



MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2

**CARACTERIZAÇÃO DE DANOS EM
ESTRUTURAS TRIDIMENSIONAIS ATRAVÉS DO
MÉTODO DO ERRO RESIDUAL**

**AMANDA ARAÚJO DA SILVA
FERNANDO MARTINS RIBEIRO FILHO**

Brasília, 18 de junho de 2018

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

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

**CARACTERIZAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS
TRIDIMENSIONAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DO
ERRO RESIDUAL**

**AMANDA ARAÚJO DA SILVA
FERNANDO MARTINS RIBEIRO FILHO**

**ORIENTADORA: PROF^a. GRACIELA NORA DOZ DE
CARVALHO**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2

BRASÍLIA – DF, 18 DE JUNHO DE 2018

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

**CARACTERIZAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS
TRIDIMENSIONAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DO
ERRO RESIDUAL**

AMANDA ARAÚJO DA SILVA
FERNANDO MARTINS RIBEIRO FILHO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 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 BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof.^a Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr. Ing. (ENC - UnB)
(Orientadora)

Prof. Artur Antônio de Almeida Portela, Ph.D. (ENC - UnB)
(Examinador Interno)

Prof.^a Marília Marcy Cabral de Araújo, DSc (UniCEUB)
(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 18 DE JUNHO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, AMANDA ARAÚJO

Caracterização De Danos Em Estruturas Tridimensionais Através Do Método Do Erro Residual / Amanda Araújo da Silva, Fernando Martins Ribeiro Filho – Distrito Federal, 2018.

xii, 55 p., 210 x 279 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Método do Erro Residual

3. Características Dinâmicas

2. Modos de Vibração

4. Identificação de Dano

I ENC/FT/UnB

II Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, A. A., RIBEIRO FILHO, F. M. (2018). Caracterização De Danos Em Estruturas Tridimensionais Através Do Método Do Erro Residual. Monografia de Projeto Final 2 em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 55 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Amanda Araújo da Silva e Fernando Martins Ribeiro Filho

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Caracterização de danos em estruturas tridimensionais através do método do erro residual.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

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

Amanda Araújo da Silva
SQN 113 BL F APTO 506
CEP: 70763-060 Brasília-DF, Brasil
amanda.96@gmail.com

Fernando Martins Ribeiro Filho
SGAN 911 COND. GREEN PARK BL J APTO 112
CEP 70790-110 Brasília-DF, Brasil
fernandofilho337@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Presto aqui meus agradecimentos a todos os que me auxiliaram no decorrer do curso.

Agradeço aos meus pais e familiares, pelos conselhos, apoio e incentivo, sempre garantindo que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Agradeço a minha orientadora Graciela N. Doz pelo apoio e ensinamentos.

Por fim, agradeço aos meus amigos pela paciência e companheirismo ao longo do curso, tornando a graduação uma ótima experiência.

Amanda Araújo da Silva

Aqui agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram para o desenvolvimento desse projeto. Em especial, agradeço a minha orientadora, Graciela N. Doz, pela paciência e dedicação durante o semestre; aos meus professores, por todo apoio prestado durante minha graduação; aos meus familiares, amigos e namorada, por terem tornado essa trajetória mais leve e prazerosa e que agora a veem realizada nesse Projeto Final.

Fernando Martins Ribeiro Filho

RESUMO

As estruturas tendem a sofrer o processo de deterioração no decorrer de sua vida útil, o que pode ocorrer devido a falhas na fase de concepção e de execução da estrutura, fenômenos naturais (terremotos, ventos, etc.), sobrecargas decorrentes do uso, fadiga, corrosão, etc. A deterioração pode levar a problemas como flechas /ou vibrações excessivas, fissuração e, dependendo de sua gravidade, até mesmo ao colapso estrutural. Visando permitir um controle da integridade estrutural de modo não destrutivo, foram desenvolvidos diferentes métodos baseados na alteração das características dinâmicas da estrutura quando há presença de danos na mesma. Dentre esses métodos, destaca-se o Método do Erro Residual (MER), desenvolvido por Genovese (2000), que já foi demonstrado ser eficiente na caracterização de dano em vigas simples bi-apoiadas, vigas contínuas, pórticos planos e pórticos espaciais. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo expandir o MER de forma a aplicá-lo em estruturas tridimensionais mais complexas, em específico em uma rampa em curva localizada no Instituto Central de Ciências (ICC) do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Os resultados obtidos por meio de simulações numéricas demonstraram a eficiência do método tanto na localização quanto na quantificação do dano para os cenários estudados.

Palavras-chave: Método do Erro Residual, Modos de Vibração, Características Dinâmicas, Identificação de Dano.

ABSTRACT

Over time, structures are submitted to deterioration processes due to many factors, such as errors in the design or during the execution of the structure, natural phenomena (earthquakes, wind, etc.), overloads, fatigue, corrosion, etc. The deterioration process can lead to problems such as excessive deflections and/or vibrations, cracking and can even lead to the collapse of the structure. Many methods based on the variation of the dynamic characteristics of the structure due to the occurrence of damage were developed in order to control and analyze the construction integrity. Among these methods, the Residual Error Method (REM), proposed by Genovese (2000), has been proved efficient when applied to simply supported and continues beams and to two-dimensional and three-dimensional frames. This way, the present work expanded the REM in order to apply it in more complex three-dimensional structures, more specifically a curved ramp localized at the Instituto de Ciências Centrais (ICC) at the Darcy Ribeiro Campus of the Universidade de Brasília. The results, obtained through numerical analyses, showed that the method was efficient at localizing and quantifying the damage for the analyzed scenarios.

Keywords: Residual Error Method, Vibration Modes, Dynamic Characteristics, Damage.

Lista de Figuras

Figura 1 - Pórtico de três andares do tipo shear building e seus modos de vibração (Fonte: Clough e	8
Figura 2 - Elemento isoparamétrico do tipo hexaedro de 20 nós	11
Figura 3 - Esquema da utilização das ferramentas computacionais para aplicação do MER ..	14
Figura 4 - Esquema da etapa de quantificação para o caso de múltiplas intensidades de dano simultâneas	15
Figura 5 – Estrutura escolhida para análise: rampa do ICC da UnB (Fonte: https://bit.ly/2IPJl11)	16
Figura 6 - Vista lateral da rampa (dimensões em metros)	16
Figura 7 - Planta baixa da rampa (dimensões em metros)	17
Figura 8 – Rampa de concreto em curva modelada (a) sem a malha (b) com a malha	18
Figura 9 - Condições de apoio (a) apoio inferior, face em contato com o chão engastada (b) apoio superior, face em contato com a laje engastada	18
Figura 10 - 1º modo de vibração.....	19
Figura 11 - 2º modo de vibração.....	19
Figura 12 - 3º modo de vibração.....	19
Figura 13 - 4º modo de vibração.....	20
Figura 14 - 5º modo de vibração.....	20
Figura 15 - Gráficos de aceleração obtidos através do aplicativo VibSensor	21
Figura 16 - Elementos danificados, cenário 1	24
Figura 17 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 1	25
Figura 18 – Localização dos elementos danificados, cenário 1	26
Figura 19 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 1	26
Figura 20 – Quantificação do dano, cenário 1 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%	27
Figura 21 – Nós identificados como danificados, cenário 1	28
Figura 22 - Elementos danificados, cenário 2	28
Figura 23 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 2	29
Figura 24 – Localização dos elementos danificados, cenário 2	30
Figura 25 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 2	30
Figura 26 – Quantificação do dano, cenário 2 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%	31
Figura 27 – Nós identificados como danificados, cenário 2	32
Figura 28 - Elementos danificados, cenário 3	32
Figura 29 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 3	33
Figura 30 – Localização dos elementos danificados, cenário 3	34
Figura 31 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 3	34
Figura 32 – Quantificação do dano, cenário 3 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%	35
Figura 33 – Nós identificados como danificados, cenário 3	36
Figura 34 - Elementos danificados, cenário 4	36
Figura 35 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 4	37
Figura 36 – Localização dos elementos danificados, cenário 4	38
Figura 37 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 4	38
Figura 38 – Quantificação do dano, cenário 4 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%	39
Figura 39 – Nós identificados como danificados, cenário 4	40

