

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

**IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE DANOS EM
PÓRTICOS ESPACIAIS VIA MÉTODO DO ERRO
RESIDUAL E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

MARÍLIA MARCY CABRAL DE ARAÚJO

**ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO
CO-ORIENTADORA: ANDREA BRASILIANO SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM - 001 A/13
BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2013**

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

**IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE DANOS EM PÓRTICOS
ESPACIAIS VIA MÉTODO DO ERRO RESIDUAL E REDES
NEURAIS ARTIFICIAIS.**

MARÍLIA MARCY CABRAL DE ARAÚJO

**DISSERTAÇÃO 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:

**Prof^ª Graciela Doz, Dr. Ing. (ENC-UnB)
(Orientadora)**

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

**Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, Dr. (ENM-UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 05 DE ABRIL DE 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

MARCY, MARILIA CABRAL DE ARAUJO	
Identificação e Quantificação de Danos em Pórticos Espaciais Via Método do Erro Residual e Redes Neurais [Distrito Federal] 2013.	
xviii, 112p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2013).	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Identificação de danos	2. Propriedades dinâmicas
3. Estruturas	4. Método do Erro Residual
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARCY, M. (2013). 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.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marília Marcy Cabral de Araújo.

TÍTULO: Identificação e Quantificação de Danos em Pórticos Espaciais Via Método do Erro Residual e Redes Neurais Artificiais.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

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.

Marília Marcy Cabral de Araújo
CLN 406, Bl D, apto 212.
70847540 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo auxílio espiritual em todos os momentos da minha vida.

A minha família, em especial aos meus pais, por todo amor, dedicação e todo o esforço feito para me passar uma educação de qualidade, baseada em princípios importantes para formação de um ser humano.

As minhas professoras Graciela Doz e Andrea Brasiliano, por acreditarem em mim, pelos ensinamentos, apoio e pela confiança que me proporcionaram o desenvolvimento do trabalho de forma tranquila e agradável.

A toda equipe do PECC, professores e funcionários, que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho, em especial a Eva Veloso, pela disponibilidade em ajudar, por todo o carinho e atenção, tanto comigo quanto com os outros colegas.

Ao professor Gustavo Barbosa, por todo o conhecimento e incentivo passados antes e durante o mestrado.

Aos amigos que compartilharam comigo os diversos momentos de alegrias e tristezas vividos nestes dois anos. Com toda certeza, o companheirismo foi essencial para a finalização deste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

*Dedico este trabalho aos
meus pais
Pereira e Margareth.*

RESUMO

IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM PÓRTICOS ESPACIAIS VIA MÉTODO DO ERRO RESIDUAL E REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

Autor: Marília Marcy Cabral de Araújo

Orientadora: Graciela Nora Doz de Carvalho

Co-Orientadora: Andrea Brasiliano Silva

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, abril de 2013.

Cada vez mais vem se exigindo das estruturas tanto no que se refere ao nível construtivo quanto a segurança e nível de serviço. Nesse sentido, busca-se desenvolver métodos mais rápidos e práticos com o objetivo de controlar os danos gerados ao longo da vida útil das estruturas. Dentre os métodos destacam-se os baseados na observação das mudanças das características dinâmicas, capazes de indicar mudanças na integridade estrutural. Neste trabalho, o Método do Erro Residual – MER (Genovese, 2000, Brasiliano *et al.*, 2004) foi expandido com o objetivo de ser aplicado a pórticos espaciais. O método permite localizar e quantificar danos por meio de alterações produzidas pelo dano nas características dinâmicas da estrutura. Foi utilizada também a técnica de Redes Neurais Artificiais – RNAs na etapa da quantificação de danos. As redes foram treinadas com o algoritmo *Levenberg-Marquardt backpropagation* e tiveram como dados de entrada os erros fornecidos pelo Método do Erro Residual. Com os resultados encontrados, por meio das simulações numéricas em quatro modelos de pórtico espacial, pôde-se observar que os referidos métodos comportaram-se de maneira satisfatória, localizando e quantificando de forma clara os elementos danificados.

Palavras chave: Propriedades Dinâmicas; Identificação de danos; Método do Erro Residual; Redes Neurais Artificiais.

ABSTRACT

LOCATING AND QUANTIFYING DAMAGES IN 3-D FRAME USING RESIDUAL ERROR METHOD AND NEURAL NETWORKS

Autor: Marília Marcy Cabral de Araújo

Orientadora: Graciela Nora Doz de Carvalho

Co-Orientadora: Andrea Brasiliano Silva

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, abril de 2013.

With the evolution in the techniques of structural design and the use of lighter and more resistant materials, the structures are being more required both in the aspects of comfort and safety as well as the best use of places. In that sense, seeks to develop faster methods and practical aiming greater control of the damage generated throughout the useful life of those structures. Among such methods, those based on study of the dynamic characteristics (natural frequencies, mode shapes and modal damping values) should be mentioned. In this work, the Error Residual Method - ERM (Genovese, 2000, Brasiliano et al., 2004) was expanded in order to be applied to 3D-frames. This method allows to locate and quantify damage through changes produced by damage to the dynamic characteristics of the structure. Was also used the technique of Artificial Neural Networks - ANNs in step quantification of damage. The networks were trained with the backpropagation Levenberg-Marquardt algorithm, and had as input the errors provided by the Error Residual Method. The numerical analysis in the four 3D-frame showed that both methods presented satisfactory results since they allowed locating and quantifying the damages present in the structural models.

Keywords: Dynamic Characteristics, Damage, Residual Error Method, Artificial Neural Network.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVOS	2
1.2 - METODOLOGIA	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
3.1 - MÉTODO DO ERRO RESIDUAL (MER)	12
3.2 - REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNAs)	15
3.2.1 - Redes Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP)	22
3.3 - QUANTIFICAÇÃO DE DANOS VIA REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	26
4 - FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	28
4.1 - PROGRAMA PARA O MÉTODO DO ERRO RESIDUAL (MER)	28
4.2 - PROGRAMA PARA QUANTIFICAÇÃO DE DANO COM RNAs.....	32
5 - ANÁLISE NUMÉRICA.....	35
5.1 - MODELOS ANALISADOS	36
5.1.1 - Modelo 1 (M1)	38
5.1.2 - Modelo 2 (M2)	55
5.1.3 - Modelo 3 (M3)	74
5.1.4 - Modelo 4 (M4)	92
6 - CONCLUSÕES	106
6.1 - LOCALIZAÇÃO DE DANOS	106
6.2 - QUANTIFICAÇÃO DE DANOS.....	107
6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
---	------------

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 FREQUÊNCIAS DO MODELO 1 INTACTO.	40
TABELA 5.2 CENÁRIOS 1 E 2 DO MODELO 1 – DANOS ISOLADOS.	41
TABELA 5.3 FREQUÊNCIAS DOS CENÁRIOS 1 E 2 DO MODELO 1.....	42
TABELA 5.4 VALORES DAS REDUÇÕES DE INÉRCIA E ÁREA INTRODUZIDOS INICIALMENTE E IDENTIFICADOS PELO MER PARA O MODELO 1.	46
TABELA 5.5 CENÁRIOS DE DANOS UTILIZADOS NO TREINAMENTO DA REDE DO MODELO1....	48
TABELA 5.6 CENÁRIOS DE DANOS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DA REDE DO MODELO1.....	48
TABELA 5.7 CENÁRIOS 21 E 22 DO MODELO1.	51
TABELA 5.8 FREQUÊNCIAS DOS CENÁRIOS 21 E 22 DO MODELO1.	52
TABELA 5.9 FREQUÊNCIAS DO MODELO 2 INTACTO	56
TABELA 5.10 CENÁRIOS 1, 2 E 3 DO MODELO 2 – DANOS ISOLADOS.....	58
TABELA 5.11 VALORES DE REDUÇÃO NAS ÁREAS E INÉRCIAS DOS ELEMENTOS DANIFICADOS CORRESPONDENTES AOS CENÁRIOS 1, 2 E 3 DO MODELO 2 – DANOS ISOLADOS.	59
TABELA 5.12 FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO DO MODELO 2 INTACTO E DANIFICADO - CENÁRIOS 1, 2 E 3.....	60
TABELA 5.13 VALORES DAS REDUÇÕES INERCIAIS E VALORES DOS DANOS DO MODELO2.....	65
TABELA 5.14 CENÁRIOS DE DANOS UTILIZADOS NO TREINAMENTO DA REDE DO MODELO 2.	67
TABELA 5.15 CENÁRIOS DE DANOS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DA REDE DO MODELO 2.	67
TABELA 5.16 CENÁRIOS 16 E 17 DO MODELO 2.	70
TABELA 5.17 FREQUÊNCIAS DOS CENÁRIOS 16 E 17 DO MODELO2.....	71
TABELA 5.18 FREQUÊNCIAS DO MODELO 3.....	76
TABELA 5.19 CENÁRIOS 1, 2 E 3 DO MODELO 2 – DANOS ISOLADOS.....	77
TABELA 5.20 FREQUÊNCIAS DOS CENÁRIOS 1, 2 E 3 DO MODELO 3.	79
TABELA 5.21 CENÁRIOS DE DANOS UTILIZADOS NO TREINAMENTO DA REDE DO MODELO 3.	84
TABELA 5.22 CENÁRIOS DE DANOS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DA REDE DO MODELO 3.	85
TABELA 5.23 CENÁRIOS 14 E 15 DO MODELO 3.	87
TABELA 5.24 FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO DO MODELO 3 CORRESPONDENTES AOS CENÁRIOS 14 E 15.....	88
TABELA 5.25 FREQUÊNCIAS DO MODELO 4 INTACTO.	93
TABELA 5.26 CENÁRIOS 1 E 2 DO MODELO 4 – DANOS ISOLADOS.	95
TABELA 5.27 FREQUÊNCIAS DOS CENÁRIOS 1 E 2 DO MODELO 4.....	96

TABELA 5.28 CENÁRIOS DE DANOS UTILIZADOS NO TREINAMENTO DA REDE DO MODELO 4.	101
TABELA 5.29 CENÁRIOS DE DANOS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DA REDE DO MODELO 4... 101	
TABELA 5.30 FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÃO DO MODELO 4 CORRESPONDENTES AO CENÁRIO 13.	103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA	4
FIGURA 3.1 (A) NEURÔNIO HUMANO; (B) MODELO DO NEURÔNIO BOOLEANO.....	16
FIGURA 3.2 FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO.	17
FIGURA 3.3 REDE <i>FEEDFORWARD</i> DE UMA ÚNICA CAMADA.....	18
FIGURA 3.4 REDE <i>FEEDFORWARD</i> DE MÚLTIPLAS CAMADAS.....	19
FIGURA 3.5 REDE COM RECORRÊNCIA ENTRE CAMADA DE SAÍDA E CAMADA INTERMEDIÁRIA.	20
FIGURA 3.6 REDE COM RECORRÊNCIA AUTO-ASSOCIATIVA.	20
FIGURA 3.7 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA REDE MLP. GENOVESE (2005).....	22
FIGURA 3.8 FASES FORWARD E BACKWARD DO ALGORITMO BACKPROPAGATION. (CHRISTIANO, 2000 MODIFICADA).....	23
FIGURA 3.9 ARQUITETURA DA REDE UTILIZADA.....	27
FIGURA 4.1 ROTINA PARA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DINÂMICAS.	29
FIGURA 4.2 ROTINA PARA LOCALIZAÇÃO DE DANOS.....	30
FIGURA 4.3 ROTINA PARA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS.	31
FIGURA 4.4 ESTRUTURA DA FUNÇÃO <i>NEWFF</i>	33
FIGURA 4.5 FUNÇÕES <i>INIT</i> E <i>TRAIN</i>	33
FIGURA 4.6 FUNÇÃO <i>SIM</i>	33
FIGURA 4.7 ROTINAS PARA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS USANDO RNAs.	34
FIGURA 5.1 ELEMENTO DE PÓRTICO ESPACIAL, COM 6 GRAUS DE LIBERDADE POR NÓ.	35
<u>FIGURA</u> 5.2 MODELO 1.	37
FIGURA 5.3 MODELO 2.	37
<u>FIGURA</u> 5.4 MODELO 3.	37
FIGURA 5.5 MODELO 4	38
FIGURA 5.6 MODELO 1 DISCRETIZADO COM DESTAQUE NOS ELEMENTOS DANIFICADOS.	39
FIGURA 5.7 MODOS DE VIBRAÇÃO DO MODELO 1.	40
FIGURA 5.8 CENÁRIOS COM DANOS INDIVIDUAIS DO MODELO 1. (A) CENÁRIO 1. (B) CENÁRIO 2.....	41
FIGURA 5.9 LOCALIZAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO1, CENÁRIO 1 – 1% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 1.	43
FIGURA 5.10 LOCALIZAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO1, CENÁRIO 2 – 15% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 24.	44

FIGURA 5.11 QUANTIFICAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO1, CENÁRIO 1– 1% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 1.	45
FIGURA 5.12 QUANTIFICAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO1, CENÁRIO 2 – 15% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 24.	45
FIGURA 5.13 REDE NEURAL ARTIFICIAL UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS DO MODELO 1.	46
FIGURA 5.14 FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO UTILIZADAS NO RNA DO MODELO 1. (A) FUNÇÃO TANSIG. (B) FUNÇÃO SATLINS. (MATHWORKS, R2009B)	47
FIGURA 5.15 ESQUEMA DA RNA UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS DO MODELO 1.	47
FIGURA 5.16 ERRO NO TREINAMENTO DA REDE DO MODELO 1.	49
FIGURA 5.17 QUANTIFICAÇÃO DE DANOS PELA RNA DO MODELO 1.....	49
FIGURA 5.18 CENÁRIOS DO MODELO 1 COM VÁRIOS ELEMENTOS DANIFICADOS. (A) CENÁRIO 21. (B) CENÁRIO 22.....	51
FIGURA 5.19 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS CORRESPONDENTE AO MODELO1, CENÁRIO 21.	53
FIGURA 5.20 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS CORRESPONDENTE AO MODELO1, CENÁRIO 22.	54
FIGURA 5.21 MODELO 2 DISCRETIZADO.	56
FIGURA 5.22 MODOS DE VIBRAÇÃO DO MODELO 2.	57
FIGURA 5.23 CENÁRIOS COM DANOS INDIVIDUAIS DO MODELO 2. (A) CENÁRIO 1. (B) CENÁRIO 2.....	58
FIGURA 5.23 CENÁRIOS COM DANOS INDIVIDUAIS DO MODELO 2 (C) CENÁRIO 3.	59
FIGURA 5.24 LOCALIZAÇÃO DE DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 2, CENÁRIO 1 – 40% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 16.	61
FIGURA 5.25 LOCALIZAÇÃO DE DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 2, CENÁRIO 2 – 20% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 180.	62
FIGURA 5.26 LOCALIZAÇÃO DE DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 2, CENÁRIO 3 – 1% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 225.	63
FIGURA 5.27 QUANTIFICAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 2, CENÁRIO 1 – 40% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 16.	64
FIGURA 5.28 QUANTIFICAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 2, CENÁRIO 2 – 20% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 180.	64
FIGURA 5.29 QUANTIFICAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO2, CENÁRIO 3 – 1% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 225.	65
FIGURA 5.30 QUANTIFICAÇÃO DE DANOS PELA RNA DO MODELO 2.....	66
FIGURA 5.31 ESQUEMA DA RNA UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS DO MODELO 2.	67

FIGURA 5.32 ERRO NO TREINAMENTO DA REDE DO MODELO 2.	68
FIGURA 5.33 QUANTIFICAÇÃO DE DANOS PELA RNA DO MODELO 2.....	69
FIGURA 5.34 CENÁRIOS DO MODELO 2 COM VÁRIOS ELEMENTOS DANIFICADOS. (A) CENÁRIO 16. (B) CENÁRIO 17.	71
FIGURA 5.35 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS CORRESPONDENTE AO MODELO 2, CENÁRIO 16.	72
FIGURA 5.36 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS CORRESPONDENTE AO MODELO 2, CENÁRIO 17	73
FIGURA 5.37 MODELO 3 DISCRETIZADO.	75
FIGURA 5.38 MODOS DE VIBRAÇÃO DO MODELO 3.	76
FIGURA 5.39 CENÁRIOS COM DANOS INDIVIDUAIS DO MODELO 2. (A) CENÁRIO 1. (B) CENÁRIO 2. (C) CENÁRIO 3.	78
FIGURA 5.40 LOCALIZAÇÃO DE DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 3, CENÁRIO 1 – 20% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 91.	80
FIGURA 5.41 LOCALIZAÇÃO DE DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 3, CENÁRIO 2 – 40% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 870.	81
FIGURA 5.42 LOCALIZAÇÃO DE DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 3, CENÁRIO 3 – 10% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 1141.	82
FIGURA 5.43 REDE NEURAL ARTIFICIAL UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS DO MODELO 3.....	84
FIGURA 5.44 ESQUEMA DA RNA UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS DO MODELO 3.	84
FIGURA 5.45 ERRO NO TREINAMENTO DA REDE DO MODELO 3.	85
FIGURA 5.46 QUANTIFICAÇÃO DE DANOS PELA RNA DO MODELO 3.....	86
FIGURA 5.47 CENÁRIOS DO MODELO 3. (A) CENÁRIO 14.	87
FIGURA 5.47 CENÁRIOS DO MODELO 3. (B) CENÁRIO 15.....	88
FIGURA 5.48 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS CORRESPONDENTES AO MODELO 3, CENÁRIO 14....	90
FIGURA 5.49 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS CORRESPONDENTES AO MODELO 3, CENÁRIO 15....	91
FIGURA 5.50 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS DO CENÁRIO 15 (MODO DE VIBRAÇÃO 2) DO MODELO 3.	92
FIGURA 5.51 MODELO 4 DISCRETIZADO.	93
FIGURA 5.52 MODOS DE VIBRAÇÃO DO MODELO 4.	94
FIGURA 5.53 CENÁRIOS COM DANOS INDIVIDUAIS DO MODELO 4. (A) CENÁRIO 1.	95
FIGURA 5.53 CENÁRIOS COM DANOS INDIVIDUAIS DO MODELO 4. (B) CENÁRIO 2.	96
FIGURA 5.54 LOCALIZAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 4, CENÁRIO 1 – 30% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 1.	97

FIGURA 5.55 LOCALIZAÇÃO DO DANO CORRESPONDENTE AO MODELO 4, CENÁRIO 2 – 10% DE REDUÇÃO NA ÁREA DO ELEMENTO 1000.	98
FIGURA 5.56 REDE NEURAL ARTIFICIAL UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS DO MODELO 4.	100
FIGURA 5.57 ESQUEMA DA RNA UTILIZADA NA QUANTIFICAÇÃO DE DANOS DO MODELO 4.	100
FIGURA 5.58 ERRO NO TREINAMENTO DA REDE DO MODELO 4.	101
FIGURA 5.59 QUANTIFICAÇÃO DE DANOS PELA RNA DO MODELO 4.	102
FIGURA 5.60 CENÁRIO 9 DO MODELO 4.	103
FIGURA 5.61 LOCALIZAÇÃO DOS DANOS CORRESPONDENTES AO MODELO 4, CENÁRIO 9.	104

LISTA DE ABREVIações SÍMBOLOS E NOMECLATURAS

AT	Algoritmo de Treinamento
MCP	Neurônio McCulloch e Pitts ou Neurônio Booleano
MEF	Método dos Elementos Finitos
MER	Método do Erro Residual
MLP	Rede Perceptron de Múltiplas Camadas
NNC	Número de Neurônios da Camada
RNAs	Redes Neurais Artificiais
<i>A</i>	Área da seção transversal
<i>C</i>	Matriz de amortecimento
<i>E</i>	Módulo de elasticidade longitudinal
E^2	Erro quadrático de todos os neurônios
<i>E</i>	Matriz de erros da equação de movimento da estrutura
<i>F</i>	Força excitadora do sistema
<i>H</i>	Matriz hessiana
I_x	Momento de inércia em torno do eixo x
I_y	Momento de inércia em torno do eixo y

I_z	Momento de inércia em torno do eixo z
L	Comprimento do elemento
K'	Matriz de rigidez da estrutura danificada
K	Matriz de rigidez da estrutura
K_{EI}	Matriz de rigidez de elementos intactos
K_{ED}	Matriz de rigidez do elemento danificado
Λ'	Matriz diagonal com as frequências de vibração da estrutura
Λ	Matriz diagonal com as frequências de vibração da estrutura danificada
M'	Matriz de massa da estrutura danificada
M	Matriz de massa da estrutura
N_e	Número de neurônios na camada de entrada da RNA
N_i	Número de neurônios na camada intermediária da RNA
N_Y	Número de neurônios na camada de saída da RNA
Y	Resposta da RNA
X_k	Dado de entrada da rede
α_{jk}	Pesos entre as camadas de entrada e intermediária da RNA
σ_j	Neurônios da camada intermediária da RNA

μ	Coeficiente para melhor convergência da RNA
\vec{y}	Vetor aceleração
\vec{y}	Vetor deslocamento
(t)	Tempo
ϕ	Matriz com os modos de vibração da estrutura
ϕ'	Matriz com os modos de vibração da estrutura danificada
ϕ	Modo de vibração
φ	Peso de uma camada
∇E	Gradiente do da função erro
ω_{ij}	Pesos entre a camada intermediária e camada de saída da RNA
ω	Frequência natural de vibração
<i>Init</i>	Função para iniciação da RNA no MATLAB
<i>Newff</i>	Função para criação da rede no MATLAB
<i>Sim</i>	Função para simulação da rede no MATLAB
<i>Train</i>	Função para treinamento da RNA no MATLAB

1 - INTRODUÇÃO

Durante a vida útil as estruturas são submetidas a vários tipos de solicitações, sejam elas provenientes de fenômenos naturais ou geradas pela ação humana, de comportamento estático ou dinâmico, mas que certamente, quando combinadas, podem causar desgastes, vibrações excessivas, deterioração, entre outros eventos que podem comprometer o funcionamento e até mesmo ser a causa do colapso estrutural.

Neste sentido, é importante desenvolver meios capazes de acompanhar o desempenho funcional, localizar e quantificar os danos que, geralmente, aparecem de forma isolada, ou seja, em determinadas regiões da estrutura, e são caracterizados pela perda localizada de rigidez.

Tal perda pode ser ocasionada por reduções na seção transversal e/ou na inércia do elemento, como também por alterações nas propriedades do material, estas últimas causadas pela presença de agentes químicos.

É importante ressaltar que a existência do dano também provoca a perda de massa na estrutura, porém, esta pode ser considerada insignificante, segundo estudos de Hearn e Testa (1991).

Os métodos de detecção de danos são muitos. Entre os primeiros a serem usados, podem se mencionar aqueles baseados no uso de raios-X, ultrassom e ressonância magnética, os quais representavam técnicas de alto custo e de certa forma com uma significativa demanda de tempo para sua aplicação, além da necessidade de se ter uma estimativa prévia do local do dano.

Assim, busca-se elaborar métodos mais rápidos, com menos custos e aplicáveis a estruturas de modo geral, capazes de indicar mudanças na integridade estrutural.

Nessa perspectiva, devem-se mencionar os métodos baseados no estudo das características dinâmicas (frequências naturais, modos de vibração e razão de amortecimento), estas últimas, propriedades intrínsecas da estrutura, o que as tornam dependentes das condições em que esta se encontra.

Segundo Zou *et al.* (2000), estes métodos podem ser divididos em quatro grupos, dentre os quais, os métodos de análise modal utilizam dados dos parâmetros dinâmicos, os métodos no domínio da frequência fazem uso só das frequências, os métodos no domínio do tempo utilizam os históricos de registros no tempo, podendo ser utilizados em conjunto com os métodos no domínio da frequência. Por fim, os métodos no domínio da impedância observam as mudanças na impedância das estruturas.

Eles são baseados no fato de que a perda de rigidez causada pelo dano na estrutura produz alterações em suas características dinâmicas (Adams *et al.* 1978). Desta forma, os referidos métodos fazem uso das diferenças que surgem entre os parâmetros dinâmicos das estruturas intacta e danificada para a identificação de possíveis falhas no sistema estrutural das edificações. Assim, são capazes de fornecer informações sobre mudanças ocorridas nas propriedades físicas da estrutura.

Entretanto, alguns métodos apresentam limitações com relação à aplicação em alguns tipos de estruturas. Daí a necessidade de aprimorar o estudo, uma vez que, baseado no monitoramento, a detecção de danos, de forma antecipada, torna-se uma ferramenta de grande importância no que diz respeito à manutenção das edificações, já que reparos estruturais são ações economicamente mais viáveis frente à perda total de estruturas.

1.1 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estender, para análise de pórticos espaciais, o Método do Erro Residual (MER), proposto por Genovese (2000).

O MER trata-se de uma ferramenta capaz de localizar e quantificar danos, concebido inicialmente para o estudo de vigas, e posteriormente expandido para a aplicação em estruturas planas aporticadas, o qual apresentou um bom funcionamento.

Desta forma, este trabalho tem sua importância no sentido de tornar um método de detecção de danos, o Método do Erro Residual, mais abrangente no tocante à aplicação do mesmo em outros tipos de estruturas.

Será aplicada também a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNAs) na etapa da quantificação dos danos, a fim de se fazer uma comparação entre os métodos no que diz respeito à aplicação de ambos.

1.2 - METODOLOGIA

O trabalho proposto será desenvolvido de forma numérica. A partir de uma estrutura intacta serão considerados diferentes cenários de danos, modelados numericamente por meio de uma redução da rigidez dos elementos que compõem a região danificada.

As propriedades dinâmicas da estrutura intacta e de cada um dos seus modelos danificados serão comparadas por meio do Método do Erro Residual, proposto por Genovese (2000), de modo a localizar as zonas que apresentaram perdas da integridade estrutural.

Diferentes pórticos espaciais serão analisados, iniciando este estudo com pórticos simples e seguindo, posteriormente, com estruturas mais complexas. Nesta fase do trabalho será utilizado o Software Matlab (versão 7.9.0.529).

Em uma segunda etapa será feita a quantificação do dano observado, utilizando para isso, o MER e as RNAs. Na etapa através da RNAs, também será usado o software Matlab, mais especificamente o pacote *Neural Network Toolbox*.

A Figura 1.1 mostra as fases a serem desenvolvidas neste trabalho.

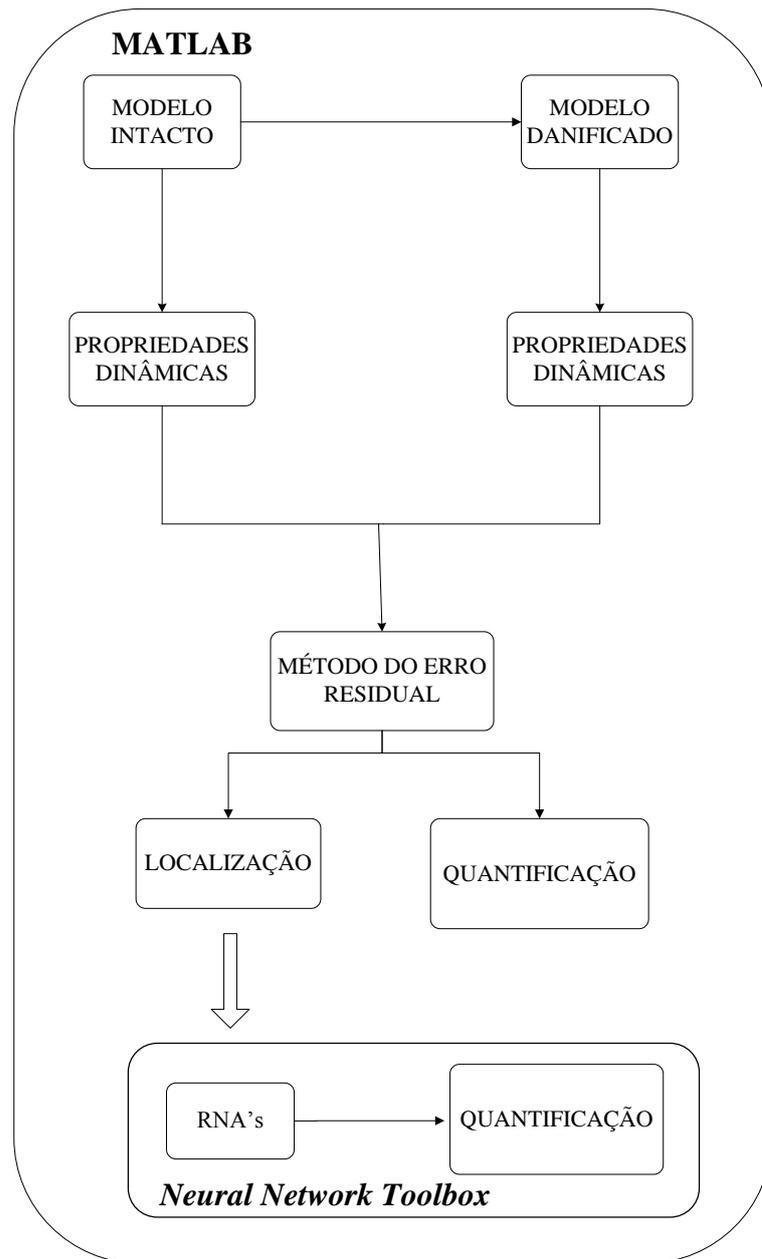


Figura 1.1 Fluxograma da metodologia

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No contexto histórico deste assunto, muitos são os autores que buscaram e buscam aprimorar e desenvolver métodos para o estudo desta área.

Adams *et al.* (1978) aplicaram, em barras em vibração axial, um método que localiza e indica a severidade do dano. Esse método faz uso do modelo teórico e dos modos de vibração da estrutura real, obtidos experimentalmente. Tal estudo concluiu que a perda de rigidez causada pelo dano na estrutura produz alterações em suas características dinâmicas.

Allemang e Brown (1982) propuseram o índice MAC (*Modal Assurance Criterion*), que permite analisar diferenças globais entre os modos de vibração da estrutura intacta e danificada. Já Lieven e Ewins (1988) definiram o índice COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*), o qual também faz a comparação entre os modos de vibração, porém a comparação feita neste último índice é realizada ponto a ponto do modo de vibração.

Pandey *et al.* (1991) apresentaram um método baseado nas diferenças entre as curvaturas dos modos de vibração da estrutura intacta e danificada. O método foi proposto para estruturas nas quais o esforço predominante é o momento fletor, uma vez que o referido esforço é proporcional à curvatura. Deste modo, para validação do método, foram utilizados dois modelos, uma viga em balanço e uma viga simplesmente apoiada, os quais mostraram que os pontos onde se observam mudanças na curvatura dos modos de vibração podem indicar os locais danificados.

Hearn e Testa (1991) analisaram, a partir de ensaios de laboratório em um pórtico de aço sob o efeito de fadiga, um método baseado em modificações da equação de movimento, a partir de alterações entre as frequências da estrutura intacta e danificada. Este mesmo método também foi testado em cabos, nos quais cortes transversais simularam os danos. Neste segundo experimento foi observado que as frequências apresentaram poucas variações, tornando-se, portanto, um parâmetro pouco eficiente na detecção de danos. Porém, notou-se que o amortecimento apresentou alterações e que pode ser fator de monitoramento estrutural.

Wu *et al.* (1992) apresentaram uma metodologia analítica para identificar danos através da técnica de Redes Neurais Artificiais. Neste trabalho, a rede *Backpropagation* foi treinada

com dados numéricos de acelerações, aos quais se aplicou a FFT. Foram fornecidos, como dados de entrada da rede, as acelerações no domínio da frequência e as saídas foram as localizações dos danos. Após a etapa de generalização da rede, o estudo mostrou que a rede conseguiu aprender o comportamento estrutural quanto à presença de danos; no entanto, em casos mais complexos, devem-se fazer alterações nos dados de entrada da rede.

Elkordy *et al.*(1993) também utilizaram a técnica de redes neurais para diagnosticar danos. Neste trabalho os autores utilizaram dois modelos numéricos bidimensionais (modelos com mesmas dimensões, porém o segundo com um maior nível de discretização) e um modelo experimental para obter respostas de vibrações. Foram utilizadas três redes *backpropagation*, das quais a primeira e a segunda redes foram utilizadas para detectar danos e a terceira para detectar e mensurar a severidade do dano. As redes tiveram como padrões de danos os cenários utilizados nos referidos modelos numéricos e foram testadas (analisadas quanto ao seu funcionamento) com dados do modelo experimental. O estudo obteve bons resultados, ou seja, a detecção de danos através das RNAs pode ser uma boa ferramenta na identificação de danos, porém é necessário a aplicação da técnica em modelos estruturais e cenários de danos mais complexos.

Chen *et al.* (1995) realizaram um estudo experimental e numérico para analisar as variações ocorridas nas frequências devidas à existência de danos nas estruturas. A análise foi feita com uma viga em perfil C objetivando a comparação com as características dinâmicas de pontes rodoviárias usuais. Os resultados mostraram boa aproximação entre o estudo numérico e o experimental. Porém, no que diz respeito às diferenças entre as frequências da estrutura danificada e da intacta, os resultados indicaram que para níveis críticos de danos as variações apresentadas foram insuficientes para serem consideradas indicadores de presença de danos de pontes reais.

Genovese (2000) desenvolveu o Método do Erro Residual, o qual é capaz de localizar e quantificar danos. O método é baseado no desequilíbrio que surge na equação de movimento ao combinar os parâmetros físicos da estrutura intacta, rigidez e massa, com os parâmetros dinâmicos da estrutura danificada, frequências e modos de vibração. Inicialmente, o método foi aplicado em vigas por meio de análises numérica e experimental, apresentando bons resultados. As análises mostraram que o método localizou e quantificou os danos nas vigas, estes últimos representados pela perda de rigidez dos elementos.

No ano seguinte, Brasiliano (2001) estendeu o Método do Erro Residual (Genovese, 2000) para ser aplicado em pórticos planos. O estudo numérico realizado mostrou que o método tem bom comportamento para esse tipo de estrutura. Nesse mesmo trabalho foram testados outros métodos de identificação de danos por meio das características dinâmicas, entre os quais estavam presentes o MAC (Allemang e Brown, 1982), COMAC (Lieven e Ewins, 1988) e o Método da Curvatura (Pandey *et al.*, 1991).

Genovese (2002) apresentou um método híbrido baseado no Método do Erro Residual (Genovese, 2000) e no Método da Curvatura (Pandey, 1991) combinados com a técnica de Redes Neurais Artificiais - RNAs. O método consiste em duas etapas, a localização e a quantificação. Na primeira etapa foram utilizados o Método do Erro Residual e o Método da Curvatura para identificação das regiões danificadas em uma série de vigas bi-apoiadas e a etapa seguinte, a quantificação, foi realizada por meio da técnica de RNAs. Os resultados observados permitiram concluir que o método híbrido localizou e quantificou os danos de forma correta, mas com uma pequena perda de sensibilidade para danos pequenos.

Gomes (2004) utilizou a técnica de Redes Neurais Artificiais com Funções de Base Radial para obter informação de possíveis danos em uma viga biapoiada. A rede recebeu como dados de entrada a variação dos quadrados das frequências naturais e, com base no processamento de suas três camadas, forneceu como saída o índice de dano de cada elemento da estrutura. Foi utilizado um modelo numérico de viga com diferentes cenários de danos, do qual se obteve os dados de treinamento e de teste da rede.

O autor também analisou o impacto causado pela presença de ruídos nos resultados das redes. Gomes (2004) concluiu que à medida que são acrescentados parâmetros da estrutura como dados de entrada na fase de treinamento, melhores serão os resultados da rede, sobretudo em estruturas mais complexas. Além disso, observou-se também que a presença de ruídos pode prejudicar significativamente a sensibilidade na avaliação do dano.

Genovese (2005) analisou os ruídos presentes em métodos de detecção de danos. Neste estudo, o autor utilizou a formulação híbrida, proposta por Genovese *et al.*, 2002, e o Método da Curvatura (Pandey *et al.*, 1991). Para realização dos testes, foram utilizadas vigas submetidas a carregamento impulsivo e os danos foram simulados através da redução das propriedades geométricas. Os resultados mostraram que com a presença de ruído a eficiência

dos métodos é comprometida, podendo apresentar incertezas, chegando assim à mesma conclusão que Gomes (2004).

Ma *et al.* (2005) apresentaram o Método da Força Residual. O método é baseado nas diferenças das propriedades modais entre a estrutura intacta e danificada. Neste estudo foram analisados três casos. O primeiro foi uma viga em balanço na qual o dano foi simulado por um carregamento de massa. No segundo caso, foi estudado um pórtico plano com diferentes cenários de danos, sendo estes representados através de uma redução na rigidez dos elementos, e o terceiro caso consistiu na análise em uma placa de alumínio. O estudo apresentou bons resultados.

Beskyroun *et al.* (2006) propuseram uma técnica de identificação e localização de danos baseada nas alterações da curvatura e na Densidade de Potência Espectral (PSD – *Power Spectral Density*). Foram criados dois modelos, uma ponte e um pórtico em aço com diferentes cenários de danos para a validação da técnica. Os danos foram simulados pela retirada de parafusos. A partir dos resultados experimentais, pôde-se observar que a técnica apresentou bons resultados, ou seja, identificou e localizou de forma precisa os elementos que continham danos.

Kunert e Ambrosini (2007) apresentaram um método capaz de identificar danos estruturais através da variação de frequência entre a estrutura intacta e danificada. O método apresenta três novas funções para o cálculo do módulo de elasticidade da estrutura. Tais funções são usadas como meio de simular o dano estrutural, de tal forma que a partir de um fator multiplicativo, o referido módulo varia quantitativamente representando, portanto, a variação na rigidez dos elementos. A técnica foi testada numericamente por meio de modelos de vigas e apresentou bons resultados.

Hsieh *et al.* (2008) apresentaram um método composto de três etapas. A primeira parte é o sistema de identificação, o qual está baseado em uma combinação do algoritmo ERA-OKID com Funções de Respostas em Frequência (FRF). A segunda etapa consiste na modelagem da estrutura através do Método dos Elementos Finitos, e por fim, o processo de atualização modal. Foram realizados três estudos de caso, os quais mostraram que a metodologia é uma poderosa ferramenta na localização de danos.

Curandelli *et al.* (2008) apresentaram um método de identificação de danos por meio da identificação do coeficiente de amortecimento usando transformada de *wavelet*. Foram realizados estudos numéricos e experimentais, os quais indicaram que o amortecimento também pode ser utilizado como indicador da presença de danos estruturais.

Mehrjoo *et al.* (2008) apresentaram um método utilizando Redes Neurais com algoritmo *backpropagation*, capaz de estimar a intensidade de danos presentes em articulações de estruturas tipo pontes. Por se tratar de grandes estruturas com muitas articulações, conseqüentemente com muitos parâmetros, o método propõe uma divisão da estrutura em subestruturas que possam representar a ponte completa. A rede recebeu como dados de entrada as frequências e os modos naturais de vibração das estruturas testadas. O treinamento da rede foi realizado com os dados obtidos de uma subestrutura, e a partir do seu aprendizado pôde-se generalizar a referida rede, a fim de conhecer os dados de saída, ou seja, os danos da estrutura completa. Os resultados indicaram um bom aprendizado da rede mostrando, portanto, boa precisão na identificação dos danos.

Curandelli e Ambrosini (2011) realizaram um estudo numérico-experimental em tanques esféricos elevados a fim de detectar danos neste tipo de estrutura, inclusive sob a influência da presença de fluido no interior desses tanques. Tal estudo foi baseado na diferença entre as frequências medidas entre a estrutura intacta e danificada e os cenários de danos foram simulados a partir de uma redução na rigidez da estrutura. Os resultados obtidos mostraram que, para análise em estruturas com fluido em seu interior, a variação entre os valores das frequências é uma maneira confiável para detecção de danos, desde que o fluido não ocupe mais que 30% do volume total permitido pelo reservatório. Visto que uma quantidade de líquido superior ao referido valor, tornará tal variação imperceptível.

Frang *et al.* (2012) utilizaram as Funções de Respostas em Frequência (FRF) como dados de entrada de uma Rede Neural Artificial a fim de treiná-la para identificação de danos estruturais. Foi utilizado o algoritmo *backpropagation* para o treinamento da rede, bem como algumas de suas variações para comparação de resultados. O estudo foi desenvolvido numericamente em uma viga com diferentes cenários de danos, e os resultados mostraram que a técnica funcionou adequadamente, apresentando resultados satisfatórios.

Sayyad e Kumar (2012) desenvolveram um método para a identificação, localização e determinação do tamanho de trincas, estas últimas, simuladas por meio de uma mola axial equivalente entre os dois segmentos da viga. O método é baseado nas medições de vibrações naturais axiais e, para a identificação do dano, utilizam-se basicamente as alterações nas duas primeiras frequências naturais. Para observar a aplicabilidade do método, foi realizada uma análise experimental e os resultados apresentaram eficiência.

Diante do exposto, nota-se a relevância da identificação de danos em estruturas por meio de mudanças em suas propriedades dinâmicas. Neste trabalho, o Método do Erro Residual proposto por Genovese (2000) é expandido para ser aplicado na localização e na quantificação de danos em pórticos espaciais. E as redes Neurais são utilizadas na quantificação dos respectivos danos em comparação com o primeiro método.

