



**AVALIAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS EM VIGAS CONSIDERANDO A
INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA VIA REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

VANESSA DE MOURA SANTANA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS EM VIGAS
CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA VIA REDES
NEURAIS ARTIFICIAIS**

VANESSA DE MOURA SANTANA

ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.DM-21A/18

BRASÍLIA/DF, AGOSTO DE 2018

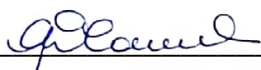
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS EM VIGAS CONSIDERANDO A
INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA VIA REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

VANESSA DE MOURA SANTANA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL.**

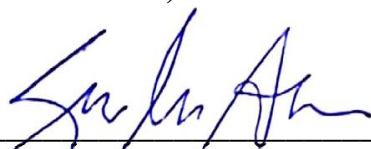
APROVADA POR:



Profª. Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr. Ing. (ENC-UnB)
(Orientadora)



Prof. José Luis Vital de Brito, Dr. (ENC-UnB)
(Examinador Interno)



Profª. Suzana Moreira Ávila, Dr. (UnB - Gama)
(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 30 DE AGOSTO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTANA, VANESSA DE MOURA

Avaliação de danos estruturais em vigas considerando a influência da temperatura via Redes Neurais Artificiais

[Distrito Federal] 2018.

xix, 97p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2018).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Avaliação de Dano

2. Frequências de Vibração

3. Temperatura

4. Rede Neural Artificial

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTANA, V. M. (2018). Avaliação de danos estruturais em vigas considerando a influência da temperatura via Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-21A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 116p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Vanessa de Moura Santana.

TÍTULO: Avaliação de danos estruturais em vigas considerando a influência da temperatura via Redes Neurais Artificiais.

GRAU: Mestre

ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Vanessa de Moura Santana

Vanessa de Moura Santana

Avenida Rui Barbosa, Quadra 136, Lote 12 – Setor Jaó

74.674-070 Goiânia – GO – Brasil.

e-mail: eng.vanessams@gmail.com

Dedico este trabalho aos meus pais
Ricardo e Matildes,
e a minha irmã Letícia

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela companhia nesta jornada e apoio nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Ricardo e Matildes, que puderam me proporcionar o máximo de conforto, amparo e apoio que estava em seu alcance, meu muitíssimo obrigada. Sem dúvidas a realização deste mestrado não seria possível sem vocês.

A minha irmã Letícia, que hoje sem dúvidas é minha melhor amiga. Sempre a disposição para me ajudar, a fazer companhia pelo telefone nas madrugadas de estudo, em momentos de drama, a dar conselhos... Em fim, você é uma pessoa muito importante em minha vida e agradeço por você existir.

A minha linda bisinha que, mesmo vendo tão pouco, me alegra e sobe minha autoestima sempre que estamos juntas. A minha avó, meus tios, tias, primas e primos pelo apoio.

Aos professores do PECC pelos ensinamentos, em especial a minha orientadora Graciela, que apesar de todos os momentos difíceis encontrados ao longo desta pesquisa teve paciência e compreensão, me ajudando a realizar um sonho.

Amigos do PECC, Bryan, Carlos, Diego, Davidson, William e Mariana por toda ajuda e momentos compartilhados durante as disciplinas e pesquisa. Faço também um agradecimento especial a atual Doutora Marília Marcy por toda disponibilidade e paciência em me ajudar, e ao aluno de doutorado Murilo Limeira pela ajuda na etapa final.

Ao Msc. Fabricio Alejandro Ortiz Morales e ao Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury pela atenção e disponibilidade em ajudar com os dados experimentais utilizados na etapa final deste trabalho.

As minhas amigas da graduação, Laynara, Jéssica e Luísa, por todo companheirismo durante a graduação e incentivo durante o mestrado.

Aos meus professores da graduação. Em especial meu orientador Alberto Chaer, por todos os ensinamentos, conselhos e ajuda ao longo dos últimos 5 anos. E a professora Rosana Brandão que indiretamente, no primeiro período, me ajudou a ingressar no mestrado.

Todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, deixo meu muito obrigada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) pela oportunidade. A CAPES e FAP-DF pelo apoio financeiro.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS EM VIGAS CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA VIA REDES NEURAS ARTIFICIAIS

Autora: Vanessa de Moura Santana

Orientadora: Graciela Nora Doz de Carvalho

Programa de pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, agosto de 2018

Com o passar dos anos a preocupação com a integridade estrutural das construções vem sendo crescente. Dentre os numerosos métodos para avaliação da integridade estrutural destacam-se aqueles baseados na observação das propriedades dinâmicas, uma vez que frequências e modos dependem, fundamentalmente, da rigidez estrutural. Os métodos que avaliam esta alteração na rigidez demandam de um monitoramento contínuo da estrutura, e a busca de metodologias adequadas para o tratamento do vasto conjunto de dados coletados se faz necessária. Nesse sentido, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) constituem uma ferramenta interessante para o tratamento destes dados. Entretanto, os efeitos ambientais, como temperatura, umidade e vento, limitam a aplicação bem-sucedida destes métodos. Dentre os efeitos ambientais mencionados a temperatura se destaca, por ser capaz de camuflar a influência provocada por pequenos danos. Com base no exposto, este trabalho apresenta um estudo sobre a influência que a variação da temperatura gera nas propriedades dinâmicas e, conseqüentemente, no método de avaliação de dano buscando uma alternativa de avaliação que supere estes problemas. Os dados utilizados para a construção deste estudo foram obtidos através do *software* de elementos finitos ANSYS, com o qual foram criados modelos numéricos de viga na configuração intacta, em diversas temperaturas, e com diferentes cenários de danos. Estes dados foram utilizados em diferentes RNAs com o algoritmo de aprendizagem *backpropagation* para construir uma ferramenta capaz de localizar danos, visto que pouco se conhece sobre a utilização de RNAs para avaliação de dano levando em consideração os efeitos provocados por mudanças na temperatura. Por fim, com o objetivo de analisar o desempenho das RNAs criadas diante de problemas reais, estas foram testadas com dados experimentais.

Palavras chave: Avaliação de Dano, Frequências de Vibração, Temperatura, Rede Neural Artificial;

ABSTRACT

EVALUATION OF STRUCTURAL DAMAGE IN BEAMS CONSIDERING THE INFLUENCE OF TEMPERATURE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Author: Vanessa de Moura Santana

Supervisor: Graciela Nora Doz de Carvalho

Programa de pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, august 2018

Over the years the concern with the structural integrity of the constructions has been increasing. Among the many methods for evaluating structural integrity, those based on the observation of dynamic properties stand out, since frequencies and modes depend fundamentally on structural rigidity. The methods that evaluate this change in rigidity, demand a continuous monitoring of the structure, and the search for suitable methodologies for the treatment of the vast set of collected data becomes necessary. In this sense, Artificial Neural Networks (ANNs) constitute an interesting tool for the treatment of these data. However, environmental effects, such as temperature, humidity and wind, limit the successful application of these methods. Among the mentioned environmental effects the temperature stands out, being able to camouflage the influence caused by small damages. Based on this discussion, this work presents a study on the influence that the temperature variation generates on the dynamic properties and, consequently, on the damage evaluation method looking for an alternative evaluation that overcomes these problems. The data used for the construction of this study were obtained through ANSYS finite element software, with which numerical models of beam were created in intact configuration, at different temperatures, and with different damage scenarios. These data were used in different ANNs with the backpropagation learning algorithm to construct a tool capable of locating damage, since little is known about the use of RNAs for damage assessment taking into account the effects caused by changes in temperature. Finally, with the purpose of analyzing the performance of ANNs created in the face of real problems, the ANNs were tested with experimental data.

Keywords: Damage Evaluation, Vibration Frequencies, Temperature, Artificial Neural Network;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO -----	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo Geral-----	3
1.2.2. Objetivos Específicos -----	3
1.3. METODOLOGIA.....	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	5
2.1. AVALIAÇÃO DE DANO	5
2.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO DINÂMICO ...	10
2.3. AVALIAÇÃO DE DANO COM INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA -----	18
3.1. ANÁLISE MODAL	18
3.1.1. Obtenção das características dinâmicas como sistema contínuo -----	18
3.1.2. Obtenção das características dinâmicas de um sistema discreto-----	21
3.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO MÓDULO DE YOUNG E GEOMETRIA	22
3.3. REDE NEURAL ARTIFICIAL	23
3.3.1. Rede <i>Multilayer Perceptron</i> -----	30
4. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS -----	35
4.1. ANSYS	35
4.2. MATLAB	39
4.3. ARTEMIS.....	41
5. ANÁLISE NUMÉRICA -----	43
5.1. AVALIAÇÃO DE DANO A TEMPERATURA CONSTANTE	43
5.1.1. Exemplo Analisado-----	43
5.1.2. Modelagem Numérica -----	46
5.1.3. Avaliação de dano -----	50
5.2. COMPORTAMENTO DA RNA DIANTE A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA ..	68
.....	68
5.2.1. Exemplo Analisado-----	68
5.2.2. Modelagem Numérica -----	70
5.2.3. Desempenho da RNA sob influência da temperatura-----	71
5.3. AVALIAÇÃO DE DANO COM VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	76

5.3.1. RNA com Modos de Vibração	79
6. CONCLUSÕES	82
6.1. DANO.....	82
6.2. TEMPERATURA.....	83
6.3. DANO E TEMPERATURA.....	84
6.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXO A	91
ANEXO B	95
ANEXO C	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Propriedades da viga ensaiada por Ortiz Morales (2016)	44
Tabela 5.2. Resultados obtidos experimentalmente por Ortiz Morales (2016).....	46
Tabela 5.3. Frequências analíticas da viga intacta	48
Tabela 5.4. Convergência da discretização das malhas.....	49
Tabela 5.5. Erro percentual entre os resultados obtidos experimentalmente por Ortiz Morales (2016) com os resultados numéricos da viga intacta.....	49
Tabela 5.6. Erro percentual entre os resultados obtidos experimentalmente por Ortiz Morales (2016) com os resultados numéricos da viga danificada.....	50
Tabela 5.7. Características das 5 configurações de RNAs criadas para a avaliação de dano a temperatura constante	51
Tabela 5.8. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento e teste da RNA I.....	52
Tabela 5.9. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento e teste da RNA II	54
Tabela 5.10. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento e teste da RNA III.....	55
Tabela 5.11. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento e teste da RNA IV	56
Tabela 5.12. Dados utilizados para o segundo teste da RNA IV	57
Tabela 5.13. Propriedades atualizadas no modelo numérico	58
Tabela 5.14. Erro percentual entre os resultados experimentais com os resultados numéricos atualizados da viga intacta e danificada	58
Tabela 5.15. Padrões do treinamento da RNA V	59
Tabela 5.16. Propriedades da viga ensaiada por Brasiliano (2005)	64
Tabela 5.17. Posição dos acelerômetros em cada etapa do ensaio feito por Brasiliano (2005).....	65
Tabela 5.18. Resultados obtidos experimentalmente por Brasiliano (2005).....	66
Tabela 5.19. Erro percentual entre os resultados numéricos da viga intacta e danificada com os resultados experimentais de Brasiliano (2005).....	66
Tabela 5.20. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento da rede ...	67

Tabela 5.21. Frequências obtidas por Ortiz Morales (2016) para a viga intacta em diferentes temperaturas	70
Tabela 5.22. Erro percentual entre os resultados obtidos experimentalmente por Ortiz Morales (2016) com os resultados numéricos da viga intacta em diferentes temperaturas	71
Tabela 5.23. Características das 2 RNAs criadas para analisar o desempenho da técnica diante da influência apenas da temperatura nas características dinâmicas da viga	74
Tabela 5.24. Frequências utilizadas para o treinamento e teste da rede com dados numéricos (RNA VI).....	75
Tabela 5.25. Frequências utilizadas para o treinamento e teste da rede com dados experimentais (RNA VII)	76
Tabela 5.26. Características da rede criada para avaliar a influência da temperatura na avaliação de dano.....	77
Tabela 5.27. Propriedades dos modelos intactos e danificados utilizados para o treinamento da RNA VIII.....	77
Tabela 5.28. Dados utilizado para teste da RNA VIII.....	78
Tabela 5.29. Modos de vibração experimental da viga danificada a 25°C e intacta a 18°C e 34°C	80
Tabela 5.30. Características da rede criada para contornar o problema do falso dano apresentado na RNA VIII.....	80
Tabela A.1. Frequências utilizadas no treinamento e teste da RNA I.....	91
Tabela A.2. Frequências utilizadas no treinamento e teste da RNA II	92
Tabela A.3. Frequências utilizadas no treinamento e teste da RNA III	93
Tabela A.4. Frequências utilizadas no treinamento e teste da RNA IV	94
Tabela B.1. Frequências utilizadas para o treinamento da RNA V com os dados da viga de Ortiz Morales (2016)	95
Tabela B.2. Frequências utilizadas para o treinamento da RNA V com os dados da viga de Brasiliano (2005)	96
Tabela C.1. Modos de vibração utilizados no teste da RNA IX	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolução no número de publicações ao longo dos anos dos tópicos: <i>Damage Detection e Temperatura e Artificial Neural Network</i> obtido na base de dados <i>Web of Science</i>	2
Figura 2.1. Resultados dos testes numéricos das vigas (a) viga bi-apoiada com dano na posição 360mm utilizando o 1° modo de vibração (b) viga engastada-livre com dano na posição 240mm utilizando o 2° modo (c) viga bi-apoiada com danos nas posições 100 e 400mm utilizando o 2° modo (d) viga bi-engastada com danos nas posições 120, 240, 360 e 480mm utilizando o 4° modo (Guo e Xu, 2018)	9
Figura 2.2. Resultados dos testes experimentais da viga bi-engastada utilizando o primeiro modo de vibração (a) dano na posição 150mm (b) danos nas posições 86mm e 149mm (Guo e Xu, 2018).....	9
Figura 2.3. Ponte Ting Kau construída em 1998 e localizada em Hong Kong (Zhou <i>et al.</i> 2010)	10
Figura 2.4. Frequências do primeiro modo de vibração coletadas experimentalmente e reproduzidas através do método SVR em conjunto com as PCA (Hua <i>et al.</i> , 2007)	11
Figura 2.5. Passarela de Dowling Hall localizada em Medford, MA, EUA (Moser e Moaveni, 2011).....	12
Figura 2.6. Localização dos acelerômetros na passarela (Kostić e Gül, 2017)	15
Figura 2.7. Estruturas onde o método proposto por Gu <i>et al.</i> (2017) foi aplicado (a) Viga bi-apoiada (b) Pórtico tridimensional	16
Figura 3.1. (a) Viga bi-apoiada submetida à um carregamento dinâmico (b) Elemento infinitesimal com os esforços internos (Clough e Penzien, 2003).....	19
Figura 3.2. (a) Neurônio Humano (b) Modelo do Neurônio Booleano.....	24
Figura 3.3. Classificação simplificada das RNAs	25
Figura 3.4. Rede <i>Feedforward</i> com camada única (Haykin, 2005 adaptada)	26
Figura 3.5. Rede <i>Feedforward</i> com múltiplas camadas (Haykin, 2005 adaptada).....	27
Figura 3.6. Rede recorrente (Haykin, 2005 adaptada)	27
Figura 3.7. Exemplos de funções de ativação (a) Função Linear (b) Função Tangente-Hiperbólica (c) Função Sigmóide (d) Função Degrau (e) Função “Radial basis” (f) Função Triangular (MatLab, 2016)	28
Figura 3.8. Etapas para o treinamento de uma RNA.....	29
Figura 3.9. Configuração de uma rede <i>Multilayer Perceptron</i> com uma camada de entrada, uma de saída e duas ocultas e com vários neurônios por camadas (Haykin, 2005).....	30

Figura 3.10. Fases do treinamento da RNA com o algoritmo <i>Backpropagation</i>	31
Figura 4.1. Interface do programa ANSYS da extensão <i>Workbench</i>	36
Figura 4.2. Sistemas de análise utilizados, Static Structural, Modal e Finite Element Modeler	36
Figura 4.3. Módulo <i>Engineering Data</i> com o gráfico Módulo de Elasticidade x Temperatura	37
Figura 4.4. (a) Elemento finito Quadratic Hexahedron (b) Elemento finito Quadratic Wedge	37
Figura 4.5. Exemplo de resultado apresentado pelo ANSYS <i>Workbench</i> após a análise dinâmica	38
Figura 4.6. Janela utilizada para criação da RNA no MatLab	39
Figura 4.7. Exemplo da organização do conjunto de dados importados para o treinamento da rede (a) Dados de entrada (input) (b) Dados de saída (target)	40
Figura 4.8. (a) Gráfico de <i>Performance</i> (b) Gráfico de <i>Regression</i>	41
Figura 4.9. Exemplo do espectro de densidade utilizado pelo programa para obtenção das frequências naturais.	42
Figura 4.10. Exemplo do modo de vibração plotado pelo programa.	42
Figura 5.1. Representação da viga ensaiada por Ortiz Morales (2016) na configuração intacta.	44
Figura 5.2. Posição, em milímetros, dos acelerômetros ao longo do comprimento da viga (Ortiz Morales, 2016 adaptada)	44
Figura 5.3. Representação das condições de contorno da viga ensaiada (Ortiz Morales, 2016 adaptada).....	45
Figura 5.4. Perspectiva da instalação dos acelerômetros (Ortiz Morales, 2016)	45
Figura 5.5. (a) Seção transversal intacta (b) Seção transversal danificada (c) Dano em perspectiva.....	45
Figura 5.6. Representação da viga ensaiada por Ortiz Morales (2016) na configuração danificada	45
Figura 5.7. Módulo numérico da viga intacta	48
Figura 5.8. Detalhe da redução da seção transversal realizada no modelo numérico para simular o dano criado no ensaio experimental.	49
Figura 5.9. Representação do dano provocado no modelo numérico para avaliação de dano.	50
Figura 5.10. Representação do dano provocado no modelo numérico para avaliação de dano	52

Figura 5.11. Resultados da fase de teste da RNA I	53
Figura 5.12. Resultados da fase de teste da RNA II.....	54
Figura 5.13. Resultados da fase de teste da RNA III	55
Figura 5.14. Resultados da fase de teste da RNA IV	57
Figura 5.15. Resultados da fase de teste da RNA IV para os dados experimentais.....	57
Figura 5.16. Resultados da fase de teste da RNA V (a) Função Tansig – Tansig (b) Função Tansig – Logsig (c) Função Tansig – Purelin	60
Figura 5.17. Resultados da fase de teste da RNA V (a) Função Logsig – Tansig (b) Função Logsig – Logsig (c) Função Logsig – Purelin.....	61
Figura 5.18. Resultados da fase de teste da RNA V (a) Função Purelin – Tansig (b) Função Purelin – Logsig (c) Função Purelin – Purelin	61
Figura 5.19. Gráfico da <i>Regression</i> obtido na rede com função de ativação Tansig – Logsig com 5 neurônios	62
Figura 5.20. Gráfico da <i>Regression</i> obtido na rede com função de ativação Logsig – Tansig com 5 neurônios	63
Figura 5.21. Viga ensaiada por Brasileiro (2005) (a) Representação da viga intacta (b) Seção transversal.....	64
Figura 5.22. Discretização da viga e posição dos acelerômetros fixos (Brasiliano 2005).....	64
Figura 5.23. Esquema do ensaio (a) Visão geral (b) Detalhe do apoio (Brasiliano 2005).....	65
Figura 5.24. (a) Localização da região danificada (Brasiliano 2005) (b) Seção transversal danificada	65
Figura 5.25. Discretização do modelo numérico da viga (a) ao longo do comprimento (b) da seção transversal.....	66
Figura 5.26. Resultados da fase de teste da RNA V com função de ativação Tansig - Tansig e 10 neurônios para a Viga de Brasileiro (2005).....	67
Figura 5.27. Posição dos termômetros ao longo do comprimento da viga (Ortiz Morales, 2016)	69
Figura 5.28. Perspectiva da instalação dos termômetros (Ortiz Morales, 2016).....	69
Figura 5.29. Instalação dos sensores de temperatura na viga. (Ortiz Morales, 2016).....	69
Figura 5.30. Consideração da influência da temperatura no Módulo de Elasticidade (a) Relação tabular entre a Temperatura e o Módulo de Elasticidade fornecido pelo usuário (b) Gráfico Módulo de Elasticidade \times Temperatura criado pelo <i>software</i>	71

Figura 5.31. Frequências alteradas pela variação da temperatura (a) 1° Frequência (b) 2° Frequência (c) 3° Frequência	73
Figura 5.32. Modos de vibração obtidos do modelo numérico sob qualquer temperatura (a) 1° Modo (b) 2° Modo (c) 3° Modo	73
Figura 5.33. Resultados da fase de teste da RNA VI (a) Temperatura T21 (b) Temperatura T22	75
Figura 5.34. Resultados da fase de teste da RNA VII (a) Temperatura T21 (b) Temperatura T22	76
Figura 5.35. Resultados da fase de teste da RNA VIII (a) Teste com os dados Num 1 e Exp 1 da Tabela 5.28 (b) Teste com os dados Num 2 e Exp 2 da Tabela 5.28 (c) Teste com os dados Num 3 e Exp 3 da Tabela 5.28	79
Figura 5.36. Resultados da fase de teste da RNA IX	81

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

MEF	Método dos Elementos Finitos
MER	Método do Erro Residual
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i> - Rede Perceptron de Múltiplas Camadas
MSE	<i>Mean Squared Error</i> – Erro quadrático médio
nntool	Neural Network Toolbox
RNA	Rede Neural Artificial
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento da saúde estrutural
SVR	<i>Support Vector Regression</i> – Regressão de Vetores Suporte
TMD	<i>Tuned Mass Damper</i> – Amortecedor de Massa Sintonizada
A	Área da seção transversal
C	Matriz de amortecimento da estrutura
dx	Comprimento de um elemento infinitesimal
e	Erro entre o neurônio da camada de saída encontrada com a desejada da RNA
E	Módulo de Elasticidade
E_0	Módulo de Elasticidade ensaiado em uma temperatura conhecida
f_i	Força de Inércia
$F(x)$	Vetor de força externa
H	Matriz Hessiana
I	Inércia
I	Matriz identidade
K	Matriz de rigidez da estrutura
L	Comprimento
L_0	Comprimento inicial
ΔL	Variação do comprimento
m	Massa

\bar{m}	Massa por unidade de comprimento
M	Momento Fletor
\mathbf{M}	Matriz de massa da estrutura
p	Força externa
(t)	Tempo
T	Variação da temperatura
v	Deslocamento
\ddot{v}	Aceleração
V	Força cortante
X_k	Neurônio da camada de entrada da RNA
$y(x)$	Vetor deslocamento
$\dot{y}(x)$	Vetor velocidade
$\ddot{y}(x)$	Vetor aceleração
$Y(0)$	Deslocamento inicial
$\dot{Y}(0)$	Velocidade inicial
Y_i	Neurônio da camada de saída da RNA
Y_i^*	Neurônio desejado da camada de saída da RNA
input	Dado de entrada
output	Dado de saída calculado
target	Dado de saída objetivado
Logsig	Função sigmóide
Hardlims	Função degrau
Purelin	Função linear
Tansig	Função tangente hiperbólica
Tribas	Função triangular
\emptyset	Modo de vibração

α	Coeficiente de dilatação linear
α_{jk}	Pesos entre a camada de entrada e camada intermediária da RNA
θ	Ângulo de fase
μ	Fator de aprendizado da RNA
ρ	Massa específica do material
σ_j	Neurônio da camada oculta da RNA
τ	Fator de ajuste da RNA
ω	Frequência natural
ω_{ij}	Pesos entre a camada intermediária e camada de saída da RNA
∇E	Gradiente do erro

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Todas as construções estão sujeitas a solicitações não consideradas em projetos, erros na execução da obra, desgaste ou outros eventos que deixam a estrutura suscetível a danos. Estes danos alteram as propriedades físicas e/ou mecânicas da estrutura, e essas alterações, dependendo da gravidade, podem levar a estrutura à ruína.

Diversos métodos vêm sendo utilizados com a intenção de identificar esses danos, entre eles o de Raio-x (NBR 15739:2012), Método de Emissão acústica (NBR 15360:2013), Método de Ultrassom (NBR 6002:2015) ou até mesmo a inspeção visual, entre outros. Porém, à aplicação dos métodos supracitados exige um conhecimento prévio da região danificada, e analisar toda estrutura demandaria muito tempo, podendo inviabilizar o emprego dos mesmos em estruturas de grande porte. Neste sentido, a utilização de métodos baseados nas propriedades dinâmicas torna-se uma alternativa para identificar regiões suspeitas e otimizar o tempo de aplicação destes métodos. “A utilização de medições de vibrações para avaliação da integridade estrutural não tem intenção de substituir os tradicionais ensaios não-destrutivos” (Miguel, 2007).

Os métodos de avaliação de dano baseados nas propriedades dinâmicas, frequência e modo de vibração, se fundamentam no acompanhamento das alterações das características dinâmicas da estrutura, uma vez que estruturas danificadas apresentam perda de rigidez localizada, provocando alterações nas propriedades dinâmicas. E, estes métodos, podem ter quatro objetivos: a detecção, localização, quantificação ou recuperação do dano.

Contudo, quando estes métodos são utilizados em estruturas suscetíveis a efeitos ambientais, como variação da temperatura, vento, radiação solar, umidade, os resultados obtidos podem apresentar alguma imprecisão. Isto está relacionado ao fato de que os efeitos ambientais provocam mudanças nas propriedades físicas/mecânicas e, conseqüentemente, dinâmicas da estrutura, levando a uma falsa indicação de dano.

Dentre esses efeitos ambientais a variação da temperatura é o mais significativo na variação das frequências modais, Li *et al.* (2010). A correta interpretação desta variação é fundamental para se ter um método confiável de avaliação de dano, uma vez que alguns danos apresentam a mesma influência nas propriedades dinâmicas quando comparado aos efeitos da variação da

temperatura. Ortiz Morales (2016) em sua dissertação de mestrado estudou uma viga metálica bi-apoiada e constatou que para a primeira frequência natural “as variações de temperatura mascararam as variações ocasionada pelos danos”.

Por outro lado, o acompanhamento contínuo de uma estrutura para identificação das características dinâmicas e, posteriormente, a avaliação de dano, implica na necessidade de trabalhar com um vasto conjunto de dados. Uma alternativa para o tratamento deste grande conjunto de dados são as Redes Neurais Artificiais (RNAs).

As RNAs consistem em uma técnica computacional baseada no neurônio humano, que possui como principal característica a habilidade de reconhecer e classificar padrões. Esta habilidade confere à rede a capacidade de identificar a presença do dano, devido às alterações provocadas nas propriedades dinâmicas da estrutura. Diversos autores realizaram avaliação de dano com métodos baseados nas características dinâmicas em conjunto com RNAs, como Mehrjoo *et al.* (2008), Marcy (2013), Maia (2016) e Marcy (2017).

Entretanto, pouco se conhece sobre o uso de RNAs para avaliação de danos considerando os efeitos da temperatura, na Figura 1.1 é apresentado um gráfico da evolução de publicações segundo a base de dados *Web of Science* sobre os tópicos detecção de dano, temperatura e Rede Neural Artificial, mostrando ser uma linha de pesquisa em ascensão. Tendo isto em mente, e sabendo que a variação da temperatura pode interferir na avaliação de dano de métodos baseados nas características dinâmicas, este trabalho busca estudar essa interferência e como contorná-la, utilizando a técnica de RNAs.

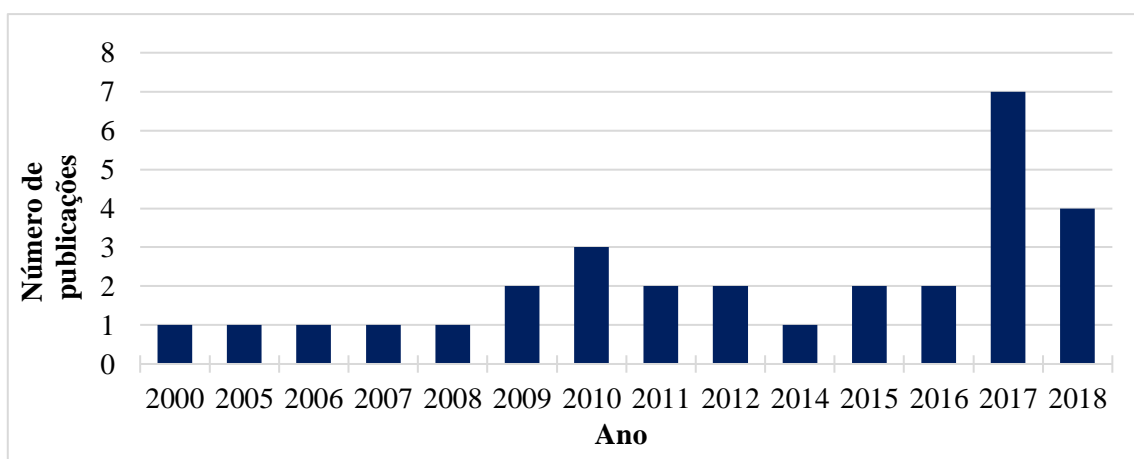


Figura 1.1. Evolução no número de publicações ao longo dos anos dos tópicos: *Damage Detection e Temperatura e Artificial Neural Network* obtido na base de dados *Web of Science*

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral compreender a influência provocada pela variação de temperatura na avaliação de dano em conjunto com RNAs. E a partir disto, propor um método de localização de dano que seja menos suscetível ao efeito da temperatura nas características dinâmicas.

1.2.2. Objetivos Específicos

Como objetivo específico propôs-se:

- Gerar e validar modelos numéricos intactos e danificados de vigas metálicas para obter as frequências e modos de vibração;
- Propor uma RNA capaz de localizar dano em estruturas que não esteja suscetível a variação de temperatura;
- Analisar a influência provocada pela temperatura nas características dinâmicas da estrutura, frequências naturais e modos de vibração;
- Analisar o comportamento da RNA com relação as mudanças provocadas pela temperatura nas frequências naturais da viga;
- Propor uma RNA capaz de localizar dano de modo que seja menos suscetível a erros quando a estrutura analisada estiver submetida a variações de temperatura.

1.3. METODOLOGIA

Este trabalho é realizado por meio de três etapas, uma revisão da literatura e de fundamentos teóricos pertinentes à concepção deste trabalho, construção de modelos numéricos para obtenção das propriedades dinâmicas e treinamento e teste de RNAs para avaliação de dano.

Com relação à segunda etapa, onde são construídos modelos numéricos para a obtenção das propriedades dinâmicas, frequências e modos de vibração, utiliza-se o *software* de elementos finitos ANSYS (2016). Nesta etapa o primeiro modelo é caracterizado por uma estrutura intacta. A partir deste modelo intacto novos modelos numéricos são desenvolvidos considerando a estrutura danificada ou com diferentes temperaturas. Os danos são simulados através de reduções da seção transversal de pequenos trechos ao longo da viga.

Na terceira etapa são treinadas e testadas RNAs através do *software* de cálculo numérico MatLab (2016), mais especificamente, através do pacote *Neural Network Toolbox*, com o objetivo de localizar a posição do dano. As RNAs criadas serão treinadas com os dados numéricos, obtidos através do *software* ANSYS (2016), e testadas com dados numéricos e experimentais.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo apresentou-se uma introdução ao assunto estudado, os objetivos gerais e específicos da pesquisa e a metodologia empregada.

No segundo capítulo consta uma breve revisão da literatura com trabalhos sobre avaliação de dano, com ênfase nos que utilizaram RNAs, trabalhos sobre a influência provocada pela variação da temperatura nas propriedades dinâmicas e, por fim, trabalhos sobre avaliação de dano nos quais as variações da temperatura foram consideradas.

O terceiro capítulo contém a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente são apresentadas as formulações para a obtenção das características dinâmicas da viga, analiticamente e numericamente. Também são apresentadas as considerações sobre a influência provocada pela temperatura na geometria e módulo de elasticidade. Além disso, este capítulo também contém a teoria de Redes Neurais Artificiais aplicadas neste trabalho.

O quarto capítulo é dedicado à apresentação das ferramentas computacionais utilizadas nesta pesquisa.

No quinto capítulo são descritas todas as análises numéricas realizadas e seus resultados. São apresentadas as análises referentes à avaliação de dano a temperatura constante, com testes utilizando dados experimentais de duas tipologias de vigas. E também a análise do comportamento da RNA diante da influência da temperatura nas propriedades dinâmicas. Assim como a influência provocada pela temperatura na avaliação de dano.

Por fim, no sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros, que podem complementar este estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Todas as estruturas estão suscetíveis à sofrerem danos, seja por desgaste, deterioração, depredação, mau uso, etc. Os danos podem prejudicar a integridade e funcionamento da estrutura, por isso, o campo relacionado com o monitoramento da saúde da estrutura (*Structural Health Monitoring* - SHM) vem sendo cada vez mais estudado.

Ao longo dos anos muitos estudos foram realizados a fim de auxiliar na manutenção através dos indicativos de dano e, desse modo, prolongando a vida útil da estrutura. Os métodos baseados nas características dinâmicas da estrutura, frequências naturais e modos de vibração, em conjunto com as Redes Neurais Artificiais (RNAs), são um exemplo de metodologia que vem sendo estudada e aplicada em casos reais.

Contudo, estudos apontaram que a temperatura, assim como os danos, influenciava nos parâmetros dinâmicos. Isto gerou uma série de estudos a fim de se compreender essa influência e poder propor métodos de avaliação de dano mais confiáveis.

Neste sentido, uma breve revisão da literatura será apresentada neste capítulo. Serão apresentados trabalhos sobre a avaliação de dano, com ênfase nos que utilizaram as RNAs, trabalho sobre a influência que a temperatura provoca nas propriedades dinâmicas da estrutura e, por fim, trabalhos sobre avaliação de dano levando em consideração variações de temperatura na estrutura.

2.1. AVALIAÇÃO DE DANO

Estudos na área de avaliação de dano vêm sendo feitos a mais de quatro décadas, entre eles pode se destacar os precursores, Adams *et al.* (1978) através de testes em barras prismáticas retas, submetidas a vibração axial, propuseram localizar e quantificar dano em modelos teóricos e experimentais. Na análise teórica simularam o dano através de uma mola, de forma que uma rigidez infinita da mola simula a inexistência de dano e valores decrescentes da rigidez indicam um dano crescente. Na investigação experimental o dano foi provocado por redução na seção transversal. Tanto no modelo teórico como no experimental, os danos provocaram alterações nas características dinâmicas, e possíveis áreas danificadas foram localizadas a partir do cruzamento dos modos de vibração.

Wu *et al.* (1992) iniciaram pesquisas que visavam desenvolver métodos de monitoramento automático para a detecção de danos estruturais, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNAs). O objetivo era treinar uma RNA para reconhecer padrões, provocados pela presença do dano, e a partir destes padrões ser capaz de detectar a presença do dano. Com os resultados obtidos constataram que as RNAs, com algoritmo de aprendizagem *Backpropagation*, são mecanismos promissores na identificação de dano, já que foram capazes de aprender sobre o comportamento da estrutura danificada e intacta, conseguindo não só identificar o dano como quantificá-lo.

Sohn *et al.* (2002) realizaram uma revisão bibliográfica de trabalhos publicados entre 1996 e 2001 sobre o monitoramento da saúde estrutural (*Structural Health Monitoring – SHM*), abordando técnicas locais de ensaios não destrutíveis. Apontaram que apesar da necessidade de uma grande quantidade de dados para serem treinadas, as RNAs são uma opção para a avaliação de danos. Além disso, os autores também comentam a relevância em se considerar a influência dos efeitos ambientais nos métodos de avaliação de dano.

Kim *et al.* (2003) propuseram um método para localizar e estimar a intensidade de danos utilizando apenas duas frequências ou os dois primeiros modos de vibração. Tal método foi aplicado em uma viga bi-apoiada de concreto protendido com 3,6m de comprimento, criada numericamente via elementos finitos. Os danos foram simulados em dois locais da viga, a $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ do vão com relação ao apoio, e para cada local foram simuladas três intensidades de dano. A utilização dos modos de vibração proporcionou uma ótima localização dos danos propostos, erro de até 1,74%. Já as frequências apresentaram melhores resultados quando o dano estava localizado no meio do vão, erro inferior à 0,28%. Para o dano mais próximo ao apoio, o erro foi de até 3,8%, sendo que o mesmo foi detectado em sua posição real ou simétrica.

Mehrjoo *et al.* (2008) utilizaram redes neurais com múltiplas camadas (*Multilayer Perceptron - MLP*) para localizar e estimar intensidades de dano nas ligações de estruturas treliçadas. Os modos de vibração foram utilizados como dados de entrada da rede, e estes foram obtidos através de simulações numéricas. Realizaram duas análises numéricas, primeiro em uma treliça simples para demonstrar a eficácia da abordagem e depois em uma treliça de ponte real. Em ambos os testes a rede apresentou bons resultados. Utilizando os quatro primeiros modos de vibração a treliça simples teve um erro médio de 1,28% entre o dano estimado pela rede e o dano real, e a treliça real de ponte teve um erro médio de 1,08%, quando utilizaram os seis primeiros modos de vibração.

Samali *et al.* (2012) utilizam RNAs para mapear as mudanças, provocadas por danos do tipo entalhe, nas frequências naturais de um pórtico plano metálico de dois pavimentos. No pórtico, com vão entre colunas de 0,8m e altura total de 1,4m, foram simuladas três intensidades de dano em diferentes posições. Criaram dois modelos, um modelo experimental, em laboratório, e um modelo numérico no *software* ANSYS *Workbench*. A fim de simular as condições do teste experimental, introduziram no modelo numérico 10% de ruído gaussiano branco. Os dados obtidos nos dois modelos foram utilizados para o treinamento, validação e teste em 14 RNAs. Como dado de entrada, nas RNAs, utilizaram a diferença entre as frequências sem dano e as frequências danificadas, de modo que o objetivo era localizar e estimar a severidade do entalhe. Com os dados experimentais a RNA conseguiu uma ótima performance na localização do dano, com erros inferiores a 0,1% nas três fases (treinamento, validação e teste), e na determinação da severidade os erros foram inferiores a 5%. Com os dados numéricos o erro na localização do dano chegou a quase 10% em 1 RNA, e na severidade, assim como nos dados experimentais, ficaram inferiores a 5%.

Marcy (2013) utilizou o Método do Erro Residual (MER), criado por Genovese (2000) *apud* Marcy (2013), para localizar e quantificar danos em 4 modelos de pórticos espaciais diferentes. Além do MER, utilizou as RNAs na etapa de quantificação a fim de comparar os resultados dos dois métodos. O trabalho foi todo numérico e os danos foram simulados através de uma redução na seção transversal. Marcy (2013) concluiu que pequenos danos pouco alteram as propriedades dinâmicas, quando comparadas com o modelo intacto. O MER mostrou-se eficaz na etapa de localização do dano em todos os modelos propostos, nos modelos mais simples o processamento foi rápido e nos modelos mais complexos foi necessário um tempo maior para o processamento. Já na etapa de quantificação o MER foi utilizado apenas nos pórticos mais simples, devido à demora no processamento, e as RNAs foram utilizadas nos quatro pórticos. Tanto o MER como as RNAs apresentaram um bom funcionamento na quantificação dos danos, mas as RNAs apresentaram resultados mais exatos e rapidez no processamento.

Maia (2016) em sua dissertação de mestrado utilizou RNAs para localizar o dano em uma viga metálica e um pórtico plano, através de análises numéricas e experimentais destes dois elementos. Os dados numéricos da viga metálica foram obtidos através de uma rotina computacional criada no *software* MatLab por Brasileiro (2005). Já o pórtico plano foi modelado numericamente no *software* de elementos finitos SAP2000 com o objetivo de se obter os parâmetros dinâmicos, frequências e modos de vibração, e criar um banco de dados para o

treinamento e validação das RNAs. As RNAs criadas foram treinadas e validadas com os modos de vibração normalizados das estruturas, e os dados experimentais foram utilizados na fase de teste. Para a viga, todas as RNAs apresentaram bons resultados nas fases de treinamento, validação e generalização. Já para o pórtico as RNAs apresentaram bons resultados nas fases de validação e generalização quando utilizou os modos de vibração e frequência natural, mas na fase de treinamento apenas as RNAs que se basearam nos modos apresentaram bons resultados.

Amaral *et al.* (2016) avaliaram o uso de RNA para a predição de danos estruturais com base em indicadores estatísticos das respostas dinâmicas no domínio do tempo. Para a aplicação do estudo foi concebido um modelo numérico em elementos finitos de uma viga bi-apoiada de aço. Neste modelo foram consideradas três configurações estruturais (sem dano, dano 1 e dano 2), onde para cada configuração admitiu-se três níveis de ruído. Foi aplicada uma força aleatória próxima ao apoio com frequências e amplitudes variadas a fim de se obter as respostas temporais. Nestas respostas temporais foram aplicados 10 indicadores estatísticos. E os dados obtidos estatisticamente foram utilizados como dados de entrada em uma RNA do tipo *Multilayer Perceptron* via *software* MatLab, mais especificamente utilizando a plataforma *Neural Network Toolbox*. O objetivo era a determinação da configuração estrutural (sem dano, dano 1 ou dano 2) e todos os 6 modelos de RNA criados (4, 5, 6, 8, 10 e 20 neurônios) apresentaram bons resultados.

