

## **DAMAGE DETECTION USING AN HIBRID FORMULATION BETWEEN CHANGES IN CURVATURE MODE SHAPES AND NEURAL NETWORK.**

### **Miguel Genovese**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto. de Engenharia Civil e Ambiental.  
Brasília - DF, CEP: 70910 – 900.

### **Adolfo Bauchspiess**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto. Engenharia Elétrica.  
Brasília - DF, CEP: 70910 – 900.

### **José L.V. de Brito**

### **Graciela N. Doz**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto. de Engenharia Civil e Ambiental.  
Brasília - DF, CEP: 70910 – 900.

***Abstract** The correct location and quantification of damages in structures has a great value for the subsequent evaluation of their real conditions for use. In this field, dynamic tests applied to structures can be a valid alternative for this purpose.*

*The results obtained from dynamic tests are frequently analyzed by methods. Pandey et al (1991) proposed a method to do so. This method tries to locate the damage by the changes in curvature mode shapes produced by the presence of damage.*

*In the last years, countless studies were published using Neural Networks in many fields of science. This study uses this neural network together with damage detection from changes in curvature to make a hybrid formulation.*

*Thanks to Neural Network, it is possible to implement the quantification of damage in the Method of Changes in Curvature Mode Shapes in a easy way.*

**Keywords:** *Damage Detection, System Identification, Neural Network, Curvature Mode Shapes, Dynamic Test*

## 1. INTRODUÇÃO

Geralmente durante a sua vida útil as estruturas são submetidas a diversos tipos e formas de carregamentos estáticos e dinâmicos, como cargas permanentes ou acidentais, movimento de pessoas ou máquinas, carregamentos devido ao vento, terremotos, impactos, fadiga, etc.

Estes carregamentos, associados aos fenômenos da corrosão, ataques químicos, carbonatação, radiação, entre outros, podem produzir diferentes tipos de danos, de acordo com a morfologia da estrutura e do material utilizado na sua construção.

Pontes e estádios de futebol, em especial aqueles construídos há mais de 30 anos, vêm apresentando diversos avisos de deterioração. As estruturas vêm sendo solicitadas por carregamentos dinâmicos aos quais não foram inicialmente projetadas, como por exemplo os resultantes do aumento em tamanho e peso dos veículos de carga que trafegam nas pontes e rodovias. As torcidas organizadas têm mudado seu comportamento da década de 50 até os dias de hoje, quando, além de pular sobre as arquibancadas dos estádios, o fazem de maneira sincronizada.

Quando existe dúvida a respeito da integridade estrutural é necessário utilizar técnicas para determinar em que condições as estruturas se encontram. As técnicas para avaliar danos em estruturas são classificadas em destrutivas e não destrutivas.

As técnicas destrutivas geralmente inutilizam a estrutura ou modelo ao qual estão sendo aplicadas, ficando esses métodos restritos à pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas. Deste modo, estes métodos têm pouco uso na vida prática.

As técnicas não destrutivas consistem em fornecer uma quantidade de energia, relativamente pequena, perto do local suspeito do dano e examinar a resposta da estrutura. Essas técnicas diferem em virtude das diferentes formas e características da energia incidente.

Entre estas, os ensaios dinâmicos aparecem como uma alternativa e consistem em excitar a estrutura e medir as vibrações nela produzidas. Com as respostas experimentais é possível obter as características dinâmicas da estrutura, ou seja, seus modos e frequências naturais de vibração, com as correspondentes razões de amortecimento. Da análise destes modos e frequências naturais de vibração pode-se determinar indiretamente o estado atual da estrutura.

Usualmente o dano modifica as condições da estrutura e esta modificação depende do tipo de problema. Como exemplo ilustrativo, considere-se o dano proveniente de fissuras ou trincas em uma viga.

Estas fissuras alteram principalmente as propriedades geométricas da seção danificada, uma vez que há uma redução da inércia e/ou área da seção transversal em questão. Oposto a isso encontra-se o dano provocado por agentes químicos. Estes agentes químicos geralmente incidem nas propriedades físicas, deteriorando-as de forma a reduzir seus valores, como acontece com o módulo de elasticidade.

