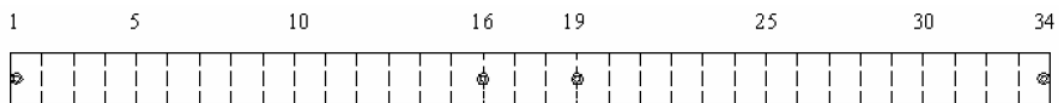


Figura 5. Vista superior da viga mostrando os pontos onde os acelerômetros de referência permaneceram fixos em todas as etapas. Fonte: (Brasiliano, 2005)

Para estimar as frequências e os modos de vibração, utilizou-se o software ARTeMIS Modal 4.0®, em conjunto com os sinais das acelerações obtidas nas 10 etapas mencionadas anteriormente. Assim, a Tab. 3 mostra as 6 primeiras frequências das vigas 1 e 2 (intacta e danificada respectivamente), e os seus respectivos modos de vibração estão ilustrados na Fig.6.

Tabela 3: Frequências experimentais das vigas 1 e 2.

Frequência (Hz)	Viga 1	Viga 2
1	43,658	39,59
2	120,110	117,305
3	235,010	222,879
4	387,750	369,51
5	578,120	542,535
6	805,900	739,02

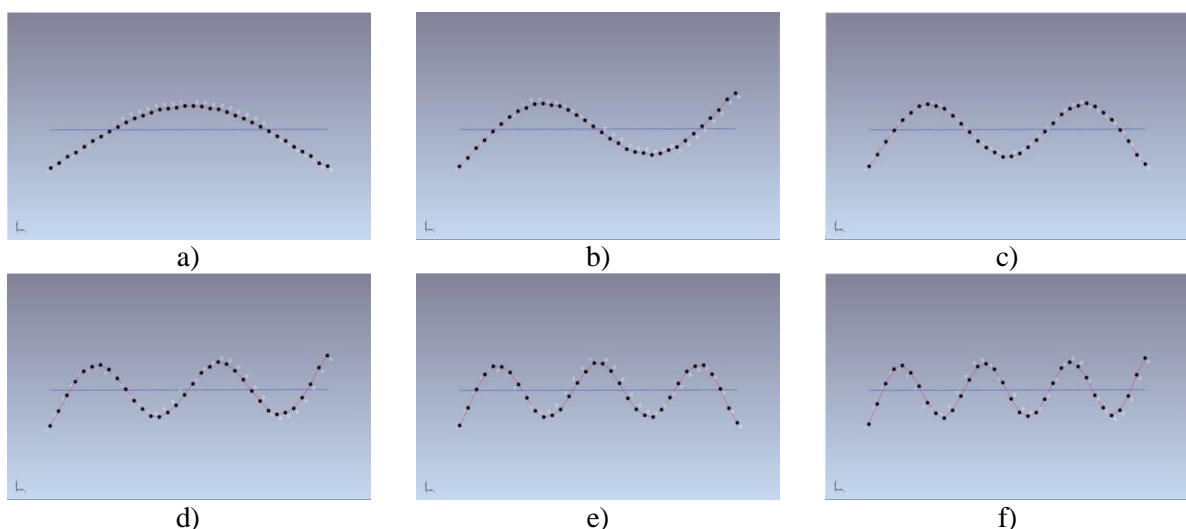


Figura 6: Modos de vibração dos modelos experimentais, obtidos no ARTeMIS a) 1º Modo; b) 2º Modo; c) 3º Modo; d) 4º Modo; e) 5º Modo; f) 6º Modo

4.2 Análise Numérica

Neste tópico são tratadas as premissas que levaram ao desenvolvimento dos modelos numéricos visando representar a viga na condição livre-livre conforme os dois cenários considerados na análise experimental, intacta e com dano, e ainda simulando danos e variação da temperatura.

Foram desenvolvidos 22 modelos numéricos, sendo os dois primeiros (V1 e V2) referentes às vigas ensaiadas e 20 modelos (V3 a V22) com danos simulados, além de 14 condições de variação de temperatura para a viga intacta, que tiveram como objetivo o treinamento das RNAs. Para o desenvolvimento dos modelos foi utilizada a versão acadêmica do *software* comercial de elementos finitos ANSYS.

4.2.1 Desenvolvimento dos modelos numéricos – V1 e V2

Para o desenvolvimento dos modelos foram utilizados os elementos de viga BEAM188, que se baseiam na teoria de resistência dos materiais da viga de Timoshenko. Este elemento possui seis graus de liberdade em cada nó, translação e rotação nas direções X, Y e Z. As propriedades geométricas e do material foram adotadas conforme indicado nas Fig.3 e Tab.1.

A viga intacta foi denominada V1 e a viga com dano V2 seguindo a mesma definição do ensaio experimental. A viga danificada apresenta uma redução de 1,0 mm na altura da seção transversal dos elementos 18 e 19 conforme apresentado na Fig. 7 abaixo.