Chaves *et al.* (2017) utilizaram uma RNA ARTMAP-Fuzzy para identificar falhas estruturais em uma estrutura predial. O trabalho foi dividido em três etapas: aquisição de dados, treinamento e diagnóstico da rede. A primeira etapa, aquisição de dados, foi feita por meio de um modelo matemático formado por um sistema de equações diferenciais que modelaram uma estrutura predial de dois pavimentos. As etapas subsequentes, treinamento e diagnóstico, foram realizadas no *software* MatLab. O objetivo dos testes realizados era classificar os sinais emitidos pela RNA em três tipos: sinal normal, sinal com falha no primeiro andar e sinal com falha no segundo andar. Os resultados demonstraram um ótimo desempenho da rede ao obter 100% de acerto, mostrando a eficácia da RNA ARTMAP Fuzzy em identificar a presença ou ausência das falhas estruturais.

Guo e Xu (2018) propuseram um novo método para localizar pequenas intensidades de danos utilizando um dos modos de vibração da estrutura contendo ruído. O método proposto foi testado em modelos numéricos e experimentais de vigas e eixos, e se baseia na teoria de núcleos

Gaussianos (*Gaussian kernels*) em conjunto com o método de fusão de dados Bayesiano (*Bayesian data fusion method*). Em ambos os testes, numéricos e experimentais, os resultados para a localização do dano foram bons. Nas Figura 2.1 e Figura 2.2 constam alguns dos resultados apresentados por Guo e Xu (2018) para os testes das vigas, sendo a seta em vermelho a posição real do dano e os picos em preto o resultado obtido através do método proposto.

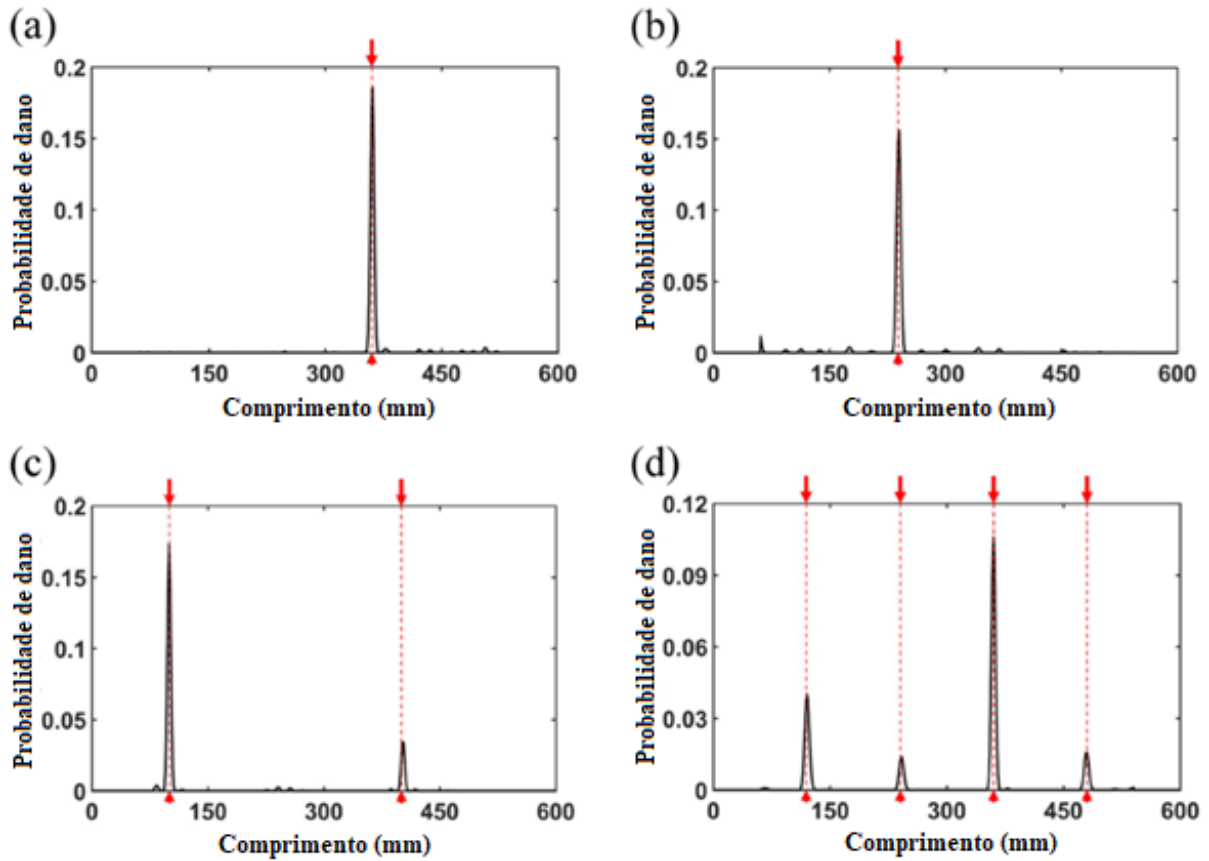


Figura 2.1. Resultados dos testes numéricos das vigas (a) viga bi-apoiada com dano na posição 360mm utilizando o 1º modo de vibração (b) viga engastada-livre com dano na posição 240mm utilizando o 2º modo (c) viga bi-apoiada com danos nas posições 100 e 400mm utilizando o 2º modo (d) viga bi-engastada com danos nas posições 120, 240, 360 e 480mm utilizando o 4º modo (Guo e Xu, 2018)

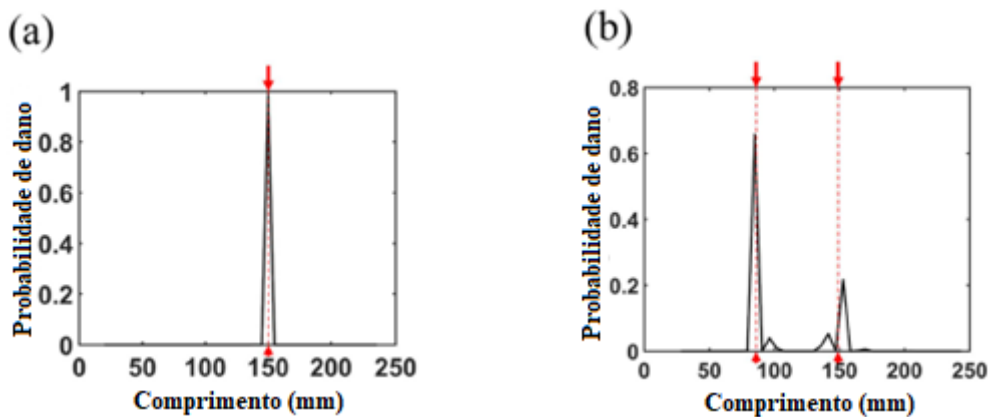


Figura 2.2. Resultados dos testes experimentais da viga bi-engastada utilizando o primeiro modo de vibração (a) dano na posição 150mm (b) danos nas posições 86mm e 149mm (Guo e Xu, 2018)

2.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO DINÂMICO

A fim de se compreender a influência provocada pela variação da temperatura nas propriedades dinâmicas estudos nessa área veem sendo feitos há mais de 20 anos. Wahab e Roeck (1997) estudaram a ponte de concreto protendido B15 localizada na Bélgica, para compreender a influência que uma variação de 15°C para 0°C provocaria na avaliação de danos. Realizaram dois testes dinâmicos: uma vibração forçada e uma vibração ambiente, para observar a mudança provocada nos parâmetros modais com a variação da temperatura, e estes testes produziram resultados semelhantes. Também fizeram uma análise em elementos finitos, utilizando o *software* ANSYS. Concluíram, através das três análises, que a redução na temperatura afetou principalmente o módulo de Young, provocando um aumento nas frequências naturais de 4% a 5%. Com isso, sugeriram não utilizar apenas frequências naturais para a detecção de danos em estruturas submetidas à variação da temperatura, devido sua sensibilidade à mesma.

Fu e DeWolf (2001) fizeram um estudo analítico em elementos finitos e uma análise experimental de uma ponte composta por vigas metálicas e tabuleiro de concreto. O estudo foi motivado após observarem que as frequências naturais alteravam quando os apoios de extremidade eram impedidos de movimentar, devido às baixas temperaturas. Não conseguiram determinar a temperatura em que as propriedades estruturais permaneciam inalteradas, como consideradas em projeto, com isso não foi possível estabelecer uma relação entre os resultados experimentais e os numéricos. Concluíram apenas que um aumento na temperatura de -17,8°C para 15,6°C provocava uma redução na segunda frequência de flexão de 8,96% nos ensaios experimentais e de 8,10% no modelo de elementos finitos.

Hua *et al.* (2007) e Zhou *et al.* (2010) estudaram os efeitos da temperatura na ponte estaiada Ting Kau, localizada em Hong Kong, Figura 2.3. A ponte em questão vem sendo monitorada desde sua construção, em 1998, e conta com mais de 230 sensores distribuídos em diferentes partes da ponte, e dentre eles 83 são para determinar a temperatura.



Figura 2.3. Ponte Ting Kau construída em 1998 e localizada em Hong Kong (Zhou *et al.* 2010)

Hua *et al.* (2007) aplicaram a técnica de Regressão de Vetores Suporte (*Support Vector Regression – SVR*) para reproduzir as frequências naturais com maior precisão, estando a estrutura suscetível à variação da temperatura. O estudo foi feito para ser utilizado em estruturas instrumentadas com sistemas de monitoramento de longo prazo, como é o caso da ponte Ting Kau. Foram testadas três entradas no SVR relacionadas com a temperatura, temperatura original, combinação das temperaturas do instante atual com o anterior e componentes principais da temperatura (PCA). Dentre essas a PCA apresentou os melhores resultados, apresentados na Figura 2.4, onde é possível visualizar que o método proposto foi capaz de modelar a influência provocada pela temperatura e reproduzir com eficácia as frequências modais da ponte sem este efeito ambiental.

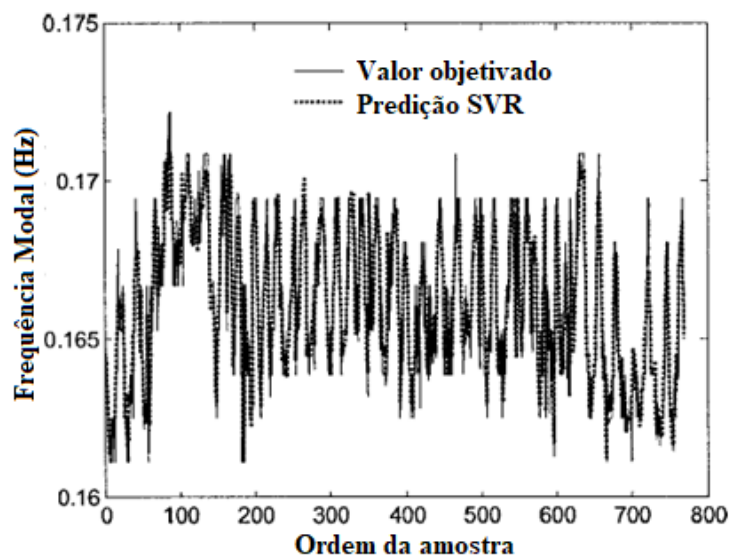


Figura 2.4. Frequências do primeiro modo de vibração coletadas experimentalmente e reproduzidas através do método SVR em conjunto com as PCA (Hua *et al.*, 2007)

Zhou *et al.* (2010), utilizando RNAs do tipo *backpropagation* (*Back-Propagation Neural Network – BPNN*), propuseram uma relação entre a variabilidade modal e a variação de temperatura. As condições de vento estavam fracas, de modo que a sua influência pode ser desprezada. Dividiram 770h de dados coletados em três conjuntos, conjunto de treinamento, de validação e de teste. Foram construídos três tipos de entradas, temperaturas eficazes, temperaturas médias e componentes principais (PCs) de temperaturas. Quando utilizado um número suficiente de PCs, esta entrada de dados apresentou a melhor capacidade de reprodução e previsão dos dados coletados experimentalmente. Verificou-se também que a capacidade de prever, de todos os modelos de BPNN, é inferior à sua capacidade de reproduzir os dados coletados.

Li *et al.* (2010) investigaram a ponte estaiada Tianjin Yonghe, localizada na China, para modelar uma correlação das propriedades dinâmicas (coeficientes de amortecimento, frequência e formas modais) com a temperatura e a velocidade do vento. Utilizaram uma Análise não Linear de Componentes Principais para fazer um pré-processamento dos dados, com o intuito de separar a influência da temperatura da velocidade do vento nos dados experimentais. Concluíram que as RNAs apresentam uma melhor capacidade de mapeamento e previsão que uma análise linear. Além disso, verificaram que a temperatura apresenta uma correlação negativa com a frequência e positiva com o amortecimento. O vento, na maioria dos casos, apresentou uma relação contrária à temperatura, ou seja, maiores velocidades de vento provocaram um aumento na frequência. Não foi identificada uma relação clara sobre a influência desses fatores ambientais na forma modal.

Moser e Moaveni (2011) observaram que durante seis semanas, devido à uma variação de -14°C para 39°C , as frequências da passarela Dowling Hall (Figura 2.5) variaram não linearmente de 4 a 8%. Propuseram quatro modelos para representar a relação entre as frequências naturais identificadas e as temperaturas medidas, um modelo linear estático, um modelo ARX (*AutoRegressive models with eXogenous inputs*), um modelo bi-linear e polinômios de várias ordens. O polinômio de quarta ordem sem termos cruzados apresentou os melhores resultados neste estudo. E o modelo bi-linear se mostrou promissor para temperaturas próximas ao ponto de congelamento.



Figura 2.5. Passarela de Dowling Hall localizada em Medford, MA, EUA (Moser e Moaveni, 2011)

Xia *et al.* (2012) elaboraram um artigo de revisão literária constatando que em ensaios laboratoriais e de campo, independentemente do material e tipo de estrutura, as variações no módulo de elasticidade sob diferentes temperaturas são a principal causa das variações nas frequências de vibração. Não conseguiram identificar uma relação clara entre o amortecimento

e a temperatura, uma vez que o amortecimento é um parâmetro difícil de se medir com precisão. E as formas modais pouco se alteraram com o efeito térmico.

Zhou e Yi (2014) fizeram uma revisão bibliográfica sobre trabalhos que estabeleceram correlações entre temperaturas e frequências de pontes. Dividiram a revisão em três tópicos, trabalhos de derivações teóricas, análises de tendência e modelos quantitativos. Na análise de tendência apresentam trabalhos com simulações numéricas, utilizando elementos finitos, trabalhos de testes feitos em laboratório e trabalhos com monitoramento em campo. O modelo quantitativo foi dividido em trabalhos com modelos lineares, que apresentaram bons resultados em estruturas mais simples, modelos não lineares e modelos de aprendizagem, como RNAs. Concluíram que o efeito da temperatura não deve ser negligenciado, já que pode camuflar os efeitos provocados por danos, e que os modelos de aprendizagem são uma boa alternativa para se estabelecer uma relação entre temperatura e propriedades dinâmicas.

Moreira (2015) estudou a influência da temperatura na dessintonização de Amortecedores de Massa Sintonizada (*Tuned Mass Damper – TMDs*). Através de 720 horas de dados experimentais observou que a frequência não era constante durante o dia, e atribuiu este fato à variação da temperatura diária. Como os TMDs são sintonizados para amortecer uma frequência específica da estrutura, esta variação na frequência, provocada pela temperatura, gerou uma dessintonização do amortecedor, fazendo com que perdesse eficiência. O TMD estudado teve uma redução de aproximadamente 40% em sua eficiência, isto porque as novas frequências ficaram acima da sintonização ideal, caso ficassem abaixo o TMD poderia ter uma redução de até 80% de eficiência.

Ortiz Morales (2016) realizou ensaios em condições controladas de temperatura em uma viga de aço biapoada para analisar a influência da variação da temperatura nos parâmetros modais, frequências e taxas de amortecimentos, e estabelecer uma relação entre eles. Avaliou as três primeiras frequências e respectivas taxas de amortecimento da viga intacta e com duas intensidades de danos diferentes por três técnicas estatísticas, e a hipótese de Kolmogorov apresentou os melhores resultados. Identificou, através de gráficos de dispersão, que as frequências reduziram com os incrementos de temperatura e nenhuma relação clara foi obtida das taxas de amortecimento.

2.3. AVALIAÇÃO DE DANO COM INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Como apresentado na seção anterior a variação da temperatura provocou alterações nas propriedades dinâmicas, principalmente nas frequências. Deste modo, nesta seção serão apresentados alguns trabalhos de avaliação de dano onde a temperatura foi tratada para a aplicação do método.

Miguel (2007) estudou a integridade estrutural de treliças. Observou que a temperatura apresentava uma influência significativa na avaliação de danos e, a partir disso, utilizou equações de regressão linear e RNAs com o objetivo de filtrar este efeito ambiental das frequências naturais. A rede construída possuía treinamento supervisionado com algoritmo *backpropagation* e arquitetura com uma camada de entrada, uma oculta e uma de saída. Além disso, como dados de entrada foram utilizadas as temperaturas e os dados de saída foram as frequências. Após o treinamento e validação da rede e análise dos resultados obtidos através das regressões lineares, constatou que as duas metodologias apresentaram bons resultados na capacidade de previsão da frequência sem a influência da temperatura, porém salienta que as RNAs podem se adaptar mais facilmente a situação.

Magalhães (2010) em sua tese de doutorado desenvolveu técnicas para obter parâmetros modais a partir de dados de ensaio de vibração. As técnicas desenvolvidas foram aplicadas em duas estruturas, uma cobertura metálica de estádio e uma ponte em arco com comprimento de 371m. Para a aplicação das técnicas foi necessário o tratamento dos dados devido à influência provocada pela variação da temperatura nos mesmos. Este tratamento foi feito através de modelos de regressão linear dinâmica, para estabelecer uma relação entre a variação de temperatura e a frequência modal, com o intuito de desprezar este efeito nas análises. Com a regressão conseguiu valores em que a frequência variou em 5 mili-Hz no período de um ano. Foi percebida apenas uma exceção, no mês de janeiro de 2009, quando neveu e temperaturas negativas desencadearam mecanismos não lineares que aumentaram a rigidez da estrutura, gerando assim frequências com valores superiores aos medidos durante o restante do ano.

Jin et al. (2016) estudaram o efeito de mudanças severas na temperatura, variando de 34,76°C à -15,82°C, em uma ponte nos EUA. Utilizaram RNAs com o filtro de Kalman estendido (EKFNN) por estimar sistemas dinâmicos não-lineares e serem capazes de prever processos não estacionários, como a frequência natural. Fizeram considerações para o efeito de congelamento. Para validar o método, realizaram simulações no *software* SAP2000 sugerindo

dois cenários de danos. O método EFKNN mostrou um forte potencial de detecção dos danos em tempo real, o que ajuda na gestão e manutenção da ponte.

Kostić e Gül (2017) propuseram localizar dano utilizando as acelerações e temperatura da estrutura utilizando uma RNA. Construíram um modelo numérico no *software* SAP2000 da passarela estudada por Moser e Moaveni (2011) localizada em Medford, para aplicação do método. A RNA foi construída no *software* Matlab através do pacote *Neural Network Toolbox*, e possui múltiplas camadas com algoritmo de treinamento *backpropagation*, função de ativação tangente-hiperbólica e 10 neurônios na camada oculta. Foi fornecida a rede como dado de entrada três temperaturas: da laje de concreto, das vigas metálicas que apoia a laje e dos demais elementos. E como dado de saída a rede forneceu a aceleração dos 16 acelerômetros distribuídos ao longo da passarela, na Figura 2.6 é apresentada a posição onde esses acelerômetros foram instalados. A localização do dano foi feita a partir da aplicação do método ARX, proposto por Gül e Çatbas (2011) *apud* Kostić e Gül (2017), nos dados de saída fornecidos pela RNA, onde a região que apresentasse dano teria os canais próximos com valores superiores aos não danificados.

Foram simulados cinco cenários de danos e com o objetivo de abranger casos reais, onde os dados podem apresentar uma pequena variação, testou a combinação da RNA com o método ARX incidindo um ruído gaussiano branco de 0%, 1%, 3% e 5% nos dados dos 5 cenários de dano criados. Pode-se afirmar que a localização do dano correu de forma eficaz, uma vez que para todos os cenários de dano criados o método conseguiu determinar a região danificada. Vale ressaltar que quanto maior o ruído menor foi a diferença entre os resultados dos canais, ou seja, dados com ruídos superiores a 5% o método pode não ser eficaz.

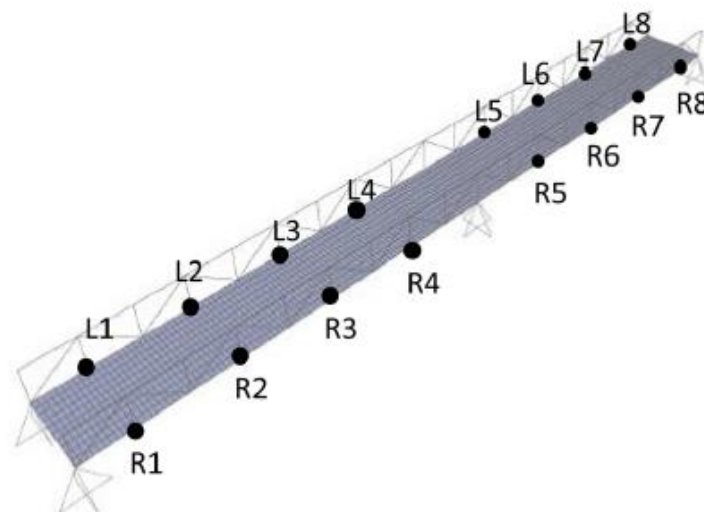


Figura 2.6. Localização dos acelerômetros na passarela (Kostić e Gül, 2017)

Gu *et al.* (2017) propuseram detectar e quantificar dano utilizando frequências naturais em uma RNA auto-assosiativa assimétrica, estando a estrutura sob diferentes temperaturas, com o objetivo que a RNA identificasse as alterações geradas pela presença do dano ou da temperatura nas frequências. Como dado de entrada para o treinamento da RNA foram utilizadas as frequências e temperatura da estrutura, e como dado de saída apenas as frequências, configurando assim uma RNA auto-assosiativa assimétrica. O método foi aplicado em duas estruturas, uma viga bi-apoiada e um pórtico tridimensional, ambos metálicos, na Figura 2.7 consta essas duas estruturas.

Com relação à viga, o treinamento da rede foi feito com 1000 modelos numéricos. Os modelos foram criados a partir de três configurações, a viga intacta e com duas intensidades de dano, e essas três configurações foram submetidas a temperaturas entre -15° e 50°C . Como dado de entrada foi fornecido as 6 primeiras frequências mais a temperatura, e a rede forneceu como dado de saída 6 frequências. Para o pórtico também foram criados 1000 modelos, porém com cinco configurações, o pórtico intacto e mais quatro intensidades de dano, submetidos a temperaturas entre -15° e 50°C . Como dado de entrada utilizaram as 10 primeiras frequências mais duas temperaturas (temperaturas da ligação viga-pilar dos pilares centrais), e como dado de saída a rede forneceu 10 frequências. Em ambos os testes foi possível determinar a existência ou não de dano e sua gravidade. A presença do dano foi determinada a partir da diferença entre as frequências fornecidas como dado de entrada, com as frequências obtidas nos dados de saída, e quanto maior a diferença mais grave era o dano.

Por fim, o método foi aplicado nos dados contendo ruído de 1% e 5%. Nas duas estruturas com os cenários com ruído também foi possível identificar a existência de dano e sua intensidade, mostrando que o método é eficaz com dados imprecisos.

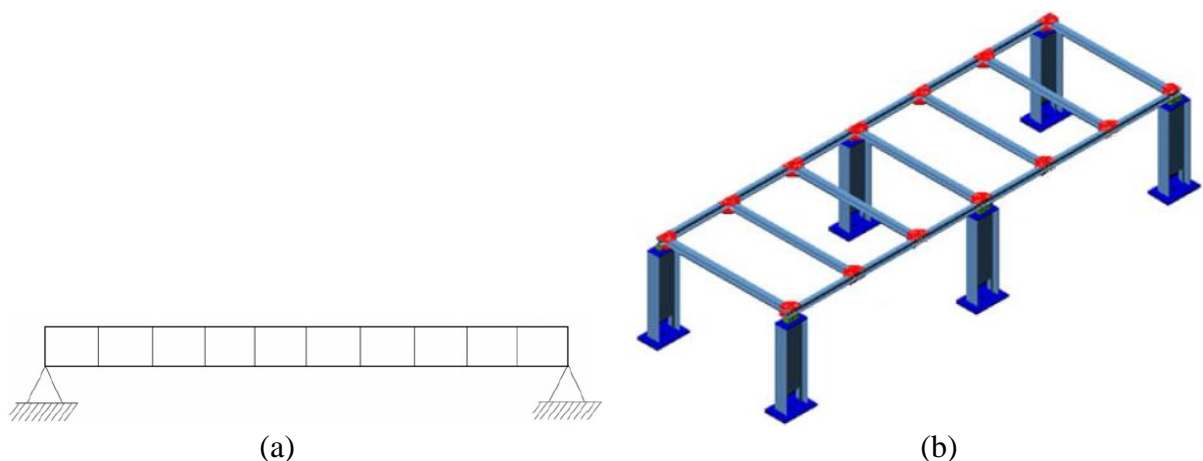


Figura 2.7. Estruturas onde o método proposto por Gu *et al.* (2017) foi aplicado (a) Viga bi-apoiada (b) Pórtico tridimensional

Com base nos trabalhos mencionados notou-se que as RNAs veem apresentando um bom desempenho, ao serem utilizadas com o objetivo de detectar, localizar e/ou quantificar dano. Paralelo a isto, foi observada que, no caso de estruturas usuais, a temperatura é um fenômeno que deve ser considerado, já que pode interferir no método de avaliação de dano.

Diante deste cenário as RNAs serão utilizadas para, inicialmente, localizar dano sem considerar mudanças de temperatura, em uma viga construída em laboratório. Além disto é apresentado como a temperatura modifica nos parâmetros modais, frequência e modo de vibração, juntamente com o desempenho da técnica de RNA diante do fenômeno da temperatura. E por fim, é verificado se as mudanças nos parâmetros modais, gerados pela temperatura, influencia na localização do dano.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho é estudada a influência que a variação da temperatura provoca no método de avaliação de dano baseado nas características dinâmicas da estrutura, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA).

Uma vez que a presença de dano em uma estrutura provoca perda de rigidez localizada, o que conseqüentemente gera alterações nas propriedades dinâmicas, inicialmente são apresentadas formulações para a realização de uma análise modal. A partir da análise modal é possível determinar as frequências naturais e modos de vibração da estrutura.

Além da análise modal, também será apresentado como foi feita a consideração da alteração provocada pela temperatura na geometria da viga e no Módulo de Elasticidade. E por fim, um breve conceito sobre as RNAs é apresentado, tendo como ênfase a utilizada neste trabalho.

3.1. ANÁLISE MODAL

A análise modal foi feita de duas formas. Primeiramente considerando um sistema contínuo, onde se obteve a formulação analítica para o cálculo dos modos e frequências de vibração de uma viga, elemento estrutural estudado neste trabalho. Em segundo lugar, considerando um sistema discreto, utilizando a equação que governa o comportamento dinâmico, para obter as formulações utilizadas numericamente para a obtenção das frequências naturais, modos naturais de vibração, razão de amortecimento.

3.1.1. Obtenção das características dinâmicas como sistema contínuo

Na Figura 3.1 (a) encontra-se a representação de uma viga bi-apoiada submetida a um carregamento dinâmico, onde $EI(x)$ e $m(x)$ representam a rigidez e a massa em função da posição, respectivamente, e $p(x, t)$ a carga dinâmica aplicada, dependente da posição e tempo. A partir da análise de um elemento infinitesimal desta viga, Figura 3.1 (b), é possível obter formulações relacionadas com as frequências naturais e modos de vibração, como será apresentado a seguir.

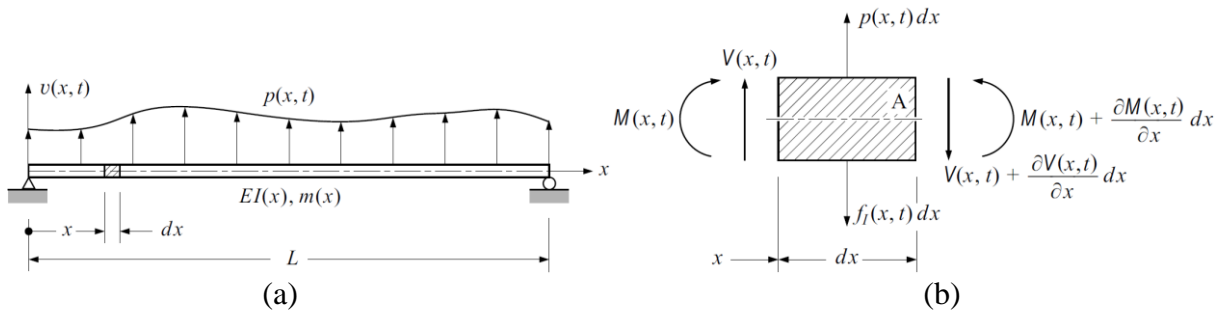


Figura 3.1. (a) Viga bi-apoiada submetida à um carregamento dinâmico (b) Elemento infinitesimal com os esforços internos (Clough e Penzien, 2003)

Equilíbrio de Forças:

$$V(x, t) + p(x, t)dx - \left[V(x, t) + \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} dx \right] - f_i(x, t)dx = 0 \quad (3.1)$$

Onde: $V(x, t)$ é a força cortante que atua na seção;

$p(x, t)dx$ é a força externa aplicada no elemento infinitesimal de tamanho dx ;

$\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} dx$ é a variação da força cortante;

$f_i(x, t)dx$ representa a força de inércia, calculada como o produto da massa pela aceleração, ou seja, $f_i(x, t)dx = m(x)dx \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2}$;

$v(x, t)$ representa o deslocamento em função da posição e do tempo;

Substituindo a expressão da força de inércia e fazendo algumas simplificações encontra-se que:

$$\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = p(x, t) - m(x) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.2)$$

Equilíbrio de Momentos em A (desprezando os termos de ordem superior):

$$M(x, t) + V(x, t)dx - \left[M(x, t) + \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} dx \right] = 0 \quad (3.3)$$

$$V(x, t) = \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} \quad (3.4)$$

Onde: $M(x, t)$ é o momento atuante na seção considerada;

$\frac{\partial M(x, t)}{\partial x} dx$ é a variação do momento;

Substituindo a equação (3.4) em (3.2) temos que:

$$\frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + m(x) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = p(x, t) \quad (3.5)$$

Lembrando que a relação momento-curvatura é dada por $M = EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ e considerando $m(x) = \bar{m}$, a equação (3.5) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = p(x, t) \quad (3.6)$$

Para se obter as frequências naturais e modos de vibração deve ser realizada uma análise em vibração livre, ou seja, $p(x, t) = 0$.

$$v^{iv}(x, t) + \frac{\bar{m}}{EI} \ddot{v}(x, t) = 0 \quad (3.7)$$

A solução da equação diferencial (3.7) pode ser obtida através da separação de variáveis, considerando $v(x, t) = \phi(x)Y(t)$. Indicando que o movimento em vibração livre possui uma forma $\phi(x)$ e uma amplitude dependente do tempo $Y(t)$. Substituindo essa relação em (3.7), chega-se a:

$$\phi^{iv}(x) \cdot Y(t) + \frac{\bar{m}}{EI} \phi(x) \cdot \ddot{Y}(t) = 0 \quad (3.8)$$

É possível isolar as variáveis que dependem de x em um lado da igualdade e as variáveis que dependem de t no outro, apresentado em (3.9). Uma forma de resolver a equação (3.9), de modo que possa ser satisfeita por quaisquer valores de x e t , é cada lado da igualdade ser igual a uma mesma constante, que por conveniência matemática será adotado a^4 .

$$\frac{\phi^{iv}(x)}{\phi(x)} = -\frac{\bar{m} \ddot{Y}(t)}{EI Y(t)} = a^4 \quad (3.9)$$

A expressão (3.9) dará origem a duas equações diferenciais, apresentadas em (3.10) e (3.11).

$$\ddot{Y}(t) + \omega^2 Y(t) = 0 \quad (3.10)$$

$$\phi^{iv}(x) - a^4 \phi(x) = 0 \quad (3.11)$$

Onde $\omega^2 = \frac{a^4 \cdot EI}{\bar{m}}$, que representa o quadrado da frequência em 'rad/s'.

A equação (3.10) representa os deslocamentos em função do tempo, e apresenta como solução a função apresentada em (3.12), onde $Y(0)$ e $\dot{Y}(0)$ são o deslocamento e velocidade inicial da estrutura. A equação (3.11) representa os modos de vibração, e tem como solução a função apresentada em (3.13).

$$Y(t) = Y(0)\cos\omega t + \frac{\dot{Y}(0)}{\omega}\text{sen}\omega t \quad (3.12)$$

$$\phi(x) = A_1\cos(ax) + A_2\text{sen}(ax) + A_3\cosh(ax) + A_4\text{senh}(ax) \quad (3.13)$$

A partir das condições de contorno da viga é possível determinar os valores das constantes A_1, A_2, A_3 e A_4 da equação (3.13), e conseqüentemente sua forma modal. Com isso, a constante a também será conhecida, o que possibilita o cálculo da frequência natural ω . Este procedimento foi realizado para o cálculo analítico das frequências e modos da viga intacta.

3.1.2. Obtenção das características dinâmicas de um sistema discreto

A partir da equação que governa o comportamento dinâmico, é possível resolver o problema clássico de autovalores e autovetores, e obter as frequências de vibração e deformadas modais de um sistema.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3.14)$$

Na equação (3.14) é apresentada a equação dinâmica para um sistema de múltiplos graus de liberdade (Clough e Penzien, 2003). Onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema. E $\ddot{\mathbf{y}}(t)$, $\dot{\mathbf{y}}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ e $\mathbf{F}(t)$ são, respectivamente, os vetores de aceleração, velocidade, deslocamento e forças externas do sistema.

As matrizes de massa (\mathbf{M}) e rigidez (\mathbf{K}) dependem das propriedades dos materiais e geométricas da estrutura, e a matriz de amortecimento (\mathbf{C}) normalmente é obtida a partir de uma combinação entre as matrizes de massa e rigidez.

Clough e Penzien (2003) apresentam a análise modal assumindo que a estrutura encontra-se em vibração livre não amortecida, já que o amortecimento influencia pouco nos valores das frequências e deformadas modais. Assim, a equação (3.14) pode ser simplificada por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = 0 \quad (3.15)$$

A equação diferencial (3.15) apresenta como solução:

$$y(t) = A \sin(\omega t + \theta) \quad (3.16)$$

Onde: A é o vetor que representa os modos de vibração do sistema associado a ω ;

ω é a frequência natural do sistema;

θ é o ângulo de fase.

Substituindo a equação (3.16) na equação (3.15), tem-se:

$$\mathbf{M}[-A\omega^2 \sin(\omega t + \theta)] + \mathbf{K}[A \sin(\omega t + \theta)] = 0 \rightarrow A[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] = 0 \quad (3.17)$$

Multiplicando a equação (3.17) pelo inverso da matriz de massa (\mathbf{M}^{-1}), tem-se:

$$A[\mathbf{D} - \omega^2 \mathbf{I}] = 0 \quad (3.18)$$

Onde: $\mathbf{D} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}$

A equação (3.18) representa o problema clássico de valores próprios de um sistema linear de n equações com A e ω^2 desconhecidos, sendo n o número total de graus de liberdade do sistema. A solução não trivial da equação (3.18) é obtida quando o determinante da matriz que acompanha o vetor A é igual a zero, ou seja,

$$|\mathbf{D} - \omega^2 \mathbf{I}| = 0 \quad (3.19)$$

A expansão da equação (3.19) resulta em um polinômio de grau n para a variável ω^2 , conhecida como equação característica do sistema. A solução do polinômio permite obter n valores para ω^2 , cuja raiz representa as frequências naturais da estrutura. E cada valor de ω^2 quando substituído na equação (3.18) permite obter um vetor A , que correspondera a forma modal associada a frequência de vibração ω .

Este procedimento é utilizado para a determinação das frequências e formas modais da viga intacta e danificada dos modelos numéricos criados.

3.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO MÓDULO DE YOUNG E GEOMETRIA

Segundo Zhou e Yi (2014) a temperatura de uma estrutura real pode ser influenciada pela temperatura do ar, velocidade do vento, umidade ambiente, intensidade da radiação solar, tipo e característica dos materiais, configurações geométricas, condições de contorno e carregamento solicitante. Ou seja, a temperatura é um parâmetro que depende de muitas

variáveis aleatórias, o que provoca uma distribuição não uniforme na estrutura, principalmente nas de grande porte como, por exemplo, pontes com grandes vãos, e por isso deve-se ter cautela na consideração deste fenômeno.

O efeito provocado pela variação da temperatura na geometria é feito de forma linear, considerando que o material utilizado é isotrópico e seu alongamento é proporcional à variação da temperatura em todas as direções. Na equação (3.20) encontra-se representado esta relação, sendo L_0 o comprimento inicial, α o coeficiente de dilatação linear e T a variação de temperatura.

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot T \quad (3.20)$$

Para considerar a mudança provocada pela temperatura no módulo de elasticidade, do aço estrutural, Poh (2001) propôs as formulações (3.21) e (3.22).

$$E = E_0 \left[1 + \frac{T}{c_9 \cdot \ln\left(\frac{T}{c_{10}}\right)} \right] \quad \text{quando } 0^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C} \quad (3.21)$$

$$E = E_0 \left(\frac{c_{11} - c_{12}T}{T - c_{13}} \right) \quad \text{quando } 600^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \quad (3.22)$$

Onde: $c_9 = 2000$; $c_{10} = 1100$; $c_{11} = 690$; $c_{12} = 0,69$; $c_{13} = 53,5$;

E_0 é o módulo de elasticidade ensaiado em uma temperatura conhecida;

T é a variação da temperatura a partir da temperatura conhecida utilizada em E_0 .

Segundo Xia *et al.* (2012) o coeficiente de expansão térmica linear do aço ($1,1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) é cerca de dez vezes menor que o coeficiente térmico do módulo de elasticidade ($-3,6 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), ou seja, o Módulo de Young possui uma influência mais significativa nas mudanças da rigidez, devido à variação da temperatura que a geometria, já que os coeficientes térmicos são maiores.

3.3. REDE NEURAL ARTIFICIAL

Rede Neural Artificial (RNA) é uma técnica computacional, onde um processador é distribuído paralelamente e composto de unidades simples de processamento (neurônios artificiais), com capacidade de armazenar conhecimento (Haykin, 2005). Essas unidades são dispostas em camadas e associadas a pesos. Os pesos conferem à RNA a capacidade de armazenar o

conhecimento, o que possibilita à rede reconhecer e classificar padrões, viabilizando o aprendizado do comportamento do problema em estudo.

A RNA foi construída tendo como inspiração o neurônio humano, célula especializada na transmissão de informações através de impulsos elétricos, (Figura 3.2 (a)). O neurônio é constituído de três partes, os *dendritos*, prolongamentos do corpo celular que possuem como objetivo receber as mensagens transmitidas por outros neurônios, a *soma ou corpo celular*, centro metabólico do neurônio, responsável por receber, processar e enviar informações, e o *axônio*, prolongamento responsável por transmitir o impulso nervoso processado no corpo celular. Sendo o fenômeno de transmissão das informações de um neurônio para outro conhecido como sinapse.

O primeiro modelo de neurônio artificial foi proposto por Warren McCulloch e Walter Pitts em 1943 (Braga *et al.*, 2000) chamado de MCP ou Neurônio Booleano (Figura 3.2 (b)). O modelo proposto por McCulloch e Pitts simula os *dendritos* através de terminais de entrada ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) e o *axônio* por um único canal de saída Y . A *soma ou corpo celular* é representada pelos símbolos Σ e Φ caracterizando o processamento da rede. E o fenômeno da sinapse é representado pelos pesos ($W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$), que associados aos dados de entrada e funções de ativação, tem como função a ativação ou inibição das entradas.

Na Figura 3.2 encontra-se uma representação do neurônio humano e do modelo de neurônio artificial proposto por McCulloch e Pitts em 1943.