Independente do tipo de dano, este produz uma redução da rigidez da estrutura, pois esta depende das propriedades físicas e geométricas das peças. Isto já foi verificado por diversos autores, como por exemplo, Adams et al (1978) e Coob e Liebst (1997).

Embora o dano também afete a massa da estrutura, esta modificação geralmente é desprezível e pode-se considerar que esta não sofre modificação, como argumentam Adams et al (1978) e Hearn e Testa (1991).

Visto que o dano altera de alguma forma a massa e a rigidez da estrutura, as suas características dinâmicas, como modos e frequências naturais e razões de amortecimento, são também afetados em maior ou menor grau, dependendo do local e severidade do mesmo.

Estudos experimentais, como o do Raghavendrchar e Aktan (1992) em uma ponte rodoviária com dano verificaram uma queda nas frequências naturais de vibração, e conseguiram localizar corretamente o dano através da análise dos modos de vibração.

Com o uso de computadores e sistemas de captação e emissão de sinais é possível realizar estes ensaios de maneira padrão sem muitas dificuldades, porém, com um custo elevado em algumas situações. No entanto, para grandes estruturas onde a utilização de ultra-som ou provas de carga são ensaios onerosos, os ensaios dinâmicos podem ser uma alternativa e as vezes a única solução economicamente viável.

Uma vez que o dano modifica a massa e a rigidez da estrutura, é possível assegurar que as características dinâmicas como modos de vibração e frequências naturais são também afetadas de alguma forma, de acordo com a localização e severidade do mesmo.

Retirar a localização e quantificação do dano das características dinâmicas não é uma tarefa simples. Este problema é muitas vezes classificado como um problema de identificação de sistemas. Problemas deste tipo são amplamente estudados em várias áreas do conhecimento.

Um problema inverso clássico foi estudado durante a Segunda Guerra Mundial, quando foi necessária a detecção de aviões inimigos antes de sua chegada. Consistia no envio de ondas electromagnéticas que ao se chocarem com a fuselagem dos aviões retornavam ao ponto de emissão do sinal. As ondas rebatidas eram captadas e transformadas de maneira a indicar a posição do avião quase instantaneamente.

Outro problema inverso clássico consiste na visualização do feto no útero da mãe. Enviam-se ondas de ultra-som ao útero que se refletem diferentemente. Dessas diferenças é possível delimitar a silhueta do feto.

Em ambos os casos desconhecem-se as características ou posição do objeto desejado, porém, possui-se uma resposta dele aos estímulos externos.

Observa-se que no problema inverso de determinação da integridade estrutural por meio das características dinâmicas da estrutura, aqui tratado, também consta de uma entrada (*input*), representada pela excitação produzida na estrutura e uma saída (*output*), constituída pela resposta apresentada. A dificuldade situa-se em transformar esta resposta da estrutura na sua condição ou estado, ou em outras palavras, montar, utilizando os modos e frequências de vibração, as matrizes de massa e rigidez da estrutura que a caracterizam.

Um dos primeiros artigos que tratam da localização do dano como método para avaliação da integridade estrutural foi escrito por Adams et al (1978). Os autores estudaram as alterações que se produzem nas características dinâmicas de estruturas simples de barras em vibração axial. Nesse estudo propuseram um método que simula o dano na viga através da introdução de uma mola no local do dano com rigidez menor do que a das duas parcelas de vigas adjacentes a ela. Conseguiram medir satisfatoriamente o local e a intensidade do dano utilizando os modos e frequências naturais de vibração obtidos experimentalmente.

Allemang e Brown (1982) definiram o índice MAC (Modal Assurance Criterion), ou Critério de Concordância Modal, para testar a ortogonalidade entre dois modos de vibração. Wolff e Richardson (1989) observaram a utilidade deste índice para localização de danos em estruturas.

Lieven e Ewins (1988) definem o índice COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion). O COMAC, ou Critério de Concordância da Coordenada Modal segue o mesmo princípio básico do MAC, sendo que se diferencia deste no fato de ser uma medida pontual. Este índice já foi concebido para localização de danos em estruturas pelos seus autores.