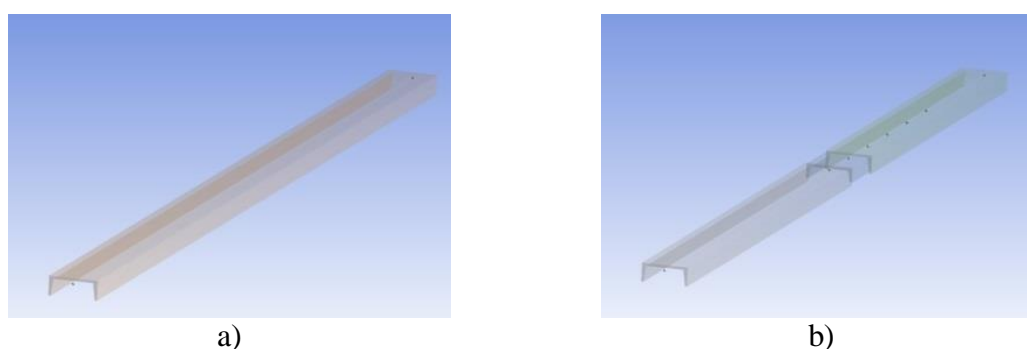


Figura 7: Modelos Numéricos a) Seção V1 e b) V2

4.2.2 Modelos com danos simulados – V3 a V22

Além da viga V1 e V2 foram simulados outros 20 cenários de danos numéricos V3 a V22, onde foram simuladas diferentes reduções na seção, variando a altura do dano de 0,5cm a 3cm, o comprimento do dano, entre 2, 4 e 8 elementos, assim como a posição, do centro da viga para as extremidades. As diversas simulações estão apresentadas na Tab. 4.

Tabela 4: Descrição dos Danos Simulados

Descrição do Danos		Descrição do Dano	
V3	Posição: Elemento 18 e 19, Altura: 2cm	V13	Posição: Elemento 28 a 34, Altura: 2cm
V4	Posição: Elemento 18 e 19, Altura: 1cm	V14	Posição: Elemento 26 e 27, Altura: 2cm
V5	Posição: Elemento 18 a 21, Altura: 1cm	V15	Posição: Elemento 26 e 27, Altura: 3cm
V6	Posição: Elemento 18 a 21, Altura: 2cm	V16	Posição: Elemento 24 e 25, Altura: 2cm
V7	Posição: Elemento 18 a 21, Altura: 3cm	V17	Posição: Elemento 22 e 23, Altura: 2cm
V8	Posição: Elemento 20 e 21, Altura: 1cm	V18	Posição: Elemento 20 e 21, Altura: 2cm
V9	Posição: Elemento 22 e 23, Altura: 1cm	V19	Posição: Elemento 20 e 21, Altura: 3cm
V10	Posição: Elemento 24 e 25, Altura: 1cm	V20	Posição: Elemento 22 e 23, Altura: 3cm
V11	Posição: Elemento 26 e 27, Altura: 1cm	V21	Posição: Elemento 24 e 25, Altura: 3cm
V12	Posição: Elemento 28 a 34, Altura: 1cm	V22	Posição: Elemento 24 e 25, Altura: 0,5cm

4.2.3 Modelos numéricos da viga intacta, sob variação de temperatura

Para a simulação do modelo sem danos em vários cenários de temperatura foram utilizados os valores da variação da elasticidade em função da temperatura conforme proposto por Callister e Rethwish (2009), implementado nas propriedades do material, no *software* ANSYS.

Foi desenvolvido um modelo de viga intacta, no qual foram testadas 14 condições de variação de temperatura entre -10 a 55°C, sendo adotada a temperatura padrão do ensaio 22°C. Esta simulação teve como objetivo caracterizar o comportamento numérico da viga, obtendo as frequências e os respectivos modos de vibração, de forma a implementar o treinamento das RNAs para a condição intacta.

5 RESULTADOS

A atualização teve como objetivo obter um modelo numérico da viga intacta que melhor representasse o comportamento experimental. Deste modo, utilizou-se o modelo final nas análises subsequentes de atualização inversa e RNAs, que tiveram como foco a identificação e localização de danos.

5.1 Atualização do Modelo Numérico da Viga Intacta

Pode-se dividir o processo de atualização em etapas distintas, a primeira consistiu na atualização manual do modelo, como pequenos ajustes na discretização do modelo, a segunda etapa foi a avaliação dos parâmetros susceptíveis ao processo de atualização automática, realizada por meio da análise de sensibilidade dos parâmetros, e finalmente na terceira etapa a atualização automática, onde os parâmetros foram modificados de forma a obter um modelo que melhor representa o comportamento experimental.

5.1.1 Modelo inicial

A Tabela 5 apresenta os valores das frequências numéricas, experimentais e a comparação da correlação entre as frequências, índice FER, e os valores do índice MAC, o qual correlaciona os modos de vibrações experimentais e numéricos em relação ao modelo inicial.

Tabela 5: Valores Iniciais das Frequências, Índice FER e MAC

Modo	Freq. Numérica (Hz)	Freq. Experimental (Hz)	FER (%)	MAC (%)
1	43,658	43,233	0,98%	99,90%
2	120,110	119,040	0,90%	99,80%
3	235,010	231,020	1,73%	99,80%
4	387,750	378,270	2,51%	99,70%
5	578,120	556,540	3,88%	99,30%
6	805,900	760,620	5,95%	99,30%

A Figura 8 apresenta a comparação dos modos de vibração numéricos e experimentais.

