



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS  
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING  
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

## OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS EM COMPÓSITOS USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

**Camila Aparecida Diniz**  
**Sebastião Simões da Cunha Júnior**  
**Antônio Carlos Ancelotti Júnior**  
**Guilherme Ferreira Gomes**  
**Rodrigo Bicalho**  
**Rafaella Barrêto Campos**  
camiladiniz@unifei.edu.br  
sebas@unifei.edu.br  
ancelotti@unifei.edu.br  
guilhermefergom@unifei.edu.br  
bicalho.rodrigo@hotmail.com  
rafaella.barreto.campos@gmail.com

Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.  
Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, MG, Brasil.

**Resumo.** *É de grande relevância investigar possíveis falhas em materiais compósitos visando à segurança das estruturas. O critério de falha Tsai-Wu é um método eficaz para analisar as falhas em materiais compósitos anisotrópicos, definindo se o material em determinado carregamento sofrerá ou não falha estrutural. Buscando a otimização da produção de materiais compósitos em fibras de carbono foi utilizada a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA). Neste trabalho, o intuito é que esta técnica consiga encontrar uma configuração de camadas conveniente para a produção do material compósito. Primeiramente, foram feitas simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Para as simulações foi considerada uma viga tubular engastada-livre sujeita a uma força de compressão em uma de suas extremidades. Como resultado das simulações obteve-se o valor do índice de Tsai-Wu para cada laminado com 03 camadas. Quando a rede neural é bem treinada, a mesma é capaz de fazer a inversão do que foi feito pela simulação numérica, ou seja, conhecendo o valor do índice de falha é gerada a configuração adequada para o laminado. Os resultados obtidos pela RNA foram satisfatórios, permitindo que uma produção de materiais compósitos seja feita de forma mais confiável e com um número menor de experimentos.*

**Palavras-chaves:** *Materiais compósitos, Redes Neurais Artificiais, Critério de falha.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos, mais especificamente as fibras de carbono, vêm a cada dia tendo uma maior participação no projeto de sistemas mecânicos complexos. Suas propriedades permitem aplicações em diversas áreas da Engenharia moderna, como as indústrias aeronáutica, naval e automobilística. A indústria aeronáutica, por exemplo, vem utilizando os materiais compósitos (carbono/epóxi) em suas estruturas na busca por redução do peso estrutural, sendo esta uma forma de obter redução no consumo de combustível (ANGÉLICO, 2009; DIACENCO, 2010).

Segundo Smith e Hashemi (2012) os materiais compósitos feitos de fibras de carbono e com matriz epóxi apresentam baixo peso, alta resistência mecânica e alta rigidez. Essas propriedades fazem com que esse tipo de material seja muito requisitado pela indústria aeronáutica.

Considerando que o comportamento dos materiais compósitos é sensível a forma como eles são obtidos, é de extrema importância analisar as falhas que esse tipo de material pode sofrer. Um critério de falha muito utilizado para materiais anisotrópicos é o critério de falha Tsai-Wu, este critério consegue distinguir as forças de compressão e de tração. Porém, não consegue distinguir os modos de falhas, apenas a ocorrência das mesmas (PANOSSO, 2011).

Uma ferramenta que vem sendo muito utilizada para análise de materiais compósitos é a técnica de Redes Neurais Artificiais. De acordo com Haykin (2009) essa técnica é considerada como uma máquina que modela a forma com que o cérebro desempenha uma tarefa, armazenando conhecimento e tornando este conhecimento disponível.

Pereira e Bezerra (2007) implementaram a técnica de Redes Neurais para obter curvas de cisalhamento e vibração de materiais compósitos reforçados com fibras de vidro e de carbono. Brito Jr *et al.* (2007) utilizaram a técnica de Redes Neurais com o objetivo de conhecer o comportamento mecânico-dinâmico do material compósito carbono/epóxi e compararam com resultados experimentais. Lopes *et al.* (2010) utilizaram a análise de confiabilidade considerando o critério de falha Tsai-Wu e compararam com a Análise de Elementos Finitos, onde foi utilizada a técnica de Redes Neurais. Câmara (2013) criou uma RNA para modelar o módulo de elasticidade de materiais compósitos.

