

## **REDES NEURAIS ARTIFICIAIS: IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS**

**Douglas Alves de Souza**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. douglasalves9631@gmail.com

**Emilly Tallyssa Evangelista de Souza**

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. emillysouzazgm@gmail.com

**Fernando José dos Santos**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. fernandofelipe05@hotmail.com

**Marielle da Silva Macedo**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. mariellemacedo350@gmail.com

**Vilson Dalla Libera Júnior**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. vilson.dalla@gmail.com

### **Resumo**

Redes Neurais Artificiais (RNAs) são procedimentos computacionais que representam exemplos matemáticos inspirados na estrutura neural de organismos inteligentes. As RNAs podem ser utilizadas na construção civil através de modelos matemáticos aplicados na detecção de danos em elementos estruturais. Este estudo realizou uma análise comparativa através da avaliação da aplicação das RNAs na identificação de eventuais desgastes estruturais em elementos da construção civil. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico nas bases de dados Scielo, Science Direct, ResearchGate, Repositório de Universidades e Portal de Periódicos Capes. Durante a coleta de dados foram utilizadas as palavras-chaves “Redes Neurais Artificiais,” “Danos Estruturais” e “Construção Civil” na língua portuguesa e inglesa. Por meio deste estudo percebe-se que as RNAs são eficientes em informar o tipo de dano, sua intensidade e localização. Segundo os estudos avaliados a presença alta de ruído é o principal fator de interferência na eficiência das RNAs. Ainda assim, com os erros encontrados, as RNAs corroboram para o enriquecimento das técnicas na Construção Civil voltadas para identificação de falhas, desgastes e eventuais problemas que surgem durante a vida útil das estruturas.

Palavras-Chave: Redes Neurais Artificiais; Danos; Elementos estruturais; Construção Civil.

### **1. Introdução**

Uma edificação é a interligação lógica entre os diferentes componentes e materiais que possuem um determinado tempo de vida útil, ou seja, não duram eternamente. Estes elementos podem apresentar trincas ou romper-se perante a ação de um determinado nível de carregamento [20]. As falhas estruturais são danos na estrutura que implicam em mudanças nas suas propriedades físicas, e consequentemente nas características dinâmicas. Essas estruturas podem ser prédios, pontes, plataformas etc., em que tais falhas podem influenciar no desempenho geral da estrutura, bem como causar consequências desastrosas [6] [7]. A identificação de dano estrutural em seus ciclos primários permite sua correção através de pequenos reparos, tornando a manutenção menos trabalhosa do que seria caso o dano fosse constatado tardiamente [15].

Existem diversas técnicas utilizadas para a identificação de danos. Os procedimentos habituais se fundamentam em análise visual adquirida de forma experimental. Geralmente são aplicados através de experimentos com aplicação de ondas, campo magnético ou similar e em elucidação de resultados a partir da análise visual. Dentre os principais, podem ser citados os métodos de ultrassom, métodos de campo magnético, raios x, e métodos de campo térmico. Estes procedimentos estão submetidos a determinadas limitações, como a necessidade de se conhecer previamente as imediações da região que está sujeita à análise, bem como a capacidade que o dispositivo utilizado apresenta para ter acesso a esta região [4]. Também existem processos aptos a averiguar alterações estruturais provocadas por esforços iniciais aplicados à estrutura que causam variações de temperatura, estado de vibração, deformação ou outros. Essas alterações são detectadas por meio da comparação de um estado inicial que a estrutura apresenta (estado sadio) com o estado que a estrutura exhibe após algum fator externo provocar alteração desse estado [5].

De modo geral, os problemas de identificação de danos estão relacionados aos métodos que buscam uma abordagem apoiada nas propriedades dinâmicas das estruturas. Contudo, são utilizadas deformações específicas estáticas, como um modo mais simples e barato de detecção. Este método tende a exigir menor custo computacional, ainda assim, as amostras estáticas não possuem tanta informação quanto às dinâmicas [8]. Wang et al. [22] aponta um método no qual é utilizado a variação das frequências naturais, associado ao equilíbrio de forças estáticas, para aprimorar a caracterização da estrutura. Deste modo, as frequências naturais se encarregam de preencher parte da lacuna do modelo estático, apesar disso, estas técnicas apresentam algumas limitações. A primeira é que as estruturas estão submetidas a excitações ambientais devidas ao tráfego, ao vento, entre outras. Neste caso, os níveis de vibração são baixos e os sensores utilizados devem ser sensíveis para que as medições apresentem boa precisão, ainda que submetidas a erros inerentes de aquisição (ruído, por exemplo). A segunda está associada às variações advindas de efeitos de umidade, temperatura, condições de contorno, massas de ar, entre outros. E a terceira encontra-se no fato de o dano ser um fenômeno local, isso significa que a tendência é de que apenas danos severos sejam identificados se as frequências naturais e os modos de vibração forem analisados [2]. Neste contexto, pode-se citar a existência de ferramentas que, ao serem trabalhadas em conjunto com as propriedades dinâmicas, tornam-se métodos eficientes na constatação de danos, como é o caso das RNAs [16].