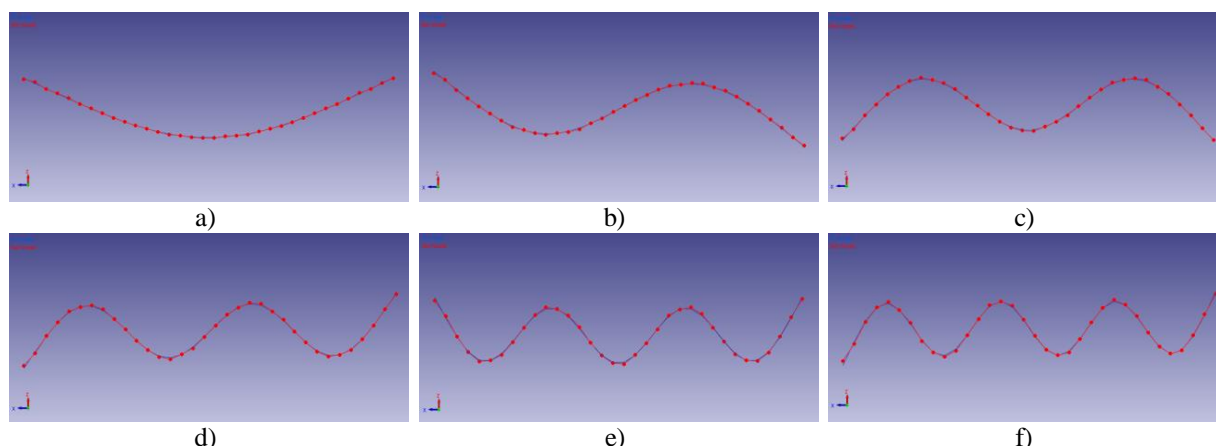


Figura 8: Comparação Inicial dos Modos Numéricos (AZUL) e experimentais (VERMELHA) a) 1º Modo; b) 2º Modo; c) 3º Modo; d) 4º Modo; e) 5º Modo e f) 6º Modo

Como pode ser observado, os modos numéricos e experimentais iniciais apresentaram uma boa correlação, com valores de MAC acima de 99%. Contudo, nos valores das frequências mais elevadas apresentaram uma discrepância em relação ao experimental de até 5,95%, o que justificou a atualização do modelo numérico.

5.1.2 Sensibilidade dos parâmetros

A análise de sensibilidade foi realizada no *software* FemTools e teve como objetivo identificar os parâmetros a serem considerados no processo de atualização automática.

Foram testadas as correlações entre os parâmetros módulo de elasticidade (1), massa específica (2), área (3) e inércia nas direções X (4), Y (5), Z (6) e coeficiente de Poisson (7), com as respostas das seis primeiras frequências verticais (1 a 6) e os valores dos MAC dos modos correspondentes (7 a 12). A Fig. 9 ilustra os valores dos coeficientes encontrados.

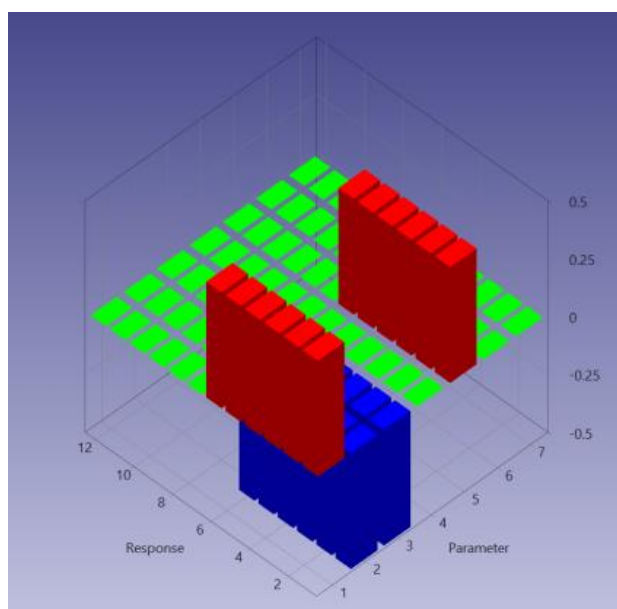


Figura 9: Análise de sensibilidade

Como resultado do estudo de sensibilidade, concluiu-se que os parâmetros de maior impacto sobre a resposta de frequência foram o módulo de elasticidade (1) e a inércia na direção Y (5), com um coeficiente de sensibilidade de +0,5, e os parâmetros de massa específica (2) e área (3) apresentaram coeficientes de correlação com as respostas de -0,5. Os

demais parâmetros apresentaram correlação com valores infinitamente inferiores, como poderia ser previsto uma vez que foram analisadas apenas as frequências dos modos verticais.

Assim, com base na análise de sensibilidade, decidiu-se trabalhar com os parâmetros módulo de elasticidade (1), massa específica (2), área (3) e inércia em Y (5), que mostraram os maiores valores absolutos de coeficiente de sensibilidade.

5.1.3 Modelo atualizado

O modelo da viga intacta V1 foi então atualizado baseado nos dados do ensaio experimental. Os valores finais dos parâmetros analisados, módulo de elasticidade (1), massa específica (2), área (3) e inércia em Y (5), são apresentados na Tab. 6.