Por meio de um estudo numérico e experimental de uma ponte rodoviária e de seu modelo em escala reduzida, Salane e Baldwin (1990) mostraram que, considerando a massa da estrutura inalterável, pode-se rearranjar a equação de equilíbrio dinâmico para obter um sistema de equações lineares onde as únicas incógnitas são os coeficientes da matriz de

rigidez. Este estudo levou os autores a acreditarem que os modos de vibração são melhores indicadores do que as alterações sofridas nas frequências e no amortecimento.

Pandey et al (1991) apresentaram um método de localização de danos baseado na modificação entre as curvaturas dos modos de vibração da estrutura danificada e não danificada. Neste estudo numérico testa-se o método com duas vigas, uma delas simplesmente apoiada e a outra em balanço. Além da consolidação dos resultados fez-se uma comparação com os índices MAC e COMAC, sendo estes últimos questionados a respeito da sua validade e eficiência.

Neste trabalho propõe-se localizar o dano em estruturas simples de vigas mediante a utilização do Método acima citado e quantificá-lo por meio da utilização de redes neurais artificiais no ponto danificado previamente determinado.

Alguns trabalhos de localização e quantificação nesta área já foram feitos utilizando a técnica de redes neurais como por exemplo, Tsou e Shen (1994) e Wong et al (1996), porém a formulação neste trabalho é uma formulação híbrida que combina o método da alteração na curvatura dos modos de vibração com a técnica de redes neurais.

## 2. LOCALIZAÇÃO DO DANO ATRAVÉS DA ALTERAÇÃO NA CURVATURA DOS MODOS DE VIBRAÇÃO

O método da alteração na curvatura (Pandey et al 1991) tem como objetivo localizar o dano nas estruturas. As estruturas compostas de vigas ou placas têm como esforço principal o momento fletor. Como o momento fletor é proporcional à curvatura, equação (1), a deterioração de uma parte da estrutura altera o momento fletor e, conseqüentemente, a curvatura dos modos de vibração. A equação que relaciona momento fletor da viga (M) com sua curvatura ( $y''$ ) é;

$$y'' = \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (1)$$

onde E o módulo de elasticidade do material da viga (módulo de Young) e I o momento de inércia da sua seção transversal.

Assim, a localização do dano é obtida através da maior diferença existente entre as curvaturas provenientes dos modos de vibração transversais das vigas com e sem dano.

Para calcular a curvatura de uma viga, proveniente de um modo de vibração, por diferenças finitas, utiliza-se a equação;

$$y_i'' = \frac{x_{i+1} + x_{i-1} - 2x_i}{h^2} \quad (2)$$

onde;

$y_i''$ : curvatura no ponto ( i ),

$x_i$  : ordenada do modo de vibração no ponto ( i ) e

h : comprimento entre os elementos.

O Método da Curvatura utiliza a propriedade de vigas e placas, que diz respeito a seu esforço principal. Em decorrência disso, esse método não pode ser aplicado diretamente a estruturas de pórticos ou treliças, requerendo talvez algumas adaptações.

### 3. BREVE INTRODUÇÃO A REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A rede neural de maneira simplificada é um conjunto em várias camadas de neurônios artificiais interligados entre si. O neurônio artificial foi inicialmente proposto por McCulloch e Pitts W. (1943). Esse primeiro neurônio artificial foi um neurônio booleano tendo serias limitações na sua aplicação, porém foi o primeiro trabalho que inspirou vários autores a aperfeiçoarem este neurônio e abrirem uma nova área para a ciência chamada de Inteligência Artificial.