As RNAs são algoritmos computacionais que apresentam exemplos matemáticos inspirados na estrutura neural de organismos inteligentes, e que adquirem conhecimento através de uma análise detalhada [21]. De forma geral, uma RNA é uma estrutura projetada para funcionar de maneira similar à forma como o cérebro realiza uma determinada tarefa de interesse. Objetivando atingir um bom desempenho, as RNAs adotam uma estratégia de interligação maciça de células computacionais simples, denominadas neurônios ou unidades de processamento [12]. Segundo Moreira (2002) [19] as principais vantagens do uso da RNA estão associadas à capacidade de auto adaptação, redução de falhas, resolução de problemas de forma ágil sem necessidade de execução de regras e sua aplicação em tempo real. Ma e Khorasni (2004) [14] definem uma rede neural, como um método rápido e ágil de ser efetuado, além de aproximar funções para aprendizagens onde é difícil criar modelos matemáticos. As RNAs aplicadas no contexto da detecção de danos podem proporcionar diversas vantagens, dentre as quais pede-se destacar o seu processamento relativamente rápido, a ausência da necessidade de ser remodelado ou reconstruído para nova utilização, desde que tenha adquirido bons resultados durante o treinamento e a possibilidade de utilizar diferentes parâmetros de vibração como dados de entrada e baixa sensibilidade em presença de ruídos [1]. Nesta perspectiva, este estudo realiza uma análise comparativa através da avaliação da aplicação das RNAs na identificação de eventuais desgastes estruturais em elementos da Construção Civil.

## **2. METODOLOGIA**

O presente estudo é resultado de uma pesquisa básica, de carácter descritivo e exploratório cujo objetivo é analisar de forma detalhada as RNAs, com foco na identificação de eventuais desgastes em elementos estruturais. O estudo foi realizado através da utilização de métodos de pesquisa secundários como trabalhos acadêmicos, livros, artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado. A pesquisa foi baseada em uma revisão bibliográfica, deste modo, o trabalho transcorreu a partir da análise e comparação de trabalhos científicos encontrados nas bases de dados: Scielo, Science Direct, ResearchGate, Repositório de Universidades e Portal de Periódicos Capes. A tabela 1 apresenta as principais referências para o desenvolvimento do estudo.

**Tabela 1** – Principais trabalhos utilizados para a comparação de dados.

Ano	Título	Base de dados	Autor
2015	Fault diagnosis on beam-like structures from modal parameters using artificial neural networks.	Science Direct	HAKIM, S. J. S. et al.
2012	Impedance based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity.	Science Direct	MIN, J. et al.
2008	Damage identification for beams using ANN based on statistical property of structural responses.	Science Direct	LI, Z.; YANG X.
2008	Damage detection of truss bridge joints using Artificial Neural Networks.	Science Direct	MEHRJOO, M.;
2005	Avaliação estrutural: influência do ruído nos métodos de detecção de danos baseados na análise das propriedades dinâmicas.	RIUnB	GENOVESE, M.
2004	Redes neurais artificiais para detecção de danos.	ResearchGate	GOMES, H. M.