Tabela 6: Valores Finais dos Parâmetros obtidos no Processo de Atualização

Parâmetro	Inicial	Atualizado	Diferença (%)
1	2,07E+11	2,04E+11	1,2961%
2	7.850,00	7.951,78	-1,2966%
3	1,053E-03	1,06665E-3	-1,2963%
5	1,302E-7	1,28512E-7	1,2965%

Com o processo de atualização pode-se obter um modelo que melhor representa o comportamento experimental da viga, uma vez que os valores das respostas, as seis primeiras frequências verticais (1 a 6) e os valores dos MAC dos modos correspondentes (7 a 12), encontrados se aproximaram ao comportamento experimental, conforme apresentado na Tab.7.

Tabela 7: Valores Finais dos Parâmetros de Resposta

Parâmetros	Numérico	Experimental	Diferença (%)
1	42,54 Hz	43,23 Hz	1,6011%
2	117,04 Hz	119,04 Hz	1,6860%
3	229,00 Hz	231,02 Hz	0,8748%
4	377,82 Hz	378,27 Hz	0,1176%
5	563,32 Hz	556,54 Hz	-1,2179%
6	785,27 Hz	760,62 Hz	-3,2406%
7	99,92%	100,00%	0,0810%
8	99,83%	100,00%	0,1659%
9	99,82%	100,00%	0,1825%
10	99,66%	100,00%	0,3407%
11	99,30%	100,00%	0,6956%
12	99,29%	100,00%	0,7105%

Assim, pode-se concluir que o modelo atualizado apresentou melhor correlação com o comportamento experimental da viga, diminuindo os erros na estimativa das frequências e melhorando a correlação dos modos com aos dados experimentais.

5.2 Localização de Danos

A fim de identificar e/ou localizar danos estruturais, neste trabalho foram aplicadas duas técnicas, a otimização de modelos e as Redes Neurais Artificiais (RNAs), especificamente a rede *Self Organizing Maps* (SOM) com o algoritmo LVQ. Deste modo, os resultados encontram-se divididos nos dois itens subsequentes.

5.2.1 Otimização visando identificação de danos

Nesta fase da análise procedeu uma segunda atualização do modelo final da viga V1 (Intacta), mas desta vez utilizando os dados de resposta experimentais da viga V2 (Danificada). O objetivo desta fase foi avaliar a capacidade de identificar ou até localizar danos por meio dos processos de otimização automática de modelos numéricos, avaliando a aptidão dos parâmetros atualizados com os dados experimentais da viga danificada convergirem para os valores de danos já mensurados e analisados no ensaio experimental.

Os parâmetros de projeto considerados neste processo foram os mesmos analisados na otimização do modelo numérico: módulo de elasticidade (1), massa específica (2), área (3) e inércia em Y (5), e visou não induzir a convergência da análise para a modificação dos parâmetros do dano.

Foram realizados dois testes, o primeiro modificando os parâmetros de projeto de forma global, ou seja, as modificações ocorrem simultaneamente nos 33 elementos da viga, e o segundo teste os parâmetros foram modificados de forma independente ou local, podendo variar por elemento do modelo.

A Tabela 8 apresenta os valores das frequências numéricas atualizadas V1 e experimentais danificadas V2 e a correlação entre as frequências índice FER e os valores do índice MAC.

Tabela 8: Valores Iniciais das Frequências, Índice FER e MAC

Modo	Freq. Numérica (Hz)	Freq. Experimental (Hz)	FER (%)	MAC (%)
1	42,541	40,144	5,635%	99,80
2	117,040	117,470	-0,367%	99,70
3	229,000	222,220	2,961%	99,60
4	377,820	369,720	2,144%	99,10
5	563,320	542,300	3,731%	99,00
6	785,270	738,710	5,929%	98,60

A Figura 10 apresenta respectivamente, os valores dos índices MAC calculados a partir do modelo numérico atualizado da viga V1 e os dados experimentais da viga V2.

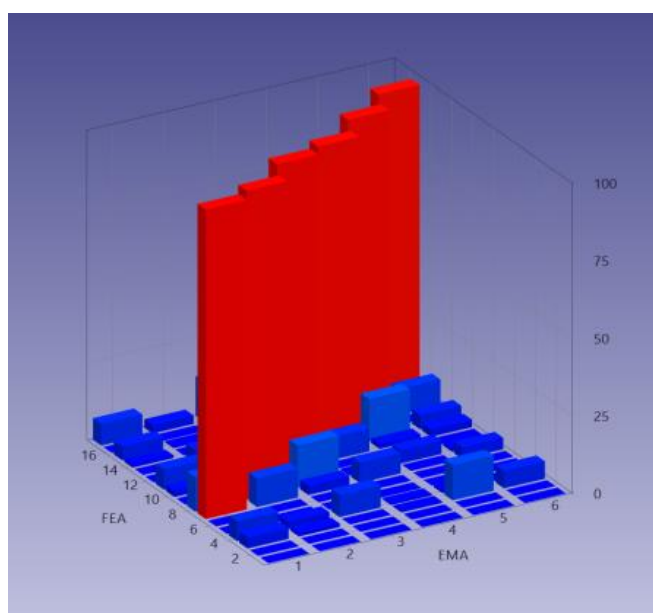


Figura 10: Índice MAC considerando os dados experimentais danificados

A Tabela 9 apresenta os resultados encontrados no primeiro teste de otimização automática considerando a modificação dos parâmetros: módulo de elasticidade (1), massa específica (2), área (3) e inércia em Y (5) de forma global.