Figura 40 - Elementos danificados, cenário 5	40
Figura 41 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 5	41
Figura 42 – Localização dos elementos danificados, cenário 5	42
Figura 43 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 5	42
Figura 44 – Quantificação do dano, cenário 5 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%	43
Figura 45 – Nós identificados como danificados, cenário 5	44
Figura 46 - Elementos danificados, cenário 6	44
Figura 47 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 6	45
Figura 48 – Localização dos elementos danificados, cenário 6	45
Figura 49 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 6	46
Figura 50 – Quantificação do dano, elemento 161, 1ª tentativa, cenário 6	46
Figura 51 – Quantificação do dano, elemento 162, 1ª tentativa, cenário 6	46
Figura 52 – Quantificação do dano, elemento 163, 1ª tentativa, cenário 6	47
Figura 53 – Quantificação do dano, elemento 164, 1ª tentativa, cenário 6	47
Figura 54 – Quantificação do dano, elemento 165, 1ª tentativa, cenário 6	47
Figura 55 – Quantificação do dano, elemento 166, 1ª tentativa, cenário 6	48
Figura 56 – Quantificação do dano, elemento 167, 1ª tentativa, cenário 6	48
Figura 57 – Quantificação do dano, elemento 168, 1ª tentativa, cenário 6	48
Figura 58 – Quantificação do dano, elemento 169, 1ª tentativa, cenário 6	49
Figura 59 – Quantificação do dano, elemento 170, 1ª tentativa, cenário 6	49
Figura 60 – Quantificação do dano, elemento 163, 2ª tentativa, cenário 6	49
Figura 61 – Quantificação do dano, elemento 164, 2ª tentativa, cenário 6	50
Figura 62 – Quantificação do dano, elemento 165, 2ª tentativa, cenário 6	50
Figura 63 – Quantificação do dano, elemento 166, 2ª tentativa, cenário 6	50
Figura 64 – Quantificação do dano, elemento 167, 2ª tentativa, cenário 6	51
Figura 65 – Quantificação do dano, elemento 168, 2ª tentativa, cenário 6	51
Figura 66 – Quantificação do dano, elemento 165, 3ª tentativa, cenário 6	51
Figura 67 – Quantificação do dano, elemento 166, 3ª tentativa, cenário 6	52
Figura 68 – Fator p obtido para cada elemento danificado	52
Figura 69 – Nós identificados como danificados, cenário 6	53

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Frequências naturais da estrutura intacta.....	20
Tabela 2 - Descrição dos cenários de dano analisados	22
Tabela 3 - Descrição dos cenários de dano analisados (continuação)	23
Tabela 4 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 1	24
Tabela 5 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 2	28
Tabela 6 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 3	32
Tabela 7 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 4	36
Tabela 8 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 5	40
Tabela 9 - Frequências naturais da estrutura danificada: cenário 6.....	45

Lista de Símbolos

ω – frequência angular natural de vibração

\mathbf{M} – matriz de massa

\mathbf{K} – matriz de rigidez

\mathbf{C} – matriz de amortecimento

t – tempo

$\vec{y}(t)$ – vetor de deslocamentos

$\vec{F}(t)$ – vetor de forças externas atuantes no corpo

θ – ângulo de fase

\hat{y} – vetor coluna, correspondente a um modo de vibração

Φ – matriz cujas colunas representam os modos de vibração da estrutura

Λ – matriz diagonal cujos valores são os valores de ω

p – fator de minimização do erro no Método do Erro Residual

$E(p)$ – erro da equação do movimento da estrutura danificada em função do fator p

\mathbf{K}_{EI} – matriz de rigidez dos elementos não danificados

\mathbf{K}_{ED} – matriz de rigidez dos elementos danificados

ν – coeficiente de Poisson

d – densidade do material

E – módulo de elasticidade

E' – somatório dos erros dos cinco primeiros modos de vibração

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO	2
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
3.1	OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA ESTRUTURA.....	7
3.2	MÉTODO DO ERRO RESIDUAL (MER)	8
4.	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	11
5.	ANÁLISE NUMÉRICA.....	16
5.1	ESTRUTURA ANALISADA E MODELAGEM NUMÉRICA	16
5.2	ANÁLISE MODAL.....	19
5.3	AVALIAÇÃO DE DANOS	22
5.3.1	Cenário 1.....	23
5.3.2	Cenário 2.....	28
5.3.3	Cenário 3.....	32
5.3.4	Cenário 4.....	36
5.3.5	Cenário 5.....	40
5.3.6	Cenário 6.....	44
6.	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

No decorrer de sua vida útil, a estrutura tende a sofrer o processo de deterioração, seja devido a falhas na fase de concepção e de execução da estrutura, fenômenos naturais (terremotos, ventos, etc.), sobrecargas decorrentes do uso, fadiga, corrosão, etc. Esse processo pode levar à ocorrência de problemas como flechas e/ou vibrações excessivas, fissuração e, dependendo de sua gravidade, até mesmo ao colapso estrutural. Dessa forma, é ideal que as condições globais da estrutura sejam avaliadas, de forma que eventuais danos em elementos estruturais sejam localizados e quantificados previamente.

Os danos estruturais costumam ocorrer de forma localizada, podendo ser caracterizados pela perda local de rigidez. Esta diminuição pode ocorrer devido à redução da massa da estrutura e por reduções na seção transversal do elemento, além de poderem ser resultado de alterações nas propriedades do material, quando a estrutura está exposta à presença de agentes químicos. Na maioria dos casos, entretanto, o dano resultante da perda de massa é desprezível (Hearn e Testa, 1991 *apud* Marcy, 2013).

A detecção de danos pode ser realizada de forma visual ou por meio de métodos não destrutivos, de forma a não implicar nenhum dano adicional à estrutura. A avaliação visual apresenta como principal limitação a impossibilidade de detecção de danos no interior da estrutura, além de requerer profissionais altamente especializados.