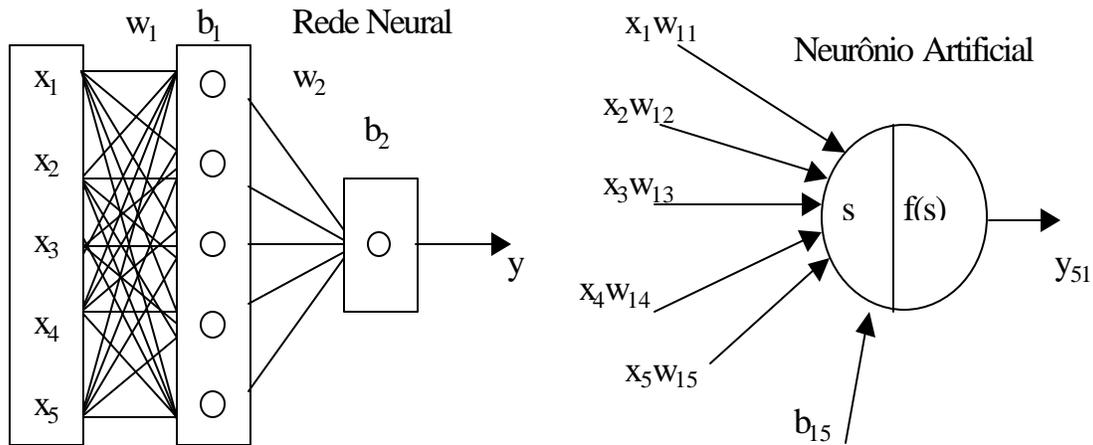


Figura 1: Perceptron Multicamadas e esquema de um neurônio artificial

Basicamente os neurônios artificiais são inspirados nos neurônios biológicos, células altamente complexas e ainda não totalmente compreendidas. Estas células possuem dendritos que são longas fibras captadoras de sinais externos provenientes de alguma excitação. Estes sinais são conduzidos à soma ou corpo central da célula onde são processados e transmitidos ao cérebro através de uma fibra comprida denominada axônios em mili-segundos.

Por analogia o neurônio artificial recebe sinais ou dados ( $\mathbf{x}$ ) através de suas  $\mathbf{n}$  entradas que por meio da soma e multiplicação de pesos ou ganhos sinápticos ( $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{b}$ ) obtendo-se a função de ativação ( $s$ ). Esta função de ativação é alterada pela função de transferência ( $\mathbf{f}(s)$ ) e sua resposta é conduzida para a saída ( $\mathbf{y}$ ) do neurônio como sinal ou resposta. Na figura 1 pode-se observar este neurônio, onde as equações utilizadas no nosso caso foram as seguintes;

$$s_5 = b_{15} + \sum_{i=1}^{n=5} w_{1i} \cdot x_i . \quad (3)$$

$$y = f(s) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha s}} . \quad (4)$$

onde a equação 4 é a função de transferência ou função de ativação do neurônio que neste caso particular é uma função logística e  $\alpha$  é uma constante de espalhamento.

Existem variadas topologias ou modos de se ligar cada neurônio ou camadas de neurônios com os outros em questão. Uma das mais conhecidas é a tipologia de Perceptron Multicamadas onde os neurônios de McCulloch foram melhorados e colocados em camadas interligadas entre si de maneira seqüencial. Assim, a primeira camada que recebe os dados foi denominada de camada de entrada e a última camada denominada camada de saída. As camadas intermediárias freqüentemente são chamadas de camadas ocultas.

Uma rede está totalmente interligada quando os neurônios de uma das camadas estão ligados a todos os neurônios da camada seguinte, caso contrario a rede é chamada de

parcialmente conectada. O esquema utilizado de rede e neurônio pode ser visualizado na figura 1.

Cada entrada é multiplicada por pesos ( $w$ ,  $b$ ) estipulados inicialmente pelo operador. Obter estes pesos que reproduzem a saída para uma certa entrada é o objetivo do método. Quando estes pesos da rede conseguem reproduzir os padrões a eles apresentados com o menor erro possível ou previamente estabelecido se diz que a rede está treinada. Somente pela experiência somos capazes de aprender, fazendo-se assim uma analogia com o aprendizado humano.

O algoritmo que possibilitou o treinamento da rede neural perceptron multicamadas é o de retropropagação de erro ou mais conhecido como algoritmo de Backpropagation (Rumelhart et al. 1986). Nota-se que uma vez treinada, a rede reconhece os valores para os quais foram treinadas. Devido a isto, as redes neurais artificiais são frequentemente enquadradas como aproximadores universais de funções.