Considerando a produção de materiais compósitos mais confiáveis e com propriedades que atendam aos requisitos de projeto, este trabalho apresenta a técnica de Redes Neurais como uma ferramenta poderosa para auxiliar na produção de materiais compósitos. Assim, torna-se desnecessário os inúmeros experimentos para identificar as propriedades dos materiais compósitos. Por meio de simulações numéricas utilizando um programa baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), foram feitas análises considerando os valores do critério de falha Tsai-Wu para laminados com 03 camadas. Após várias simulações foi gerado um banco de dados com os valores do critério de falha para cada configuração de laminado. Considerando como configuração para as camadas do laminado os ângulos (0°, -45°, 45°, 90°), este banco de dados foi utilizado para treinamento da RNA.

Neste trabalho utilizou-se um processo de inversão com o uso das RNAs, ou seja, a RNA fez o caminho inverso ao percorrido pelas simulações numéricas. A entrada da RNA consistiu no valor do índice de falha Tsai-Wu desejado e a saída à orientação das fibras para cada camada de laminado.

O grande objetivo desta pesquisa é demonstrar uma configuração adequada para que o material compósito seja capaz de retribuir as exigências de projeto. Evitando assim, a

produção de vários corpos de provas para obter a orientação adequada das fibras que atenda a determinada margem de segurança. Com um estudo prévio sobre qual configuração o material compósito deve ter para atender as necessidades de projeto será economizado tempo e material. Isso será possível, pois a rede neural conseguirá atribuir às orientações adequadas de acordo com o valor do critério de falha Tsai-Wu.

## 2 CRITÉRIO DE FALHA TSAI-WU

De acordo com Costa *et al.* (2010), a falha no material compósito sofre interferência das propriedades do material, do tipo de carregamento aplicado, das orientações das fibras em cada camada e da quantidade de camadas. Por meio do conhecimento das tensões limites do material compósito é importante utilizar um critério de falha que seja capaz de diagnosticar se o material irá falhar em um determinado estado de tensão. O critério de falha Tsai-Wu é um dos mais utilizados nas pesquisas devido sua simples implementação computacional. Sendo então, considerado como um método relativamente fácil de calcular os carregamentos na estrutura do material compósito (COSTA, 2011). Nos compósitos laminados o critério de falha relaciona as forças de compressão, tração e cisalhamento.

O critério de falha Tsai-Wu é baseado na Teoria de Falha da Energia de Deformação Total. Ressaltando, que para este critério é considerado o estado plano de tensões. Sendo assim, a falha no material ocorre se a equação abaixo for violada (VOYIADJIS E KATTAN, 2005):

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 \leq 1 \quad (1)$$

Onde  $F_{11}, F_{22}, F_{66}, F_1, F_2$  e  $F_{12}$  são os tensores de forças e  $\sigma_1, \sigma_2$  e  $\tau_{12}$  são as tensões normais aplicadas nas direções perpendiculares às fibras, transversais às fibras e de cisalhamento.

Os tensores de forças são obtidos pela seguinte formulação:

$$F_{11} \equiv \frac{1}{X_1^T X_1^C} \quad (2)$$

$$F_{22} \equiv \frac{1}{X_2^T X_2^C} \quad (3)$$

$$F_{66} \equiv \frac{1}{(S_{12})^2} \quad (4)$$

$$F_1 \equiv \frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C} \quad (5)$$

$$F_2 \equiv \frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C} \quad (6)$$

$$F_{12} \equiv -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_1^T X_1^C X_2^T X_2^C}} \quad (7)$$

Onde  $X_1^T, X_1^C$  são as resistências à tração e compressão na direção longitudinal às fibras,  $X_2^T, X_2^C$  são as resistências à tração e compressão na direção transversal às fibras e  $S_{12}$  é a resistência ao cisalhamento no plano.

Esse critério de falha não considera fenômenos físicos, sendo capaz de prever a falha no material, mas não consegue distinguir os diferentes tipos de falha (COSTA *et al.*, 2010). Segundo Gouvêa (2006), o critério de falha Tsai-Wu busca uma melhor relação com os resultados experimentais através do melhor ajuste da curva de dados experimentais.