Assim, podem ser utilizados os métodos não destrutivos, dentre os quais podem-se citar o uso de raios-X, ultrassom e ressonância magnética. Estas técnicas, entretanto, são de alto custo, requerem uma quantidade considerável de tempo e permitem a análise de apenas uma pequena parte da estrutura, de modo que é necessário possuir uma ideia prévia da localização do dano.

Visando obter meios mais rápidos e baratos e que permitissem a análise global da estrutura, foram desenvolvidos métodos baseados na análise das características dinâmicas da estrutura (frequências naturais, modos de vibração e razão de amortecimento), como os desenvolvidos por Adams *et al.* (1978), Allemang e Brown (1982), Lieven e Ewins (1988), Pandey *et al.* (1991), Genovese (2000), dentre outros. Estes métodos baseiam-se no fato de que a ocorrência do dano resulta em perda de rigidez que, por sua vez, produz variações nas características dinâmicas da estrutura.

Vale ressaltar que cada método apresenta suas limitações com relação ao tipo de estrutura ao qual pode ser aplicado. Assim, torna-se necessário a análise do melhor método a ser aplicado em cada caso, bem como buscar sempre aprimorar os métodos.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo estudar a aplicabilidade do Método do Erro Residual (Genovese, 2000) para estruturas tridimensionais mais complexas do que os pórticos analisados por Marcy (2013), mais especificamente uma rampa em curva localizada no Instituto de Ciências Centrais (ICC) do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em seis capítulos. Neste primeiro capítulo, foi apresentada uma breve introdução ao assunto a ser abordado no trabalho, bem como seus objetivos.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica, na qual são comentados diferentes trabalhos relevantes para a área de identificação e quantificação de danos.

No terceiro capítulo, é apresentada a fundamentação teórica do trabalho. Nesse capítulo, serão apresentados os equacionamentos do movimento dinâmico e do Método do Erro Residual (Genovese, 2000).

No quarto capítulo, são explicitadas as ferramentas computacionais utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

O quinto capítulo consiste na apresentação e na análise dos resultados das simulações numéricas dos diferentes cenários escolhidos para estudo.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho.

Ao final do trabalho, são apresentadas as referências utilizadas para o desenvolvimento dos estudos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo do tempo, diversos métodos de identificação de danos estruturais foram desenvolvidos e aprimorados a partir do princípio de que danos geram variações nas características dinâmicas (frequências e modos de vibração) da estrutura.

Adams *et al* (1978 *apud* Brasiliano, 2001 e Marcy, 2013) desenvolveram um dos primeiros trabalhos no qual as características dinâmicas foram utilizadas para a identificação de dano. Foram ensaiados diferentes tipos de peças uniaxiais, as quais foram submetidas a excitações. Os resultados permitiram demonstrar que a medição da vibração em apenas um ponto da estrutura, associada ao modelo teórico, são um método eficaz para a indicar tanto a localização quanto a magnitude do dano.

Allemang e Brown (1982 *apud* Cardoso, 2005) propuseram o índice MAC (*Modal Assurance Criterion*). Este índice é um índice global, que permite a análise global das diferenças entre os modos de vibração da estrutura intacta e danificada. Os valores do índice variam entre 0 (total ortogonalidade entre os modos) e 1 (total concordância entre os modos). Por sua vez, Lieven e Ewins (1988 *apud* Cardoso, 2005) desenvolveram o índice COMAC (*Coordinate Modal Assurance Criterion*), o qual também se baseia na diferença dos modos de vibração. A diferença entre este índice e o índice MAC é que o índice COMAC permite uma análise ponto a ponto do modo de vibração, sendo então um índice local. O intervalo de valores do índice COMAC bem como seus significados são os mesmos do índice MAC.

Pandey *et al* (1991 *apud* Brasiliano, 2001 e Marcy, 2013) propuseram um método de identificação e localização de dano baseado na alteração das curvaturas dos modos de vibração como resultado da ocorrência do dano. O método foi testado em vigas engastadas e em vigas simplesmente apoiadas (ambas estruturas no qual o momento fletor é o esforço predominante). Os resultados mostraram que as maiores mudanças de curvatura se concentram no local onde ocorreu o dano, de forma que o método pode ser utilizado para a localização do dano.

Hearn e Testa (1991 *apud* Brasiliano, 2001 e Marcy, 2013) desenvolveram um método de localização de dano com base nas variações de frequências naturais decorrentes de uma perturbação na equação de equilíbrio dinâmico do sistema. O método foi testado por meio de ensaios em laboratório realizados em um pórtico com quatro componentes de aço sob o efeito de fadiga. Os resultados permitiram a localização correta do dano. No trabalho, discutiu-se

ainda o fato de que os valores de amortecimento também apresentam variações com o dano, de forma que o amortecimento poderia ser utilizado para o monitoramento estrutural.

Ferrufino (1993 *apud* Brasiliano, 2001) propôs um método de localização e quantificação do dano baseado nos critérios de análise propostos por Hearn e Testa (1991). O método foi testado em uma viga biapoiada e a um pórtico, modelado como pórtico plano com três componentes. As frequências e modos de vibração, tanto da estrutura intacta quanto da danificada, foram obtidos de forma numérica.

Genovese (2000) desenvolveu o Método do Erro Residual, o qual permite a localização e quantificação do dano. O método é baseado no fato de que se forem introduzidas características da estrutura não danificada e danificada simultaneamente na equação de movimento, surge um desequilíbrio ou um erro na mesma. O maior desequilíbrio na equação indica o local do dano. Já a quantificação do dano é realizada por meio de um processo iterativo que visa minimizar esse erro. Foram ensaiadas oito vigas metálicas, dentre as quais havia vigas intactas e vigas com diferentes danos. O autor comparou os resultados obtidos por meio de seu método com os obtidos por meio dos métodos da alteração da curvatura e dos índices MAC e COMAC. Os danos foram identificados e quantificados corretamente por meio do método proposto.

Brasiliano (2001) aplicou o Método do Erro Residual (Genovese, 2000) visando analisar a eficiência do método quando aplicado a pórticos planos e vigas contínuas. A autora utilizou ainda outros métodos para identificar o dano, como o método da alteração na curva de vibração, os índices MAC e COMAC e o método de identificação de dano em estruturas pela variação das características modais (Ferrufino, 1993). Os resultados permitiram a conclusão de que o Método do Erro Residual (Genovese, 2000) é eficiente na localização e quantificação de dano nas estruturas estudadas.

Cardoso (2005) utilizou diferentes métodos de identificação e quantificação de dano buscando analisar a eficiência dos mesmos em dois casos. No primeiro, os parâmetros modais foram obtidos de forma numérica, ao passo que no segundo caso, os parâmetros modais foram obtidos experimentalmente. Foram analisadas vigas metálicas com perfil U. Os resultados mostraram que os métodos de detecção de dano são satisfatórios quando utilizados os parâmetros modais obtidos numericamente. Entretanto, quando considerados os parâmetros modais obtidos experimentalmente, os resultados só foram satisfatórios para os casos de maior dano (pelo menos 35% de redução de inércia).