Quando não é possível dispor da equação analítica do problema mas sim alguns pontos, é possível treinar a rede para que esta aprenda ou ajuste uma função qualquer minimizando o erro entre a saída e a referência. O conhecimento, neste caso, encontra-se distribuído nos pesos da rede e não somente na sua topologia ou em uma única função. Isto confere à rede robustez, permitindo em alguns casos que, mesmo danificada (sem o correto funcionamento de alguns neurônios) consiga cumprir o seu papel.

Um dos pontos de maior importância é quando apresenta-se à rede já treinada um padrão qualquer que não foi incluído no seu treinamento. Se tudo foi feito de maneira correta e tomando certos cuidados, a rede neural consegue colocar este padrão dentro do que se espera na saída. Em outras palavras, a rede faz associações de seus conhecimentos e conclui novos fatos que inicialmente eram desconhecidos para ela. Por analogia, quando somos submetidos a uma situação nova fazemos analogias com situações similares a esta nova. Neste momento tomamos novas decisões para uma nova experiência, ou em outras palavras, pensamos. Deste fato provem o termo Inteligência Artificial pois a Rede Neural consegue retirar valores coerentes de uma situação não antes vivenciada.

## 4. EXEMPLO NUMÉRICO

### 4.1 Modelo

Uma viga metálica de 198 cm de comprimento foi analisada numericamente mediante o Método dos Elementos finitos. Foi discretizada com 33 elementos de 6 cm de comprimento cada (Fig 2) e obtidos os cinco primeiros modos de vibração na condição livre livre.

A área da seção transversal é de  $14.5 \text{ cm}^2$  e uma inércia de  $31.7 \text{ cm}^4$ . O módulo de elasticidade é de  $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$  e o coeficiente de Poisson igual a 0.29. O peso por metro linear da viga é de 111.83 N/m.

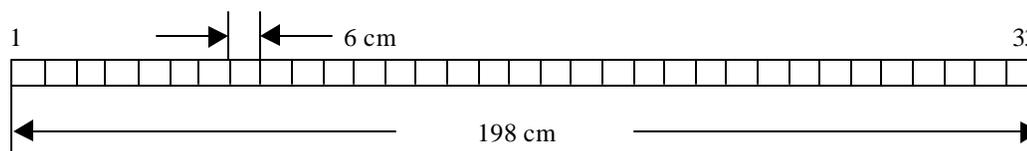


Figura 2: Discretização da viga adoptada

Foram analisadas também 13 vigas com dano. Os danos foram introduzidos por meio de uma redução equivalente de inércia e área de um elemento. Assim, foram estudadas vigas com redução de inércia de 3, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20, 23, 25, 28, 30, 33 %.

Estas seis percentagens de danos foram localizadas ao longo da viga danificando um elemento de cada vez.

## 4.2 Resultados

Foram calculados os cinco primeiros modos de vibração mediante o Método dos Elementos Finitos. Levou-se em conta a deformação por corte e aplicou-se a condensação estática para eliminar a rotação e o deslocamento longitudinal a viga. Devido as condições de contorno assumida para a viga, os dois primeiros modos de vibração correspondem a movimento de corpo rígido e por isso não forma considerados. As freqüências da viga sem dano estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Freqüências das Vigas com e sem dano

Freqüências (Hz)	Viga Sem dano	Redução 20% inércia no elemento No. 10.
Primeira	67.76	67.48
Segunda	184.22	182.72
Terceira	354.01	352.62
Quarta	570.26	569.59
Quinta	825.83	821.93

Numa seguinte etapa foram obtidos as freqüências e modos de vibração de vigas que possuem o dano. Seis percentagem de redução de inércia foram utilizados, de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 %.

Foram obtidas 33 soluções devido aos 33 elementos (cada solução contendo os cinco primeiros modos de vibração) para cada percentagem de dano, dando um total de 198 respostas. Para cada solução, foi calculada a curvatura dos modos com dano e sem dano, e feita a diferença entre estes. No total obtiveram-se 990 diferenças e em todos os casos o dano foi localizado com eficiência.

A figura 3 apresenta a localização do dano para o elemento 10 compreendido entre os nós 10 e 11 com uma redução de inércia de 20 %. Verifica-se que os picos nos gráficos da alteração na curvatura encontram-se nos pontos 10 e 11, evidenciando o elemento danificado. Nota-se claramente a alteração na curvatura provocada pela presença do dano. A Tabela 1 apresenta as freqüências de vibração desta viga danificada.