Tabela 9: Valores Finais dos Parâmetros de Projeto obtidos no Processo de Otimização

Parâmetro	Inicial	Atualizado	Diferença (%)
1	2,043E+11	2,009E+11	-1,6685%
2	7.951,780	8.084,450	+1,6684%
3	1,067E-03	1,084E-03	+1,6688%
5	1,285E-07	1,264E-07	-1,6683%

Podemos verificar que as alterações propostas para os parâmetros durante o processo de otimização automática (Tab.9) tendem a representar os danos ao propor reduzir a inércia e módulo de elasticidade global, porém apresentou também um incremento no valor da área da seção e massa específica do material, conflitante com o modelo analisado.

Ainda assim, o processo de otimização por parâmetros globais conduzir a representação da estrutura de forma mais precisa melhorando a correlação com o comportamento experimental, conforme apresentado na Tab. 10.

Tabela 10: Valores Finais dos Parâmetros de Resposta

Parâmetros	Numérico	Experimental	Diferença (%)
1	41,14 Hz	40,14 Hz	-2,492%
2	113,19 Hz	117,47 Hz	3,638%
3	221,48 Hz	222,22 Hz	0,330%
4	365,42 Hz	369,72 Hz	1,163%
5	544,83 Hz	542,30 Hz	-0,468%
6	759,50 Hz	738,71 Hz	-2,815%
7	99,822%	100,00%	0,178%
8	99,697%	100,00%	0,303%
9	99,613%	100,00%	0,387%
10	99,098%	100,00%	0,902%
11	99,022%	100,00%	0,978%
12	98,635%	100,00%	1,365%

No segundo teste realizou-se a otimização por parâmetros locais de projeto, ou seja variando de forma independente por elemento do modelo. O primeiro passo foi realizar a análise de sensibilidade conforme apresenta a Fig. 11, onde os parâmetros de projeto módulos de elasticidade dos elementos (1 a 33), massa específica (34 a 66), área (67 a 99) e Inércia em Y (100 a 132), são comparados com os parâmetros de resposta das seis primeiras frequências verticais (1 a 6) e os valores dos MAC dos modos correspondentes (7 a 12).

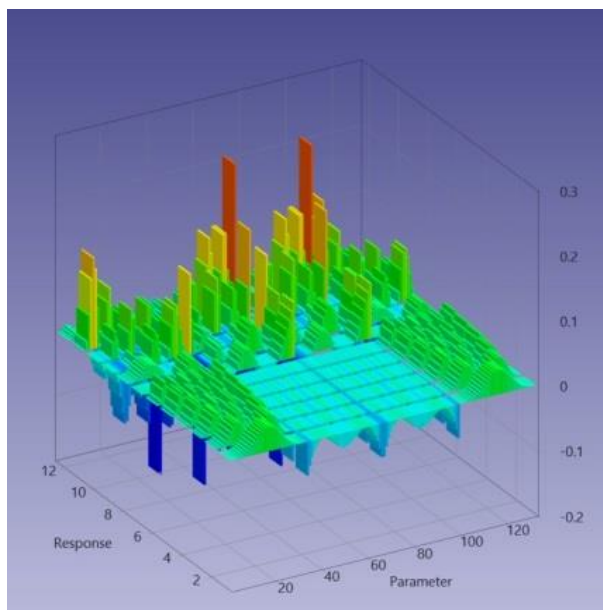


Figura 11: Análise de sensibilidade – Parâmetros Locais

Assim, após a análise de sensibilidade procedeu a otimização automática dos parâmetros locais. O modelo final atualizado conduziu a uma representação extremamente precisa da estrutura, aprimorando a correlação com o comportamento experimental, conforme avaliado por meio dos parâmetros de resposta apresentados na Tab. 11.

Tabela 11: Valores Finais dos Parâmetros de Resposta

Parâmetros	Numérico	Experimental	Diferença (%)
1	40,1452	40,1440	-0,0030%
2	117,4410	117,4680	0,0230%
3	222,2150	222,2170	0,0009%
4	369,7000	369,7230	0,0062%
5	542,4100	542,2950	-0,0212%
6	738,7610	738,7080	-0,0072%
7	99,9084%	100,00%	0,0916%
8	99,8300%	100,00%	0,1700%
9	99,5513%	100,00%	0,4487%
10	99,0324%	100,00%	0,9676%
11	98,5937%	100,00%	1,4063%
12	98,6750%	100,00%	1,3250%

Quanto às alterações nos parâmetros encontrados no processo de otimização automática, estas levaram à representação dos danos analisados ao propor reduzir a inércia e o módulo de elasticidade, principalmente nos elementos ao meio vão, onde se encontram os elementos danificados, como pode ser observado na Fig. 12 a seguir.