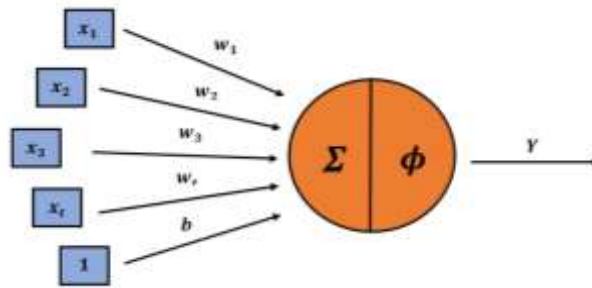
Durante a coleta de dados foram utilizadas as palavras-chaves “redes neurais artificiais,” “danos estruturais” e “construção civil” na língua portuguesa e inglesa. O estudo apresenta carácter essencialmente qualitativo, uma vez que expõem a análise de conceitos e ideias dos principais autores: GOMES [9], GENOVESE [10], LI; YANG, MEHRJOO *et al.* [13], MIN *et al.* [18], HAKIM *et al.* [11]. Dessa forma, foi possível estabelecer parâmetros entre as ideias dos trabalhos selecionados e como os mesmos abordam o tema em questão.

### 3. Resultados e discussão

Uma das principais tecnologias desenvolvidas para identificar danos estruturais no setor da construção civil são as RNAs. Estas redes são definidas como um sistema projetado para modelar a maneira como o cérebro executa uma tarefa particular, sendo comumente realizada utilizando-se componentes eletrônicos ou simulada por propagação em um computador. Assim, para alcançarem bom desempenho, as redes neurais empregam uma interligação maciça de células computacionais simples, denominadas unidades de processamento ou “neurônios” [12].

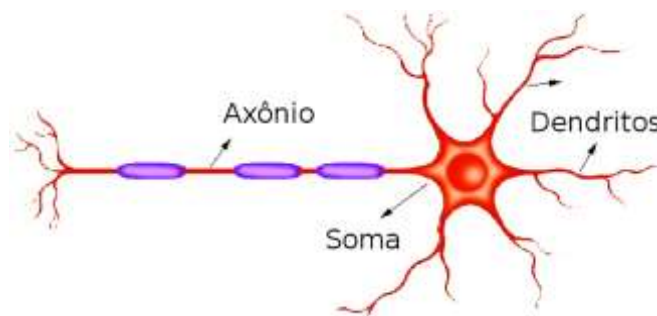
O primeiro modelo de neurônio artificial conhecido foi sugerido por McCulloch e Pitts no ano de 1943, por isso chamado de MCP e mais conhecido por Neurônio Booleano (Figura 1). No sistema neural humano, os dendritos são as ramificações responsáveis por receber os impulsos oriundos de outros neurônios e levar os sinais para o soma, ambiente no qual os impulsos são processados e novos impulsos são gerados. O neurônio ainda é composto de uma ramificação única, mas robusta, o axônio, este tem a função de transmitir para a extremidade da célula os impulsos processados no soma, e desta forma, transmiti-los por meio de nervos terminais para outros neurônios. Esta transmissão recebe o nome de sinapse.

**Figura 1:** Modelo do Neurônio Booleano



Simulando o comportamento dos dendritos apresentados na Figura 2, o modelo apresenta  $t$  terminais de entrada acompanhados do viés ( $b = 1$ )  $x_1, x_2, \dots, x_t + b$  e um único canal de saída  $Y$ , o qual se assemelha com a ramificação do axônio.  $W_1, W_2, \dots, W_t$  são pesos que se somam às entradas para determinar a ativação ou inibição destas entradas, simulando a tarefa das sinapses. Desta forma, a ativação do neurônio depende da função correspondente, que ativa ou não a saída, representada na Figura 1 por  $\Sigma$  e  $\Phi$ . Além das entradas mostradas no modelo artificial, o neurônio Booleano conta com o valor unitário, conhecido por viés, e com o objetivo de polarizar as entradas do neurônio [16].