Mais recentemente, Marcy (2013) buscou expandir o Método do Erro Residual (Genovese, 2000) visando aplicá-lo a pórticos espaciais modelados por elementos de barra. Na etapa de quantificação de dano, foi também utilizada a técnica de Redes Neurais Artificiais - RNAs. Foram analisados numericamente quatro modelos de pórtico espacial. Os resultados permitiram observar que os métodos utilizados são satisfatórios na localização (MER) e quantificação (MER e RNAs) de danos para as estruturas estudadas, além de observar que na etapa da quantificação as RNAs apresentaram maior agilidade no processamento, sendo este um diferencial.

Guerreiro (2014) realizou estudos de sensibilidade em três modelos estruturais (viga bi-apoiada, viga simplesmente engastada e um pórtico plano simples com ambas extremidades engastadas), buscando avaliar a confiabilidade do método das curvaturas. Além disso, o autor também utilizou os indicadores MAC e COMAC e analisou as alterações das frequências naturais. Os resultados mostraram que o método da curvatura foi eficiente na detecção do dano em todos os três tipos de estrutura. Entretanto, Guerreiro (2014) afirma que na estrutura de pórtico os erros do método foram maiores. Quanto ao método da comparação das frequências naturais, Guerreiro (2014) concluiu que este não permite identificar a existência do dano em uma estrutura real, além de não dar indicações quanto à localização e magnitude do dano, pois para que o método seja utilizado com segurança, seria necessária uma alteração mínima das frequências de 5%, o que já representaria um dano muito avançado na estrutura. Por fim, apesar de indicarem pequenas alterações na rigidez da estrutura, os índices MAC e COMAC não foram capazes de localizar o dano.

Maia (2016) utilizou a técnica das RNAs para a detecção de dano em uma viga e pórticos planos com base em características dinâmicas obtidas experimental e numericamente. Os resultados obtidos para vigas mostraram que as redes foram eficientes na localização do dano, com exceção da rede cuja entrada eram os dados experimentais do primeiro modo, a qual apresentou um pequeno erro na localização do dano. Quanto aos pórticos, as redes treinadas com os modos de vibração obtidos numericamente apresentaram bons resultados. Porém, as redes testadas com os dados experimentais das propriedades dinâmicas do pórtico apresentaram uma maior dificuldade na localização correta do dano. O autor aponta como possíveis fatores que influenciaram negativamente a localização do dano: a simetria da estrutura, a utilização de poucos pontos para a obtenção experimental dos modos de vibração e o fato de que a inserção do dano gera alterações baixas nas frequências naturais de vibração.

Bastos (2017) realizou um estudo experimental em vigas protendidas de concreto submetidas à degradação devido à corrosão. As características dinâmicas foram obtidas para a viga não danificada e para diferentes cenários de dano. O autor buscou analisar o dano por meio do Método da Variação das Frequências e do Método da Variação dos Modos de Vibração. Em relação ao primeiro método, observou-se que este foi eficiente em apontar a existência de dano, porém não sendo utilizável no que diz respeito à localização do dano. Já o segundo método apresentou resultados razoáveis, apontando corretamente a localização de dano nos modelos com uma degradação estrutural considerável, sendo menos preciso quando o dano introduzido era uniforme ao longo da barra.

Assim, é possível concluir que a observação das características dinâmicas é um modo de identificação de danos interessante, ainda necessitando de mais estudos para que possa ser utilizado em estruturas já construídas de forma a monitorar dano nas mesmas. Neste trabalho, foi estudada a aplicabilidade do Método do Erro Residual (Genovese, 2000) em estruturas tridimensionais mais complexas do que os pórticos espaciais analisados por Marcy (2013).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA ESTRUTURA

De modo a entender o Método do Erro Residual (Genovese, 2000), faz-se necessário inicialmente entender o movimento dinâmico. Para um sistema de n graus de liberdade, a equação do movimento é dada pela Equação 3.1.

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

Onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura, respectivamente, de dimensões $n \times n$. Por sua vez, $\ddot{\vec{y}}(t)$, $\dot{\vec{y}}(t)$ e $\vec{y}(t)$ representam, respectivamente, os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento. Por fim, $\vec{F}(t)$ representa o vetor de forças externas.

Pode-se considerar que, para pequenos amortecimentos, as frequências naturais de vibração do sistema são semelhantes às do sistema livre não amortecido. Desse modo, a Equação 3.1 pode ser reescrita na forma da Equação 3.2, cuja solução é dada na forma da Equação 3.3.

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

$$\vec{y}(t) = \hat{\mathbf{y}} \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (3.3)$$

Onde $\hat{\mathbf{y}}$ representa o modo de vibração do sistema (a qual não muda com o tempo, apenas a amplitude varia), ω é a frequência natural de vibração da estrutura correspondente e θ é o ângulo de fase.

Substituindo a Equação 3.3 na 3.2, obtém-se a Equação 3.4.

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{0} \quad (3.4)$$

De forma que a Equação 3.4 não resulte em resposta trivial, a condição descrita pela Equação 3.5 deve ser observada, a qual é solucionada ao igualar o determinante indicado em 3.5 a zero. Chega-se assim a um problema geral de autovalores e autovetores que permite a obtenção das frequências naturais de vibrações e as formas modais associadas a cada uma dessas frequências.

$$\left| (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \right| = 0 \quad (3.5)$$

Uma vez obtidas as n frequências naturais angulares da estrutura, os modos de vibração podem ser obtidos por meio da Equação 3.6.

$$K\phi - \Lambda M\phi = 0 \quad (3.6)$$

Onde ϕ é uma matriz cujas colunas representa os n modos de vibração da estrutura e Λ é uma matriz diagonal, cujos valores representam os autovalores (ω^2) da estrutura.

Os modos de vibração de uma estrutura representam as formas com que a estrutura vibra, sendo os valores geralmente normalizados pelo maior deslocamento do modo. Dessa forma, os modos de vibração não representam a amplitude do movimento.

Para uma melhor visualização do que seriam os modos de vibração de uma estrutura, pode-se tomar como exemplo o pórtico de três andares do tipo shear-building apresentado por Clough e Penzien (2003), ilustrado na Figura 1. Realizando o equacionamento apresentado para múltiplos graus de liberdade ($n=3$, no caso em análise), são obtidos os três modos de vibração da estrutura (Figura 1), ou seja, as três formas segundo as quais a estrutura vibra.