Angélico (2009) afirma que a falha no compósito laminado pode ocorrer considerando a falha na primeira camada (*first ply failure*) ou a falha na última camada (*ultimate laminate failure*), sendo o processo de falha progressivo.

Buscando obter uma maior confiabilidade da estrutura feita em material compósito, foi analisada a margem de segurança de acordo com o valor do índice de falha Tsai-Wu. Conforme a seguinte equação (MARTINS, 2015):

$$MoS \equiv \frac{1}{FI} - 1 \quad (8)$$

Sendo  $MoS$  a margem de segurança e  $FI$  o valor máximo do índice de falha. Uma margem de segurança superior a um, indica que o material compósito é seguro e não irá apresentar falhas. Já uma margem de segurança muito alta prediz que a estrutura deve ser otimizada, pois apresenta uma resistência muito elevada (VERA, 2012).

### 3 REDES NEURAS ARTIFICIAIS

As Redes Neurais são modelos computacionais que se inspiram no cérebro humano, buscando imitar o processo de aprendizagem. Elas são formadas por neurônios capazes de transmitir as informações uns para os outros (LOPES, 2007). Uma típica rede neural é constituída de camadas de entrada (*input layers*), camadas de saída (*output layers*) e camadas ocultas (*hidden layers*). As camadas em uma rede neural são ocupadas por neurônios que apresentam várias entradas e apenas uma saída (CHONG e ZAK, 2001).

As redes neurais tem seu aprendizado também chamado de treinamento por meio de exemplos. Esta etapa requer um ajuste de parâmetros que é estimulado pelo ambiente que a RNA está inserida. Uma rede neural tem seu aprendizado total quando o valor de saída é coerente com o valor de saída esperado (BRAGA *et al.*, 2000).

Uma estrutura de rede neural muito utilizada é a *Feedforward*, neste tipo de rede os neurônios de cada camada tem como entrada a saída do neurônio da camada anterior. Esse processo é repetido até chegar à saída da rede. Assim, os neurônios percorrem apenas um caminho, não sendo possível fazer o caminho inverso (HAYKIN, 2009). Um processo de treinamento utilizado é *Backpropagation* que é um treinamento supervisionado. Neste tipo de treinamento, os erros encontrados pela rede são propagados para as camadas anteriores até atingirem um valor insignificante. Posteriormente, esses erros são utilizados para atualizar os pesos de cada camada (CHONG E ZAK, 2001). Almeida (2012) cita que o treinamento supervisionado é um dos mais utilizados, já que considera um conjunto de valores como entrada e outro como saída.

Este trabalho considerou um modelo de rede neural do tipo *Backpropagation*, este tipo de rede utiliza a topologia *Feedforward*. Segundo Lopes (2007), primeiramente deve-se escolher

os valores de entrada e de saída que serão utilizados para o treinamento da rede. Em seguida, faz-se a configuração dos parâmetros que serão utilizados pela rede. Posteriormente, o algoritmo entra na fase de treinamento seguido da fase de simulação, que é onde a RNA deve ser capaz de gerar a saída desejada.

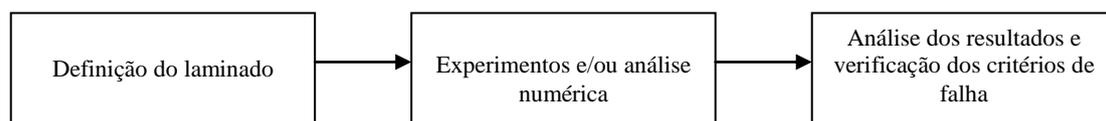
## 4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Os danos sofridos pelos materiais compósitos não são de fácil reparo ou até mesmo percepção. Por isso, muitas vezes é imprescindível ter algum mecanismo para detectar este dano e produzir estruturas mais confiáveis. Esta é a grande dificuldade encontrada nos dias de hoje, pois na maioria das vezes é necessário realizar muitos experimentos para diagnosticar o desempenho do material, possíveis falhas, reações geradas pelo tipo de carregamento entre outros fatores relevantes. Estes experimentos demandam tempo e tem um alto custo financeiro, pois são feitos vários testes para encontrar a configuração necessária do material laminado que atenda aos requisitos de projeto (COSTA *et al.*, 2011; VERA, 2012).