3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Como mencionando anteriormente, neste trabalho são utilizados dois métodos, o Método do Erro Residual (MER) e as Redes Neurais Artificiais (RNAs). Deste modo, a fim de se conhecer o funcionamento de cada um dos métodos citados, este capítulo descreve as equações usadas em seus desenvolvimentos, bem como as considerações feitas para serem utilizadas neste estudo.

Para que se conheçam as características dinâmicas (frequências e modos naturais de vibração) da estrutura, faz-se necessário o conhecimento da equação que governa o comportamento dinâmico. Desta forma, a partir do Princípio de D'Alembert, por exemplo, a equação de movimento para um sistema de n graus de liberdade é expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\vec{y}}(t) + \mathbf{K}\vec{y}(t) = \vec{F}(t) \quad (3.1)$$

Na qual \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura, respectivamente, e seus números de linhas e colunas dependem da discretização adotada, ou seja, do número de graus de liberdade da estrutura.

Os símbolos $\ddot{\vec{y}}(t)$, $\dot{\vec{y}}(t)$ e $\vec{y}(t)$ representam os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente; e $\vec{F}(t)$, indica o vetor de forças excitadoras do sistema.

As matrizes de massa e rigidez são obtidas com base na geometria do sistema e nas propriedades dos materiais envolvidos. Já a matriz de amortecimento, por se tratar de uma análise mais complexa, em geral é expressa como uma combinação entre as matrizes de massa e rigidez do sistema.

Considerando que, para pequenos amortecimentos, a análise modal do sistema é muito semelhante à análise feita do sistema em vibração livre não amortecida, neste estudo, o amortecimento foi desconsiderado. Desta forma, a equação de movimento dos sistemas em vibrações livres é formulada pela seguinte expressão:

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{y}}(t) + \mathbf{K}\vec{y}(t) = \mathbf{0} \quad (3.2)$$

A equação acima tem solução do tipo:

$$y(t) = A\sin\omega t + B\cos\omega t; \quad (3.3)$$

$$\dot{y}(t) = -A\omega^2\sin\omega t - B\omega^2\cos\omega t \quad (3.4)$$

Substituindo as equações (3.3) e (3.4) na equação (3.2):

$$(K - \omega^2 M)y = 0 \quad (3.5)$$

Equação (3.5) é homogênea linear, e para que não se obtenha a resposta trivial, ou seja, $y = 0$, o determinante da matriz entre parênteses deve ser nulo.

$$|(K - \omega^2 M)| = 0 \quad (3.6)$$

Tal equação resulta em um problema matemático chamado de autovalores e autovetores. Sendo assim, as n raízes encontradas representam os quadrados das n frequências naturais (os autovalores - ω^2) e os n vetores associados a estas frequências (autovetores) correspondem aos modos de vibração (ϕ), respectivamente.

3.1 - MÉTODO DO ERRO RESIDUAL (MER)

O Método do Erro Residual (Genovese, 2000) é uma técnica que permite localizar e quantificar danos numa estrutura. A primeira etapa, a localização do dano, é realizada avaliando o desequilíbrio (erro) na equação de movimento da estrutura ocasionado pela presença de dano. A partir desse erro encontrado, o segundo passo, a quantificação do dano, consiste em minimizar o referido erro na equação do movimento.

O método é baseado no conhecimento das características da estrutura em perfeito estado e da estrutura com regiões danificadas. Dessa forma, é necessário inicialmente o cálculo dos modos e frequências de vibração.

A partir da equação de movimento de uma estrutura em vibração livre e não amortecida Equação (3.2), obtém-se as frequências naturais e seus respectivos modos de vibração Equação (3.6).

$$M\ddot{\vec{y}} + K\dot{\vec{y}} = \vec{0} \quad (3.7)$$

$$K\phi - \Lambda M\phi = \mathbf{0} \quad (3.8)$$

$M \rightarrow$ Matriz de massa global da estrutura;

$K \rightarrow$ Matriz de rigidez global da estrutura;

$\ddot{\vec{y}} \rightarrow$ Vetor aceleração;

$\dot{\vec{y}} \rightarrow$ Vetor deslocamento;

$\phi \rightarrow$ Matriz cujas colunas representam os modos de vibração da estrutura sem dano.

$\Lambda \rightarrow$ Matriz diagonal, na qual os valores são os autovalores (ω^2) da estrutura sem dano.

No caso de estruturas com danos há uma modificação na rigidez das regiões danificadas, o que leva também a frequências e modos diferentes. Desta forma, a equação que governa seu movimento é dada por:

$$K'\phi' - \Lambda' M'\phi' = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

Onde todos os caracteres representam os parâmetros da Equação (3.8), porém correspondentes à estrutura danificada.

Na Equação (3.9) as matrizes de massa e rigidez da estrutura danificada são desconhecidas. Considerando as afirmações efetuadas por diversos pesquisadores (Adams *et al.*, 1978 e Hearn e Testa, 1991, entre outros) é válido supor que a matriz de massa permanece inalterada, uma vez que com a presença de dano a perda de massa pode ser considerada insignificante.

Em relação à matriz de rigidez da estrutura danificada, ela não é conhecida então a consideração na Equação (3.9) da matriz original (correspondente à estrutura intacta) leva a um desequilíbrio chamado de erro residual (Equação (3.10)).

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}\boldsymbol{\phi}' - \boldsymbol{\Lambda}'\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}' \quad (3.10)$$

Onde,

$\boldsymbol{\phi}' \rightarrow$ Matriz cujas colunas representam os modos de vibração da estrutura com dano.

$\boldsymbol{\Lambda}' \rightarrow$ Matriz diagonal, na qual os valores são as frequências de vibração da estrutura com dano.

$\mathbf{E} \rightarrow$ matriz cujos valores representam o erro na equação de movimento devido à presença do dano. E suas colunas, os vetores de erros associados ao modo de vibração.

Como a matriz \mathbf{E} agrupa em suas colunas os vetores dos erros associados aos modos de vibração, a localização do dano consiste em observar o maior valor de cada coluna, o qual representa o local do dano.

A etapa de quantificação do dano é feita por meio de um processo iterativo a partir de um coeficiente " p " que multiplica somente a matriz de rigidez do elemento danificado, uma vez que este já foi localizado.

Os valores de p podem variar entre 0 e 1, onde 0 representa a perda total de rigidez do elemento, e 1 o elemento intacto.

Dessa forma, a matriz global de rigidez considerada na equação do erro residual (Equação (3.10)) passa a ter coeficientes de rigidez com alguns valores reduzidos, uma vez que estes representam a parcela referente ao elemento danificado, como mostra a Equação (3.11).

$$\mathbf{E}(p) = \mathbf{K}''(p)\boldsymbol{\phi}' - \boldsymbol{\Lambda}'\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}' \quad (3.11)$$

Onde:

$$\mathbf{K}''(p) = \mathbf{K}_{EI} + p\mathbf{K}_{ED} \quad (3.12)$$

K_{EI} → Matriz de rigidez global da estrutura com elementos intactos;

K_{ED} → Matriz de rigidez global da estrutura com elemento danificado.

Esquemáticamente:

$$K''(p) = \begin{bmatrix} K_{EI} & & \\ & \mathbf{0} & \\ & & K_{EI} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \mathbf{0} & & \\ & K_{ED} & \\ & & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

O processo iterativo implica em variar o valor de p a fim de se obter o mínimo da norma da função de erros $E(p)$. O valor de p que minimiza a norma de E representa a relação entre a rigidez dos elementos danificado e intacto.

Assim, de posse do valor de p , pode-se afirmar que a estrutura sofreu uma perda de rigidez igual a $1-p$.

3.2 - REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS (RNAs)

As redes neurais são técnicas inseridas dentre as várias metodologias existentes para a solução de problemas de Inteligência Artificial. Essas técnicas são baseadas no ajuste de um conjunto de dados (ajuste de pesos) para que esses possam representar o comportamento de um determinado problema.

Parte da literatura aproxima esse ajuste de pesos ao comportamento do sistema neurológico humano, uma vez que a rede "aprende" técnicas, de forma matemática, a partir da experiência de treinamentos.

Em analogia com o neurônio humano, o primeiro modelo artificial proposto por McCulloch e Pitts em 1943, e por isso chamado de MCP, mais conhecido por Neurônio Booleano está representado na Figura 3.1.

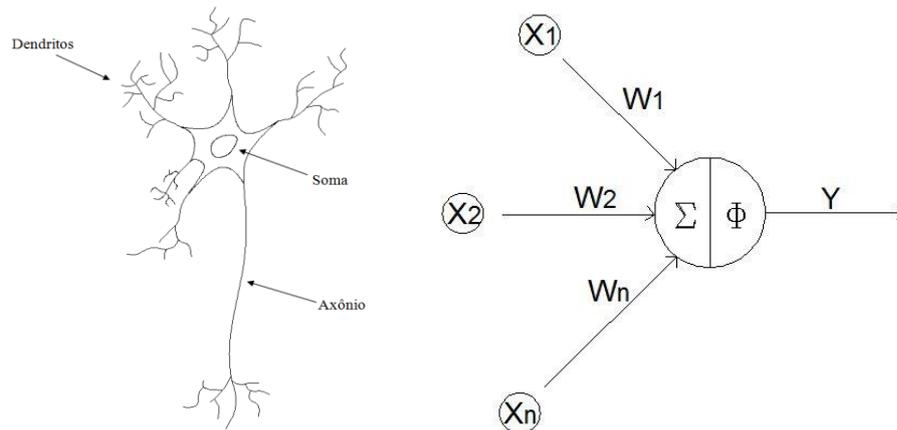


Figura 3.1 (a) Neurônio humano; (b) Modelo do Neurônio Booleano.

Os *dendritos* são ramificações responsáveis por receber os impulsos oriundos de outros neurônios e levar os sinais para o *soma*, ambiente no qual os impulsos são processados e novos impulsos são gerados (Figura 3.1(a)).

O neurônio ainda é composto de uma ramificação única, mas robusta, o *axônio*. Este tem a função de transmitir para a extremidade da célula os impulsos processados no *soma*, e desta forma, transmiti-los por meio de nervos terminais para outros neurônios. Esta transmissão recebe o nome de sinapse.

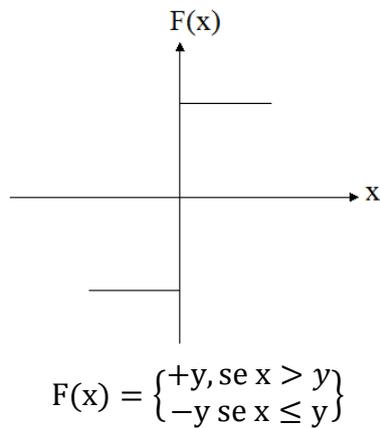
Simulando o comportamento dos dendritos, o modelo apresenta n terminais de entrada x_1, x_2, \dots, x_n e um único canal de saída Y , o qual se assemelha com a ramificação do *axônio*. W_1, W_2, \dots, W_n são pesos que se somam às entradas para determinar a ativação ou inibição destas entradas, simulando aí a tarefa das *sinapses*. Desta forma, a ativação do neurônio depende da função correspondente, que ativa ou não a saída, representada na Figura 3.1(b) por Σ e Φ .

As redes neurais podem se diferenciar quanto às funções de ativação usadas em seu interior, quanto à arquitetura e quanto à sua forma de aprendizado.

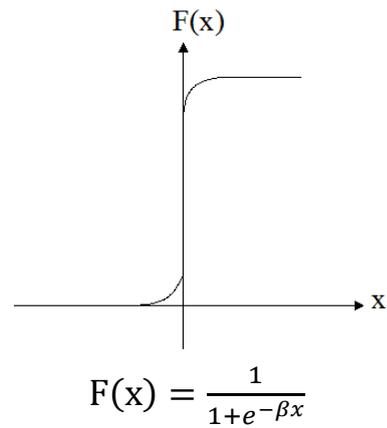
- **Funções de ativação**

As funções de ativação têm como objetivo gerar as saídas dos neurônios e, para tal, fazem uso dos valores dos dados de entrada e dos pesos. Seu uso varia de acordo com o problema a ser resolvido. Dentre as principais funções de ativação, as mais utilizadas são as funções Degrau, Sigmoidal, Linear e a Gaussiana. (Figura 3.2 -(a), (b), (c), (d), respectivamente).

(a) Função de ativação Degrau

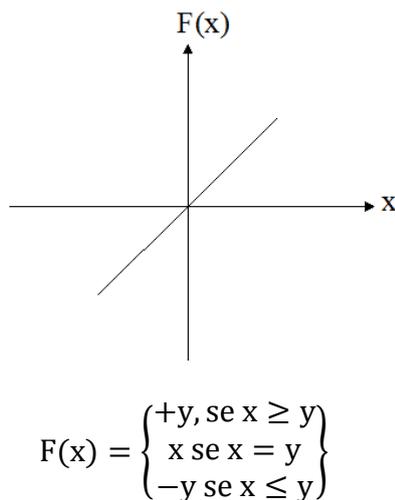


(b) Função de ativação Sigmoidal

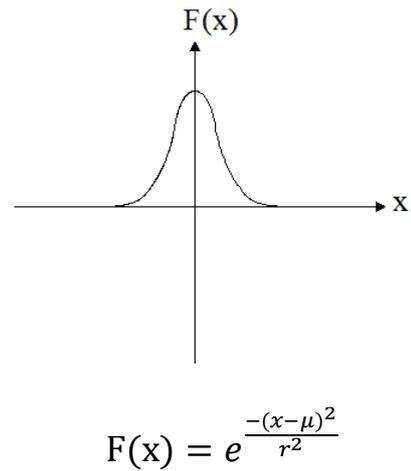


Onde β é a inclinação da função

(c) Função de ativação Linear



(d) Função de ativação Gaussiana



Onde μ é o centro (ponto médio) e r é o raio de abertura da função.

Figura 3.2 Funções de ativação.

- **Arquitetura da Rede**

Trata-se de como os neurônios são agrupados. A rede pode ser composta de uma ou mais camadas de neurônios, e essa organização independe da função de ativação. No caso de neurônios individuais, há redução na capacidade de resolução de determinados problemas. Assim, busca-se conectar os neurônios na forma de uma rede, a fim de ser obter sucesso na resolução de problemas complexos.

As configurações mais usuais para organização dos neurônios são as seguintes: Rede *feedforward* de uma única camada, Rede *feedforward* de Múltiplas camadas (MLP); Rede com recorrência entre camada de saída e camada intermediária e Rede com recorrência auto associativa.

Rede *feedforward* de uma única camada: Composta de apenas uma camada alimentada pela frente (*feedforward*). As unidades de entrada são neurônios que recebem os sinais externos e, as de saída, os neurônios que apresentam os resultados processados pela rede. A Figura 3.3 mostra a estrutura deste tipo de rede, as unidades azuis ($X_1, X_2, X_3... X_n$) representam os neurônios de entrada, e, $Y_1, Y_2, Y_3... Y_n$, as unidades em vermelho, os neurônios de saída. Este tipo de estrutura apresenta algumas restrições quanto à sua eficiência, uma vez que, contando apenas com uma camada pode resultar insuficiente para solucionar problemas de alta complexidade.

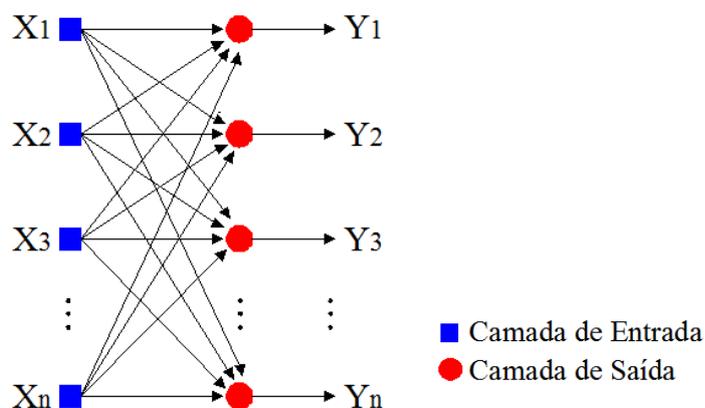


Figura 3.3 Rede *feedforward* de uma única camada.

Rede *feedforward* de Múltiplas Camadas (MLP): Possui um arranjo muito semelhante às estruturas das Redes *feedforward* de uma única camada, porém, por dispor de camadas intermediárias (camadas ocultas), este tipo de rede apresenta melhor desempenho quando utilizada na resolução de problemas mais complexos.

A Figura 3.4 mostra o agrupamento de neurônios em camada de entrada, camada intermediária (unidades verdes) e camada de saída. A quantidade de neurônios pode variar de acordo com o problema a ser resolvido.

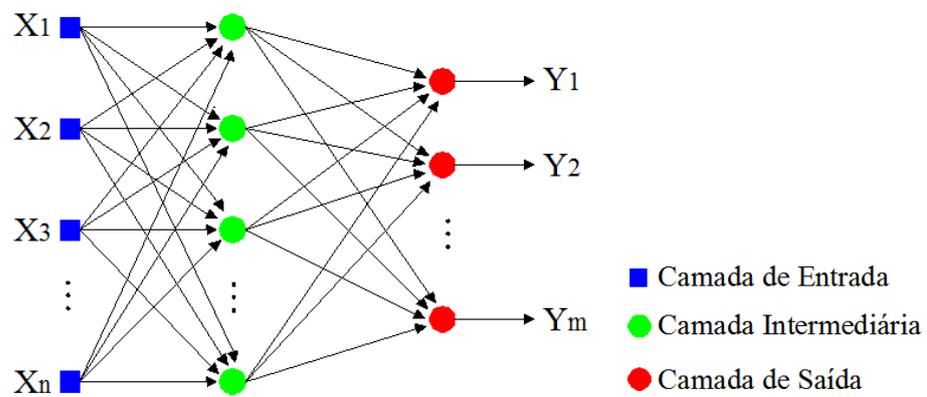


Figura 3.4 Rede *feedforward* de Múltiplas camadas.

Rede com recorrência entre camada de saída e camada intermediária: Tipo de estrutura na qual os neurônios dependem não somente das entradas, mas também dos seus valores atuais. Isto ocorre porque as células artificiais podem apresentar recorrência (*feedback*), como observado na Figura 3.5. Tal recorrência consiste na realimentação do neurônio com a saída atual, o que torna as saídas determinadas pelas entradas atuais e pelas saídas anteriores, e pode acontecer com neurônios de mesmo e de diferentes níveis.

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

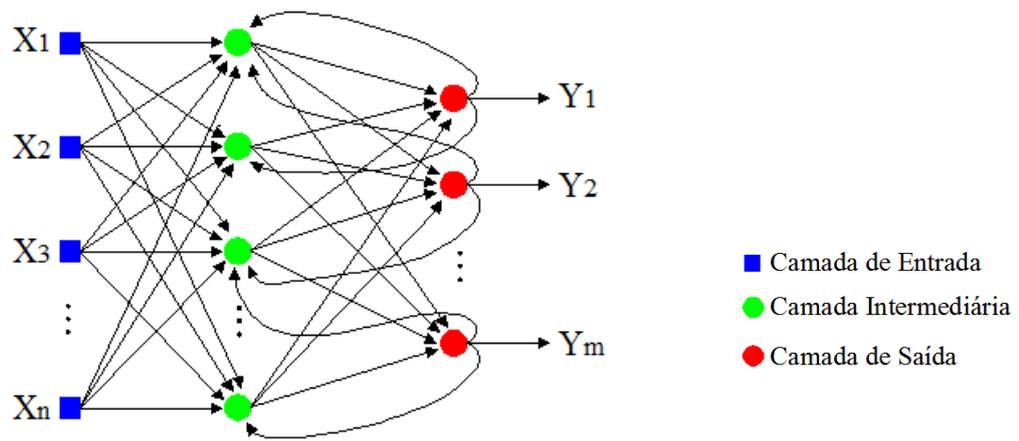


Figura 3.5 Rede com recorrência entre camada de saída e camada intermediária.

Rede com recorrência auto associativa: Rede Neural conhecida por rede de Hopfield é do tipo recorrente e se constitui de neurônios de McCulloch-Pitts agrupados em um só nível e de forma simétrica. Esta organização permite que a saída de cada neurônio se conecte com as entradas de todos os outros. A rede não possui entradas externas, e sua operação se dá em função da dinâmica de mudança de estados de neurônios que operam de forma auto-associativa. A Figura 3.6 mostra este tipo de rede, com os neurônios representados pelas unidades localizadas nas extremidades e pontos de encontros entres as ligações.

As redes Hopfield podem ser utilizadas em problemas de otimização e de controle, entre outros.

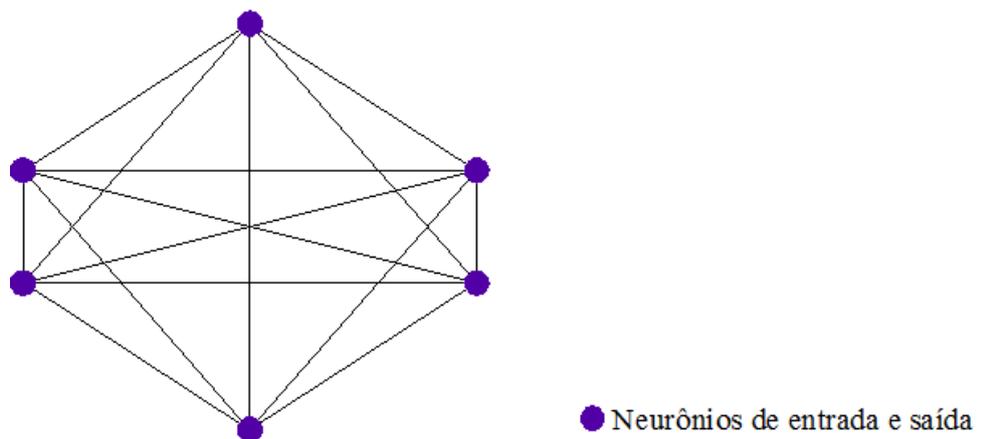


Figura 3.6 Rede com recorrência auto-associativa.

- **Aprendizado**

O treinamento consiste, basicamente, no ajuste dos pesos (parâmetros da rede), através de um processo iterativo. Esse processo ocorre por meio de um critério preestabelecido, mais conhecido por algoritmo, que a partir de dados de entrada, produz conjuntos de saída desejados, ou seja, com erros aceitáveis para o problema em questão.

Existem vários algoritmos de treinamento, e estes são divididos em duas principais classes pelo modo de ajustar os pesos. Estas classes são: Aprendizado Supervisionado e Aprendizado Não Supervisionado.

Aprendizado Supervisionado: Neste tipo de treinamento há um supervisor externo que conhece a resposta desejável da rede. Tal supervisor é responsável por estimular as entradas da rede (observando os padrões de entrada) e analisar as saídas, comparando as respostas “atuais” com as desejadas. Com base nesta análise, o supervisor direciona o ajuste de pesos, por meio de um algoritmo, com vistas à minimização do erro e, assim, à finalização do treinamento com uma possível solução.

Os algoritmos de aprendizado supervisionado mais utilizados são a regra Delta e sua generalização para redes de múltiplas camadas, o algoritmo *Backpropagation* (que será detalhado mais adiante) e suas variações (*Levenberg-Marquardt*, *Rprop*, *Quickprop*, etc).

Aprendizado Não Supervisionado: Modelo de aprendizagem no qual não se tem o agente conhecedor das entradas e das respectivas saídas da rede. Durante o processo de aprendizagem somente os padrões de entradas são fornecidos à rede, e a existência de regularidades nesses dados faz com que o aprendizado seja possível. Assim, para este tipo de treinamento, faz-se necessário a existência de regularidade e redundância dos dados.

Os problemas que podem ser resolvidos com este tipo de rede são aqueles que procuram descobertas de características estatisticamente relevantes nos dados de entrada.

3.2.1 - Redes Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP)

Após o trabalho de Warren McCulloch e Walter Pitts (McCulloch e Pitts, 1943), Rosenblatt (1958) sugeriu um modelo que tinha como unidades básicas neurônios MCP (Neurônio Booleano). O *Perceptron* ou *Perceptron* de uma camada, como ficou conhecido, era composto por três níveis, a Retina (recebe entradas do exterior), Associação (nível intermediário) e Resposta (saída), e se limitava a resolver problemas linearmente separáveis. Por este motivo o referido modelo não ficou bem visto pela comunidade científica.

Depois de alguns anos de novos estudos nas RNAs, surgiu a ideia de que os neurônios artificiais fossem agrupados em camadas, das quais se destacavam a camada de entrada, a camada de saída e as camadas ocultas ou intermediárias.

Estas camadas foram compostas por quantidades diferentes de neurônios, dependendo apenas das variáveis envolvidas no problema e da quantidade de saídas que se pretende. Desta forma, estava concebida a rede neural mais conhecida como Perceptron de Múltiplas Camadas. (Figura 3.7)

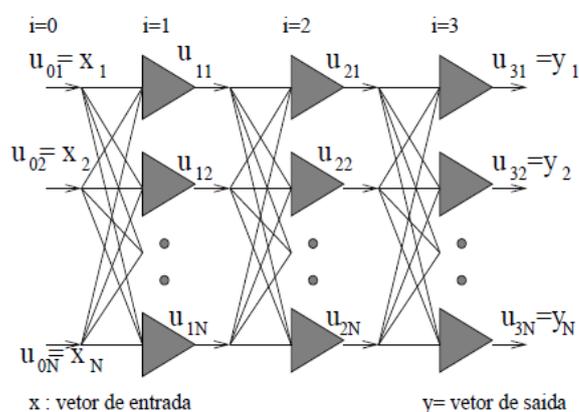


Figura 3.7 Representação gráfica da Rede MLP. Genovese (2005)

A Figura 3.7 representa o comportamento matemático da rede, na qual u_{ij} são as saídas da i -ésima camada com seu respectivo j -ésimo neurônio. No caso mostrado, as entradas da rede são mostradas pela camada 0 ($i=0$) e as saídas pela camada 3 ($i=3$).

Este tipo de arquitetura de rede com múltiplas camadas (MLP) apresenta mais vantagens em relação às redes com uma única camada, uma vez que as MLPs são mais eficientes no desempenho computacional e, por este motivo, utilizada neste trabalho como meio de quantificar o dano em pórticos espaciais.

3.2.1.1 Treinamento das RNAs

A grande função das RNAs está na sua capacidade de aprender a partir de informações externas. Sendo assim, para que essa capacidade seja desenvolvida, a rede precisa passar pela etapa de treinamento.

O treinamento consiste, basicamente, no ajuste dos pesos, através de um processo iterativo, para que a rede tenha um aprendizado satisfatório e possa apresentar erros aceitáveis. Sendo assim, para cada tipo de rede, existem vários algoritmos de aprendizado adaptáveis a cada problema a ser resolvido.

Dentre os algoritmos existentes, neste trabalho será utilizado um pacote computacional chamado *Neural Network Toolbox* que já tem, internamente, o algoritmo de retropropagação ou *backpropagation*, proposto por Rumelhart *et al.*(1986), bem como suas variações. O *backpropagation* é uma regra de aprendizado supervisionada, cujo objetivo é minimizar erros até valores mínimos, por meio da correção dos pesos entre as conexões dos neurônios.

A minimização do erro acontece pela execução do gradiente decrescente. Este processo pode ser descrito nas etapas *forward* e *backward*. A figura 3.8 mostra uma rede neural com N_e neurônios na camada de entrada (chamados de X_k), N_i neurônios na camada oculta (chamados de σ_j), N_y neurônios na camada de saída (chamados de Y_i) e pesos α_{jk} (entre a camada de entrada e a camada intermediária) e ω_{ij} (entre a camada intermediária e camada de saída).

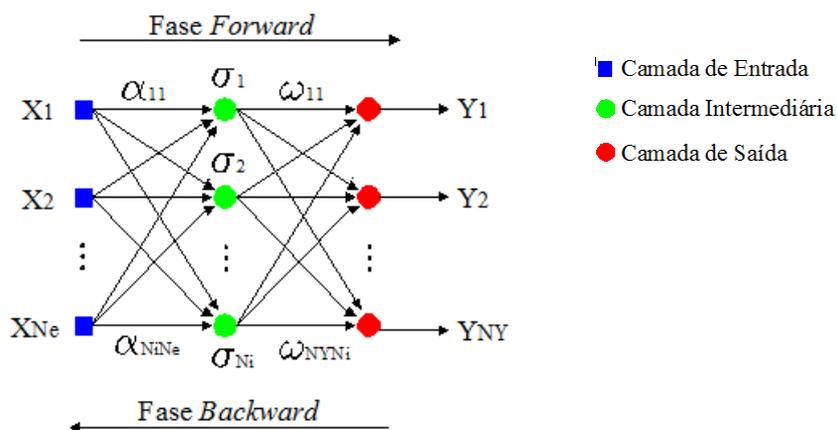


Figura 3.8 Fases forward e backward do algoritmo backpropagation.

Com base na rede da figura 3.8, os passos do *backpropagation* são mostrados a seguir:

Forward

- 1) São fornecidos à rede o vetor \mathbf{X} com Z conjuntos de entradas (com saídas conhecidas – Y_{id}) e, a partir dos pesos α_{jk} , e da função de ativação, são calculados os neurônios σ_j da primeira camada intermediária.

$$\sigma_j = f\left(\sum_{k=1}^{N_e} X_k \cdot \alpha_{jk}\right) \quad (3.14)$$

Os neurônios da camada de saída são calculados da mesma forma, mas com outros pesos (ω_{ij}) e utilizando os neurônios da camada intermediária (σ_j) como dados de entrada.

$$Y_i = f\left(\sum_{j=1}^{N_i} \sigma_j \cdot \omega_{ij}\right) \quad (3.15)$$

O processo se repete até se chegar à última camada da rede, neste caso, a terceira camada, a camada de saída.

- 2) As saídas produzidas pelos neurônios da última camada (Y_{NY}) são comparadas com as saídas desejadas (Y_{NYd}), estas últimas já conhecidas. A partir dessa comparação é gerado o erro ($e = Y_{id} - Y_i$). O erro quadrático de todos os neurônios (E^2) é dado por:

$$E^2 = \frac{1}{2Z} \sum_{v=1}^Z \sum_{i=1}^{N_Y} (Y_{id} - Y_i)^2 \quad (3.16)$$

Backward

- 1) A partir do gradiente decrescente do erro das camadas com relação aos pesos, chega-se ao ajuste destes pesos. Utilizando a rede mostrada na Figura 3.8, esta etapa se

realiza com a correção dos pesos ω_{ij} que ligam a última camada (camada de saída) à camada intermediária.

$$\frac{\partial E^2}{\omega_{ij}} = \frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z \frac{\partial E^2}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial \omega_{ij}} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial E^2}{\omega_{ij}} = -\frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z (Y_{id} - Y_i) f'(\sum_{j=1}^{Ni} \sigma_j \cdot \omega_{ij}) \sigma_j \quad (3.18)$$

Com base nas derivadas, a correção dos pesos é efetuada pela seguinte expressão:

$$\omega_{ij}^{\text{novo}} = \omega_{ij}^{\text{velho}} - \mu \frac{\partial E^2}{\partial \omega_{ij}} \quad (3.19)$$

Onde μ é o passo usado para alcançar a melhor convergência.

- 2) Uma vez calculados os novos pesos da camada última camada (camada de saída), os erros são propagados para camada anterior (camada intermediária), utilizando-se para isso os pesos, que serão multiplicados pelos erros correspondentes. Assim, tem-se um valor de erro para cada neurônio da camada escondida.
- 3) Os erros da camada intermediária são utilizados para o ajuste dos seus pesos, analogamente ao procedimento descrito anteriormente.

$$\frac{\partial E^2}{\alpha_{jk}} = \frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z \frac{\partial E^2}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial \sigma_j} \frac{\partial \sigma_j}{\partial \alpha_{jk}} \quad (3.20)$$

Como a correção dos pesos da camada intermediária depende dos novos erros propagados pela camada última camada, a camada de saída,

$$\frac{\partial E^2}{\alpha_{jk}} = -\frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z (Y_{id} - Y_i) f'(\sum_{j=1}^{Ni} \sigma_j \cdot \omega_{ij}) \omega_{ij} f'(\sum_{k=1}^{Ne} X_k \cdot \alpha_{ij}) X_k \quad (3.21)$$

Com base nas derivadas, a correção dos pesos é efetuada pela seguinte expressão:

$$\alpha_{jk}^{\text{novo}} = \alpha_{jk}^{\text{velho}} - \mu \frac{\partial E^2}{\alpha_{jk}} \quad (3.22)$$

Uma vez ajustados os pesos, conclui-se o ajuste dos pesos de toda a rede para o vetor de entrada \mathbf{X} e sua saída desejada Y_{id}

Após a fase de treinamento, na qual a variação dos erros é mínima, a rede passa para as etapas de validação e generalização. Na validação a rede é simulada com conjuntos de dados já conhecidos. No caso da generalização, a rede passa a ter os dados de entrada diferentes dos que foram fornecidos em seu treinamento, ou seja, dados ainda desconhecidos, uma vez que esta já "aprendeu" como deve ser seu comportamento. Deste modo, ela está apta a ser aplicada no problema em questão.

3.3 - QUANTIFICAÇÃO DE DANOS VIA REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Neste trabalho a etapa de quantificação é realizada por meio do software Matlab, mais especificamente o pacote *Neural Network Toolbox*.

A rede é do tipo Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP), e tem o *backpropagation* com variações como algoritmo de treinamento. Essas variações acontecem na etapa da correção ou ajustes dos pesos, e dão nome as outros algoritmos, como é o caso do algoritmo *Levenberg-Marquardt backpropagation*. Este último desenvolve os passos mostrados no item anterior, substituindo as equações (3.19) e (3.22) pela Equação (3.23), esta última generalizada para todas as camadas.

O *Levenberg-Marquardt backpropagation* é um dos algoritmos de otimização mais utilizados superando outros algoritmos em uma grande variedade de problemas, no entanto demanda grande quantidade de memória computacional para sua realização.

A regra de ajuste de pesos é baseada no método de Newton e se dá pela seguinte equação:

$$\varphi^{Novo} = \varphi^{velho} - (\mathbf{H} + \mu\mathbf{I})^{-1}\nabla E \quad (3.23)$$

Onde φ representa os pesos, \mathbf{H} a matriz Hessiana, ∇E o gradiente do erro (mostrado na Equação 3.16) e μ um fator de ajuste.

A arquitetura utilizada está representada na Figura 3.9, com uma camada de entrada, uma camada oculta ou intermediária, e, finalmente, a camada de saída, com apenas uma resposta.

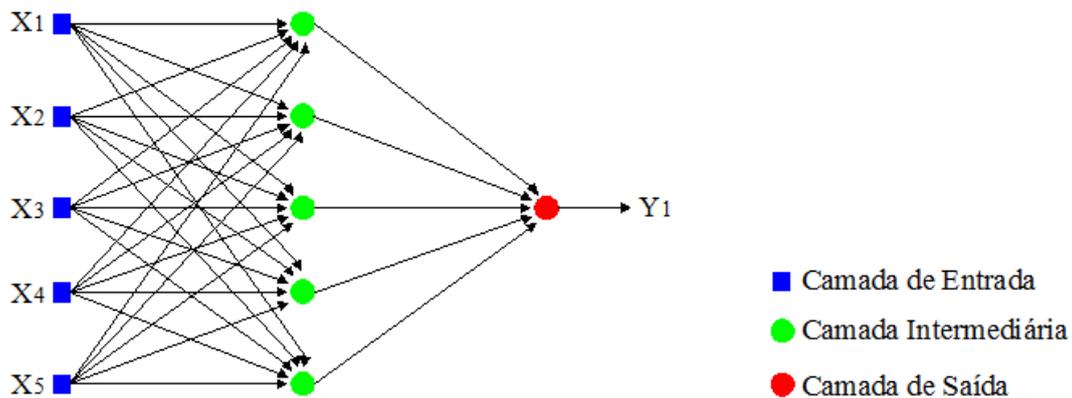


Figura 3.9 Arquitetura da rede utilizada.

A rede tem como dados de entrada os erros encontrados por meio do MER (Genovese, 2000). A partir daí, seu treinamento tenta estabelecer uma relação entre os valores máximos desses erros com o valor dos danos existentes nos elementos.

4 - FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Como já mencionando, este trabalho foi desenvolvido no ambiente Matlab. Este software dispõe de várias bibliotecas ou *toolboxes* para aplicações específicas, como, por exemplo, os pacotes de Redes Neurais Artificiais (RNAs), Lógica Fuzzy, Otimização de Sistemas, *Wavelets*, entre outras, além de proporcionar uma linguagem de programação de fácil entendimento para o desenvolvimento de códigos computacionais.

Nesse sentido, baseado nas equações descritas no capítulo anterior, este capítulo descreve as etapas computacionais desenvolvidas para o uso do Método do Erro Residual (MER) e das RNAs.

4.1 - PROGRAMA PARA O MÉTODO DO ERRO RESIDUAL (MER)

Para utilização do método de identificação de danos, o Método do Erro Residual (MER) (Genovese, 2000), foram desenvolvidas rotinas baseadas em códigos computacionais criados por Genovese (2000) e Brasileiro (2001) e utilizando as equações (3.1) a (3.13) indicadas no Cap. 3, item 3.1.

As rotinas foram separadas em três partes principais: obtenção das características dinâmicas, localização e quantificação dos danos.

Obtenção das características dinâmicas: Esta primeira etapa tem como objetivo a obtenção das propriedades dinâmicas dos modelos intactos e danificados. Para isso, de posse do modelo intacto, cria-se o modelo danificado através da “introdução” de danos em alguns elementos por meio da redução de suas seções transversais.

Os modelos são discretizados através do Método dos Elementos Finitos, a partir daí são criados os arquivos que servirão de entrada para o código computacional. Esses arquivos, também conhecidos como arquivos de entrada, contêm todas as informações da discretização (número de elementos, número de nós, graus de liberdade, coordenadas e conectividades) além das propriedades físicas do material.

O arquivo de entrada do modelo intacto é então fornecido ao programa. Este contém sub-rotinas capazes de captar as informações citadas acima, e a partir daí, gerar as matrizes de massa e rigidez da estrutura.

Com as referidas matrizes, o Matlab resolve o problema de autovalores e autovetores, representado pela Equação (3.8), contida no Cap. 3, chegando, portanto, às frequências naturais e seus respectivos modos de vibração.

Esta primeira etapa se encerra com uma sub-rotina capaz de plotar os modos de vibração e armazenar as matrizes de massa e rigidez, bem como as propriedades dinâmicas do modelo.

Para o modelo danificado executam-se os mesmos passos descritos acima, representados na Figura 4.1, e, da mesma forma que no modelo intacto, armazenam-se todas as suas características.

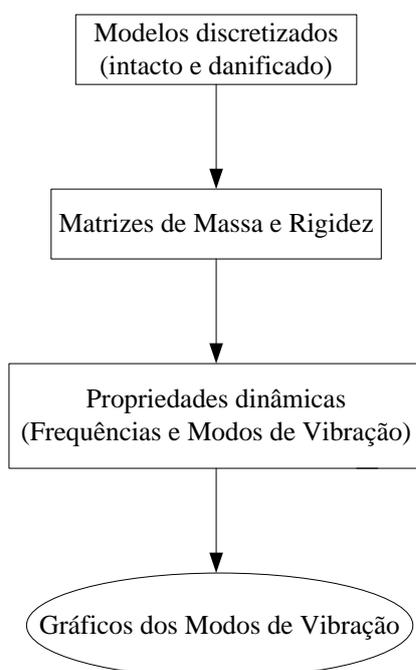


Figura 4.1 Rotina para obtenção das propriedades dinâmicas.

Localização dos danos: Esta rotina se inicia com o resgate das características dinâmicas do modelo danificado e das matrizes de massa e rigidez do modelo intacto. O código computacional segue com a utilização da Equação (3.10) do Cap. 3, na qual são observados os desequilíbrios numéricos do sistema (os chamados Erros).

Os erros são agrupados em forma de matriz, a matriz **E**. O número de linhas corresponde à quantidade de nós da estrutura e as colunas representam os modos de vibração. Assim, a matriz agrupa em suas colunas os vetores dos erros associados aos modos de vibração.

Para que seja localizado o elemento danificado, o programa identifica os maiores valores de cada coluna, ou seja, os erros atribuídos a cada modo de vibração. Após a identificação, há uma interação do usuário no sentido de informar ao programa a quantidade de elementos da estrutura, bem como a quantidade de nós.

Esta intervenção ocorre para permitir a plotagem da localização do dano, uma vez que os picos devem aparecer exatamente no número do elemento danificado, conforme a discretização realizada no passo anterior.

A Figura 4.2 mostra o resumo da segunda etapa do código computacional do MER.