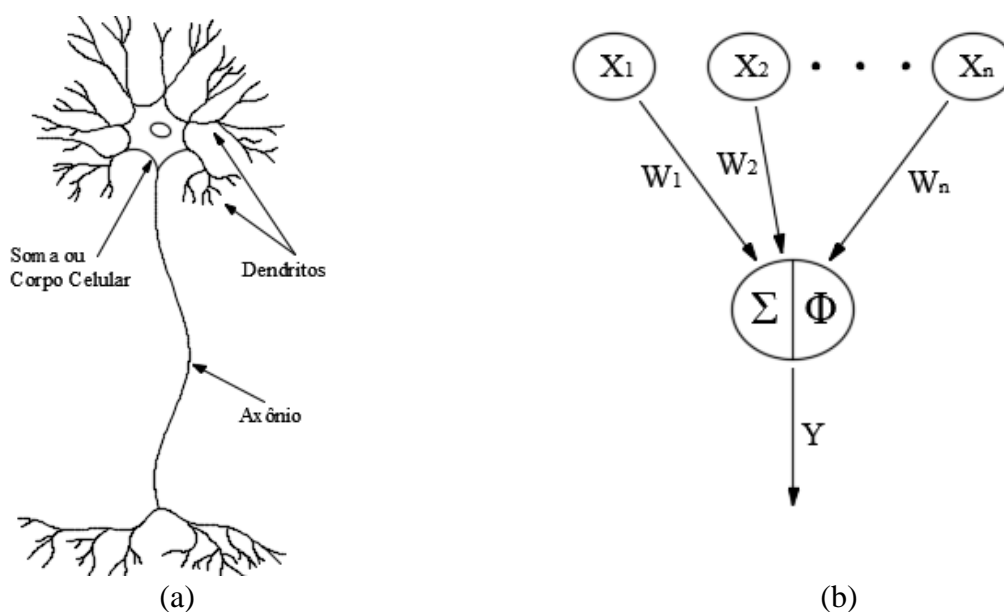


Figura 3.2. (a) Neurônio Humano (b) Modelo do Neurônio Booleano

Existem diversos tipos de RNAs, e estas, simplificada, podem ser classificadas segundo a forma de aprendizado, arquitetura e funções de ativação utilizadas. A Figura 3.3 contém essa classificação simplificada das RNAs com algumas subclassificações, que serão explicadas com mais detalhes a seguir.

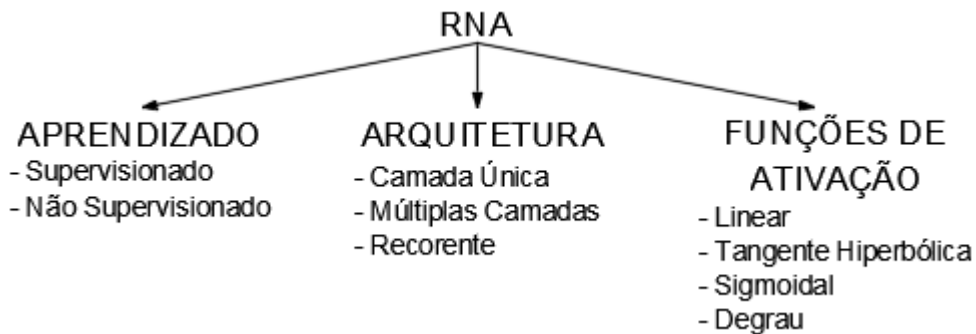


Figura 3.3. Classificação simplificada das RNAs

Forma de Aprendizagem:

A forma de aprendizagem diz respeito à macroestrutura da rede, onde se determina a forma como a RNA será treinada, basicamente como os parâmetros (pesos) da rede serão ajustados. As formas de treinamento das redes podem ser divididas em dois grupos principais: o aprendizado supervisionado e o não-supervisionado.

Aprendizado supervisionado

Treinamento com um supervisor externo que conhece as entradas (Input) e a saída desejada da rede (Target). Este supervisor é encarregado de analisar as saídas determinadas pela rede (Output) e comparar estas com as saídas desejadas. A partir desta comparação é feita uma atualização dos pesos, por meio de um algoritmo, com o objetivo de minimizar o erro entre essas saídas (Target e Output).

Aprendizado não supervisionado

Ao contrário do treinamento anterior, as redes com aprendizagem não supervisionado não possuem um supervisor externo com o conhecimento das saídas desejadas (Target). O aprendizado é feito a partir de padrões nos dados de entrada fornecidos para o treinamento. Logo, as redes com aprendizado não supervisionado precisam apresentar regularidade e lógica nos dados de entrada.

Arquitetura:

A arquitetura corresponde à mesoestrutura da rede, e está relacionada com a forma como os neurônios são organizados e tipo de conexão entre eles. A forma de organizar os neurônios está relacionada com a quantidade de camadas da rede, podendo ser rede de camada única ou múltiplas camadas. E o tipo de conexão com a alimentação da rede, se a RNA percorre apenas uma direção é dita como alimentada para frente, *feedforward*, e se os dados de saída são utilizados para realimentar a RNA é dita como recorrente, *feedback* (Braga *et al.*, 2000).

Rede *Feedforward* com camada única

Como mencionado, se trata de uma rede composta por uma única camada (camada de saída) com alimentação para frente (*feedforward*). A camada de entrada simboliza os dados que serão fornecidos para o treinamento da rede e a camada de saída os resultados obtidos após o processamento. Este tipo de rede encontra-se representada na Figura 3.4, onde é possível observar uma camada de entrada (X_1, X_2, \dots, X_n) e uma camada de saída (Y_1, Y_2, \dots, Y_n), com o sentido de processamento dos dados de entrada para os de saída ($X_k \rightarrow Y_i$).

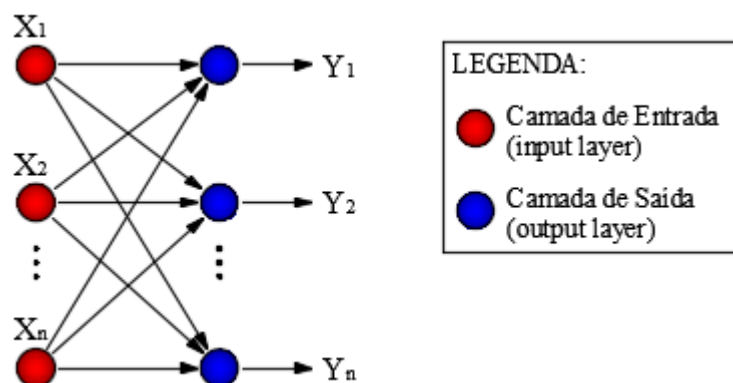


Figura 3.4. Rede *Feedforward* com camada única (Haykin, 2005 adaptada)

Este tipo de configuração, pode apresentar dificuldades na solução de problemas complexos devido à existência de uma única camada para o processamento.

Rede *Feedforward* com múltiplas camadas

Esta rede é composta por múltiplas camadas (camadas ocultas e camada de saída) com alimentação para frente (*feedforward*). Este tipo de rede encontra-se representada na Figura 3.5, onde é possível observar a camada de entrada (X_1, X_2, \dots, X_n), camada intermediária (representada na cor verde) e a camada de saída (Y_1, Y_2, \dots, Y_n), com o sentido de processamento dos dados de entrada para os de saída ($X_k \rightarrow Y_i$).

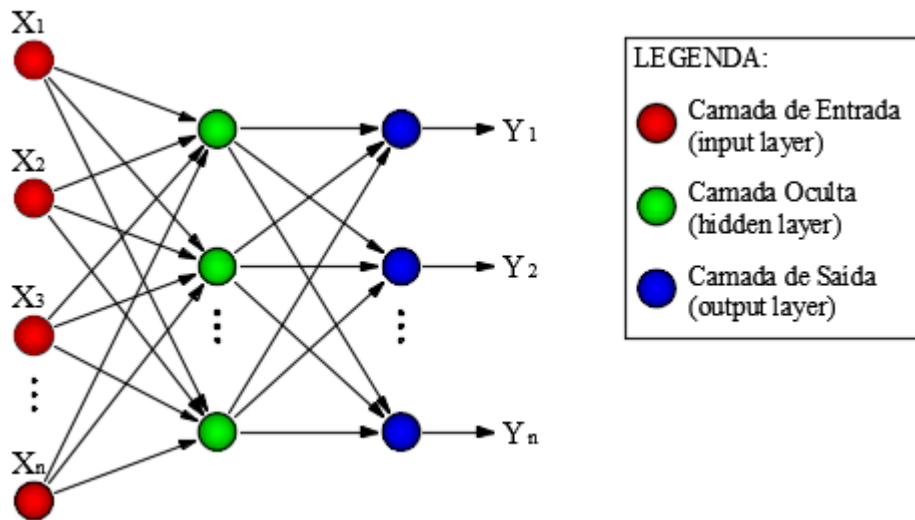


Figura 3.5. Rede Feedforward com múltiplas camadas (Haykin, 2005 adaptada)

A existência das camadas intermediárias proporciona à RNA a capacidade de resolver problemas mais complexos que a rede anterior, de camada simples.

Rede recorrente

A configuração deste tipo de rede é semelhante à rede com múltiplas camadas, ou seja, é composta por camada de entrada, camadas ocultas e camada de saída. A diferença está na forma de alimentação, a rede utiliza os dados de saída como dados de entrada para a camada antecedente, e este fenômeno é chamado de recorrência. É possível visualizar este tipo de rede na Figura 3.6.

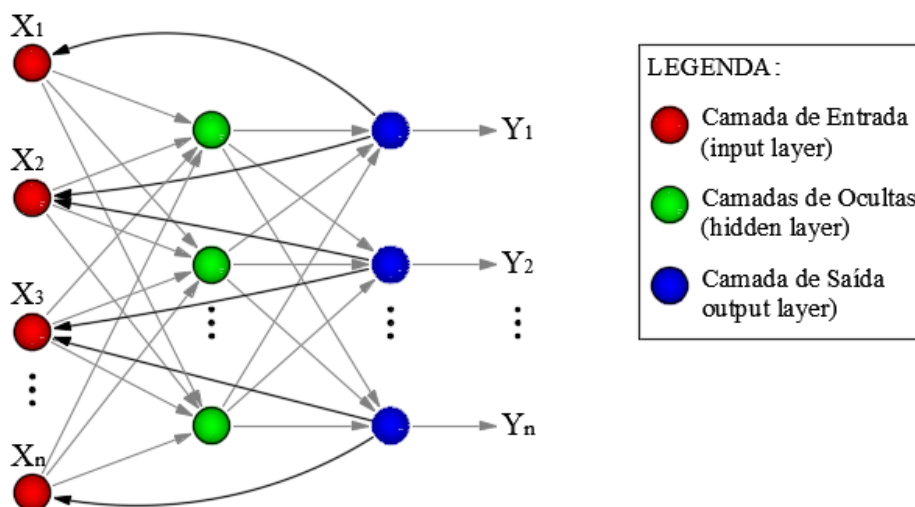


Figura 3.6. Rede recorrente (Haykin, 2005 adaptada)

Este tipo de rede é, geralmente, utilizado em problemas que envolvem previsões de eventos futuros.

Função de Ativação:

Por fim, a função de ativação, que representa a microestrutura da rede, está relacionada com o processamento da rede e é responsável por gerar as saídas dos neurônios. Os dados de entrada são combinados com os pesos e inseridos em uma função de ativação, o resultado representa a saída do neurônio. A seguir, na Figura 3.7, encontra-se alguns exemplos de funções de ativação.

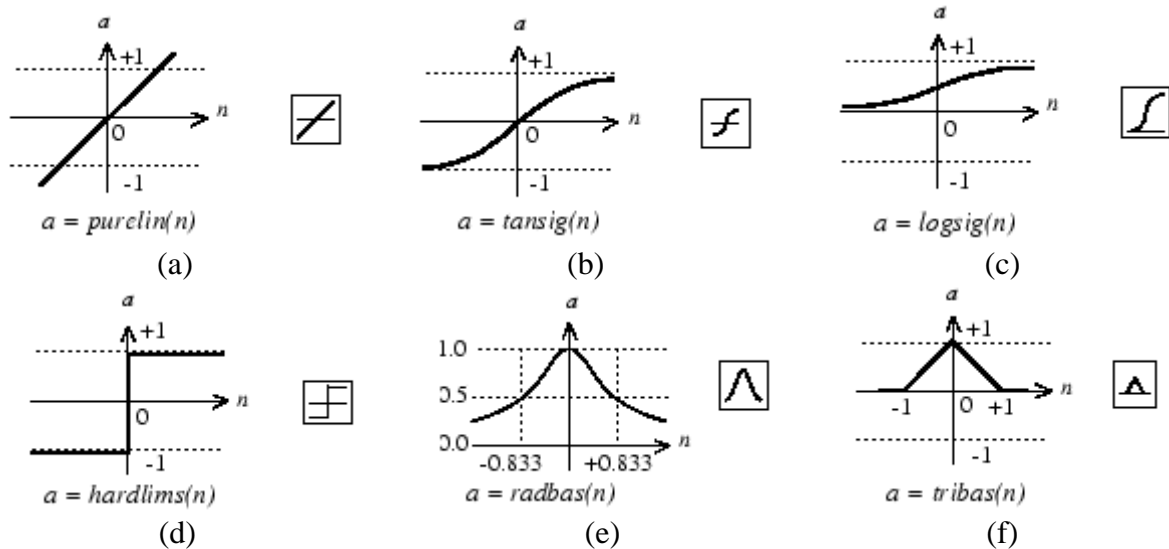


Figura 3.7. Exemplos de funções de ativação (a) Função Linear (b) Função Tangente-Hiperbólica (c) Função Sigmóide (d) Função Degrau (e) Função “Radial basis” (f) Função Triangular (MatLab, 2016)

Nas equações (3.23) a (3.28) encontra-se as funções representadas graficamente na Figura 3.7, onde a equação (3.23) diz respeito à Função Linear (Figura 3.7(a)), a equação (3.24) corresponde à Função Tangente-Hiperbólica (Figura 3.7(b)), a equação (3.25) refere-se à Função Sigmóide (Figura 3.7(c)), e assim sucessivamente.

$$a = n \quad (3.23)$$

$$a = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \quad (3.24)$$

$$a = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (3.25)$$

$$a = \begin{cases} +1, & \text{se } n \geq 0 \\ -1, & \text{se } n < 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

$$a = e^{-n^2} \quad (3.27)$$

$$a = \begin{cases} 1 - |n|, & \text{se } -1 \leq n \leq 1 \\ 0, & \text{se } n < -1 \text{ ou } n > 1 \end{cases} \quad (3.28)$$

No caso das redes neurais com aprendizado supervisionado, utilizadas neste trabalho, é necessário fornecer à rede um conjunto de dados, tendo dados de entrada (input) e dados de saída desejável (target). Para garantir um bom desempenho deste tipo de rede, este conjunto de dados é dividido em três grupos, treinamento, validação e generalização ou teste.

- O treinamento, como mencionado anteriormente, está relacionado com a forma de aprendizado da rede, onde é feita a atualização dos pesos comparando as saídas calculadas pela rede (output) com as fornecidas (target). Esta etapa será mais detalhada a seguir.
- A validação ocorre após a atualização dos pesos, ou seja, o treinamento, e tem como objetivo avaliar a capacidade de reprodução da RNA. São fornecidos à rede apenas os dados de entrada e o erro entre as saídas (output com target) são utilizados como um parâmetro para continuar ou interromper o treinamento. Nesta etapa os pesos não são atualizados.
- A generalização consiste em um teste/avaliação da rede, onde, assim como na validação, são fornecidas à RNA apenas os dados de entrada, contudo esta fase não tem efeito na construção da rede, apenas verifica-se a habilidade da mesma em prever o problema em estudo.

Cada atualização dos pesos é definida como interação ou ciclo, e essas três etapas são realizadas sucessivamente até que o erro entre as saídas encontradas e desejadas seja um valor mínimo aceitável. Na Figura 3.8 encontra-se um fluxograma deste processo.

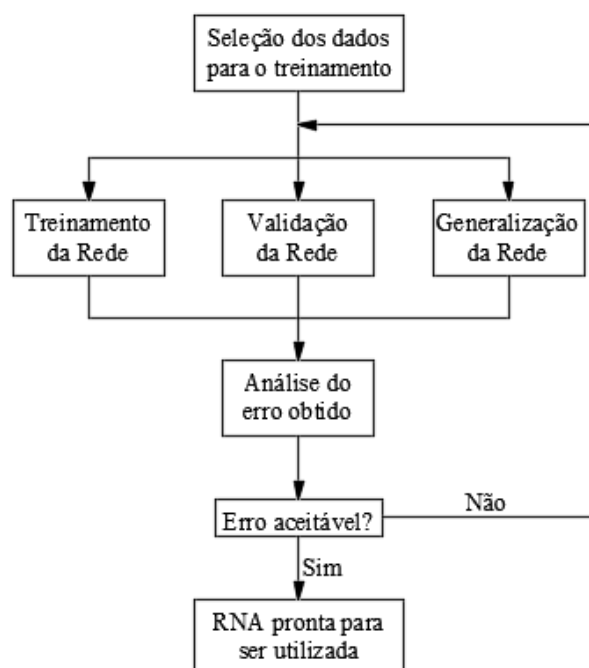


Figura 3.8. Etapas para o treinamento de uma RNA

3.3.1. Rede *Multilayer Perceptron*

Quinze anos após a proposta de Warren McCulloch e Walter Pitts do neurônio Booleano, Rosenblatt propôs a rede *Perceptron*, o primeiro modelo de rede com aprendizado supervisionado. Basicamente, consiste em um único neurônio com pesos e direções sinápticas ajustáveis. Contudo este modelo só era capaz de resolver problemas linearmente separáveis, uma vez que só tinha um neurônio. A fim de contornar esta limitação sugeriu-se agrupar vários neurônios em diferentes camadas, ficando essa configuração conhecida como *Multilayer Perceptron* (MLP) ou, *Perceptron* de múltiplas camadas.

Na Figura 3.9 é representada a rede *Multilayer Perceptron* com as camadas propostas: uma camada de entrada, uma camada de saída e uma ou mais camadas intermediárias.

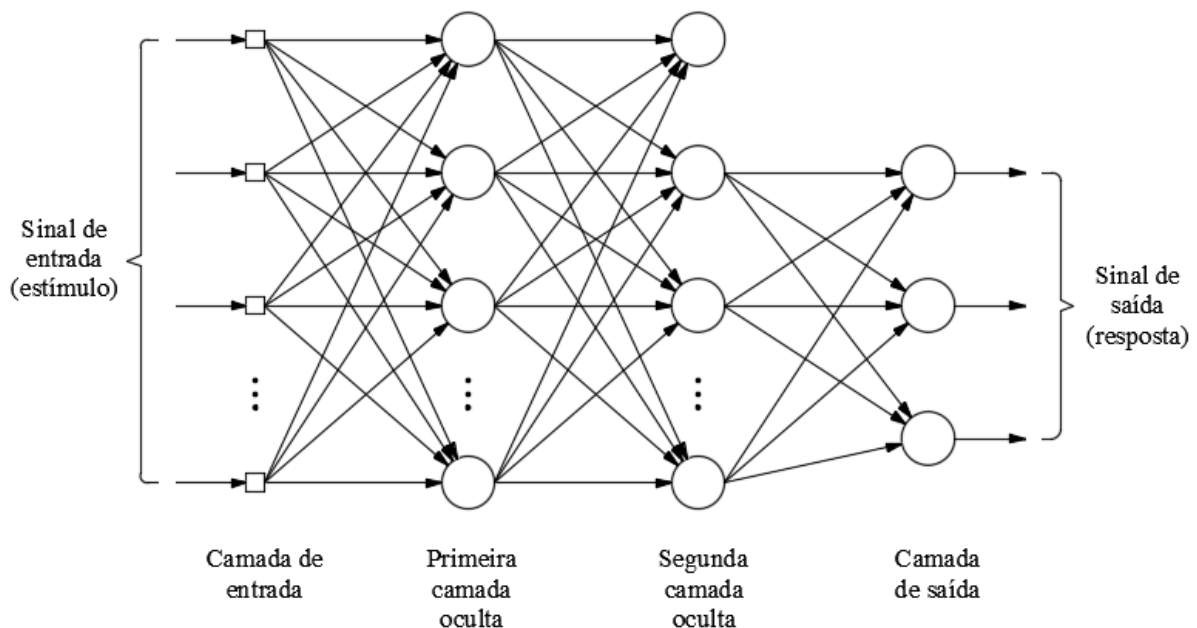


Figura 3.9. Configuração de uma rede *Multilayer Perceptron* com uma camada de entrada, uma de saída e duas ocultas e com vários neurônios por camadas (Haykin, 2005)

Optou-se por trabalhar com este tipo de rede, MLP, devido à disposição de vários neurônios por camada conferir a rede maior capacidade de generalizar e solucionar problemas mais complexos e de forma mais rápida que as redes de camada única.

3.3.1.1. Treinamento da Rede *Backpropagation*

O diferencial das RNAs está em sua capacidade de adquirir conhecimento a partir de informações externas. E para tal feito ser possível, a rede deve passar por uma etapa de

treinamento. Como já dito, esta etapa consiste basicamente no ajuste dos pesos que ligam as camadas. Este ajuste é feito de forma iterativa até obter um erro classificado como aceitável para garantir que o aprendizado foi satisfatório. O processo iterativo do ajuste dos pesos é feito a partir de algoritmos de aprendizado, que se adaptam a cada tipo de problema.

O algoritmo de aprendizado *backpropagation* ou retropropagação, proposto por Rumelhart *et al.* (1986) *apud* Marcy (2017), é uma regra de aprendizado supervisionado, cujo objetivo é minimizar os erros por meio da correção dos pesos entre as conexões dos neurônios.

O treinamento com este algoritmo se dá em duas fases, a fase *forward* e a fase *backward*. Na Figura 3.10 encontra-se uma representação destas fases, sendo a fase *forward* responsável pelo cálculo das saídas com base nos dados de entrada, e a fase *backward* responsável por atualizar os pesos com base no erro entre as saídas calculadas e as saídas fornecidas.

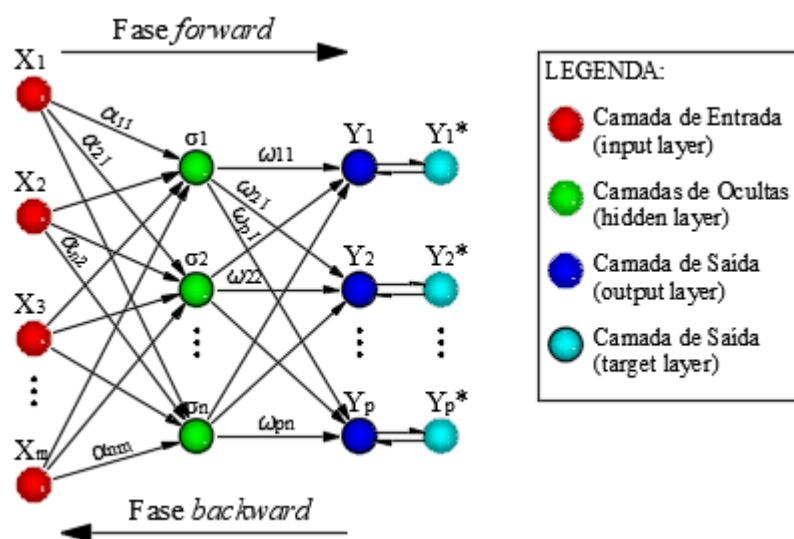


Figura 3.10. Fases do treinamento da RNA com o algoritmo *Backpropagation*

Na Figura 3.10 está representada uma rede neural com ‘ m ’ neurônios na camada de entrada (chamados de X_k), ‘ n ’ neurônios na camada oculta (chamados de σ_j), ‘ p ’ neurônios na camada de saída (chamados de Y_i). Pesos α_{jk} (entre a camada de entrada e a camada intermediária) e ω_{ij} (entre a camada intermediária e camada de saída).

De forma simplificada, o treinamento da rede com o algoritmo *backpropagation* inicia com a definição aleatória dos pesos seguida pela definição da quantidade máxima de ciclos e o erro máximo aceitável entre as saídas. Até atingir um erro inferior ao máximo aceitável ou a realização do número de ciclos, são definidas as saídas da rede, através da fase *forward*. Estas

saídas produzidas (output) são comparadas com as saídas desejadas (target) e os pesos são atualizados, através da fase *backward*.

Fase Forward

São fornecidos à rede um conjunto de dados com Z padrões de dados de entrada. Cada padrão diz respeito a um vetor com X características diferentes (cor vermelha na Figura 3.10). Para cada vetor X também é fornecido à rede um vetor Y^* representando a saída desejada daquele padrão.

Para o cálculo de cada neurônio da camada oculta (σ_j) são utilizadas as funções de ativação, escolhidas no início do treinamento, os pesos iniciais α_{jk} , estabelecidos aleatoriamente, e cada valor X_k do vetor X . σ_j pode ser calculado como apresentado na equação (3.29)

$$\sigma_j = f \left(\sum_{k=1}^m X_k \alpha_{jk} \right) \quad (3.29)$$

O cálculo dos neurônios de saída (Y_i) segue a mesma lógica, mas agora a camada de entrada que antes era o vetor X será o vetor σ e os pesos serão ω_{ij} . Sendo assim,

$$Y_i = f \left(\sum_{j=1}^n \sigma_j \omega_{ij} \right) \quad (3.30)$$

Os valores encontrados para os neurônios de saída Y_i são, então, subtraídos dos valores desejados já conhecidos Y_i^* , ou seja, o erro ‘ e ’ para cada vetor X fornecido como dado de entrada é obtido por:

$$e = Y_i^* - Y_i \quad (3.31)$$

Este procedimento é realizado para todos os Z padrões de entrada e o cálculo do erro total da rede ‘ E ’ é feito da seguinte forma:

$$E = \frac{1}{Z} \sum_{V=1}^Z \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^p (e)^2 \right] \quad (3.32)$$

Após calculado o erro total da rede tem-se início a fase *backward*, onde os pesos ω_{ij} e α_{jk} serão atualizados para reduzir este erro.

Fase Backward

Os ajustes dos pesos são feitos a partir do gradiente descendente do erro com relação ao peso (Braga *et al.*, 2000), sendo iniciado pelos pesos entre as camadas de saída e oculta (ω_{ij}).

$$\frac{\partial E}{\omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial \omega_{ij}} \quad (3.33)$$

Substituindo o valor de ‘E’ e ‘e’ apresentado em (3.31) e (3.32) na equação (3.33), tem-se que:

$$\frac{\partial E}{\omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial \omega_{ij}} \quad \therefore \quad \frac{\partial E}{\omega_{ij}} = -\frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z (Y_i^* - Y_i) f' \left(\sum_{j=1}^n \sigma_j \omega_{ij} \right) \sigma_j \quad (3.34)$$

Resolvendo a equação (3.34) a correção dos pesos é dada por:

$$\omega_{ij}^{novo} = \omega_{ij}^{velho} - \mu \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} \quad (3.35)$$

Sendo μ é um fator correspondente ao passo do aprendizado, usado para alcançar a melhor convergência.

Os pesos (α_{jk}) entre a camada oculta e a camada de entrada são atualizados de forma semelhante, equações (3.36), (3.37) e (3.38). Sendo que para a atualização destes pesos não se leva em conta a atualização já realizada nos pesos da camada antecessora (ω_{ij}), ou seja, o erro da camada de saída é propagado para a camada de entrada.

$$\frac{\partial E}{\alpha_{jk}} = \frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z \frac{\partial E}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial \sigma_j} \frac{\partial \sigma_j}{\partial \alpha_{jk}} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial E^2}{\alpha_{jk}} = -\frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z (Y_i^* - Y_i) f' \left(\sum_{j=1}^n \sigma_j \omega_{ij} \right) \omega_{ij} f' \left(\sum_{k=1}^m X_k \alpha_{ij} \right) X_k \quad (3.37)$$

$$\alpha_{jk}^{novo} = \alpha_{jk}^{velho} - \mu \frac{\partial E^2}{\partial \alpha_{jk}} \quad (3.38)$$

Contudo, neste trabalho foi utilizado uma variação do algoritmo *backpropagation*, conhecido como algoritmo *Levenberg-Marquardt backpropagation*. Este algoritmo realiza o ajuste dos pesos com base no método de Newton e as equações (3.35) e (3.38) passam a ser substituídas pela equação (3.39).

$$\varphi^{novo} = \varphi^{velho} - (\mathbf{H} - \tau \mathbf{I})^{-1} \nabla E \quad (3.39)$$

Onde: φ representa os pesos;

H é a Matriz Hessiana;

τ é um fator de ajuste da equação;

∇E é o gradiente do erro calculado anteriormente.

Após todos os pesos serem corrigidos e o valor do erro entre as saídas ter sido aprovado, e as etapas de validação e generalização apresentarem um desempenho satisfatório, a rede pode ser considerada como treinada e está pronta para ser utilizada.

É interessante destacar que alguns fatores podem contribuir para o desempenho da rede. Como por exemplo, o conjunto de dados designado para cada etapa (treinamento, validação e generalização), a representatividade do conjunto de dados utilizados para o treinamento, a quantidade de neurônios da camada oculta, as funções de ativação utilizadas entre cada camada, entre outros. Caso o erro entre as saídas não convirja, fazendo com que a RNA não apresente um bom desempenho, estes fatores podem ser reavaliados de modo a otimizar a rede.

Além disso, diante das análises modais apresentadas pode-se observar que a frequência e modo de vibração dependem fundamentalmente da rigidez e massa da estrutura. Como já mencionado, um dano provoca perda de rigidez localizada e a variação da temperatura interfere no módulo de elasticidade e geometria da estrutura, ou seja, também modifica a rigidez. Com base nisto observa-se como o dano e temperatura influenciam nos referidos parâmetros dinâmicos.

4. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Nesta pesquisa foram utilizados três *softwares*. Primeiramente, o *software* comercial ANSYS (ANSYS, 2016), a fim de se obter as características dinâmicas da viga intacta e danificada. O MatLab (MatLab, 2016) para a criação das Redes Neurais Artificiais (RNA), com o qual será feito o tratamento do conjunto de dados obtidos no ANSYS. E por fim o ARTeMIS Modal (ARTeMIS, 2015) para a análise modal a partir de dados experimentais.

4.1. ANSYS

O ANSYS (2016) utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para modelar numericamente problemas encontrados na engenharia. Ele possui duas extensões, a *Mechanical ANSYS Parametric Design Language*, conhecida como *Mechanical APDL*, e a *Workbench*, utilizada neste trabalho.

Na Figura 4.1 encontra-se a interface da extensão *Workbench*. À esquerda, na seção intitulada “Toolbox”, estão os tipos de análise possíveis de serem realizadas. Foram utilizados três sistemas de análise, apresentados na Figura 4.2.

O sistema “Static Structural” pode ser utilizado para determinar deslocamentos, tensões e deformações a partir de cargas que não induzam efeitos significativos de inércia e amortecimento, como forças e pressões aplicadas externamente, forças inerciais de estado estacionário (como gravidade ou velocidade de rotação), deslocamentos impostos (não nulos) ou temperaturas (para tensão térmica). Já o sistema “Modal” determina as características de vibração (frequências naturais e formas modais) de uma estrutura ou pode servir como ponto de partida para outra análise dinâmica mais detalhada, como uma análise dinâmica transitória, uma análise harmônica ou uma análise de espectro. E por fim, o “Finite Element Modeler” para visualizar as especificações dos elementos finitos usados na modelagem, como por exemplo, quantidade e tipo de elemento.

A primeira etapa a ser realizada nos sistemas “Static Structural” e “Modal” é a definição das propriedades dos materiais que serão utilizados. Esta etapa é feita no módulo *Engineering Data*. Neste módulo são definidas as características dos materiais como, massa específica, coeficiente de Poisson, módulo de Young. Na Figura 4.3 é apresentada a interface do módulo *Engineering Data*.

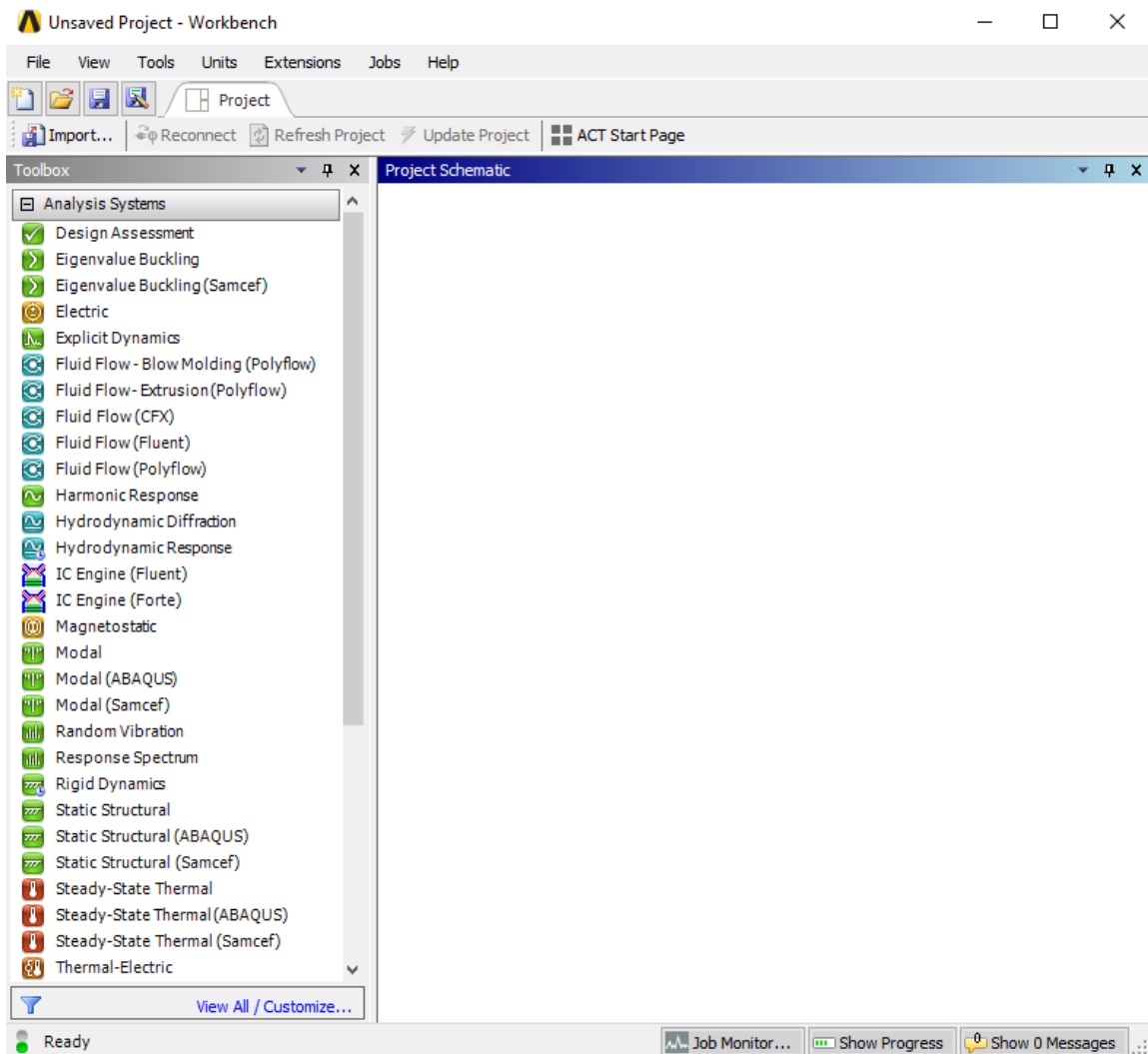


Figura 4.1. Interface do programa ANSYS da extensão *Workbench*

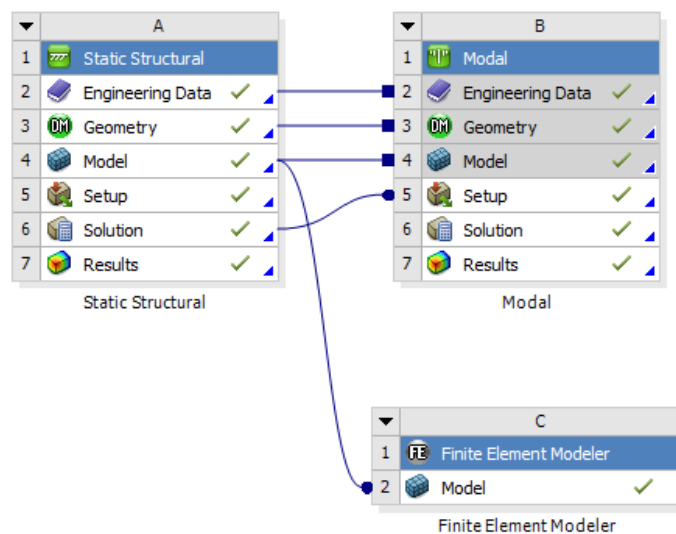


Figura 4.2. Sistemas de análise utilizados, Static Structural, Modal e Finite Element Modeler

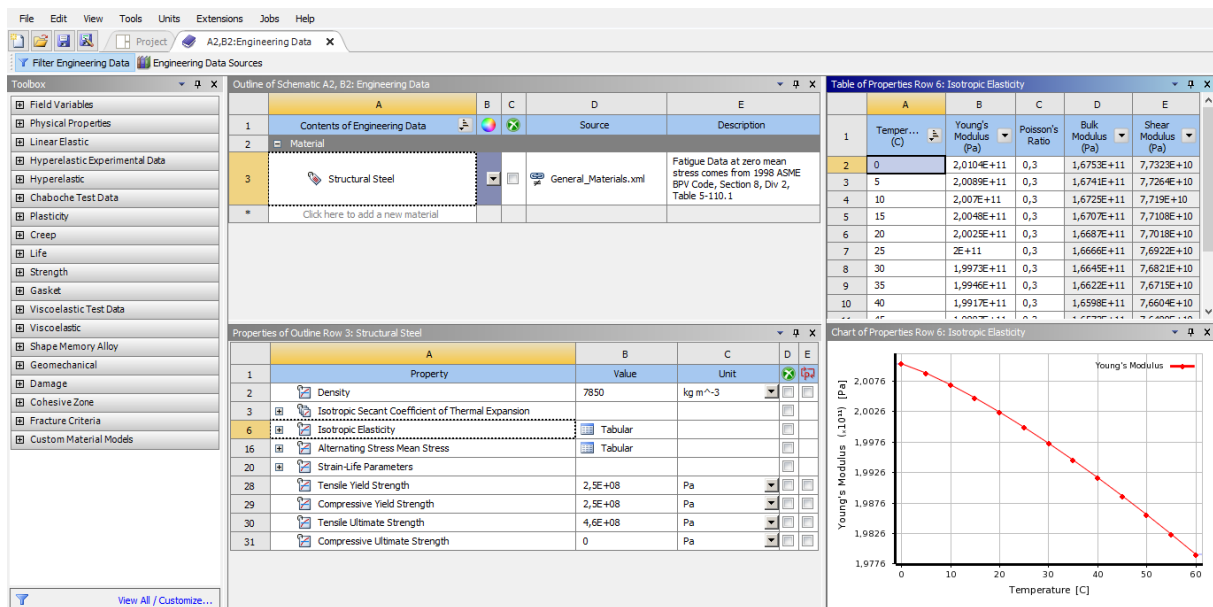


Figura 4.3. Módulo *Engineering Data* com o gráfico Módulo de Elasticidade \times Temperatura

Após definidas as características dos materiais inicia-se a construção do modelo. Esta construção pode ser dividida em 3 etapas: criação da geometria, características da modelagem em elementos finitos e aplicação das condições de contorno naturais e essenciais.

Para a criação da geometria é utilizado o módulo *Geometry*. Esta geometria pode ser construída de duas maneiras, utilizando as ferramentas do próprio programa ou importando-a de outro *software*. Neste trabalho optou-se por importar as geometrias do *software* de desenho AutoCAD, devido à praticidade em se criar os modelos com a seção transversal reduzida, ou seja, das vigas danificadas.

Com relação às características da modelagem dois parâmetros foram observados, a dimensão e tipo de elemento finito. A respeito da dimensão, diferentes tamanhos de elemento podem ser testados, a fim de se verificar a convergência dos resultados. Quanto ao tipo de elemento o programa disponibiliza diversas formas, como por exemplo, '*Quadratic Hexahedron*', prisma quadrangular com 20 nós, e o '*Quadratic Wedge*', prisma triangular com 15 nós. Na Figura 4.4 encontra-se a representação destes dois elementos finitos.