A quantidade de camadas e as orientações das fibras demonstram grande influência nas propriedades dos materiais compósitos, sendo um fator determinante no momento da produção do material compósito.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem permitido simular com relativa precisão o comportamento de materiais laminados. O uso deste método se torna importante quando se deseja estudar o comportamento de materiais de tal natureza. Logo, utilizou-se o MEF para fazer a análise estrutural, tendo como respostas o valor do critério de falha Tsai-Wu. De posse dos resultados das análises estruturais, foi criado um banco de dados o qual foi utilizado para treinar e validar a RNA. É interessante que a RNA possa fazer o caminho inverso ao realizado pelas simulações numéricas. No caso, para as simulações numéricas foi necessário entrar com a configuração das camadas do laminado e como resposta foi obtido o valor do critério de falha. Já a RNA, tem como entrada o valor do critério de falha e como saída é gerado a configuração ótima do material laminado para um dado valor de critério de falha.

A Figura 1 mostra um procedimento padrão de projeto de estrutura laminada feita com simulação numérica. Primeiramente, tem-se a definição do laminado, seguido de sua construção e ensaios mecânicos. Somente após estas fases, que se podem fazer as avaliações de forma a obter as características finais do material. Entre essas características, se o mesmo atende ao critério de falha adotado no projeto. Caso o critério de falha adotado não seja atendido, deve-se refazer todo o procedimento. Isso poderá demandar tempo e/ou material tornando este procedimento, em alguns casos, lento e caro.



**Figura 1. Procedimento de análise de estruturas laminadas.**

A fim de evitar o reprojeção e a demanda de tempo e/ou material, propõe-se neste trabalho uma alternativa utilizando as RNAs. Assim, de acordo com a Figura 2, apresenta-se o caminho inverso ao realizado pelas simulações. Como entrada a RNA tem o índice de falha desejado e como saída a orientação do laminado que levará ao atendimento do critério de

falha aplicado. Desta forma, projeta-se o laminado uma única vez diminuindo tempo e custos na sua produção.

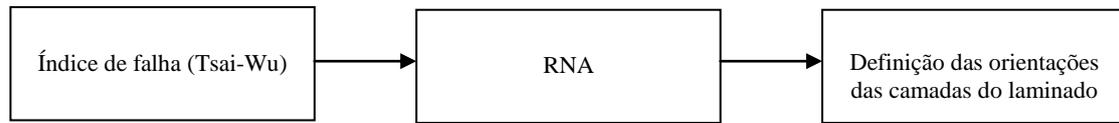


Figura 2. Procedimento inverso utilizando a RNA.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estrutura analisada é uma viga de secção transversal tubular vazada que é utilizada em próteses transtibiais. Esta estrutura é feita de material pré-impregnado de compósito carbono/epóxi, tendo a espessura de 0,00018 m em cada camada. Este tubo tem as dimensões (300 x 30 mm) e as simulações foram feitas considerando 03 camadas de material compósito. A análise estrutural foi feita via programa computacional de elementos finitos. Foram consideradas as seguintes propriedades para o material compósito carbono/epóxi:

Tabela 1. Propriedades do laminado carbono/epóxi

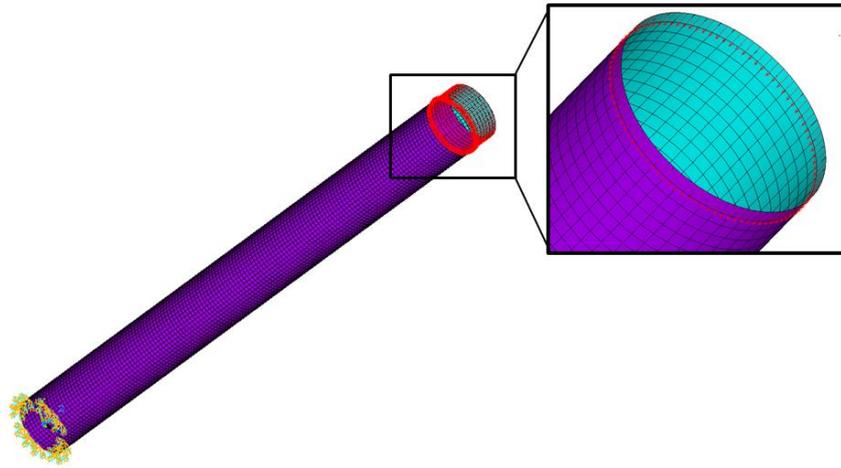
$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
101,86	3,41	7,56	0,30	1,55