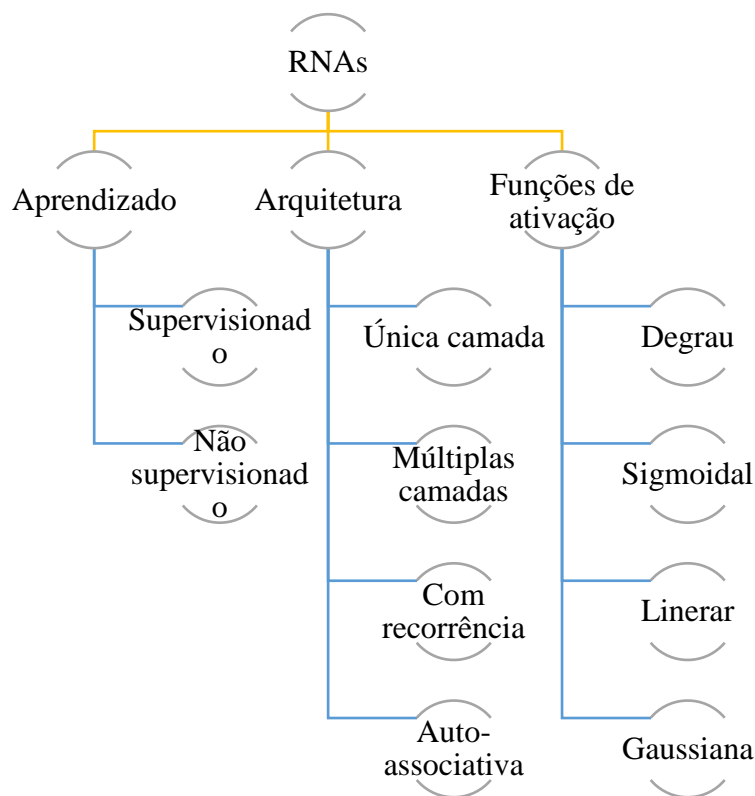
Figura 2: Representação do neurônio humano



Fonte: [3]

As redes neurais podem se classificar, de modo geral e simplificado, quanto à sua forma de aprendizado (Macroestrutura), sua arquitetura (Mesoestrutura), e suas funções de ativação utilizadas em seu interior (Microestrutura) [16]. A Figura 3 apresenta um esquema com os diversos tipos de redes comumente utilizadas.

Figura 3: Tipos de RNAs



Segundo Haykin (2001) [12], o grande benefício da utilização de RNAs para a resolução de problemas complexos provém de algumas propriedades e capacidades úteis, descritas a seguir:

- **Aprendizagem:** É a capacidade da RNA de aprender espontaneamente, o mapeamento almejado, entre as entradas e a saída, por meio de um processo participativo de ajustes efetuados aos parâmetros livres (ex.: pesos sinápticos);
- **Generalização:** Condiz à aptidão da RNA de apontar uma saída apropriada para uma entrada ausente no processo de aprendizagem;
- **Não Linearidade:** Uma RNA é não linear se esta for composta de neurônios artificiais também não lineares. Este é um aspecto significativo, visto que a grande parte dos sistemas físicos encarregados pela produção do mapeamento entre os sinais de entrada e a saída almejada são não lineares;
- **Adaptabilidade:** É a habilidade que as RNAs dispõem de conciliar seus pesos sinápticos diante da modificação no meio ambiente, isto é, uma RNA instruída para atuar em um cenário específico pode facilmente ser instruída novamente para captar pequenas modificações no ambiente;
- **Tolerância a Falhas:** O conhecimento é subdividido pela RNA; deste modo, uma parcela das conexões pode estar ineficaz, sem alterações significativas no funcionamento de toda a RNA;
- **Resposta a Evidências:** Em sua aplicação como classificadora de padrões, uma RNA pode oferecer, em sua saída, não somente a referência relativa ao conjunto de entradas pertencentes, como também uma referência sobre a convicção dos resultados. Deste modo, essas referências podem ser utilizadas para recusar padrões evasivos.

Há ainda outros elementos que podem ser configurados ou predeterminados na arquitetura de uma rede, como: a quantidade de camadas de neurônios e a quantidade de neurônios de cada camada; a função de transferência e treinamento e o método de aprendizagem e medição de desempenho. Definidas estas configurações, uma RNA está preparada para ser treinada com base em uma amostra composta por entrada e saída [12].

Muitos estudos na área de identificação de dano estrutural foram efetuados usando diferentes tipos de RNAs em conjunto com as características dinâmicas dos elementos estruturais, diversificando essencialmente o algoritmo de treinamento das redes. A tabela 2 apresenta uma comparação entre diversos



trabalhos que utilizaram materiais e padrões de entrada semelhantes para analisar o dono em elementos estruturais através de RNAs.