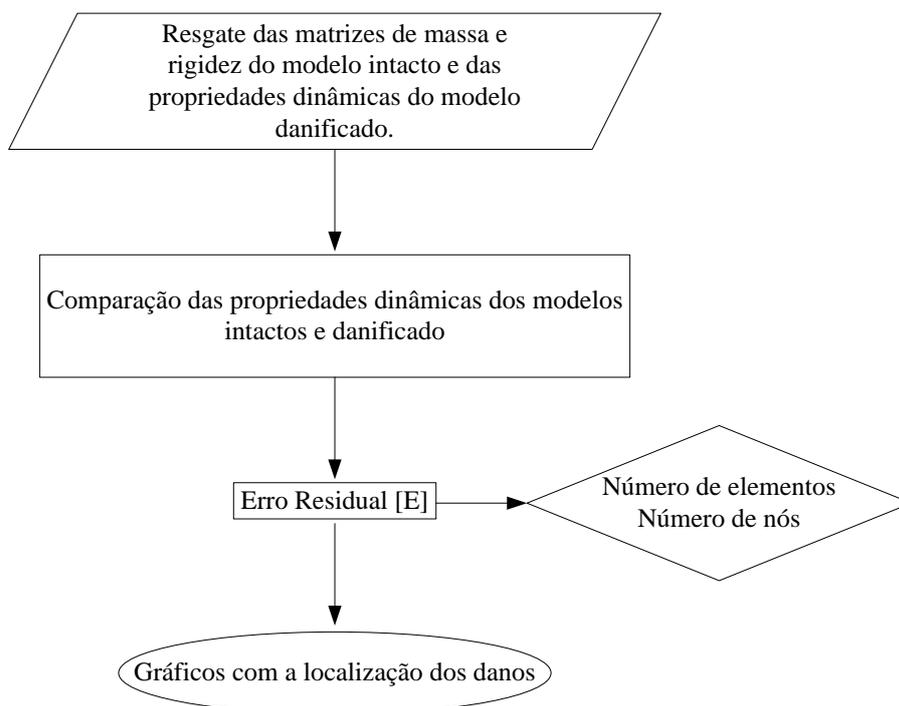


Figura 4.2 Rotina para localização de danos.

Quantificação dos danos: A última fase do método, a quantificação dos danos, tem início com o resgate das propriedades dinâmicas do modelo danificado seguido da “alimentação” do programa com o arquivo de entrada do modelo intacto.

A partir daí, a rotina é interrompida pelo usuário para informar o número do elemento danificado, previamente localizado, e o número de nós do modelo.

Essas informações são necessárias, pois o processo da formação da matriz de rigidez depende do fator “ p ” que multiplicará a submatriz do elemento danificado, como mostrada nas equações (3.11), (3.12) e (3.13) do Capítulo 3.

Neste processo iterativo, à medida que a nova matriz de rigidez é formada, é calculado o mínimo da norma da função Erro. Desse modo, ao final do processo, a mínima norma da referida função subtraída de 1, corresponde ao valor do dano no elemento.

A etapa termina com a plotagem do valor mínimo da norma calculado no processo iterativo (Figura 4.3).

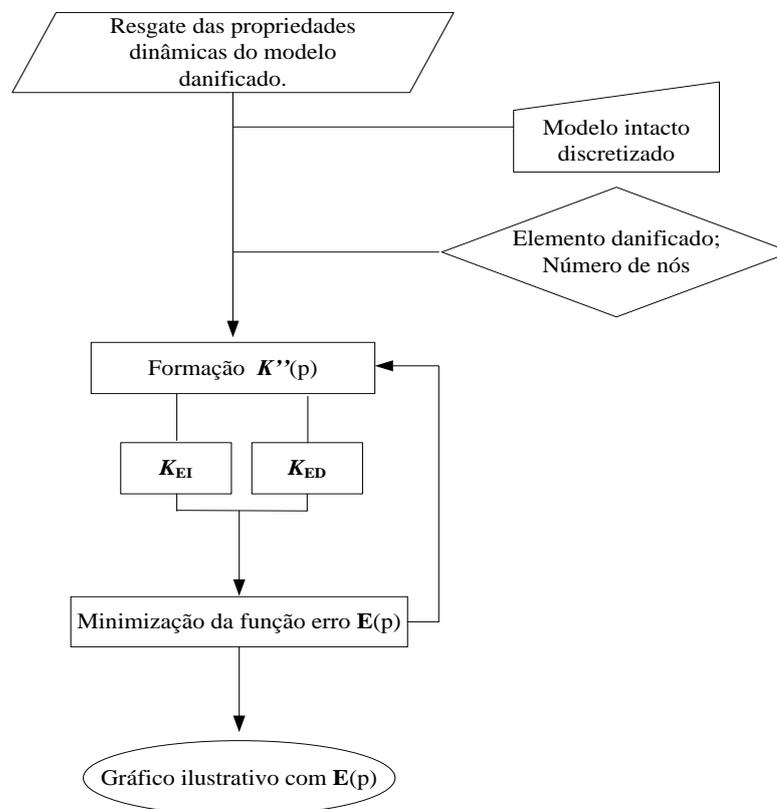


Figura 4.3 Rotina para quantificação de danos.

4.2 - PROGRAMA PARA QUANTIFICAÇÃO DE DANO COM RNAs

Neural Network Toolbox™ é um pacote computacional inserido no ambiente do Matlab que fornece ferramentas para execução, visualização e simulação de Redes Neurais Artificiais com variações quanto ao modo de aprendizado, algoritmo, maneira de processamento dos dados, bem como as várias funções de ativação existentes. Além destas funções, o pacote suporta diferentes tipos de rede, o que o torna capaz de ser utilizado em diversas áreas do conhecimento, bem como em diferentes tipos de problemas como, por exemplo, dados de montagem, reconhecimento de padrões, ou agrupamento de séries temporais, previsão, modelagem do sistema dinâmico e controle, etc.

Como já mencionado anteriormente, a utilização de uma rede neural passa, basicamente, por três processos: o treinamento, a validação e a generalização. Por se tratar de um pacote que contém internamente o algoritmo *Backpropagation*, o *Neural Network Toolbox* realiza as referidas etapas automaticamente, ficando para o usuário apenas a tarefa de fornecer os dados a serem usados em cada uma das fases.

O código para utilização das RNAs tem início com a declaração dos dados para o treinamento, a validação e a generalização. Os dados devem ser agrupados em forma de matrizes e, na etapa de treinamento, os dados de entrada devem ser organizados com suas respectivas saídas para que assim a rede possa identificar as relações matemáticas existentes entre tais informações.

Após a declaração dos referidos dados, o código passa para a etapa da criação da rede através da função *Newff*. Esta função é responsável pela determinação das características da RNA, e é a partir dela que são definidos o algoritmo, o número de camadas, de neurônios e as funções de ativação. A Figura 4.4 mostra a estrutura da função *Newff*.

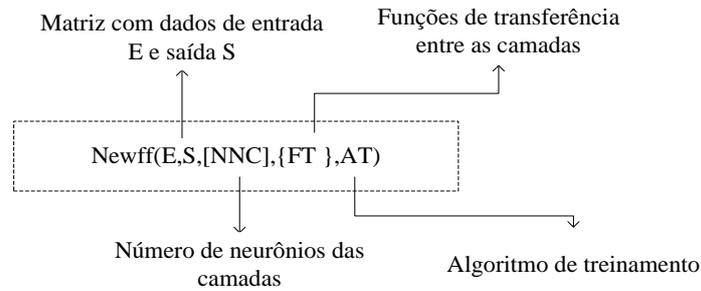


Figura 4.4 Estrutura da função *Newff*.

A rede é iniciada e treinada através das funções *init* e *train*, respectivamente (Figura 4.5). Nesta etapa o processamento interno do Matlab define, através do algoritmo selecionado, os padrões da rede, bem como a relação existente entre os dados de entrada e saída.

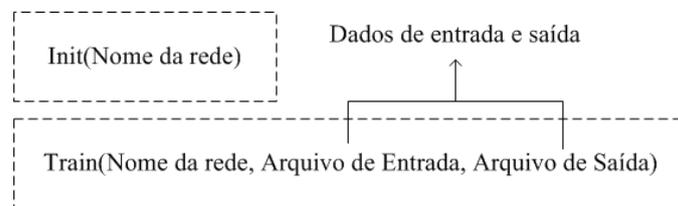


Figura 4.5 Funções *Init* e *Train*.

Após o treinamento, com os pesos já definidos, a rede é submetida à validação e à generalização. Para a realização de tais etapas é usada a função *sim*, esta responsável pela simulação da referida RNA. A Figura 4.6 mostra como é feita sua sintaxe.

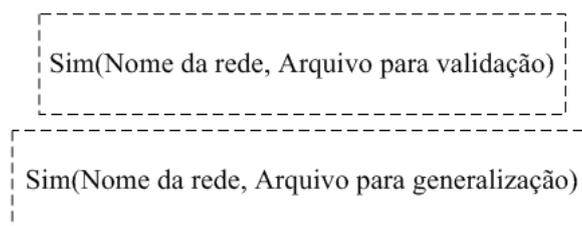


Figura 4.6 Função *Sim*.

Após todas as tarefas descritas acima, o código computacional finaliza a quantificação dos danos com a plotagem do gráfico dos elementos danificados e seus respectivos valores de dano. Esse gráfico é gerado de forma que possibilita a visualização do desempenho da RNA, uma vez que na plotagem são exibidos os resultados esperados (valores dos danos introduzidos inicialmente) bem como os resultados processados pela rede.

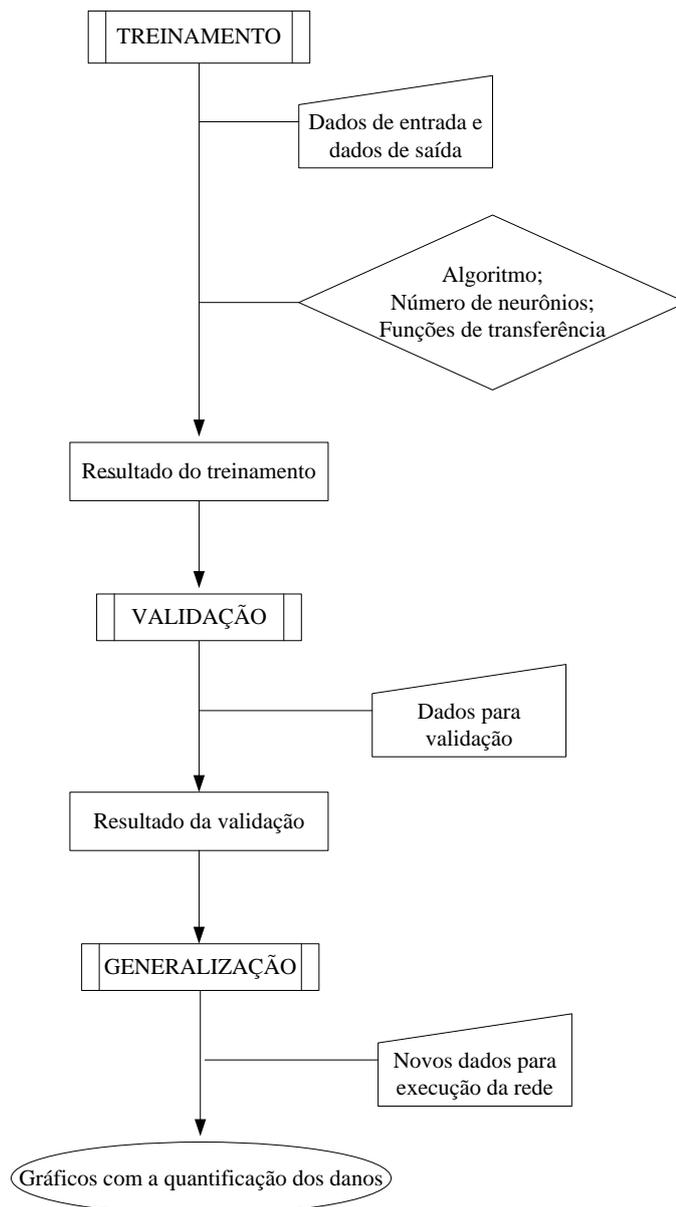


Figura 4.7 Rotinas para quantificação de danos usando RNAs.

A Figura 4.7 mostra todas as etapas que compõem a rotina computacional para a quantificação de danos com a utilização das RNAs através do pacote *Neural Network Toolbox*.

A partir da fase de elaboração das rotinas computacionais, o trabalho passou para a etapa de análises numéricas, esta última descrita no próximo capítulo, o capítulo 5.

5 - ANÁLISE NUMÉRICA

A localização e a quantificação dos danos foram realizadas de forma numérica, utilizando-se para isso quatro modelos de pórticos espaciais, o Método do Erro Residual (MER) e a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNAs).

A análise foi dividida em duas partes, na primeira etapa foi utilizado o MER para localizar e quantificar danos em todos os modelos numéricos considerados.

Na segunda etapa foram utilizados dois métodos, MER e RNAs, na qual os danos foram localizados pelo MER, e a partir destes resultados, RNAs foram aplicadas para quantificá-los.

Foi utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF) na discretização dos pórticos. As referidas estruturas foram subdivididas em elementos de pórtico espacial, com seis graus de liberdade por nó (Figura 5.1), sendo a matriz de rigidez (Gere e Weaver, 1987) e a matriz de massa (J. S Przemieniecki, 1968) representadas pelas expressões (5.1) e (5.2), respectivamente.

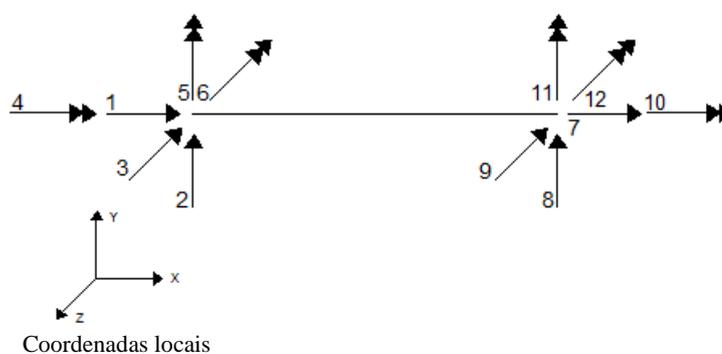


Figura 5.1 Elemento de pórtico espacial, com 6 graus de liberdade por nó.

Na Figura 5.1 estão representados os graus de liberdade compreendidos em cada nó de um elemento de pórtico espacial em coordenadas locais. Os graus de liberdade representados pelos números 1, 2, 3, 7, 8 e 9 indicam as translações dos dois nós extremos dos elementos na direção dos eixos X, Y e Z, respectivamente.

Já as setas duplas, representadas pelos números 4, 5, 6, 10, 11 e 12, representam as rotações em torno dos referidos eixos (Figura 5.1).

$$\mathbf{M} = \rho LA \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_Z}{5AL^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{11L}{210} + \frac{I_Z}{10AL} & 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_Y}{5AL^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13L}{420} + \frac{I_Z}{10AL} \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_Y}{5AL^2} & 0 & -\frac{11L}{210} - \frac{I_Y}{10AL} & 0 & 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_Y}{5AL^2} & 0 & \frac{13L}{420} - \frac{I_Y}{10AL} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{I_X}{3A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_X}{6A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{11L}{210} - \frac{I_Y}{10AL} & 0 & \frac{L^2}{105} + \frac{2I_Y}{15A} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13L}{420} + \frac{I_Y}{10AL} & 0 & -\frac{L^2}{140} - \frac{I_Y}{30A} & 0 \\ 0 & \frac{11L}{210} + \frac{I_Z}{10AL} & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{105} + \frac{2I_Z}{15A} & 0 & \frac{13L}{420} - \frac{I_Z}{10AL} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{140} - \frac{I_Z}{30A} \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_Z}{5AL^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{13L}{420} - \frac{I_Z}{10AL} & 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_Z}{5AL^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{11L}{210} - \frac{I_Z}{10AL} \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_Y}{5AL^2} & 0 & -\frac{13L}{420} + \frac{I_Y}{10AL} & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_Y}{5AL^2} & 0 & \frac{11L}{210} + \frac{I_Y}{10AL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{I_X}{6A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_X}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13L}{420} + \frac{I_Y}{10AL} & 0 & -\frac{L^2}{140} - \frac{I_Y}{30A} & 0 & 0 & 0 & \frac{11L}{210} + \frac{I_Y}{10AL} & 0 & \frac{L^2}{105} + \frac{2I_Y}{15A} & 0 \\ 0 & -\frac{13L}{420} + \frac{I_Z}{10AL} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{140} - \frac{I_Z}{30A} & 0 & -\frac{11L}{210} - \frac{I_Z}{10AL} & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{105} + \frac{2I_Z}{15A} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_Z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_Z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_Z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_Z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_Y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_Y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_Y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_Y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_X}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_X}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_Y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_Y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_Y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_Y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_Z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_Z}{L} & 0 & -\frac{6EI_Z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_Z}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_Z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_Z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_Z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_Z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_Y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_Y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_Y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_Y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_X}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_X}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_Y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_Y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_Y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_Y}{L^2} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_Z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_Z}{L} & 0 & -\frac{6EI_Z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_Z}{L} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

5.1 - MODELOS ANALISADOS

Como dito anteriormente, foram analisados quatro modelos de pórtico espacial, entre eles, um modelo mais simples (Figura 5.2), com apenas um pavimento, e modelos mais complexos (Figuras 5.3 a 5.5). Em todos foram aplicados os procedimentos descritos acima para localização e quantificação dos danos previamente introduzidos.

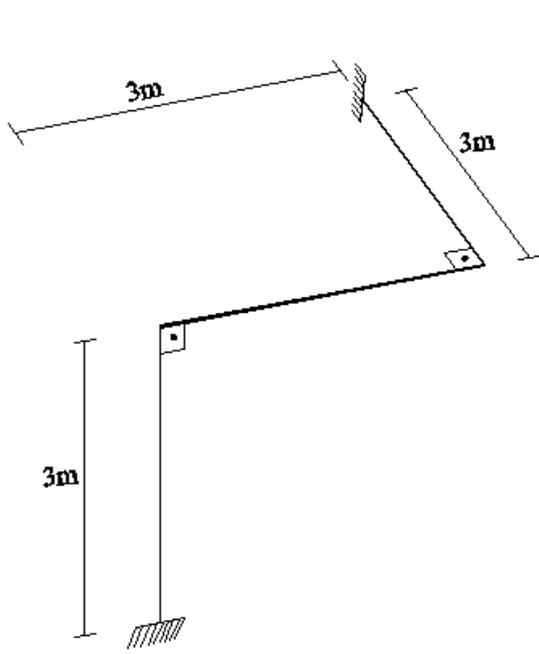


Figura 5.2 Modelo 1.

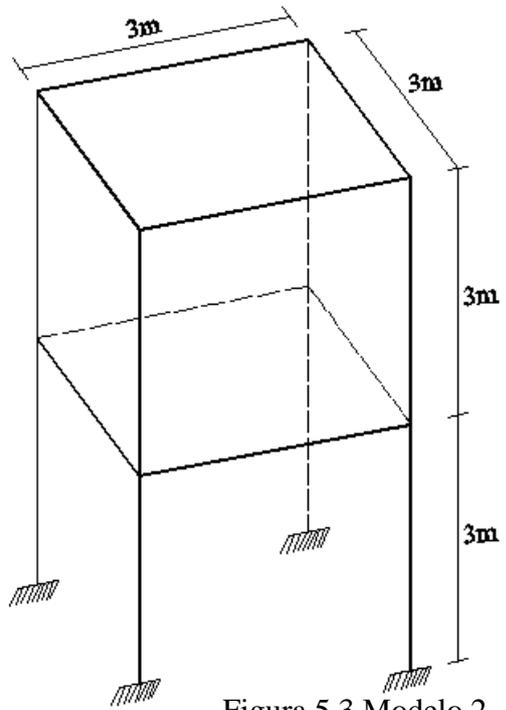


Figura 5.3 Modelo 2.

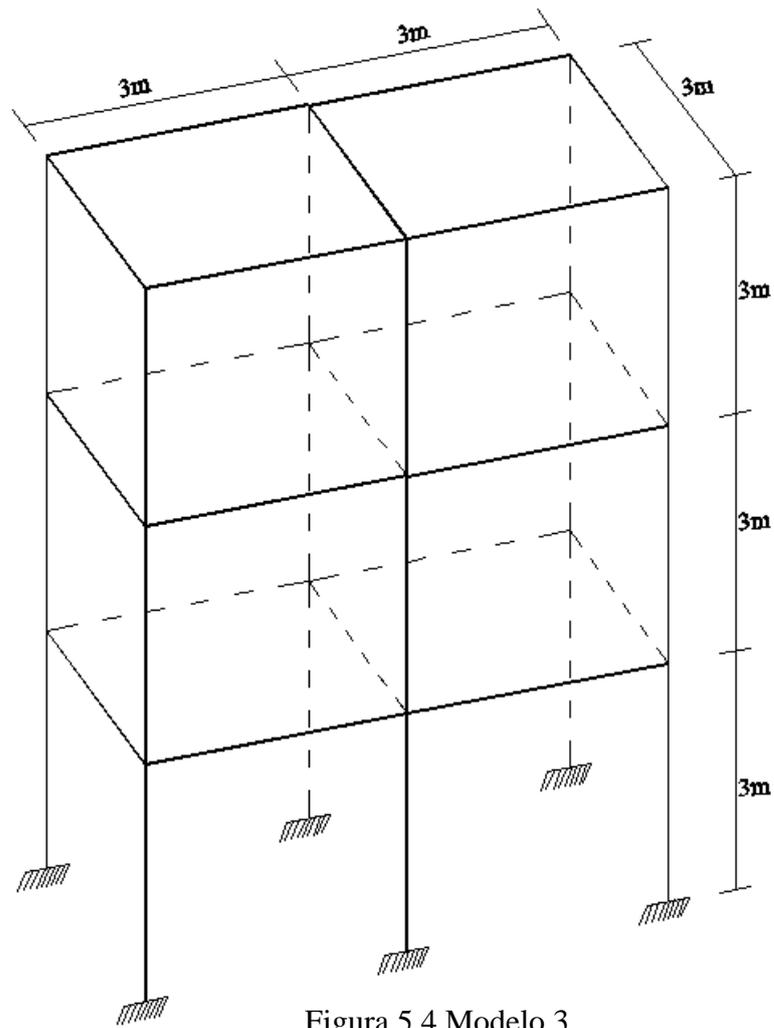


Figura 5.4 Modelo 3.

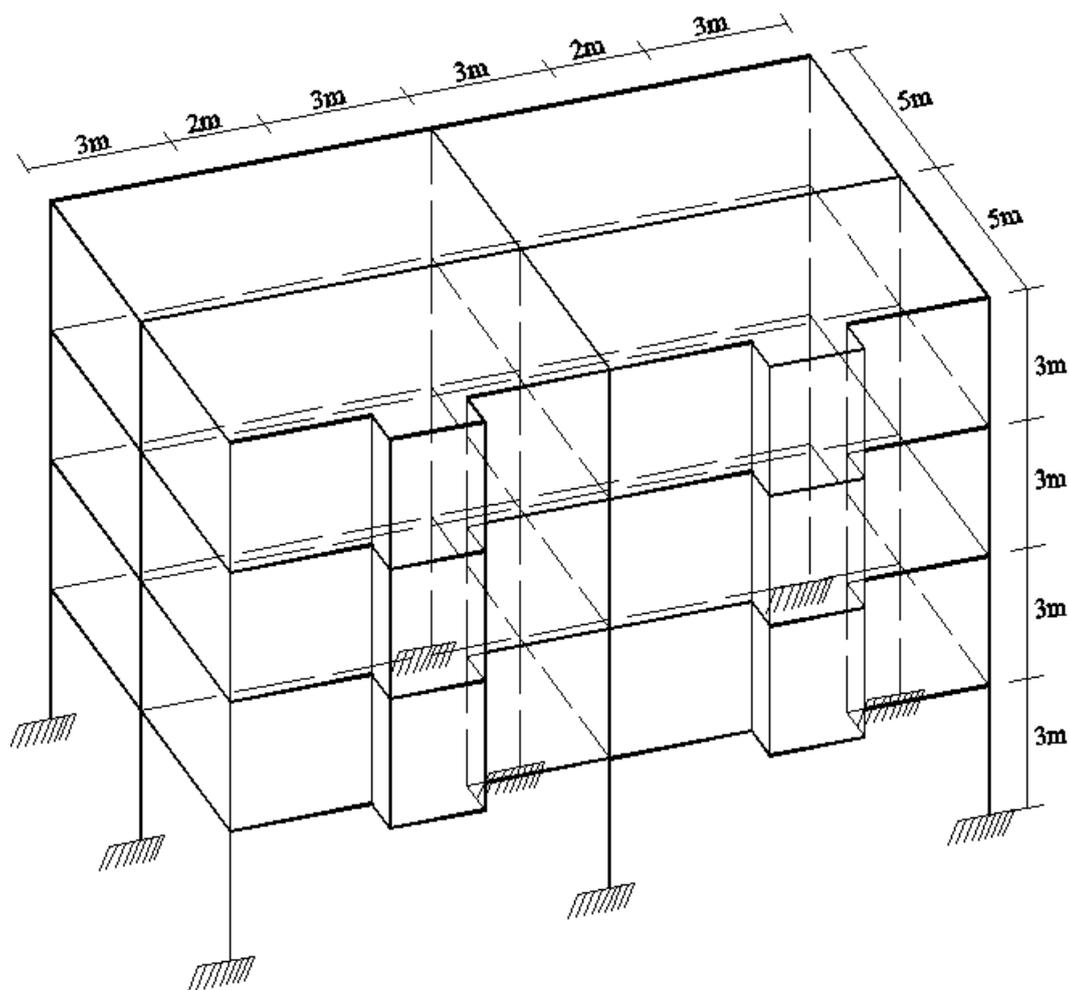


Figura 5.5 Modelo 4

5.1.1 - Modelo 1 (M1)

O modelo 1, apresentado na Figura 5.2, consiste em um pórtico espacial formado por três barras com três metros de comprimento, discretizadas em 15 elementos cada uma. Os elementos intactos apresentam as seguintes características: comprimento (L) de 0,2m, seção transversal (A) (0,3m x 0,3m), momento de inércia em relação ao eixo x (I_x) de $0,00168\text{m}^4$, momento de inércia em relação ao eixo y (I_y) de $0,000675\text{ m}^4$, momento de inércia em relação ao eixo z (I_z) de $0,000675\text{ m}^4$, módulo de elasticidade longitudinal (E) de $2,5 \times 10^{10}\text{N/m}^2$, módulo de elasticidade transversal de $9,68999 \times 10^9\text{ N/m}^2$ e coeficiente de Poisson de 0,2.

A figura 5.6 mostra o modelo 1 discretizado com os elementos danificados em destaque (na cor vermelha).

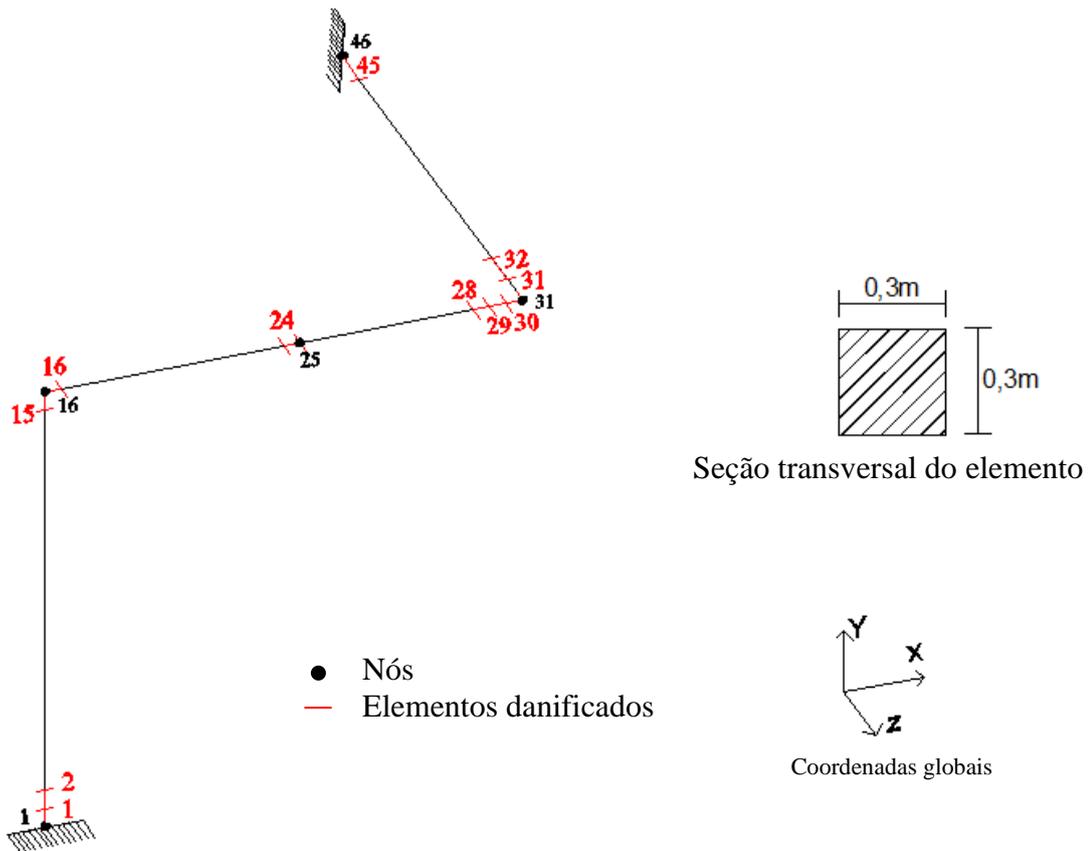


Figura 5.6 Modelo 1 discretizado com destaque nos elementos danificados.

Os danos foram introduzidos por meio de reduções na área da seção transversal dos elementos 1, 2, 15, 16, 24, 28, 29, 30, 31, 32 e 45 que se encontram compreendidos entre os nós 1 e 2, 2 e 3, 15 e 16, 16 e 17, 24 e 25, 28 e 29, 29 e 30, 30 e 31, 31 e 32, 32 e 33, 45 e 46, respectivamente (Figura 5.6). Tais reduções aconteceram nas proporções de 1 a 40%.

Inicialmente, foram obtidas as cinco primeiras frequências do pórtico intacto (Tabela 5.1), bem como seus respectivos modos de vibração (Figura 5.7). Posteriormente, foi adotado o mesmo procedimento para a obtenção das características dinâmicas dos modelos danificados, e os resultados estão detalhados em cada caso (cenários com danos individuais e em conjunto).

Tabela 5.1 Frequências do modelo 1 intacto.

Frequências	Modelo 1 (Hz)
1 ^a	9,9977
2 ^a	10,8742
3 ^a	27,5570
4 ^a	29,9488
5 ^a	54,0163

Para o pórtico sem dano, as 5 primeiras frequências obtidas ficaram aproximadamente entre 10Hz e 54Hz (Tabela 5.1).

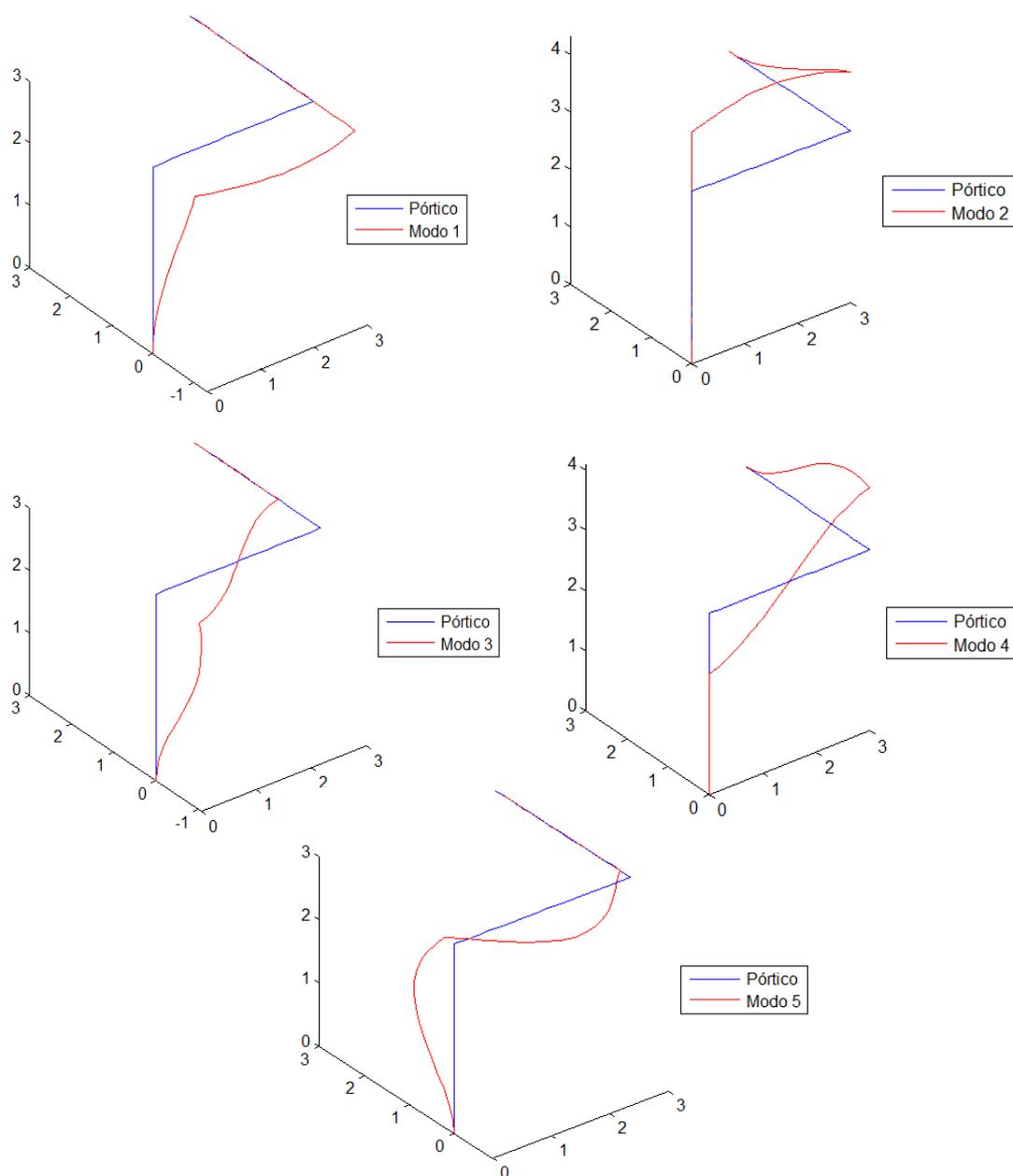


Figura 5.7 Modos de vibração do modelo 1.

5.1.1.1 Localização e quantificação de danos em elementos isolados

Nesta modalidade foram simulados danos isolados, ou seja, em cada cenário de dano apenas um elemento danificado foi considerado. As diferentes porcentagens de dano para cada elemento são mostradas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Cenários 1 e 2 do modelo 1 – danos isolados.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
1	1	1
2	24	15

Foram analisados dois cenários de danos representados por meio de uma redução na área da seção transversal de alguns elementos. No primeiro cenário, o elemento 1, compreendido entre os nós 1 e 2 (ver indicação na Figura 5.8 (a)), sofreu uma redução de 1% na área de sua seção transversal, o que equivale a perdas de 3, 2,9 e 1% dos momentos de inércia em torno dos eixos x, y e z, respectivamente, com relação ao elemento intacto. Já no segundo cenário, foi considerada uma redução de 15% na área da seção transversal do elemento 24, compreendido entre os nós 24 e 25 (Figura 5.8(b)), o que representa perdas de 36, 39 e 15% com relação aos momentos de inércia em torno dos eixos x, y e z do elemento intacto respectivamente.

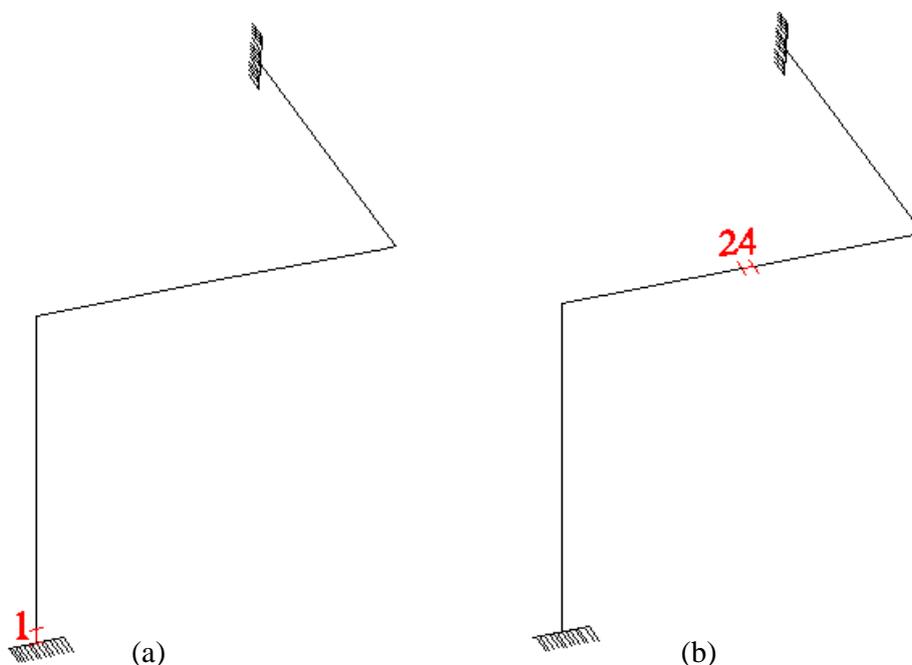


Figura 5.8 Cenários com danos individuais do modelo 1. (a) Cenário 1. (b) Cenário 2.

Assim como para o pórtico sem dano, também foram obtidas as cinco primeiras frequências, bem como seus respectivos modos de vibração para os modelos danificados. A Tabela 5.3 apresenta as frequências dos modelos intacto e danificados (Cenários 1 e 2).

A partir da Tabela 5.3, pode-se notar que as frequências do modelo intacto e dos modelos danificados não apresentaram grandes variações, mesmo com porcentagens de danos diferentes. Tal fato ocorre, pois, no caso do cenário 1, mesmo sendo um dano bem pequeno (de 1%), o elemento danificado se encontra no apoio da estrutura, o que certamente tem grande influência nos resultados.

Tabela 5.3 Frequências dos cenários 1 e 2 do modelo 1.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)	Cenário 1 (Hz)	Cenário 2 (Hz)
1 ^a	9,9977	9,9935	10,0113
2 ^a	10,8742	10,8610	10,8259
3 ^a	27,5570	27,5463	27,5570
4 ^a	29,9488	29,9151	29,9419
5 ^a	54,0163	53,9968	53,9882

De posse das características dinâmicas dos modelos, foi aplicado o MER para encontrar as regiões danificadas representadas pelos elementos 1 e 24, bem como sua severidade.

As figuras 5.9 e 5.10 mostram a localização dos danos presentes no primeiro (redução de 1% na seção transversal do elemento 1) e segundo cenário (redução de 15% na seção transversal do elemento 24).

A partir dos gráficos mostrados nas figuras 5.9 e 5.10, pode-se notar a presença de picos em correspondência com os nós dos elementos aos quais foram atribuídos os danos de 1% e 15% de redução na área da seção transversal do elemento.

Esses gráficos são provenientes da aplicação da equação do erro para os cinco primeiros modos de vibração e simbolizam, de forma normalizada, os maiores erros encontrados (Equação 3.10).

Desta maneira, verifica-se que no cenário 1, com o elemento danificado entre os nós 1 e 2, as alterações mais significativas aconteceram nos graus de liberdade correspondentes à translação nos eixos x e y e rotação em torno do eixo z.

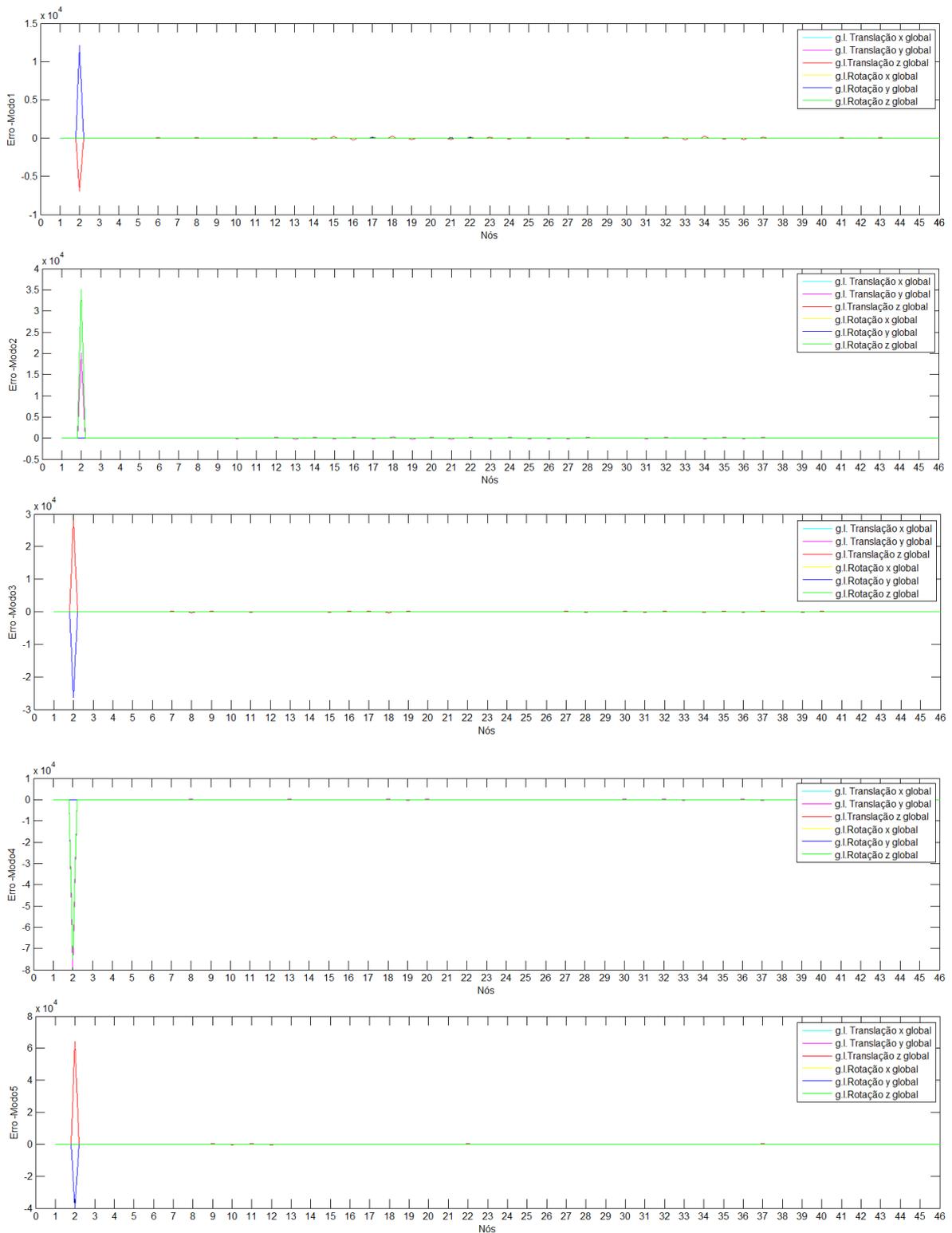


Figura 5.9 Localização do dano correspondente ao modelo1, cenário 1 – 1% de redução na área do elemento 1.