As propriedades do material compósito foram obtidas através de experimentos realizados por Martins (2015). Para este estudo foi utilizado uma média dos valores obtidos nos experimentos. Para realizar a análise do critério de falha via Método dos Elementos Finitos são necessárias outras propriedades do material como:

Tabela 2. Propriedades do laminado carbono/epóxi para o critério de falha

$X_1^T$ (MPa)	$X_1^C$ (MPa)	$X_2^T$ (MPa)	$X_2^C$ (MPa)	$S_{12}$ (MPa)
1363,49	572,27	5,86	102	200,61

Com conhecimento dessas propriedades foi possível criar a estrutura tubular em ambiente de programação. O elemento utilizado foi do tipo casca, considerando 03 camadas de material compósito variando as orientações de 0°/-45°/45°/90°. A viga tubular encontra-se engastada-livre em uma de suas extremidades e na outra extremidade sujeita a uma força de compressão de 4480 N que é distribuída entre os nós da extremidade. A Figura 3 mostra a estrutura laminada criada com simulação numérica.



**Figura 3. Viga tubular com força em uma das extremidades.**

Com os resultados dos valores máximos do índice de falha Tsai-Wu para cada laminado de 03 camadas, foi criado um banco de dados com as orientações e os respectivos valores do índice de falha para cada caso. Em posse deste banco de dados, foram selecionados alguns valores para serem usados como validação pela rede neural e os demais foram usados no treinamento.

A configuração da RNA foi a seguinte:

- Tipo: *Backpropagation*,
- Função de ativação para a camada oculta: Tangente Hiperbólica,
- Função de ativação para a camada de saída: Linear,
- Algoritmo de aprendizado: Levenberg-Marquardt,
- Erro médio quadrático:  $10^{-5}$ ,
- Número de camadas oculta: 2,
- Número de neurônios na camada oculta: [10 15],
- Número de iterações: 8000.

Após o período de treinamento da RNA, a mesma foi validada e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3, bem como na Figura 4:

**Tabela 3. Orientações esperadas e orientações geradas pela rede**

Resultados	Tsai-Wu	Objetivo			Dados da RNA			Margem de segurança
		$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1^*$	$\theta_2^*$	$\theta_3^*$	
1	0,0615	0	90	45	1,42	89,91	46,79	15,26
2	0,2751	45	0	45	50,02	-2,70	44,20	2,63
3	0,3522	90	0	45	87,15	-4,91	41,15	1,84

Pode-se observar pelos resultados que a RNA foi capaz de fazer o caminho inverso com grande precisão, já que as orientações obtidas numericamente via MEF foram praticamente às

mesmas fornecidas pela RNA. Salienta-se ainda, que como os dados utilizados para validação da RNA não foram utilizados no treinamento, enxerga-se as RNAs com grande potencial futuro para ensaios mais detalhados. Sendo considerada uma ferramenta capaz de prever as configurações ótimas para um material laminado, sem a necessidade de fabricar ou mesmo avaliar numericamente diferentes configurações de dispositivos mecânicos.