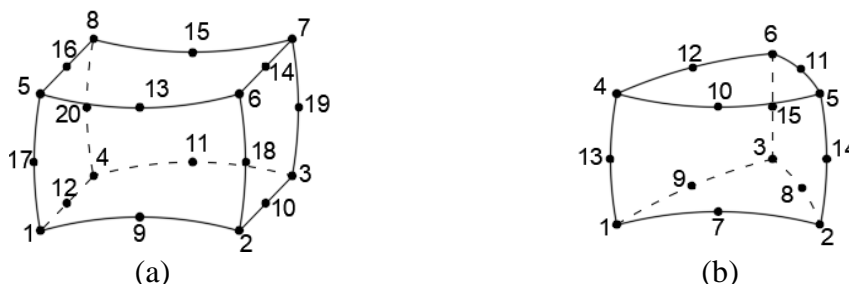


Figura 4.4. (a) Elemento finito Quadratic Hexahedron (b) Elemento finito Quadratic Wedge

Estes elementos são identificados, no sistema de análise “Finite Element Modeler”, como Mesh2000 e se comportam como o Solid185, adequado para modelar estruturas sólidas em 3D. O elemento Solid185 apresenta como principais características a possibilidade de considerar a plasticidade, hiperelasticidade, endurecimento, rigidez, grande deflexão e grande capacidade de deformação (ANSYS, 2016). Além disso, este elemento permite considerar a variação da temperatura, inserindo-a como carregamento, e é um elemento indicado para ser utilizado em regiões irregulares.

Na terceira e última etapa da construção do modelo são inseridos os apoios e carregamentos.

Por fim, após o modelo construído, é feito o processamento e a análise dos resultados. Na Figura 4.5 é apresentado um exemplo dos resultados da análise modal plotado pelo ANSYS, onde se pode visualizar a frequência natural e a forma do modo de vibração.

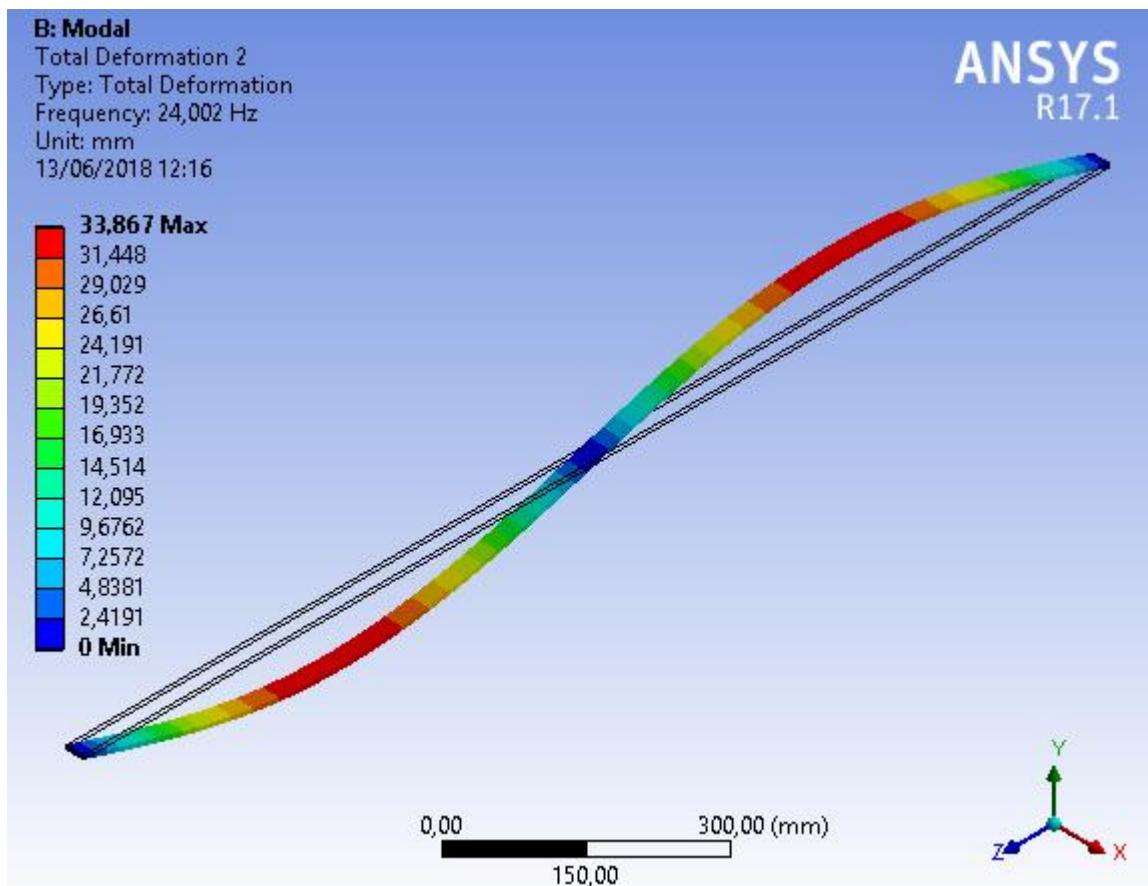


Figura 4.5. Exemplo de resultado apresentado pelo ANSYS *Workbench* após a análise dinâmica

4.2. MATLAB

O programa MatLab (2016) foi utilizado para a criação das RNAs. Este *software* é voltado para o cálculo numérico e possui alguns pacotes e rotinas pré-definidos que facilitam sua utilização. Um desses pacotes é o Neural Network Toolbox™ (nntool) que fornece algoritmos, funções e aplicativos para criar, treinar, visualizar e simular redes neurais (MatLab, 2016).

A partir deste pacote é acessada a janela onde se configuram as RNAs definindo suas características. Nesta janela, apresentada na Figura 4.6, é possível escolher o tipo de rede, e partir dela determinar a função de treinamento, número de camadas, quantidade de neurônios das camadas ocultas e as funções de ativação a serem utilizadas.

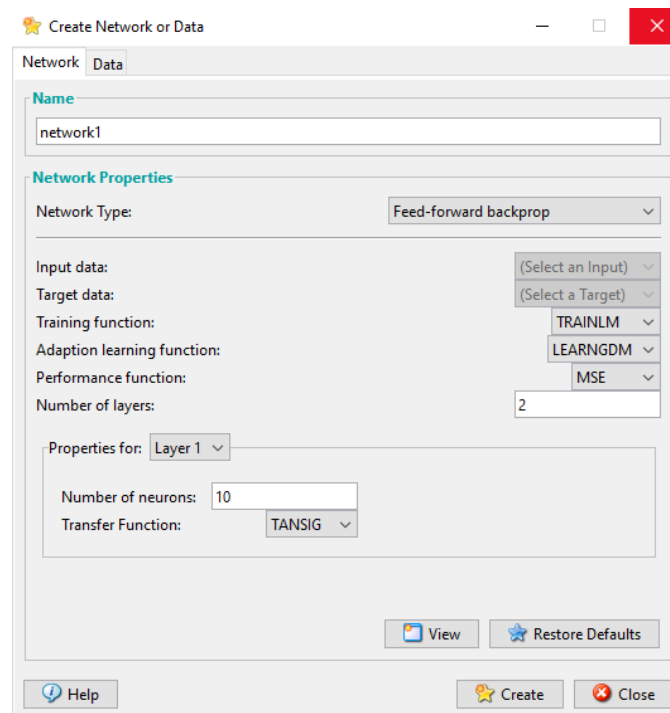


Figura 4.6. Janela utilizada para criação da RNA no MatLab

Além de configurar novas RNAs no pacote nntool também é feita à importação do conjunto de dados que é utilizado para o treinamento, validação e generalização/teste da rede. Com relação aos dados de entrada estes devem ser fornecidos à rede em forma de matriz, na qual as colunas representam os modelos e as linhas as características do modelo. Na Figura 4.7 encontra-se um exemplo de como devem ser fornecidos os dados de entrada e saída da rede.

	Modelo 1	Modelo 2	...	Modeno m
1° frequência				
2° frequência				
⋮				
n° frequência				
1° coord. modo				
2° coord. modo				
⋮				
n° coord. modo				

(a)

	Modelo 1	Modelo 2	...	Modeno m
Posição do dano				

(b)

Figura 4.7. Exemplo da organização do conjunto de dados importados para o treinamento da rede

(a) Dados de entrada (input) (b) Dados de saída (target)

Após a importação do conjunto de dados e a configuração da rede a ser utilizada, pode-se determinar os parâmetros relacionados com o treinamento. Dentre esses parâmetros tem-se, por exemplo, o número de ciclos/interações máximas a serem realizadas e os erros máximos admitidos entre as saídas.

Definidos os parâmetros para o treinamento da rede este pode ser iniciado. Vale ressaltar que o conjunto de dados importados é distribuído aleatoriamente entre as fases de treinamento, validação e teste, na proporção de 70% dos dados para o treinamento, 15% para a validação e os outros 15% para o teste.

Durante o treinamento da rede, são disponibilizados ao usuário gráficos interativos para acompanhar visualmente o processo. Um destes gráficos é intitulado como *Performance* que apresenta a raiz da soma dos quadrados do erro (MSE) entre a saída calculada e a desejada, após cada interação, representando assim o desempenho da rede, e tem como referência o conjunto de dados utilizado para a validação. Outro gráfico é o *Regression*, que mostra a relação entre as saídas encontradas pela rede (output) e o objetivo (target) da fase de treinamento (training), validação (validation) e teste (test). Na Figura 4.8 é apresentado um exemplo de cada um destes gráficos após concluído o treinamento da RNA.

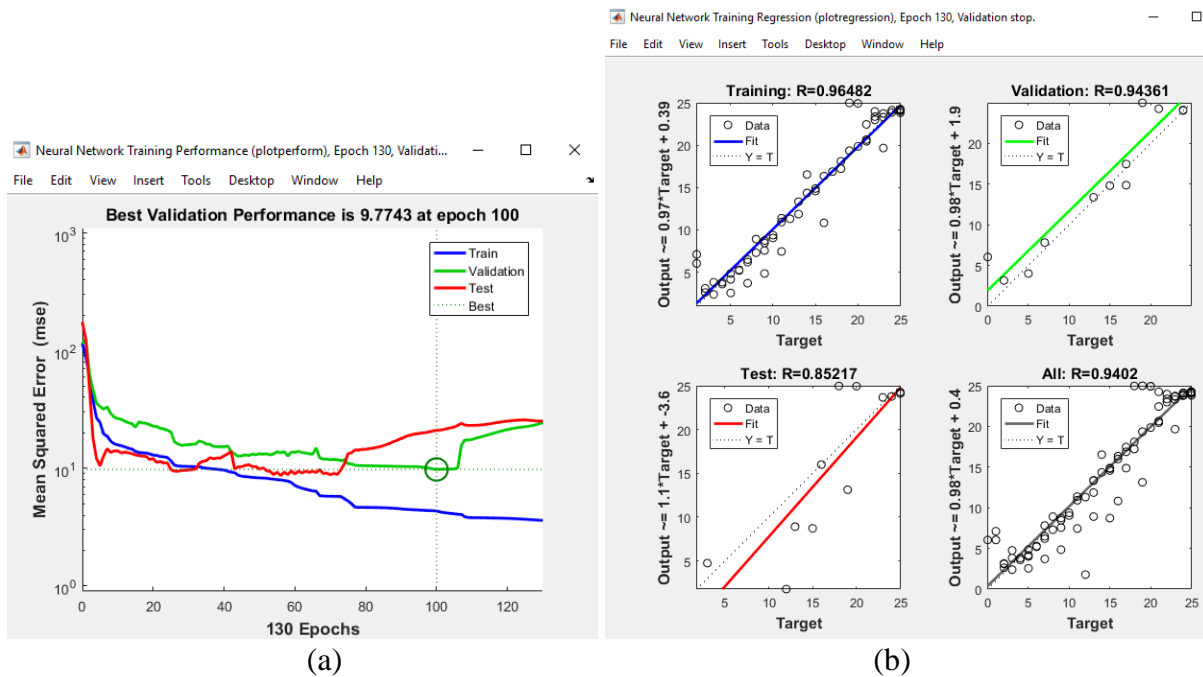


Figura 4.8. (a) Gráfico de *Performance* (b) Gráfico de *Regression*

Com relação aos gráficos da Figura 4.8 a *Performance* apresenta o erro (eixo y) entre as saídas fornecidas e as calculadas após cada ciclo de treinamento (eixo x). E na *Regression* a linha tracejada representa o resultado perfeito ($\text{output} = \text{target}$) e a linha sólida representa a linha de regressão linear de melhor ajuste entre saídas calculadas e objetivadas. Ainda no gráfico da *Regression* o coeficiente ‘R’ varia entre 0 e 1, indicando quanto a RNA consegue reproduzir os dados analisados, e pode ser utilizado para verificar a capacidade de aprendizado da RNA.

4.3. ARTEMIS

O ARTeMIS (2015), desenvolvido por Structural Vibration Solutions A/S, é um *software* que pode ser utilizado para fazer análises modais a partir de dados experimentais. Este programa foi utilizado para identificar os parâmetros modais (frequências e modos de vibração) a partir do histórico de acelerações no domínio do tempo, obtidos de ensaios experimentais de vibração realizados por Fabrício Morales, Alexandre Cury e Ricardo Peixoto (Ortiz Morales *et. al*, 2018).

Inicialmente é fornecido ao programa a geometria da estrutura, o período do experimento e a localização de cada acelerômetro com seus respectivos dados coletados no ensaio.

Para obtenção das frequências naturais foi utilizado o método da Decomposição no Domínio da Frequência (FDD) através do gráfico de espectro de densidade, fornecido pelo programa. Na Figura 4.9 é apresentado um exemplo do gráfico de espectro de densidade gerado pelo

programa, onde as frequências são obtidas a partir dos picos no gráfico. A seleção dos pontos de pico pode ser automática, feita pelo próprio programa, ou manual, feita pelo usuário.

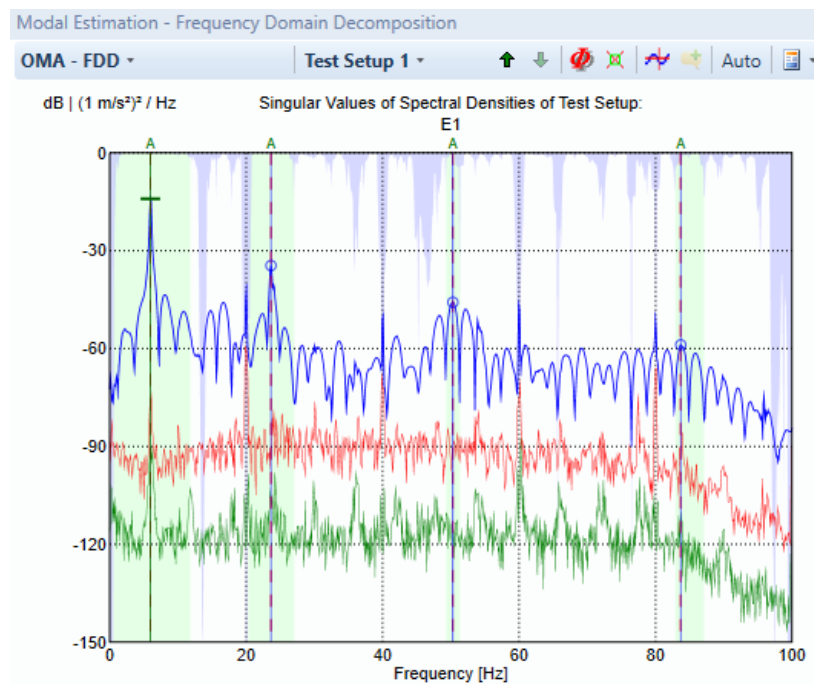


Figura 4.9. Exemplo do espectro de densidade utilizado pelo programa para obtenção das frequências naturais.

Por fim, o programa apresenta os modos de vibração associados a cada uma das frequências identificadas no gráfico de espectro de densidade, representados pelo deslocamento da estrutura nos locais em que houve coleta de dados, como pode ser visto na Figura 4.10.

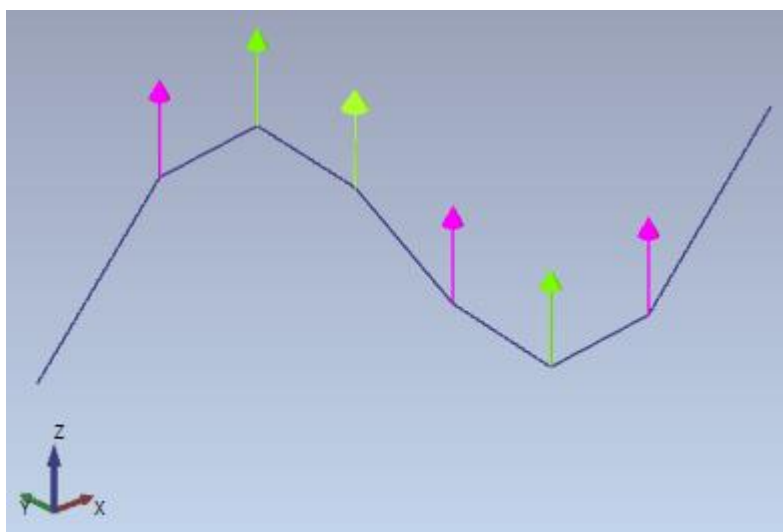


Figura 4.10. Exemplo do modo de vibração plotado pelo programa.

Os modos de vibração, obtidos através do ARTEMIS (2015) com os dados experimentais de Ortiz Morales *et. al* (2018), serão utilizadas na fase de teste da última RNA criada, a fim de verificar o desempenho da rede perante dados reais.

5. ANÁLISE NUMÉRICA

Como mencionado anteriormente, este trabalho tem como objetivo estudar a influência que a variação da temperatura provoca na avaliação de dano. Com essa premissa, primeiramente foi realizada uma avaliação de dano sem levar em consideração a variação da temperatura, ou seja, uma avaliação de dano a temperatura constante.

Posteriormente foi realizada uma análise da influência que a variação da temperatura provoca nas propriedades dinâmicas, mas especificamente com relação à frequência. E a partir destas duas análises, avaliação de dano a temperatura constante e influência da temperatura nas propriedades dinâmicas, estudou-se a influência provocada pela temperatura na avaliação de dano.

5.1. AVALIAÇÃO DE DANO A TEMPERATURA CONSTANTE

Este item está dividido em três partes. Inicialmente são apresentadas as características da viga que foi estudada, tanto em sua configuração intacta como danificada.

Na segunda parte são apresentadas as características relacionadas com a modelagem numérica. Primeiro é indicado o cálculo analítico das frequências naturais e dos modos de vibração da viga intacta. Com base nesses resultados são feitas algumas considerações no *software* ANSYS (2016) para a concepção do modelo numérico da viga intacta. A partir do modelo intacto foi criado o modelo danificado e, a fim de validar o modelo numérico, foi feita a comparação entre os resultados numéricos obtidos no ANSYS (2016) com resultados experimentais.

Por fim, na terceira e última parte, são apresentadas todas as RNAs construídas com seus respectivos resultados, mostrando o desempenho que cada configuração teve diante do problema em questão. Nesta terceira etapa, as RNAs foram treinadas e testadas apenas com dados numéricos, e aquela que apresentou os melhores resultados diante destes testes foi testada com dados experimentais visando avaliar seu desempenho diante de casos reais.

5.1.1. Exemplo Analisado

A viga escolhida foi ensaiada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Ouro Preto por Ortiz Morales (2016). Trata-se de uma viga metálica feita com perfil de barra chata em aço A36, com dimensões de 1500mm x 25,1mm x 5,9mm e condição de contorno apoiada-apoiada. Na Figura 5.1 é apresentada a configuração intacta desta viga.

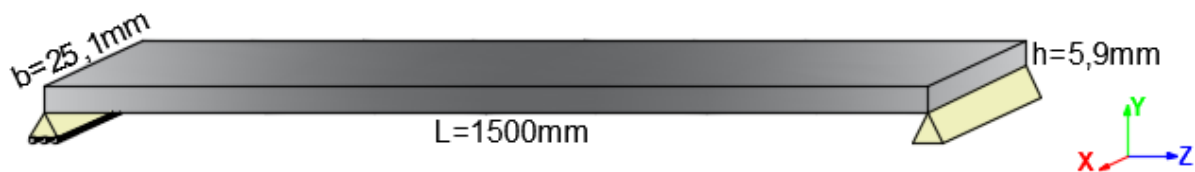


Figura 5.1. Representação da viga ensaiada por Ortiz Morales (2016) na configuração intacta.

A viga estava à temperatura de 25°C, possui limite de escoamento mínimo de 250MPa e tensão de ruptura entre 400 e 500MPa, na Tabela 5.1 são apresentas mais características da viga.

Tabela 5.1. Propriedades da viga ensaiada por Ortiz Morales (2016)

Propriedades	Valores
Área da Seção Transversal - A	$1,481 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Momento de Inércia - I	$4,296 \times 10^{-10} \text{ m}^4$
Módulo de Elasticidade - E	200GPa
Massa Específica - ρ	7850 kg/m^3
Massa por metro - \bar{m}	1,162 kg/m

Ortiz Morales (2016) ensaiou a viga da Figura 5.1 com o objetivo de obter as três primeiras frequências naturais e taxa de amortecimento, e, com isso, realizar uma análise estatística básica e avançada para detectar dano. Para a obtenção de tais características foram instalados 6 acelerômetros piezométricos distribuídos ao longo da viga, medindo os valores correspondentes à direção dos graus de liberdade verticais (eixo Y), como mostrado na Figura 5.2.

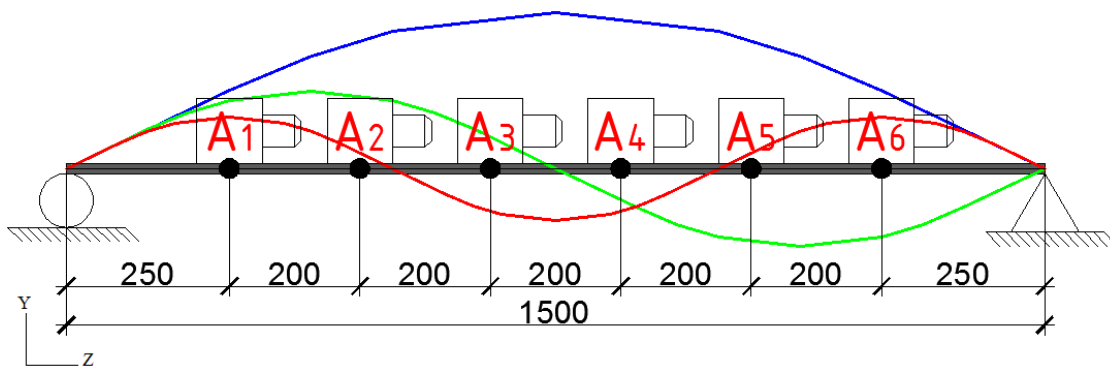


Figura 5.2. Posição, em milímetros, dos acelerômetros ao longo do comprimento da viga (Ortiz Morales, 2016 adaptada)

Já os dois apoios foram simulados como apresentado na Figura 5.3. No apoio A o deslocamento nas três direções, X, Y e Z são restritos e a rotação é livre. E no apoio B os deslocamentos nas direções X e Y são restringidos, já o deslocamento na direção do eixo Z e a rotação são livres. Deste modo o apoio A tem a intenção de simular um apoio do 2º gênero e o apoio B do 1º gênero. Ortiz Morales (2016) utilizou as barras destacadas na cor azul para impedir os movimentos descritos acima.

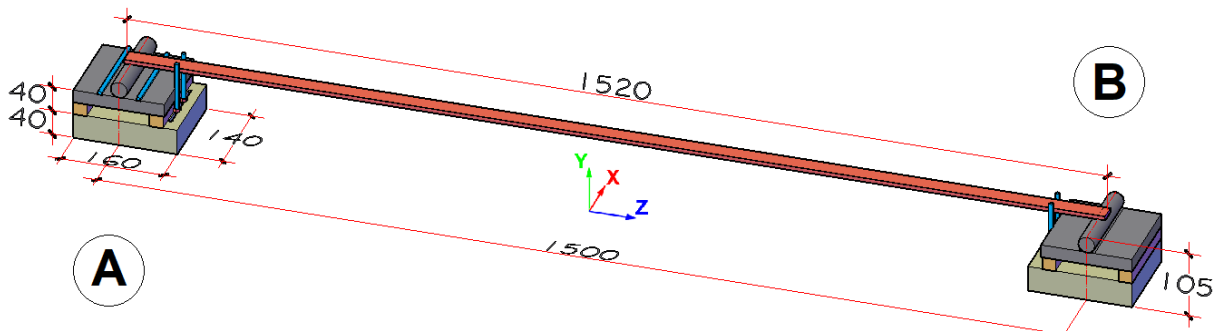


Figura 5.3. Representação das condições de contorno da viga ensaiada (Ortiz Morales, 2016 adaptada)

Na Figura 5.4 é apresentada uma perspectiva da viga ensaiada, onde em amarelo são destacados os acelerômetros instalados.

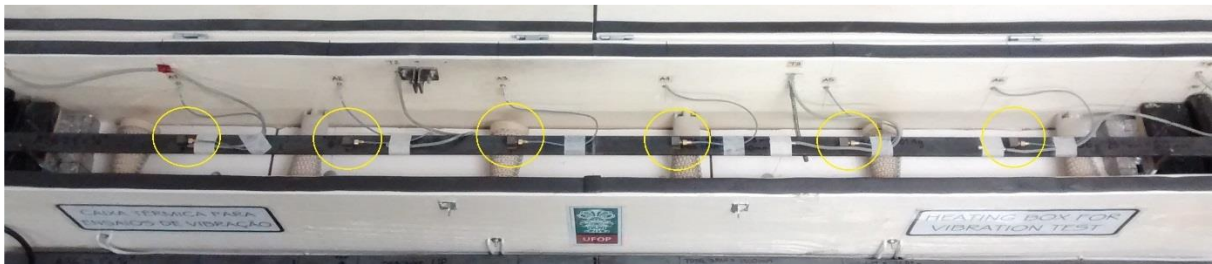


Figura 5.4. Perspectiva da instalação dos acelerômetros (Ortiz Morales, 2016)

A fim de simular um dano a exatos 750mm de distância em relação ao apoio, ou seja, no meio do vão, uma redução na seção transversal foi criada. Na Figura 5.5 é apresentada a redução feita, onde a área e inércia da seção danificada sofreram uma redução de 16,67% e 42,13%, respectivamente. A Figura 5.6 apresenta a viga experimental com a marcação do local onde o dano foi inserido.

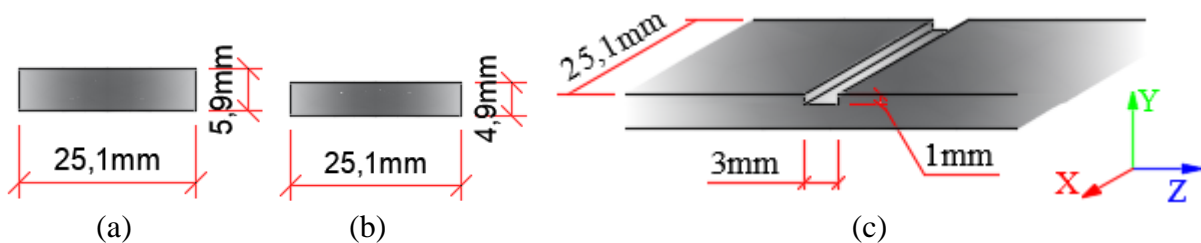


Figura 5.5. (a) Seção transversal intacta (b) Seção transversal danificada (c) Dano em perspectiva



Figura 5.6. Representação da viga ensaiada por Ortiz Morales (2016) na configuração danificada

Ortiz Morales (2016) realizou o experimento três vezes para cada configuração, intacta e danificada, e obteve as frequências naturais e taxas de amortecimento. Os resultados da média das frequências naturais obtidas encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Resultados obtidos experimentalmente por Ortiz Morales (2016)

Frequência (Hz)	Viga Intacta	Viga Danificada
1º Freq.	6,0256	5,9685
2º Freq.	23,5977	23,6595
3º Freq.	53,4709	53,2127

5.1.2. Modelagem Numérica

Inicialmente foram calculadas as características dinâmicas da viga na configuração intacta analiticamente. Para tal, primeiro obteve-se os modos de vibração da viga em estudo aplicando as condições de contorno da viga na Equação (3.13) (reapresentada em (5.1)), depois foram obtidas as frequências naturais através da Equação (5.2).

$$\phi(x) = A_1 \cos(ax) + A_2 \sin(ax) + A_3 \cosh(ax) + A_4 \sinh(ax) \quad (5.1)$$

$$\omega = a^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad (5.2)$$

Onde: $\phi(x)$ é a função que representa a forma modal da viga;

A_1, A_2, A_3, A_4 e a são constantes a serem determinadas;

ω é a frequência natural em 'rad/s';

E é o módulo de elasticidade;

I é a inércia da seção transversal;

\bar{m} é a massa por unidade de comprimento.

A viga estudada apresenta como condições de contorno apoios simples, ou seja, o deslocamento vertical e o momento fletor são nulos nos apoios, como apresentado na Equação (5.3).

$$\begin{aligned} \text{Deslocamento: } \phi(0) = 0 & \quad \phi(1,5) = 0 \\ \text{Momento Fletor: } M(0) = EI \phi''(0) = 0 & \quad M(1,5) = EI \phi''(1,5) = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Onde: $\phi(0)$ é o deslocamento na posição 0m;

$\phi(1,5)$ é o deslocamento na posição 1,5m;

$M(0)$ é o momento fletor na posição 0m;

$M(1,5)$ é o momento fletor na posição 1,5m.

Aplicando as condições de contorno apresentadas em (5.3) para a posição '0m' ($x = 0$) na função apresentada na Equação (5.1), para determinar as constantes A_1, A_2, A_3 e A_4 , temos que:

$$\begin{aligned}\phi(0) = 0 &\rightarrow A_1 \cos(0) + A_2 \sin(0) + A_3 \cosh(0) + A_4 \sinh(0) = 0 \\ &\therefore A_1 + A_3 = 0\end{aligned}\quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}\phi''(0) = 0 &\rightarrow a^2(-A_1 \cos(0) - A_2 \sin(0) + A_3 \cosh(0) + A_4 \sinh(0)) = 0 \\ &\therefore -A_1 + A_3 = 0\end{aligned}\quad (5.5)$$

A partir da resolução das Equações (5.4) e (5.5) obtém-se que $A_1 = A_3 = 0$. Levando isto em consideração e aplicando as condições de contorno apresentadas na Equação (5.3) para $x = 1,5$ na Equação (5.1), tem-se que:

$$\phi(1,5) = 0 \rightarrow A_2 \sin(1,5a) + A_4 \sinh(1,5a) = 0 \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}\phi''(1,5) = 0 &\rightarrow a^2(-A_2 \sin(1,5a) + A_4 \sinh(1,5a)) = 0 \\ &\therefore A_2 \sin(1,5a) = A_4 \sinh(1,5a)\end{aligned}\quad (5.7)$$

Ou seja,

$$2 A_4 \sinh(1,5a) = 0 \quad (5.8)$$

$$2 A_2 \sin(1,5a) = 0 \quad (5.9)$$

Analisando a Equação (5.8) tem-se que $A_4 = 0$, uma vez que $\sinh(1,5a) \neq 0$. Excluindo a solução trivial da Equação (5.9), com $A_2 = 0$, tem-se que $\sin(1,5a) = 0$, e tal equação é satisfeita quando:

$$a = n \frac{\pi}{1,5} \quad \text{com } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5.10)$$

Com isso, tem-se que a função que rege o modo de vibração da viga estudada é:

$$\phi(x) = \sin\left(\frac{n\pi}{1,5} x\right) \quad (5.11)$$

No que diz respeito a frequência, a partir da Equação (5.2) tem-se que:

$$\omega = \left(\frac{n\pi}{1,5}\right)^2 \sqrt{\frac{(2 \cdot 10^{11}) \cdot (4,296 \cdot 10^{-10})}{1,162}} \quad (5.12)$$

Lembrando que $\omega = 2\pi f$, tem-se que a frequência de vibração para a viga em ‘Hz’ é:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{n^2 \pi^2}{2,25} \sqrt{73,9066} \rightarrow f_n = 6,0017 \cdot n^2 \quad (5.13)$$

Na Tabela 5.3 são apresentadas as três primeiras frequências analíticas da viga na configuração intacta.

Tabela 5.3. Frequências analíticas da viga intacta

Frequência (Hz)	Viga Intacta
1º Freq.	6,0017
2º Freq.	24,0069
3º Freq.	54,0155

Após o cálculo analítico foi construído o modelo numérico da viga intacta à temperatura de 25°C. Este modelo numérico, representado na Figura 5.7, foi feito no *software* ANSYS (2016), mais especificamente no módulo “Modal” utilizando elementos Mesh2000 prismático de 20 nós. As condições de contorno foram inseridas nas arestas inferiores do modelo. No apoio A impediu-se o deslocamento nas direções X e Y e no apoio B impediu-se o deslocamento nas três direções, X, Y e Z. A rotação permaneceu livre em ambos os apoios.

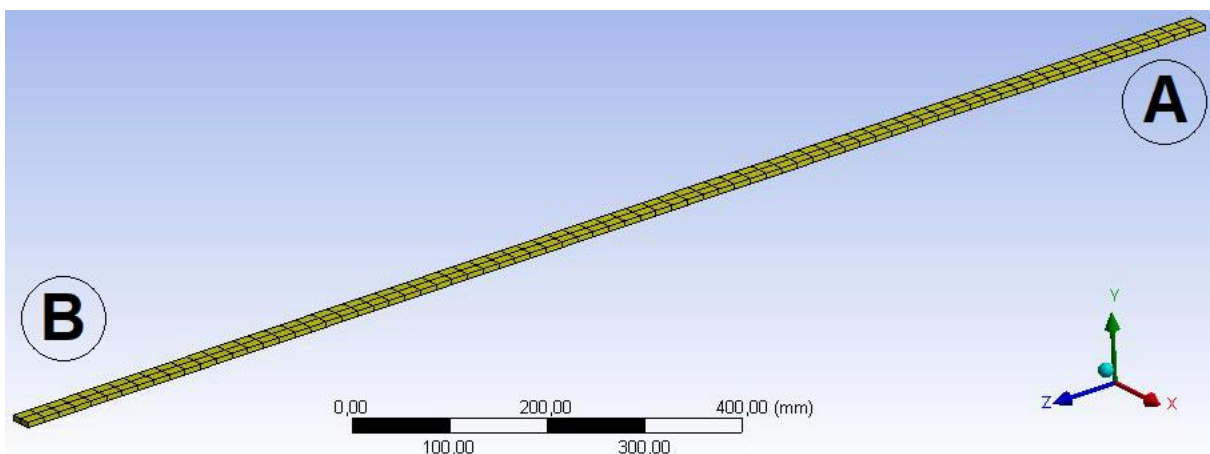


Figura 5.7. Módulo numérico da viga intacta

Após uma análise de convergência, apresentada na Tabela 5.4, adotou-se a discretização com dois elementos finitos na largura (direção X), um elemento na altura (direção Y) e elementos com 20mm ao longo do comprimento (direção Z), totalizando 150 elementos. Na Tabela 5.4 são apresentadas as três primeiras frequências encontradas para cinco tamanhos de malha e o erro destas com relação à frequência calculada analiticamente.

Tabela 5.4. Convergência da discretização das malhas

	Analítico	Numérico									
		20mm		15mm		10mm		6mm		3mm	
		Freq. (Hz)	Erro	Freq. (Hz)	Erro	Freq. (Hz)	Erro	Freq. (Hz)	Erro	Freq. (Hz)	Erro
1ºFreq.	6,00172	6,00141	0,005%	6,00141	0,005%	6,00142	0,005%	6,00142	0,005%	6,00140	0,005%
2ºFreq.	24,00689	24,00195	0,021%	24,00195	0,021%	24,00199	0,020%	24,00199	0,020%	24,00170	0,022%
3ºFreq.	54,01551	53,99042	0,046%	53,99039	0,047%	53,99062	0,046%	53,99058	0,046%	53,98916	0,049%

A partir do modelo intacto foi criado o modelo danificado. Com o mesmo princípio feito por Ortiz Morales (2016) foi provocada uma redução na seção transversal do modelo numérico. Na Figura 5.8 consta o dano criado no modelo numérico. Ressalta-se que no modelo danificado foram utilizadas duas geometrias do elemento finito Mesh2000, o prisma quadrilátero com 20 nós (cor amarela) e prisma triangular com 15 nós (cor cinza), para modelar a região irregular do dano.

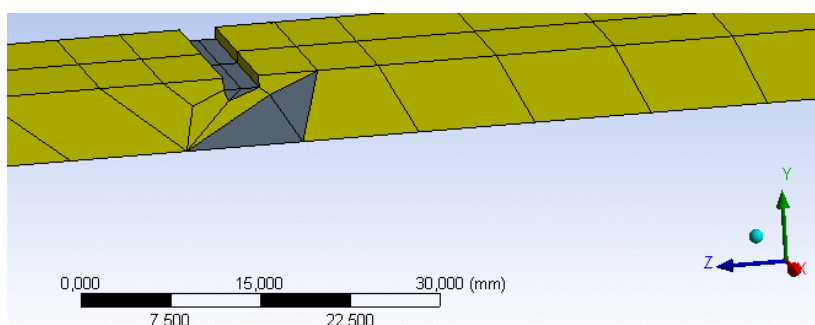


Figura 5.8. Detalhe da redução da seção transversal realizada no modelo numérico para simular o dano criado no ensaio experimental.

Por fim, nas Tabela 5.5 e Tabela 5.6 são apresentados os erros percentuais entre as frequências obtidas experimentalmente, por Ortiz Morales (2016), com as numéricas para a viga intacta e danificada. Com base nos valores encontrados para os erros, todos inferiores a 2%, foram considerados validados os modelos numéricos.

Tabela 5.5. Erro percentual entre os resultados obtidos experimentalmente por Ortiz Morales (2016) com os resultados numéricos da viga intacta

	Experimental	Numérico	
	Freq. (Hz)	Freq. (Hz)	Erro
1ºFreq.	6,0256	6,0014	0,402%
2ºFreq.	23,5977	24,0019	-1,713%
3ºFreq.	53,4709	53,9904	-0,972%

Tabela 5.6. Erro percentual entre os resultados obtidos experimentalmente por Ortiz Morales (2016) com os resultados numéricos da viga danificada

	Experimental	Numérico	
	Freq. (Hz)	Freq. (Hz)	Erro
1ºFreq.	5,9685	5,9904	-0,368%
2ºFreq.	23,6595	24,0011	-1,444%
3ºFreq.	53,2127	53,8874	-1,268%

5.1.3. Avaliação de dano

Com o modelo numérico validado, foram construídos vários modelos danificados, para realizar a avaliação de dano em conjunto com as RNAs. Para criar os modelos danificados, de modo que as RNAs pudessem reconhecer o padrão provocado pelo dano nas características dinâmicas, foram criadas diferentes reduções na seção transversal em pequenos trechos da viga, estando estes posicionados em diferentes locais ao longo do comprimento.

As reduções na seção transversal do modelo numérico foram, em milímetros, de $20 \times 25,1 \times a$. Na Figura 5.9 consta a representação dos danos provocados, sendo que ‘a’ representa a altura do dano. Adotou-se diversos valores para a altura do dano com o objetivo de simular diferentes intensidades de dano.

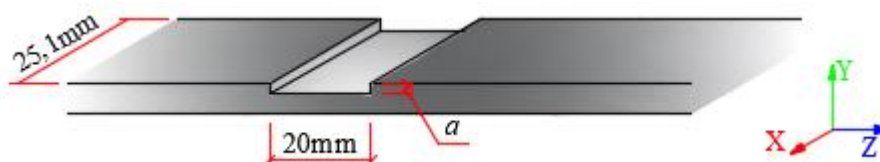


Figura 5.9. Representação do dano provocado no modelo numérico para avaliação de dano

Ao todo foram criadas 5 configurações de RNAs para a avaliação de dano à temperatura constante. Na Tabela 5.7 são apresentadas algumas características destas 5 configurações. Sendo que as RNAs I, II, III e IV foram criadas para otimizar o desempenho da rede durante o treinamento e teste, observando a influência da quantidade de modelos utilizados para o treinamento da rede. Já na RNA V foi observada a influência da função de ativação e quantidade de neurônios diante de teste com dados reais.

Tabela 5.7. Características das 5 configurações de RNAs criadas para a avaliação de dano a temperatura constante

RNA	Características da rede			Dados para o treinamento e teste da rede			Características do treinamento
	Tipo de Aprendizado	Arquitetura	Função de Ativação	Padrão utilizado como dado de entrada	Padrão utilizado como dado de saída	Quantidade de modelos utilizados para o treinamento	Número de Neurônios
I	Supervisionado com o algoritmo de <i>Levenberg-Marquardt backpropagation</i>	Duas camadas	Tansig	3 primeiras frequências	Distância do apoio ao dano	69	20
II			Tansig			37	20
III			Tansig			55	20
IV			Tansig			74	20
V			Logsig Purelin			74	5, 10, 25 e 50

A seguir, são apresentadas as características dos modelos numérico criados com relação à posição e intensidade dos danos, assim como os parâmetros e desempenho da rede na fase de treinamento e os resultados da fase de teste, para cada uma das 5 configurações de RNA.