Figuras semelhantes foram obtidas para todos os outros casos, mas somente esta é apresentada neste trabalho. Embora tivessem características diferentes, todas as figuras obtidas apresentaram seus máximos nos locais do dano introduzido numericamente.

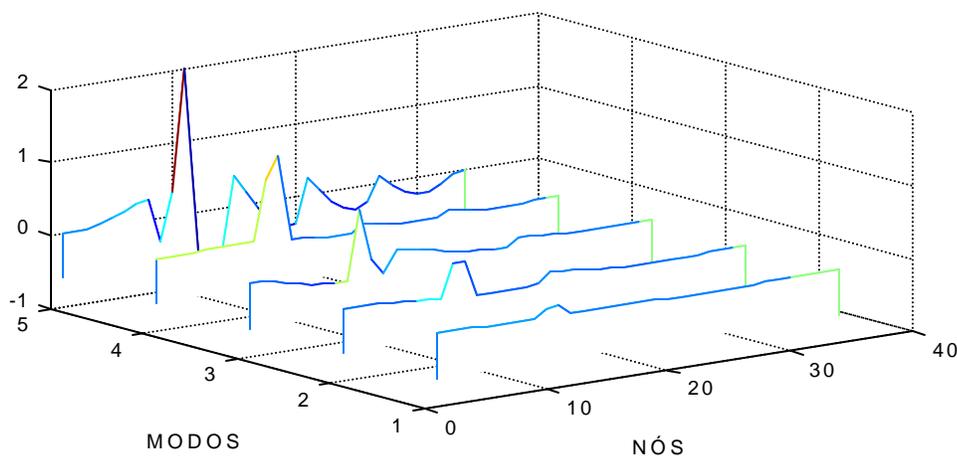


Figura 3: Método da Alteração na Curvatura aplicado a viga com dano de 20 % no elemento 10

Utiliza-se a seguir valores absolutos dos máximos picos obtidos dos gráficos de curvaturas para quantificar o dano. Estes valores serão as entradas para a rede neural. Assim, esta rede consta de cinco entradas, 5 neurônios na camada central e um neurônio na camada de saída, como mostra a figura 2. A resposta procurada deve ser a redução do dano.

Para treinar a rede foram apresentados a esta os cinco picos máximos da curvatura para cada dano. Isto representou um total de 198 dados de entrada, sendo que cada dado constava de 5 entradas e somente uma saída, o dano em questão. Estes dados representam o conjunto de treinamento ao qual a rede será submetida.

Uma variante mais eficiente do algoritmo Backpropagation ( Levenberg-Marquardt ) foi utilizada para treinar a rede, sendo que a convergência foi obtida com 341 épocas atingindo-se um erro menor que 0.0001. O erro é calculado como a raiz do quadrado da soma de todos os erros cometidos individualmente para cada elemento danificado em uma porcentagem de dano. Uma vez treinada, a rede possibilita a quantificação do dano de maneira simples e eficiente.

Com a rede treinada, foi realizado o teste desta com o próprio conjunto de treinamento. Assim, calculou-se para cada elemento e cada porcentagem de dano do erro cometido que ficou inferior a 3%, como mostra a figura 4.

Para a validação dos resultados, simulou-se sete tipos diferentes de danos em todos os elementos um por um. As quantias foram de 3, 8, 13, 18, 23, 28 e 33 % de redução de inércia. Os resultados são apresentados na figura 5. Como pode-se observar, o maior erro cometido foi inferior a 27 %. Este valor é alto, porém ocorre para um dano muito pequeno, correspondente a uma redução de 3%, valor este que extrapola os limites do conjunto de treinamento. Já para os demais valores, o erro cometido foi menor que 4%. Este sim já é um resultado razoável. Note-se que o valor de 33% também extrapola os limites do conjunto de treinamento, porém apresentou um bom resultado, a diferença do seu similar no limite oposto (3%).