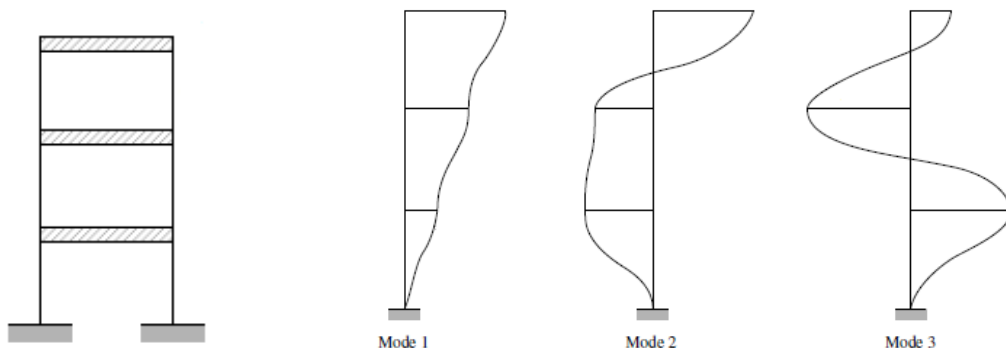


Figura 1 - Pórtico de três andares do tipo shear building e seus modos de vibração (Fonte: Clough e Penzien, 2003 modificado)

3.2 MÉTODO DO ERRO RESIDUAL (MER)

O Método do Erro Residual (MER), desenvolvido por Genovese (2000), se baseia no fato de que quando são utilizados parâmetros dinâmicos da estrutura intacta e da estrutura danificada simultaneamente na equação do movimento, surge um desequilíbrio na equação. Este desequilíbrio permite a localização e a quantificação do dano.

Quando a estrutura apresenta danos, há alteração da rigidez de elementos. Esta alteração resulta em novas frequências e modos de vibração. Assim, a equação do movimento da estrutura danificada é dada pela Equação 3.7.

$$\mathbf{K}'\boldsymbol{\phi}' - \mathbf{A}'\mathbf{M}'\boldsymbol{\phi}' = \mathbf{0} \quad (3.7)$$

Onde os parâmetros são correspondentes aos descritos para a Equação 3.6, porém agora para a estrutura danificada.

Hearn e Testa (1991 *apud* Marcy, 2013) afirmam que a variação de massa quando da ocorrência de dano é geralmente desprezível. Assim, a Equação 3.7 pode ser reescrita na forma da Equação 3.8.

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}' - \mathbf{A}'\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}' = \mathbf{0} \quad (3.8)$$

Ao substituir na Equação 3.8 a matriz de rigidez danificada (a qual não é conhecida) pela matriz de rigidez da estrutura intacta, surge um desequilíbrio na equação do movimento, denominado erro residual (\mathbf{E}), conforme a Equação 3.9.

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\phi}' - \mathbf{A}'\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}' = \mathbf{E} \quad (3.9)$$

Cada coluna da matriz \mathbf{E} representa os vetores dos erros de cada modo de vibração. Dessa forma, o maior valor em cada coluna representa o local da estrutura com o maior erro. Assim, o dano é localizado através da observação do maior valor de cada coluna.

A quantificação do dano, por sua vez, é feita por meio de um processo iterativo, que consiste na introdução de um fator p que multiplica apenas a matriz de rigidez do elemento danificado previamente à montagem da matriz de rigidez global da estrutura. Colocando a Equação 3.9 em função do parâmetro p , obtém-se a Equação 3.10.

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

Onde $\mathbf{K}''(p)$ é dado pela Equação 3.11, sendo \mathbf{K}_{EI} a matriz de rigidez dos elementos intactos e \mathbf{K}_{ED} a matriz dos elementos danificados.

$$\mathbf{K}''(p) = \mathbf{K}_{EI} + p\mathbf{K}_{ED} \quad (3.11)$$

Esquemáticamente, $\mathbf{K}''(p)$ pode ser observado na Equação 3.12.

$$\mathbf{K}''(p) = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{EI} & & \\ & 0 & \\ & & \mathbf{K}_{EI} \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} 0 & & \\ & \mathbf{K}_{ED} & \\ & & 0 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

O processo iterativo consiste em obter o valor de p que minimize o erro. O valor obtido representa a relação entre a rigidez dos elementos danificados e intactos. Uma vez obtido o valor de p , a quantidade de dano é dada por “1-p”. Dessa forma, se p for 0, o elemento apresenta perda total da rigidez, ao passo que se p for igual a 1, o elemento encontra-se intacto.

Caso a estrutura possua mais de um elemento danificado e as intensidades do dano dos elementos sejam diferentes, o processo iterativo passa a consistir na obtenção dos valores de p_i , $i=1, 2, \dots, n$, onde n é o número de elementos danificados, que minimizem o erro, de forma que a matriz de rigidez $\mathbf{K}''(p_1, p_2, \dots, p_n)$ é dada pela Equação 3.13.

$$\mathbf{K}''(p_1, p_2, \dots, p_n) = \mathbf{K}_{EI} + p_1 \mathbf{K}_{ED1} + p_2 \mathbf{K}_{ED2} + \dots + p_n \mathbf{K}_{EDn} \quad (3.13)$$

Onde $\mathbf{K}_{ED1}, \mathbf{K}_{ED2}, \dots, \mathbf{K}_{EDn}$ são as matrizes de rigidez dos elementos danificados e p_1, p_2, \dots, p_n são os respectivos valores que representam a relação entre a rigidez dos elementos danificados e intactos.

Este método é usado nos capítulos seguintes em relação a uma rampa em curva localizada no Instituto de Central de Ciências (ICC) do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

4. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

O trabalho foi desenvolvido de forma numérica, com o auxílio de duas ferramentas computacionais: o Abaqus/CAE 6.14-4 da Dassault Systèmes e o MATLAB R2015a da MathWorks, Inc.

O software Abaqus foi utilizado para modelar a estrutura desejada, definir as condições de apoio e gerar a malha. Decidiu-se por realizar essa fase nesse software por rapidez e simplicidade, já que para gerar a malha no MATLAB seria necessário implementar um novo código no mesmo, ao passo que essa função já existe no Abaqus.

A estrutura escolhida para a análise foi uma rampa em curva localizada no Instituto de Ciências Centrais (ICC) do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. A estrutura foi modelada de forma tridimensional por meio de elementos isoparamétricos do tipo hexaedros de 20 nós (Figura 2). Esse tipo de elemento foi escolhido porque dentre os elementos disponíveis para a modelagem (elementos de viga, de pórtico, tetraedro e hexaedro), considerou-se que o hexaedro permitiria uma melhor modelagem tridimensional da estrutura em curva e representaria melhor os deslocamentos da mesma.

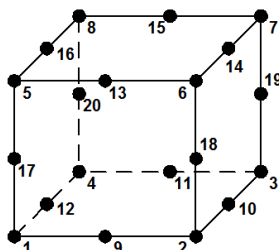


Figura 2 - Elemento isoparamétrico do tipo hexaedro de 20 nós
(Fonte: <https://bit.ly/2x1bYDd>)

Após a modelagem da estrutura, para a aplicação do Método do Erro Residual (Genovese, 2000), foram implementadas rotinas no MATLAB. De forma geral, as rotinas podem ser subdivididas de acordo com suas funções em: obtenção das características dinâmicas da estrutura, localização do dano e quantificação do dano.

Obtenção das características dinâmicas

Inicialmente, os dados de geometria gerados no Abaqus foram exportados para o software MATLAB, no qual foi implementado um código para a aplicação do MER. Além dos dados importados do Abaqus, são também dados de entrada do programa as propriedades do material

(módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade), os elementos danificados e o dano aplicado aos mesmos.