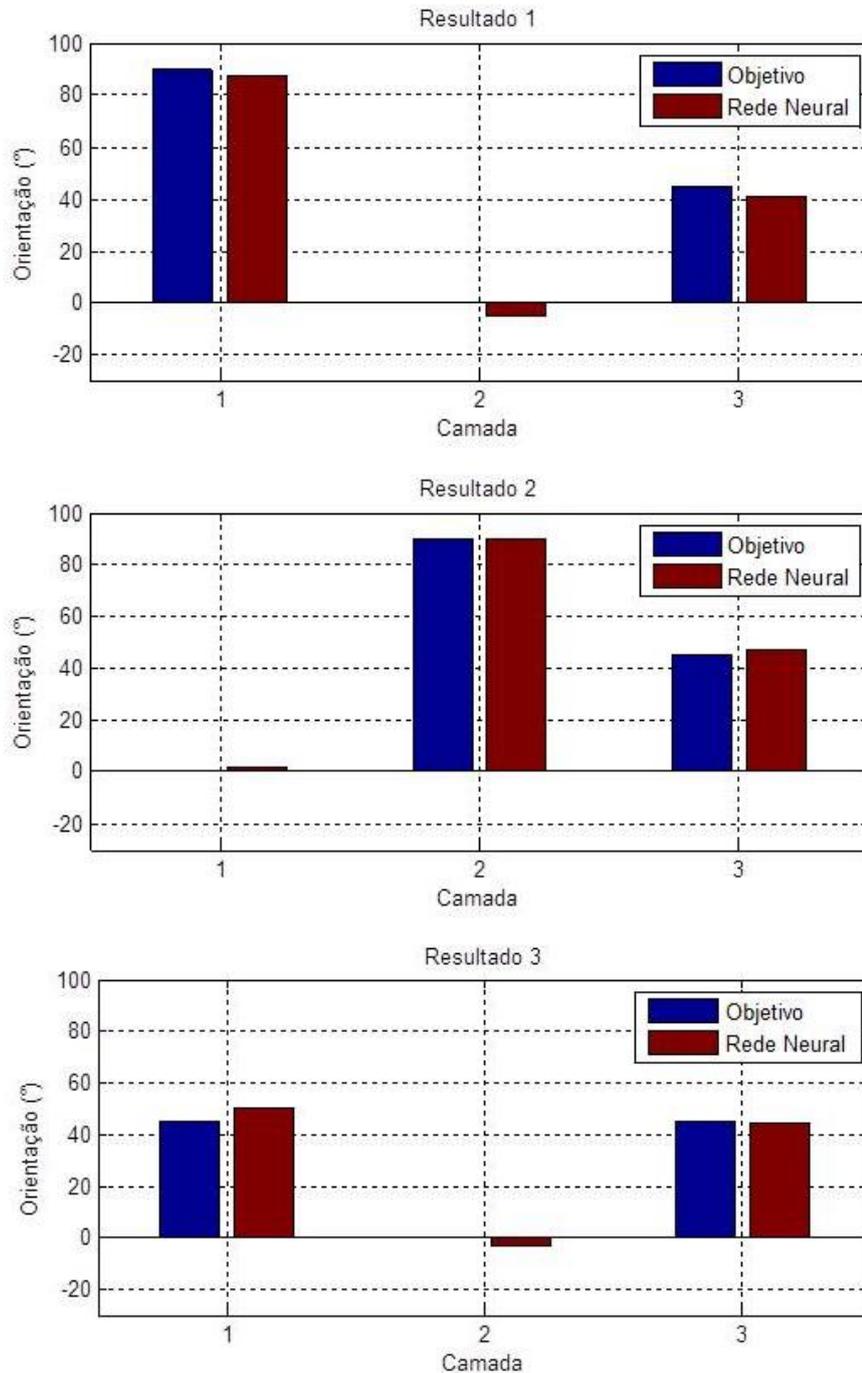


Figura 4. Comparação entre os resultados gerados pela rede com os esperados.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a possibilidade das Redes Neurais Artificiais conseguirem fazer o caminho inverso ao realizado pelas simulações numéricas. Considerando o projeto de uma estrutura laminada (carbono/epóxi), para aplicação em próteses transtibiais.

Os resultados demonstram que a metodologia utilizada é vantajosa e apresenta bons resultados, sendo utilizada junto com a análise estrutural. Observa-se que a rede gerou resultados muito coerentes depois de treinada.