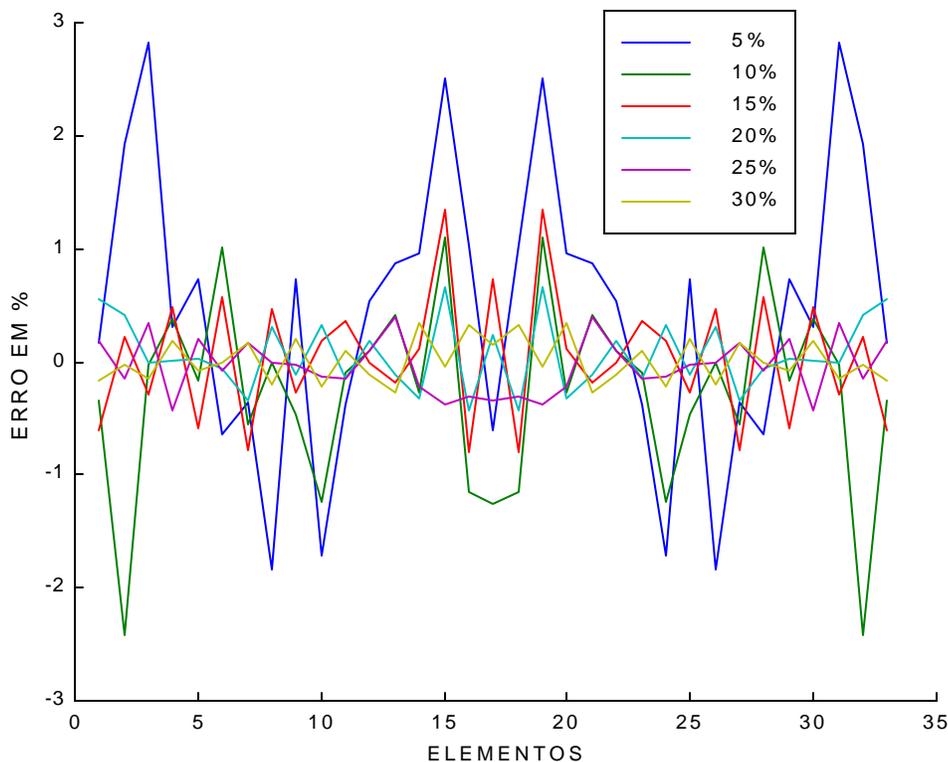


Figura 4: Erro pontual cometido na quantificação pela rede neural quando submetida ao conjunto de treinamento.