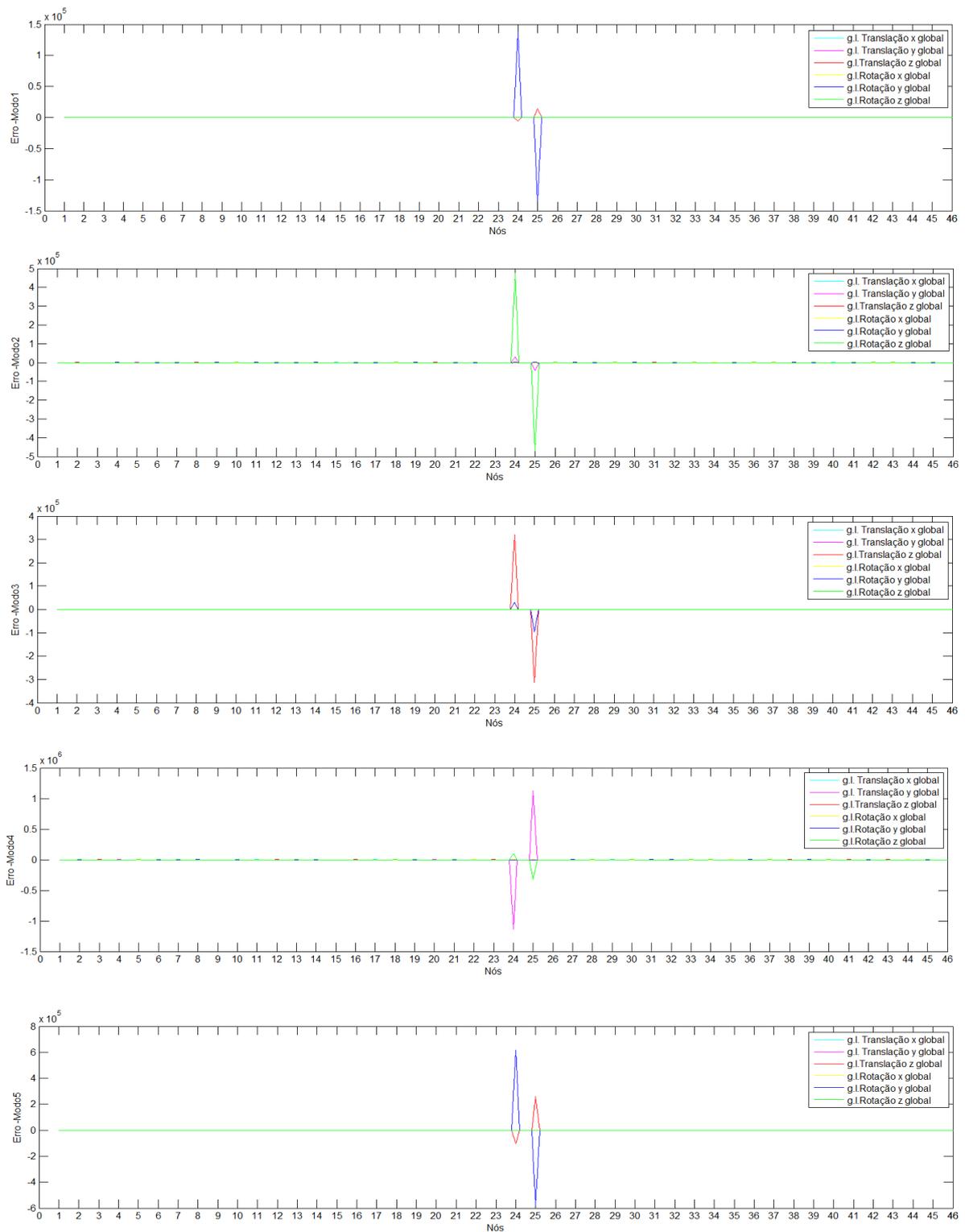


Figura 5.10 Localização do dano correspondente ao modelo1, cenário 2 – 15% de redução na área do elemento 24.

Da mesma forma que no caso anterior, os gráficos que representam o cenário 2, indicam que o MER permitiu a localização da região danificada, identificando maiores valores de erros nos nós que delimitam o elemento danificado (elemento 24), os nós 23 e 24.

A etapa de quantificação pelo MER foi realizada por meio da Equação (3.11), e consistiu basicamente em obter o valor de p que produziu o mínimo da função $E(p)$. Tal valor de p representa a relação entre a rigidez dos elementos danificado e intacto.

Desta forma, o valor do dano é obtido por $1-p$. As figuras 5.11 e 5.12 mostram a quantificação dos danos presentes nos elementos 1 e 24, respectivamente, e a Tabela 5.4 os valores das reduções nas inércias.

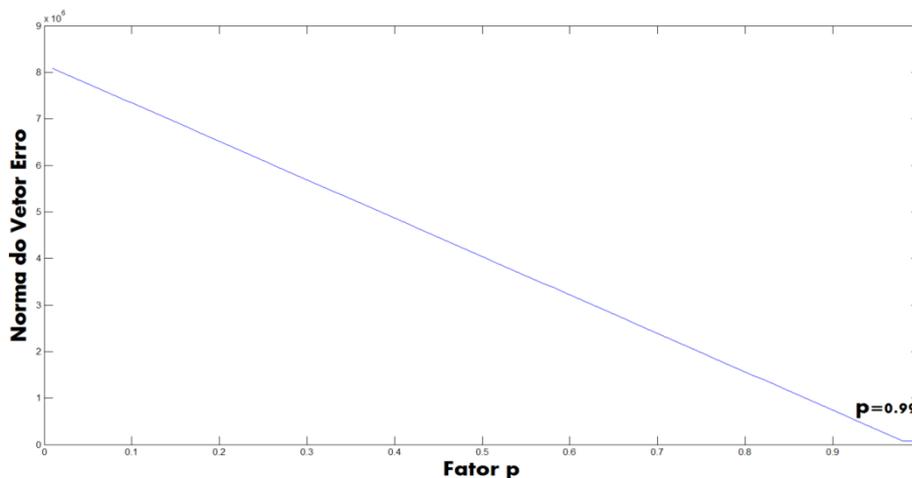


Figura 5.11 Quantificação do dano correspondente ao modelo1, cenário 1– 1% de redução na área do elemento 1.

Na Figura 5.11 e na Tabela 5.4, pode-se observar que, no caso da análise do modelo 1, cenário 1 (dano de 1% de redução na área da seção transversal do elemento 1), o MER forneceu como resultado da quantificação o valor de 1%, coincidindo exatamente o valor de redução da área introduzido inicialmente.

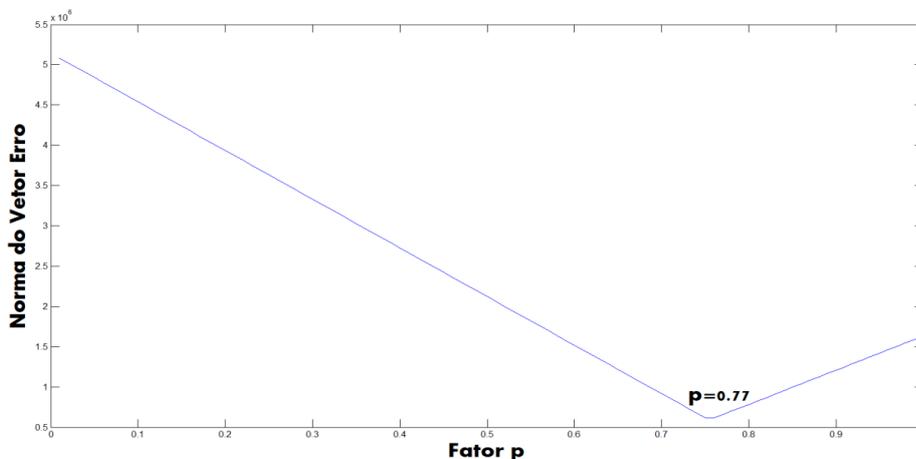


Figura 5.12 Quantificação do dano correspondente ao modelo1, cenário 2 – 15% de redução na área do elemento 24.

Já no caso do cenário 2 (redução de 15% na área do elemento 24), a quantificação foi de 23% (Figura 5.12 e Tabela 5.4), porém essa diferença entre o resultado obtido e o esperado parece razoável, uma vez que o valor fornecido na quantificação do dano se encontra entre os valores da redução da área e da redução das inércias. Desta forma, observa-se que o método apresentou resultados satisfatórios.

Tabela 5.4 Valores das reduções de inércia e área introduzidos inicialmente e identificados pelo MER para o modelo 1.

Elementos Danificados	Redução da Área (%)	Redução da Inércia em X (%)	Redução da Inércia em Y (%)	Redução da Inércia em Z (%)	Quantificação (1-p)
1	1	3	2,9	1	1%
24	15	36	39	15	23%

Para a quantificação dos danos através das RNAs, foi criada uma rede composta por três camadas (camadas de entrada, intermediária ou oculta e de saída – Figura 5.13).

A camada de entrada foi formada por cinco neurônios, estes últimos alimentados com os erros encontrados através do MER (Equação (3.10), item 3.1 do Cap.3). Esses erros representam o desequilíbrio na equação de movimento do modelo em seus cinco primeiros modos de vibração, por este motivo, a rede apresenta cinco neurônios na camada de entrada.

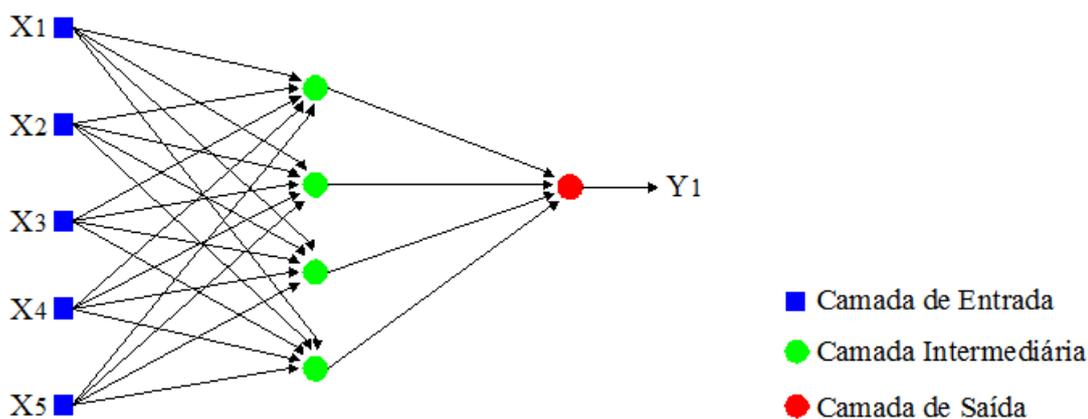


Figura 5.13 Rede Neural Artificial utilizada na quantificação de danos do modelo 1.

A camada intermediária foi composta por quatro neurônios (Figura 5.13), fato este explicado pelo melhor desempenho da rede. Todos os neurônios da camada anterior se relacionam com

os neurônios desta camada (intermediária) para processar apenas um resultado. Desta forma, a camada de saída contém apenas um neurônio, uma vez que a resposta da rede deve ser a severidade do dano, portanto uma única saída como resposta.

Entre as referidas camadas foram utilizadas duas funções de ativação, a função *tansig* na primeira parte do processamento (entre a camada de entrada e a camada intermediária), e a função *satlins* na segunda etapa (entre a camada intermediária e a camada de saída).

Tais funções foram escolhidas de forma aleatória, de modo a se obter o melhor desempenho da rede e com o mínimo erro possível durante o treinamento, ambas contidas no pacote de Redes Neurais Artificiais do Matlab.

As funções *tansig* (*Hyperbolic tangent sigmoid*) e *satlins* (*Symmetric saturating linear*), são representadas pelos gráficos mostrados nas figuras 5.14 – (a) e (b), respectivamente.

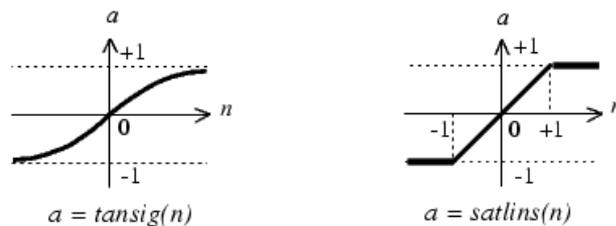


Figura 5.14 Funções de ativação utilizadas no RNA do modelo 1. (a) Função tansig. (b) Função satlins. (MathWorks, R2009b)

Assim, de forma esquemática e reduzida, a rede ficou com a estrutura mostrada na Figura 5.15.

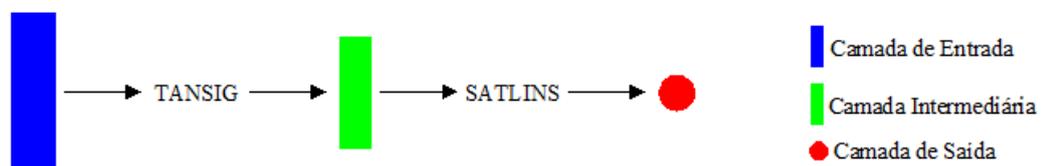


Figura 5.15 Esquema da RNA utilizada na quantificação de danos do modelo 1.

Para o treinamento e validação da rede foram simulados novos cenários de danos (redução na área da seção transversal dos respectivos elementos) com diferentes severidades. As

tabelas 5.5 e 5.6 mostram os cenários utilizados para obtenção dos dados (erros obtidos através do MER) para as referidas etapas, respectivamente.

Tabela 5.5 Cenários de danos utilizados no treinamento da rede do modelo1.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
3	2	1
4	1	5
5	1	10
6	1	15
7	1	20
8	1	25
9	1	30
10	1	40
11	1	45
12	1	50
13	1	55
14	1	60
15	1	65
16	1	70
17	1	75
18	1	80

Tabela 5.6 Cenários de danos utilizados na validação da rede do modelo1.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
19	1	85
20	1	90

As etapas de treinamento e validação apresentaram desempenho satisfatório, de forma que durante seu processamento as iterações realizadas para o ajuste dos pesos permitiram encontrar a relação entre os erros do MER e a severidade do dano, resultando em erros na ordem de 10^{-8} (Figura 5.16), o que indica que a rede conseguiu “aprender” a referida relação.

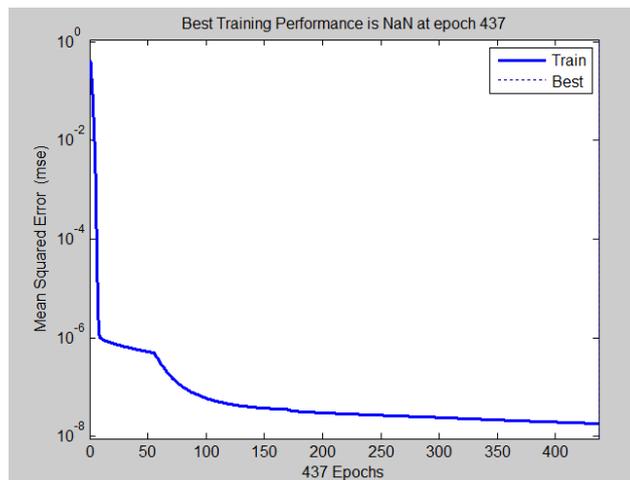


Figura 5.16 Erro no treinamento da rede do modelo 1.

Uma vez treinada (pesos ajustados) e com bom resultado, a rede passou para a etapa da generalização. Nesta fase, foram fornecidos à rede os dados do problema a ser resolvido. Tais dados referem-se aos erros encontrados, pelo MER, quando simulados os cenários de danos 1 e 2 (danos de 1 e 15% nos elementos 1 e 24, respectivamente).

Foram selecionados os cinco maiores valores dos erros utilizados na localização dos danos, e transmitidos à rede como dados de entrada. Esta última foi simulada utilizando os mesmos valores dos pesos obtidos na fase de treinamento, e forneceu como resultado a quantificação dos referidos danos (Figura 5.17).

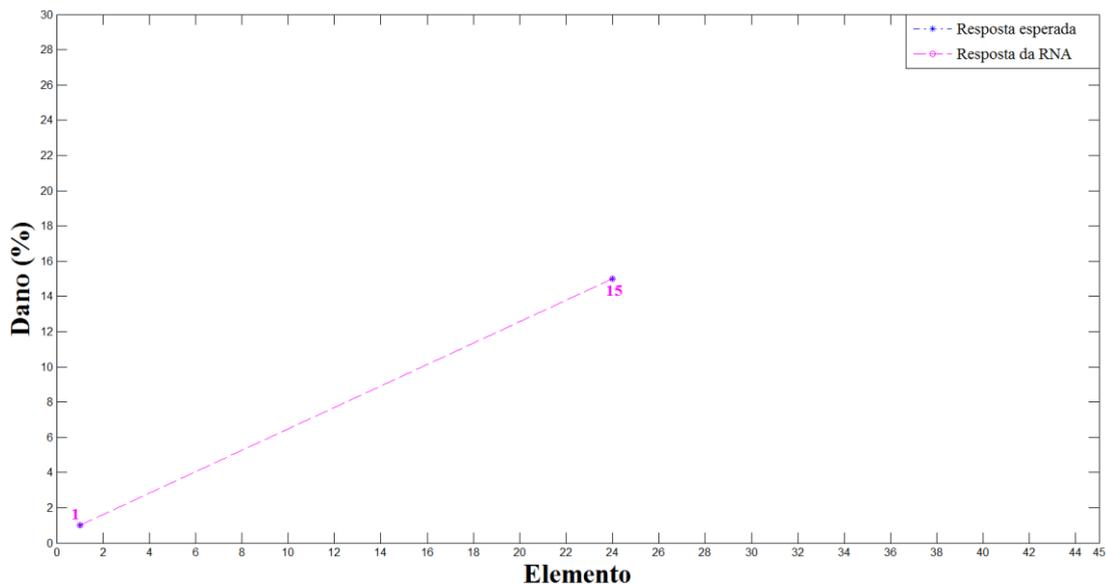


Figura 5.17 Quantificação de danos pela RNA do modelo 1.

A Figura 5.17 mostra o gráfico com a quantificação dos danos dos cenários 1 e 2. Pode-se notar a presença de dois pontos em destaque, os quais representam os valores esperados do dano (em azul) e o resultado processado pela rede criada para o modelo 1 (na cor rosa).

O primeiro ponto representa o cenário 1, ou seja, o modelo 1 com um dano de 1% no elemento 1. Já o ponto 2 representa a quantificação do dano do cenário 2, este último com um dano de 15% no elemento 24 do modelo 1.

Desta forma, observa-se que a RNA criada e treinada para estabelecer a relação entre os erros gerados para a localização do dano e sua quantificação, forneceu resultados satisfatórios.

A severidade dos danos processados pela rede foi o valor esperado, ou seja, para o cenário 1, o dano foi de 1% no elemento 1, e para o cenário 2, o dano foi de 15% no elemento 24.

5.1.1.2 - Localização de vários elementos danificados no mesmo cenário

Nesta análise foram simulados vários elementos danificados em um mesmo cenário. Esses cenários contêm elementos danificados em diferentes proporções e em várias posições, bem como vários elementos danificados em sequência, formando assim uma região danificada.

Desta forma, foram considerados dois cenários distintos para representar tal modalidade, os cenários 21 e 22, como mostram a Figura 5.18 e a Tabela 5.7.

Os danos foram representados por meio de uma redução na área da seção transversal de alguns elementos. No cenário 21, os elementos 2 (compreendido entre os nós 3 e 4), 15 (compreendido entre os nós 15 e 16), 16 (compreendido entre os nós 16 e 17), 24 (compreendido entre os nós 24 e 25), 30 (compreendido entre os nós 30 e 31) e 45 (compreendido entre os nós 45 e 46), sofreram perdas de 5%, 10%, 20%, 25%, 30% e 40%, respectivamente (ver indicação na Figura 5.18 (a)).

Essas perdas de seção transversal resultam em reduções nos momentos de inércia dos eixos x, y e z com relação ao elemento intacto. Assim, o elemento 2 (dano de 5%) apresentou diminuições de 14.1, 14.27 e 5%, respectivamente. O elemento 15 (dano de 10%) sofreu perdas de 20, 28 e

10%. O elemento 16, com dano de 20%, resultou em perdas de 38, 49 e 20%. O elemento 24 (dano de 25%) sofreu reduções de 49, 58 e 25%. O elemento 30 (dano de 30%) apresentou perdas de 54, 65 e 30%. Por fim, o elemento 45 (dano de 40%) sofreu perdas de 68, 79 e 40%, respectivamente.

Já no segundo cenário desta modalidade, no cenário 22, foram considerados 5 elementos danificados em sequência, caracterizando uma “região” danificada. Esta região corresponde aos elementos 28 (compreendido entre os nós 28 e 29), 29 (compreendido entre os nós 29 e 30), 30 (compreendido entre os nós 30 e 31), 31 (compreendido entre os nós 31 e 32), e, finalmente, o elemento 32, compreendido entre os nós 32 e 33 (Figura 5.18(b)).

Os referidos elementos foram danificados, em proporções diferentes, através de reduções nas suas respectivas seções transversais, como mostra a Tabela 5.7.

Deste modo, em relação aos momentos de inércia em torno dos eixos x, y e z, o elemento 28 (dano de 20%) sofreu perdas de 38, 49 e 20%, respectivamente; o elemento 29 (dano de 30%) teve seus momentos de inércias reduzidos em 54, 65 e 30%; o elemento 30 (dano de 40%) sofreu reduções de 68, 79 e 40%; o elemento 31 (dano de 15%) sofreu perdas de 36, 39 e 15%; e, o elemento 32 (dano de 1%) apresentou reduções de 3, 29 e 1%, respectivamente.

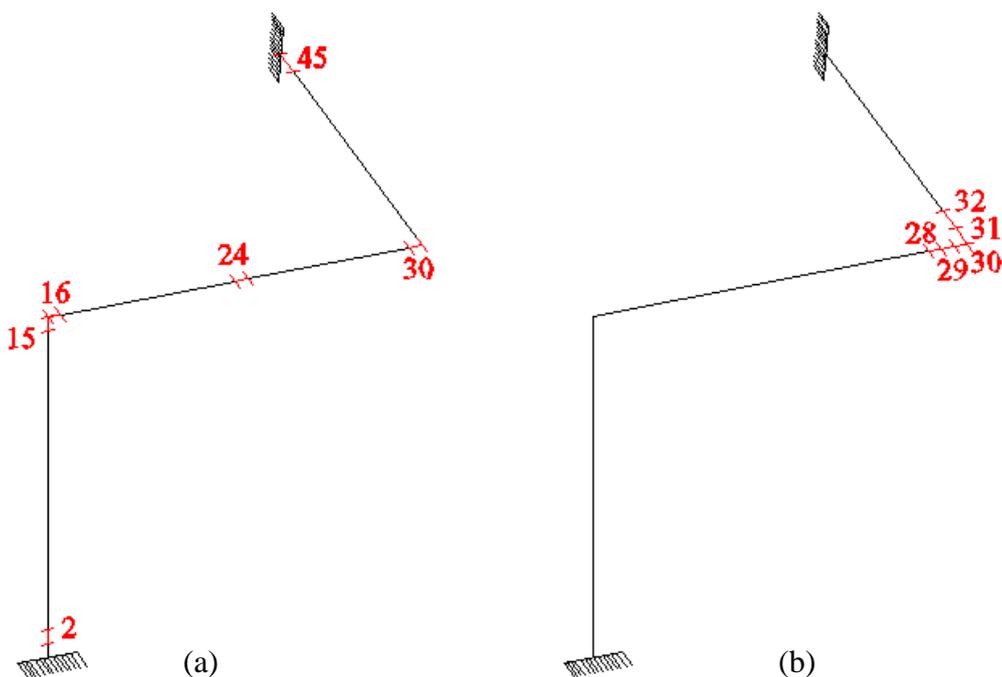


Figura 5.18 Cenários do modelo 1 com vários elementos danificados. (a) Cenário 21. (b) Cenário 22.

Tabela 5.7 Cenários 21 e 22 do modelo1.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
21	2	5
	15	10
	16	20
	24	25
	30	30
	45	40
22	28	20
	29	30
	30	40
	31	15
	32	1

Seguindo a metodologia empregada até agora, foram obtidas as cinco primeiras frequências dos pórticos, bem como seus respectivos modos de vibração. A tabela 5.8 mostra as frequências dos modelos intacto e danificados (Cenários 21 e 22).

Tabela 5.8 Frequências dos cenários 21 e 22 do modelo1.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)	Cenário 21 (Hz)	Cenário 22 (Hz)
1 ^a	9,9977	9,5613	10,0956
2 ^a	10,8742	9,8079	10,6862
3 ^a	27,5570	26,6149	27,5486
4 ^a	29,9488	26,9080	28,3866
5 ^a	54,0163	52,8352	54,0062

De posse das características dinâmicas dos modelos, foi aplicado o MER para encontrar os locais danificados, representados pelos elementos 2, 15, 16, 24, 30 e 45, no cenário 21, e pelos elementos 28, 29, 30, 31 e 32, no cenário 22.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram as regiões danificadas no cenário 21 (danos entre os nós 2 e 3, 15 e 16, 16 e 17, 24 e 25, 30 e 31, 45 e 46) e no cenário 22 (danos entre os nós 28 e 29, 29 e 30, 30 e 31, 31 e 32, 32 e 33).

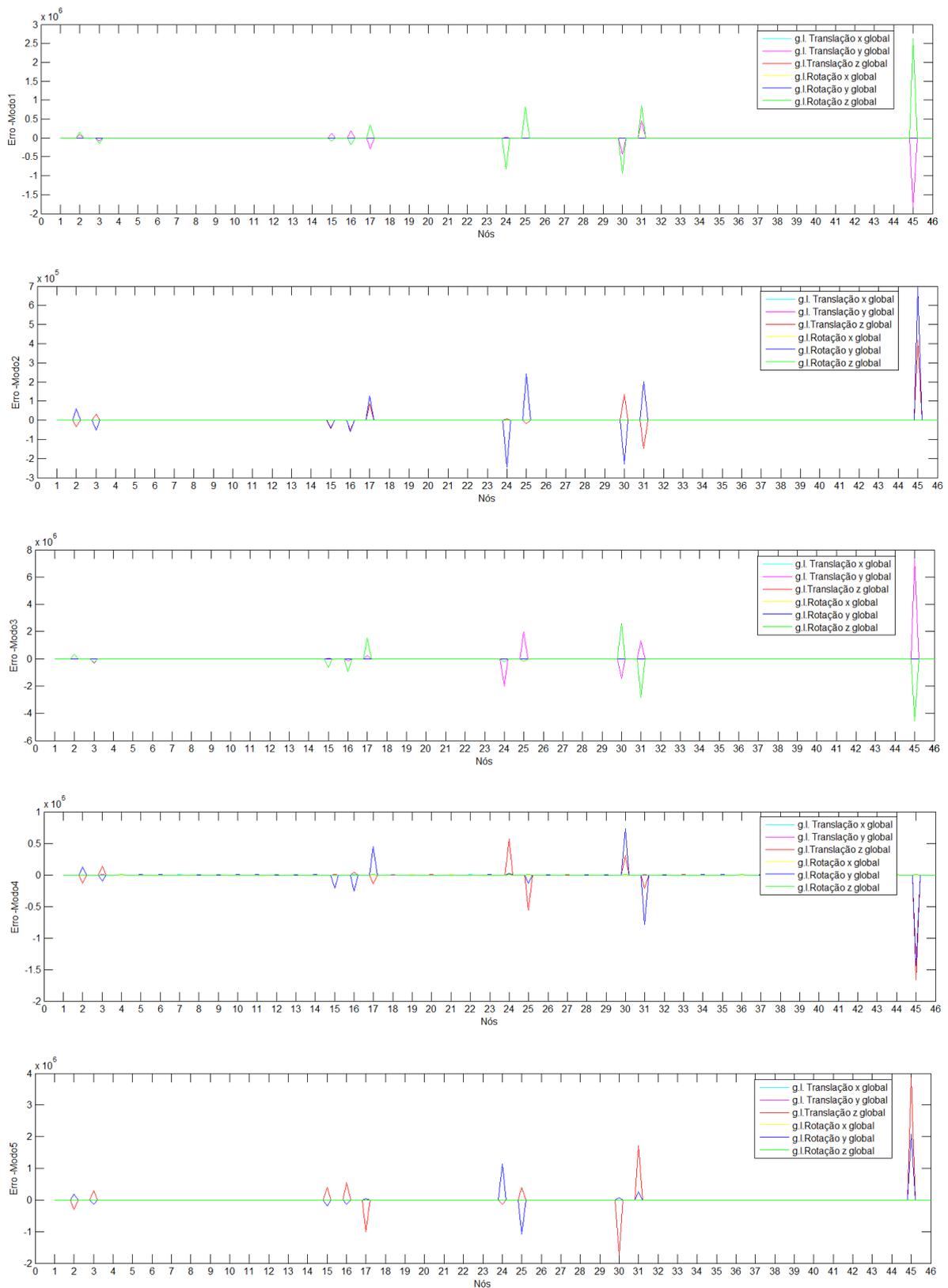


Figura 5.19 Localização dos danos correspondente ao modelo1, cenário 21.

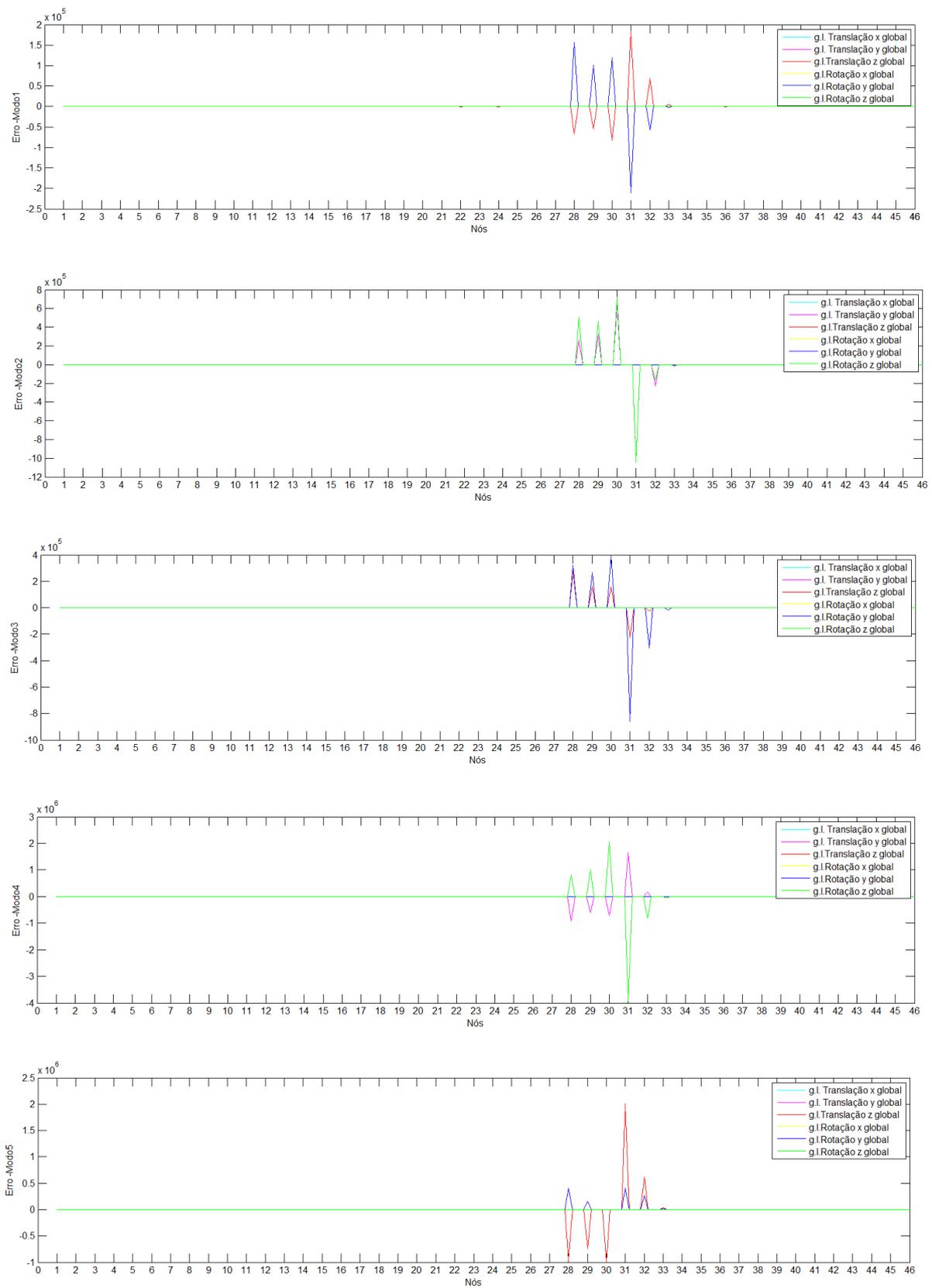


Figura 5.20 Localização dos danos correspondente ao modelo1, cenário 22.

A partir dos gráficos mostrados nas figuras 5.19 e 5.20, pode-se notar a presença de picos em correspondência com os nós dos elementos aos quais foram atribuídos os danos.

Desta maneira, verifica-se que no cenário 21 os picos de erros acontecem nos nós 2 e 3 (extremidades do elemento 2), nos nós 15, 16 e 17 (extremidades dos elementos 15 e 16, respectivamente), nos nós 24 e 25 (extremidades do elemento 24), nos nós 30 e 31 (extremidades do elemento 30), e no nó 45 (uma das extremidades do elemento 45, uma vez que a outra extremidade corresponde ao engaste da estrutura).

Nos gráficos que representam o cenário 22, pode-se notar que o MER permitiu a localização da região danificada, identificando maiores valores de erros nos nós que delimitam os elementos 28, 29, 30, 31 e 32, os nós 28, 29, 30, 31, 32 e 33.

5.1.2 - Modelo 2 (M2)

O modelo 2, mostrado na Figura 5.3, consiste em um pórtico espacial formado por dois pavimentos, discretizado em 240 elementos de pórtico espacial e com seis graus de liberdade por nó. Dentre os 240 elementos, foram selecionados alguns para as simulações que serão apresentadas mais adiante. Esses elementos foram escolhidos em locais que podem apresentar diferenças significativas nos resultados (Figura 5.21)

Os elementos intactos apresentam as seguintes características: comprimento (L) de 0,2m, seção transversal (A) (0,3m x 0,3m), momento de inércia em relação ao eixo x (I_x) de $0,00168\text{m}^4$, momento de inércia em relação ao eixo y (I_y) de $0,000675\text{ m}^4$, momento de inércia em relação ao eixo z (I_z) de $0,000675\text{ m}^4$, módulo de elasticidade longitudinal (E) de $2,5 \times 10^{10}\text{N/m}^2$, módulo de elasticidade transversal de $9,68999 \times 10^9\text{ N/m}^2$ e coeficiente de Poisson de 0,2.

Os danos foram introduzidos por meio de reduções na área da seção transversal dos elementos 1 (compreendido entre os nós 1 e 2), 16 (compreendido entre os nós 16 e 17), 23 (compreendido entre os nós 23 e 24), 24 (compreendido entre os nós 24 e 25), 25 (compreendido entre os nós 25 e 26), 180 (compreendido entre os nós 178 e 179), 181 (compreendido ente os nós 179 e 180) e 225 (compreendido entre os nós 222 e 179).

A Figura 5.21 mostra o posicionamento desses elementos, bem como seus respectivos nós.

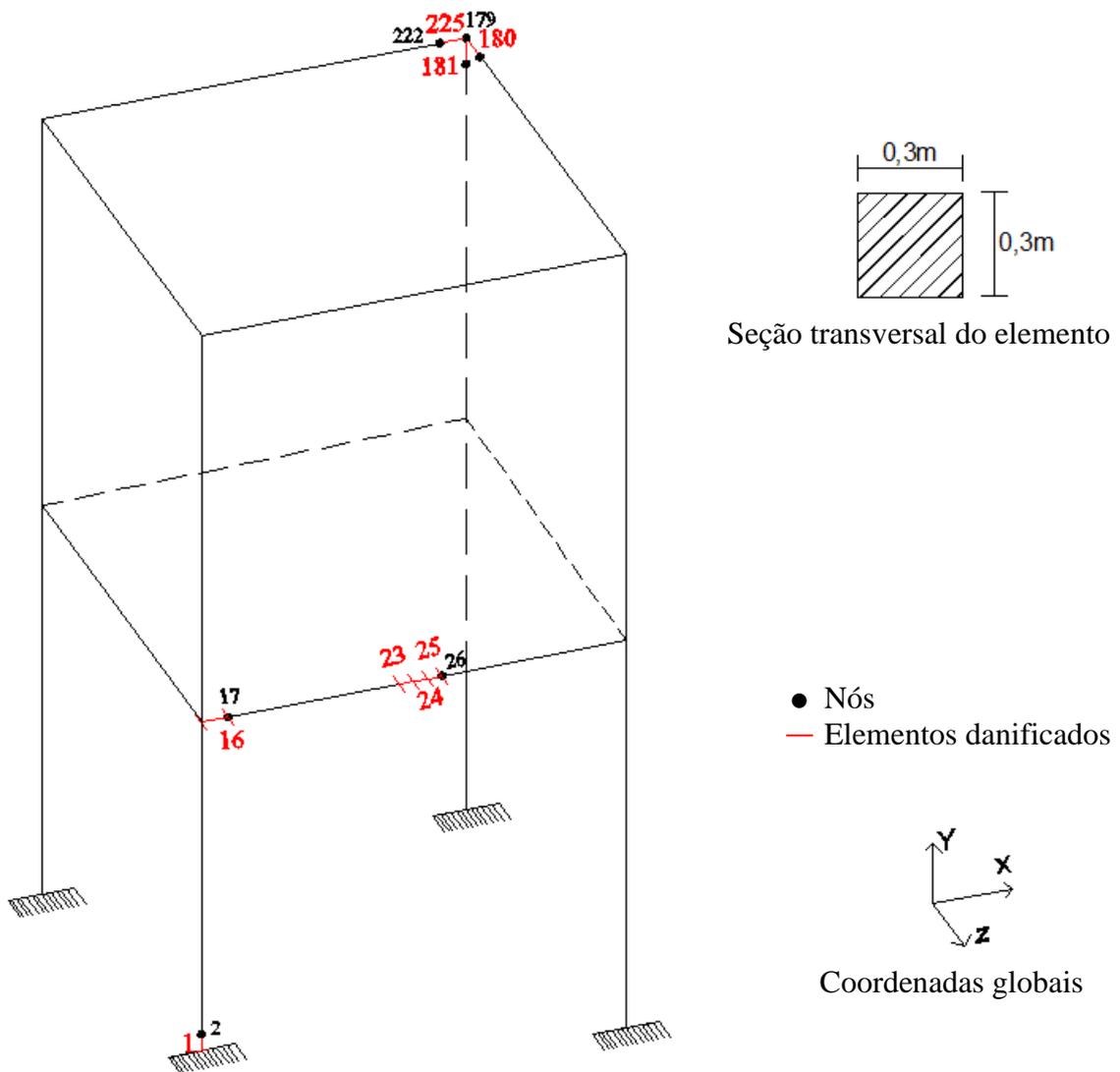


Figura 5.21 Modelo 2 discretizado.

Inicialmente, foram obtidas as cinco primeiras frequências do pórtico intacto (Tabela 5.9), bem com seus respectivos modos de vibração (Figura 5.22). Posteriormente, foi adotado o mesmo procedimento para a obtenção das características dinâmicas dos cenários danificados (descrito no item 4.1, Capítulo 4), cujos resultados estão detalhados e explicados nos casos a seguir.