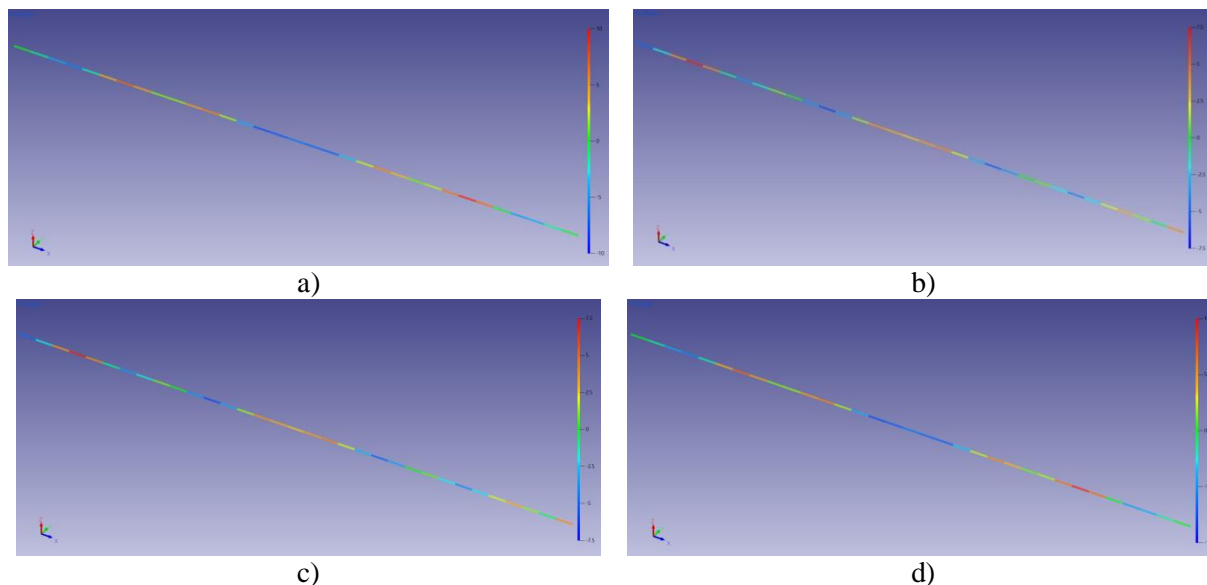


Figura 12: Alteração percentual dos parâmetros locais no processo de otimização. a) Módulo de Elasticidade. b) Massa específica. c) Área. d) Inércia Y

5.2.2 Localização de danos com Redes Neurais Artificiais (RNAs)

A detecção de danos utilizando as RNAs, especificamente a rede SOM com o algoritmo LVQ, foi realizada no ambiente do Matlab, especificamente, usando o *Neural Network Toolbox*, um pacote destinado ao uso das Redes Neurais Artificiais.

O *Neural Network Toolbox*™ é um pacote computacional inserido no ambiente do Matlab que fornece ferramentas para execução, visualização e simulação de Redes Neurais Artificiais em diferentes configurações, sejam elas no modo de aprendizado, no algoritmo utilizado para o seu treinamento, na maneira de processar dos dados, bem como nas funções de ativação utilizadas.

O processamento tem início com a indicação dos dados necessários em cada etapa (padrões de entrada), isto é, no treinamento e teste da rede. Neste trabalho, como dados de entrada para o treinamento, foram utilizadas as frequências e as 34 coordenadas dos modos de vibrações obtidos dos cenários danificados, apresentados na Tabela 4, bem como dos modelos com variação de temperatura; resultando em uma matriz 35x26. As saídas corresponderam às posições dos elementos danificados, correspondendo a uma matriz 34x26 (Tabela 12).

Tabela 12: Cenários usados no treinamento das redes.

Rede (r = 1 to 6)	Entrada da rede	Cenário	Elementos danificados	Saída da rede (vetor com 34 coordenadas contendo 0 e apenas a posição do dano contedo o algarismo 1)
r	r ^o Freq r ^o modo de vibração	1	Intacto (variação de temperatura)	1
		2	Intacto (variação de temperatura)	1
		3	intacto (modo de vibração em módulo)	1
		4	Intacto (modo de vibração invertido)	1
		V1	intacto	1
		V2 - V22 (Tabela 02)	18-33	Um dos nós correspondetes ao elemento danificado

Foram criadas seis redes, cada uma referente a um modo de vibração da viga, por exemplo, a primeira rede foi treinada e testada com a primeira frequência e o respectivo modo de vibração dos modelos. Neste contexto, foram necessários 20, 30, 35, 55, 70 e 100 neurônios para as redes 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente, e os erros encontrados foram da ordem de 10⁻².

A fim de avaliar a performance das RNAs, aos testes foram fornecidas as frequências e os modos de vibração do modelo experimental da viga danificada (redução na seção transversal dos elementos 18 e 19) para as redes 1, 2, 3, 4, 5 e 6, como mostra a Fig.13.