Gomes (2004) [9] aplicou RNAs em um estudo quantitativo para identificar danos em uma viga numérica bi-apoiada e discretizada em 24 elementos, forçando estados de dano induzidos neste elemento estrutural por meio de um programa de elementos finitos. Os critérios de entrada utilizados foram às alterações dos quadrados das frequências naturais, e os critérios de saída os índices de dano em cada parte da estrutura. Constatou-se que a RNA identificou com alto rigor todas as localidades avariadas para todos os panoramas de dano, com restrição de um panorama com erros em três elementos distintos, em que o dano foi apresentado equivocadamente para componentes próximos. Ainda foi efetuado um panorama de dano considerando ruído na resposta numérica para uma razoável autenticidade e verificou-se que quanto maior a intensidade menor é a qualidade do resultado da rede. Apesar disso, para um valor de ruído de 10%, a rede localizou com referente rigor os elementos danificados, porém mensurou equivocadamente o dano.

Genovese (2005) [10] reproduziu uma análise dinâmica experimental numericamente com intuito de constatar a utilidade do Método da Alteração na Curvatura das Formas Modais e do Método do Erro Residual na identificação de danos em elementos estruturais. Para tal reprodução, recorreram a estruturas simples de viga de concreto armado sujeitadas a sobrecargas impulsivas. O estudo foi efetivado contando com o Método dos Elementos Finitos para moldar a estrutura e obter históricos de deslocação em função do tempo por meio da integração de *Newmark*. Estes históricos foram acrescentados de ruído com diversas intensidades, de modo a reproduzir de forma adequada um ensaio dinâmico. Utilizaram-se ainda elaborações híbridas, isto é, que agregam os procedimentos apontados à técnica de RNAs para mensurar o dano na estrutura. Os métodos utilizados provaram-se eficazes, entretanto a existência de ruídos reduz esse rendimento: quanto maior o ruído, menor a eficácia dos métodos. Quando estes métodos foram utilizados em conjuntura com as RNAs, houve um declínio relevante nas interferências ocasionadas pelo ruído.

**Tabela 2** – Investigações na área de identificação de dano em elementos estruturais contando com diferentes tipos de RNAs.

<b>Autor</b>	<b>Material</b>	<b>Padrões de entrada</b>	<b>Resultados</b>
Gomes (2004)	Viga numérica bi-apoiada.	Variações dos quadrados das frequências naturais.	Constatou-se que a RNA identificou com alto rigor todas as localidades avaliadas para todos os panoramas de dano. No entanto, em um cenário considerando o ruído percebeu-se que quanto maior sua intensidade menor é o resultado da rede. Apesar disso, para um valor de ruído de 10%, a rede verificou com relativo rigor os elementos danificados, porém mensurou erroneamente o dano.
Genovese (2005)	Viga de concreto armado.	Método dos elementos finitos juntamente com ruídos.	Os métodos utilizados provaram-se eficazes, entretanto a existência de ruídos reduz esse rendimento: quanto maior o ruído, menor a eficácia dos métodos. Com a aplicabilidade das RNAs houve considerável redução nas interferências provenientes dos ruídos.
Li e Yang (2008)	Viga contínua com três vãos.	Covariância das frequências naturais de vibração	Com base dos resultados alcançados constatou-se que as RNAs localizaram e identificaram a intensidade do dano com alto rigor, com erros relativamente baixos.
Mehrjoo et al. (2008)	Articulações de pontes.	Frequências naturais e os modos de vibração da estrutura.	Os resultados obtidos indicaram que as Redes Neurais Artificiais identificam com boa plenitude a detecção dos danos. Os erros encontrados foram relativamente baixos.
Min et al. (2012)	Duas vigas de alumínio (danificada e intacta).	Dados da impedância das estruturas.	Apresentou resultados satisfatórios, sendo a RNA apta para informar com eficiência o tipo de dano introduzido e sua intensidade. Em relação aos erros observados, pode-se dizer que giram em torno 10%.
Hakim et al. (2015)	Vigas de aço de perfil tipo I (intacta e danificada).	Cinco primeiras frequências naturais e os cinco primeiros modos de vibração.	Percebeu-se que os resultados obtidos foram satisfatórios tanto para a detecção quanto para a mensuração do dano. Os erros apresentados foram menores que 13%.

Li e Yang (2008) [13] desenvolveram técnicas de detecção de dano em vigas usando RNAs fundamentadas na resposta dinâmica da estrutura. Nesta técnica, as variâncias conjuntas das respostas estruturais são utilizadas como parâmetros para detecção de dano. Para tanto, uma RNA do tipo *feedforward* aplica a variância conjunta das frequências naturais de vibração como padrão de entrada e a saída da rede constitui-se na posição do dano e na condição da estrutura (danificada ou intacta). A viga foi dividida em 30 partes, e em cada panorama de dano uma ou mais partes suportou uma diminuição na inércia entre 10% e 60%. Com base nos resultados alcançados pela rede verificou-se que a RNA identificou e constatou a intensidade do dano com alto rigor.