Tabela 5.9 Frequências do modelo 2 intacto

Frequências	Modelo 2 (Hz)
1 ^a	3,9674
2 ^a	4,3160
3 ^a	11,6294
4 ^a	12,6478
5 ^a	15,8560

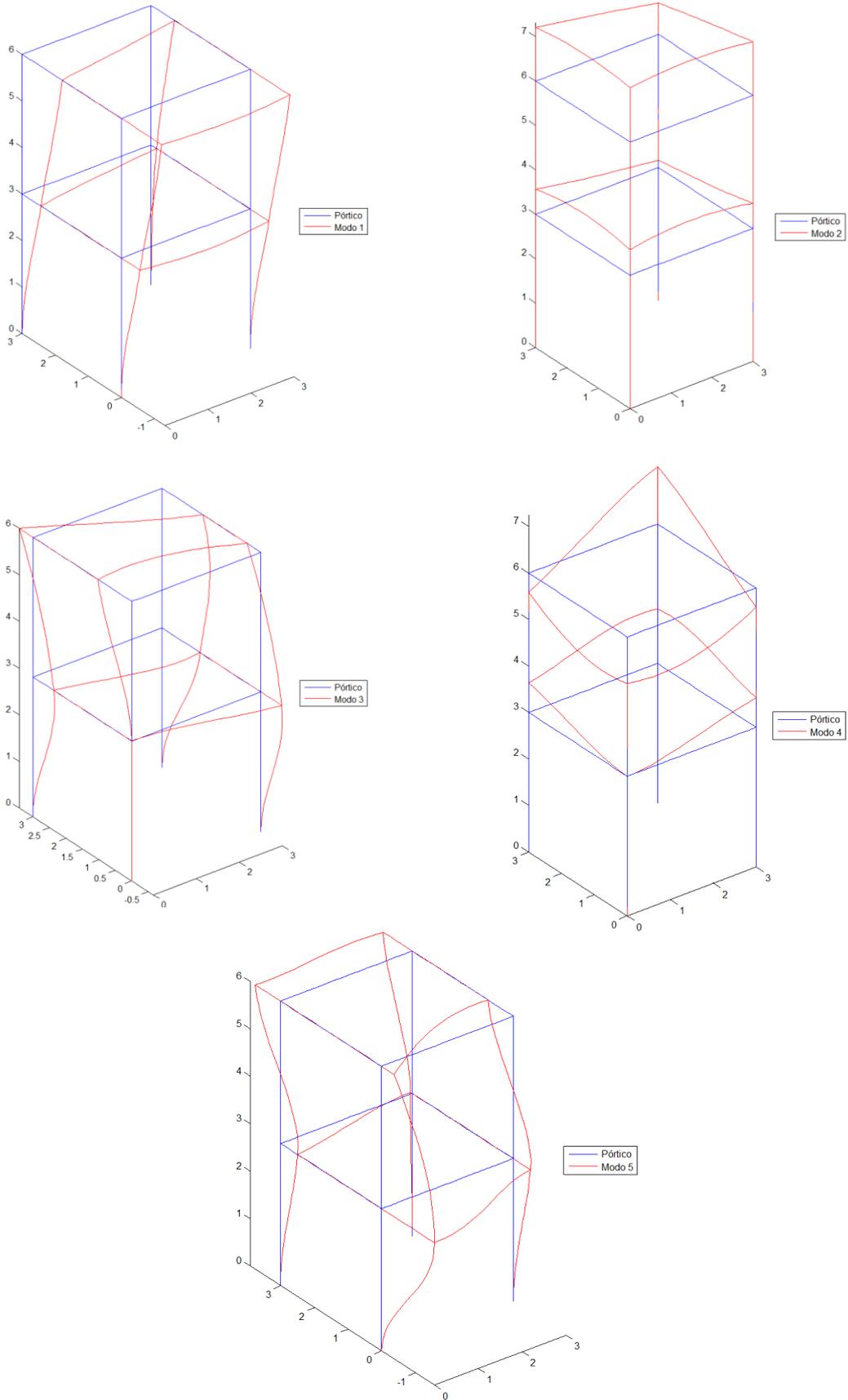


Figura 5.22 Modos de vibração do modelo 2.

5.1.2.1 Localização e quantificação de danos em elementos isolados

Nesta análise foram simulados danos isolados, de modo que cada cenário contém apenas um elemento danificado. Desta forma, foram considerados 3 cenários com elementos deteriorados em diferentes proporções, como mostram a Tabela 5.10 e a Figura 5.23.

Tabela 5.10 Cenários 1, 2 e 3 do modelo 2 – danos isolados.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
1	16	40
2	180	20
3	225	1

No primeiro cenário (Figura 5.23(a)), o elemento 16 sofreu uma redução de 40% na sua seção transversal, desta forma, os momentos de inércia em torno dos eixos x, y e z apresentaram perdas de 68, 79 e 40%, respectivamente. Já o elemento 180, cenário 2 (Figura 5.23(b)), teve uma redução na sua seção transversal de 20%, o que representou decréscimos de 38, 49 e 20% nos momentos de inércia dos eixos x, y e z, respectivamente. Por fim, o último cenário desta modalidade, o cenário 3 (Figura 5.23(c)), se caracteriza por ter o elemento 225 danificado em 1% de sua seção transversal. Essa perda gerou reduções de 3, 2,9 e 1% dos momentos de inércia em torno dos eixos x, y z, respectivamente, com relação ao elemento intacto. (Ver Tabela 5.11)

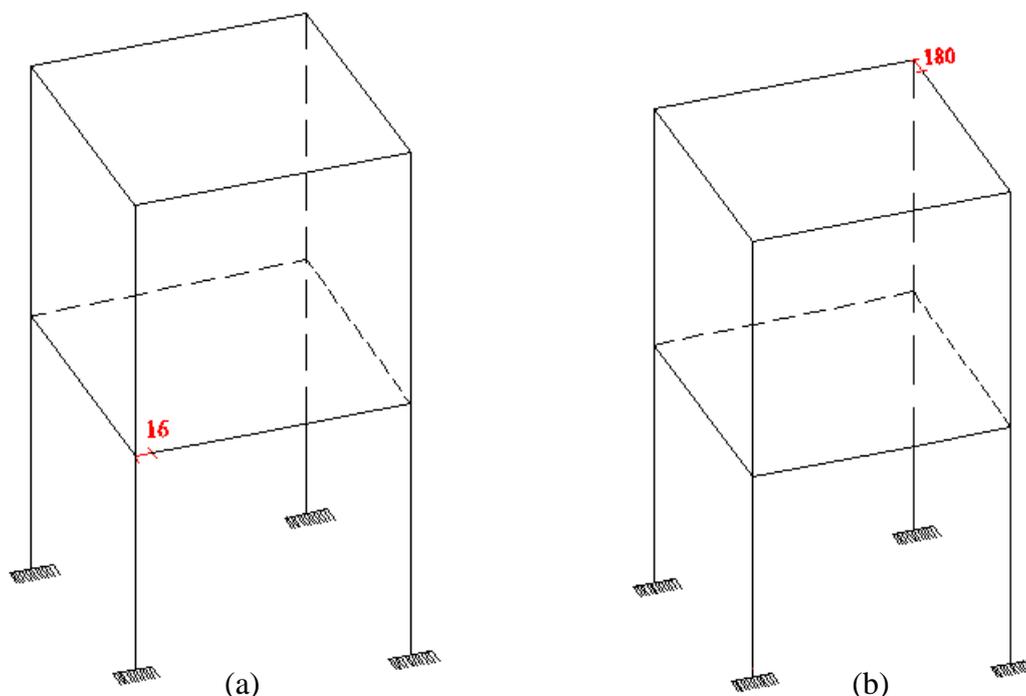


Figura 5.23 Cenários com danos individuais do modelo 2. (a) Cenário 1. (b) Cenário 2.

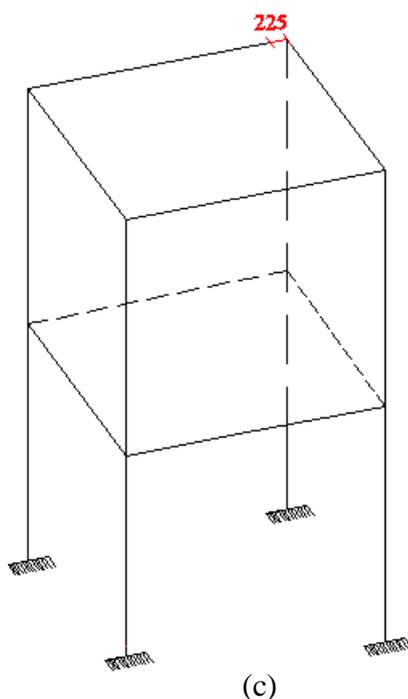


Figura 5.24 Cenários com danos individuais do modelo 2 (c) Cenário 3.

Tabela 5.11 Valores de redução nas áreas e inércias dos elementos danificados correspondentes aos cenários 1, 2 e 3 do modelo 2 – danos isolados.

Elementos Danificados	Redução da Área (%)	Redução da Inércia em X (%)	Redução da Inércia em Y (%)	Redução da Inércia em Z (%)
16	40	68	79	40
180	20	38	49	20
225	1	3	2,9	1

A partir dos cenários descritos acima, foram obtidas as cinco primeiras frequências dos pórticos, bem como seus respectivos modos de vibração. A Tabela 5.12 mostra as frequências dos modelos intacto e danificados (Cenários 1, 2 e 3).

Com base na Tabela 5.12, pode-se notar que as frequências do cenário 1 apresenta, algumas diferenças consideráveis, resultados estes já esperados, uma vez que o dano presente neste cenário foi de 40% de redução na seção transversal do elemento 16. Já no caso do cenário 3 (dano de 1% no elemento 225), como o dano é de baixa intensidade, as frequências obtidas foram basicamente iguais às frequências do modelo intacto.

Tabela 5.12 Frequências de vibração do modelo 2 intacto e danificado - Cenários 1, 2 e 3.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)	Cenário 1 (Hz)	Cenário 2 (Hz)	Cenário 3 (Hz)
1 ^a	3,9674	3,9589	3,9678	3,9674
2 ^a	4,3160	4,2707	4,3156	4,3160
3 ^a	11,6294	11,6036	11,6290	11,6295
4 ^a	12,6478	12,5237	12,6517	12,6477
5 ^a	15,8560	15,8836	15,8555	15,8564

De posse das características dinâmicas dos modelos, foi aplicado o MER para encontrar as regiões danificadas, representadas pelos elementos 1 e 180 e 225, bem como suas severidades.

A localização e quantificação de danos, desenvolvidas pelo referido método, estão descritas de forma analítica no item 3.1 do capítulo 3 e, de forma computacional, no item 4.1 do capítulo 4.

As figuras 5.24, 5.25 e 5.26 mostram gráficos com a localização dos danos presentes no cenário 1 (representado pela redução de 40% na seção transversal do elemento 16, este último compreendido entre os nós 16 e 17), no cenário 2 (representado pela redução de 20% na seção transversal do elemento 180, este último compreendido entre os nós 178 e 179) e no cenário 3 (representado pela redução de 1% na seção transversal do elemento 225, este último compreendido entre os nós 222 e 179).

Esses gráficos são provenientes da aplicação da equação do erro para os cinco primeiros modos de vibração e simbolizam, de forma normalizada, os maiores erros encontrados. A partir dos gráficos, nota-se a presença de picos nos nós dos elementos aos quais foram atribuídos os danos de 40%, 15% e 1% na área de suas seções transversais, representando, portanto, a região danificada.

Desta maneira, observam-se na Figura 5.24, representando a localização do dano do cenário 1, picos nos nós 16 e 17, mostrando que o MER funcionou adequadamente na etapa de localização de danos.

Já os gráficos que representam os erros do cenário 2 (Figura 5.25), apresentaram picos em determinados nós. Neste caso, como o elemento danificado correspondeu ao elemento de número 180, compreendido entre os nós 178 e 179, os picos se localizaram nestes nós.

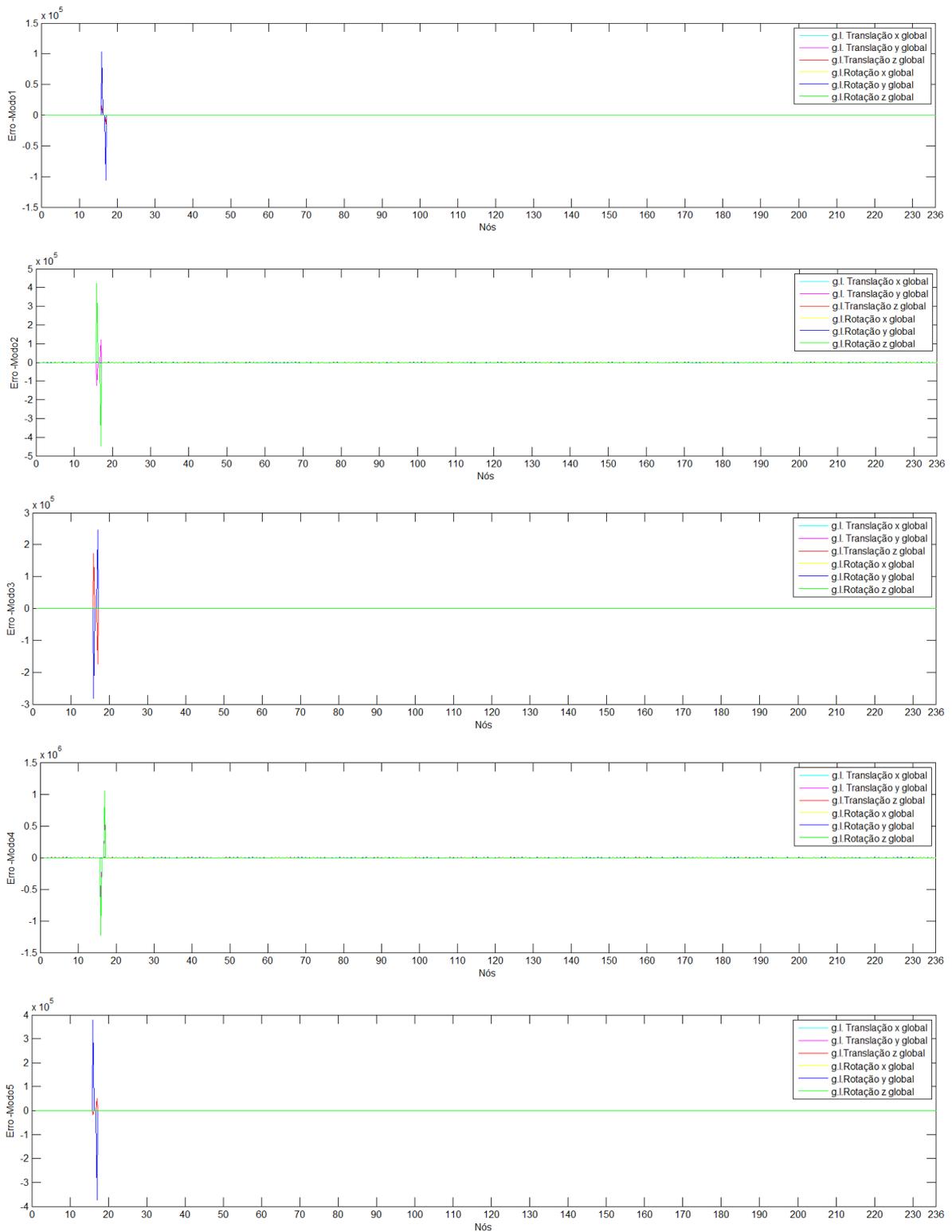


Figura 5.25 Localização de dano correspondente ao modelo 2, cenário 1 – 40% de redução na área do elemento 16.

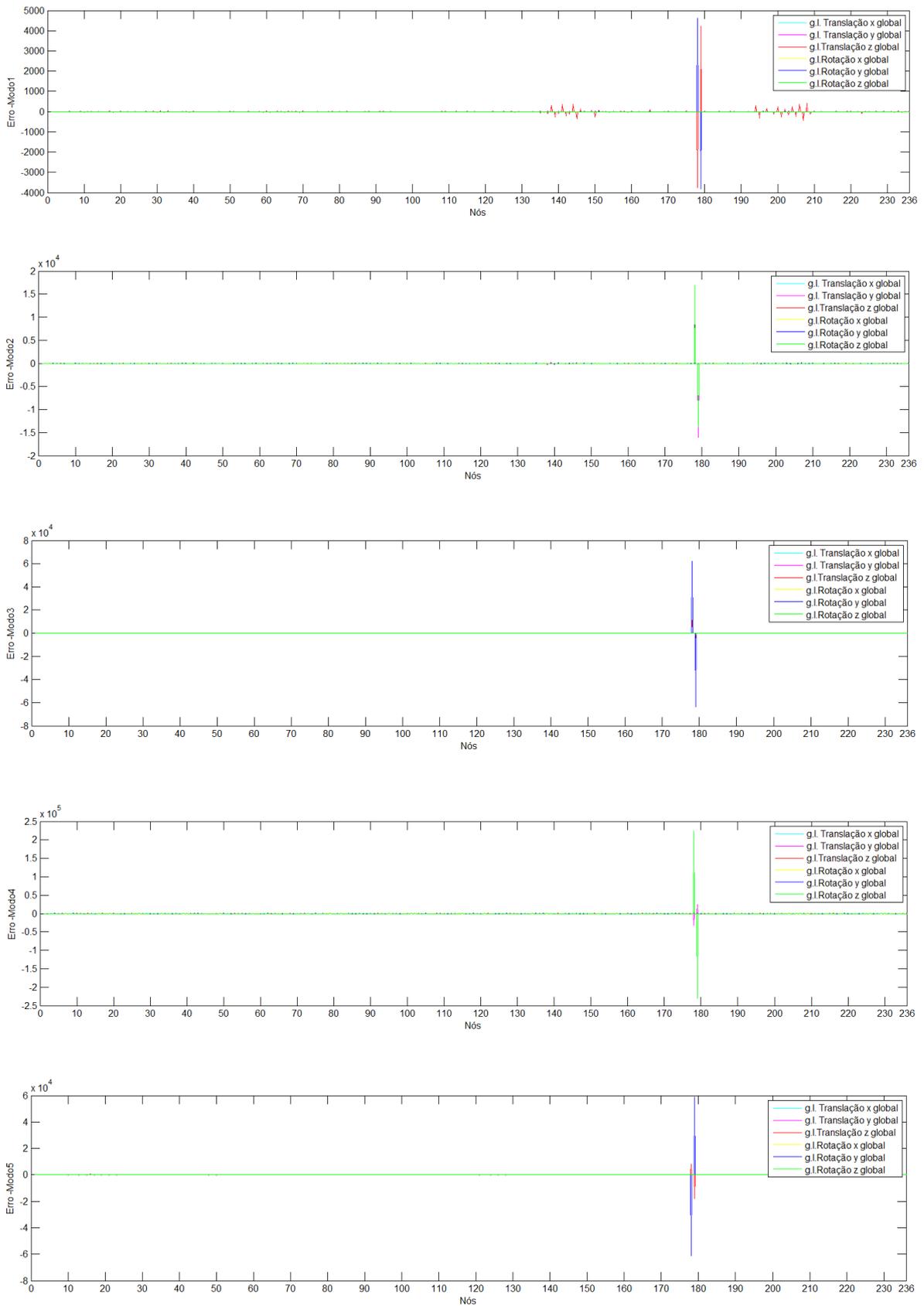


Figura 5.26 Localização de dano correspondente ao modelo 2, cenário 2 – 20% de redução na área do elemento 180.

Seguindo o bom desempenho do MER nas análises anteriores (cenários 1 e 2), no cenário 3 o método permitiu a perfeita localização do elemento danificado, isto é, na Figura 5.26 percebe-se claramente a presença de picos nos nós 222 e 179, representando, portanto, o local do dano. Nota-se também, neste caso, a presença de algumas indicações de erros (pequenos picos), em escala bem reduzida. Esse fato pode ser explicado pelo espalhamento do erro nos nós de elementos interligados.

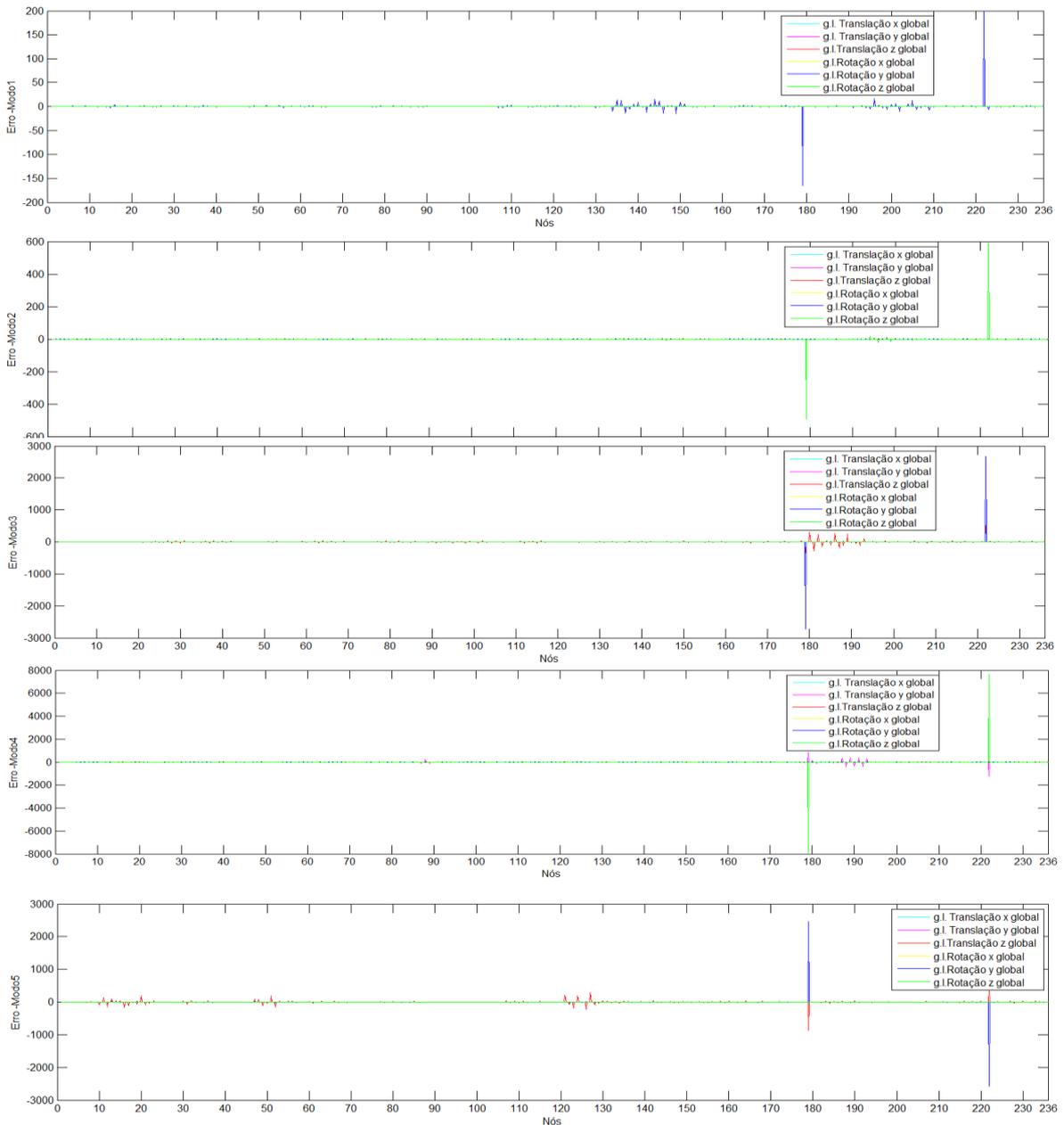


Figura 5.27 Localização de dano correspondente ao modelo 2, cenário 3 – 1% de redução na área do elemento 225.

A etapa de quantificação pelo MER foi realizada por meio da Equação (3.11) (Capítulo 3, item 3.1), e consistiu basicamente em obter o valor de p que produziu o mínimo da função $E(p)$.

A severidade do dano presente no elemento é encontrada fazendo $1-p$. As figuras 5.27, 5.28 e 5.29 mostram a quantificação dos danos presentes nos elementos 16, 180 e 225, respectivamente. A Tabela 5.13 mostra os valores das reduções nas inércias, bem como os valores dos danos.

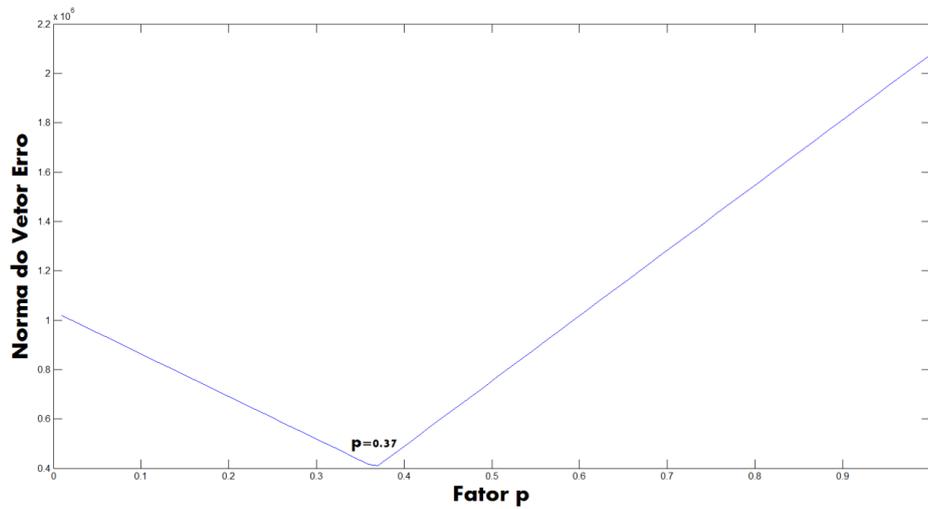


Figura 5.28 Quantificação do dano correspondente ao modelo 2, cenário 1 – 40% de redução na área do elemento 16.

A Figura 5.27 apresenta a quantificação do dano de 40% no elemento 16. De acordo com a figura, o p encontrado foi de 0.37, o que resulta em uma severidade do dano de 63% (valor entre as variações inerciais).

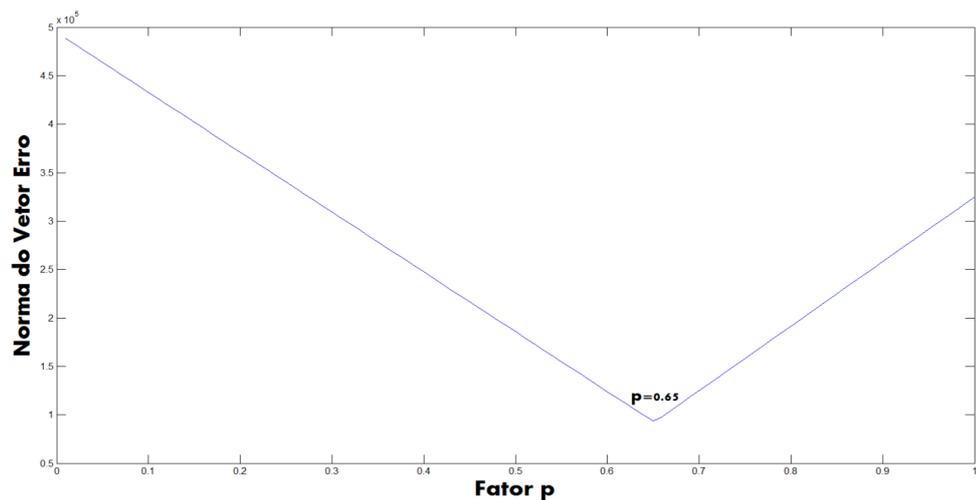


Figura 5.29 Quantificação do dano correspondente ao modelo 2, cenário 2 – 20% de redução na área do elemento 180.

No caso das figuras 5.28 e 5.29, os valores de p encontrados foram 0.65 e 0.98, respectivamente. Assim, as severidades dos danos encontradas pelo MER foram de 35%, para o cenário 2, e de 2% para o cenário 3.

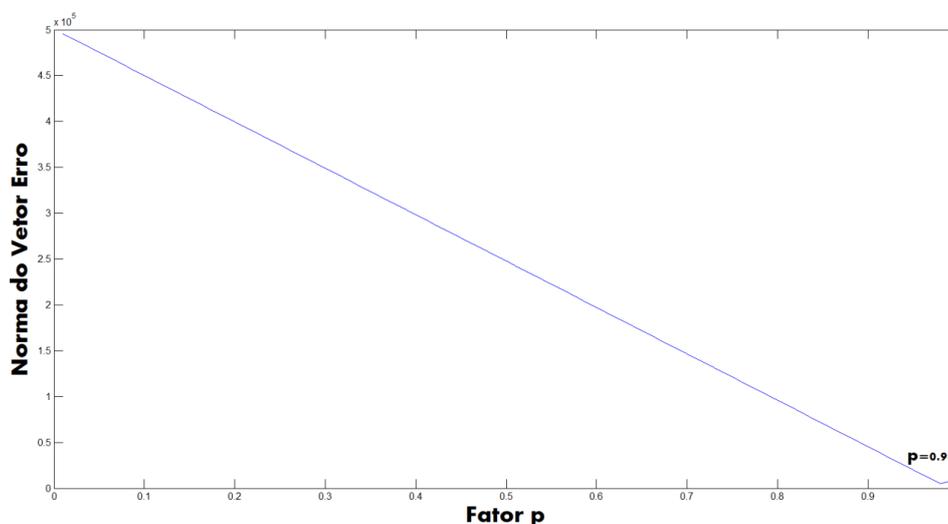


Figura 5.30 Quantificação do dano correspondente ao modelo2, cenário 3 – 1% de redução na área do elemento 225.

Tabela 5.13 Valores das reduções inerciais e valores dos danos do modelo2.

Elementos Danificados	Redução da Área (%)	Redução da Inércia em X (%)	Redução da Inércia em Y (%)	Redução da Inércia em Z (%)	Quantificação (1-p)
16	40	68	79	40	63%
180	20	38	49	20	35%
225	1	3	2,9	1	2%

A partir das figuras 5.27, 5.28 e 5.29 e da Tabela 5.13, pode-se observar que, nos três casos, o MER não quantificou de forma exata o valor do dano fornecido inicialmente aos respectivos elementos. Porém, como mencionado anteriormente, os valores dos danos encontrados pelo MER encontram-se entre os valores de redução da seção transversal e as perdas das inércias em tornos dos eixos x, y e z, o que pode se considerar satisfatório.

No cenário 1 o elemento 16, simulado inicialmente com um dano de 40% de redução na sua seção transversal, apresentou diminuições nas inércias em torno dos eixos x, y e z de 68, 79 e 40%, respectivamente. O MER indicou como resultado um dano de severidade de 63% em relação ao elemento intacto. Assim como nos outros casos considerados, tal valor

determinado pelo método, não corresponde exatamente aos valores introduzidos inicialmente, no entanto encontra-se entre tais valores, como pode ser verificado na Tabela 5.13.

O mesmo comportamento foi observado nos cenários 2 e 3. No caso do cenário 2, onde o elemento 180 continha um dano inicial de 20%, o MER quantificou tal dano em 35%, fato este explicado pelas variações de 38, 49 e 20% nos momentos de inércias dos eixos x, y e z, respectivamente. Já no caso 3, cenário no qual o elemento 225 tinha uma redução de 1% na área de sua seção transversal, o resultado fornecido pelo MER ficou bem próximo do valor do dano fornecido inicialmente, uma vez que o método apresentou como resposta o valor de 2%. Desta forma, pode se afirmar que foram obtidos resultados satisfatórios nos casos até aqui analisados.

A quantificação dos danos por meio das RNAs foi realizada com uma rede neural composta pelas camadas de entrada, intermediária e de saída – Figura 5.30. A camada de entrada foi formada por cinco neurônios alimentados com os erros do MER. Esses representam o desequilíbrio na equação de movimento do modelo em seus cinco primeiros modos de vibração, por este motivo, o número de neurônios desta camada.

Para o melhor desempenho da rede, a camada intermediária foi composta por oito neurônios (Figura 5.30). Por fim, considerando que a rede foi formada para fornecer apenas um resultado, a quantificação do dano, a camada de saída foi composta de apenas um neurônio.

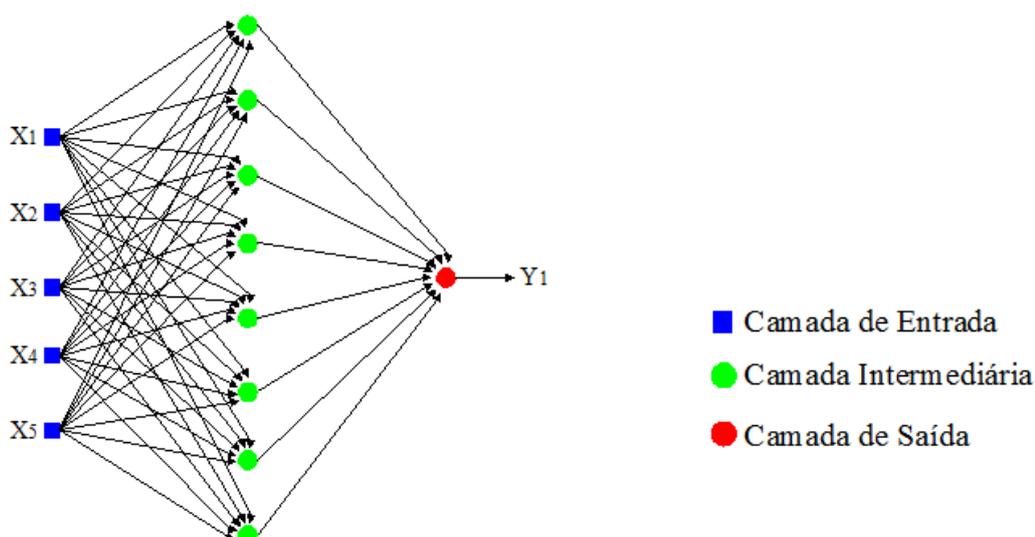


Figura 5.31 Quantificação de danos pela RNA do modelo 2.

Entre as camadas foram utilizadas as mesmas duas funções de ativação utilizadas na rede do modelo 1 (Figura 5.31), a função *tansig* na primeira parte do processamento (entre a camada de entrada e a camada intermediária), e a função *satlins* na segunda etapa (entre a camada intermediária e a camada de saída).

Como mencionado anteriormente, tais funções foram escolhidas de forma aleatória, de modo a se obter o melhor desempenho da rede e com o mínimo erro possível durante o treinamento.

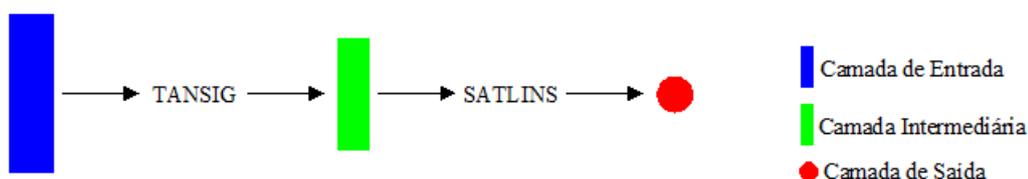


Figura 5.32 Esquema da RNA utilizada na quantificação de danos do modelo 2.

Para o treinamento e validação da rede, foram criados diferentes cenários com elementos danificados (diminuição na área da seção transversal) situados em diferentes lugares e com diferentes intensidades de dano. As tabelas 5.14 e 5.15 mostram os cenários utilizados para obtenção dos dados (erros obtidos através do MER) usados nas referidas etapas, respectivamente.

Tabela 5.14 Cenários de danos utilizados no treinamento da rede do modelo 2.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
4	1	1
5	1	5
6	1	10
7	15	15
8	15	20
9	15	25
10	90	30
11	150	35
12	23	40
13	23	45
14	60	50

Tabela 5.15 Cenários de danos utilizados na validação da rede do modelo 2.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
15	60	55

Uma vez fornecidos os dados de para o treinamento e validação, foi iniciado o processamento da rede de forma que, após o treinamento, a RNA forneceu erros extremamente pequenos (Figura 5.32), demonstrando ter “aprendido” a relação existente entre os dados de entrada, os erros gerados pelos elementos danificados, previamente localizados e o dado de saída, a quantificação do dano.

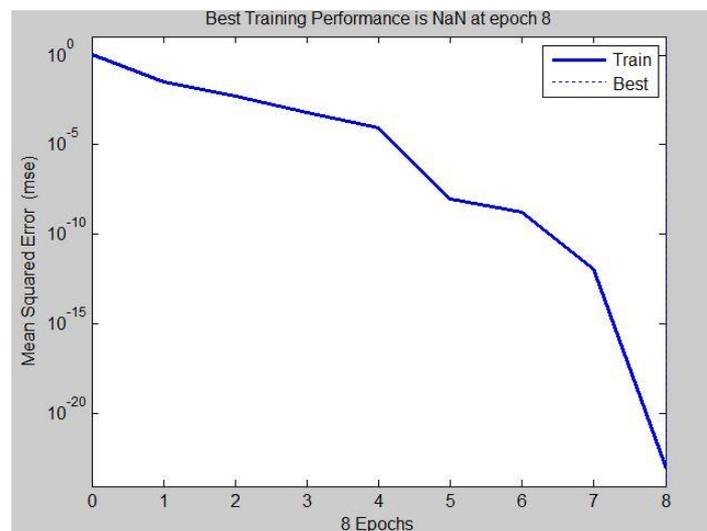


Figura 5.33 Erro no treinamento da rede do modelo 2.

Baseada no treinamento, na validação e com seus pesos ajustados, a rede passou para a etapa de generalização. Nesta etapa foram fornecidos à RNA os dados da localização dos danos dos cenários 1 (dano de 40% no elemento 16), 2 (dano de 20% no elemento 180) e 3 (dano de 1% no elemento 225), dados estes obtidos por meio do MER.

Foram selecionados os cinco maiores valores dos erros utilizados na localização dos danos, e transmitidos à rede como dados de entrada. A rede foi simulada com os mesmos valores dos pesos obtidos na fase de treinamento, e forneceu como resultado a quantificação dos referidos danos (Figura 5.33).

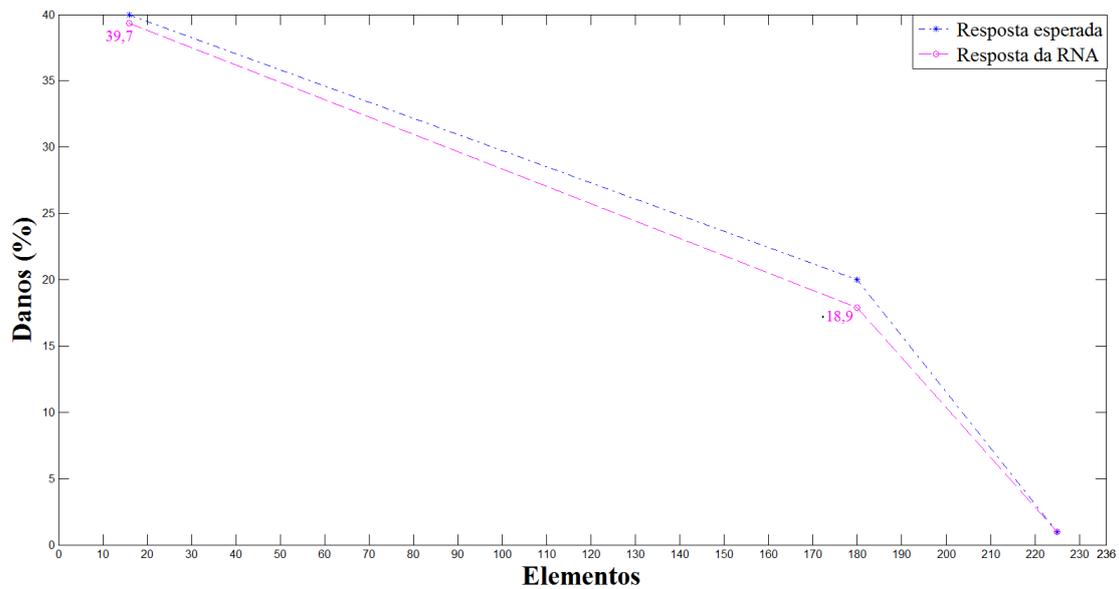


Figura 5.34 Quantificação de danos pela RNA do modelo 2.

A Figura 5.33 mostra o gráfico com a quantificação dos danos dos cenários 1, 2 e 3. Pode-se notar a presença de três pontos em destaque, estes representam o valor esperado do dano (em azul) e o resultado processado pela rede criada para o modelo 2 (na cor rosa).

O primeiro ponto representa o cenário 1, ou seja, o modelo 2 com um dano de 40% no elemento 16. Já o ponto 2 representa a quantificação do dano do cenário 2, este último com um dano de 20% no elemento 180 do modelo 2. Por fim, o terceiro ponto representa a quantificação do dano do cenário 3, este último representado pelo dano de 1% no elemento 225.