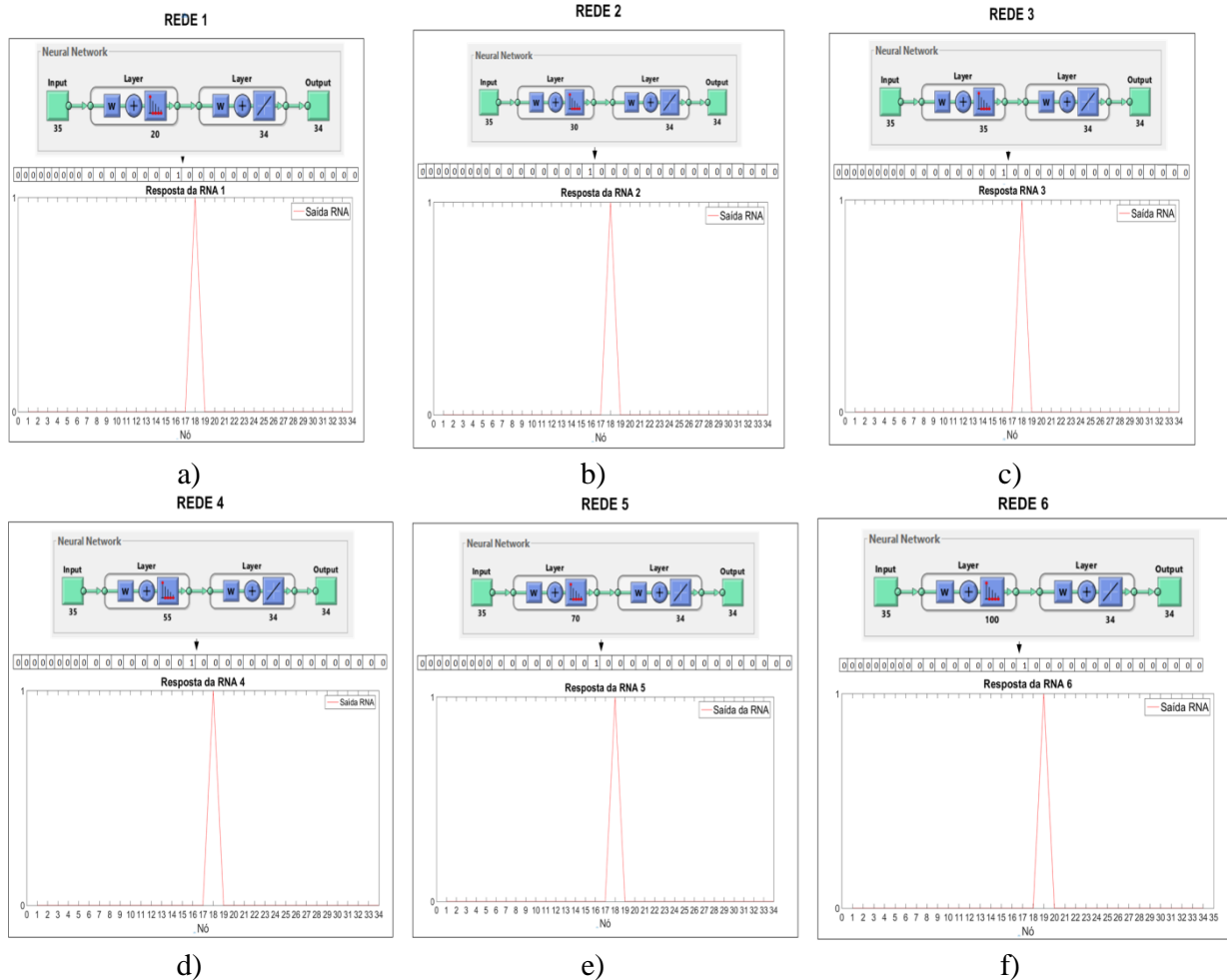


Figura 13: Respostas das 6 RNAs. (a) Rede 1. (b) Rede 2. (c) Rede 3. (d) Rede 4. (e) Rede 5. (f) Rede 6.

Com os resultados encontrados pelas RNAs, é possível observar que as redes foram capazes de identificar com uma boa precisão a posição dos elementos danificados. Da rede 1 a 5, o nó apontado correspondeu à posição 18 (pico). Já na rede referente ao treinamento com a 6ª frequência e o 6º modo de vibração, observa-se uma alteração no resultado, ou seja, após o processamento, a rede forneceu como saída o nó 19. Tal fato pode ser considerado correto, uma vez que os elementos do modelo experimental são delimitados pelos nós 19 e 20.

Observa-se também um aumento significativo no número de neurônios de cada rede para se chegar a um bom resultado, tal fato pode ser explicado, uma vez que as diferenças entre as frequências experimental e numérica vão aumentando gradativamente, dificultando a relação entre treinamento e teste das RNAs, uma vez que estas são treinadas e testadas com dados numéricos e experimentais, respectivamente.

É importante ressaltar que as RNAs 5 e 6 apresentaram maiores dificuldade durante o processamento, ou seja, em alguns testes identificaram um nó afastado dos nós 18 ou 19.