Como dito anteriormente, a presença de dano em uma estrutura leva à diminuição de rigidez da mesma. Essa diminuição da rigidez pode ocorrer de diversas formas, dentre as quais podem-se citar a diminuição do módulo de elasticidade ou a redução da seção transversal. No código implementado, escolheu-se por representar o dano como uma diminuição do módulo de elasticidade do elemento. Seria também possível representar o dano como uma diminuição de uma seção transversal do modelo, porém essa possibilidade não foi implementada.

Com os dados de entrada, o programa criado no ambiente MATLAB utiliza a integração completa para gerar as matrizes de massa e de rigidez da estrutura não danificada e, em seguida, gerar a matriz de rigidez da estrutura danificada. Em todas as análises, foi utilizada a matriz de massa consistente. Seria possível utilizar as matrizes de massa e de rigidez obtidas pelo software Abaqus. Entretanto, o processo de transferência das matrizes de um software para o outro é lento, sendo mais rápido gerar as matrizes no próprio MATLAB.

Com as matrizes de massa e de rigidez das estruturas, são obtidos as cinco primeiras frequências naturais e os cinco primeiros modos de vibração da estrutura danificada. Escolheu-se trabalhar com esses modos porque os primeiros modos deslocam uma maior quantidade de massa. Além disso, ao considerar mais de um modo, é possível analisar o deslocamento de todos os nós, já que em alguns modos é possível que um nó se desloque pouco e em outro modo ele se desloque mais. Esses dois fatos associados fazem com que a utilização dos cinco primeiros modos melhore a identificação dos nós danificados, independentemente de sua posição.

Localização do dano

Obtidas as características dinâmicas da estrutura danificada, é possível começar a aplicar o Método do Erro Residual (Genovese, 2000). Para a localização do dano, são considerados os cinco primeiros modos de vibração. Nesta etapa, primeiramente é calculado o somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração (E') de cada nó. Após o cálculo de E' , é necessário definir duas condições: o valor mínimo de E' para que o nó seja considerado danificado e a quantidade de nós danificados em um elemento para que este elemento seja considerado danificado.

Quantificação do dano

Para a etapa de quantificação, apenas o primeiro modo de vibração foi considerado, por geralmente ser o modo que desloca mais massa. Esta medida foi adotada visando economizar processamento. Ao final do processamento, foi gerado um arquivo no formato do Abaqus, com figuras da rampa que ilustram os nós e elementos danificados.

Para o cenário em que a estrutura possui elementos danificados com diferentes valores de dano, foi implementada uma sub-rotina a parte. Neste caso, a etapa de quantificação é realizada de forma separada para cada elemento considerado como danificado. Após a etapa de identificação, a matriz $\mathbf{K}''(p_{EDA})$ é montada para cada elemento danificado através da Equação 4.1.

$$\mathbf{K}''(p_{EDA}) = \mathbf{K}_{EI} + p_{EDA} \mathbf{K}_{EDA} \quad (4.1)$$

Onde \mathbf{K}_{EDA} é a matriz de rigidez do elemento danificado analisado e p_{EDA} é o valor que representa a relação entre a rigidez do elemento danificado e intacto do respectivo elemento.

Em seguida, para cada elemento danificado, a matriz $\mathbf{K}''(p_{EDA})$ é substituída na Equação 3.10 e é gerado um gráfico do erro em função de p_{EDA} para cada elemento danificado. Caso o gráfico possua um valor mínimo bem definido, considera-se que o valor de p_{EDA} foi obtido. Após realizar a análise dos gráficos de todos os elementos danificados, é informado para o programa os elementos cujo valor de dano não foi identificado com sucesso na primeira tentativa. Então, a matriz $\mathbf{K}''(p_{EDA})$ é novamente montada para esses elementos, porém segundo a Equação 4.2.

$$\mathbf{K}''(p_{EDA}) = \mathbf{K}_M + p_{EDA} \mathbf{K}_{EDA} \quad (4.2)$$

A matriz \mathbf{K}_M pode ser representada de forma esquemática através da Equação 4.3.

$$\mathbf{K}_M = \begin{pmatrix} K_{EI} & & \\ & 0 & \\ & & K_{EI} \end{pmatrix} + \sum p_{Ci} \begin{pmatrix} 0 & & \\ & K_{EDi} & \\ & & 0 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Onde p_{Ci} é o valor que representa a relação entre a rigidez do elemento danificado e intacto dos elementos cujo valor de p_{EDA} foi identificado de forma clara através dos gráficos gerados anteriormente e \mathbf{K}_{EDi} é a matriz de rigidez dos respectivos elementos.

Então, novamente para cada elemento danificado cujo dano ainda não foi quantificado, a matriz $K''(p_{EDA})$ é substituída na Equação 3.10. Novos gráficos do erro em função de p_{EDA} são gerados. Caso todos os valores de p sejam identificados de forma clara, o processo é finalizado e é gerado um gráfico final ilustrando a intensidade do dano de cada elemento. Caso contrário, o processo é repetido até que todos os valores de p_{EDA} tenham sido obtidos.

A Figura 3 esquematiza a utilização das ferramentas computacionais para a aplicação do MER, ao passo que a Figura 4 esquematiza a sub-rotina utilizada para a quantificação de dano no cenário em que a estrutura possui elementos danificados com diferentes valores de dano.

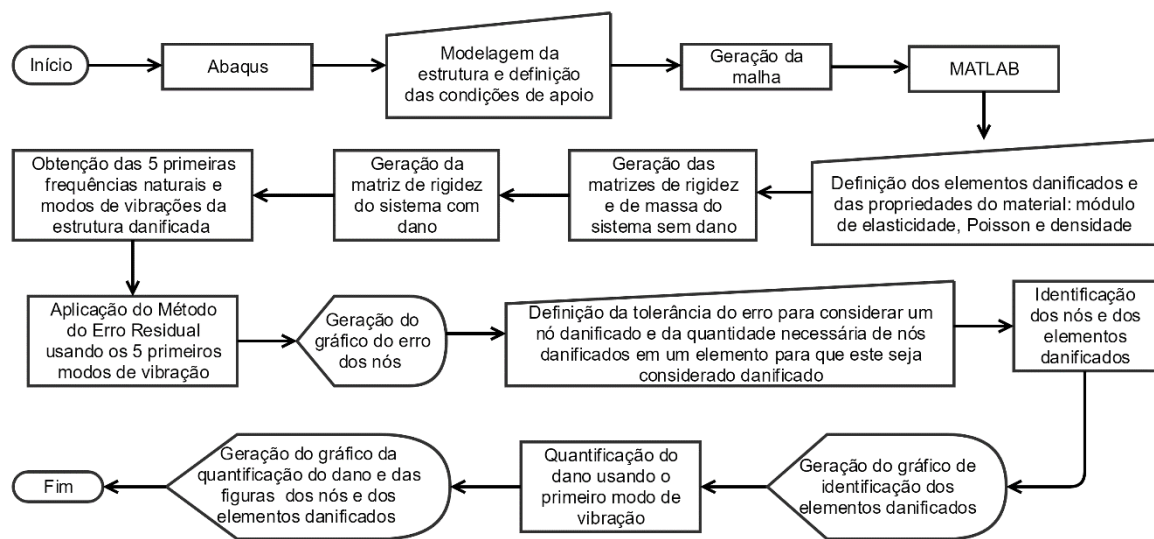


Figura 3 - Esquema da utilização das ferramentas computacionais para aplicação do MER