Nota-se que a quantificação dos elementos 16 e 180 não teve o resultado exatamente como o esperado, porém os valores são bem próximos, isto é, a rede forneceu como resposta ao cenário 1 um dano de 39,4% no elemento 16, neste caso esperado 40%, e, ao cenário 2, um dano de 18,9% no elemento 180, no qual se esperava 20%. Já no caso do cenário 3, onde o elemento 225 contém um dano de 1%, a rede quantificou exatamente o valor esperado.

Baseado nos resultados mostrados na Figura 5.33, observa-se que a RNA criada e treinada para estabelecer a relação entre os erros gerados para a localização do dano e sua quantificação, forneceu resultados satisfatórios.

5.1.2.2 Localização de vários elementos danificados no mesmo cenário

Nesta análise foram simulados vários elementos danificados em um mesmo cenário. Foram consideradas duas situações (Figura 5.34) com elementos danificados em diferentes proporções e posições, estes últimos intitulados de cenário 16 e cenário 17 (Tabela 5.16).

Os danos foram representados por meio de uma redução na área da seção transversal de alguns elementos. O cenário 16 (Figura 5.34(a)) foi configurado por quatro elementos danificados em posições variadas, entre os quais, o elemento 1, compreendido entre os nós 1 e 2, tem uma redução na área de sua seção transversal de 25% (representando perdas inerciais de 48%, 58% e 25%); o elemento 16, compreendido entre os nós 16 e 17, apresenta um dano de 30% (representando reduções inerciais de 54%, 65% e 30%); o elemento 23, compreendido entre os nós 23 e 24, apresenta um dano de 40% (representando perdas inerciais de 68%, 79% e 40%) e, por fim, o elemento 180 danificado em 45% de sua seção transversal (representando perdas inerciais de 76%, 83% e 45%).

O cenário 17 (Figura 5.34(b)) foi composto de seis elementos danificados, estes últimos separados em duas sequências, formando duas “regiões” danificadas. A primeira região foi formada pelos elementos 23, 24 e 25, delimitados pela sequência dos nós 23 a 26, e com danos de 5%, 10% e 15%, respectivamente. Já a segunda sequência contém os elementos 180 (delimitado pelos nós 178 e 179), 181 (compreendido entre os nós 179 e 180) e 225 (entre os nós 222 e 179). Esses elementos foram danificados em 20%, 25 e 30%, respectivamente.

Tabela 5.16 Cenários 16 e 17 do modelo 2.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
16	1	25
	16	30
	23	40
	180	45
17	23	5
	24	10
	25	15
	180	20
	181	25
	225	30

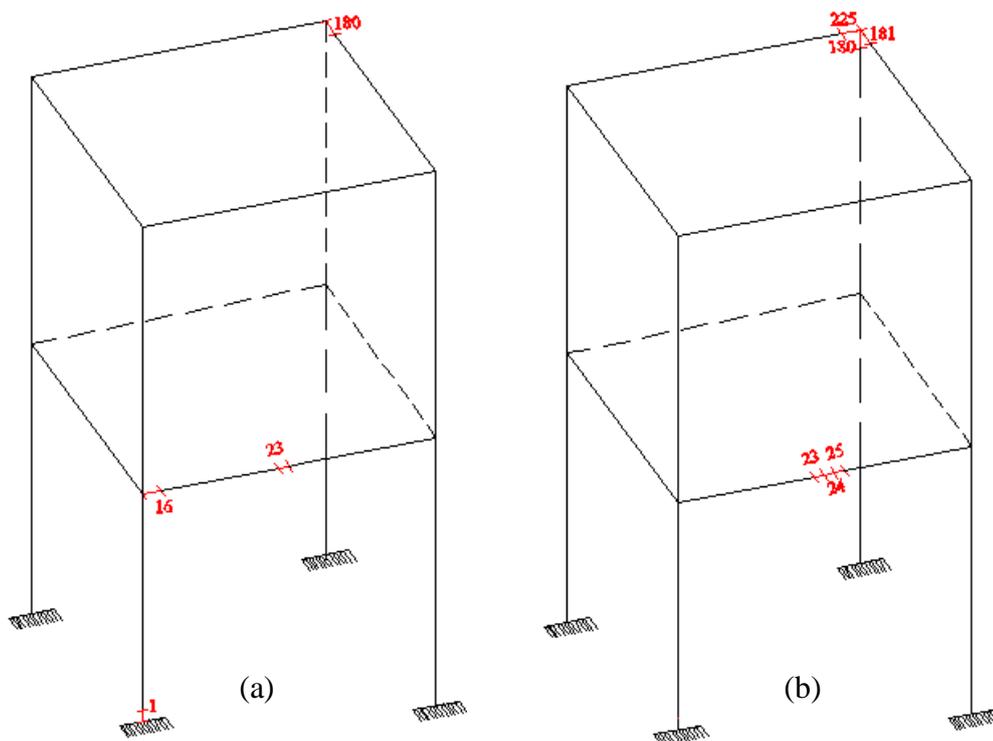


Figura 5.35 Cenários do modelo 2 com vários elementos danificados. (a) Cenário 16. (b) Cenário 17.

Seguindo a mesma metodologia empregada nas análises anteriores, foram obtidas as cinco primeiras frequências dos pórticos, bem como seus respectivos modos de vibração. A Tabela 5.17 mostra as frequências dos modelos intacto e danificados (Cenários 16 e 17). As frequências do cenário 16 apresentaram variações consideráveis com relação às frequências do modelo intacto, sobretudo a segunda e a quarta. Essas variações devem-se aos danos de grandes intensidades aos quais o cenário 16 está submetido. Apesar de ter mais elementos danificados do que o cenário 16, o cenário 15 não apresentou grandes diferenças de suas frequências em relação ao pórtico intacto. Tal fato pode ser explicado pela baixa severidade dos danos presentes neste cenário.

Tabela 5.17 Frequências dos cenários 16 e 17 do modelo2.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)	Cenário 16 (Hz)	Cenário 17 (Hz)
1 ^a	3,9674	3,9333	3,9679
2 ^a	4,3160	4,1520	4,3015
3 ^a	11,6294	11,6331	11,6551
4 ^a	12,6478	12,5621	12,5969
5 ^a	15,8560	15,8015	15,8953

De posse das características dinâmicas dos modelos, foi aplicado o MER para encontrar os locais danificados, representados pelos elementos 1, 16, 23 e 180, no cenário 16, e os elementos 23, 24, 25, 180, 181 e 225 no cenário 17.

As figuras 5.35 e 5.36 indicam as regiões que resultaram danificadas no cenário 16 (danos entre os nós 1 e 2, 16 e 17, 23 e 24, 178 e 179) e no cenário 17 (danos entre os nós 23 e 24, 24 e 25, 25 e 26, 178 e 179, 179 e 180, 222 e 179).

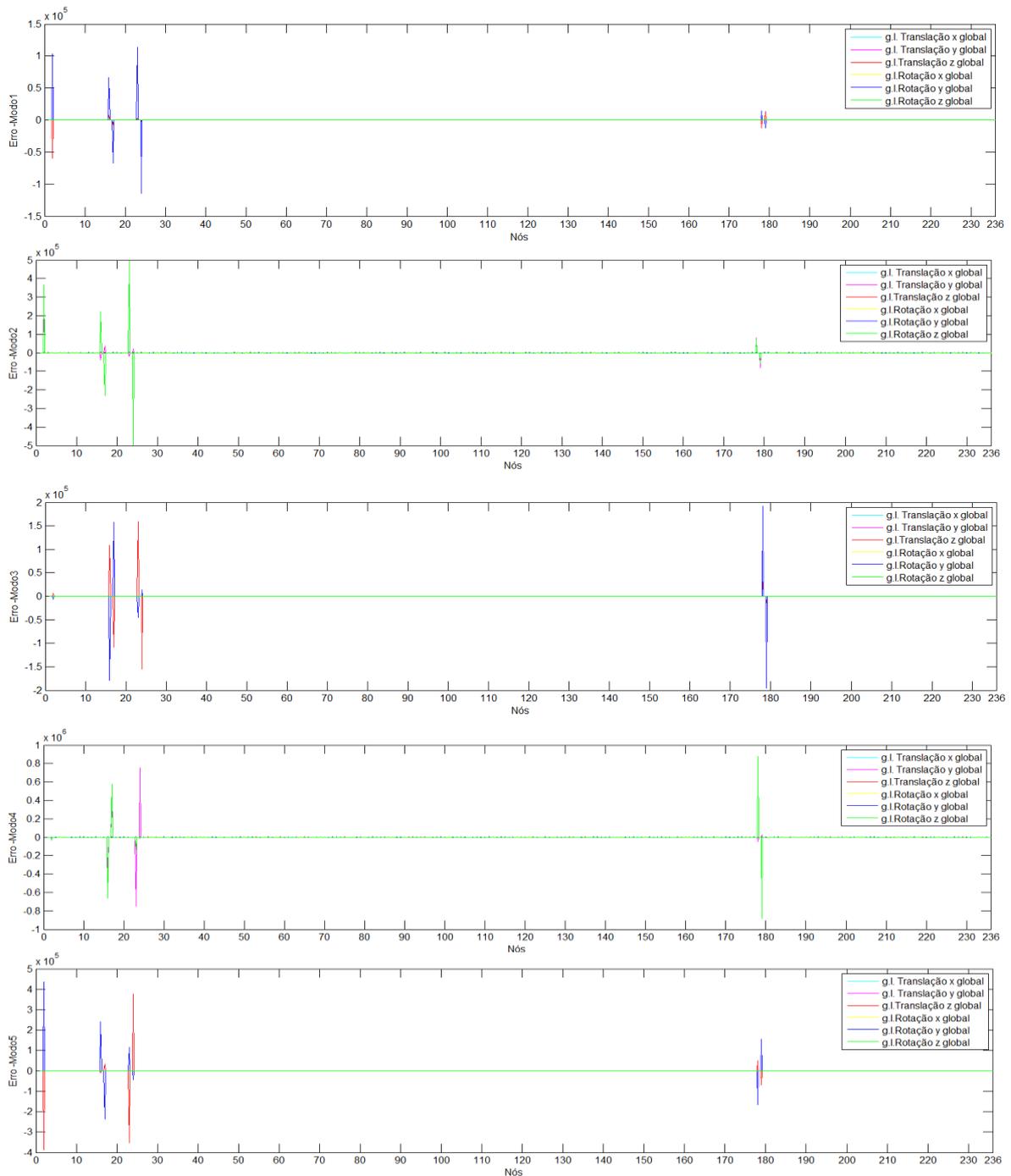


Figura 5.36 Localização dos danos correspondente ao modelo 2, cenário 16.

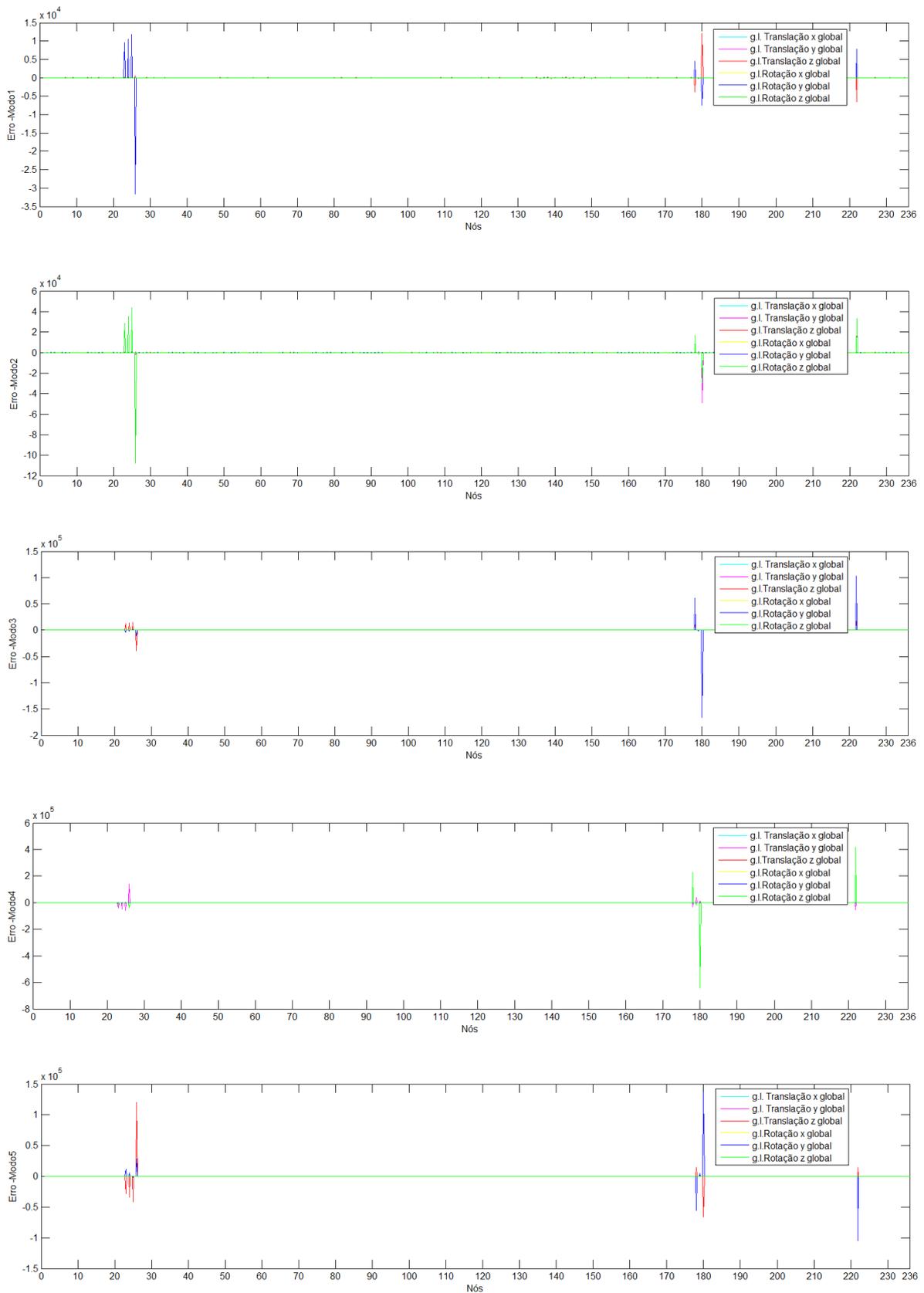


Figura 5.37 Localização dos danos correspondente ao modelo 2, cenário 17 .

A partir das Figuras 5.35 e 5.36, pode-se notar a presença de picos nos nós dos elementos aos quais foram atribuídos os danos.

Desta maneira, verifica-se que no cenário 16 os picos de erros acontecem no nó 2 (uma das extremidades do elemento 1, uma vez que a outra extremidade corresponde ao engaste da estrutura), nós 16 e 17 (extremidades do elemento 16), nós 23 e 24 (extremidades do elemento 23), e nós 178 e 179 (extremidades do elemento 180).

Da mesma forma do caso anterior, nos gráficos que representam o cenário 17, pode-se notar que o MER permitiu a localização da região danificada, identificando maiores valores de erros nos nós que delimitam os elementos 23, 24, 25, 180, 181 e 225, os nós 23, 24, 25, 26, 178, 179 e 222.

5.1.3 - Modelo 3 (M3)

O modelo 3, mostrado na Figura 5.4, consiste em um pórtico espacial formado por três pavimentos com barras de três metros, discretizado em 1170 elementos de pórtico espacial, com seis graus de liberdade por nó.

Os elementos intactos têm comprimento (L) de 0,1m, seção transversal (A) (0,3m x 0,3m), momento de inércia em relação ao eixo x (I_x) de $0,00168m^4$, momento de inércia em relação ao eixo y (I_y) de $0,000675 m^4$, momento de inércia em relação ao eixo z (I_z) de $0,000675 m^4$, módulo de elasticidade longitudinal (E) de $2,5 \times 10^{10} N/m^2$, módulo de elasticidade transversal de $9,68999 \times 10^9 N/m^2$ e coeficiente de Poisson de 0,2.

Os danos foram introduzidos por meio de reduções na área da seção transversal dos elementos 91 (compreendido entre os nós 61 e 92), 391 (delimitado pelos nós 31 e 390), 661 (entre os nós 657 e 656), 838 (compreendido entre os nós 829 e 830), 839 (compreendido entre os nós 830 e 831), 840 (compreendido entre os nós 831 e 832), 871 (compreendido entre os nós 832 e 862), 872 (compreendido entre os nós 862 e 863), 873 (compreendido ente os nós 863 e 864) e 225 (compreendido entre os nós 222 e 179).

A Figura 5.37 mostra o posicionamento dos referidos elementos, bem como seus respectivos nós. Os locais desses elementos danificados foram escolhidos a fim de contemplar as mais

diversas posições e o que estas podem representar nos resultados das propriedades dinâmicas. Alguns elementos deteriorados encontram-se isolados em extremidades de barras que se ligam a várias outras barras, o que pode indicar mudanças representativas nas propriedades dinâmicas. Outros foram alocados em conjunto, formando uma região danificada. Neste caso, optou-se por esse posicionamento a fim de se conhecer o funcionamento do método a partir da referida configuração, além do conhecimento do comportamento das frequências e dos modos de vibração frente ao conjunto de elementos danificados.

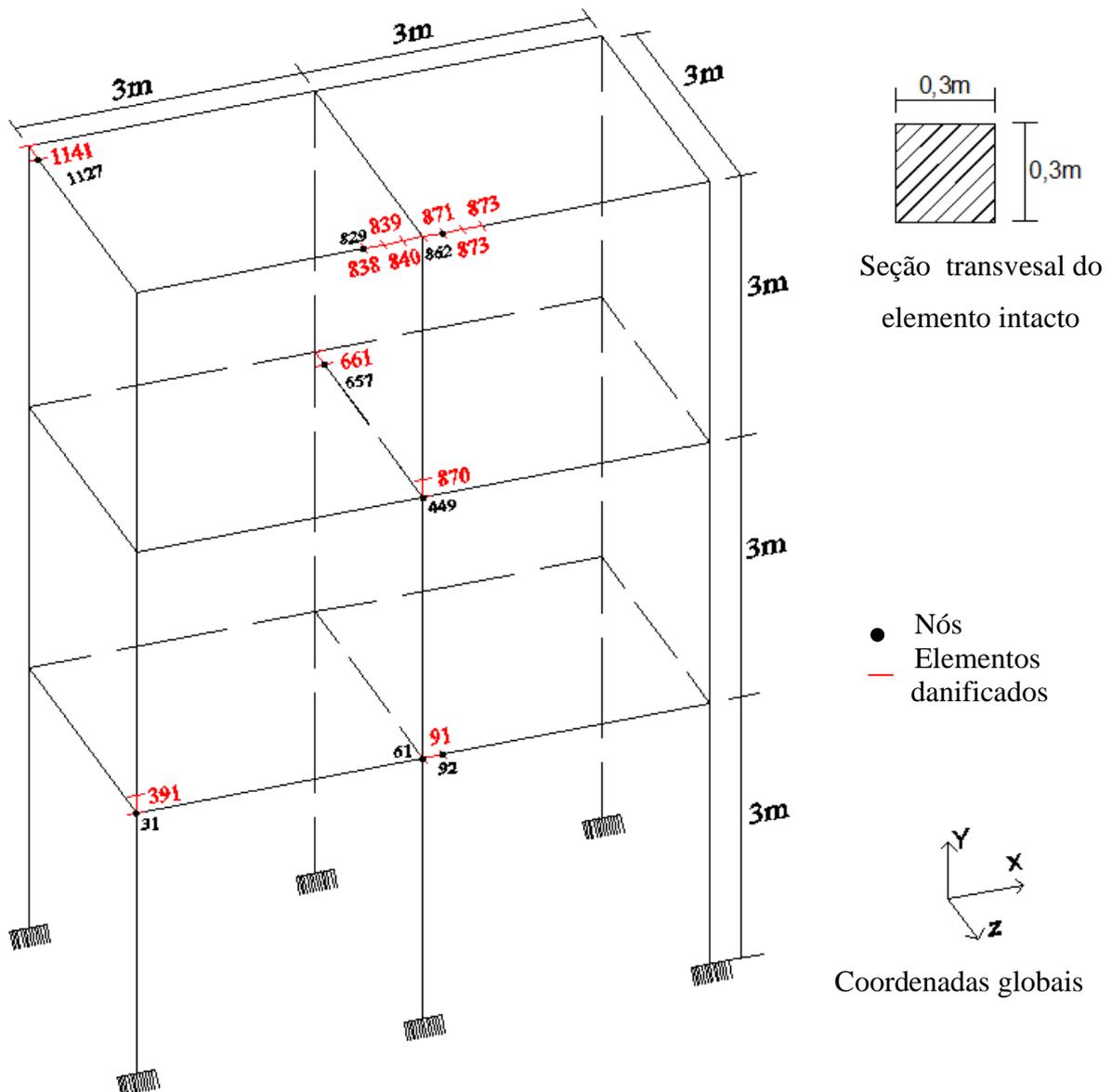


Figura 5.38 Modelo 3 discretizado.

Inicialmente, foram obtidas as cinco primeiras frequências do pórtico intacto (Tabela 5.18), bem com seus respectivos modos de vibração (Figura 5.38). Posteriormente, foi adotado o mesmo procedimento para obtenção das características dinâmicas dos modelos danificados e os resultados estão detalhados em cada um dos cenários a seguir.

Tabela 5.18 Frequências do modelo 3.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)
1 ^a	2,1828
2 ^a	2,6498
3 ^a	5,8514
4 ^a	7,1029
5 ^a	7,4549

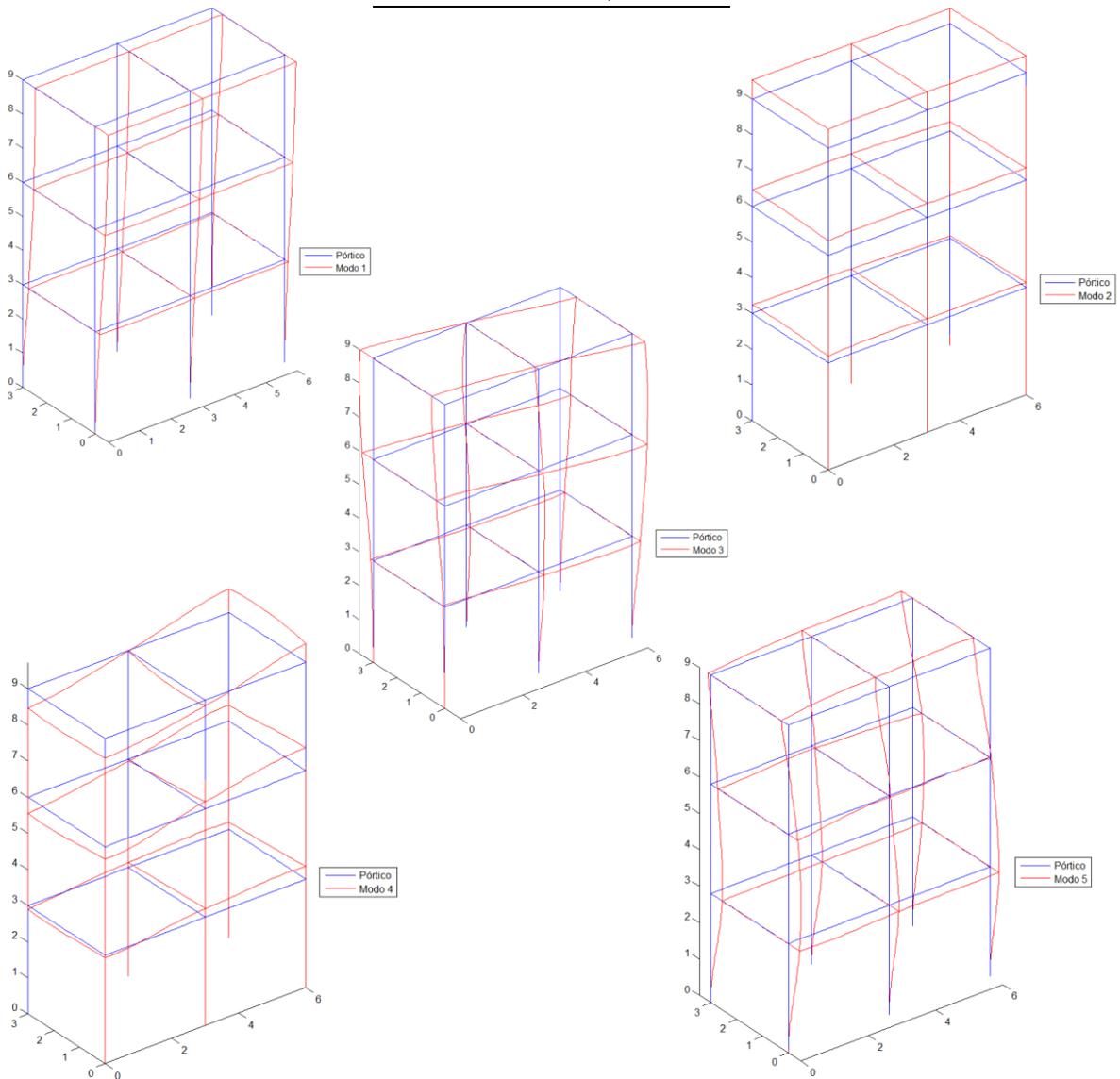


Figura 5.39 Modos de vibração do modelo 3.

5.1.3.1 Localização e quantificação de danos em elementos isolados

Nesta análise foram simulados cenários com apenas um elemento danificado. Desta forma, foram consideradas 3 cenários com elementos danificados em diferentes proporções, como mostra a Tabela 5.19.

Tabela 5.19 Cenários 1, 2 e 3 do modelo 2 – danos isolados.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
1	91	20
2	870	40
3	1141	10

Foram considerados três cenários de danos representados por meio de uma redução na área da seção transversal de alguns elementos. No primeiro cenário o elemento 91, compreendido entre os nós 61 e 92 (ver indicação na Figura 5.39 (a)), sofreu uma redução de 20% na área de sua seção transversal, o que equivale a perdas de 38, 49 e 20% dos momentos de inércia em torno dos eixos x, y e z, respectivamente, com relação ao elemento intacto. Já no segundo cenário, foi considerada uma redução de 40% na área da seção transversal do elemento 870, compreendido entre os nós 449 e 861 (Figura 5.39(b)), o que representa perdas de 68, 79 e 40% com relação aos momentos de inércia nos eixos x, y e z.

No terceiro cenário, o elemento 1141, delimitado pelos nós 1127 e 1097, foi danificado em 10% na área de sua seção transversal. Tal redução significa perdas de 20, 28 e 10% nos momentos de inércia dos três eixos, x, y e z, respectivamente, com relação aos elementos intactos. (Figura 5.39(c))

A partir destes modelos foram obtidas as cinco primeiras frequências, bem como seus respectivos modos de vibração. A Tabela 5.20 mostra as frequências dos modelos intacto e danificados (Cenários 1, 2 e 3).

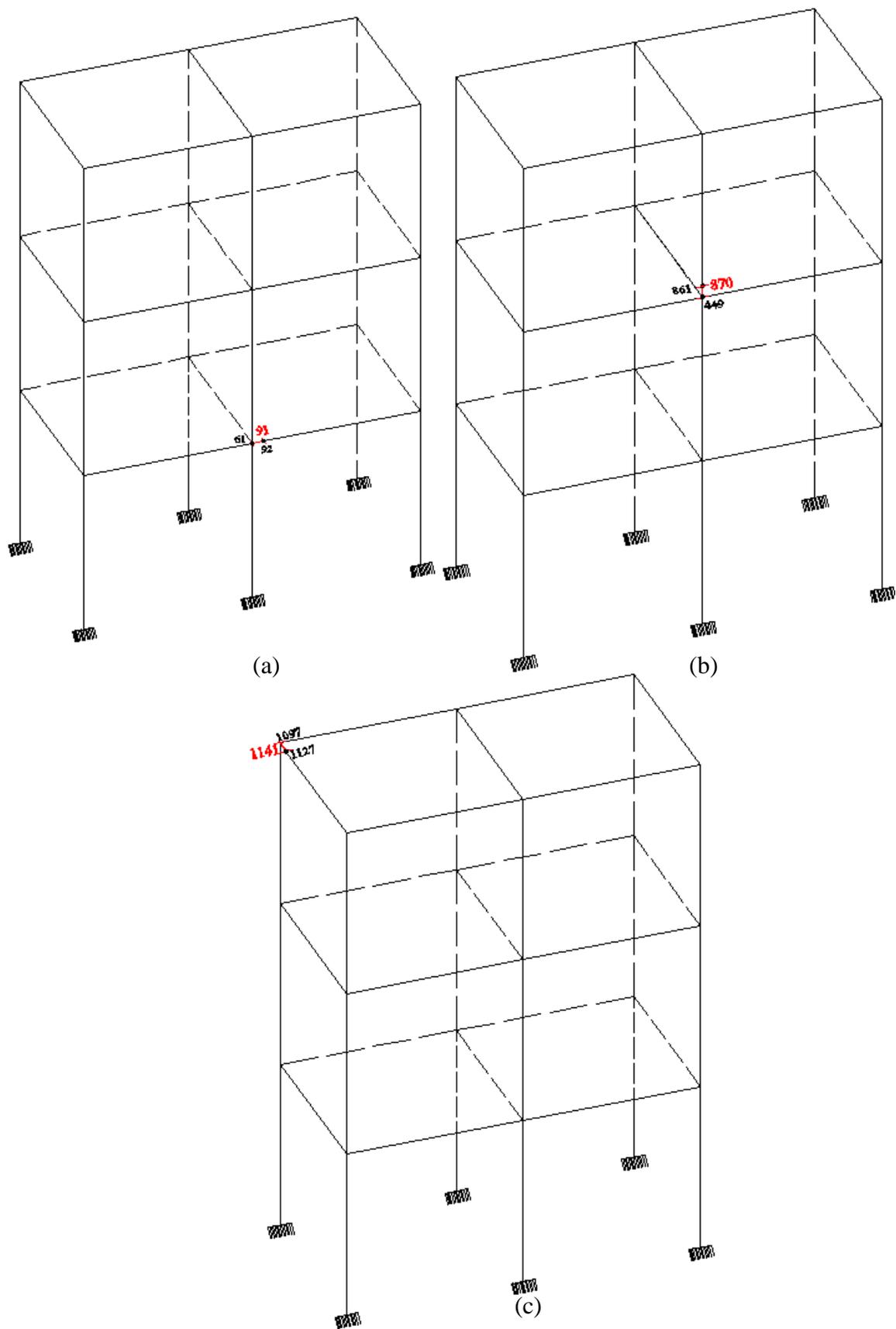


Figura 5.40 Cenários com danos individuais do modelo 2. (a) Cenário 1. (b) Cenário 2. (c) Cenário 3.

Tabela 5.20 Frequências dos cenários 1, 2 e 3 do modelo 3.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)	Cenário 1 (Hz)	Cenário 2 (Hz)	Cenário 3 (Hz)
1 ^a	2,1828	2,1823	2,1828	2,1829
2 ^a	2,6498	2,6471	2,6481	2,6493
3 ^a	5,8514	5,8506	5,8509	5,8508
4 ^a	7,1029	7,0987	7,0985	7,1024
5 ^a	7,4549	7,4555	7,4311	7,4447

A Tabela 5.20 mostra que as frequências dos três cenários não apresentaram grandes diferenças com relação às do modelo intacto. Mesmo com porcentagens e locais diferentes, os elementos danificados de forma isolada não foram capazes de exercer significativa diferença de comportamento dinâmico quando comparado ao pórtico sem danos discretizados em muitos elementos.

De posse das características dinâmicas dos modelos, foi aplicado o MER para encontrar as regiões danificadas, representadas pelos elementos 91 e 870 e 1141, bem como as intensidades desses danos.

Como já mencionado, as localização e quantificação de danos, desenvolvidas pelo referido método, estão descritas, de forma analítica, no item 3.1 do capítulo 3, e, de forma computacional, no item 4.1 do capítulo 4.

As figuras 5.40, 5.41 e 5.42 indicam a localização dos danos presentes no cenário 1 (representado pela redução de 20% na seção transversal do elemento 91, este último compreendido entre os nós 61 e 92), no cenário 2 (representado pela redução de 40% na seção transversal do elemento 870, este último compreendido entre os nós 449 e 861) e no cenário 3 (representado pela redução de 10% na seção transversal do elemento 1141, este último compreendido entre os nós 1097 e 1127).

Tais gráficos são provenientes da aplicação da equação do erro para os cinco primeiros modos de vibração e simbolizam, de forma normalizada, os maiores erros encontrados. A partir dos gráficos, nota-se a presença de picos nos nós dos elementos aos quais foram atribuídos os referidos danos na área de suas seções transversais, representando, portanto, os locais danificados.

Desta maneira, observa-se na Figura 5.40, o aparecimento de picos nos nós 61 e 92, mostrando que o MER funcionou adequadamente na etapa de localização de danos.

De modo similar, a Figura 5.41 apresenta gráficos com picos em correspondência com determinados nós. Neste caso, como o elemento danificado correspondeu ao elemento de número 870, compreendido entre os nós 449 e 861, os picos se localizaram nestes nós. Por fim, seguindo o bom desempenho observado até aqui, o MER indicou corretamente a localização do elemento danificado nas análises dos cenários 1 e 2, e no cenário 3, isto é, na Figura 5.42 percebe-se claramente a presença de picos nos nós 1097 e 1127 representando, portanto, o local do dano.

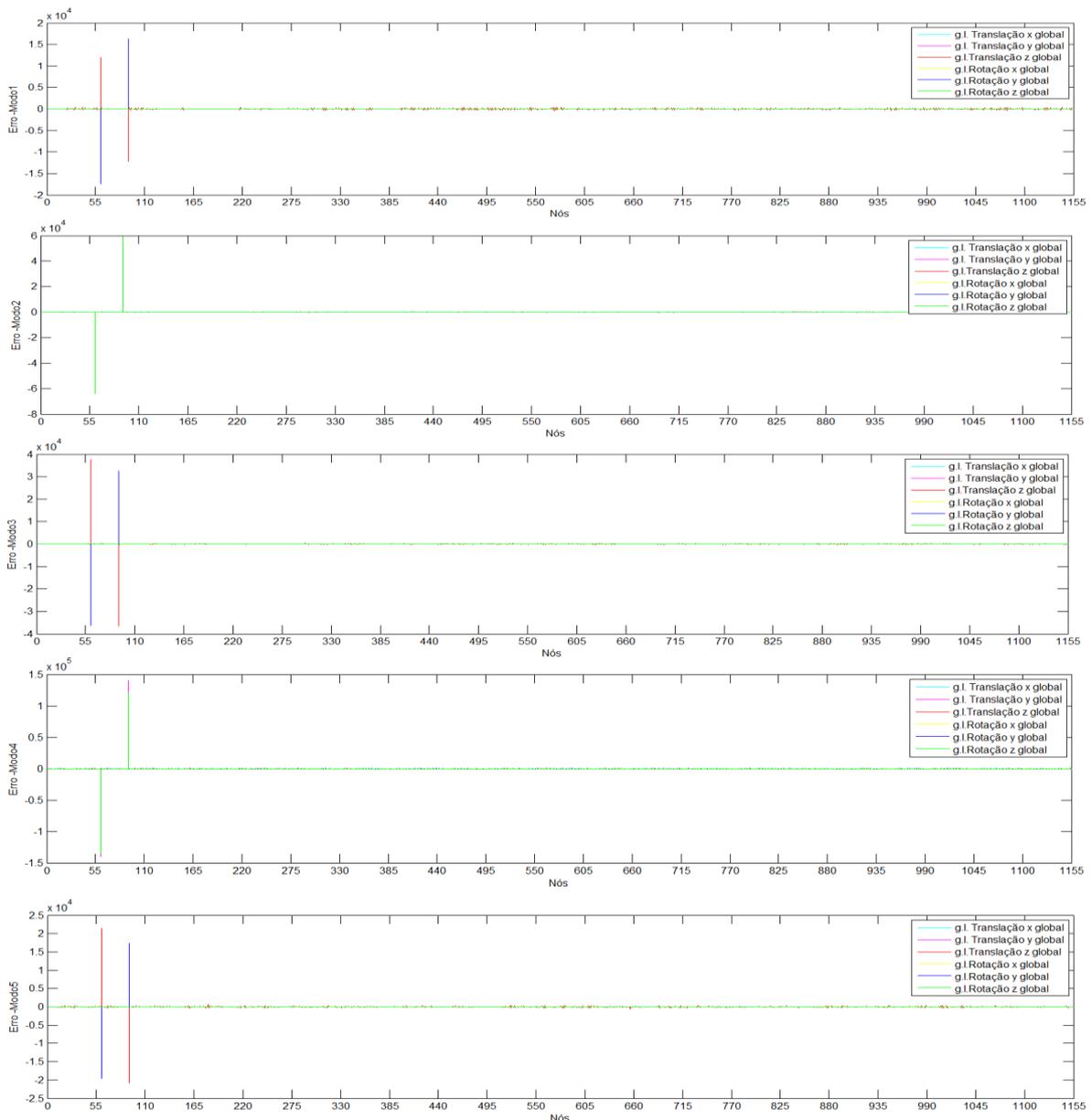


Figura 5.41 Localização de dano correspondente ao modelo 3, cenário 1 – 20% de redução na área do elemento 91.

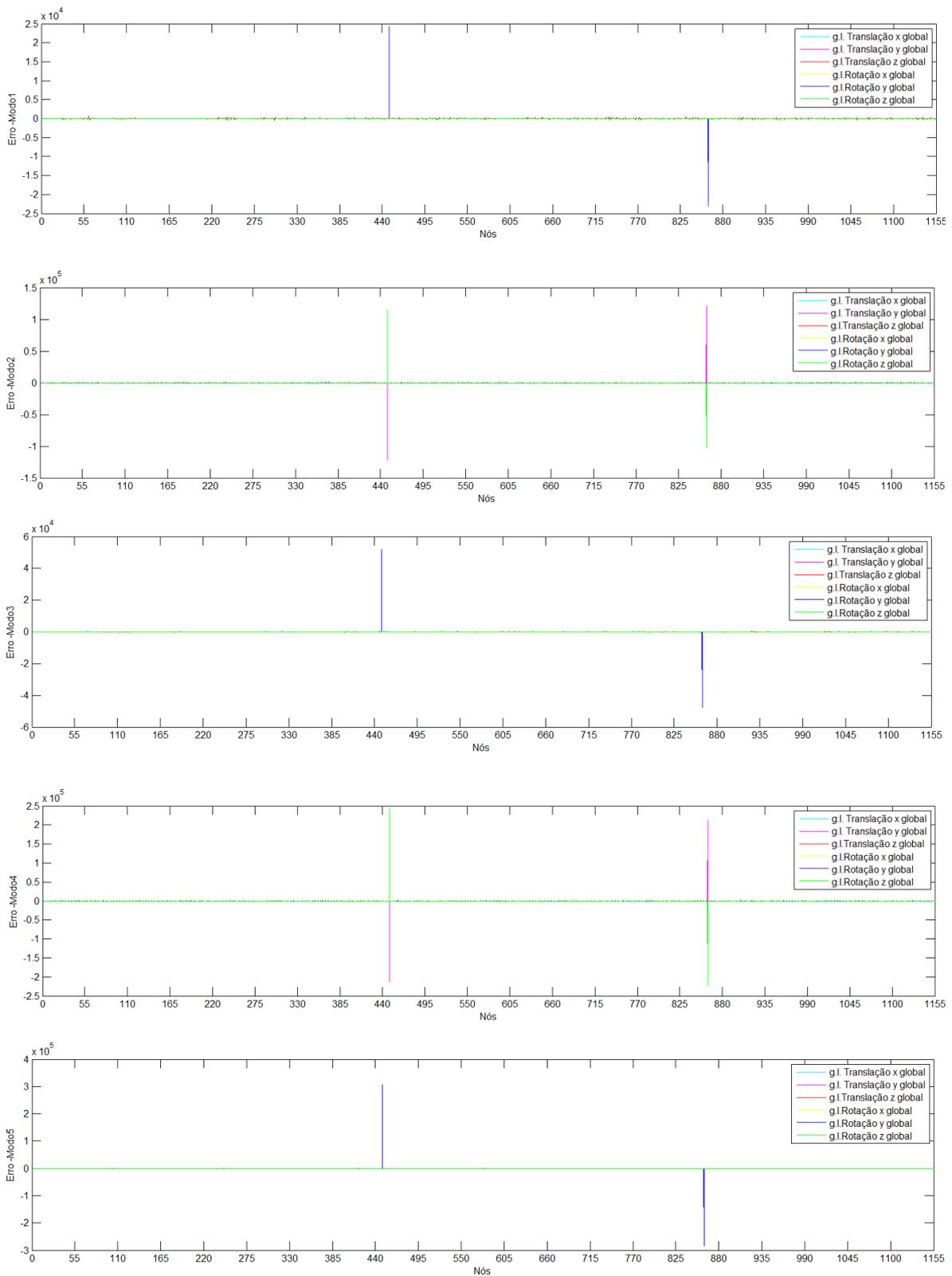


Figura 5.42 Localização de dano correspondente ao modelo 3, cenário 2 – 40% de redução na área do elemento 870.