6 CONCLUSÕES

O objetivo da atualização do modelo numérico da viga intacta V1 e com dano V2, foi avaliar a capacidade de representar analiticamente o comportamento dinâmico, assim como avaliar a capacidade de identificação e detecção de danos por meio da atualização do modelo numérico. Assim, algumas conclusões puderam ser inferidas por meio da avaliação dos modelos numéricos analisados:

- Com relação à análise de sensibilidade dos parâmetros pode-se verificar que os parâmetros de maior impacto sobre a resposta de frequência e índice MAC foram o módulo de elasticidade e inércia na direção Y, com um coeficiente de sensibilidade de +0,5, e os parâmetros de massa específica e área da seção apresentaram coeficientes de correlação com as respostas de -0,5, sendo estes os parâmetros adotados para o processo de atualização.
- A atualização do modelo numérico da viga V1 (intacta) com base nos dados experimentais correspondentes conduziu a um modelo atualizado que apresentou apropriada correlação com o comportamento experimental, diminuindo os erros na estimativa das frequências e melhorando a correlação dos modos avaliados pelo índice MAC.
- Em relação à capacidade de identificar e localizar danos por meio dos processos de otimização automática de modelos numéricos e Redes Neurais Artificiais (RNAs), pode-se concluir que:
 - Quando adotados os parâmetros de forma global a atualização conduziu a uma boa representação da viga, melhorando a correlação com o comportamento experimental. As alterações nos parâmetros globais conduziu a representação dos danos analisados ao propor reduzir a inércia e módulo de elasticidade, contudo apresentou um incremento no valor da área da seção e massa específica do material, incompatível com o dano analisado, indicando a possibilidade de identificação de danos.
 - Quando adotados os parâmetros de forma local por elemento, pode-se verificar que o programa conduziu a representação da estrutura extremamente precisa, com erros menores que 0,01% nas frequências e de aproximadamente 1% no índice MAC. As alterações nos parâmetros levaram a representação dos danos analisados ao propor reduzir a inércia e o módulo de elasticidade, principalmente nos elementos ao meio vão onde se encontram os elementos danificados, indicando a possibilidade de identificação e localização de danos por meio da atualização do modelo numérico.
 - Por fim, por meio dos processos de otimização automática de modelos numéricos foi possível avaliar a capacidade de identificar e localizar danos, sendo que o processo apresentou grande aptidão para convergir para os valores de danos já mensurados e analisados no ensaio experimental, se mostrando promissor também para este fim.
 - As RNAs apresentaram boa precisão na localização dos danos existentes no modelo experimental da viga. Foi possível observar que, a partir de um modelo numérico que represente fielmente o modelo experimental, é possível gerar cenários de danos e assim realizar o treinamento de uma rede e testá-la usando dados experimentais.
 - Observa-se, ainda, que diante do aumento significativo de neurônios para as RNAs treinadas com as maiores frequências, tem-se uma indicação de que a técnica pode ser

confiável, desde que o comportamento entre modelos numérico e experimental seja semelhante.

- Deste modo, com base no exposto, embora tendo apresentado um bom desempenho na localização de danos em vigas, mais estudos devem ser feitos com as Redes Neurais Artificiais considerando estruturas mais complexas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte fornecido pelas seguintes instituições e parceiros no trabalho:

Universidade de Brasília (UnB)

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Licença acadêmica software FEMTools.

REFERÊNCIAS

Adams, R.D.; Cawley, P.; Pye, C.J.; Stone, B.J. (1978) ‘A vibration technique for nondestructively assessing the integrity of structures’, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp.93–100, Science.

Allemang, R. J. (2003). The Modal Assurance Criterion Twenty Years of Use and Abuse. *Sound and Vibration Magazine*, 37(8), 14-21.

Braga, A. P.; Carvalho, A. P. L. F.; Ludermir, T. B. (2011) *Redes Neurais Artificiais - Teoria e Prática - 2ª Ed.* Editora LTC

Brasiliano, A. (2005) *Identificação de Sistemas e Atualização de Modelos com Vistas à Avaliação da Integridade Estrutural*, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

Callister, W. D.; Rethwisch, D. G. (2009). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (8 ed.). Wiley. doi:9780470941669

Clough, R. W.(1960). The Finite Element in Plane Stress Analysis. *Proceedings 2nd ASCE Conference on Electronic Computations*, (pp. 345-378). Pittsburgh, USA.

Elkordy, M.F.; Chang, K.C.; Lee, G.C. (1993) ‘Neural networks trained by analytically simulated damage states’, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp.130–145.

Haykin, S. *Neural Networks (1999) A Comprehensive Foudation; 2nd edition*, Person Educatio.

Mottershead, J.; Friswell, M. (22 de outubro de 1993). Model Updating in Structural Dynamics: A Survey. *Journal of Sound and Vibration*, 167(2), 347-375.

Zienkiewicz, O. C.; CHEUNG, Y. K. (1967). The finite element method in structural and continuum mechanics: numerical solution of problems in structural and continuum mechanics (Vol. I). London: New York McGraw-Hill.

Shu, J.; Zhang, Z. (2012) *Damage Detection on Railway Bridges Using Artificial Neural Network and Train-Induced Vibrations*, Master Thesis, School of Architecture and the BuiltEnvironment, Stockholm, Sweden.

V. Meruane and J. Mahu (2014), “Real-Time Structural Damage Assessment Using Artificial Neural Networks and Antiresonant Frequencies,” *Shock and Vibration*, vol. 2014, 653279, 14.