RNA I:

Na Tabela 5.8 são apresentadas as posições, tendo como referência o apoio A da Figura 5.7, e a intensidade dos danos criados para o treinamento e teste da rede. Para o treinamento foram utilizadas as frequências da viga intacta e dos modelos de dano D1 a D68, totalizando 69 dados. Para o teste utilizaram-se os modelos de dano D69 a D71. No Anexo A são apresentadas as três frequências dos 71 modelos danificados, utilizadas no treinamento e teste da RNA I.

Com relação aos parâmetros de treinamento a rede apresentou erro quadrático (MSE) entre as saídas obtidas (output) com as objetivadas (target) de 10^2 , um erro que poderia ser classificado como aceitável, uma vez que as saídas utilizadas no treinamento da rede são da mesma ordem de grandeza (saídas utilizadas de 0 a 150, representando a localização do dano). Além disso a rede teve o fator 'R', correlacionando os dados de saída output com os target, de 0,93, ou seja, a rede conseguiu uma aproximação de 93% entre as saídas.

Tabela 5.8. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento e teste da RNA I

Dano	Posição		Redução		Dano	Posição		Redução		Dano	Posição		Redução		
	(cm)	Área	Inércia	(cm)		Área	Inércia	(cm)	Área		Inércia	(cm)	Área	Inércia	
D1	4	8,5%	23,3%	D19	10	16,9%	42,7%	D37	23	25,4%	58,5%	D55	33	33,9%	71,1%
D2	16	8,5%	23,3%	D20	21	16,9%	42,7%	D38	33	25,4%	58,5%	D56	43	33,9%	71,1%
D3	25	8,5%	23,3%	D21	34	16,9%	42,7%	D39	45	25,4%	58,5%	D57	53	33,9%	71,1%
D4	36	8,5%	23,3%	D22	43	16,9%	42,7%	D40	53	25,4%	58,5%	D58	60	33,9%	71,1%
D5	44	8,5%	23,3%	D23	51	16,9%	42,7%	D41	62	25,4%	58,5%	D59	70	33,9%	71,1%
D6	53	8,5%	23,3%	D24	60	16,9%	42,7%	D42	71	25,4%	58,5%	D60	75	33,9%	71,1%
D7	63	8,5%	23,3%	D25	70	16,9%	42,7%	D43	75	25,4%	58,5%	D61	81	33,9%	71,1%
D8	72	8,5%	23,3%	D26	75	16,9%	42,7%	D44	78	25,4%	58,5%	D62	87	33,9%	71,1%
D9	75	8,5%	23,3%	D27	81	16,9%	42,7%	D45	86	25,4%	58,5%	D63	94	33,9%	71,1%
D10	79	8,5%	23,3%	D28	89	16,9%	42,7%	D46	95	25,4%	58,5%	D64	105	33,9%	71,1%
D11	87	8,5%	23,3%	D29	96	16,9%	42,7%	D47	107	25,4%	58,5%	D65	112	33,9%	71,1%
D12	98	8,5%	23,3%	D30	105	16,9%	42,7%	D48	116	25,4%	58,5%	D66	123	33,9%	71,1%
D13	105	8,5%	23,3%	D31	116	16,9%	42,7%	D49	128	25,4%	58,5%	D67	134	33,9%	71,1%
D14	117	8,5%	23,3%	D32	124	16,9%	42,7%	D50	136	25,4%	58,5%	D68	146	33,9%	71,1%
D15	128	8,5%	23,3%	D33	135	16,9%	42,7%	D51	144	25,4%	58,5%	D69	28	30,5%	66,4%
D16	138	8,5%	23,3%	D34	144	16,9%	42,7%	D52	3	33,9%	71,1%	D70	56	25,4%	58,5%
D17	145	8,5%	23,3%	D35	5	25,4%	58,5%	D53	15	33,9%	71,1%	D71	140	33,9%	71,1%
D18	2	16,9%	42,7%	D36	12	25,4%	58,5%	D54	25	33,9%	71,1%				

Na Figura 5.10 é apresentada a 1ª frequência dos modelos de dano da Tabela 5.8. A partir deste gráfico é possível observar que a posição e a intensidade do dano influenciaram nas frequências da viga. Além disso, se observa que modelos com danos de mesma intensidade, cuja posição do dano encontra-se a uma distância ‘x’ do apoio esquerdo e a mesma distância ‘x’ do apoio direito como, por exemplo, o dano D7 e D11, tem frequências muito próximas, mais especificamente, apresentam uma diferença na quarta casa decimal. Essa pequena diferença gerou um gráfico aproximadamente simétrico, e esta “tendência simétrica” poderia ser atribuída ao fato das condições de contorno terem características semelhantes. Esta “simetria” também ocorreu nas demais frequências.

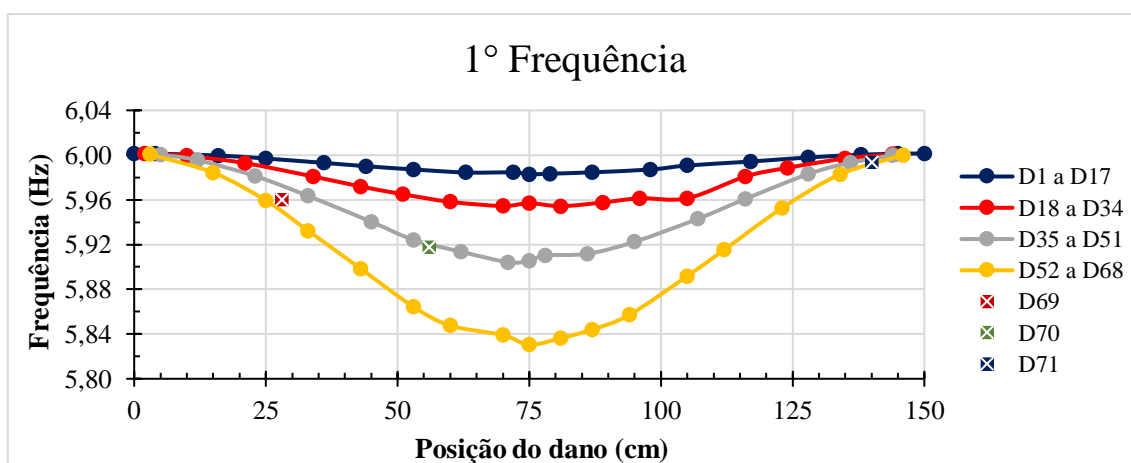


Figura 5.10. Representação do dano provocado no modelo numérico para avaliação de dano

A partir da rede treinada, foram realizados três testes para cada um dos danos (D69, D70 e D71), totalizando 9 testes da RNA I. Na Figura 5.11 são apresentados os resultados destes testes (output) e o intervalo desejado (target).

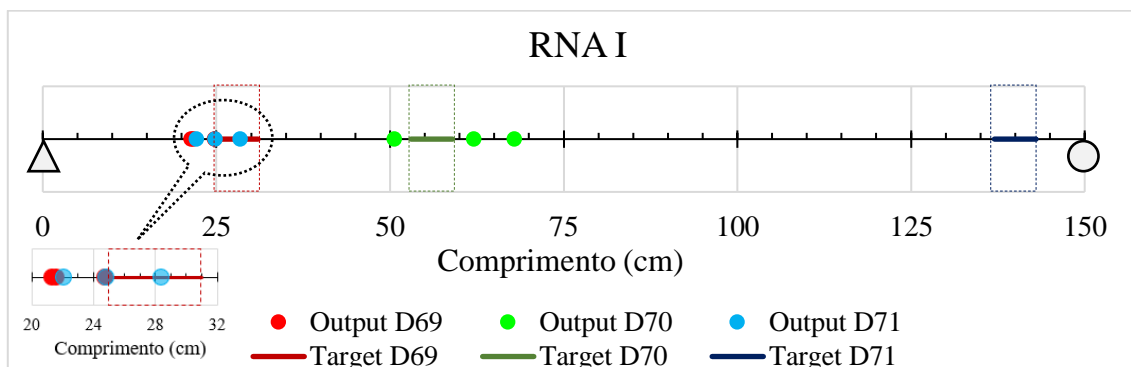


Figura 5.11. Resultados da fase de teste da RNA I

Os resultados apresentados na Figura 5.11 dos danos D69 e D70 ficaram próximos ao objetivo (output = target), porém os resultados do dano D71 foram no lado oposto ao objetivo. Os resultados do dano D71 poderiam ser atribuídos à pequena diferença entre as frequências, do referido dano, com um modelo cujo dano possuísse a mesma intensidade e estivesse posicionado à 10cm do apoio esquerdo (como o caso dos danos D7 e D11). A partir destes resultados, e afim de confirmar a hipótese feita, optou-se por criar uma rede utilizando modelos para o treinamento com dano posicionados em apenas metade da viga (RNA II).

RNA II:

Na RNA II foram utilizados os mesmos modelos da RNA I cujo dano encontrava-se entre 0 e 75cm, a fim de contornar o problema apresentado na fase de teste do dano D71. Na Tabela 5.9 são apresentados os danos utilizados no treinamento e teste da RNA II. Para o treinamento foram utilizadas frequências da viga intacta e dos modelos de dano D1 a D36, totalizando 37 dados. E para o teste utilizou-se os modelos de dano D37 a D39. No Anexo A são apresentadas as três frequências dos 39 modelos danificados, utilizadas no treinamento e teste da RNA II.

Com relação aos parâmetros de treinamento a rede apresentou erro quadrático (MSE) de 10^3 , uma piora comparada à RNA I. O fator R entre os dados de saída obtidos (output) com os calculados (target) foi de 0,94, muito próximo à RNA I. Com estes parâmetros de treinamento a rede, provavelmente, não conseguirá reproduzir o fenômeno em estudo, ou seja, não apresentará valores satisfatórios sobre a localização do dano.

Tabela 5.9. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento e teste da RNA II

Dano	Posição		Redução		Dano	Posição		Redução		Dano	Posição		Redução		
	(cm)	Área	Inércia	(cm)		Área	Inércia	(cm)	Área		Inércia	(cm)	Área	Inércia	
D1	4	8,5%	23,3%	D11	10	16,9%	42,7%	D21	23	25,4%	58,5%	D31	33	33,9%	71,1%
D2	16	8,5%	23,3%	D12	21	16,9%	42,7%	D22	33	25,4%	58,5%	D32	43	33,9%	71,1%
D3	25	8,5%	23,3%	D13	34	16,9%	42,7%	D23	45	25,4%	58,5%	D33	53	33,9%	71,1%
D4	36	8,5%	23,3%	D14	43	16,9%	42,7%	D24	53	25,4%	58,5%	D34	60	33,9%	71,1%
D5	44	8,5%	23,3%	D15	51	16,9%	42,7%	D25	62	25,4%	58,5%	D35	70	33,9%	71,1%
D6	53	8,5%	23,3%	D16	60	16,9%	42,7%	D26	71	25,4%	58,5%	D36	75	33,9%	71,1%
D7	63	8,5%	23,3%	D17	70	16,9%	42,7%	D27	75	25,4%	58,5%	D37	5	33,9%	71,1%
D8	72	8,5%	23,3%	D18	75	16,9%	42,7%	D28	3	33,9%	71,1%	D38	28	30,5%	66,4%
D9	75	8,5%	23,3%	D19	5	25,4%	58,5%	D29	15	33,9%	71,1%	D39	56	25,4%	58,5%
D10	2	16,9%	42,7%	D20	12	25,4%	58,5%	D30	25	33,9%	71,1%				

Novamente foram realizados três testes para cada um dos danos (D37, D38 e D39), totalizando 9 testes da RNA II. Na Figura 5.12 são apresentados os resultados destes testes (output) e o intervalo desejado (target).

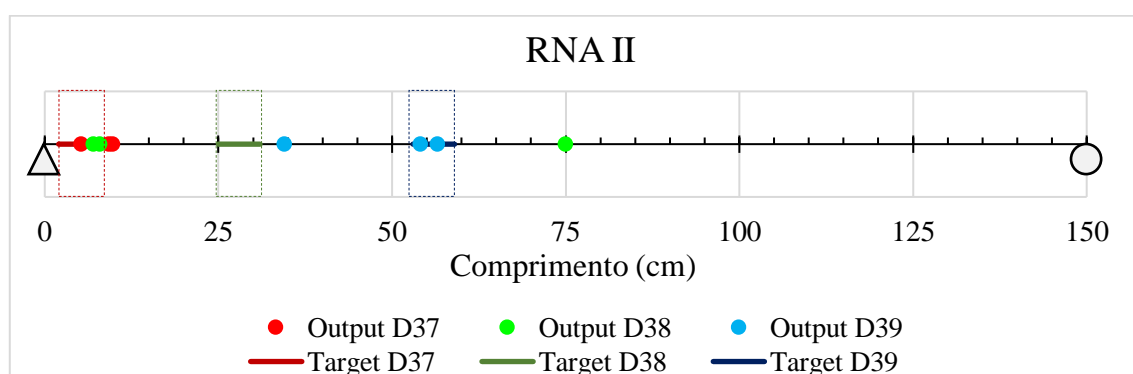


Figura 5.12. Resultados da fase de teste da RNA II

Com os resultados apresentados na Figura 5.12 pode-se notar que o problema da RNA I foi contornado, uma vez que todos os resultados dos testes ficaram na primeira metade da viga, como era esperado. Contudo a localização dos danos foi incorreta, o que já era esperado devido aos parâmetros de treinamento obtidos, e uma provável causa tenha sido a pouca quantidade de dados utilizados no treinamento. Com base nesta possibilidade criou-se uma RNA com mais modelos de danos para o treinamento (RNA III).

RNA III:

Na Tabela 5.10 são apresentados os danos utilizados no treinamento e teste da RNA III. Para o treinamento foram utilizadas as frequências da viga intacta e dos modelos de dano D1 a D54, totalizando 55 dados. Destaca-se que os 54 modelos danificados utilizados no treinamento, foram os mesmos da RNA II acrescido de mais 18 modelos escolhidos aleatoriamente. Para o teste utilizaram-se os modelos de dano D55 a D57. No Anexo A são apresentadas as três

frequências dos 57 modelos danificados, utilizadas no treinamento e teste da RNA III. Com relação aos parâmetros de treinamento a rede apresentou erro quadrático (MSE) de 10^2 e fator R entre os dados de saída obtidos (output) com os calculados (target) de 0,95.

Tabela 5.10. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento e teste da RNA III

Dano	Posição (cm)	Redução		Dano	Posição (cm)	Redução		Dano	Posição (cm)	Redução		Dano	Posição (cm)	Redução	
		Área	Inércia			Área	Inércia			Área	Inércia			Área	Inércia
D1	3	3,4%	9,8%	D16	63	8,5%	23,3%	D31	33	25,4%	58,5%	D46	3	33,9%	71,1%
D2	12	3,4%	9,8%	D17	72	8,5%	23,3%	D32	45	25,4%	58,5%	D47	15	33,9%	71,1%
D3	21	3,4%	9,8%	D18	75	8,5%	23,3%	D33	53	25,4%	58,5%	D48	25	33,9%	71,1%
D4	30	3,4%	9,8%	D19	2	16,9%	42,7%	D34	62	25,4%	58,5%	D49	33	33,9%	71,1%
D5	39	3,4%	9,8%	D20	10	16,9%	42,7%	D35	71	25,4%	58,5%	D50	43	33,9%	71,1%
D6	48	3,4%	9,8%	D21	21	16,9%	42,7%	D36	75	25,4%	58,5%	D51	53	33,9%	71,1%
D7	57	3,4%	9,8%	D22	34	16,9%	42,7%	D37	3	28,8%	63,9%	D52	60	33,9%	71,1%
D8	66	3,4%	9,8%	D23	43	16,9%	42,7%	D38	12	28,8%	63,9%	D53	70	33,9%	71,1%
D9	75	3,4%	9,8%	D24	51	16,9%	42,7%	D39	21	28,8%	63,9%	D54	75	33,9%	71,1%
D10	4	8,5%	23,3%	D25	60	16,9%	42,7%	D40	30	28,8%	63,9%	D55	5	33,9%	71,1%
D11	16	8,5%	23,3%	D26	70	16,9%	42,7%	D41	39	28,8%	63,9%	D56	28	30,5%	66,4%
D12	25	8,5%	23,3%	D27	75	16,9%	42,7%	D42	48	28,8%	63,9%	D57	56	25,4%	58,5%
D13	36	8,5%	23,3%	D28	5	25,4%	58,5%	D43	57	28,8%	63,9%				
D14	44	8,5%	23,3%	D29	12	25,4%	58,5%	D44	66	28,8%	63,9%				
D15	53	8,5%	23,3%	D30	23	25,4%	58,5%	D45	75	28,8%	63,9%				

Novamente foram realizados três testes para cada um dos danos (D55, D56 e D57), totalizando 9 testes da RNA III. Na Figura 5.13 são apresentados os resultados destes testes (output) e o intervalo desejado (target).

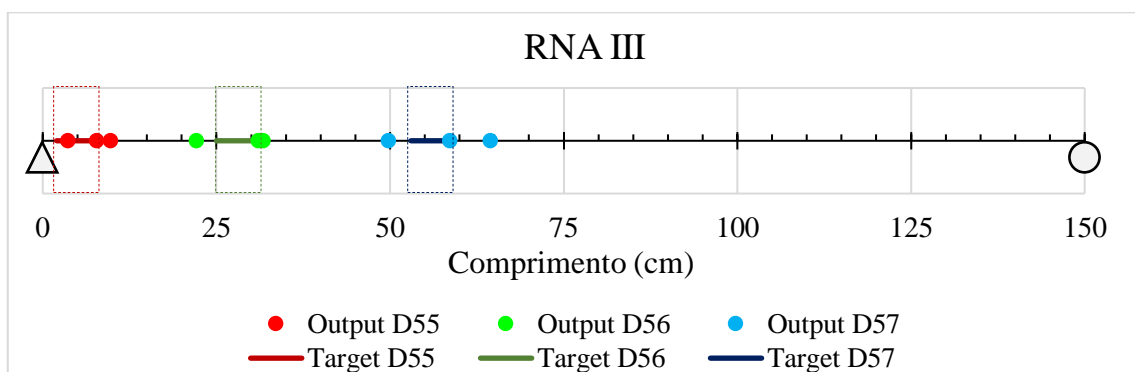


Figura 5.13. Resultados da fase de teste da RNA III

Comparando os resultados apresentados na Figura 5.12 com os da Figura 5.13, o aumento na quantidade de dados para o treinamento melhorou consideravelmente a localização do dano. Com o objetivo de reduzir o erro entre as saídas, output e target, e melhorar os parâmetros de treinamento criou-se uma rede com mais modelos danificados, para o treinamento (RNA IV).

RNA IV:

Na Tabela 5.11 são apresentados os danos utilizados no treinamento e teste da RNA IV. Para o treinamento foram utilizadas as frequências da viga intacta e dos modelos de dano D1 a D73, totalizando 74 dados. Novamente, destaca-se que os modelos danificados criados para serem utilizados no treinamento da rede foram escolhidos aleatoriamente. E para o teste utilizaram-se os modelos de dano D74 a D76. No Anexo A são apresentadas as três frequências dos 76 modelos danificados, utilizadas no treinamento e teste da RNA IV. Com relação aos parâmetros de treinamento a rede apresentou erro quadrático (MSE) de 10^1 e fator R entre os dados de saída obtidos (output) com os calculados (target) de 0,98, melhoras significativas comparado à RNA II.

Tabela 5.11. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento e teste da RNA IV

Dano	Posição (cm)	Redução Área	Redução Inércia	Dano	Posição (cm)	Redução Área	Redução Inércia	Dano	Posição (cm)	Redução Área	Redução Inércia	Dano	Posição (cm)	Redução Área	Redução Inércia
D1	3	3,4%	9,8%	D20	58	16,9%	42,7%	D39	24	28,8%	63,9%	D58	26	37,3%	75,3%
D2	17	3,4%	9,8%	D21	65	16,9%	42,7%	D40	37	28,8%	63,9%	D59	33	37,3%	75,3%
D3	33	3,4%	9,8%	D22	70	16,9%	42,7%	D41	50	28,8%	63,9%	D60	43	37,3%	75,3%
D4	48	3,4%	9,8%	D23	75	16,9%	42,7%	D42	57	28,8%	63,9%	D61	52	37,3%	75,3%
D5	57	3,4%	9,8%	D24	21	20,3%	49,4%	D43	64	28,8%	63,9%	D62	61	37,3%	75,3%
D6	68	3,4%	9,8%	D25	36	20,3%	49,4%	D44	71	28,8%	63,9%	D63	70	37,3%	75,3%
D7	75	3,4%	9,8%	D26	44	20,3%	49,4%	D45	75	28,8%	63,9%	D64	75	37,3%	75,3%
D8	9	8,5%	23,3%	D27	55	20,3%	49,4%	D46	7	33,9%	71,1%	D65	6	40,7%	79,1%
D9	25	8,5%	23,3%	D28	62	20,3%	49,4%	D47	15	33,9%	71,1%	D66	10	40,7%	79,1%
D10	41	8,5%	23,3%	D29	72	20,3%	49,4%	D48	19	33,9%	71,1%	D67	18	40,7%	79,1%
D11	53	8,5%	23,3%	D30	5	25,4%	58,5%	D49	28	33,9%	71,1%	D68	26	40,7%	79,1%
D12	63	8,5%	23,3%	D31	19	25,4%	58,5%	D50	39	33,9%	71,1%	D69	37	40,7%	79,1%
D13	72	8,5%	23,3%	D32	33	25,4%	58,5%	D51	48	33,9%	71,1%	D70	47	40,7%	79,1%
D14	75	8,5%	23,3%	D33	45	25,4%	58,5%	D52	57	33,9%	71,1%	D71	56	40,7%	79,1%
D15	2	16,9%	42,7%	D34	58	25,4%	58,5%	D53	67	33,9%	71,1%	D72	66	40,7%	79,1%
D16	14	16,9%	42,7%	D35	69	25,4%	58,5%	D54	75	33,9%	71,1%	D73	75	40,7%	79,1%
D17	27	16,9%	42,7%	D36	75	25,4%	58,5%	D55	4	37,3%	75,3%	D74	5	33,9%	71,1%
D18	39	16,9%	42,7%	D37	3	28,8%	63,9%	D56	13	37,3%	75,3%	D75	28	30,5%	66,4%
D19	51	16,9%	42,7%	D38	12	28,8%	63,9%	D57	20	37,3%	75,3%	D76	65	32,2%	68,8%

Assim como nas RNAs I, II e III foram realizados três testes para cada um dos danos (D74, D75 e D76), totalizando 9 testes da RNA IV. Na Figura 5.14 são apresentados os resultados destes testes (output) e o intervalo desejado (target).

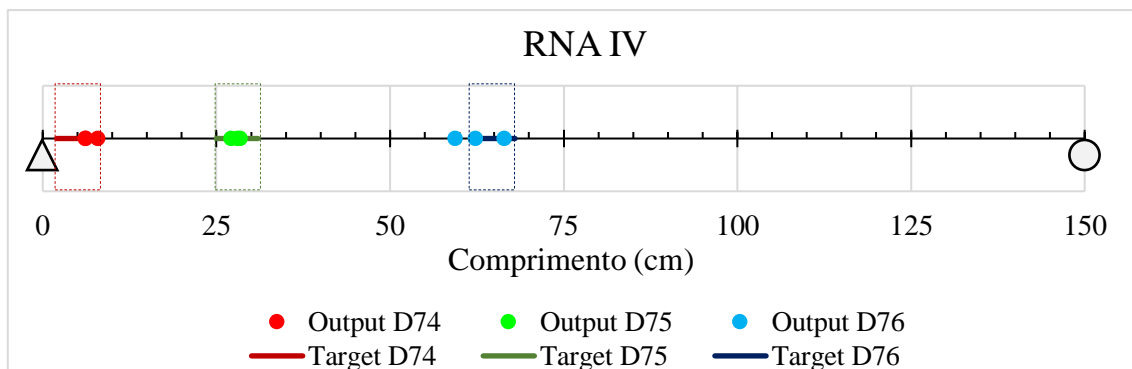


Figura 5.14. Resultados da fase de teste da RNA IV

O aumento na quantidade de dados para o treinamento melhorou a localização do dano e parâmetros de treinamento. O maior erro foi de aproximadamente 3,8%, de um dos teste do dano D76, os demais erros foram inferiores a 2% o que os deixaram dentro do intervalo definido como objetivo (target), logo, a RNA IV pode ser classificada como devidamente treinada e pronta para ser utilizada.

Com o objetivo de analisar o desempenho desta rede diante de problemas reais, foram realizados novos testes, agora utilizando os dados experimentais obtidos por Ortiz Morales (2016). Além do teste com os dados experimentais, para referência, foi realizado ao mesmo tempo um teste com dados advindo de um modelo numérico, que continha as mesmas características da viga danificada ensaiada por Ortiz Morales (2016). Na Tabela 5.12 são apresentadas as três frequências obtidas experimentalmente por Ortiz Morales (2016) e numericamente, que foram utilizadas neste segundo teste da RNA IV. E na Figura 5.15 são apresentados os resultados deste segundo teste.

Tabela 5.12. Dados utilizados para o segundo teste da RNA IV

Dados	Posição (cm)	Redução (%)		f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
		Área	Inércia			
Numérico	75	16,7%	42,1%	5,9904	24,0011	53,8874
Experimental	75	16,7%	42,1%	5,9685	23,6595	53,2127

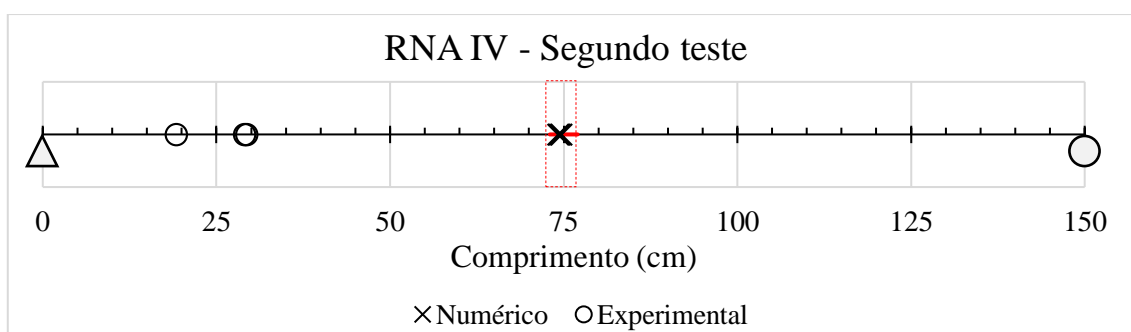


Figura 5.15. Resultados da fase de teste da RNA IV para os dados experimentais

Como já era esperado os dados do modelo numérico apresentaram a localização do dano dentro do intervalo desejado, porém com os dados experimentais a rede forneceu uma falsa localização do dano. A partir destes resultados, apresentados na Figura 5.15, optou-se por atualizar o modelo numérico da viga no *software* ANSYS (2016). Apesar do erro percentual, entre o modelo numérico com o experimental, ter sido baixo a variação provocada pela presença do dano nas frequências também foram, o que pode ter interferido no padrão aprendido pela rede com os dados do treinamento. Além da atualização do modelo, os dados de entrada fornecidos à rede foram normalizados, também com o objetivo de reduzir o erro percentual entre os dados utilizados no treinamento e no teste.

O modelo numérico foi atualizado seguindo o mesmo princípio do trabalho de Marcy *et al.* (2016), através da redução da área e inércia da seção da transversal de toda viga, na Tabela 5.13 são apresentados os valores dos dados iniciais e os atualizados. Além disso, o tamanho do elemento finito foi reduzido para 10mm, totalizando um modelo com 300 elementos, aproximadamente. Por fim, na Tabela 5.14 é apresentado o novo erro percentual entre o modelo numérico atualizado e os resultados experimentais.

Tabela 5.13. Propriedades atualizadas no modelo numérico

	Inicial	Atualizado	Diferença
Área [m ²]	1,481E-04	1,468E-04	-0,85%
Inércia [m ⁴]	4,296E-10	4,188E-10	-2,52%

Tabela 5.14. Erro percentual entre os resultados experimentais com os resultados numéricos atualizados da viga intacta e danificada

VIGA INTACTA				VIGA DANIFICADA			
	Experimental	Numérico			Experimental	Numérico	
	Freq. (Hz)	Freq. (Hz)	Erro		Freq. (Hz)	Freq. (Hz)	Erro
1°Freq.	6,0256	6,0106	0,249%	1°Freq.	5,9685	6,0012	-0,548%
2°Freq.	23,5977	23,7933	-0,829%	2°Freq.	23,6595	23,7930	-0,564%
3°Freq.	53,4709	53,5888	-0,220%	3°Freq.	53,2127	53,4964	-0,533%

Com o modelo numérico atualizado os modelos de danos com as propriedades da Tabela 5.11 foram refeitos e uma nova rede, RNA V, foi criada.

RNA V:

Além das características já apresentadas na Tabela 5.7, para o treinamento da RNA V foram utilizadas as frequências da viga intacta e dos modelos atualizados com as características dos

danos D1 a D73, apresentados na Tabela 5.11. No Anexo B são apresentadas as três frequências dos 73 modelos, utilizadas para o treinamento da RNA V. Para o teste utilizaram-se os dados experimentais de Ortiz Morales (2016) e, como parâmetro de comparação, os dados do modelo numérico danificado com as mesmas características (Tabela 5.12).

Para observar a influência da função de ativação e quantidade de neurônios, foram criadas 36 configurações de redes. Com relação às funções de ativação foram usadas as funções Tansig (tangente-hiperbólica), Logsig (sigmoide) e Purelin (linear), apresentadas no capítulo 3.3 na Figura 3.7. Por se tratar de uma rede com 2 camadas foi possível definir a função de ativação que seria utilizada para calcular cada camada, com base nisso foi feita uma combinação entre as três funções de ativação, o que totalizou 9 configurações de rede. Cada configuração foi treinada e testada com quatro números de neurônios (5, 10, 25 e 50), totalizando assim as 36 configurações de rede.

Com relação aos parâmetros de treinamento na Tabela 5.15 são apresentados os valores do erro quadrático (MSE) e do fator R, para todas as funções de ativação e quantidade de neurônios testadas. Nas Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18 são apresentados os resultados dos testes com dados experimentais (exp) e numéricos (num) para as 36 configurações de rede.

Tabela 5.15. Padrões do treinamento da RNA V

Função de Ativação	Nº de Neurônios	MSE	R	Função de Ativação	Nº de Neurônios	MSE	R	Função de Ativação	Nº de Neurônios	MSE	R
Tansig	5	10 ¹	0,94	Logsig	5	10 ²	0,94	Purelin	5	10 ²	0,69
	10	10 ¹	0,94		10	10 ²	0,93		10	10 ²	0,69
	25	10 ²	0,92		25	10 ²	0,93		25	10 ²	0,69
	50	10 ²	0,89		50	10 ²	0,88		50	10 ²	0,68
Tansig	5	10 ²	0,91	Logsig	5	10 ²	0,90	Purelin	5	10 ²	0,83
	10	10 ²	0,89		10	10 ²	0,91		10	10 ²	0,82
	25	10 ²	0,89		25	10 ²	0,89		25	10 ²	0,83
	50	10 ²	0,89		50	10 ²	0,83		50	10 ²	0,83
Purelin	5	10 ¹	0,95	Logsig	5	10 ¹	0,91	Purelin	5	10 ²	0,66
	10	10 ¹	0,96		10	10 ²	0,93		10	10 ²	0,66
	25	10 ¹	0,90		25	10 ²	0,88		25	10 ²	0,66
	50	10 ²	0,80		50	10 ²	0,82		50	10 ²	0,66

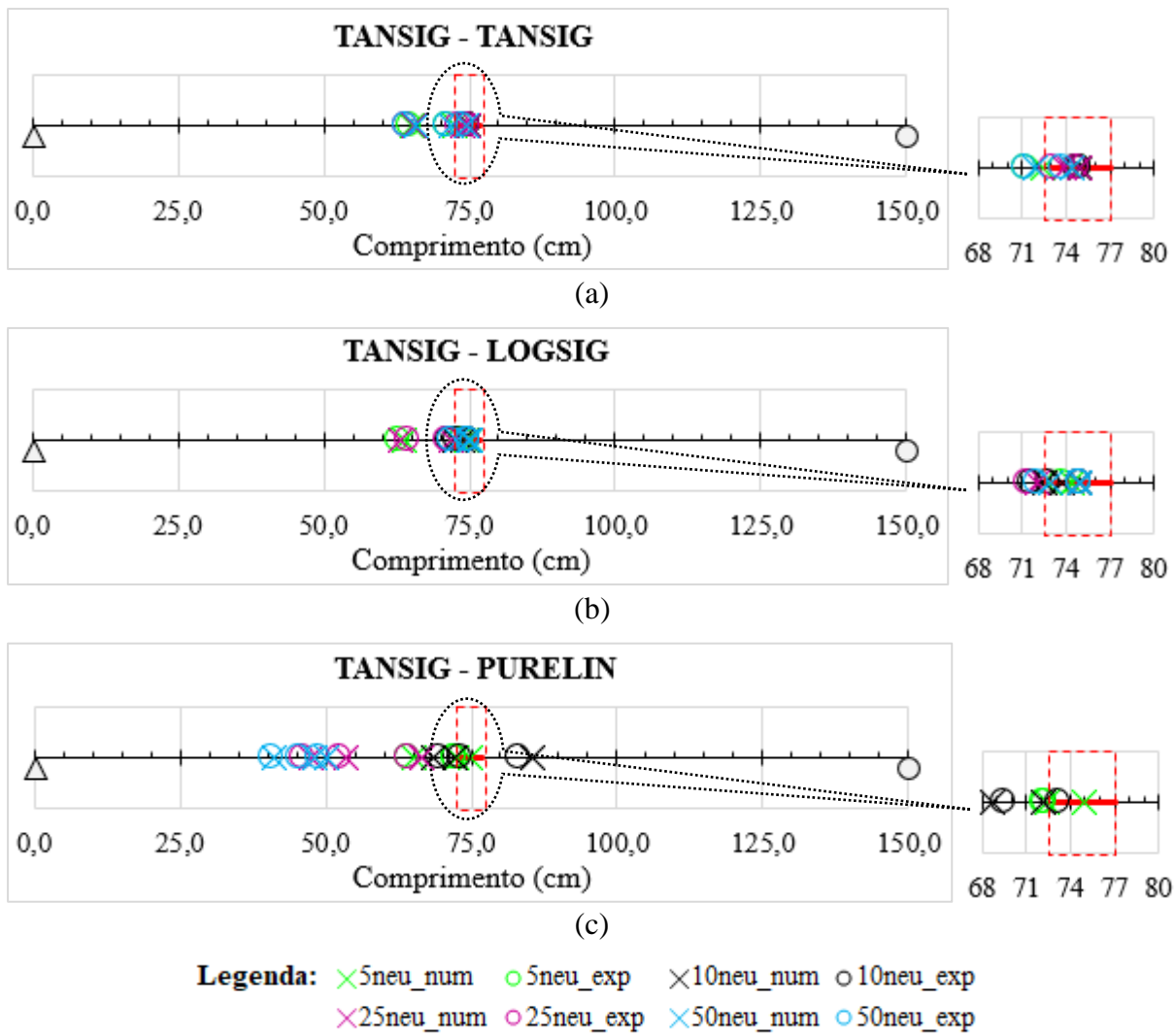
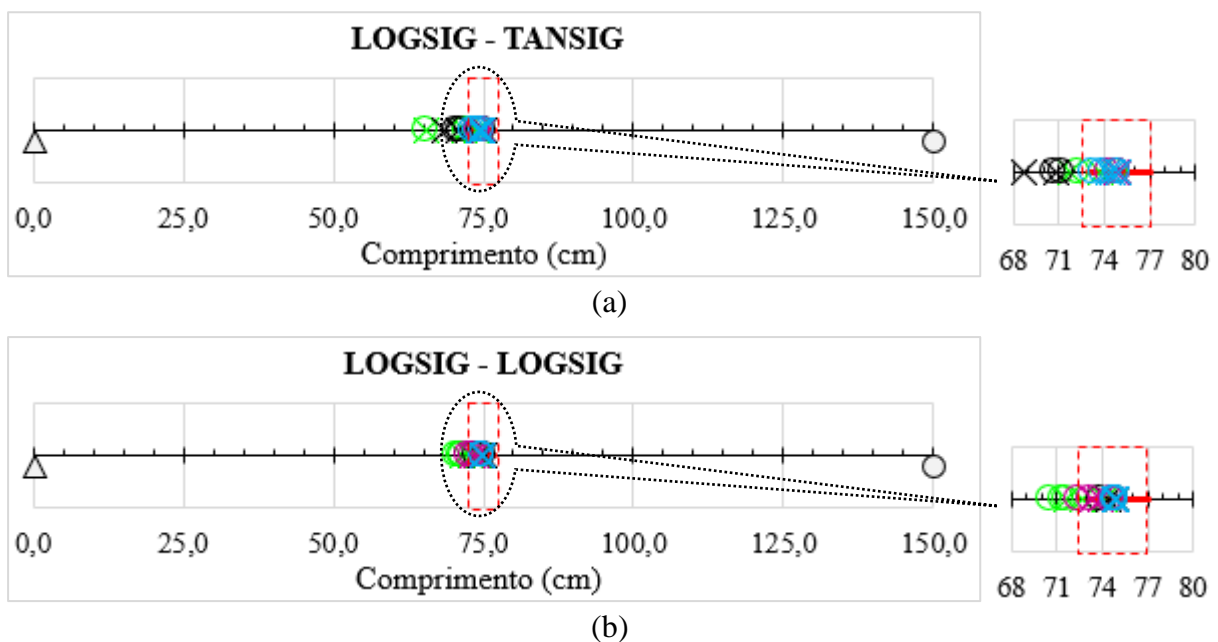


Figura 5.16. Resultados da fase de teste da RNA V (a) Função Tansig – Tansig (b) Função Tansig – Logsig (c) Função Tansig – Purelin



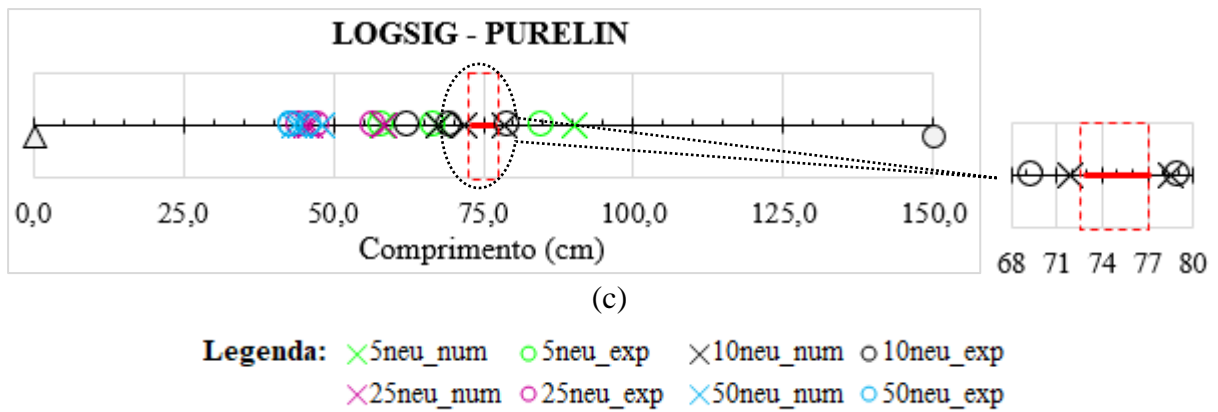


Figura 5.17. Resultados da fase de teste da RNA V (a) Função Logsig – Tansig (b) Função Logsig – Logsig (c) Função Logsig – Purelin

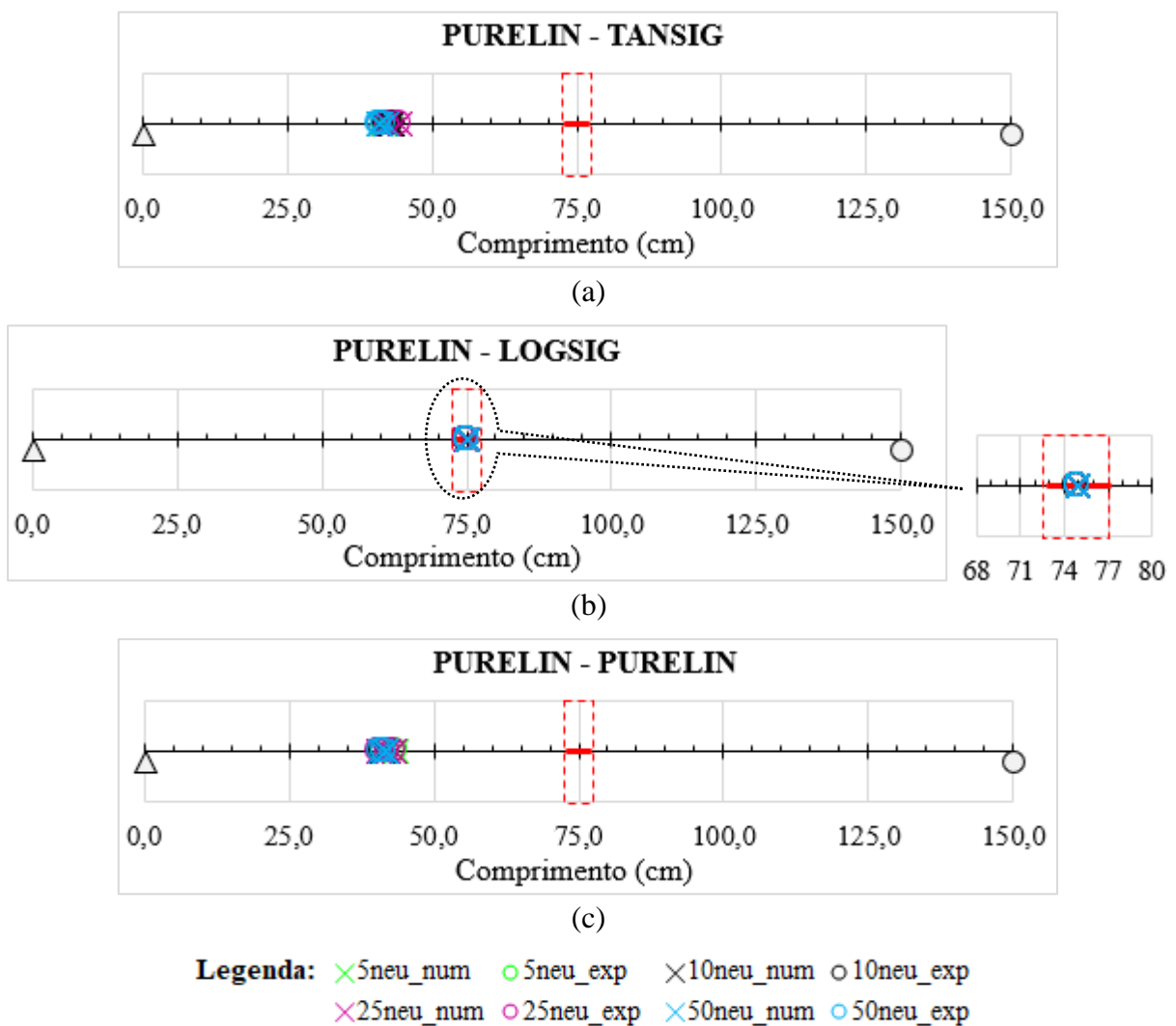


Figura 5.18. Resultados da fase de teste da RNA V (a) Função Purelin – Tansig (b) Função Purelin – Logsig (c) Função Purelin – Purelin

Com relação as redes com as funções de ativação Tansig – Logsig, Logsig – Logsig e Purelin – Logsig apenas uma parcela dos dados de saída calculados foram associados à saída desejada (output = target), como pode ser visto um exemplo na Figura 5.19. Este comportamento ocorreu para as quatro quantidades de neurônios testadas.