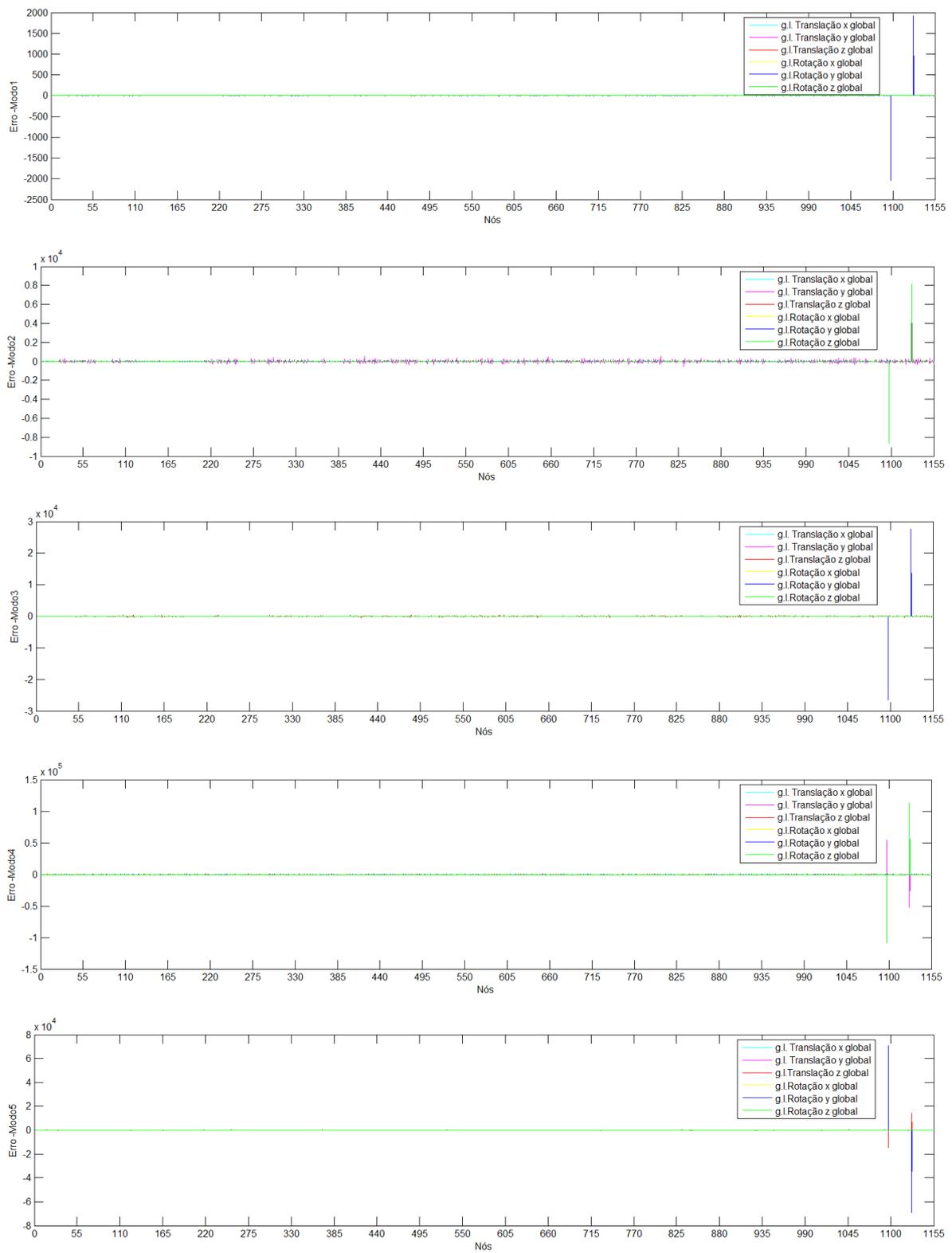


Figura 5.43 Localização de dano correspondente ao modelo 3, cenário 3 – 10% de redução na área do elemento 1141.

A etapa de quantificação pelo MER não foi realizada em modelos maiores àquele chamado de modelo 2, pois, para a realização dessa etapa, são necessárias 100 iterações para a obtenção do valor de p que produza o mínimo da função $E(p)$. Deste modo, como $E(p)$ depende da formação da matriz de rigidez global do modelo, há a montagem de uma nova matriz a cada iteração, fato este que demanda uma grande quantidade de tempo, sobretudo em modelos grandes, como é o caso do modelo 3 (formado por 1170 elementos). (Item 3.1 do Capítulo 3 e Figura 4.3)

Assim, neste caso, a quantificação dos danos dos cenários 1, 2 e 3 do modelo 3 foi realizada apenas por meio da técnica de Redes Neurais Artificiais – RNAs.

Foi criada uma rede composta por três camadas (camadas de entrada, intermediária ou oculta e de saída – Figura 5.43). A camada de entrada foi formada por cinco neurônios, estes últimos alimentados com os erros encontrados através do MER (Equação (3.10), Capítulo 3). Esses erros representam o desequilíbrio na equação de movimento do modelo em seus cinco primeiros modos de vibração, por este motivo, a rede apresenta cinco neurônios na camada de entrada.

A camada intermediária foi composta por 9 neurônios, fato este explicado pelo melhor desempenho da rede. A camada de saída contém apenas um neurônio, uma vez que a resposta da rede deve ser a quantificação do dano. Desta forma, todos os neurônios das camadas anteriores se relacionam entre si para processar apenas um resultado.

Da mesma forma das análises anteriores, neste caso também foram utilizadas as funções de transferências *tansig* e *satlins* entre as referidas camadas. (Figura 5.44)

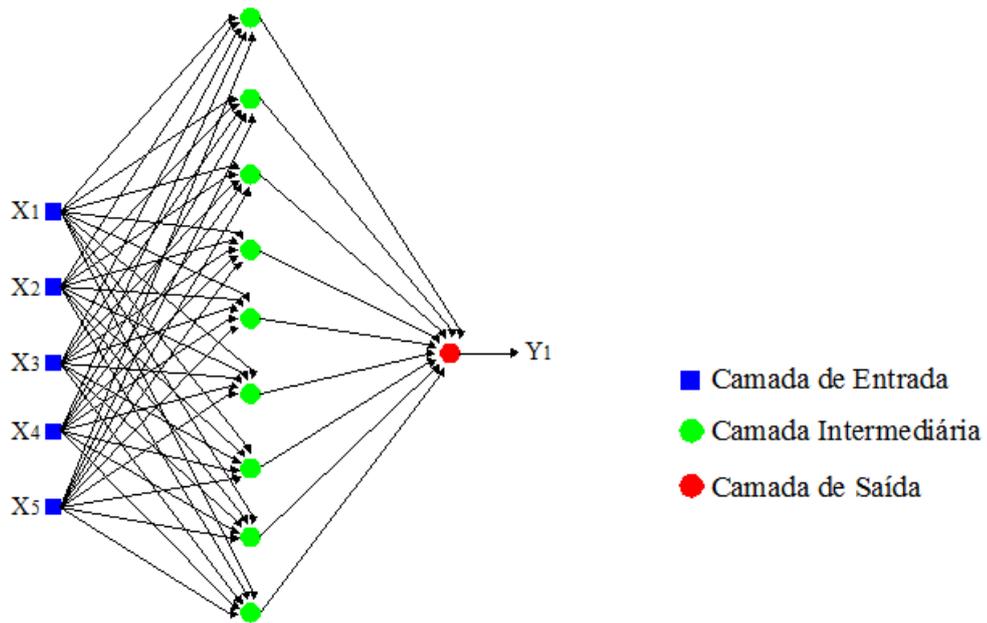


Figura 5.44 Rede Neural Artificial utilizada na quantificação de danos do modelo 3.

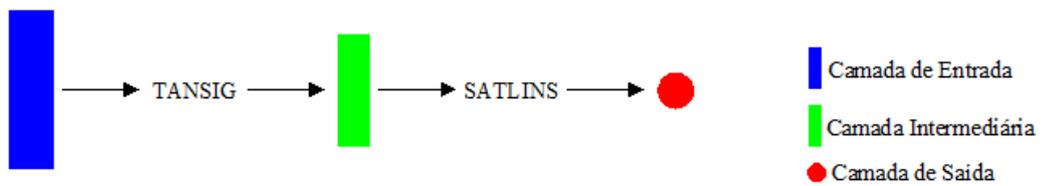


Figura 5.45 Esquema da RNA utilizada na quantificação de danos do modelo 3.

Para o treinamento e validação da rede foram simulados cenários de danos com diferentes severidades. As tabelas 5.21 e 5.22 mostram os cenários utilizados para obtenção dos dados (erros obtidos através do MER) para as referidas etapas, respectivamente.

Tabela 5.21 Cenários de danos utilizados no treinamento da rede do modelo 3.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
6	60	1
7	60	5
8	60	10
9	31	20
10	31	25
11	30	30
12	30	40

Tabela 5.22 Cenários de danos utilizados na validação da rede do modelo 3.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
13	391	45

Depois de fornecidos os dados do treinamento e da validação, estas duas etapas foram realizadas com o objetivo de ajustar os pesos da RNA e então estabelecer a relação entre dados de entrada (erros do MER) e o dado de saída, a quantificação do dano. Durante o treinamento os pesos foram ajustados e a cada iteração foram exibidos os erros do processamento. A Figura 5.45 mostra estes erros, os quais apresentaram valores mínimos, o que indicou o avanço para última etapa da quantificação, a generalização da rede.

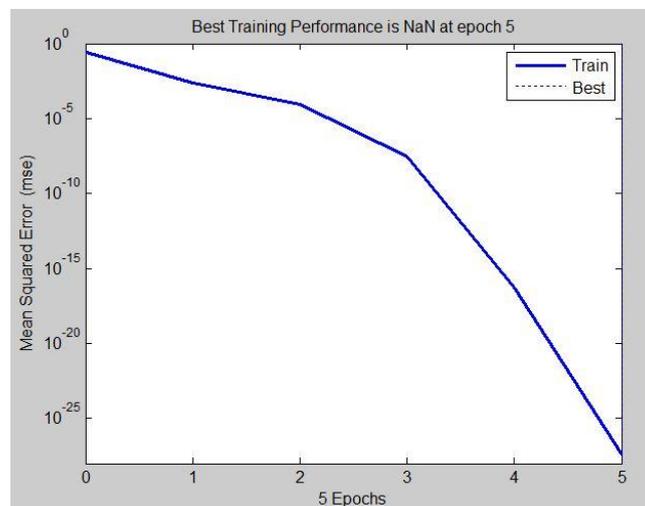


Figura 5.46 Erro no treinamento da rede do modelo 3.

Depois do treinamento e da validação, a rede já com seus pesos ajustados passou para a etapa de generalização. Nesta, fornecidos à RNA os dados da localização dos danos dos cenários 1 (dano de 20% no elemento 91), 2 (dano de 40% no elemento 870) e 3 (dano de 10% no elemento 1141), dados estes obtidos através do Método do Erro Residual.

Foram selecionados os cinco maiores valores dos erros utilizados na localização dos danos, e transmitidos à rede como dados de entrada. Esta última foi simulada e forneceu como resultado a quantificação dos referidos danos (Figura 5.46).

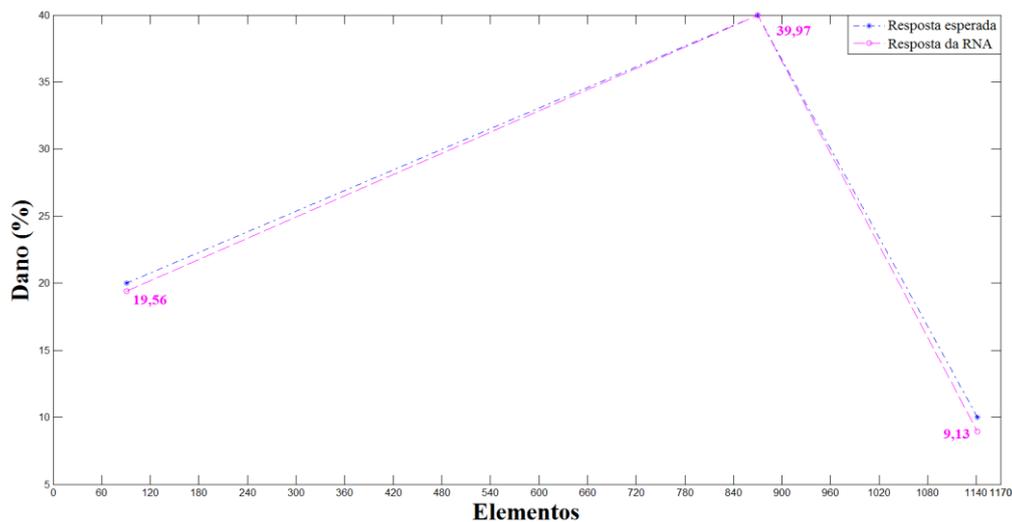


Figura 5.47 Quantificação de danos pela RNA do modelo 3.

5.1.3.2 Localização de vários elementos danificados no mesmo cenário

Nesta análise foram simulados vários elementos danificados em um mesmo cenário. Estes cenários contêm elementos danificados em diferentes posições e proporções, bem como vários elementos danificados em sequência, formando uma região danificada. A Figura 5.47 mostra em destaque (na cor vermelha) estes elementos deteriorados.

Foram considerados dois cenários distintos, os cenários 14 e 15 com elementos danificados, estes últimos representados por meio de uma redução na área da seção transversal, como mostram a Figura 5.47 e a Tabela 5.23.

No cenário 14, os elementos 91 (compreendido entre os nós 61 e 92), 391 (compreendido entre os nós 31 e 390), 661 (compreendido entre os nós 656 e 657), 870 (compreendido entre os nós 449 e 861) e 1141 (compreendido entre os nós 1097 e 1127), sofreram perdas de 40%, 30%, 25%, 15% e 5%, respectivamente (Figura 5.47 (a)).

Já no segundo cenário desta análise, o cenário 15, foram considerados 6 elementos danificados em sequência, caracterizando uma “região” danificada. Tal região corresponde aos elementos 838 (compreendido entre os nós 829 e 830) com um dano de 5%, o elemento 839 (compreendido entre os nós 830 e 831) com um dano de 10%, o elemento 840 (compreendido entre os nós 831 e 832) com um dano de 15%, o elemento 871 (compreendido entre os nós 832 e 862) com um dano de 20%, o elemento 872 (compreendido entre os nós 862 e 863) com um dano de 25% e,

por fim, o elemento 873 (delimitado pelos nós 863 e 864) com um dano de 30% (Figura 5.47(b)).
 A Tabela 5.23 mostra, de forma resumida, os referidos cenários.

Tabela 5.23 Cenários 14 e 15 do modelo 3.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
14	91	40
	391	30
	870	15
	661	25
	1141	5
15	838	5
	839	10
	840	15
	871	20
	872	25
	873	30

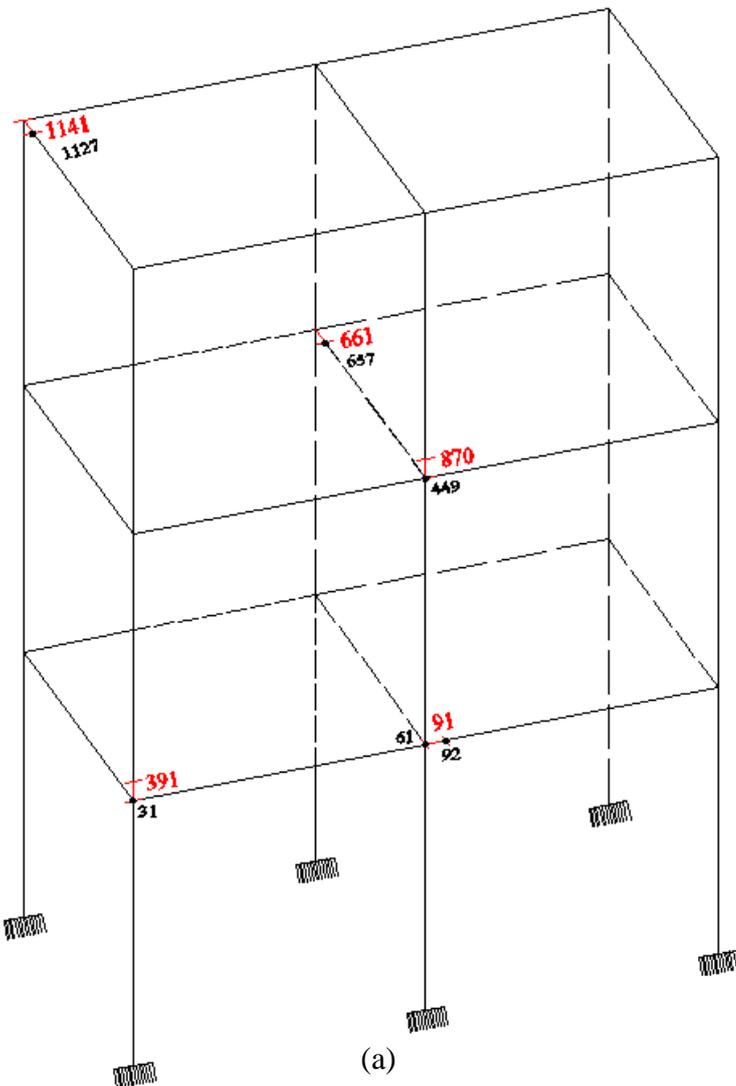


Figura 5.48 Cenários do modelo 3. (a) Cenário 14.

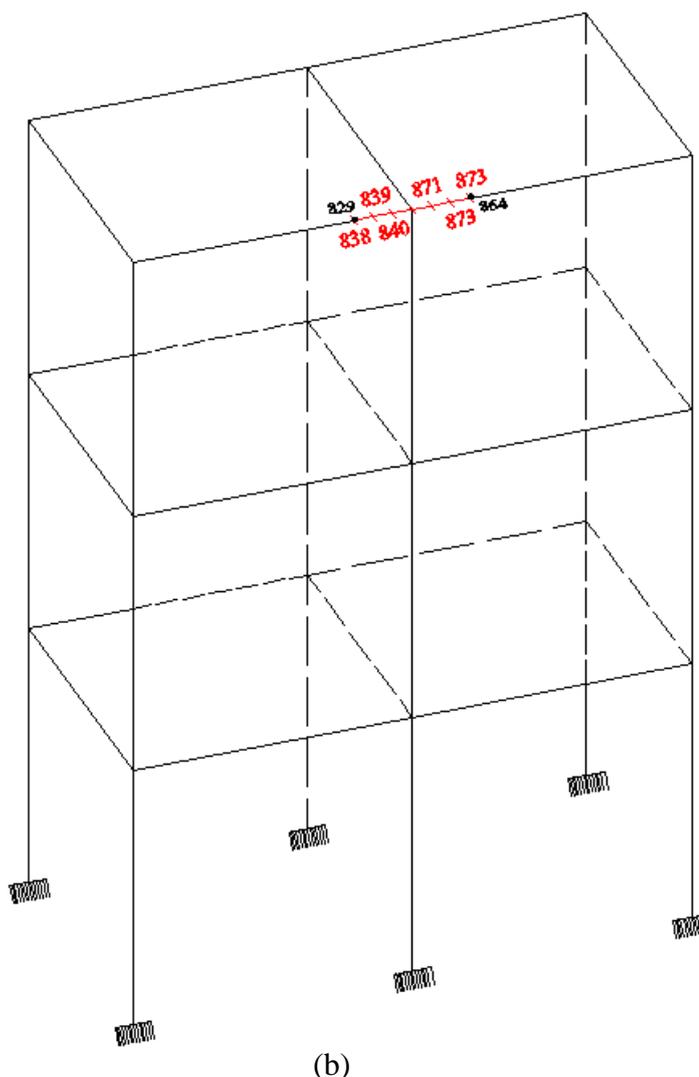


Figura 5.49 Cenários do modelo 3. (b) Cenário 15.

A partir dos modelos numéricos foram obtidas as cinco primeiras frequências dos pórticos, bem como seus respectivos modos de vibração. A Tabela 5.24 mostra as frequências dos modelos intacto e danificados (Cenários 14 e 15).

Tabela 5.24 Frequências de vibração do modelo 3 correspondentes aos cenários 14 e 15.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)	Cenário 14 (Hz)	Cenário 15 (Hz)
1 ^a	2,1828	2,1803	2,1800
2 ^a	2,6498	2,6340	2,6422
3 ^a	5,8514	5,8450	5,8433
4 ^a	7,1029	7,0658	7,0652
5 ^a	7,4549	7,4481	7,4567

Uma vez conhecidas as características dinâmicas dos modelos, foi aplicado o MER para encontrar os locais danificados, representados pelos elementos 91, 391, 661, 870 e 1141, no

cenário 14, os quais se encontram delimitados pelos nós 61 e 92, 31 e 390, 656 e 657, 449 e 861, 1097 e 1127, respectivamente. E os elementos do cenário 15, de numeração 838, 839, 840, 871, 872 e 873 e compreendidos entre os nós 829 e 830, 830 e 831, 831 e 832, 832 e 862, 862 e 863, 863 e 864, respectivamente.

Na Figura 5.48, a qual representa a localização dos danos do cenário 14, é possível identificar nitidamente os nós que delimitam os elementos danificados do referido cenário. Nos gráficos que correspondem ao primeiro, segundo e quarto modos de vibração, observam-se os picos nos nós 61, 92, 31, 390, 656, 657, 449, 861. No caso dos nós 1097 e 1127, que representam as extremidades do elemento 1141 (que contém um dano de 5%), estes não ficaram visíveis por se tratarem de erros de valores bem inferiores aos demais, sendo assim, na escala da plotagem destes gráficos, tais picos tornaram-se imperceptíveis.

Já nos gráficos do terceiro e quinto modos de vibração é possível identificar os picos que não foram possíveis visualizar nos modos de vibração 1, 2 e 4. Notam-se picos na cor rosa, exatamente nos nós 1097 e 1127, correspondendo aos nós que delimitam o elemento 1141.

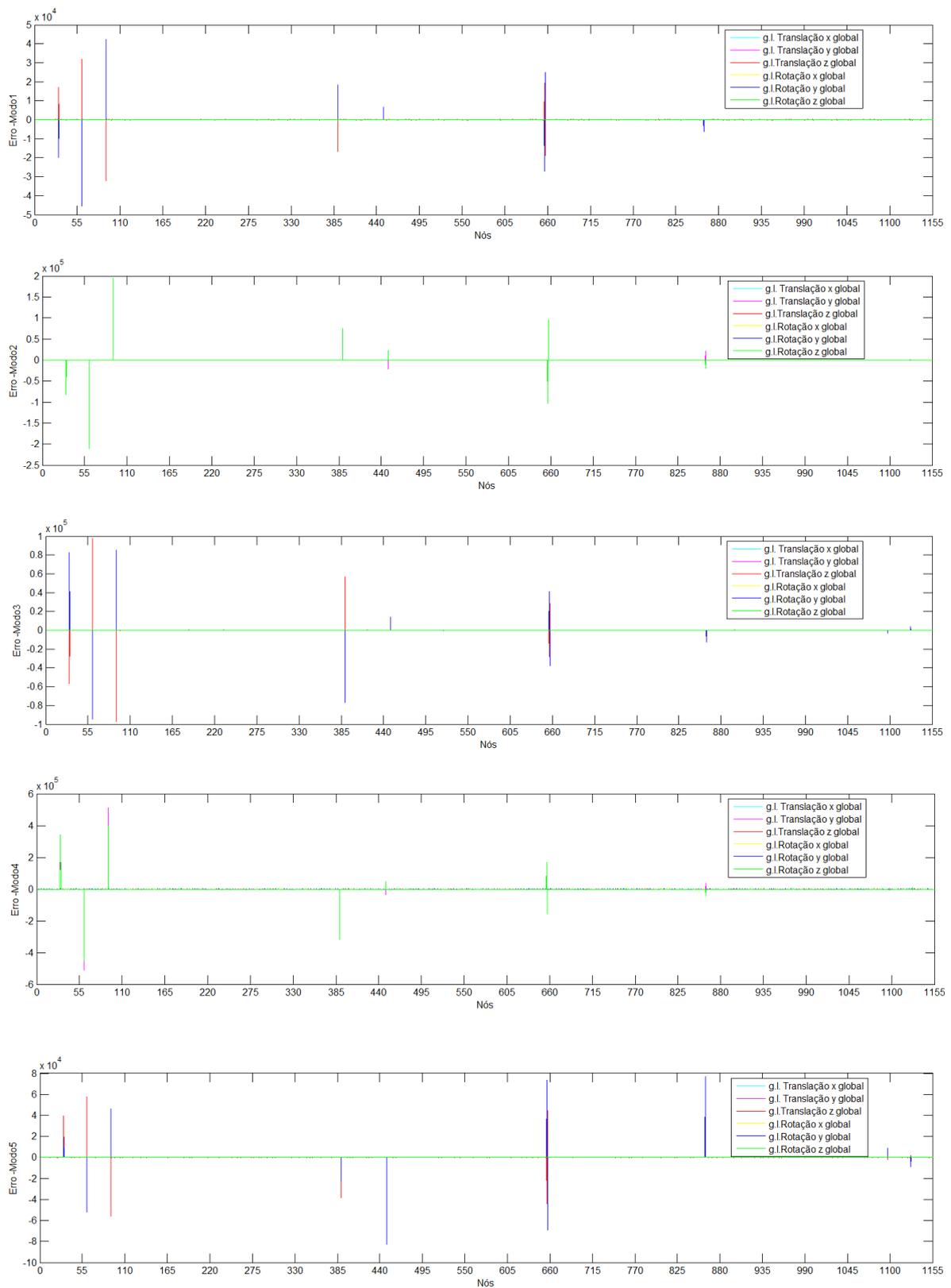


Figura 5.50 Localização dos danos correspondentes ao modelo 3, cenário 14.

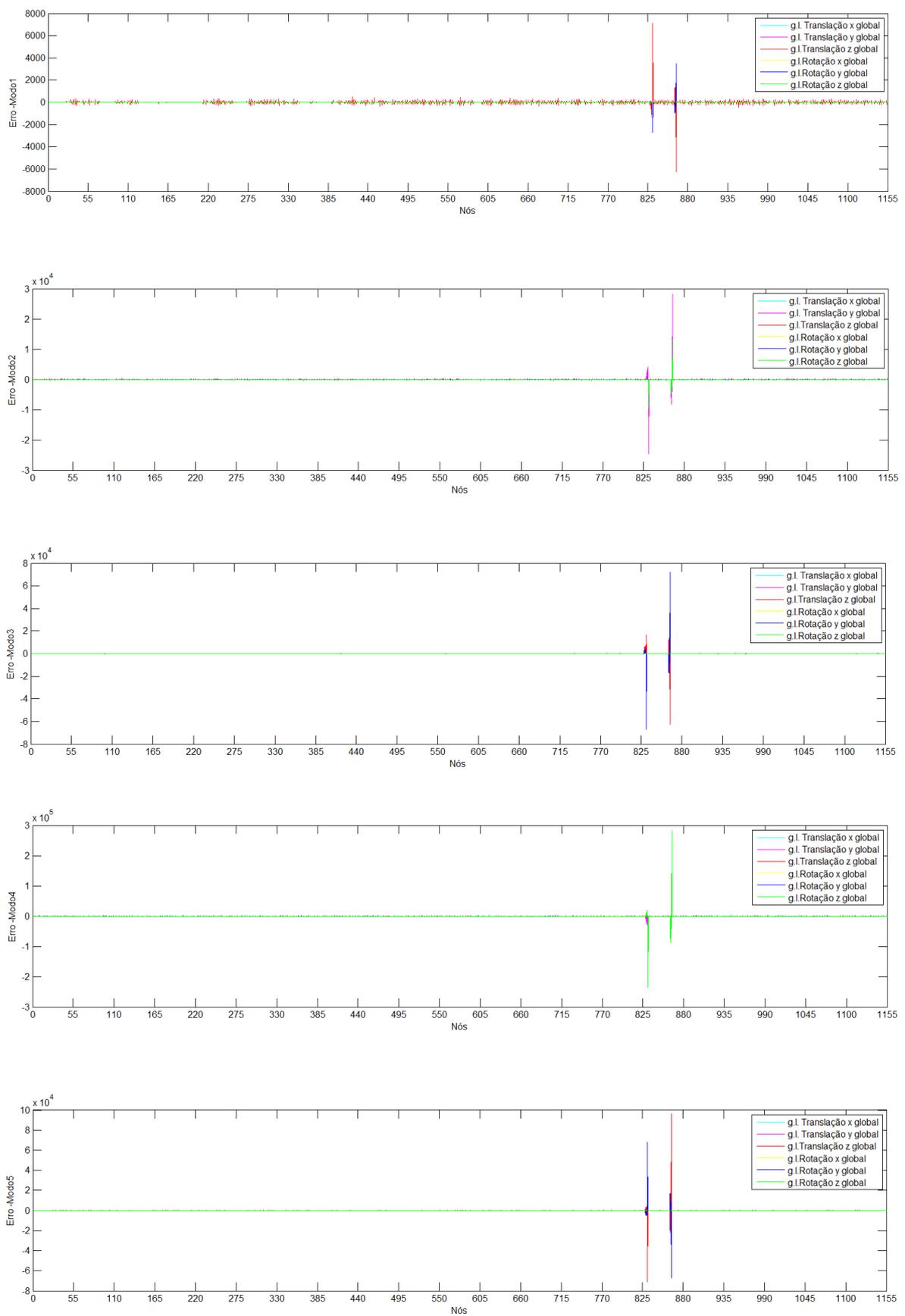


Figura 5.51 Localização dos danos correspondentes ao modelo 3, cenário 15.

A Figura 5.49 mostra a localização dos danos do cenário 15 que é composto por elementos danificados entre os nós 829 e 830, 830 e 831, 831 e 832, 832 e 862, 862 e 863, 863 e 864. Na referida figura só é possível identificar apenas dois picos, o primeiro nó da primeira sequência de elementos, isto é, o nó 829, e o último nó da segunda sequência dos elementos danificados, o nó 864. Isto ocorre, pois o modelo foi discretizado em 1155 nós, o que dificulta a exibição de todos os nós nos gráficos. Desta forma, torna-se impossível a visualização clara de todos os picos nos nós dos elementos deteriorados.

A Figura 5.50 apresenta uma ampliação do segundo modo de vibração, indicado na Figura 5.49, em correspondência com os nós referentes aos elementos danificados.

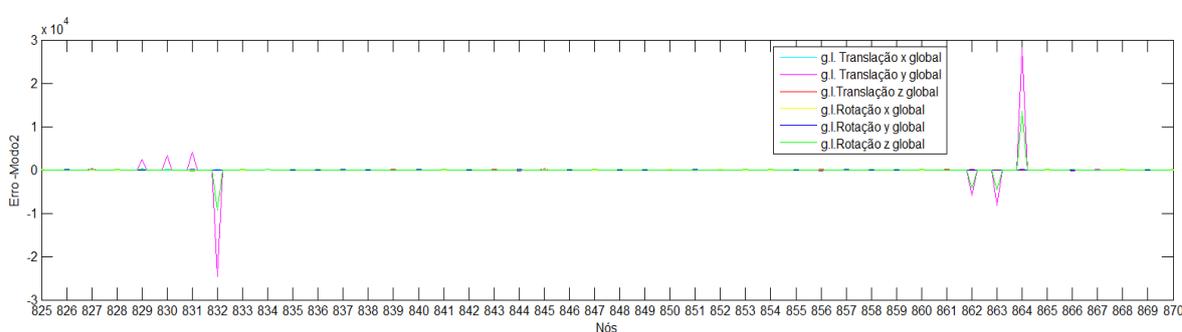


Figura 5.52 Localização dos danos do cenário 15 (modo de vibração 2) do modelo 3.

A partir do *zoom* na Figura 5.50, pode-se notar claramente a presença de picos nos nós referentes aos elementos danificados no cenário 15, isto é, os nós 829 e 830, 830 e 831, 831 e 832, 832 e 862, 862 e 863, 863 e 864, o que evidencia, mais uma vez, o bom funcionamento do MER.

5.1.4 - Modelo 4 (M4)

O modelo 4, mostrado na Figura 5.5, consiste em um pórtico espacial discretizadas em 1636 elementos de pórtico espacial, ou seja, com seis graus de liberdade por nó. (Figura 5.51) Os elementos intactos apresentam as seguintes características: comprimento (L) de 0,2m, seção transversal (A) (0,3m x 0,3m), momento de inércia em relação ao eixo x (I_x) de 0,00168m⁴, momento de inércia em relação ao eixo y (I_y) de 0,000675 m⁴, momento de inércia em relação ao eixo z (I_z) de 0,000675 m⁴, módulo de elasticidade longitudinal (E) de

$2,5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, módulo de elasticidade transversal de $9,68999 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ e coeficiente de Poisson de 0,2.

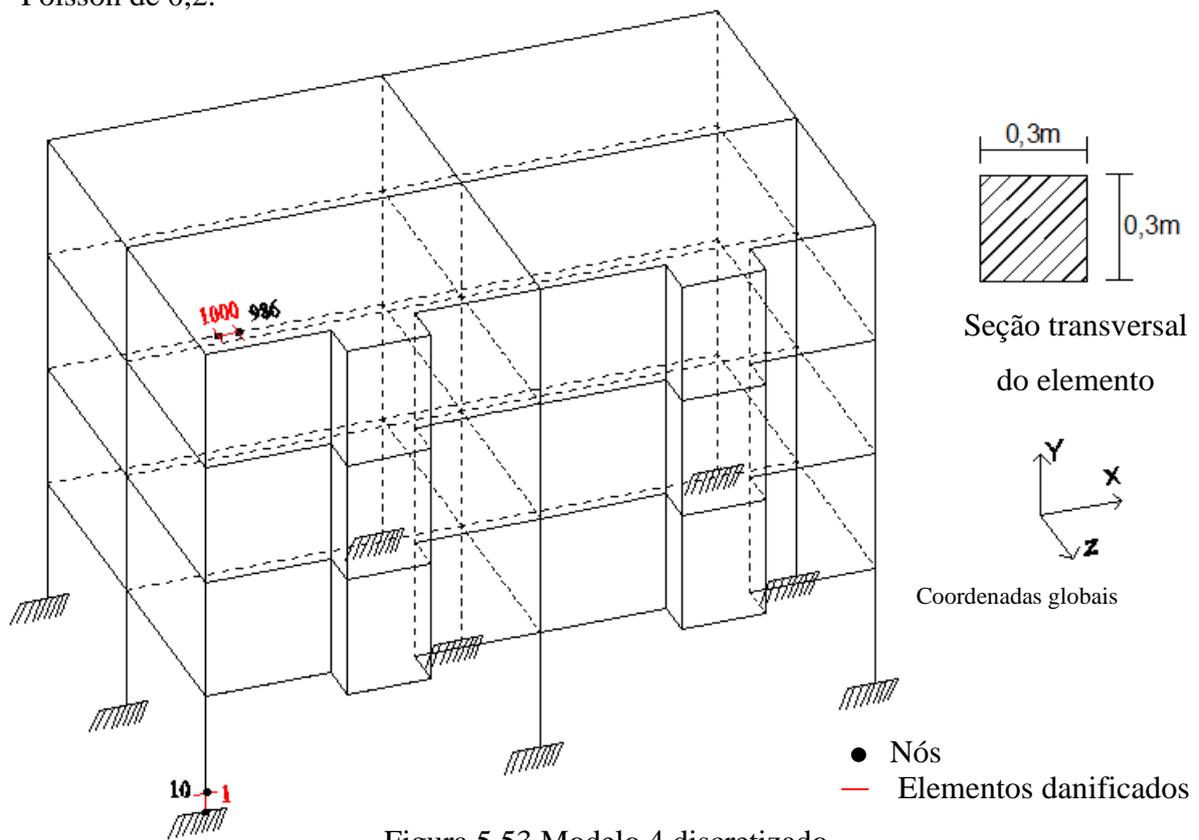


Figura 5.53 Modelo 4 discretizado.

Os danos foram simulados por meio de reduções na área da seção transversal dos elementos 1 e 1000 (Figura 5.51), delimitados pelos nós 1 e 10, 985 e 986, respectivamente. Essas reduções aconteceram nas proporções de 30 a 10%.

Inicialmente, foram obtidas as cinco primeiras frequências do pórtico intacto (Tabela 5.25), bem com seus respectivos modos de vibração (Figura 5.52). Posteriormente, foi adotado o mesmo procedimento para obtenção das características dinâmicas dos modelos danificados, os resultados estão detalhados em cada caso (cenários com danos individuais e em conjunto).

Tabela 5.25 Frequências do modelo 4 intacto.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)
1 ^a	1,6339
2 ^a	1,7776
3 ^a	2,3854
4 ^a	2,4894
5 ^a	2,5951

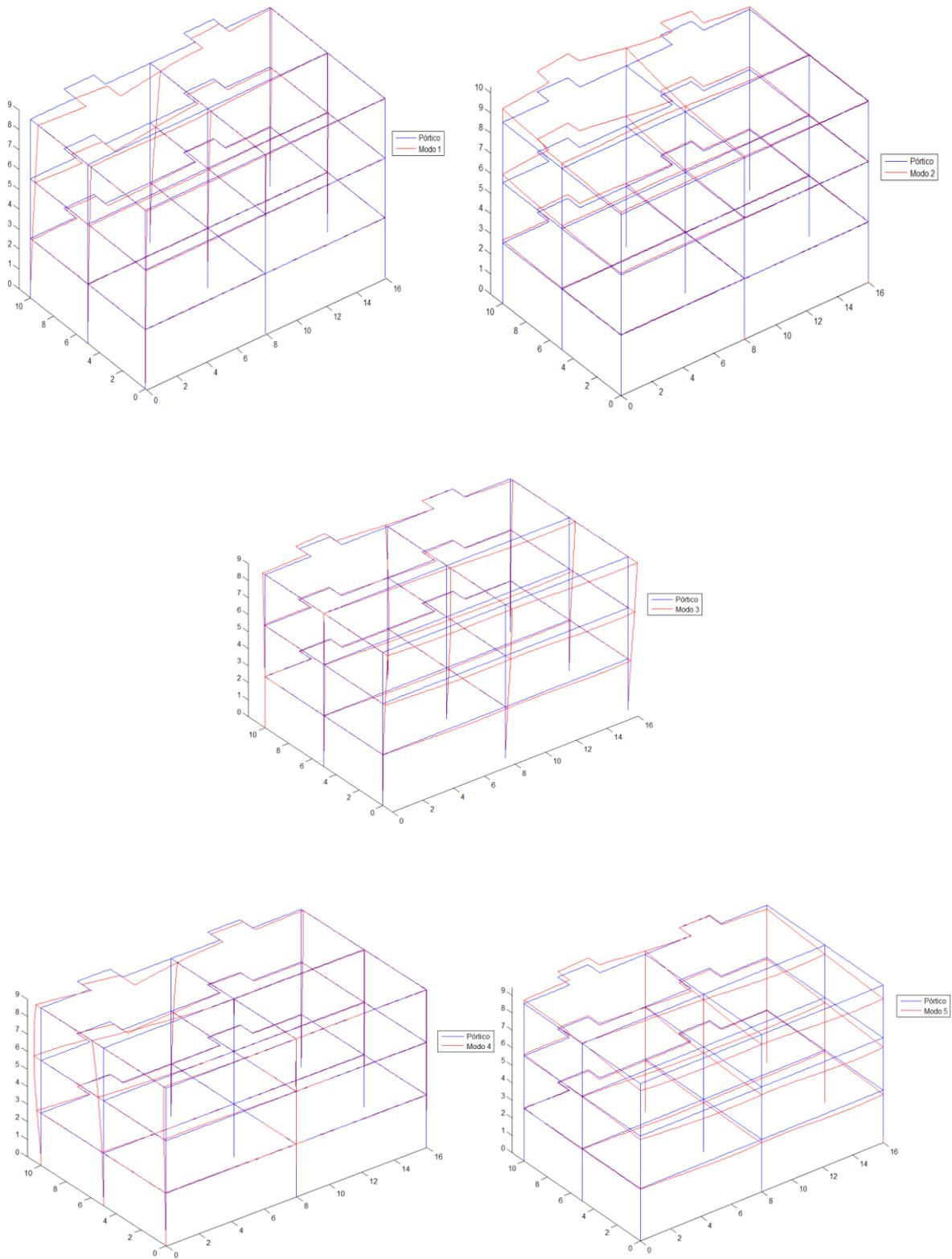


Figura 5.54 Modos de vibração do modelo 4.

5.1.4.1 Localização e quantificação de danos em elementos isolados

Neste caso foram simulados cenários com apenas um elemento danificado. Desta forma, foram consideradas 2 cenários com elementos danificados em diferentes proporções, como mostra a Tabela 5.26.

Tabela 5.26 Cenários 1 e 2 do modelo 4 – danos isolados.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
1	1	30
2	1000	10

Foram considerados dois cenários de danos representados por meio de uma redução na área da seção transversal de alguns elementos. No primeiro cenário o elemento 1, compreendido entre os nós 1 e 10 (ver indicação na Figura 5.53 (a)), sofreu uma redução de 30% na área de sua seção transversal, o que equivale a perdas de 54, 65 e 30% dos momentos de inércia em torno dos eixos x, y e z, respectivamente, com relação ao elemento intacto. Já no segundo cenário, foi considerada uma redução de 10% na área da seção transversal do elemento 1000, compreendido entre os nós 985 e 984 (Figura 5.53(b)), o que representa perdas de 20, 28 e 10% dos momentos de inércia.