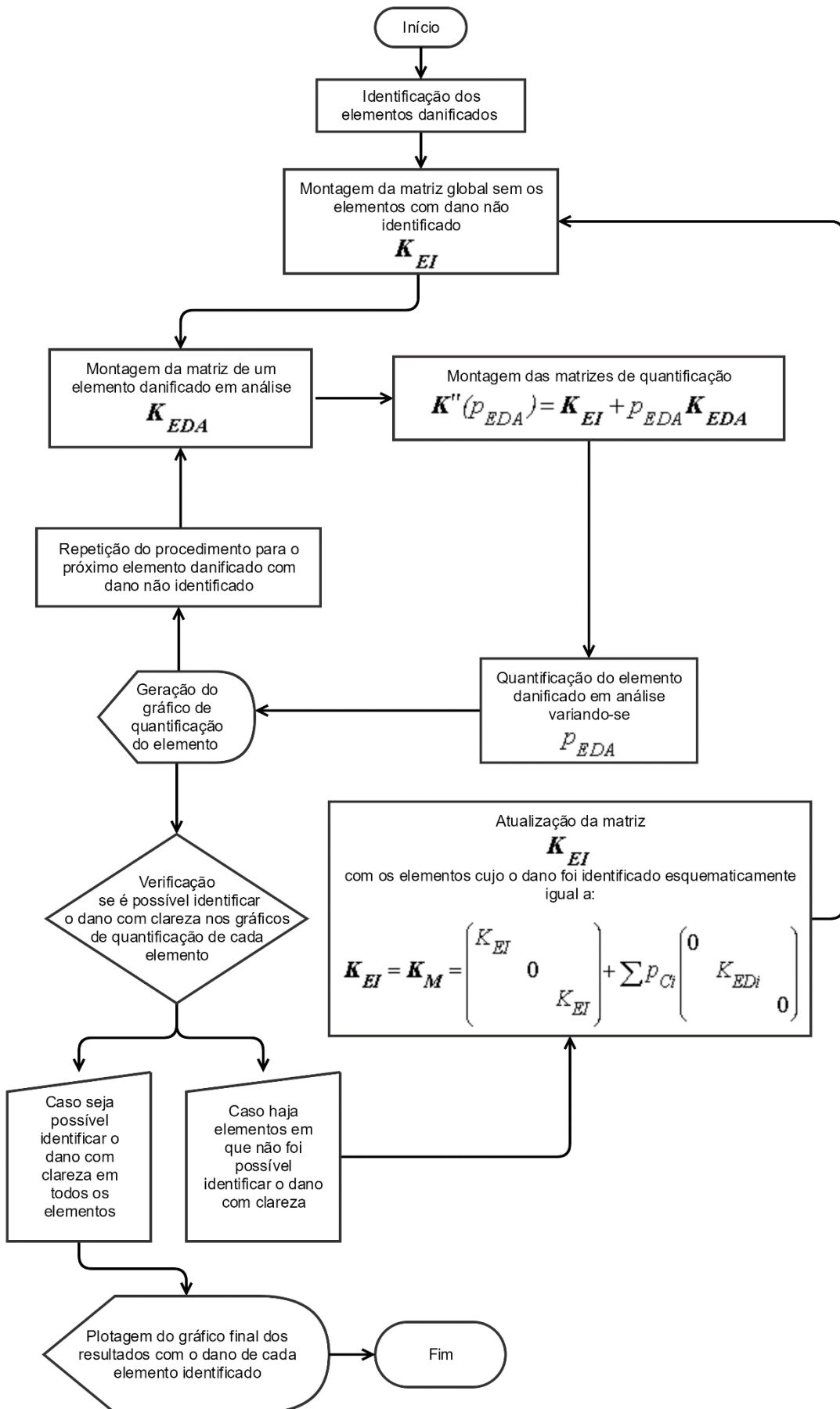


Figura 4 - Esquema da etapa de quantificação para o caso de múltiplas intensidades de dano simultâneas

5. ANÁLISE NUMÉRICA

A estrutura escolhida para análise foi a rampa em curva localizada entre a ala norte e a ala central do Instituto Central de Ciências (ICC) do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB), a qual pode ser observada na Figura 5.

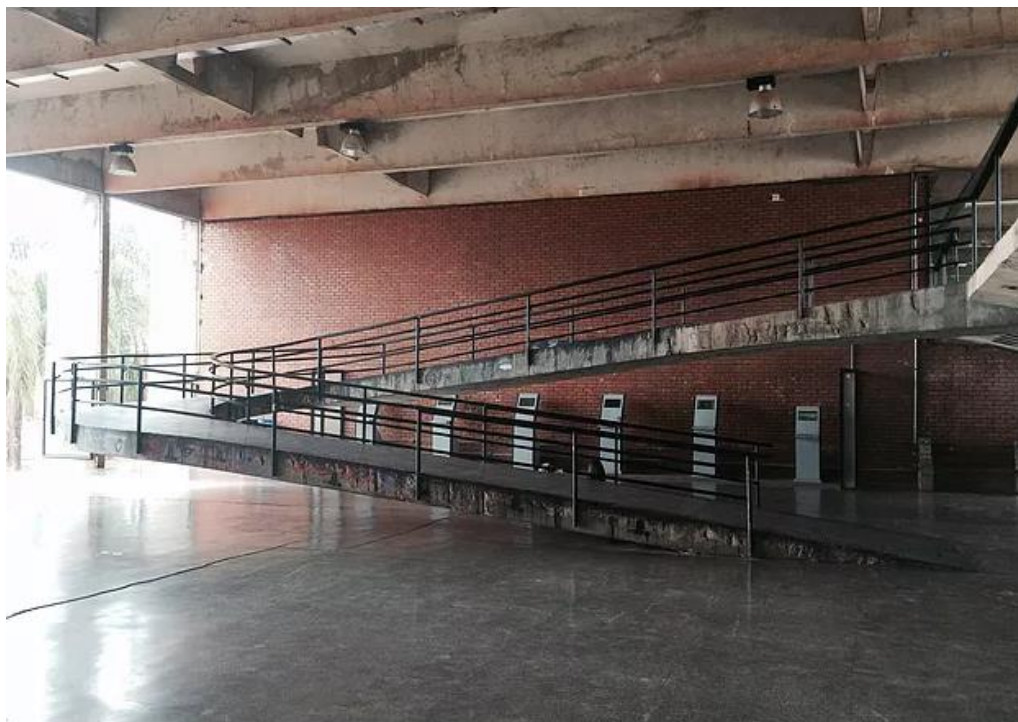


Figura 5 – Estrutura escolhida para análise: rampa do ICC da UnB (Fonte: <https://bit.ly/2IPJli1>)

5.1 ESTRUTURA ANALISADA E MODELAGEM NUMÉRICA

Inicialmente, a estrutura foi modelada com base nos projetos arquitetônicos disponibilizados no formato .dwg pelo Centro de Planejamento Oscar Niemeyer (CEPLAN) da UnB. Entretanto, em uma visita à estrutura real, notaram-se divergências entre as dimensões do projeto e as dimensões executadas, de forma que algumas dimensões da modelagem inicial foram corrigidas com base em medições realizadas pelos próprios alunos. A vista lateral e a planta baixa da estrutura final modelada podem ser observadas, respectivamente nas Figuras 6 e 7.