Mehrjoo et al. (2008) [17] usaram RNAs da classe *feedforward* para calcular a veemência de danos existentes em articulações de pontes. Considerando-se o fato de as estruturas analisadas serem de grande dimensão, com várias articulações e, conseqüentemente, muitos padrões a serem verificados, foi realizada uma separação da estrutura em três submodelos aptos a retratar a ponte como um todo. A RNA utilizou como padrões de entrada as frequências naturais e os modos de vibração das estruturas examinadas e angariou como saída às intensidades dos danos presentes. A capacitação da rede foi efetuada com os dados angariados dos submodelos, com a finalidade de diminuir o ciclo de processamento. Os resultados obtidos denotaram boa precisão na detecção dos danos.

Min et al. (2012) [18] pesquisaram um método de verificação da integridade estrutural em função da variação na impedância de duas vigas de alumínio, sendo uma danificada e outra intacta. Uma RNA foi instruída com os padrões da impedância das estruturas com o propósito de identificar o dano e ainda diferenciar o tipo e a gravidade do mesmo. A RNA proposta foi autenticada por meio da detecção de parafusos laseados e entalhes em uma viga de alumínio conectada por parafusos e uma estrutura tubular em escala limitada. Enfim, a RNA foi testada com dados obtidos por sensores sem fio de impedância ligado a uma ponte em escala natural. Efetivou-se que a RNA manifestou erros em torno de 10%, entretanto, foi eficiente em informar com precisão o tipo de dano introduzido e sua intensidade.

Hakim, Razak e Ravanfar (2015) [11] recorreram as RNAs para detectar e mensurar danos em vigas de aço de perfil tipo I, dispendo como princípio o comportamento dinâmico das mesmas. A rede neural foi treinada usando os cinco primeiros modos de vibração e as cinco primeiras frequências naturais alcançados através do estudo experimental e representações quantitativas das vigas I danificadas e intactas. Foram elaborados diversos panoramas de danos distintos, que constataram quatro locais deteriorados e 25 intensidades distintas para cada local. As frequências naturais de vibração angariadas numericamente exibiram um erro inferior a 13% em relação às mesmas frequências angariadas experimentalmente. Posteriormente, foi executada uma RNA para detecção e mensuração do dano introduzido nas vigas, tendo como padrões de entrada os modos de vibração e a primeira frequência natural de vibração das mesmas. Percebeu-se que os resultados obtidos foram satisfatórios tanto para a detecção quanto para a mensuração do dano.

#### 4. Conclusão

Em síntese, as RNAs são estruturas de programação baseadas no funcionamento de neurônios cerebrais imitando seus meios de conexões. A ideia é copiar este mecanismo, dando sinais de entrada e este realizando uma verificação para decidir se o sinal deve ser retransmitido ou não em sinais binários. Tendo em vista os aspectos analisados ao longo deste trabalho, verificou-se que identificar danos estruturais em seus ciclos primários permite que sejam feitos reparos para conservar a integridade da estrutura. Neste contexto, as RNAs quando trabalhadas em conjunto com as características dinâmicas (frequências naturais e os modos de vibração) configuram-se como boa ferramenta na identificação, mensuração e constatação da intensidade do dano em elementos estruturais, visto que tais aspectos foram comprovados pelos autores Gomes, Genovese, Li e Yang, Mehrjoo et al, Min et al e Hakim et al. Estudos realizados por Gomes e Genovese comprovaram que quanto maior a interferência causada por ruídos, menor é a eficiência das RNAs. Ainda assim, com os erros encontrados, as RNAs são eficientes em informar com precisão o tipo de dano, sua intensidade e localização. Por fim, desenvolver técnicas que busquem aprimorar as funcionalidades das RNAs é imprescindível, uma vez que corrobora para a melhora de seu desempenho como também proporciona que sua aplicabilidade seja mais



comumente no âmbito da Construção Civil para identificar falhas, desgastes e eventuais problemas que surgem durante a vida útil das estruturas.