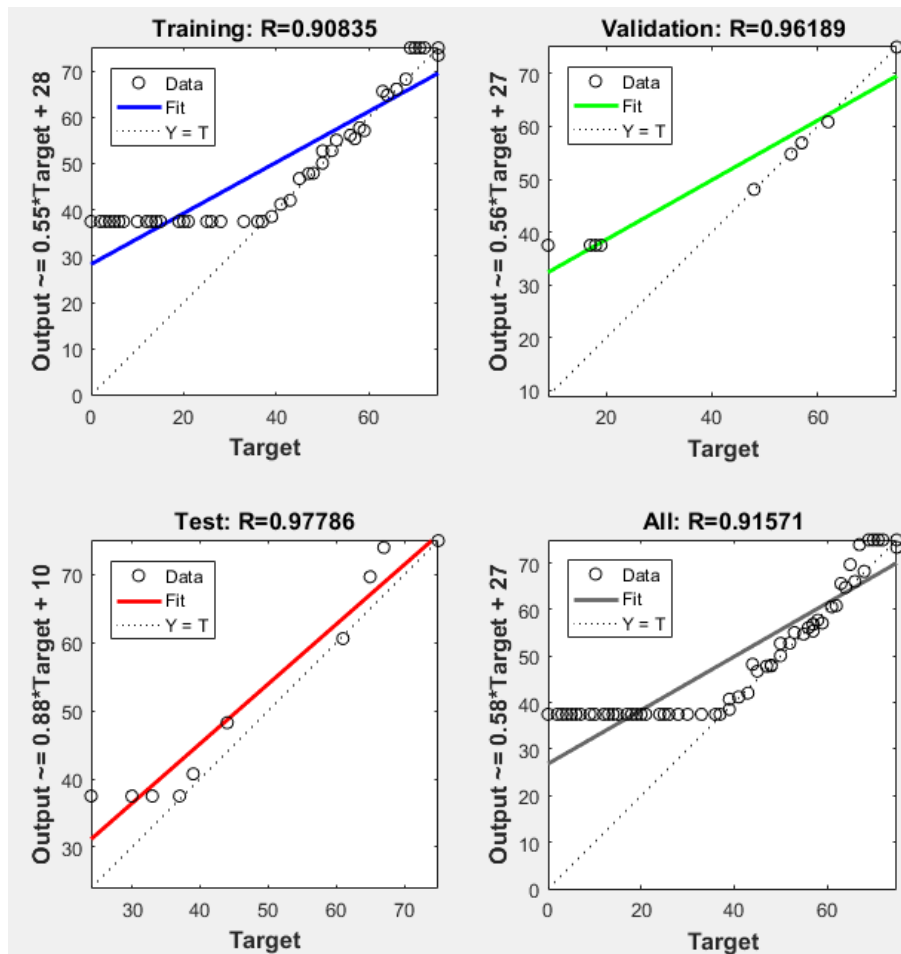


Figura 5.19. Gráfico da *Regression* obtido na rede com função de ativação Tansig – Logsig com 5 neurônios

Já nas funções Purelin – Tansig, e Purelin – Purelin o valor do fator R foi baixo, representando que o treinamento foi ruim. Mesmo com sucessíveis treinamentos da rede não foi possível aumentá-lo.

Com relação às redes que utilizaram as funções de ativação Tansig – Purelin e Logsig – Purelin os resultados na fase de teste foram incoerentes com os parâmetros de treinamento apresentados, mostrando não serem redes confiáveis.

Por fim, as redes com função de treinamento Tansig – Tansig e Logsig – Tansig apresentaram os melhores resultados. Porém, a rede com função de ativação Logsig – Tansig apresentou trechos com treinamento falho, como pode ser visto em um exemplo apresentado na Figura

5.20, e os bons resultados obtidos na fase de teste, podem ser atribuídos ao fato da região danificada da viga estar fora dos trechos não treinados da rede.

Sendo assim, a rede que apresentou o melhor desempenho foi a que utilizou a função de ativação Tansig – Tansig. Com relação à quantidade de neurônios, pôde-se observar que o aumento provocou parâmetros de treinamento e resultados da fase de teste piores, mas poucos neurônios também não apresentaram bons resultados. Sendo assim, a melhor configuração de rede foi com a função de ativação Tansig – Tansig e 10 neurônios.

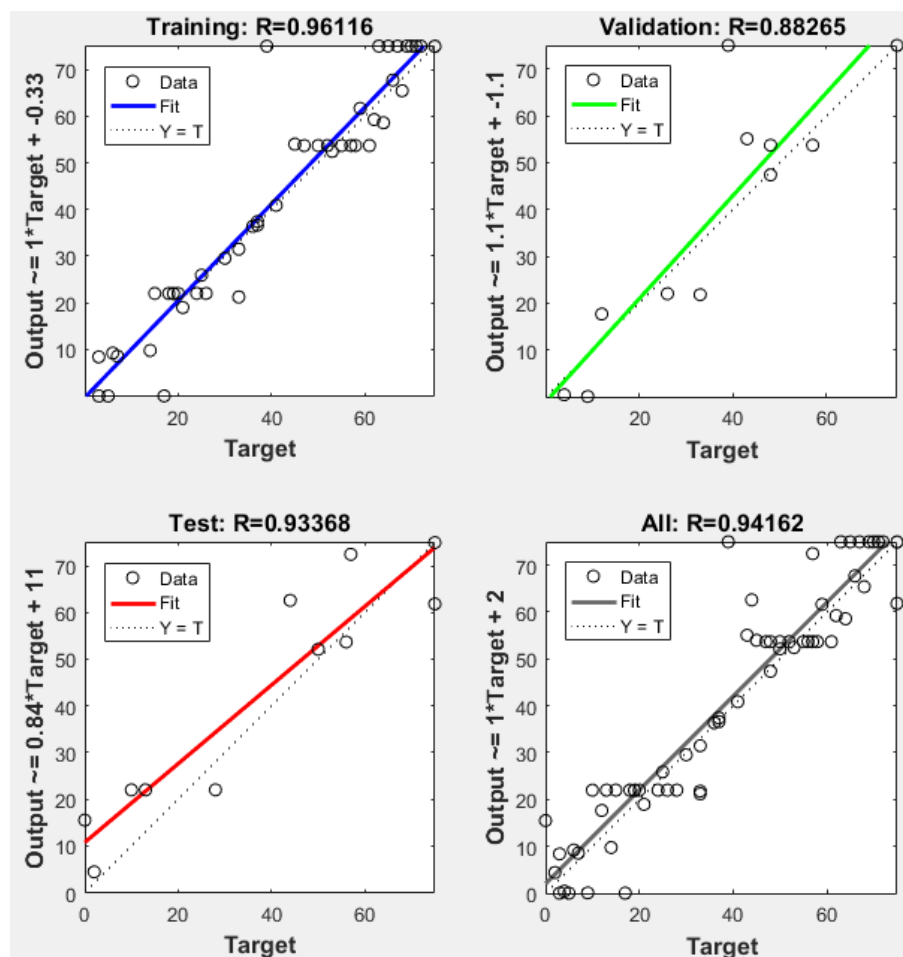


Figura 5.20. Gráfico da *Regression* obtido na rede com função de ativação Logsig – Tansig com 5 neurônios

Definida a melhor configuração de RNA e conjunto de dados utilizados para o treinamento decidiu-se testar estes parâmetros em outra viga. A seguir será apresentada a viga escolhida com suas propriedades na configuração intacta e danificada. Além disso, também são apresentadas as características dos modelos numéricos e os resultados obtidos na avaliação de dano.

5.1.3.1. Validação da RNA criada para outro modelo de viga

A viga escolhida para o segundo teste foi ensaiada no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília por Brasiliano (2005). Trata-se de uma viga metálica com perfil U 101,6mm x 4,67mm em aço ASTM-A36, com comprimento de 2155mm e condição de contorno livre-livre. Na Figura 5.21 e Tabela 5.16 são apresentadas as características da viga.

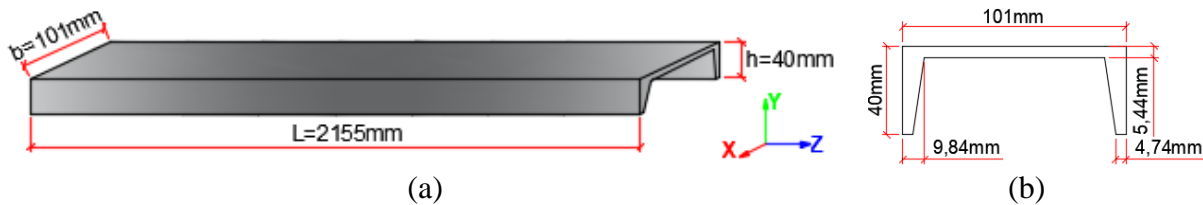


Figura 5.21. Viga ensaiada por Brasiliano (2005) (a) Representação da viga intacta (b) Seção transversal

Tabela 5.16. Propriedades da viga ensaiada por Brasiliano (2005)

Propriedades	Valores
Área da Seção Transversal - A	$1,053 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Momento de Inércia - I	$1,302 \times 10^{-7} \text{ m}^4$
Módulo de Elasticidade - E	207GPa
Massa Específica - ρ	7850 kg/m ³
Massa por metro - \bar{m}	8,27 kg/m

O modelo da viga intacta foi dividido em 33 elementos com comprimento de 0,0653m. Foram utilizados 7 acelerômetros para obter as cinco primeiras frequências e modos de vibração da viga. Os ensaios foram divididos em 10 etapas (E1, E2, E3, ... E10), em cada etapa um conjunto de quatro acelerômetros permaneceu fixos para referência e os outros três acelerômetros se moveram, para obter os deslocamentos de cada um dos 34 nós da viga. Na Figura 5.22 é apresentada a discretização da viga em 33 elementos e na Tabela 5.17 as posições dos acelerômetros em cada etapa.

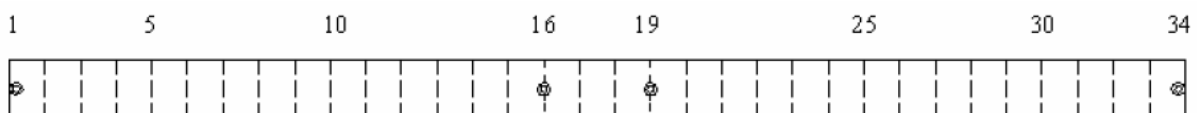


Figura 5.22. Discretização da viga e posição dos acelerômetros fixos (Brasiliano 2005)

Tabela 5.17. Posição dos acelerômetros em cada etapa do ensaio feito por Brasileiro (2005)

Etapas	Acelerômetros Móveis	Acelerômetros Fixos
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	1, 16, 19 e 34
E6	18, 20 e 21	
E7	22, 23 e 24	
E8	25, 26 e 27	
E9	28, 29 e 30	
E10	31, 32 e 33	

Para simular a condição de contorno livre-livre Brasileiro (2005) utilizou duas borrachas de espuma de alta densidade, cada uma em cima de um bloco de concreto (Figura 5.23(b)). Na Figura 5.23(a) é apresentada uma visão geral do sistema completo.

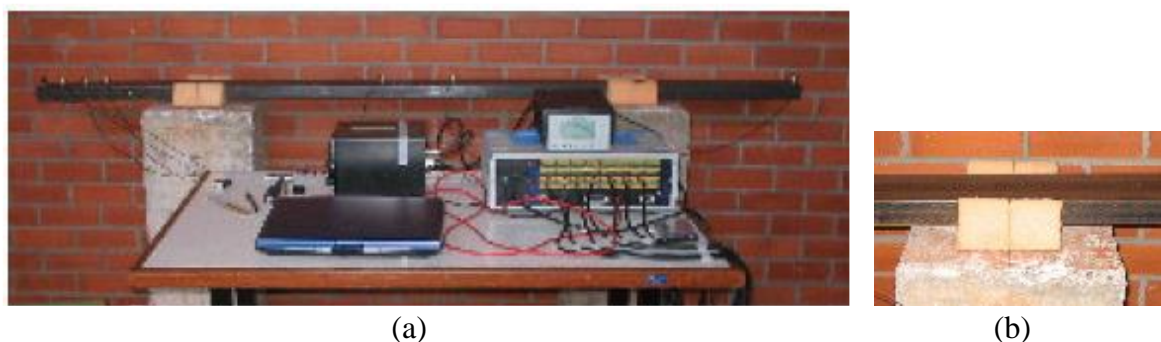


Figura 5.23. Esquema do ensaio (a) Visão geral (b) Detalhe do apoio (Brasiliano 2005)

Com relação ao modelo danificado foi inserido um dano nos elementos 18 e 19 reduzindo a altura da seção transversal em 10mm, na Figura 5.24 são apresentadas a localização do dano e seção transversal do elemento danificado. Na Tabela 5.18 são apresentadas as três primeiras frequências experimentais da viga intacta e danificada.

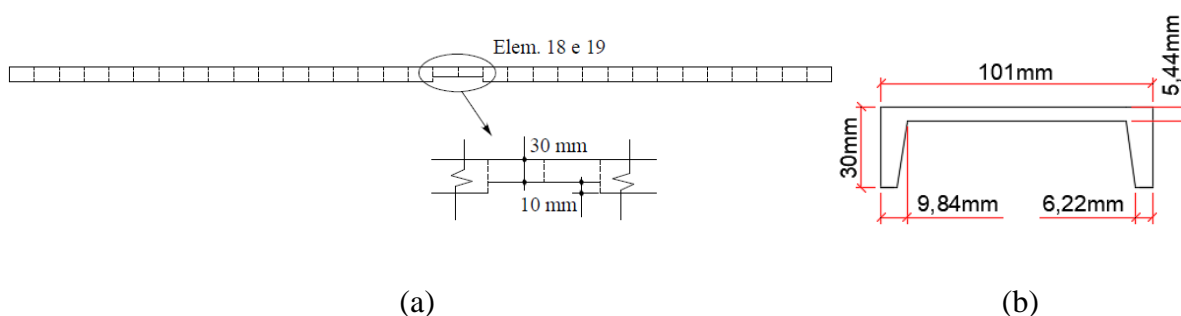


Figura 5.24. (a) Localização da região danificada (Brasiliano 2005) (b) Seção transversal danificada

Tabela 5.18. Resultados obtidos experimentalmente por Brasiliano (2005)

Frequência (Hz)	Viga Intacta	Viga Danificada
1ºFreq.	43,1889	40,1400
2ºFreq.	119,0213	117,4500
3ºFreq.	230,7397	221,9500

Com relação ao modelo numérico foram utilizados elementos Mesh2000 hexaédricos com 20 nós e prismáticos com 15 nós, devido a irregularidade da seção transversal. A viga intacta foi discretizada com elementos de 0,0653m, mesmo tamanho adotado por Brasiliano (2005), totalizando ao longo do eixo Z 33 elementos (Figura 5.25(a)). Já a seção transversal foi discretizada com 11 elementos (Figura 5.25(b)).

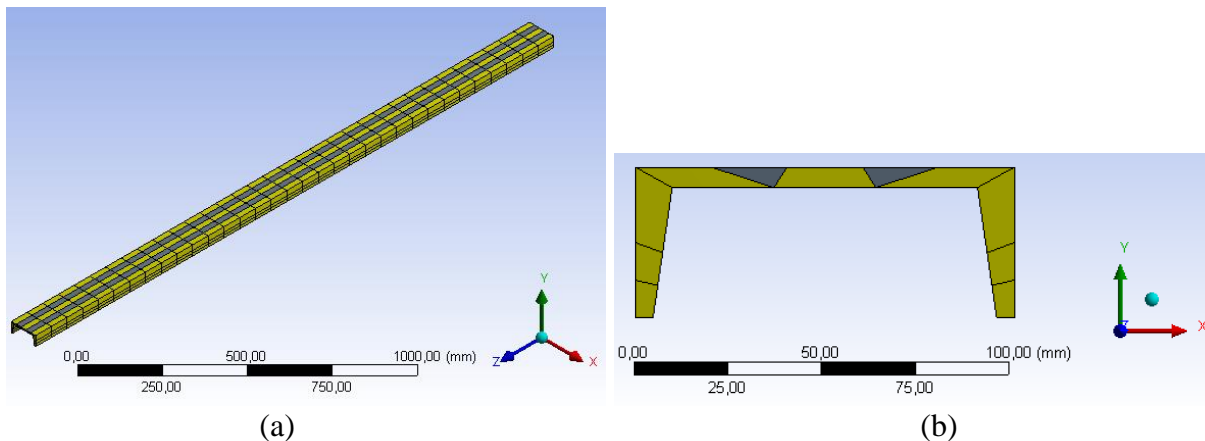


Figura 5.25. Discretização do modelo numérico da viga (a) ao longo do comprimento (b) da seção transversal

A partir do modelo numérico intacto foi inserida uma redução na seção transversal, com as características apresentadas na Figura 5.24, e criado o modelo danificado. Por fim, na Tabela 5.19 são apresentados os erros percentuais entre os modelos numéricos e experimentais, tanto para a viga intacta como danificada. Os erros encontrados foram inferiores a 2% e, ao contrário da viga de Ortiz Morales (2016), esta diferença não apresentou uma influência significativa nos resultados. Sendo assim, os modelos numéricos podem ser considerados como validados.

Tabela 5.19. Erro percentual entre os resultados numéricos da viga intacta e danificada com os resultados experimentais de Brasiliano (2005)

VIGA INTACTA				VIGA DANIFICADA			
	Experimental	Numérico			Experimental	Numérico	
	Freq. (Hz)	Freq. (Hz)	Erro		Freq. (Hz)	Freq. (Hz)	Erro
1ºFreq.	43,1889	43,5992	-0,950%	1ºFreq.	40,1400	40,7050	-1,408%
2ºFreq.	119,0213	119,6986	-0,569%	2ºFreq.	117,4500	119,1208	-1,423%
3ºFreq.	230,7397	233,0579	-1,005%	3ºFreq.	221,9500	226,2590	-1,941%

Com os modelos numéricos validados, foi possível iniciar a avaliação de dano. Na Tabela 5.20 são apresentados os danos utilizados no treinamento da rede, dados estes obtidos com base nos da Tabela 5.11, no Anexo B consta as três primeiras frequências destes modelos danificados. Para o teste, assim como a RNA V, foram utilizados os dados experimentais de Brasileiro (2005) e, como parâmetro de comparação, os dados do modelo numérico danificado com as mesmas características do modelo experimental (Tabela 5.19). Com relação aos parâmetros de treinamento a rede apresentou erro quadrático (MSE) de 10^1 e fator R entre os dados de saída obtidos (output) com os calculados (target) de 0,96.

Tabela 5.20. Propriedades dos modelos danificados utilizados para o treinamento da rede

Dano	Posição (cm)	Redução		Dano	Posição (cm)	Redução		Dano	Posição (cm)	Redução		Dano	Posição (cm)	Redução	
		Área	Inércia			Área	Inércia			Área	Inércia			Área	Inércia
D1	4	1,4%	8,6%	D20	83	7,0%	37,2%	D39	34	14,7%	64,4%	D58	37	19,4%	75,7%
D2	24	1,4%	8,6%	D21	93	7,0%	37,2%	D40	53	14,7%	64,4%	D59	47	19,4%	75,7%
D3	47	1,4%	8,6%	D22	101	7,0%	37,2%	D41	72	14,7%	64,4%	D60	62	19,4%	75,7%
D4	69	1,4%	8,6%	D23	108	7,0%	37,2%	D42	82	14,7%	64,4%	D61	75	19,4%	75,7%
D5	82	1,4%	8,6%	D24	30	10,4%	50,6%	D43	92	14,7%	64,4%	D62	88	19,4%	75,7%
D6	98	1,4%	8,6%	D25	52	10,4%	50,6%	D44	102	14,7%	64,4%	D63	101	19,4%	75,7%
D7	108	1,4%	8,6%	D26	63	10,4%	50,6%	D45	108	14,7%	64,4%	D64	108	19,4%	75,7%
D8	13	3,3%	19,5%	D27	79	10,4%	50,6%	D46	10	16,7%	69,5%	D65	9	22,2%	81,1%
D9	36	3,3%	19,5%	D28	89	10,4%	50,6%	D47	22	16,7%	69,5%	D66	14	22,2%	81,1%
D10	59	3,3%	19,5%	D29	103	10,4%	50,6%	D48	27	16,7%	69,5%	D67	26	22,2%	81,1%
D11	76	3,3%	19,5%	D30	7	12,8%	58,8%	D49	40	16,7%	69,5%	D68	37	22,2%	81,1%
D12	91	3,3%	19,5%	D31	27	12,8%	58,8%	D50	56	16,7%	69,5%	D69	53	22,2%	81,1%
D13	103	3,3%	19,5%	D32	47	12,8%	58,8%	D51	69	16,7%	69,5%	D70	68	22,2%	81,1%
D14	108	3,3%	19,5%	D33	65	12,8%	58,8%	D52	82	16,7%	69,5%	D71	80	22,2%	81,1%
D15	3	7,0%	37,2%	D34	83	12,8%	58,8%	D53	96	16,7%	69,5%	D72	95	22,2%	81,1%
D16	20	7,0%	37,2%	D35	99	12,8%	58,8%	D54	108	16,7%	69,5%	D73	108	22,2%	81,1%
D17	39	7,0%	37,2%	D36	108	12,8%	58,8%	D55	6	19,4%	75,7%				
D18	56	7,0%	37,2%	D37	4	14,7%	64,4%	D56	19	19,4%	75,7%				
D19	73	7,0%	37,2%	D38	17	14,7%	64,4%	D57	29	19,4%	75,7%				

Por fim, na Figura 5.26 são apresentados os resultados da fase de teste, ressalta-se que a rede continha função de ativação Tansig-Tansig e 10 neurônios, configurações que apresentaram o melhor desempenho da RNA V.

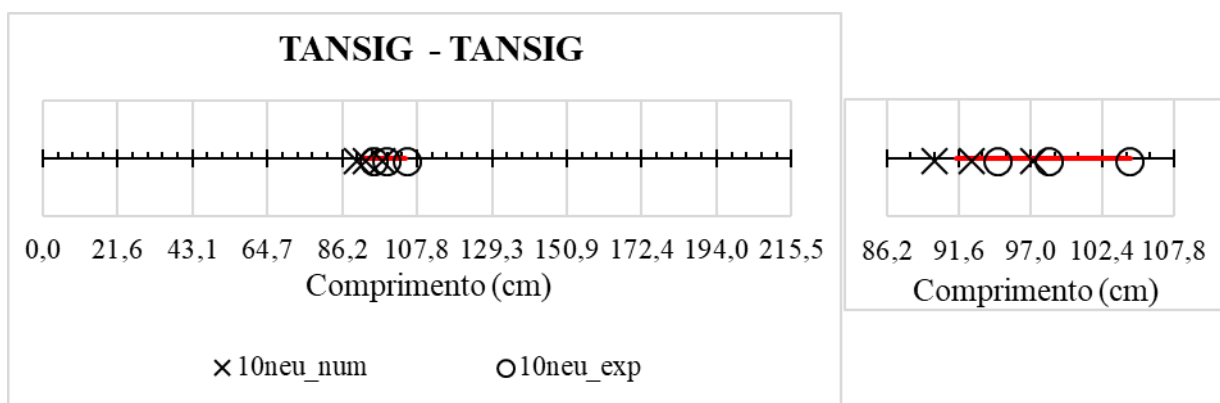


Figura 5.26. Resultados da fase de teste da RNA V com função de ativação Tansig - Tansig e 10 neurônios para a Viga de Brasileiro (2005)

A RNA V conseguiu localizar o dano tanto com os dados experimentais de Brasiliano (2005) como os de Ortiz Morales (2016), assim como os dados numéricos. Deste modo, a rede pode ser classificada como admissível para ser utilizada em casos reais.

5.2. COMPORTAMENTO DA RNA DIANTE A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

Neste item será apresentado o desempenho da RNA quando se analisa apenas a influência provocada pela temperatura nos parâmetros dinâmicos, frequências e modos de vibração. Para realizar este estudo, assim como na avaliação de dano à temperatura constante, dividiu-se este item em três partes. Na primeira, são apresentadas as características da viga intacta no que diz respeito à variação da temperatura.

Na segunda parte são indicadas as características relacionadas com a modelagem numérica. Onde se expõe as modificações feitas no modelo da viga intacta, construído para determinar as características dinâmicas à temperatura constante, e uma validação dos resultados numéricos obtidos no ANSYS (2016) com resultados experimentais.

Por fim, na terceira e última parte, é apresentado o comportamento das RNAs construídas, diante da influência da temperatura nos parâmetros dinâmicos, frequências naturais e modos de vibração.

5.2.1. Exemplo Analisado

Ortiz Morales (2016) além de obter as frequências de vibração e taxas de amortecimento da viga, cujas características encontram-se na Figura 5.1 e Tabela 5.1, também realizou um estudo entre a temperatura e os parâmetros modais. O autor realizou ensaios em condições controladas de temperatura, que variaram de 18°C a 56°C, e obteve as três primeiras frequências de vibração e taxas de amortecimento da viga apresentada no tópico 5.1.1, em sua configuração intacta e danificada.

Os parâmetros dinâmicos foram coletados iniciando em 18°C e a cada acréscimo de 2°C, ou seja, para as temperaturas de 18°, 20°, 22°, e assim sucessivamente até atingir 56°C, totalizando vinte temperaturas. Para cada temperatura o ensaio foi realizado três vezes, inicialmente para a viga intacta e depois danificada.

Para a realização deste ensaio e coleta das temperaturas, foram instaladas 8 fontes de calor e 4 sensores de temperatura na parte superior da viga (Figura 5.27), que permitiam monitorar as

temperaturas em tempo real. Na Figura 5.28 podem ser vista as fontes de calor, em amarelo, e os sensores de temperatura, destacados em azul. Por fim, a Figura 5.29 mostra a instalação do sensor na viga.

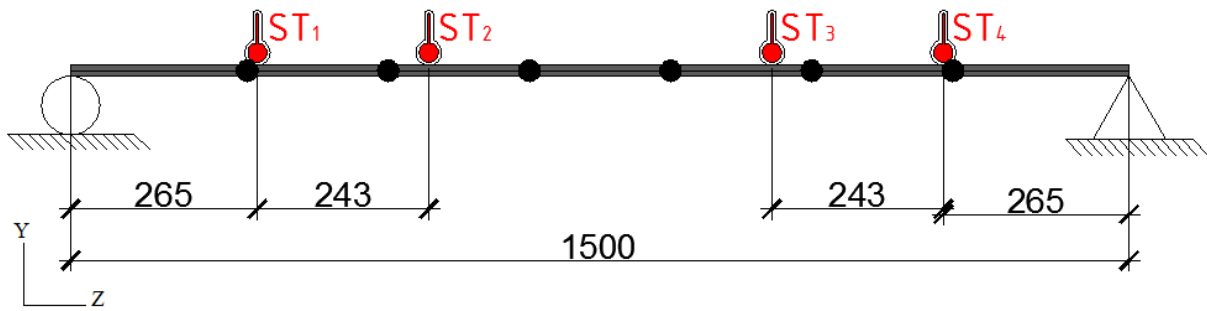


Figura 5.27. Posição dos termômetros ao longo do comprimento da viga (Ortiz Morales, 2016)

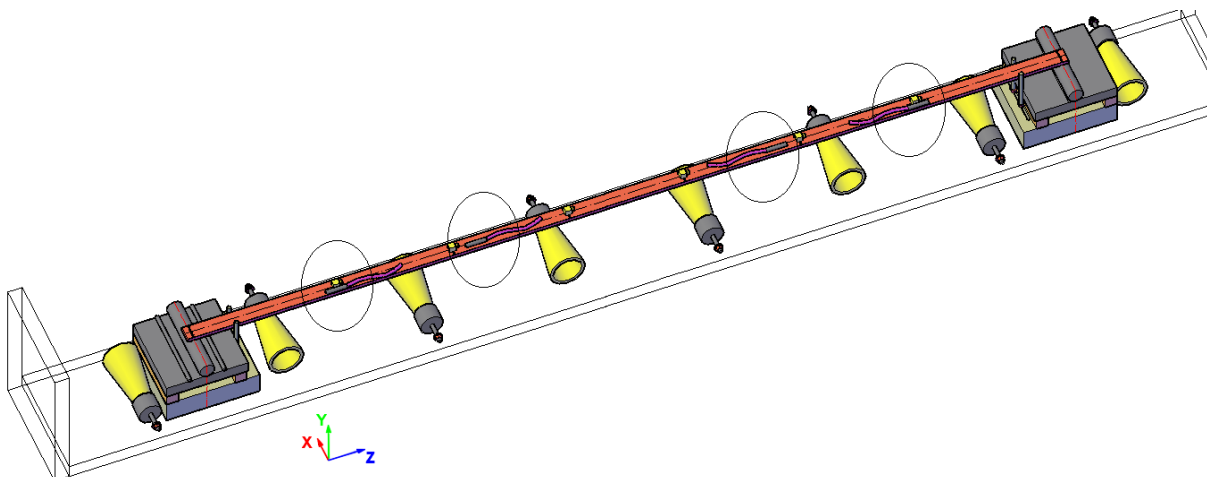


Figura 5.28. Perspectiva da instalação dos termômetros (Ortiz Morales, 2016)

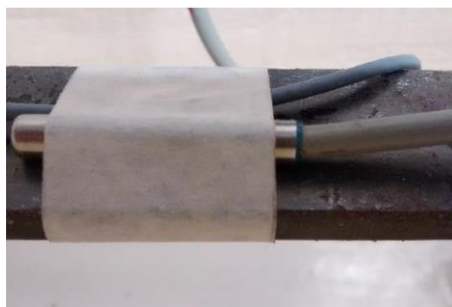


Figura 5.29. Instalação dos sensores de temperatura na viga. (Ortiz Morales, 2016)

Na Tabela 5.21 são apresentados os resultados obtidos por Ortiz Morales (2016) no ensaio da viga intacta, calculados a partir da média do valor dos três ensaios feitos para cada temperatura.

Tabela 5.21. Freqüências obtidas por Ortiz Morales (2016) para a viga intacta em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)		
	1°Freq.	2°Freq.	3°Freq.
18	6,032	23,579	53,406
22	6,000	23,598	53,166
26	6,021	23,641	53,562
30	6,002	23,569	53,695
34	5,956	23,551	53,642
38	5,939	23,490	53,189
42	5,929	23,498	53,211
46	5,930	23,477	53,161
50	5,919	23,438	52,994
54	5,913	23,440	52,925

5.2.2. Modelagem Numérica

O modelo numérico construído para avaliar a influência da temperatura nos parâmetros dinâmicos foi feito com base no modelo da viga intacta atualizado (Tabela 5.13), ou seja, utilizando elementos Mesh2000 hexaédricos com 20 nós e 10mm de comprimento. Foram acrescentadas duas considerações neste modelo. Primeiro a utilização do módulo “Static Structural”, para calcular as mudanças na geometria e depois a inserção de uma relação tabular para levar em consideração a mudança do módulo de elasticidade, uma vez que estes dois parâmetros são alterados com a variação da temperatura (Xia *et al.* 2012).

Através do módulo “Static Structural” a temperatura foi inserida como um carregamento, através da opção “Thermal Condition” contido no *software* ANSYS (2016). Com esta consideração foi possível levar em conta a influência da temperatura na geometria.

E para considerar a mudança do Módulo de Elasticidade foi criada uma tabela dentro do *software*, mais especificamente no módulo *Engineering Data*, relacionando a temperatura e o Módulo de Elasticidade (Figura 5.30(a)), com base na formulação proposta por Poh (2001) apresentada na Equação (3.21). A partir desta tabela o *software* constrói um gráfico e traça uma linha de tendência para representar o fenômeno em outras temperaturas, além das fornecidas na tabela (Figura 5.30(b)).

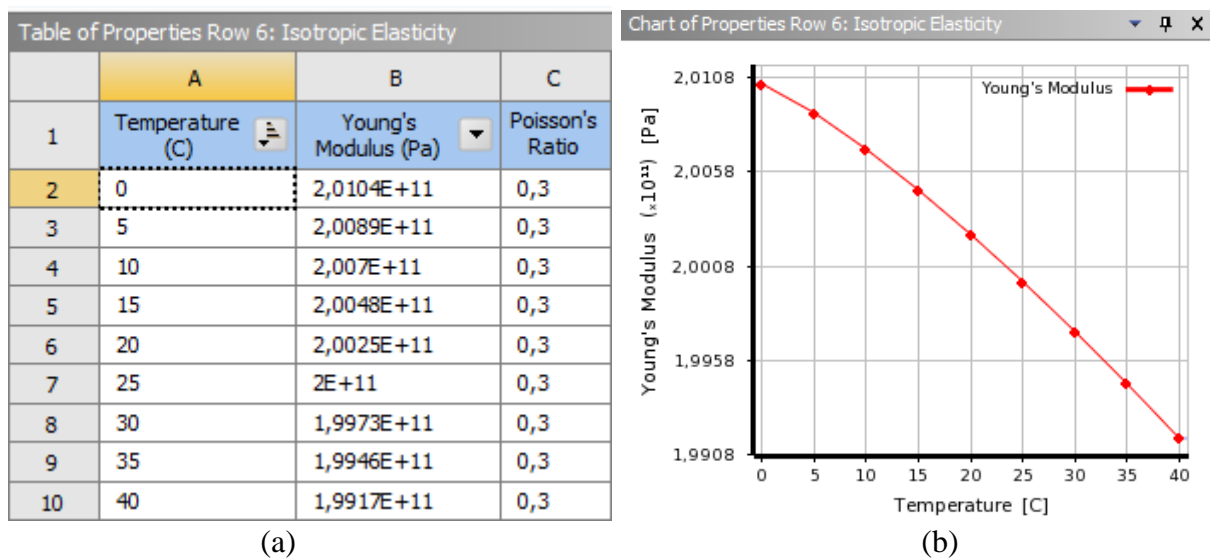


Figura 5.30. Consideração da influência da temperatura no Módulo de Elasticidade (a) Relação tabular entre a Temperatura e o Módulo de Elasticidade fornecido pelo usuário (b) Gráfico Módulo de Elasticidade \times Temperatura criado pelo *software*

Por fim, para validar o modelo numérico criado, na Tabela 5.22 é apresentado o erro percentual entre os resultados experimentais de Ortiz Morales (2016) com os resultados numéricos para algumas temperaturas. Com erros inferiores a 1,2% o modelo foi considerado como validado.

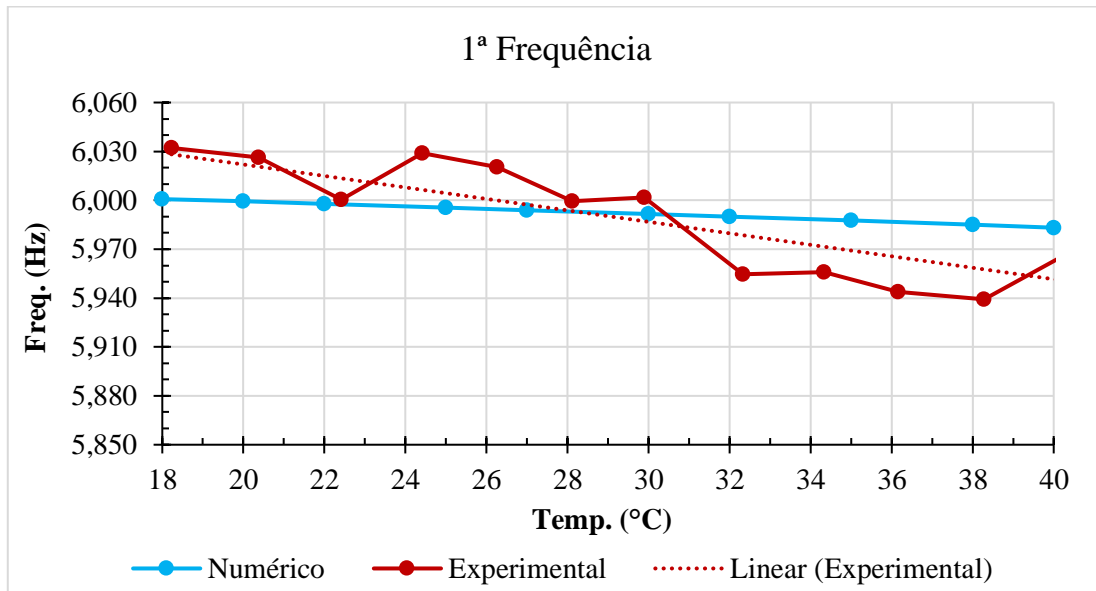
Tabela 5.22. Erro percentual entre os resultados obtidos experimentalmente por Ortiz Morales (2016) com os resultados numéricos da viga intacta em diferentes temperaturas

Temp. (°C)	Experimental			Numérico					
	1°Freq. (Hz)	2°Freq. (Hz)	3°Freq. (Hz)	1°Freq. (Hz)	Erro	2°Freq. (Hz)	Erro	3°Freq. (Hz)	Erro
18	6,032	23,579	53,406	6,0157	0,272%	23,8136	-0,995%	53,6346	-0,428%
22	6,000	23,598	53,166	6,0128	-0,207%	23,8022	-0,864%	53,6088	-0,833%
26	6,021	23,641	53,562	6,0098	0,178%	23,7902	-0,632%	53,5817	-0,037%
30	6,002	23,569	53,695	6,0067	-0,081%	23,7776	-0,887%	53,5535	0,263%
34	5,956	23,551	53,642	6,0033	-0,798%	23,7645	-0,909%	53,5240	0,220%
38	5,939	23,490	53,189	5,9999	-1,021%	23,7509	-1,109%	53,4934	-0,573%

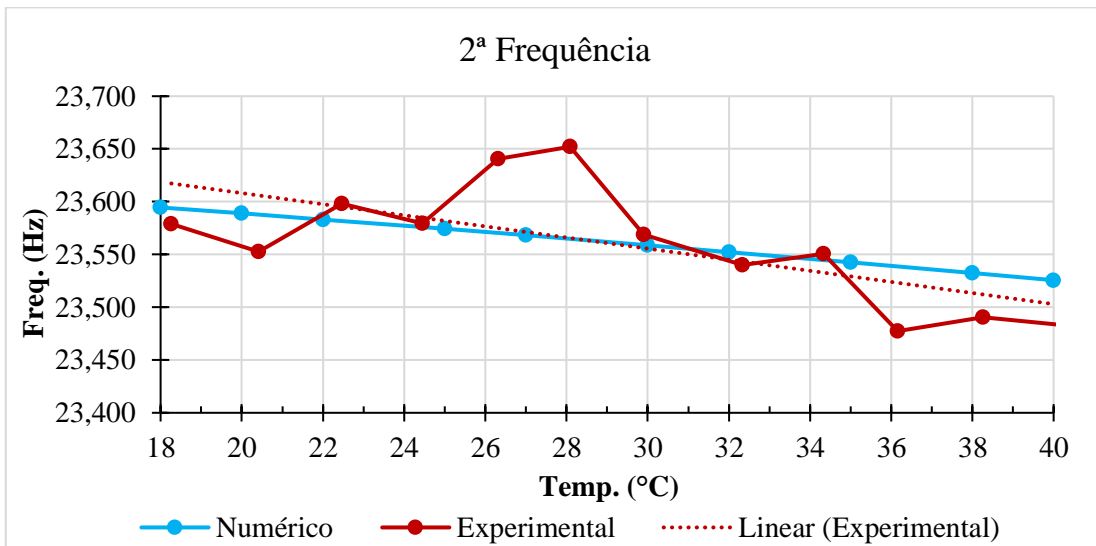
5.2.3. Desempenho da RNA sob influência da temperatura

Foi realizada uma avaliação da influência da variação da temperatura nas características dinâmicas, frequências naturais e modos de vibração, e o desempenho da RNA diante dessa influência. Para isto, foram simulados no modelo numérico intacto da viga o intervalo de temperatura entre 0° a 40°C. Optou-se por este intervalo uma vez que grande parte da temperatura ambiente mundial encontra-se neste intervalo. Destaca-se que não foram consideradas temperaturas negativas devido à necessidade em se considerar fatores adicionais, como congelamento dos materiais.