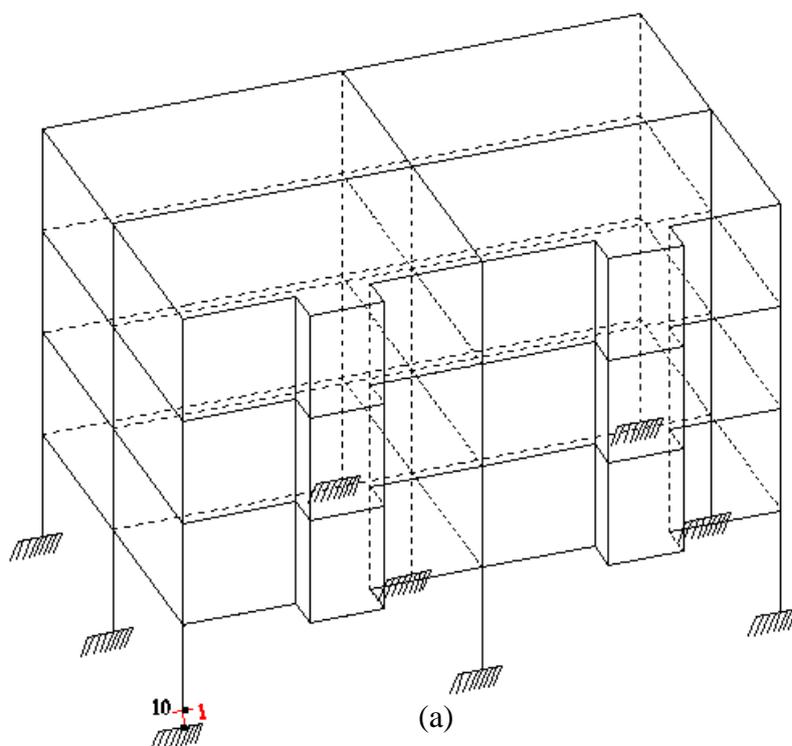


Figura 5.55 Cenários com danos individuais do modelo 4. (a) Cenário 1.

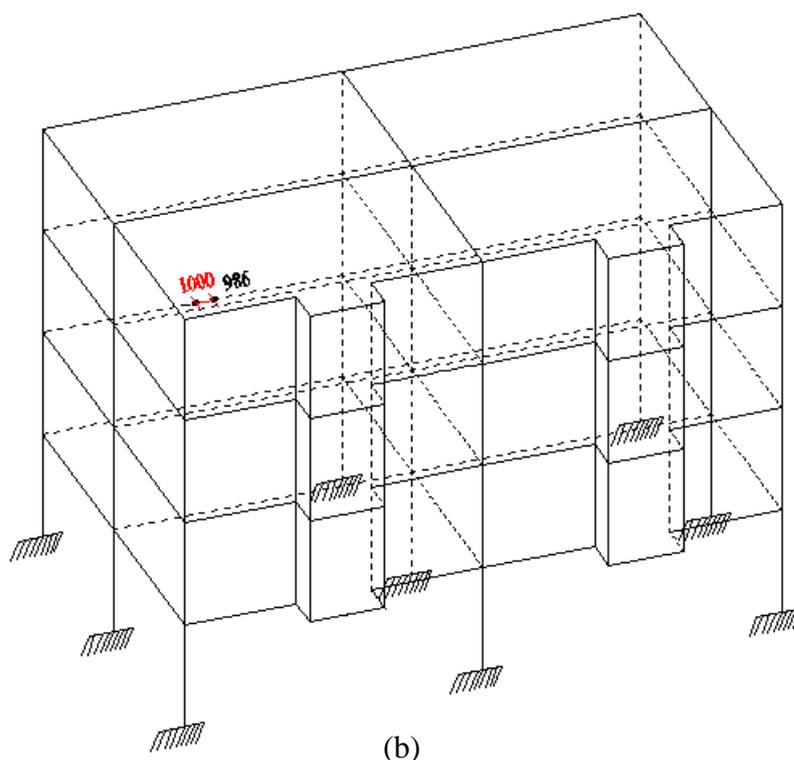


Figura 5.56 Cenários com danos individuais do modelo 4. (b) Cenário 2.

A partir dos cenários descritos acima, foram obtidas as cinco primeiras frequências dos pórticos, bem como seus respectivos modos de vibração. A Tabela 5.27 mostra as frequências dos modelos intacto e danificados, estes últimos, os cenários 1 e 2.

Do mesmo modo que no modelo 3, no item 5.1.3.1 referente à localização de danos isolados, os cenários 1 e 2 do modelo 4 não apresentaram variações significativas em suas frequências quando comparadas com as frequências do modelo intacto, uma vez que o modelo foi discretizado em muitos elementos (1636 elementos), o que indica que apenas um elemento danificado em todo o modelo não é capaz de causar consideráveis alterações nas frequências naturais.

Tabela 5.27 Frequências dos cenários 1 e 2 do modelo 4.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)	Cenário 1 (Hz)	Cenário 2 (Hz)
1 ^a	1,6339	1,6328	1,6340
2 ^a	1,7776	1,7773	1,7777
3 ^a	2,3854	2,3811	2,3853
4 ^a	2,4894	2,4856	2,4891
5 ^a	2,5952	2,594	2,5951

De posse das características dinâmicas dos modelos, foi aplicado o MER para encontrar as regiões danificadas representadas pelos elementos 1 e 1000.

As figuras 5.54 e 5.55 mostram a localização dos danos presentes no cenário 1, que contém um dano de 30% no elemento 1, este último delimitado pelos nós 1 e 10; e no cenário 2, com um dano de 10% no elemento 1000 (compreendido entre os nós 984 e 985).

A partir dos gráficos, pode-se notar, no caso do cenário 1, representado pela Figura 5.51, a presença de picos nos nós do elemento ao qual foi atribuído o dano de 30%, isto é, os nós 1 e 10.

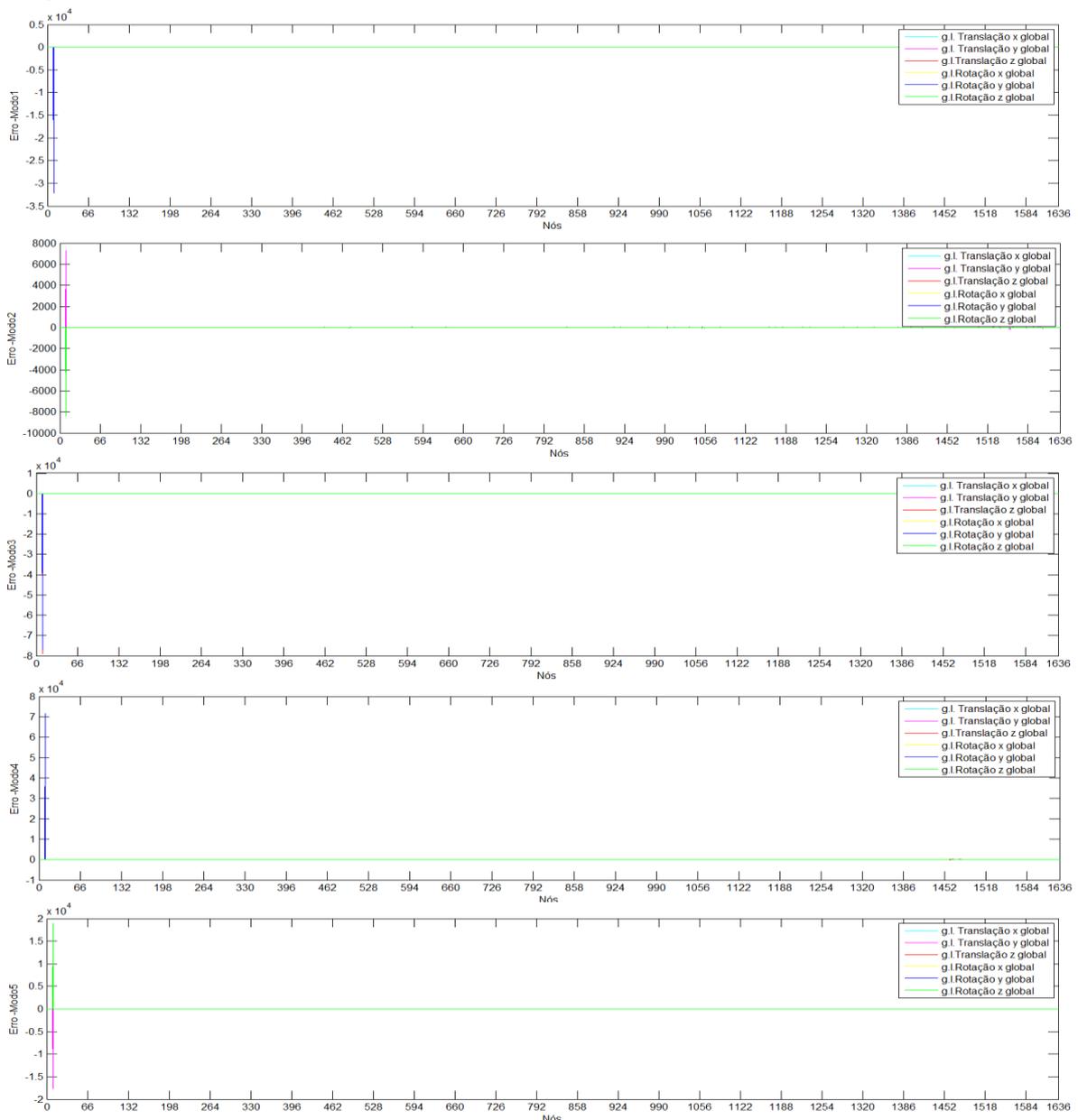


Figura 5.57 Localização do dano correspondente ao modelo 4, cenário 1 – 30% de redução na área do elemento 1.

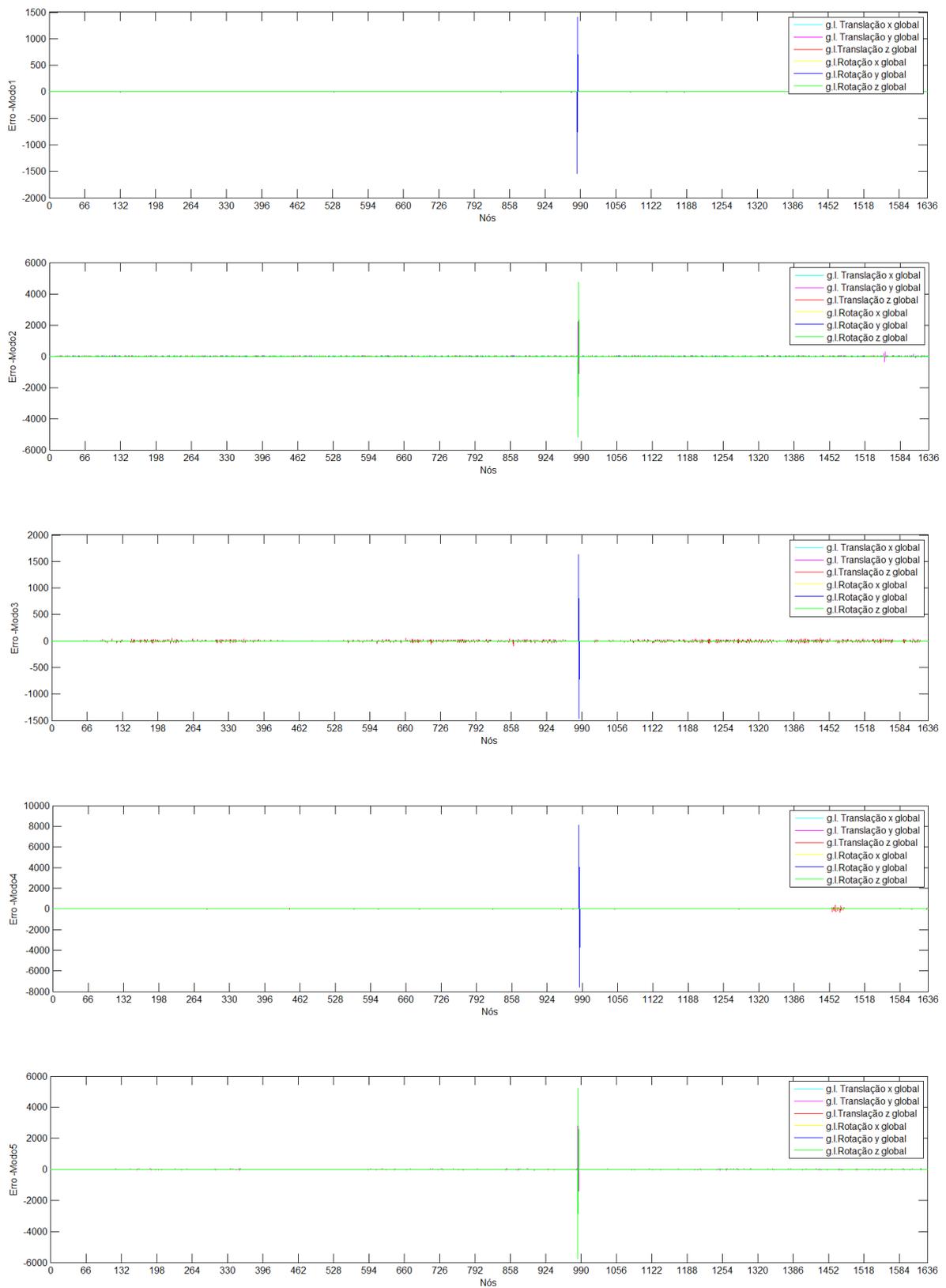


Figura 5.58 Localização do dano correspondente ao modelo 4, cenário 2 – 10% de redução na área do elemento 1000.

Da mesma forma dos casos anteriores, nos gráficos mostrados na Figura 5.55, que representam o cenário 2 (dano de 10% no elemento 1000), pode-se notar que o MER permitiu a localização da região danificada. Verifica-se, portanto, que os maiores valores da função erros encontram-se nos nós 984 e 985, que por sua vez delimitam o elemento deteriorado inicialmente, o elemento de número 1000.

Esses gráficos são provenientes da aplicação da equação do erro para os cinco primeiros modos de vibração e simbolizam, de forma normalizada, os maiores erros encontrados (Equação (3.10), Capítulo 3).

Assim como já foi comentado em relação ao modelo 3, por se tratar de um pórtico espacial grande, discretizado em muitos elementos, a etapa de quantificação foi realizada apenas utilizando a técnica de Redes Neurais Artificiais – RNAs. Desta forma, foi criada uma rede composta por três camadas (camadas de entrada, intermediária ou oculta e de saída – Figura 5.56).

A camada de entrada foi formada por cinco neurônios, e tem como dados de entrada erros representam o desequilíbrio na equação de movimento do modelo encontrados por meio do MER (Equação (3.10), Capítulo 3).

A camada intermediária foi composta por 9 neurônios (Figura 5.56), fato este explicado pela melhor performance da rede. A última camada, a camada de saída, contém apenas um neurônio, já que a resposta que a rede deve ser a quantificação do dano. Desta forma, todos os neurônios das primeira e segunda camadas se relacionam para processar apenas um resultado.

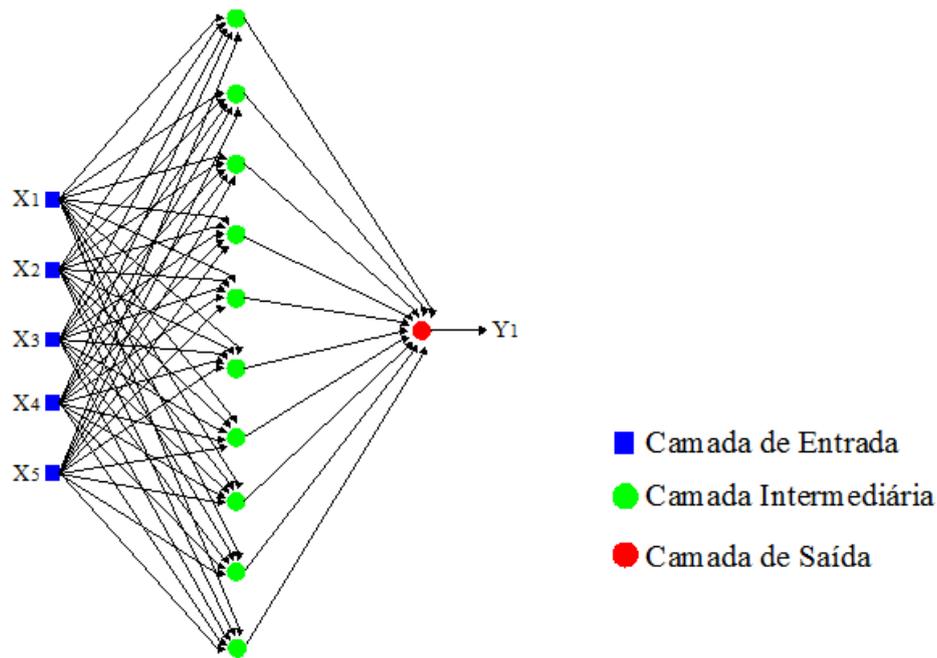


Figura 5.59 Rede Neural Artificial utilizada na quantificação de danos do modelo 4.

Da mesma forma dos modelos anteriores, neste caso também foram utilizadas as funções de transferências *tansig* e *satlins* entre as referidas camadas. (Figura 5.57)

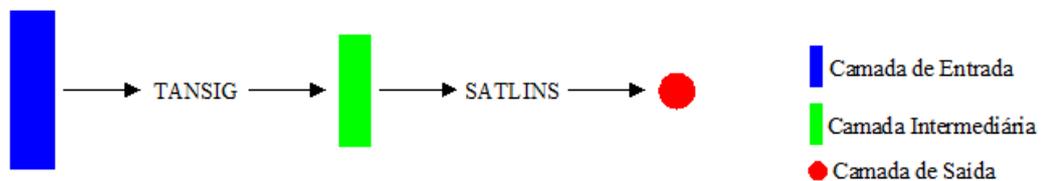


Figura 5.60 Esquema da RNA utilizada na quantificação de danos do modelo 4.

Foram criados diferentes cenários com danos com diferentes posições e severidades para as fases do treinamento e da validação. As tabelas 5.28 e 5.29 mostram os cenários utilizados para obtenção dos dados (erros obtidos através do Método do Erro Residual) usados nas referidas etapas, respectivamente.

Tabela 5.28 Cenários de danos utilizados no treinamento da rede do modelo 4.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
3	3	5
4	100	30
5	900	10
6	50	1
7	1663	25

Tabela 5.29 Cenários de danos utilizados na validação da rede do modelo 4.

Cenário	Elemento danificado	Dano (%) (Redução de área)
8	1600	20

Depois de fornecidos os dados de treinamento e validação, a rede foi executada e, após as referidas tarefas, obtiveram-se os erros durante as iterações do treinamento. O gráfico da Figura 5.58 mostra os erros, estes último com valores mínimos, mostrando, portanto, que a rede conseguiu estabelecer a relação existente entre os dados de entrada (erros do MER) e o dado de saída, a quantificação do dano.

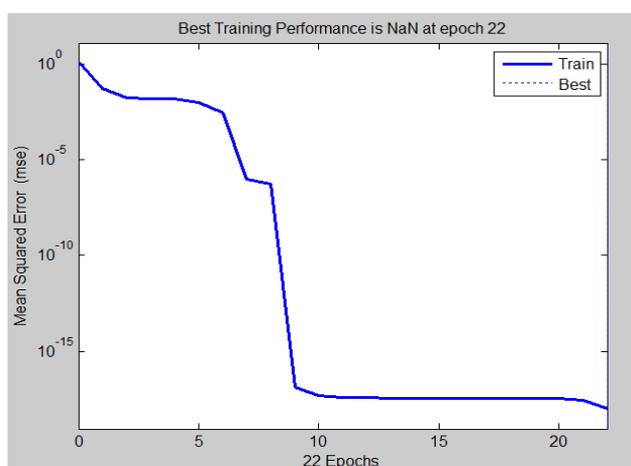


Figura 5.61 Erro no treinamento da rede do modelo 4.

Baseada no treinamento, na validação e com seus pesos ajustados, a rede passou para a etapa de generalização. Nesta etapa foram fornecidos à RNA os dados da localização dos danos dos cenários 1 (dano de 30% no elemento 1), 2 (dano de 10% no elemento 1000), dados estes obtidos através do MER.

Foram selecionados os cinco maiores valores dos erros utilizados na localização dos danos, e transmitidos à rede como dados de entrada. Esta última foi simulada utilizando os mesmos

valores dos pesos obtidos na fase treinamento, e forneceu como resultado a quantificação dos referidos danos (Figura 5.59).

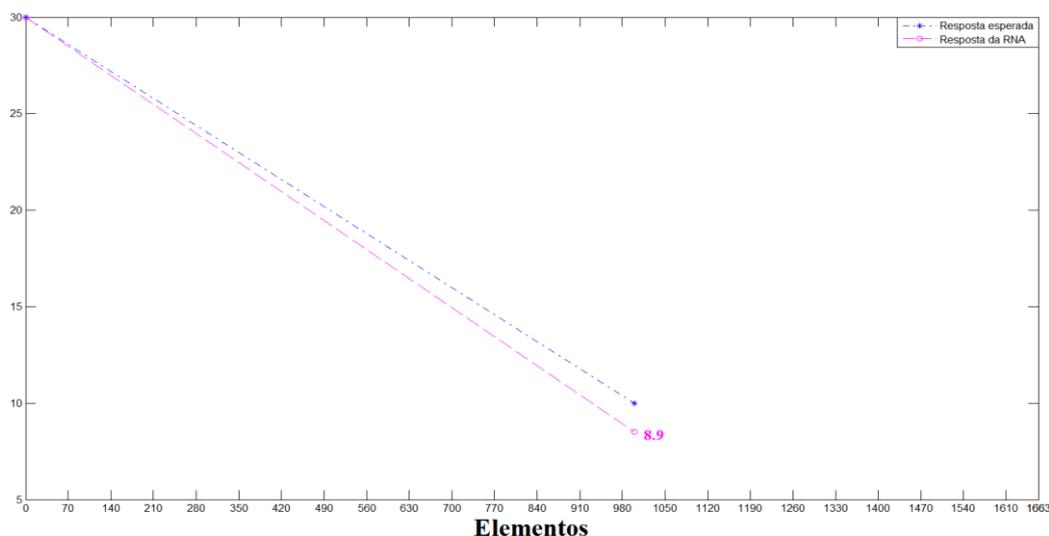


Figura 5.62 Quantificação de danos pela RNA do modelo 4.

A Figura 5.59 mostra o gráfico com a quantificação dos danos dos cenários 1 e 2. Pode-se notar a presença de dois pontos em destaque, estes representam o valor esperado do dano (em azul) e o resultado processado pela rede criada para o modelo 2 (na cor rosa).

O primeiro ponto representa o cenário 1, ou seja, o modelo 4 com um dano de 30% no elemento 1. Já o ponto 2, representa a quantificação do dano do cenário 2, este último com um dano de 10% no elemento 1000 do modelo 4.

Nota-se que RNA quantificou o dano do elemento 1 exatamente como o esperado, ou seja, a rede quantificou a severidade do dano no valor de 30%, valor este atribuído inicialmente na redução da área da seção transversal do referido elemento. Já no caso do cenário 2 (elemento 1000 com um dano de 10%), o resultado apresentado pela rede foi bem próximo do valor esperado, isto é, a RNA forneceu como resposta ao cenário 2 um dano de 8,9% no elemento 1000, neste caso esperado 10%.

5.1.4.2 Localização de vários elementos danificados no mesmo cenário

Nesta análise foi simulado um cenário (cenário 9) com dois elementos danificados em posições e proporções diferentes. Os danos foram representados por meio de uma redução na

área da seção transversal dos elementos 1 e 1000, os quais encontram-se delimitados pelos nós 1 e 10, 984 e 985, respectivamente. (Figura 5.60)

No elemento 1, o dano foi de 30%, o que representa perdas de 54, 65 e 30% nos momentos de inércia em torno dos eixos x, y e z, respectivamente. No caso do elemento 1000, o dano foi de 10% representando, portanto, reduções de 20, 28 e 10% nos momentos de inércia dos eixos citados acima.

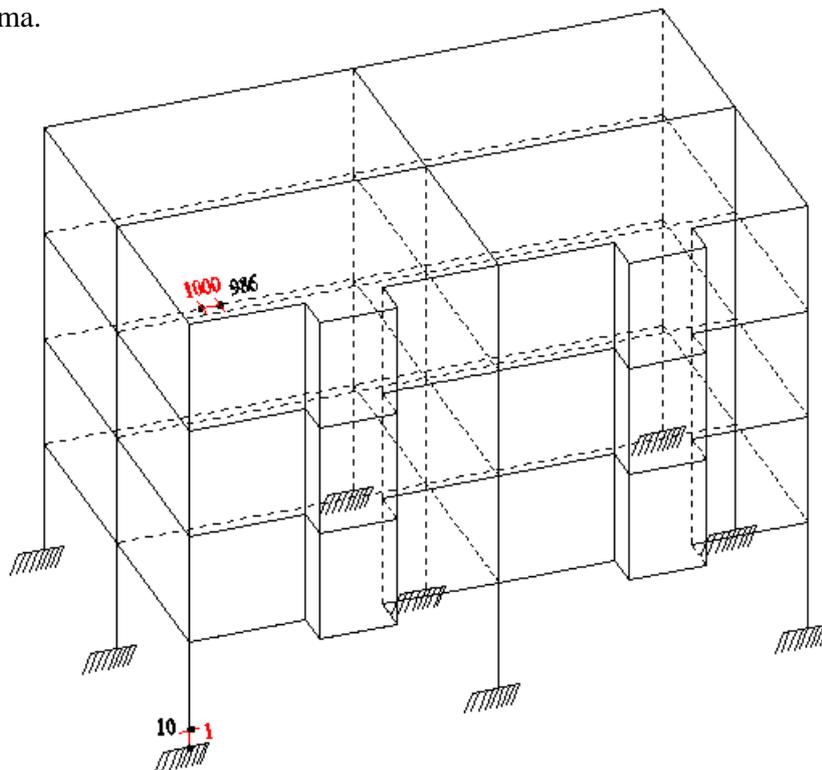


Figura 5.63 Cenário 9 do modelo 4.

Executando o mesmo procedimento dos casos anteriores, foram obtidas as cinco primeiras frequências dos pórticos, bem como seus respectivos modos de vibração. A Tabela 5.30 mostra as frequências dos modelos intacto e danificado (Cenário 9).

Tabela 5.30 Frequências de vibração do modelo 4 correspondentes ao cenário 13.

Frequências	Pórtico Intacto (Hz)	Cenário 13 (Hz)
1 ^a	1,6339	1,6329
2 ^a	1,7776	1,7774
3 ^a	2,3854	2,3811
4 ^a	2,4894	2,4852
5 ^a	2,5951	2,5939

Uma vez conhecidas as características dinâmicas dos modelos, foi aplicado o MER para encontrar os locais danificados, representados pelo elemento 1 (delimitado pelos nós 1 e 10) e pelo 1000, compreendidos pelos nós 984 e 985. A Figura 5.61 mostra a localização destes danos através de picos nos nós citados acima.

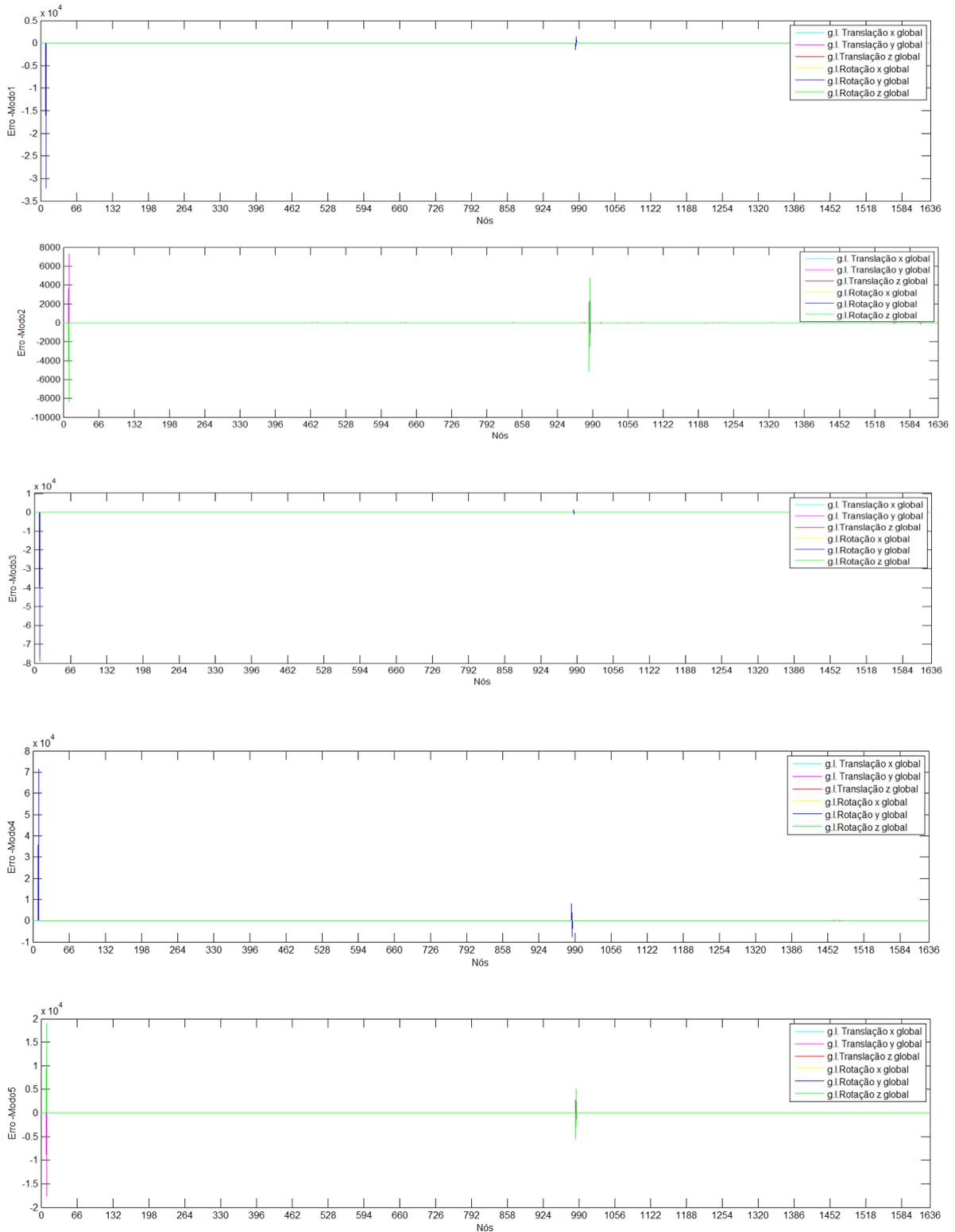


Figura 5.64 Localização dos danos correspondentes ao modelo 4, cenário 9.

A partir da Figura 5.61 pode-se notar presença de picos nos nós 10, 984 e 985. Da mesma forma que no caso do modelo 3, a visualização não permite identificar a numeração do nó, pois, por se tratar de um modelo discretizado em muitos elementos, a exibição dos nós só foi possível ser apresentada com grandes intervalos, neste caso, a cada 66 nós. Deste modo, os gráficos que representam o cenário 9 tornaram-se limitados quando à visualização dos picos nos nós que delimitam os elementos danificados.

Nos 4 modelos analisados foi utilizado MER na localização dos danos, o qual apresentou ótimos resultados, em todas as análises o método foi capaz de sinalizar os nós que delimitavam os elementos danificados. No caso da quantificação, foram utilizados o MER e as RNAs. No que se refere ao MER, este apresentou limitações no caso de modelos grandes, sendo aplicado nos modelos menores. Já as RNAs apresentaram bons resultados e, de certa forma, com grande rapidez, indicando que pode ser uma ferramenta importante para este tipo de estudo.

6 - CONCLUSÕES

A análise das características dinâmicas das estruturas é de grande importância no que diz respeito ao acompanhamento da saúde estrutural. Neste sentido, com base em estudos anteriores, buscou-se reformular para pórticos espaciais o Método do Erro Residual (MER), proposto por Genovese em 2000, que permite identificar, por meio do acompanhamento das alterações nas características dinâmicas, a perda da integridade estrutural. Além disso, aplicou-se a técnica das Redes Neurais Artificiais (RNAs) como ferramenta em uma das etapas do trabalho, na quantificação dos danos presentes nos elementos.

Assim, para verificação da eficiência dos métodos, foram estudados quatro modelos numéricos de pórtico espacial com diferentes configurações geométricas, bem como com diferentes cenários de danos.

6.1 - LOCALIZAÇÃO DE DANOS

A partir dos quatro modelos estudados, pôde-se observar que a presença de poucos elementos danificados ou de danos de baixa intensidade pouco afeta as propriedades dinâmicas quando comparadas com as propriedades do modelo intacto. No entanto, no caso de análises realizadas em pórticos de menores dimensões, como por exemplo os modelos 1 e 2, as variações entre as frequências dos modelos intacto e deteriorados apresentam valores ainda pequenos, podem indicar falhas no sistema estrutural desses modelos.

No que se refere à etapa de localização de danos por meio do MER, pode-se afirmar que nas análises feitas com elementos danificados em conjunto, em posições isoladas, com baixa ou alta porcentagem de dano, o método permitiu perfeita identificação de todos os nós que delimitavam os elementos danificados. Entretanto, no caso de uma sequência de elementos com a mesma redução de área (mesma porcentagem de dano), o MER só permite indicar o primeiro e o último nó que delimitam a sequência dos elementos deteriorados.

Com relação ao desempenho computacional do MER, verificou-se que nas análises realizadas em modelos pequenos, sua aplicação foi rápida e eficiente. Porém, no caso de pórticos com maiores dimensões, houve uma grande demanda de tempo e de memória para

o seu processamento, o que não o torna ineficiente, mas com maiores dificuldades para ser executado em computadores de uso cotidiano.

6.2 - QUANTIFICAÇÃO DE DANOS

Com base no comentário referente ao desempenho computacional do MER, a etapa de quantificação de danos por meio deste método foi aplicada apenas nos modelos 1 e 2. Assim, optou-se pela técnica das RNAs para complementar esta fase.

A aplicação do MER nos modelos 1 e 2 foi satisfatória, pois os resultados obtidos estiveram sempre dentro dos padrões estabelecidos pelo método, ou seja, as severidades dos danos sempre apontaram valores entre a redução de área e as reduções inerciais dos elementos deteriorados.

Sobre as RNAs, pode-se afirmar que em todas as análises esta técnica apresentou excelentes resultados, quantificou as severidades dos danos em valores muito próximos do esperado, uma vez que a rede, treinada com dados gerados a partir de elementos danificados por meio de redução na área da seção transversal, forneceu claramente valores de reduções de áreas de outros elementos.

Com relação aos modelos aos quais também foi aplicado o MER (modelos 1 e 2), percebeu-se que ambos os métodos apresentaram bom funcionamento. No entanto, os resultados obtidos pelas RNAs foram praticamente iguais aos valores de danos introduzidos inicialmente, fato este explicado pela forma de treinamento da RNA.

De modo geral, os dois métodos utilizados no trabalho forneceram bons resultados, porém as RNAs, na fase da quantificação dos danos, apresentaram mais agilidade em seu processamento, o que pode indicar um bom diferencial na sua aplicação em outros modelos.

É importante ressaltar que o trabalho foi desenvolvido numericamente, de modo que o MER processou apenas os erros relacionados às alterações produzidas pela presença de danos estruturais, fato este que, provavelmente, não ocorra na análise de uma estrutura real, que estará submetida a agentes externos que certamente influenciarão nos resultados da análise.

6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Otimizar o Método do Erro Residual para torná-lo mais rápido em seu processamento, sobretudo quando aplicado em grandes modelos estruturais.
- Utilizar as Redes Neurais Artificiais para localização e quantificação de danos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J. e Stone B. J. (1978). A vibration technique for nondestructively assessing the integrity of structures”, *Journal of Mechanical Engineering, Science*, 20(2), 93-100.

Allemang, R. J. e Brown, D. L (1982). “A correlation coefficient for modal vector analysis”, *Proc. 1st Int. Modal Analysis Conference*, 1, 110-116.

Beskyroun, S., Oshim, T., Mikami, S., Tsubota, Y., Takeda, T (2006). “Damage identification of steel structures based on changes in the curvature of power spectral density”. *2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Shenzhen, PEOPLES R CHINA, 16 Nov 2005 - 18 Nov 2005. Editors: Ou JP, Li H, Duan ZD. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Vols 1 and 2. TAYLOR & FRANCIS LTD. 791-797.

Brasiliano Silva, Andrea (2001). “*Caracterização de Danos em Estruturas Aperticadas*”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 109p.

Brasiliano, A., Doz, G. N. and Brito, J. L. V., (2004). Damage Identification in continuous beams and frame structures using the Residual Error Method in the Movement Equation. *Nuclear Engineering and Design*, 227(1), 1-17.

Chen, H. L., Spyrakos, C. C. e Venkatesh, G. (1995). Evaluating structural deterioration by dynamic response, *Journal of Structural Engineering*, 121(8), 1197-1203.

Clough, R. W. e Penzien, J. (1993). *Dynamics of structures*, McGraw-Hill, Second Edition, New York.

Curadelli, O. R., Riera, J. D., Ambrosini, D., Amani, M. G (2008). “Damage detection by means of structural damping identification”, *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 3497 – 3505.

Curadelli, O., Ambrosini, D (2011). “Damage detection in elevated spherical containers partially filled with liquid”. *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 2708 - 2715.

Elkordy, M. F., Chang, K. C., Lee, G. C. (1993). “Neural Networks Trained by Analytically Simulated Damage States.” *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 7(2), 130–145.

Fang, X., Luo, H., Tang, J. (2005). “Structural Damage Detection Using Neural Network with Learning Rate Improvement.” *Computers and Structures*, 83 21-50.

Genovese, M. (2000). *Localização e quantificação de danos em estruturas por meio de suas características dinâmicas*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 120p.

Genovese, M., Brito, J. L., e Doz, G., (2002). “Identificação de Danos por meio das suas Características Dinâmicas mediante a atualização de um Método híbrido entre o Método do Erro e a técnica de Redes Neurais Artificiais”. In *XXX Jornadas Sul-Americanas de Eng. Estrutural*. Brasília-DF, Brasil. UnB.

Genovese, M. (2005). *Avaliação Estrutural: Influência do Ruído nos Métodos de Detecção de Danos Baseados na Análise das Propriedades Dinâmicas*, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Gere e Weaver (1987). *Análise de estruturas reticuladas*, Guanabara, Rio de Janeiro, Brasil.

Gomes, H. M. (2004). “Redes Neurais Artificiais para Detecção de Danos”. *Mecânica Computacional Vol. XXIII*, Bariloche, Argentina, November.

Hearn, G., Testa, R. B. (1991). Modal Analysis for Damage Detection in Structure, *Journal of Structural Engineering*, Vol 117, No. 10, pp.3042-3063.

Hsieh, K. H., Halling, M. W., Barr, P. J. and Robinson, M. J. (2008). "Structural Damage Detection Using Dynamic Properties Determined from Laboratory and Field Testing". *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 22, No. 4, pp. 238 - 244.

Kunert H., Ambrosini, D. (2007). "Determinación de la distribución del daño en vigas Mediante el cambio en sus frecuencias naturales". *Mecánica Computacional*, Vol. XXI, pp.2623 - 2645.

Lieven, N. A. J. e Ewins, D. J. (1988). "Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC)", *Proc. 6th Int. Modal Analysis Conference*, 1, 690-695.

Ma Ge., Lui, E. M. (2005). "Structural Damage Identification using System Dynamic Properties". *Computers and Structures*, vol. 83, pp. 2185 - 2196.

McCulloch W. and Pitts W., (1943). A Logical Calculus of the Ideas Immanente in Nervous Activity. In *Bulletin of Mathemátical Biophysics*, pp. 115-133.

MATLAB. Matrix Laboratory - R2009b. MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing. Massachusetts, U.S.A, 2009.

Mehrjoo, M., Khaji, N., Moharrami, H., Bahreininejad. (2008) A. "Damage detection of truss bridge joints using Artificial Neural Networks", *Expert System with Applications*, Vol. 35, pp. 1122 - 1135.

Pádua, B. A., Ludemir, T. B., Ponce de Leon, A. F. C (2000). *Redes Neurais Artificiais Teoria e Aplicações*, LTC, Rio de Janeiro.

Pandey, A. K., Biswas, M. e Samman, M. M. (1991) "Damage detection from changes in curvature mode shapes", *Journal of Sound and Vibration*, 145(2), 321-332.

Przemieniecki, J. S. (1968). Theory of matrix structural analysis, McGraw-Hill, New York.

Rosenblatt, F., (1958). "The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain". *Psychology Review*, vol. 65, pp.386-408.

X. Wu, G. Ghaboussi and J. H. Garret. (1992). "Use of Neural network for Damage detection in structures". *Computers and Structures*, Vol.42, No. 4 pp. 649-659, 1992.

Zou, Y., Tong, L., G.O., (2000). "Vibration-Based Model-Dependent Damage (Delamination) Identification and Health Monitoring for Composite Structures – A Review." *Journal of Sound and Vibration*, vol. 230, n. 2, pp. 357-378.