## 5. Referências

- [1] AHMED, M. S. **Damage Detection in Reinforced Concrete Square Slabs Using Modal Analysis and Artificial Neural Network**. 2016. 297f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Nottingham Trent University, Nottingham, UK, 2016.
- [2] BAGCHI, A.; HUMAR, J.; XU, H.; NOMAN, A. S. **Model-Based Damage Identification in a Continuous Bridge Using Vibration Data**. Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 24, n. 2, p. 148–158, 2010.
- [3] BORGES, R. R.; IAROSZ, K. C.; BATISTA, A. M.; CALDAS, I. L.; BORGES, F. S.; LAMEU, E. L. **Sincronização de disparos em redes neuronais com plasticidade sináptica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 2310-1-2310-9, 2015.
- [4] CARRILO, O. J. B. **Deteção de Dano a Partir da Resposta Dinâmica da Estrutura: Estudo Analítico com Aplicação a Estruturas do Tipo Viga**. 2004. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.
- [5] CARVALHO, P. P. M. **Estudo teórico-experimental do dano em vigas de concreto**. 2015. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2015.
- [6] CHAVES, J. S. **Monitoramento e Classificação de Falhas em Estruturas utilizando Redes Neurais Artificiais**. 2016. 77f. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Solos) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2016.
- [7] CHEN, B.; NAGARAJIAH, S. **Structural damage detection using decentralized controller design method**. Smart Structures and Systems, Yuseong-gu, v. 4, n. 6, p. 779-794, 2008.
- [8] GADÉA, A. S. M. **Identificação de danos estruturais a partir das funções de resposta em frequência (frf)**. 2002. 91f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- [9] GOMES, H. M. **Redes Neurais Artificiais para deteção de danos**. Mecânica Computacional. Bariloche, v. 23, p. 3351-3367, 2004.
- [10] GENOVESE, M. **Avaliação estrutural: influência do ruído nos métodos de deteção de danos baseados na análise das propriedades dinâmicas**. 2005. 140f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.
- [11] HAKIM, S. J. S.; RAZAK, H. A.; RAVANFAR, S. A. **Fault diagnosis on beam-like structures from modal parameters using artificial neural networks**. Measurement, Vol. 76, p. 45-61, 2015.
- [12] HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e prática**. Porto Alegre, Bookman, 2001. Tradução de Paulo Martins Engel.
- [13] LI, Z.; YANG X. **Damage identification for beams using ANN based on statistical property of structural responses**. Computer and Structures, v. 86, p. 64-71, 2008.
- [14] MA, L.; KHORASANI, K. **New training strategies for constructive neural networks with application to regression problems**. Neural Networks, v. 17, n.4, p.589-609, 2004.
- [15] MAIA, R. A. **Deteção de Dano Estrutural em Estruturas Planas Utilizando Redes Neurais**. 2016. 94f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

- [16] MARCY M., C. A. **Metodologia baseada em Redes Neurais Artificiais para a detecção de Danos Estruturais**. 2017. 203f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.
- [17] MEHRJOO, M.; KHAI, N.; MOHARRAMI, H., BAHREININEJAD. **Damage detection of truss bridge joints using Artificial Neural Networks**. Expert System with Applications, v. 35, pp. 1122 – 1135, 2008.
- [18] MIN, J.; SEUNGHEE, P.; CHUNG-BANG, Y.; CHANG-GUEN, L.; CHANGGIL, L. **Impedance based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity**. Engineering Structures, v. 39, p. 210-220, 2012.
- [19] MOREIRA, F. C. **Reconhecimento e classificação de padrões de imagens de núcleos de linfócitos do sangue periférico humano com a utilização de redes neurais artificiais**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.
- [20] SILVA, R.; KALESKI, J.; KALESKI, J.; SANTOS, M. E.; SILVA, R. O.; SANTOS, M. H. P.; FELIX, M. A. S.; SANTOS, W. B. **Porque um edifício entra em colapso?** Revista Científica Integrada, Ribeirão Preto, v. 1, n. 3, p.11, 2014.
- [21] SRIRAM, R. D. **Intelligent Systems for Engineering – A Knowledge-based Approach**. Londres, Springer-Verlag, 1997.
- [22] WANG, X. I., HU, N., 1997, FUCUNAGA, H., YAO, Z. H., 2001, **Structural Damage Identification Using Static Test Data and Changes in Frequencies**, Engineering Structures, 23, p. 610-621.