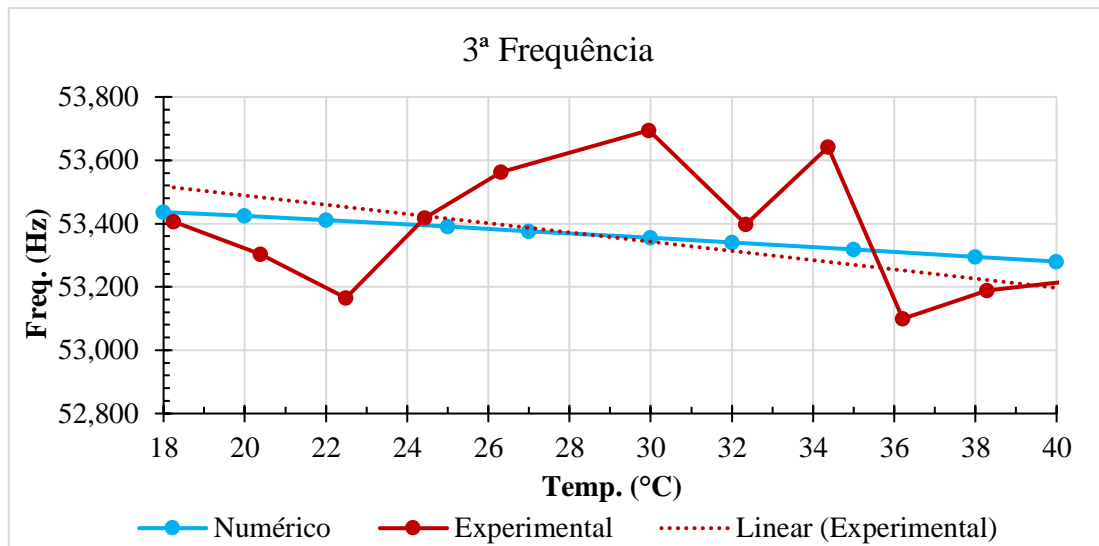
Inicialmente, estudou-se a influência da temperatura nas frequências e modos de vibração. Com relação à frequência, o aumento da temperatura provocou uma redução nas frequências, isto foi observado tanto nos dados obtidos experimentalmente como numericamente, Figura 5.31. Por sua vez, os modos de vibração permaneceram inalterados sob qualquer temperatura, tanto nos dados numéricos como experimentais, ou seja, a variação da temperatura não provocou mudanças no modo de vibração. Na Figura 5.32 são apresentados os modos obtidos numericamente.



(a)

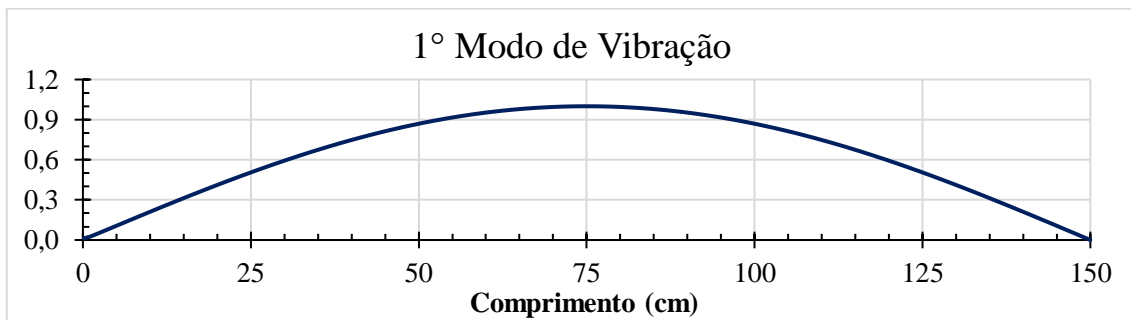


(b)

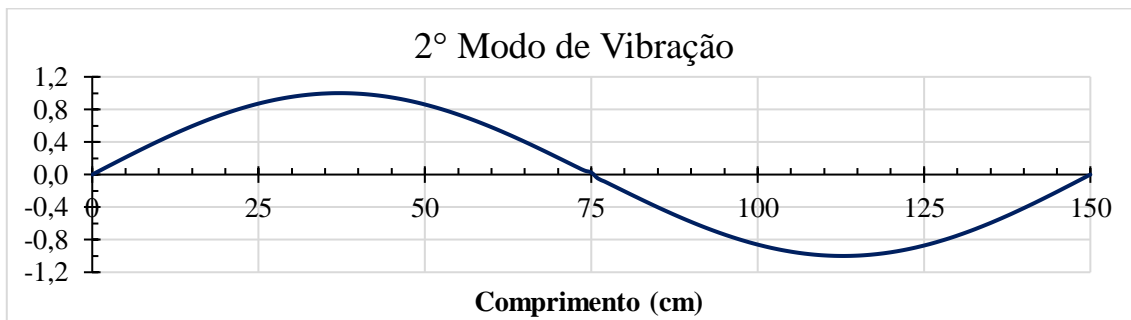


(c)

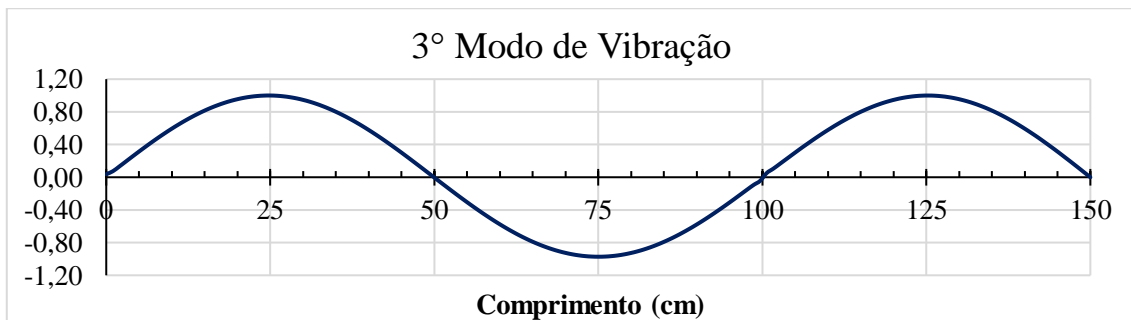
Figura 5.31. Frequências alteradas pela variação da temperatura (a) 1º Frequência (b) 2º Frequência (c) 3º Frequência



(a)



(b)



(c)

Figura 5.32. Modos de vibração obtidos do modelo numérico sob qualquer temperatura (a) 1º Modo (b) 2º Modo (c) 3º Modo

Uma vez que os modos de vibração não apresentaram mudanças com a variação da temperatura, para avaliar o desempenho da RNA perante este fenômeno, utilizou-se apenas as frequências para o treinamento e teste. As frequências foram utilizadas como dado de entrada com o objetivo de obter a temperatura em que a viga estava. Foram criadas duas redes, uma utilizando dados para o treinamento e teste apenas numéricos e outra com dados experimentais. Na Tabela 5.23 são apresentadas algumas características das duas RNAs criadas.

Destaca-se que, assim como para a viga danificada, experimentalmente foram obtidas apenas as três primeiras frequências, padrão utilizado como dado de entrada. Além disso, optou-se por utilizar apenas a função de ativação “Tansig”, já que esta apresentou os melhores resultados na avaliação de dano apresentada no item 5.1 e o objetivo final do trabalho consiste em averiguar se a variação da temperatura interfere na avaliação de dano.

Tabela 5.23. Características das 2 RNAs criadas para analisar o desempenho da técnica diante da influência apenas da temperatura nas características dinâmicas da viga

RNA	Características da rede			Dados para o treinamento e teste da rede			Características do treinamento
	Tipo de Aprendizado	Arquitetura	Função de Ativação	Padrão utilizado como dado de entrada	Padrão utilizado como dado de saída	Quantidade de modelos utilizados para o treinamento	Número de Neurônios
VI	Supervisionado com o algoritmo de <i>Levenberg-Marquardt backpropagation</i>	Duas camadas	Tansig	3 primeiras frequências de dados numéricos	Temperatura	20	5, 10, 25 e 50
VII				3 primeiras frequências de dados experimentais		20	

RNA VI:

Na Tabela 5.24 são apresentadas as temperaturas do modelo numérico e suas respectivas frequências, utilizadas para o treinamento e teste da rede. As temperaturas de T1 a T20 foram utilizadas no treinamento da rede e as T21 e T22 no teste. Com relação aos parâmetros de treinamento, para todas as quantidades de neurônios testadas, a rede apresentou erro quadrático (MSE) de 10^{-1} e fator R entre os dados de saída obtidos (output) com os calculados (target) de 0,99.

Tabela 5.24. Frequências utilizadas para o treinamento e teste da rede com dados numéricos (RNA VI)

Temperatura	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	Temperatura	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)		
T1	0	6,0262	23,8552	53,7283	T12	21	6,0136	23,8051	53,6154
T2	1	6,0258	23,8534	53,7242	T13	24	6,0114	23,7962	53,5954
T3	3	6,0249	23,8498	53,7160	T14	28	6,0082	23,7839	53,5676
T4	6	6,0234	23,8439	53,7027	T15	29	6,0074	23,7808	53,5606
T5	7	6,0228	23,8416	53,6976	T16	31	6,0058	23,7744	53,5461
T6	9	6,0217	23,8370	53,6873	T17	33	6,0042	23,7678	53,5314
T7	13	6,0191	23,8271	53,6649	T18	36	6,0016	23,7578	53,5089
T8	15	6,0178	23,8220	53,6533	T19	38	5,9999	23,7509	53,4934
T9	16	6,0171	23,8192	53,6471	T20	40	5,9982	23,7441	53,4780
T10	17	6,0164	23,8164	53,6409	T21	18	6,0157	23,8136	53,6346
T11	19	6,0150	23,8109	53,6284	T22	34	6,0033	23,7645	53,5240

Foram realizados três testes para cada quantidade de neurônios (5, 10, 25 e 50 neurônios), totalizando 12 testes da RNA VI para cada temperatura (T21 e T22). Na Figura 5.33 são apresentados os resultados destes testes.

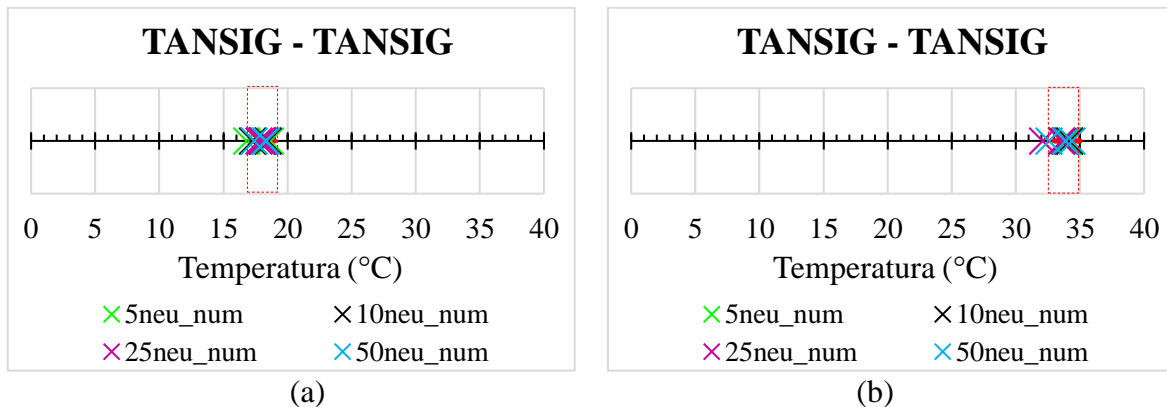


Figura 5.33. Resultados da fase de teste da RNA VI (a) Temperatura T21 (b) Temperatura T22

RNA VII:

Para realizar um estudo na mesma faixa de temperatura que a RNA VI, de 0° a 40°C, utilizou-se para o treinamento e teste da RNA VII os dados obtidos a partir da função que representa a linha de tendência, em vermelho tracejado, na Figura 5.31, uma vez que experimentalmente foram obtidas apenas temperatura entre 18° e 56°C.

Na Tabela 5.25 são apresentadas as temperaturas experimentais e suas respectivas frequências, utilizadas para o treinamento e teste da rede. As temperaturas de T1 a T20 foram utilizadas no treinamento da rede e as T21 e T22 no teste. Com relação aos parâmetros de treinamento, para todas as quantidades de neurônios testadas, a rede apresentou erro quadrático (MSE) de 10^{-1} e fator R entre os dados de saída obtidos (output) com os calculados (target) de 0,99.

Tabela 5.25. Frequências utilizadas para o treinamento e teste da rede com dados experimentais (RNA VII)

Temperatura	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	Temperatura	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)		
T1	0	6,0924	23,7144	53,5138	T12	21	6,0185	23,6032	53,4124
T2	1	6,0889	23,7091	53,5089	T13	24	6,0079	23,5873	53,3979
T3	3	6,0818	23,6985	53,4993	T14	28	5,9938	23,5661	53,3786
T4	6	6,0713	23,6826	53,4848	T15	29	5,9903	23,5608	53,3738
T5	7	6,0678	23,6773	53,4800	T16	31	5,9832	23,5502	53,3642
T6	9	6,0607	23,6668	53,4703	T17	33	5,9762	23,5396	53,3545
T7	13	6,0466	23,6456	53,4510	T18	36	5,9656	23,5237	53,3400
T8	15	6,0396	23,6350	53,4414	T19	38	5,9586	23,5131	53,3304
T9	16	6,0361	23,6297	53,4365	T20	40	5,9516	23,5025	53,3207
T10	17	6,0325	23,6244	53,4317	T21	18	6,0290	23,6191	53,4269
T11	19	6,0255	23,6138	53,4221	T22	34	5,9727	23,5343	53,3497

Foram realizados três testes para cada quantidade de neurônio, totalizando 12 testes da RNA VII para cada temperatura (T21 e T22). Na Figura 5.34 são apresentados os resultados destes testes.

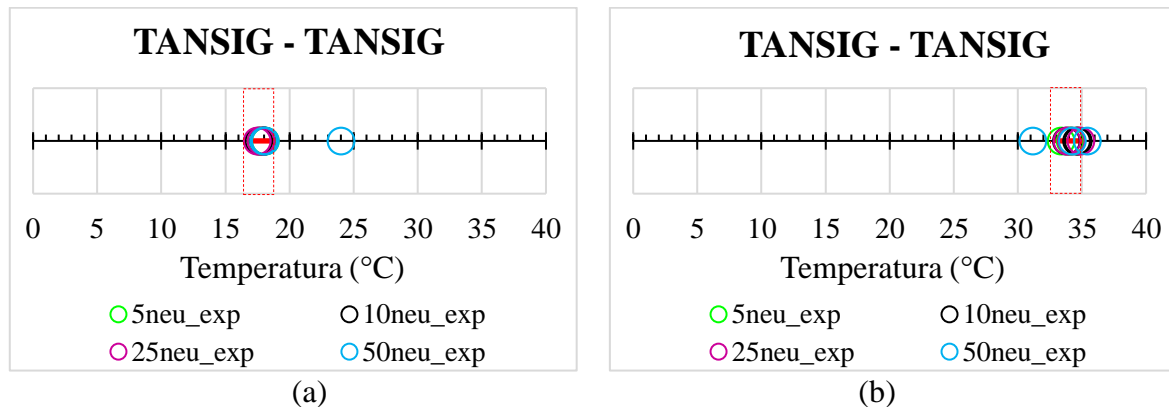


Figura 5.34. Resultados da fase de teste da RNA VII (a) Temperatura T21 (b) Temperatura T22

As redes RNA VI e RNA VII foram capazes de identificar o padrão nas frequências modificadas pela temperatura e determinar sob qual temperatura encontrava-se a viga, em praticamente todos os testes, independentemente da quantidade de neurônios e utilizando tanto dados numéricos como experimentais.

5.3. AVALIAÇÃO DE DANO COM VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

A partir da avaliação de dano a temperatura constante e do desempenho da RNA diante das mudanças provocadas pela temperatura nos parâmetros dinâmicos, foi realizada uma última análise para avaliar a influência da temperatura na localização do dano.

O objetivo desta análise era verificar se a RNA seria capaz de identificar quando as mudanças nas frequências eram ocasionadas pela presença do dano e quando pela variação da temperatura.

A rede foi criada com base nas características da RNA V e RNA VI, rede para avaliação de dano a temperatura constante e rede para avaliar a influência da temperatura nas frequências naturais. Na Tabela 5.26 são apresentadas as características da rede criada e na Tabela 5.27 os dados dos modelos numéricos utilizados para o treinamento da rede.

Tabela 5.26. Características da rede criada para avaliar a influência da temperatura na avaliação de dano

RNA	Características da rede			Dados para o treinamento e teste da rede			Características do treinamento
	Tipo de Aprendizado	Arquitetura	Função de Ativação	Padrão utilizado como dado de entrada	Padrão utilizado como dado de saída	Quantidade de modelos utilizados para o treinamento	Número de Neurônios
VIII	Supervisionado com o algoritmo de treinamento <i>Levenberg-Marquardt backpropagation</i>	Duas camadas	Tansig	Temperatura mais 3 primeiras frequências	Distância do apoio ao dano	94	5, 10, 25 e 50

Tabela 5.27. Propriedades dos modelos intactos e danificados utilizados para o treinamento da RNA VIII

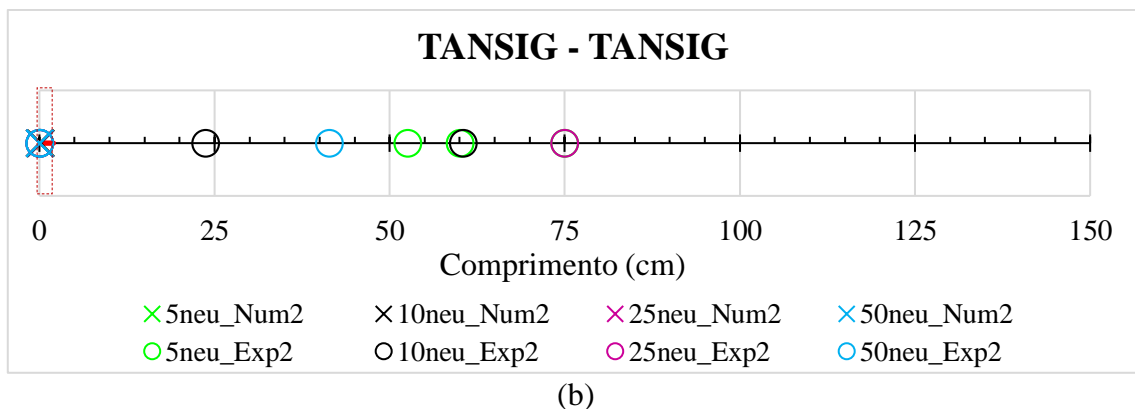
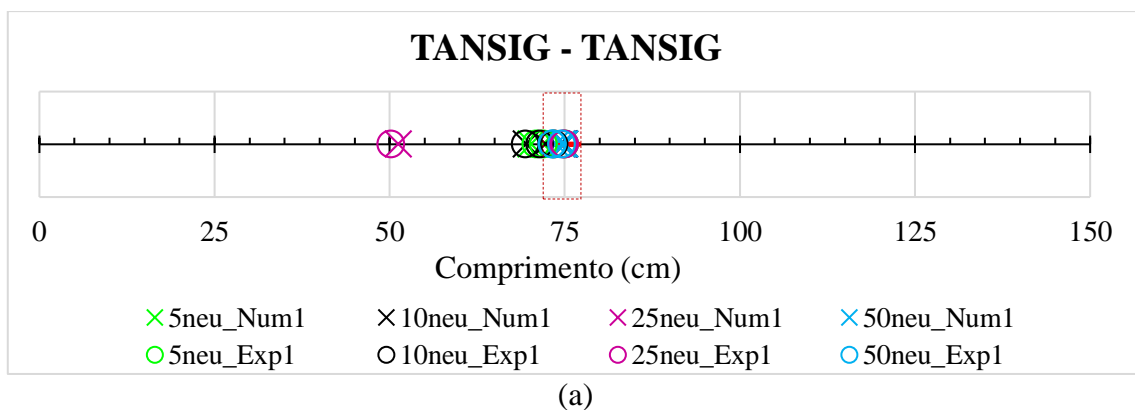
Viga	Temp. (°C)	Posição (cm)	Redução		Viga	Temp. (°C)	Posição (cm)	Redução		Viga	Temp. (°C)	Posição (cm)	Redução	
			Área	Inércia				Área	Inércia				Área	Inércia
V1	0	0	0%	0%	V33	25	63	8,5%	23,3%	V65	25	71	28,8%	63,9%
V2	1	0	0%	0%	V34	25	72	8,5%	23,3%	V66	25	75	28,8%	63,9%
V3	3	0	0%	0%	V35	25	75	8,5%	23,3%	V67	25	7	33,9%	71,1%
V4	6	0	0%	0%	V36	25	2	16,9%	42,7%	V68	25	15	33,9%	71,1%
V5	7	0	0%	0%	V37	25	14	16,9%	42,7%	V69	25	19	33,9%	71,1%
V6	9	0	0%	0%	V38	25	27	16,9%	42,7%	V70	25	28	33,9%	71,1%
V7	13	0	0%	0%	V39	25	39	16,9%	42,7%	V71	25	39	33,9%	71,1%
V8	15	0	0%	0%	V40	25	51	16,9%	42,7%	V72	25	48	33,9%	71,1%
V9	16	0	0%	0%	V41	25	58	16,9%	42,7%	V73	25	57	33,9%	71,1%
V10	17	0	0%	0%	V42	25	65	16,9%	42,7%	V74	25	67	33,9%	71,1%
V11	19	0	0%	0%	V43	25	70	16,9%	42,7%	V75	25	75	33,9%	71,1%
V12	21	0	0%	0%	V44	25	75	16,9%	42,7%	V76	25	4	37,3%	75,3%
V13	24	0	0%	0%	V45	25	21	20,3%	49,4%	V77	25	13	37,3%	75,3%
V14	25	0	0%	0%	V46	25	36	20,3%	49,4%	V78	25	20	37,3%	75,3%
V15	28	0	0%	0%	V47	25	44	20,3%	49,4%	V79	25	26	37,3%	75,3%
V16	29	0	0%	0%	V48	25	55	20,3%	49,4%	V80	25	33	37,3%	75,3%
V17	31	0	0%	0%	V49	25	62	20,3%	49,4%	V81	25	43	37,3%	75,3%
V18	33	0	0%	0%	V50	25	72	20,3%	49,4%	V82	25	52	37,3%	75,3%
V19	36	0	0%	0%	V51	25	5	25,4%	58,5%	V83	25	61	37,3%	75,3%
V20	38	0	0%	0%	V52	25	19	25,4%	58,5%	V84	25	70	37,3%	75,3%
V21	40	0	0%	0%	V53	25	33	25,4%	58,5%	V85	25	75	37,3%	75,3%
V22	25	3	3,4%	9,8%	V54	25	45	25,4%	58,5%	V86	25	6	40,7%	79,1%
V23	25	17	3,4%	9,8%	V55	25	58	25,4%	58,5%	V87	25	10	40,7%	79,1%
V24	25	33	3,4%	9,8%	V56	25	69	25,4%	58,5%	V88	25	18	40,7%	79,1%
V25	25	48	3,4%	9,8%	V57	25	75	25,4%	58,5%	V89	25	26	40,7%	79,1%
V26	25	57	3,4%	9,8%	V58	25	3	28,8%	63,9%	V90	25	37	40,7%	79,1%
V27	25	68	3,4%	9,8%	V59	25	12	28,8%	63,9%	V91	25	47	40,7%	79,1%
V28	25	75	3,4%	9,8%	V60	25	24	28,8%	63,9%	V92	25	56	40,7%	79,1%
V29	25	9	8,5%	23,3%	V61	25	37	28,8%	63,9%	V93	25	66	40,7%	79,1%
V30	25	25	8,5%	23,3%	V62	25	50	28,8%	63,9%	V94	25	75	40,7%	79,1%
V31	25	41	8,5%	23,3%	V63	25	57	28,8%	63,9%					
V32	25	53	8,5%	23,3%	V64	25	64	28,8%	63,9%					

Na Tabela 5.28 consta as frequências numéricas (Num) e experimentais (Exp), alteradas apenas pela temperatura e as alteradas apenas pelo dano, utilizadas no teste da RNA VIII. Frequências estas utilizadas na fase de teste da RNA V, RNA VI e RNA VII.

Tabela 5.28. Dados utilizado para teste da RNA VIII

Dados	Temp. (°C)	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)
			Área	Inércia			
Num 1	25	75	16,7%	42,1%	5,9904	24,0011	53,8874
Num 2	18	0	0%	0%	6,0157	23,8136	53,6346
Num 3	34	0	0%	0%	6,0033	23,7645	53,5240
Exp 1	25	75	16,7%	42,1%	5,9685	23,6595	53,2127
Exp 2	18	0	0%	0%	6,0290	23,6191	53,4269
Exp 3	34	0	0%	0%	5,9727	23,5343	53,3497

Com relação aos parâmetros de treinamento a rede apresentou para todas as quantidades de neurônio erro quadrático (MSE) de 10^1 e fator R entre os dados de saída obtidos (output) com os calculados (target) de 0,97 para 5 neurônios, 0,95 para 10 neurônios e 0,93 para 25 e 50 neurônios, isto é, o aumento de neurônios provocou uma redução na eficácia da rede em aproximar as saídas output com target. Vale ressaltar que a saída da rede utilizada para o treinamento, dos modelos alterados pela temperatura, foi igual a '0', simulando a ausência de dano.



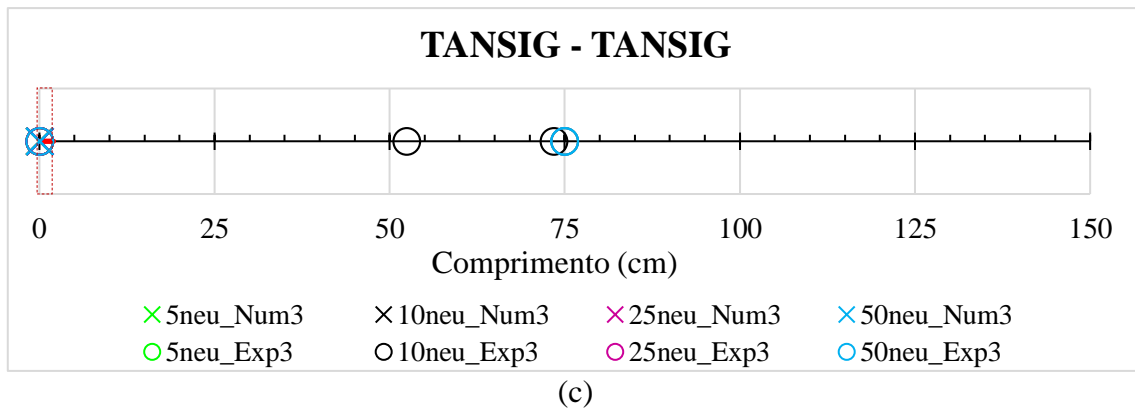


Figura 5.35. Resultados da fase de teste da RNA VIII (a) Teste com os dados Num 1 e Exp 1 da Tabela 5.28 (b) Teste com os dados Num 2 e Exp 2 da Tabela 5.28 (c) Teste com os dados Num 3 e Exp 3 da Tabela 5.28

Ao analisar os resultados obtidos na fase de teste, nota-se a identificação de um falso dano quando a viga estava apenas sob o efeito da variação da temperatura. Ou seja, a rede teve dificuldade em identificar o padrão da mudança nas frequências provocada apenas pela temperatura e apenas pela presença do dano. Logo, a presença da temperatura influenciou na avaliação de dano.

Por outro lado, a temperatura altera apenas as frequências e não altera os modos de vibração. Com esta observação e com o objetivo de contornar este problema do falso dano, propôs-se acrescentar os modos de vibração aos dados de entrada.

5.3.1. RNA com Modos de Vibração

Inicialmente foram obtidos os modos de vibração experimentais utilizando o histórico de acelerações, através do *software* ARTeMIS (2015). O Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury e MSc. Fabricio Alejandro Ortiz nos forneceram o histórico de acelerações da viga ensaiada por Ortiz Morales (2016).

Através do histórico de acelerações dos 6 acelerômetros posicionados ao longo da viga (Figura 5.2), foram construídos gráficos de espectro de densidade. A partir destes gráficos foram obtidas as frequências da viga danificada a 25°C e os modos associados a estas frequências. Já os modos da viga intacta para as temperaturas de 18°C e 34°C, foram fornecidos pelo MSc. Fabricio Alejandro Ortiz. Na Tabela 5.29 são apresentadas as coordenadas dos três primeiros modos de vibração, das três situações da viga descritas acima.

Tabela 5.29. Modos de vibração experimental da viga danificada a 25°C e intacta a 18°C e 34°C

Posição do acelerômetro	Coordenadas dos modos de vibração								
	Viga Danificada			Viga Intacta a 18°C			Viga Intacta a 34°C		
	1° Modo	2° Modo	3° Modo	1° Modo	2° Modo	3° Modo	1° Modo	2° Modo	3° Modo
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25cm	0,253	0,450	0,507	0,4946	-0,8969	0,9762	0,4885	-0,8934	0,9782
45cm	0,410	0,494	0,148	0,7935	-0,9716	0,2851	0,7903	-0,9747	0,3223
65cm	0,503	0,218	-0,442	0,9684	-0,4160	-0,7870	0,9676	-0,4211	-0,7762
85cm	0,522	-0,214	-0,451	1,0000	0,4390	-0,8061	1,0000	0,4371	-0,8298
105cm	0,419	-0,500	0,167	0,8044	0,9993	0,3046	0,8054	0,9999	0,2855
125cm	0,260	-0,459	0,543	0,4938	0,9150	0,9862	0,4975	0,9124	0,9803
150cm	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Devido à pouca quantidade de acelerômetros e, conseqüentemente, coordenadas dos modos de vibração, optou-se por traçar uma linha de tendência e utilizar a função que melhor representasse os modos, na fase de teste da rede.

Na Tabela 5.30 são apresentadas as características da rede criada para identificar as mudanças provocadas apenas pela temperatura ou pela presença do dano, com o objetivo de contornar o problema apresentado na RNA VIII.

Tabela 5.30. Características da rede criada para contornar o problema do falso dano apresentado na RNA VIII

RNA	Características da rede			Dados para o treinamento e teste da rede			Características do treinamento
	Tipo de Aprendizado	Arquitetura	Função de Ativação	Padrão utilizado como dado de entrada	Padrão utilizado como dado de saída	Quantidade de modelos utilizados para o treinamento	Número de Neurônios
IX	Supervisionado com o algoritmo de treinamento <i>Levenberg-Marquardt backpropagation</i>	Duas camadas	Tansig	Temperatura mais 3 primeiras frequências mais o 1° modo de vibração	Coordenada do modo de vibração onde está o dano	94	10

Para o treinamento da RNA IX foram utilizados os modelos com as características da Tabela 5.27. Sendo os dados de entrada de cada um destes modelos um vetor com 35 linhas, composto pela temperatura, 3 primeiras frequências e 31 coordenadas do modo. E os dados de saída, a coordenada do modo que continha o dano, ou '0' simbolizando a ausência de dano.

Para o teste da RNA IX foram utilizados os dados apresentados na Tabela 5.28 juntamente com os modos. No Anexo C são apresentadas as coordenadas dos modos utilizados no teste da RNA IX. Com relação aos parâmetros de treinamento a rede apresentou erro quadrático (MSE) de 10^{-3} e fator R entre os dados de saída obtidos (output) com os calculados (target) de 0,96.

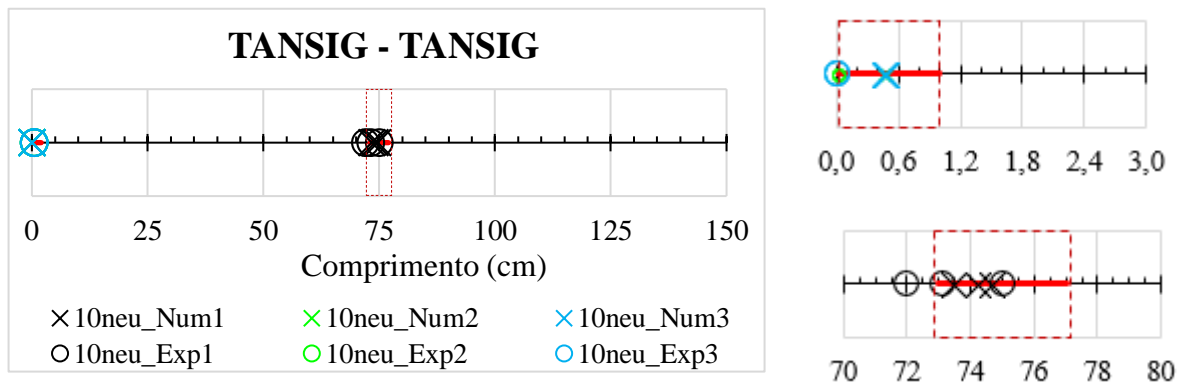


Figura 5.36. Resultados da fase de teste da RNA IX

Ao acrescentar os modos de vibração para o treinamento da rede, esta conseguiu identificar de maneira satisfatória as alterações nas características dinâmicas provocadas pela variação da temperatura ou presença de dano. Sendo assim, o uso em conjunto das frequências e modos mostrou ser uma alternativa para solucionar o problema do falso dano.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho buscou-se avaliar a influência gerada pela temperatura na avaliação de dano, utilizando a técnica de RNA juntamente com as alterações nas características dinâmicas. Para isso estudou-se a influência do dano e temperatura nas características dinâmicas e, a partir disto, propôs-se uma RNA capaz de localizar dano menos suscetível à variação da temperatura.

6.1. DANO

A viga utilizada para localização de dano a partir das mudanças no parâmetros dinâmicos, mais especificamente das frequências, e, por conseguinte, na avaliação de dano, foi a de Ortiz Morales (2016). Inicialmente foi gerado um modelo numérico da viga ensaiada por Ortiz Morales (2016) na configuração intacta e danificada. Com base nestes modelos, foram criados uma série de modelos com diferentes tipos de danos. As frequências destes diversos modelos danificados foram usadas para o treinamento e teste de cinco configurações de RNA.

Observou-se que a presença do dano interfere nas frequências por dois fatores, sua localização e intensidade. Danos próximos ao meio do vão, para uma mesma intensidade, possuíam a primeira frequência menores. E quanto maior a intensidade do dano, menor a frequência. Além disso, também foi observada uma equivalência nas frequências, de modelos cujo dano estava localizado na primeira metade da viga com danos na segunda metade, atribuída à condição de contorno bi-apoiada.

Com relação às RNAs criadas, um fator observado foi a quantidade de dados de entrada. Ao utilizar uma maior quantidade de dados, a rede aprendeu melhor o padrão do problema e foi capaz de reproduzi-lo de maneira mais eficiente.

Já a função de ativação, como esperado, a função não linear tangente hiperbólica (Tansig) apresentou os melhores resultados. Segundo Haykin (2009) *apud* Marcy (2017) “o melhor funcionamento de RNA com algoritmo *backpropagation* acontece quando se tem ao menos uma função não linear no interior da rede”.

Quanto à quantidade de neurônios, nos testes realizados observou-se uma piora nos parâmetros de treinamento e resultados da fase de teste, quando foram utilizados mais neurônios. A escolha do número de neurônios ideal é um assunto muito controverso na comunidade científica, e

vários critérios já foram propostos a fim de indicar uma quantidade ótima, sendo a escolha por tentativa e erro, adotada neste trabalho, a com maior aceitação.

Por fim, após a atualização do modelo numérico e normalização dos dados para treinamento, a RNA mostrou um bom desempenho nos testes com os dados experimentais de Ortiz Morales (2016). A partir deste desempenho, e com o objetivo de validar a rede utilizando suas características em outra estrutura, criaram-se modelos numéricos danificados da viga de Brasiliano (2005). Utilizando as três primeiras frequências normalizadas para o treinamento da rede, foi possível localizar o dano na fase de teste utilizando os dados experimentais obtidos por Brasiliano (2005), mostrando a eficiência da configuração da rede adotada.

É interessante ressaltar que Marcy (2017) em sua tese de doutorado também aplicou a técnica de RNA com algoritmo de treinamento *backpropagation* na viga de Brasiliano (2005), com o objetivo de localizar o dano. Contudo, os resultados obtidos neste trabalho foram diferentes dos obtidos por Marcy (2017). Esta diferença pode ser atribuída, provavelmente, à quantidade de dados utilizados no treinamento e teste da rede. Marcy (2017) utilizou as 5 primeiras frequências, sendo que a quinta frequência apresentou um erro de aproximadamente 6% entre as frequências do modelo numérico com o experimental. Já neste trabalho trabalhou-se apenas com as 3 primeiras frequências.

Um detalhe observado foi a eficácia da configuração de RNA adotada em localizar pequenos (caso de Ortiz Morales (2016)) e grandes danos (caso de Brasiliano (2005)).

Além disso, destaca-se a capacidade da rede em localizar dano em estrutura com baixa frequência (caso de Ortiz Morales (2016)), característica da maioria das estruturas reais. Por exemplo, Miranda *et. al.*, (2018) apresentaram as 5 primeiras frequências de um pavimento de edificação cujas frequências estavam entre 4,82Hz a 5,82Hz, Marcy (2017) apresentou as 10 primeiras frequências da ponte Infante Dom Henrique, localizada ao Norte de Portugal, e a maior foi de aproximadamente 3,7Hz.

6.2. TEMPERATURA

Para avaliar a influência da temperatura nas propriedades dinâmicas também foi utilizada a viga ensaiada por Ortiz Morales (2016). Para considerar o efeito da temperatura no modelo intacto da viga foram feitas duas considerações no ANSYS (2016), utilizou-se o módulo de análise

“Static Structural” e inseriu-se uma relação entre o módulo de elasticidade e temperatura nas propriedades dos materiais.

Nos modelos numéricos, a presença da temperatura em nada alterou os modos de vibração. Já os modos experimentais apresentaram uma mudança na terceira casa decimal, que poderia ser atribuída às imprecisões na realização do experimento. Com relação às frequências, tanto nos modelos numéricos como nos dados experimentais, um aumento de temperatura gerou redução nas frequências.

Diante do exposto, para a criação das RNAs foram utilizadas, como padrão de entrada, apenas as frequências, com o objetivo de determinar a temperatura em que se encontrava a viga. As duas redes criadas, com dados numéricos e experimentais, apresentaram bons resultados, uma vez que conseguiram determinar a temperatura da viga com erro inferior a 2,5% para a maioria dos testes. A quantidade de neurônios não teve influência significativa nos resultados.

6.3. DANO E TEMPERATURA

Por fim, foi avaliada se a variação da temperatura interferiria na avaliação de dano. Para a construção da RNA foram utilizados como dados de entrada a temperatura e frequências dos modelos danificados, utilizados na avaliação de dano à 25°C, em conjunto com os dados da viga intacta entre 0°C e 40°C. Como dado de saída a rede deveria fornecer ‘0’ quando estivesse apenas sob influência da temperatura, representando a ausência de dano, ou a posição do dano quando a viga estivesse danificada.