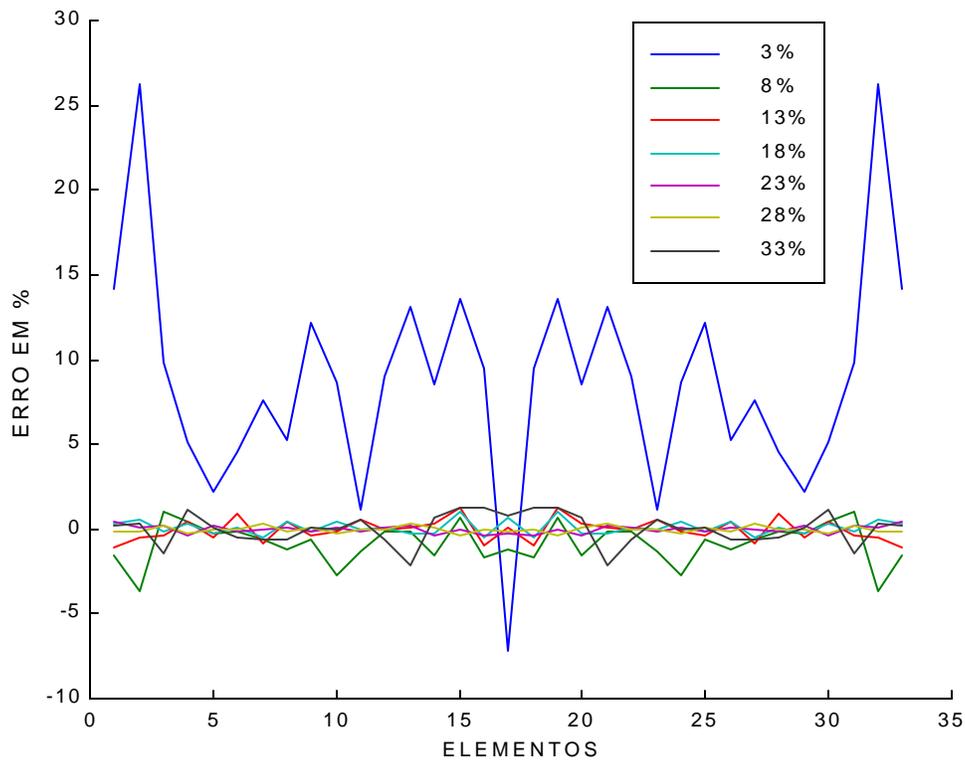


Figura 5: Erro pontual cometido na quantificação pela rede neural quando submetida ao conjunto de treinamento.

#### 4. CONCLUSÃO

A formulação híbrida apresentada neste documento obteve bons resultados para o problema tratado. A localização do dano foi bem sucedida em todos os casos e com todas percentagens de danos estudadas.

Nota-se uma perda de sensibilidade na quantificação para o caso de danos pequenos, porém isto ocorre na maioria dos métodos de determinação de danos.

Ressalta-se que os erros cometidos na quantificação ficaram abaixo de 3 % com o próprio conjunto de treinamento e 4% no conjunto de validação excluindo deste o limite extremo de 3% de redução de inércia.

Embora o treinamento da rede neural seja um processo demorado, a sua aplicação é rápida e simples. Assim, é possível monitorar estruturas de maneira a se determinar o dano no local em tempo real, tendo inicialmente ajustado os valores necessários à utilização da mesma.

#### REFERÊNCIAS

- Adams R.D. et al., 1975, A Vibration Technique for Non-Destructive Assessing the Integrity of Structures. *Journal of Mechanics Engenhering Science* , No. 20, vol.2, pp. 93-100.
- Allemang R. J. and Brown. D. L., 1978, A Correlation Coeficiente for Modal Vector Analysis. In Proc. 1st. Int. Modal Analisís Conference, Soc. for Experimental Mech. Bethel, Conn., pp 110-116.
- Cawley P. and Adams R. D., 1979, The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies. *Journal of Strain Analysis*, No. 14, vol. 2, pp. 49-57.
- Cobb, R. G., Liebst B. S., 1997 “Structural Damage Identification Using Assigned Partial Eigenstructure”, *AIAA* Vol. 35, No. 1,

- Hearn, G, Testa, R. B., 1991, "Modal Analysis for Damage Detection in Structure", Journal of Structural Engineering, Vol 117, No. 10, pp.3042-3063.
- Lieven N.A.J. and Ewins D. J.,1988, Spatial Correlation Of Mode Shapes, The Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC). In Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference, vol. 1, pp 690-695.
- McCulloch W. and Pitts W., 1943, A Logical Calculus of The Ideas Immanente in Nervous Activity. Bulletin of Mathematícal Biophysics.
- Pandey A.K. et al., 1991, Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes. Journal of Sound and Vibration , No.145, vol. 2, pp. 321-332.
- Raghavendrchar, M., Aktan, A. E., 1992 "Flexibility by Multireference Impact Testing for Bridges Diagnostics", Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 8, pp.2186-2203.
- Rumelhart D. E., Hilton G., and Williams R., 1986, Learning Internal Representation by Error Propagation. Parallel Distributed Processing.
- Salane, H. J., Baldwin J. W., 1990, "Identification of Modal Properties of Bridge", Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 7, pp. 2008-2021.
- Tsou P. and Shen M. H. H., 1994, Structural Damage Detection and Identification using Neural Networks. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), vol. 32, pp. 176-183.
- Wong F. S. et al. 1996, On-Line Detection of Structural Damage Using Neural Networks. The Gordon and Breach Publishing Group.
- Wolff. T., Richardson, M., 1989, " Fault Detection in Structure from Changes in their Modal Parametes.", Proc. 7<sup>th</sup> Int. Modal Anal. Conference. Soc. for Experimental Mech. Bethel, Conn., pp.87-94.