Cabe ressaltar que a RNA encontrou uma pequena dificuldade em diferenciar as orientações de  $-45^\circ$  e  $45^\circ$  (o que era esperado), já que dependendo da configuração do laminado essas orientações geram os mesmos valores de critério de falha. Esta coincidência de valores acaba interferindo no treinamento da RNA de forma negativa. Para evitar que isto ocorresse, foram removidas as orientações que apresentavam o mesmo valor de critério de falha.

Como trabalhos futuros, pretende-se utilizar as RNAs considerando um número maior de camadas. Além de realizar estudos acerca da utilização de cargas variáveis em conjunto com outros critérios de falha, a fim de evidenciar a robustez da metodologia adotada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES – Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior, CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa e PET – Programa de Educação Tutorial pelo apoio financeiro na forma de bolsas de estudo e à FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, R. L. F., 2012. *Aplicação de redes neuronais artificiais para aproximar o comportamento de estruturas*. Dissertação (Mestrado), Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Angélico, R. A., 2009. *Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em material compósito*. Dissertação (Mestrado), Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Braga, A. P., Carvalho, A. P. L. F., Ludermir, T. B., *Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações*, Rio de Janeiro, LTC, 2000.
- Brito Jr, C. A. R., Bezerra, E. M., Pardini, L. C., Ancelotti Jr, A. C., Pereira, M. S., Barros, E., Camargo, L. R., 2007. Redes neurais artificiais aplicadas para predição do comportamento dinâmico-mecânico de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de carbono. *Revista matéria*, vol. 12, n. 2, pp. 346-357.
- Câmara, E. C. B., 2013. *Previsão do módulo de elasticidade transversal de compósitos unidirecionais através de redes neurais mistas*. Dissertação (Mestrado), Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Costa, D. I. G., Albuquerque, E. L., Reis, A., Panosso, G., Sollero, P., 2010. Análise numérica de falhas em laminados usando um critério baseado em fenômenos físicos. *Mecânica Computacional*, vol. 29, n. 51, pp. 5173-5187.

- Costa, D. I. G., 2011. *Análise numérica de falhas em materiais compósitos laminados usando um critério baseado em fenômenos físicos*. Dissertação (Mestrado), Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Chong, E. K. P., Zak, S. H., *An introduction to optimization*, Canada, John Wiley & Sons, 2001.
- Diacenco, A. A., 2010. *Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibração e ruído*. Dissertação (Mestrado), Engenharia dos materiais, Universidade Federal de Itajubá.
- Gouvêa, A. R., 2006. *Critérios de falhas e otimização de estruturas de materiais compósitos usando o método dos elementos de contorno*. Dissertação (Mestrado), Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Haykin, S., *Redes neurais: princípios e prática*, Porto Alegre, Bookman, 2001.
- Haykin, S., *Neural networks and learning machines*, USA, Pearson, 2009.
- Lopes, P. S., 2007. *Detecção de danos em estruturas por meio de técnicas de redes neurais artificiais e algoritmos genéticos*. Dissertação (Mestrado), Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.
- Lopes, P. A. M., Gomes, H. M., Awruch, A.M., 2010. Reliability analysis of laminated composite structures using finite elements and neural networks. *Composite structures*, v. 92, n. 7, pp. 1603-1613.
- Martins, A. T. D., 2015. *Projeto e fabricação de tubos compósitos em fibras de carbono/epóxi para próteses transtibiais por moldagem com bladder*. Dissertação (Mestrado), Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.
- Panosso, G. B., 2011. *Análises de critérios de falha baseados em fenômenos físicos para materiais compósitos laminados*, Dissertação (Mestrado), Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Pereira, M. S., Bezerra, E. M., 2007. *Utilização de redes neurais para predição do comportamento em cisalhamento de compostos aeronáuticos*. In Encontro de iniciação científica e pós-graduação do ITA, 13, São José dos Campos.
- Vera, R. V., 2012. *Estruturas aeronáuticas de interior em compósito natural: fabricação, análise estrutural e inflamabilidade*, Dissertação (mestrado), Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Smith, W. S., Hashemi, J., *Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais*, Porto Alegre, AMGH, 2012.
- Voyiadjis, G. Z., Kattan, P. I., *Mechanics of composite materials with Matlab*, USA, Springer, 2005.