Para os testes sob influência da temperatura, a rede forneceu saída igual a zero (representando ausência de dano) nos testes numéricos, já com dados experimentais a rede apresentou uma posição de dano, constituindo um falso dano. E para os testes sob influência do dano a rede teve uma queda na eficácia da localização, tanto nos testes numéricos como experimentais.

Para contornar o problema do falso dano propôs-se acrescentar os modos de vibração nos dados de entrada. Isto porque quanto mais características do problema estudado são fornecidas à rede, maiores as chances de identificar o padrão entre os dados e, assim, ser capaz de reproduzir o problema.

Optou-se por trabalhar com o primeiro modo devido à pouca quantidade de dados experimentais, que poderia provocar erros significativos em modos superiores. Além disso,

Marcy (2017) realizou um estudo sobre a utilização dos modos para localizar dano e “observou que modos superiores apresentaram dificuldades para localizar a posição exata do dano”.

Ao acrescentar os modos de vibração para o treinamento da rede, esta apresentou uma melhora significativa nos resultados. A rede foi capaz de identificar quando os dados utilizados no teste eram de uma viga sob influência da temperatura ou de uma viga danificada.

Sendo assim, a técnica de RNAs em conjunto com a frequência e modos de vibração mostrou ser uma metodologia eficaz para contornar o problema do falso dano, e ter um método menos suscetível ao efeito da variação da temperatura.

6.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar a RNA em vigas com condições de contorno não simétrica e outras topologias estruturais;
- Criar RNAs utilizando dados de entrada com ruído para o treinamento;
- Analisar a influência de temperaturas negativas nas características dinâmicas;
- Realizar ensaios sob temperaturas controladas e ambientais de várias estruturas danificadas para realizar mais testes na RNA;
- Testar a metodologia proposta, de utilizar frequência em conjunto com o modo de vibração, em estruturas danificadas que estejam submetidas a variação da temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R. D.; CAWLEY, P.; PYE, C.; J. STONE, B. J. A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures. **Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 20, n. 2, p. 93–100, 1978.

AMARAL, R. P. F.; BARBOSA, F. S.; CURY, A. A.; FONSECA, L. G.; BONIFÁCIO, A. L. Aplicação de métodos computacionais a dados vibracionais para detecção de alterações estruturais. **Anais do SIMMEC**, 2016.

ANSYS. **Ansys v17.1**. Canonsburg, PA, USA. Company: Ansys In., 2016.

ARTEMIS. **ARTEMIS Modal 4.0**. Aalborg, Dinamarca. Developed by: Structural Vibration Solutions A/S, 2015.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2000.

BRASILIANO, A. **Identificação de Sistemas e Atualização de Modelos Numéricos com Vistas à Avaliação da Integridade Estrutural**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação PEEC.TD-06A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília: Brasília, DF, 222p., 2005.

CHAVES, J. S.; LOPES, M. L. M.; CHAVARETTE, F. R.; LIMA, F. P. A. Rede Neural Artificial ARTMAP-FUZZY aplicada no reconhecimento de falhas estruturais. **Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecánica**, v. 21, n. 1, p. 3–11, 2017.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. Third Edit ed. Berkely, CA, USA: Computers & Structures, Inc., 2003.

FU, Y.; DEWOLF, J. T. Monitoring and analysis of a bridge with partially restrained bearings. **Journal of Bridge Engineering**, v. 6, n. 1, p. 23–29, 2001.

GU, J.; GUL, M.; WU, X. Damage detection under varying temperature using artificial neural networks. **Structural Control and Health Monitoring**, 2017.

GUO, T.; XU, Z. Structural health monitoring using DOG multi-scale space : An approach for analyzing damage characteristics. **Smart Materials and Structures**, 2018.

HAYKIN, S. **Neural networks: A comprehensive foundation**. Second Edition. Hamilton, Ontario, Canada: Pearson Education, 2005.

HUA, X. G.; NI, Y. Q.; HO, J. M.; WONG, K. Y. Modeling of temperature–frequency correlation using combined principal component analysis and support vector regression technique. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 21, n. 2, p. 122–135, 2007.

JIN, C.; JANG, S.; SUN, X.; LI, J.; CHRISTENSON, R. Damage detection of a highway bridge under severe temperature changes using extended Kalman filter trained neural network. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 6, n. 3, p. 545–560, 2016.

KIM, J. T.; RYU, Y. S.; CHO, H. M.; STUBBS, N. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. **Engineering Structures**, v. 25, n. 1, p. 57–67, 2003.

KOSTIĆ, B.; GÜL, M. Vibration-Based Damage Detection of Bridges under Varying Temperature Effects Using Time-Series Analysis and Artificial Neural Networks. **Journal of Bridge Engineering**, v. 22, n. 10, p. 04017065, 2017.

LI, H.; LI, S.; OU, J.; LI, H. Modal identification of bridges under varying environmental conditions: temperature and wind effects. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 17, n. 5, p. 495–512, 2010.

MAGALHÃES, F. **Operational Modal Analysis for Testing and Monitoring of Bridges and Special Structures**. Thesis for the degree of Doctor in Civil Engineering, Faculty of Engineering of the University of Porto: Porto, Portugal, 278p., 2010.

MAIA, R. **Detecção de Dano Estrutural em Estruturas Planas Utilizando Redes Neurais**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-025A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília: Brasília, DF, 94p., 2016.

MARCY, M. **Identificação e Quantificação de Danos em Pórticos Espaciais Via Método do Erro Residual e Redes Neurais Artificiais**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-001A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília: Brasília, DF, 112p., 2013.

MARCY, M.; SANTOS, I. C.; BRITO, J. L. V.; DOZ, G. N.; BRASILIANO, A. Atualização e Identificação de danos baseada em dados experimentais de vigas com condições de apoio livre-livre. **XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE**, p. 20, 2016.

MARCY, M. C. A. **Metodologia Baseada em Redes Neurais Artificiais para a Detecção de Danos Estruturais**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-07A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília: Brasília, DF, 203p., 2017.

MATLAB. **MatLab R2016a**. Natick, Massachusetts, USA. Company: MathWorks Inc., 2016.

MEHRJOO, M.; KHAJI, N.; MOHARRAMI, H.; BAHREININEJAD, A. Damage detection of truss bridge joints using Artificial Neural Networks. **Expert Systems with Applications**, v. 35, n. 3, p. 1122–1131, 2008.

MIGUEL, L. **Identificação de sistemas e avaliação da integridade de estruturas treliçadas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, RS, 155p., 2007.

MIRANDA, W. F.; ÁVILA, S. M.; DOZ, G. N. Cracking Influence On Dynamic Parameters Of Reinforced Concrete Floors. **IMAC XXXVI - Springer. Society of Experimental Mechanics**, p. 7, 2018.

MOREIRA, J. A. R. **Análise da Influência da Temperatura no Comportamento Dinâmico de uma Ponte Pendonal em Santo Tirso**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal, 82p., 2015.

MOSER, P.; MOAVENI, B. Environmental effects on the identified natural frequencies of the Dowling Hall Footbridge. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, n. 7, p. 2336–2357, 2011.

NBR 15360:2013. **Ensaio não destrutivo - Emissão acústica - Caracterização do sistema de medição**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

BR 15739:2012. **Ensaio não destrutivo - Radiografia em juntas soldadas - Detecção de descontinuidades.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

NBR 6002:2015. **Ensaio não destrutivo - Ultrassom - Detecção de descontinuidades em chapas metálicas.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ORTIZ MORALES, F. A. **Avaliação da Influência da Temperatura sobre os Parâmetros Modais de Estruturas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto, MG, 110p., 2016.

ORTIZ MORALES, F. A.; CURY, A. A.; FIOROTTI PEIXOTO, R. A. Analysis of thermal and damage effects over structural modal parameters. **Structural Engineering and Mechanics**, v. 65, n. 1, p. 43–51, 2018.

POH, K. W. Stress-strain-temperature relationship for structural steel. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. 5, p. 371–379, 2001.

SAMALI, B.; DACKERMANN, U.; LI, J. Location and severity identification of notch-type damage in a two-storey steel framed structure utilising frequency response functions and Artificial Neural Network. **Advances in Structural Engineering**, v. 15, n. 5, p. 743–757, 2012.

SOHN, H.; FARRAR, C. R.; HEMEZ, F.; CZARNECKI, J. **A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996 – 2001.** Los Alamos National Laboratory. **Anais...2002**

WAHAB, M. A.; DE ROECK, G. Effect of temperature on dynamic system parameters of a highway bridge. **Structural Engineering International**, v. 7, n. 4, p. 266–270, 1997.

WU, X.; GHABOUSSI, J.; GARRETT, J. H. Use of neural networks in detection of structural damage. **Computers & Structures**, v. 42, n. 4, p. 649–659, 1992.

XIA, Y.; CHEN, B.; WENG, S.; NI, YI-Q.; XU, YOU-L. Temperature effect on vibration properties of civil structures: a literature review and case studies. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 2, n. 1, p. 29–46, 2012.

ZHOU, G.; YI, T. A Summary Review of Correlations between Temperatures and Vibration Properties of Long-Span Bridges. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, p. 19, 2014.

ZHOU, H. F.; NI, Y. Q.; KO, J. M. Constructing input to neural networks for modeling temperature-caused modal variability: mean temperatures, effective temperatures, and principal components of temperatures. **Engineering Structures**, v. 32, n. 6, p. 1747–1759, 2010.

ANEXO A

Identificação do dano, posição, intensidade e as primeiras três frequências de vibração utilizadas no treinamento e teste das RNAs I, II, III e IV.

Tabela A.1. Frequências utilizadas no treinamento e teste da RNA I

RNA I													
Dano	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)	Dano	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)
		Área	Inércia						Área	Inércia			
-	-	0%	0%	6,0014	24,0019	53,9904	D36	12	25,4%	58,5%	5,9955	23,9137	53,5978
D1	4	8,5%	23,3%	6,0012	23,9990	53,9765	D37	23	25,4%	58,5%	5,9811	23,7536	53,2074
D2	16	8,5%	23,3%	5,9996	23,9760	53,8844	D38	33	25,4%	58,5%	5,9635	23,6548	53,3954
D3	25	8,5%	23,3%	5,9969	23,9483	53,8306	D39	45	25,4%	58,5%	5,9404	23,6780	53,9113
D4	36	8,5%	23,3%	5,9930	23,9311	53,8910	D40	53	25,4%	58,5%	5,9243	23,7661	53,9549
D5	44	8,5%	23,3%	5,9901	23,9359	53,9650	D41	62	25,4%	58,5%	5,9136	23,9018	53,6040
D6	53	8,5%	23,3%	5,9871	23,9569	53,9818	D42	71	25,4%	58,5%	5,9042	23,9906	53,2020
D7	63	8,5%	23,3%	5,9844	23,9849	53,9015	D43	75	25,4%	58,5%	5,9053	24,0012	53,1663
D8	72	8,5%	23,3%	5,9845	24,0003	53,8398	D44	78	25,4%	58,5%	5,9103	23,9953	53,2313
D9	75	8,5%	23,3%	5,9829	24,0014	53,8214	D45	86	25,4%	58,5%	5,9117	23,9278	53,5012
D10	79	8,5%	23,3%	5,9834	23,9994	53,8340	D46	95	25,4%	58,5%	5,9225	23,8001	53,9077
D11	87	8,5%	23,3%	5,9846	23,9850	53,9018	D47	107	25,4%	58,5%	5,9430	23,6560	53,8400
D12	98	8,5%	23,3%	5,9871	23,9529	53,9833	D48	116	25,4%	58,5%	5,9607	23,6434	53,4292
D13	105	8,5%	23,3%	5,9907	23,9435	53,9751	D49	128	25,4%	58,5%	5,9831	23,7718	53,2354
D14	117	8,5%	23,3%	5,9942	23,9342	53,8678	D50	136	25,4%	58,5%	5,9933	23,8844	53,4886
D15	128	8,5%	23,3%	5,9979	23,9569	53,8378	D51	144	25,4%	58,5%	5,9998	23,9773	53,8689
D16	138	8,5%	23,3%	6,0003	23,9856	53,9158	D52	3	33,9%	71,1%	6,0006	23,9897	53,9272
D17	145	8,5%	23,3%	6,0012	23,9986	53,9716	D53	15	33,9%	71,1%	5,9843	23,7591	52,9906
D18	2	16,9%	42,7%	6,0013	23,9996	53,9798	D54	25	33,9%	71,1%	5,9593	23,5177	52,6387
D19	10	16,9%	42,7%	5,9992	23,9688	53,8377	D55	33	33,9%	71,1%	5,9324	23,3837	52,9621
D20	21	16,9%	42,7%	5,9928	23,8913	53,6046	D56	43	33,9%	71,1%	5,8984	23,4069	53,7385
D21	34	16,9%	42,7%	5,9808	23,8167	53,6913	D57	53	33,9%	71,1%	5,8645	23,5922	53,9326
D22	43	16,9%	42,7%	5,9719	23,8240	53,9117	D58	60	33,9%	71,1%	5,8475	23,7755	53,4879
D23	51	16,9%	42,7%	5,9650	23,8693	53,9853	D59	70	33,9%	71,1%	5,8391	23,9729	52,7472
D24	60	16,9%	42,7%	5,9582	23,9368	53,8412	D60	75	33,9%	71,1%	5,8305	24,0010	52,5667
D25	70	16,9%	42,7%	5,9545	23,9929	53,6112	D61	81	33,9%	71,1%	5,8362	23,9608	52,7744
D26	75	16,9%	42,7%	5,9570	24,0014	53,5994	D62	87	33,9%	71,1%	5,8441	23,8519	53,2289
D27	81	16,9%	42,7%	5,9543	23,9897	53,6253	D63	94	33,9%	71,1%	5,8571	23,6716	53,7867
D28	89	16,9%	42,7%	5,9576	23,9439	53,8154	D64	105	33,9%	71,1%	5,8918	23,4356	53,8578
D29	96	16,9%	42,7%	5,9613	23,8877	53,9584	D65	112	33,9%	71,1%	5,9153	23,3702	53,3616
D30	105	16,9%	42,7%	5,9613	23,8877	53,9584	D66	123	33,9%	71,1%	5,9527	23,4713	52,6601
D31	116	16,9%	42,7%	5,9808	23,8168	53,6909	D67	134	33,9%	71,1%	5,9827	23,7410	52,9479
D32	124	16,9%	42,7%	5,9886	23,8545	53,5799	D68	146	33,9%	71,1%	6,0001	23,9807	53,8837
D33	135	16,9%	42,7%	5,9969	23,9383	53,7207	D69	28	30,5%	66,4%	5,9603	23,5635	52,9381
D34	144	16,9%	42,7%	6,0006	23,9894	53,9283	D70	56	25,4%	58,5%	5,9180	23,8080	53,8699
D35	5	25,4%	58,5%	6,0003	23,9843	53,9018	D71	140	33,9%	71,1%	5,9937	23,8844	53,4478

Tabela A.2. Frequências utilizadas no treinamento e teste da RNA II

RNA II															
Dano	Posição		Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)	Dano	Posição		Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)
	(cm)	Área	Inércia	Área					Inércia	(cm)	Área	Inércia			
-	-	0%	0%	6,0014	24,0019	53,9904	D20	12	25,4%	58,5%	5,9955	23,9137	53,5978		
D1	4	8,5%	23,3%	6,0012	23,9990	53,9765	D21	23	25,4%	58,5%	5,9811	23,7536	53,2074		
D2	16	8,5%	23,3%	5,9996	23,9760	53,8844	D22	33	25,4%	58,5%	5,9635	23,6548	53,3954		
D3	25	8,5%	23,3%	5,9969	23,9483	53,8306	D23	45	25,4%	58,5%	5,9404	23,6780	53,9113		
D4	36	8,5%	23,3%	5,9930	23,9311	53,8910	D24	53	25,4%	58,5%	5,9243	23,7661	53,9549		
D5	44	8,5%	23,3%	5,9901	23,9359	53,9650	D25	62	25,4%	58,5%	5,9136	23,9018	53,6040		
D6	53	8,5%	23,3%	5,9871	23,9569	53,9818	D26	71	25,4%	58,5%	5,9042	23,9906	53,2020		
D7	63	8,5%	23,3%	5,9844	23,9849	53,9015	D27	75	25,4%	58,5%	5,9053	24,0012	53,1663		
D8	72	8,5%	23,3%	5,9845	24,0003	53,8398	D28	3	33,9%	71,1%	6,0006	23,9897	53,9272		
D9	75	8,5%	23,3%	5,9829	24,0014	53,8214	D29	15	33,9%	71,1%	5,9843	23,7591	52,9906		
D10	2	16,9%	42,7%	6,0013	23,9996	53,9798	D30	25	33,9%	71,1%	5,9593	23,5177	52,6387		
D11	10	16,9%	42,7%	5,9992	23,9688	53,8377	D31	33	33,9%	71,1%	5,9324	23,3837	52,9621		
D12	21	16,9%	42,7%	5,9928	23,8913	53,6046	D32	43	33,9%	71,1%	5,8984	23,4069	53,7385		
D13	34	16,9%	42,7%	5,9808	23,8167	53,6913	D33	53	33,9%	71,1%	5,8645	23,5922	53,9326		
D14	43	16,9%	42,7%	5,9719	23,8240	53,9117	D34	60	33,9%	71,1%	5,8475	23,7755	53,4879		
D15	51	16,9%	42,7%	5,9650	23,8693	53,9853	D35	70	33,9%	71,1%	5,8391	23,9729	52,7472		
D16	60	16,9%	42,7%	5,9582	23,9368	53,8412	D36	75	33,9%	71,1%	5,8305	24,0010	52,5667		
D17	70	16,9%	42,7%	5,9545	23,9929	53,6112	D37	5	33,9%	71,1%	5,9994	23,9705	53,8341		
D18	75	16,9%	42,7%	5,9570	24,0014	53,5994	D38	28	30,5%	66,4%	5,9603	23,5635	52,9381		
D19	5	25,4%	58,5%	6,0003	23,9843	53,9018	D39	56	25,4%	58,5%	5,9180	23,8080	53,8699		

Tabela A.3. Frequências utilizadas no treinamento e teste da RNA III

RNA III													
Dano	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)	Dano	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)
		Área	Inércia						Área	Inércia			
-	-	0%	0%	6,0014	24,0019	53,9904	D29	12	25,4%	58,5%	5,9955	23,9137	53,5978
D1	3	3,4%	9,8%	6,0013	24,0012	53,9845	D30	23	25,4%	58,5%	5,9811	23,7536	53,2074
D2	12	3,4%	9,8%	6,0010	23,9965	53,9637	D31	33	25,4%	58,5%	5,9635	23,6548	53,3954
D3	21	3,4%	9,8%	6,0004	23,9887	53,9417	D32	45	25,4%	58,5%	5,9404	23,6780	53,9113
D4	30	3,4%	9,8%	5,9994	23,9802	53,9410	D33	53	25,4%	58,5%	5,9243	23,7661	53,9549
D5	39	3,4%	9,8%	5,9983	23,9781	53,9644	D34	62	25,4%	58,5%	5,9136	23,9018	53,6040
D6	48	3,4%	9,8%	5,9970	23,9815	53,9853	D35	71	25,4%	58,5%	5,9042	23,9906	53,2020
D7	57	3,4%	9,8%	5,9964	23,9908	53,9778	D36	75	25,4%	58,5%	5,9053	24,0012	53,1663
D8	66	3,4%	9,8%	5,9957	23,9982	53,9486	D37	3	28,8%	63,9%	6,0008	23,9934	53,9458
D9	75	3,4%	9,8%	5,9957	24,0014	53,9342	D38	12	28,8%	63,9%	5,9940	23,8913	53,4994
D10	4	8,5%	23,3%	6,0012	23,9990	53,9765	D39	21	28,8%	63,9%	5,9788	23,7140	53,0126
D11	16	8,5%	23,3%	5,9996	23,9760	53,8844	D40	30	28,8%	63,9%	5,9597	23,5828	53,1003
D12	25	8,5%	23,3%	5,9969	23,9483	53,8306	D41	39	28,8%	63,9%	5,9375	23,5460	53,5862
D13	36	8,5%	23,3%	5,9930	23,9311	53,8910	D42	48	28,8%	63,9%	5,9141	23,6195	53,9684
D14	44	8,5%	23,3%	5,9901	23,9359	53,9650	D43	57	28,8%	63,9%	5,8969	23,7833	53,7978
D15	53	8,5%	23,3%	5,9871	23,9569	53,9818	D44	66	28,8%	63,9%	5,8884	23,9389	53,2740
D16	63	8,5%	23,3%	5,9844	23,9849	53,9015	D45	75	28,8%	63,9%	5,8779	24,0011	52,9418
D17	72	8,5%	23,3%	5,9845	24,0003	53,8398	D46	3	33,9%	71,1%	6,0006	23,9897	53,9272
D18	75	8,5%	23,3%	5,9829	24,0014	53,8214	D47	15	33,9%	71,1%	5,9843	23,7591	52,9906
D19	2	16,9%	42,7%	6,0013	23,9996	53,9798	D48	25	33,9%	71,1%	5,9593	23,5177	52,6387
D20	10	16,9%	42,7%	5,9992	23,9688	53,8377	D49	33	33,9%	71,1%	5,9324	23,3837	52,9621
D21	21	16,9%	42,7%	5,9928	23,8913	53,6046	D50	43	33,9%	71,1%	5,8984	23,4069	53,7385
D22	34	16,9%	42,7%	5,9808	23,8167	53,6913	D51	53	33,9%	71,1%	5,8645	23,5922	53,9326
D23	43	16,9%	42,7%	5,9719	23,8240	53,9117	D52	60	33,9%	71,1%	5,8475	23,7755	53,4879
D24	51	16,9%	42,7%	5,9650	23,8693	53,9853	D53	70	33,9%	71,1%	5,8391	23,9729	52,7472
D25	60	16,9%	42,7%	5,9582	23,9368	53,8412	D54	75	33,9%	71,1%	5,8305	24,0010	52,5667
D26	70	16,9%	42,7%	5,9545	23,9929	53,6112	D55	5	33,9%	71,1%	5,9994	23,9705	53,8341
D27	75	16,9%	42,7%	5,9570	24,0014	53,5994	D56	28	30,5%	66,4%	5,9603	23,5635	52,9381
D28	5	25,4%	58,5%	6,0003	23,9843	53,9018	D57	56	25,4%	58,5%	5,9180	23,8080	53,8699

Tabela A.4. Frequências utilizadas no treinamento e teste da RNA IV

RNA IV													
Dano	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)	Dano	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)
		Área	Inércia						Área	Inércia			
-	-	0%	0%	6,0014	24,0019	53,9904	D39	24	28,8%	63,9%	5,9731	23,6648	52,9853
D1	3	3,4%	9,8%	6,0013	24,0012	53,9845	D40	37	28,8%	63,9%	5,9424	23,5423	53,4649
D2	17	3,4%	9,8%	6,0007	23,9923	53,9485	D41	50	28,8%	63,9%	5,9096	23,6510	53,9846
D3	33	3,4%	9,8%	5,9990	23,9787	53,9478	D42	57	28,8%	63,9%	5,8969	23,7833	53,7978
D4	48	3,4%	9,8%	5,9970	23,9815	53,9853	D43	64	28,8%	63,9%	5,8891	23,9097	53,3873
D5	57	3,4%	9,8%	5,9964	23,9908	53,9778	D44	71	28,8%	63,9%	5,8806	23,9879	53,0191
D6	68	3,4%	9,8%	5,9957	23,9995	53,9432	D45	75	28,8%	63,9%	5,8779	24,0011	52,9418
D7	75	3,4%	9,8%	5,9957	24,0014	53,9342	D46	7	33,9%	71,1%	5,9975	23,9422	53,7009
D8	9	8,5%	23,3%	6,0007	23,9920	53,9416	D47	15	33,9%	71,1%	5,9843	23,7591	52,9906
D9	25	8,5%	23,3%	5,9969	23,9483	53,8306	D48	19	33,9%	71,1%	5,9753	23,6574	52,7455
D10	41	8,5%	23,3%	5,9914	23,9345	53,9449	D49	28	33,9%	71,1%	5,9492	23,4505	52,6855
D11	53	8,5%	23,3%	5,9871	23,9569	53,9818	D50	39	33,9%	71,1%	5,9127	23,3793	53,4476
D12	63	8,5%	23,3%	5,9844	23,9849	53,9015	D51	48	33,9%	71,1%	5,8768	23,4646	53,9610
D13	72	8,5%	23,3%	5,9845	24,0003	53,8398	D52	57	33,9%	71,1%	5,8572	23,7032	53,7285
D14	75	8,5%	23,3%	5,9829	24,0014	53,8214	D53	67	33,9%	71,1%	5,8358	23,9295	52,8902
D15	2	16,9%	42,7%	6,0013	23,9996	53,9798	D54	75	33,9%	71,1%	5,8305	24,0010	52,5667
D16	14	16,9%	42,7%	5,9974	23,9435	53,7405	D55	4	37,3%	75,3%	5,9998	23,9759	53,8623
D17	27	16,9%	42,7%	5,9875	23,8466	53,5800	D56	13	37,3%	75,3%	5,9853	23,7668	52,9759
D18	39	16,9%	42,7%	5,9762	23,8172	53,8228	D57	20	37,3%	75,3%	5,9664	23,5506	52,4356
D19	51	16,9%	42,7%	5,9650	23,8693	53,9853	D58	26	37,3%	75,3%	5,9445	23,3684	52,3390
D20	58	16,9%	42,7%	5,9596	23,9219	53,8889	D59	33	37,3%	75,3%	5,9167	23,2504	52,7543
D21	65	16,9%	42,7%	5,9549	23,9698	53,7084	D60	43	37,3%	75,3%	5,8724	23,2653	53,6819
D22	70	16,9%	42,7%	5,9545	23,9929	53,6112	D61	52	37,3%	75,3%	5,8309	23,4557	53,9545
D23	75	16,9%	42,7%	5,9570	24,0014	53,5994	D62	61	37,3%	75,3%	5,8087	23,7548	53,2711
D24	21	20,3%	49,4%	5,9898	23,8531	53,4748	D63	70	37,3%	75,3%	5,7997	23,9661	52,4660
D25	36	20,3%	49,4%	5,9709	23,7493	53,6581	D64	75	37,3%	75,3%	5,7890	24,0009	52,2458
D26	44	20,3%	49,4%	5,9602	23,7678	53,9105	D65	6	40,7%	79,1%	5,9969	23,9315	53,6460
D27	55	20,3%	49,4%	5,9477	23,8630	53,9330	D66	10	40,7%	79,1%	5,9892	23,8181	53,1456
D28	62	20,3%	49,4%	5,9411	23,9332	53,7209	D67	18	40,7%	79,1%	5,9647	23,5111	52,1874
D29	72	20,3%	49,4%	5,9394	23,9976	53,4675	D68	26	40,7%	79,1%	5,9307	23,2229	51,9900
D30	5	25,4%	58,5%	6,0003	23,9843	53,9018	D69	37	40,7%	79,1%	5,8744	23,0540	52,9477
D31	19	25,4%	58,5%	5,9871	23,8118	53,2894	D70	47	40,7%	79,1%	5,8236	23,2054	53,9106
D32	33	25,4%	58,5%	5,9635	23,6548	53,3954	D71	56	40,7%	79,1%	5,7757	23,4950	53,6858
D33	45	25,4%	58,5%	5,9404	23,6780	53,9113	D72	66	40,7%	79,1%	5,7612	23,8696	52,5329
D34	58	25,4%	58,5%	5,9171	23,8431	53,7908	D73	75	40,7%	79,1%	5,7346	24,0006	51,8353
D35	69	25,4%	58,5%	5,9076	23,9780	53,2837	D74	5	33,9%	71,1%	5,9994	23,9705	53,8341
D36	75	25,4%	58,5%	5,9053	24,0012	53,1663	D75	28	30,5%	66,4%	5,9603	23,5635	52,9381
D37	3	28,8%	63,9%	6,0008	23,9934	53,9458	D76	65	32,2%	68,8%	5,8551	23,9026	53,1432
D38	12	28,8%	63,9%	5,9940	23,8913	53,4994							

ANEXO B

Identificação do dano, posição, intensidade e as primeiras três frequências de vibração utilizadas para o treinamento da RNA V com os dados de Ortiz Morales (2016) e Brasiliano (2005).

Tabela B.1. Frequências utilizadas para o treinamento da RNA V com os dados da viga de Ortiz Morales (2016)

RNA V - Ortiz Morales (2016)													
Dano	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)	Dano	Posição (cm)	Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)
		Área	Inércia						Área	Inércia			
-	-	0%	0%	6,0106	23,7933	53,5888	D37	3	28,8%	63,9%	6,0099	23,7839	53,5405
D1	3	3,4%	9,8%	6,0105	23,7927	53,5841	D38	12	28,8%	63,9%	6,0018	23,6699	53,0499
D2	17	3,4%	9,8%	6,0097	23,7821	53,5418	D39	24	28,8%	63,9%	5,9786	23,4302	52,5411
D3	33	3,4%	9,8%	6,0080	23,7703	53,5479	D40	37	28,8%	63,9%	5,9445	23,3029	53,0595
D4	48	3,4%	9,8%	6,0063	23,7745	53,5854	D41	50	28,8%	63,9%	5,9200	23,4620	53,5837
D5	57	3,4%	9,8%	6,0056	23,7827	53,5778	D42	57	28,8%	63,9%	5,9103	23,5919	53,3813
D6	68	3,4%	9,8%	6,0051	23,7914	53,5417	D43	64	28,8%	63,9%	5,9000	23,7069	52,9615
D7	75	3,4%	9,8%	6,0050	23,7928	53,5334	D44	71	28,8%	63,9%	5,8984	23,7804	52,6561
D8	9	8,5%	23,3%	6,0101	23,7854	53,5527	D45	75	28,8%	63,9%	5,8980	23,7923	52,6003
D9	25	8,5%	23,3%	6,0071	23,7543	53,4753	D46	7	33,9%	71,1%	6,0061	23,7264	53,2724
D10	41	8,5%	23,3%	6,0026	23,7425	53,5575	D47	15	33,9%	71,1%	5,9919	23,5399	52,5674
D11	53	8,5%	23,3%	6,0005	23,7627	53,5806	D48	19	33,9%	71,1%	5,9815	23,4273	52,2991
D12	63	8,5%	23,3%	5,9985	23,7817	53,5220	D49	28	33,9%	71,1%	5,9534	23,2169	52,2785
D13	72	8,5%	23,3%	5,9981	23,7924	53,4739	D50	39	33,9%	71,1%	5,9163	23,1606	53,0759
D14	75	8,5%	23,3%	5,9980	23,7927	53,4699	D51	48	33,9%	71,1%	5,8895	23,2925	53,5730
D15	2	16,9%	42,7%	6,0105	23,7915	53,5802	D52	57	33,9%	71,1%	5,8650	23,5037	53,2985
D16	14	16,9%	42,7%	6,0073	23,7480	53,3971	D53	67	33,9%	71,1%	5,8526	23,7260	52,5006
D17	27	16,9%	42,7%	5,9977	23,6669	53,3198	D54	75	33,9%	71,1%	5,8550	23,7927	52,2474
D18	39	16,9%	42,7%	5,9920	23,6628	53,4801	D55	4	37,3%	75,3%	6,0086	23,7635	53,4433
D19	51	16,9%	42,7%	5,9847	23,6961	53,5874	D56	13	37,3%	75,3%	5,9922	23,5377	52,5082
D20	58	16,9%	42,7%	5,9814	23,7456	53,4928	D57	20	37,3%	75,3%	5,9711	23,3079	51,9618
D21	65	16,9%	42,7%	5,9794	23,7726	53,3861	D58	26	37,3%	75,3%	5,9461	23,1106	51,8734
D22	70	16,9%	42,7%	5,9787	23,7878	53,3172	D59	33	37,3%	75,3%	5,9199	23,0253	52,3835
D23	75	16,9%	42,7%	5,9811	23,7925	53,3170	D60	43	37,3%	75,3%	5,8791	23,0762	53,3265
D24	21	20,3%	49,4%	5,9978	23,6373	53,0633	D61	52	37,3%	75,3%	5,8497	23,2973	53,5446
D25	36	20,3%	49,4%	5,9791	23,5456	53,2821	D62	61	37,3%	75,3%	5,8239	23,5640	52,8454
D26	44	20,3%	49,4%	5,9678	23,5622	53,5227	D63	70	37,3%	75,3%	5,8172	23,7609	52,0754
D27	55	20,3%	49,4%	5,9584	23,6643	53,5255	D64	75	37,3%	75,3%	5,8126	23,7921	51,9088
D28	62	20,3%	49,4%	5,9527	23,7302	53,3146	D65	6	40,7%	79,1%	6,0053	23,7138	53,2067
D29	72	20,3%	49,4%	5,9505	23,7894	53,0615	D66	10	40,7%	79,1%	5,9966	23,5915	52,6794
D30	5	25,4%	58,5%	6,0093	23,7742	53,4940	D67	18	40,7%	79,1%	5,9693	23,2664	51,7041
D31	19	25,4%	58,5%	5,9944	23,5884	52,8510	D68	26	40,7%	79,1%	5,9305	22,9533	51,5119
D32	33	25,4%	58,5%	5,9706	23,4437	53,0157	D69	37	40,7%	79,1%	5,8758	22,8328	52,5962
D33	45	25,4%	58,5%	5,9457	23,4655	53,5248	D70	47	40,7%	79,1%	5,8305	23,0208	53,5340
D34	58	25,4%	58,5%	5,9301	23,6479	53,3825	D71	56	40,7%	79,1%	5,7972	23,3331	53,2614
D35	69	25,4%	58,5%	5,9220	23,7712	52,8951	D72	66	40,7%	79,1%	5,7781	23,6719	52,1153
D36	75	25,4%	58,5%	5,9211	23,7925	52,7956	D73	75	40,7%	79,1%	5,7654	23,7926	51,5430

Tabela B.2. Frequências utilizadas para o treinamento da RNA V com os dados da viga de Brasileiro (2005)

RNA V - Brasileiro (2005)															
Dano	Posição		Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)	Dano	Posição		Redução (%)		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)
	(cm)	Área	Inércia	Área					Inércia	(cm)	Área	Inércia			
-	-	0%	0%	43,5992	119,6986	233,0579	D37	4	14,7%	64,4%	43,9321	120,6849	235,3246		
D1	4	1,4%	8,6%	43,6503	120,0372	234,3146	D38	17	14,7%	64,4%	43,7413	119,6502	231,5807		
D2	24	1,4%	8,6%	43,6252	119,9121	233,9066	D39	34	14,7%	64,4%	43,3688	116,6729	222,7446		
D3	47	1,4%	8,6%	43,5882	119,6944	233,5730	D40	53	14,7%	64,4%	42,6483	113,5359	224,5498		
D4	69	1,4%	8,6%	43,5367	119,6457	234,0993	D41	72	14,7%	64,4%	41,7124	114,1509	233,2789		
D5	82	1,4%	8,6%	43,5072	119,7675	234,1710	D42	82	14,7%	64,4%	41,3436	116,1470	233,4145		
D6	98	1,4%	8,6%	43,4825	119,9311	233,7933	D43	92	14,7%	64,4%	40,9945	118,1540	229,2581		
D7	108	1,4%	8,6%	43,4777	119,9696	233,6603	D44	102	14,7%	64,4%	40,8748	119,6909	225,1825		
D8	13	3,3%	19,5%	43,6635	120,0102	234,1076	D45	108	14,7%	64,4%	40,7970	119,9285	224,3015		
D9	36	3,3%	19,5%	43,5873	119,5186	232,6044	D46	10	16,7%	69,5%	43,8769	120,3122	233,9607		
D10	59	3,3%	19,5%	43,4595	119,0417	233,1711	D47	22	16,7%	69,5%	43,6720	118,9250	228,3988		
D11	76	3,3%	19,5%	43,3449	119,2571	234,1775	D48	27	16,7%	69,5%	43,5301	117,6917	224,1316		
D12	91	3,3%	19,5%	43,2705	119,6712	233,6110	D49	40	16,7%	69,5%	43,0979	114,6536	219,7528		
D13	103	3,3%	19,5%	43,2342	119,9476	232,7975	D50	56	16,7%	69,5%	42,2803	112,1178	224,5574		
D14	108	3,3%	19,5%	43,2321	119,9666	232,7377	D51	69	16,7%	69,5%	41,4164	112,4417	231,9507		
D15	3	7,0%	37,2%	43,7750	120,3419	234,8347	D52	82	16,7%	69,5%	40,8521	115,3997	233,2495		
D16	20	7,0%	37,2%	43,6633	119,7741	232,9314	D53	96	16,7%	69,5%	40,2483	118,7191	225,5545		
D17	39	7,0%	37,2%	43,4999	118,6126	229,9000	D54	108	16,7%	69,5%	40,1977	119,9164	222,4209		
D18	56	7,0%	37,2%	43,2565	117,6706	231,0699	D55	6	19,4%	75,7%	44,0038	120,7818	235,2643		
D19	73	7,0%	37,2%	42,9591	117,9796	234,0139	D56	19	19,4%	75,7%	43,7373	119,1197	228,6275		
D20	83	7,0%	37,2%	42,8177	118,6872	233,7918	D57	29	19,4%	75,7%	43,4417	116,5654	220,1761		
D21	93	7,0%	37,2%	42,6933	119,4202	232,1436	D58	37	19,4%	75,7%	43,0712	113,8114	216,0564		
D22	101	7,0%	37,2%	42,6523	119,8214	230,9923	D59	47	19,4%	75,7%	42,4776	111,1482	217,5688		
D23	108	7,0%	37,2%	42,6336	119,9578	230,5373	D60	62	19,4%	75,7%	41,3108	109,6190	226,4208		
D24	30	10,4%	50,6%	43,5526	118,6327	228,6946	D61	75	19,4%	75,7%	40,5039	112,2518	233,6236		
D25	52	10,4%	50,6%	43,0938	116,1931	227,7126	D62	88	19,4%	75,7%	39,7598	115,9554	229,9742		
D26	63	10,4%	50,6%	42,7566	115,8995	231,3487	D63	101	19,4%	75,7%	39,4154	119,3121	221,5561		
D27	79	10,4%	50,6%	42,3197	117,2650	234,0415	D64	108	19,4%	75,7%	39,2631	119,9016	219,6374		
D28	89	10,4%	50,6%	42,1076	118,5032	232,0739	D65	9	22,2%	81,1%	43,9952	120,5673	234,2620		
D29	103	10,4%	50,6%	41,9475	119,8676	228,3522	D66	14	22,2%	81,1%	43,8611	119,7637	231,0213		
D30	7	12,8%	58,8%	43,8542	120,4216	234,6883	D67	26	22,2%	81,1%	43,4905	116,4970	218,5663		
D31	27	12,8%	58,8%	43,5733	118,5267	227,7241	D68	37	22,2%	81,1%	42,9167	112,2145	212,2926		
D32	47	12,8%	58,8%	43,0610	115,4278	224,7527	D69	53	22,2%	81,1%	41,5697	107,5661	217,5675		
D33	65	12,8%	58,8%	42,3711	114,5582	231,0547	D70	68	22,2%	81,1%	40,0457	108,0456	229,7612		
D34	83	12,8%	58,8%	41,7457	117,0735	233,2489	D71	80	22,2%	81,1%	39,1623	112,4412	233,2500		
D35	99	12,8%	58,8%	41,3630	119,4812	227,3629	D72	95	22,2%	81,1%	38,3405	117,5725	222,5115		
D36	108	12,8%	58,8%	41,3280	119,9359	226,0225	D73	108	22,2%	81,1%	38,3060	119,8904	216,9703		

ANEXO C

Modos de vibração utilizados para o teste da RNA IX.

Tabela C.1. Modos de vibração utilizados no teste da RNA IX

Posição (cm)	Viga Danificada	Viga Intacta a 18°C	Viga Intacta a 34°C
	1° Modo	1° Modo	1° Modo
0	0,012	-0,013	-0,017
5	0,105	0,120	0,117
10	0,200	0,243	0,241
15	0,297	0,358	0,356
20	0,393	0,464	0,461
25	0,486	0,560	0,558
30	0,576	0,647	0,645
35	0,660	0,725	0,723
40	0,737	0,794	0,792
45	0,807	0,854	0,852
50	0,868	0,904	0,903
55	0,920	0,945	0,944
60	0,961	0,977	0,976
65	0,991	1,000	0,999
70	1,011	1,014	1,013
75	1,019	1,018	1,018
80	1,015	1,014	1,014
85	1,000	1,000	1,000
90	0,973	0,977	0,977
95	0,935	0,945	0,945
100	0,887	0,903	0,904
105	0,828	0,853	0,854
110	0,760	0,793	0,794
115	0,683	0,724	0,725
120	0,598	0,646	0,648
125	0,507	0,559	0,561
130	0,410	0,463	0,464
135	0,309	0,357	0,359
140	0,206	0,242	0,244
145	0,102	0,118	0,120
150	-0,001	-0,015	-0,012