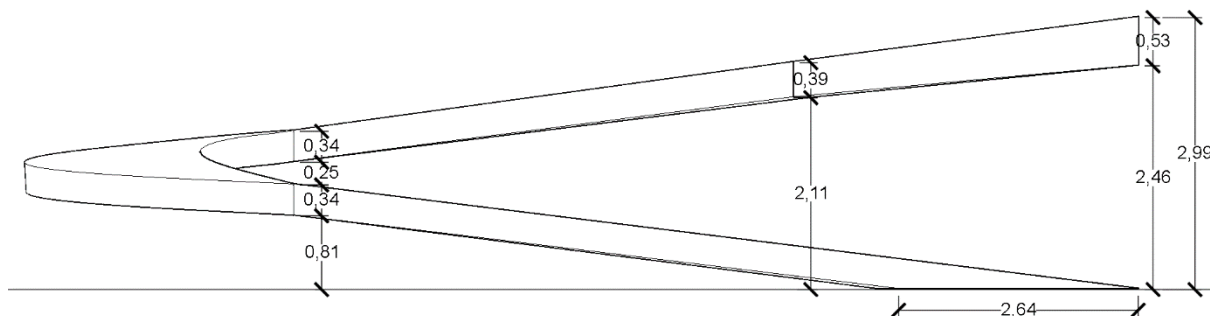


Figura 6 - Vista lateral da rampa (dimensões em metros)

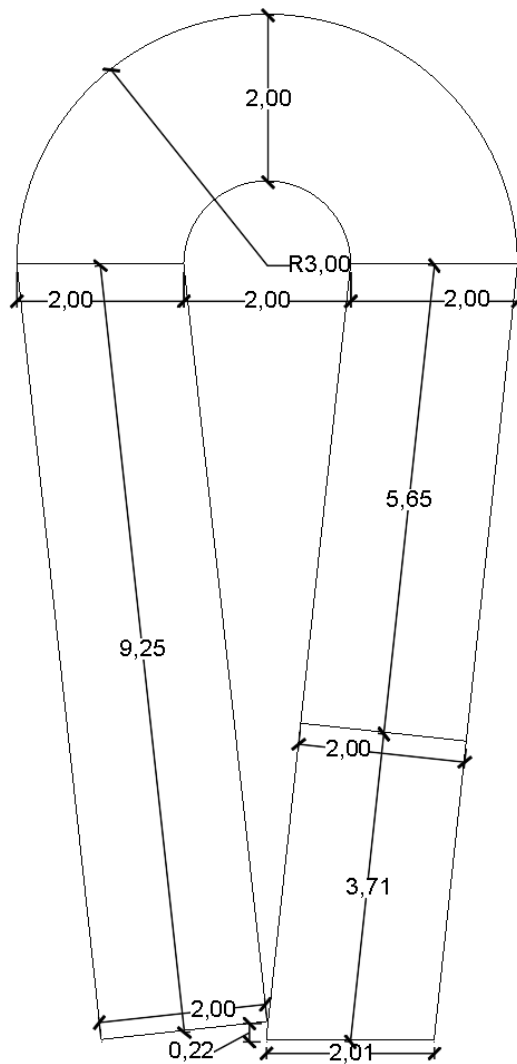


Figura 7 - Planta baixa da rampa (dimensões em metros)

A rampa foi construída em concreto armado. Porém, as propriedades dos materiais utilizados (aço e concreto) não estão detalhadas nos documentos disponíveis. Assim, as propriedades do concreto foram estimadas com base nas normas técnicas NBR 6118/2014 e 6120/1980, sendo elas: resistência do concreto $f_{ck} = 30$ MPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,20$, densidade = 2500 kg/m³ e o módulo de elasticidade $E = 31$ GPa. Para a estimativa do módulo de elasticidade, não foi considerada a armação da estrutura, pois esta não se encontrava detalhada nos documentos disponíveis. Dessa forma, optou-se por utilizar o módulo de elasticidade tangencial estimado do concreto e posteriormente verificar se o valor obtido era uma aproximação razoável para o módulo de elasticidade real da rampa por meio de um ensaio experimental.

A rampa foi modelada no software Abaqus por meio de uma malha de 625 elementos isoparamétricos do tipo hexaedro de 20 nós. Para a escolha da malha, foram testados diferentes níveis de refinamento no Abaqus. A malha mais refinada testada possuía 159040 elementos. A

frequência do primeiro modo de vibração obtida utilizando a malha mais refinada foi de 4,2676 Hz. A malha escolhida foi aquela cuja frequência obtida apresentava uma diferença desprezível em relação à frequência obtida utilizando uma malha muito refinada. A rampa modelada, sem e com a malha, pode ser observada na Figura 8.

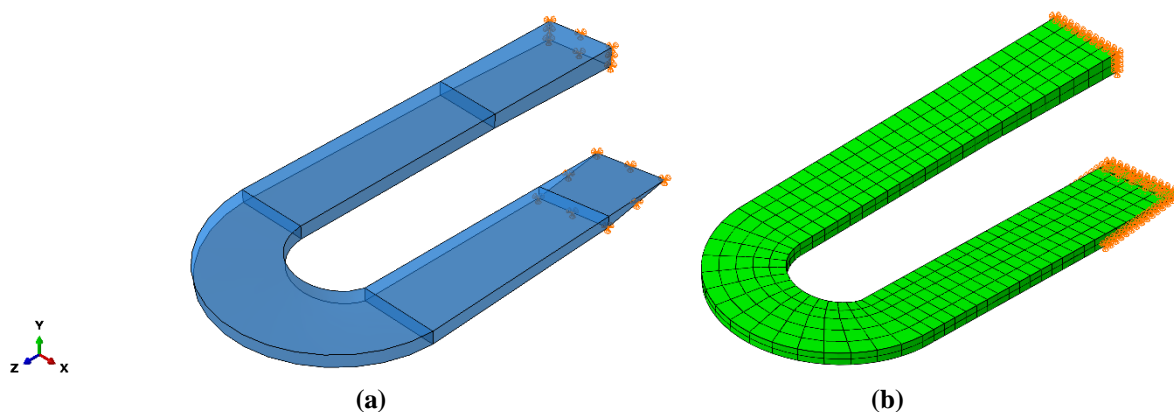


Figura 8 – Rampa de concreto em curva modelada (a) sem a malha (b) com a malha

Quanto às condições de apoio, na parte inferior da rampa a face em contato com o chão foi considerada engastada, ao passo que na parte superior da rampa a face em contato com a laje também foi considerada engastada, conforme ilustrado na Figura 9.

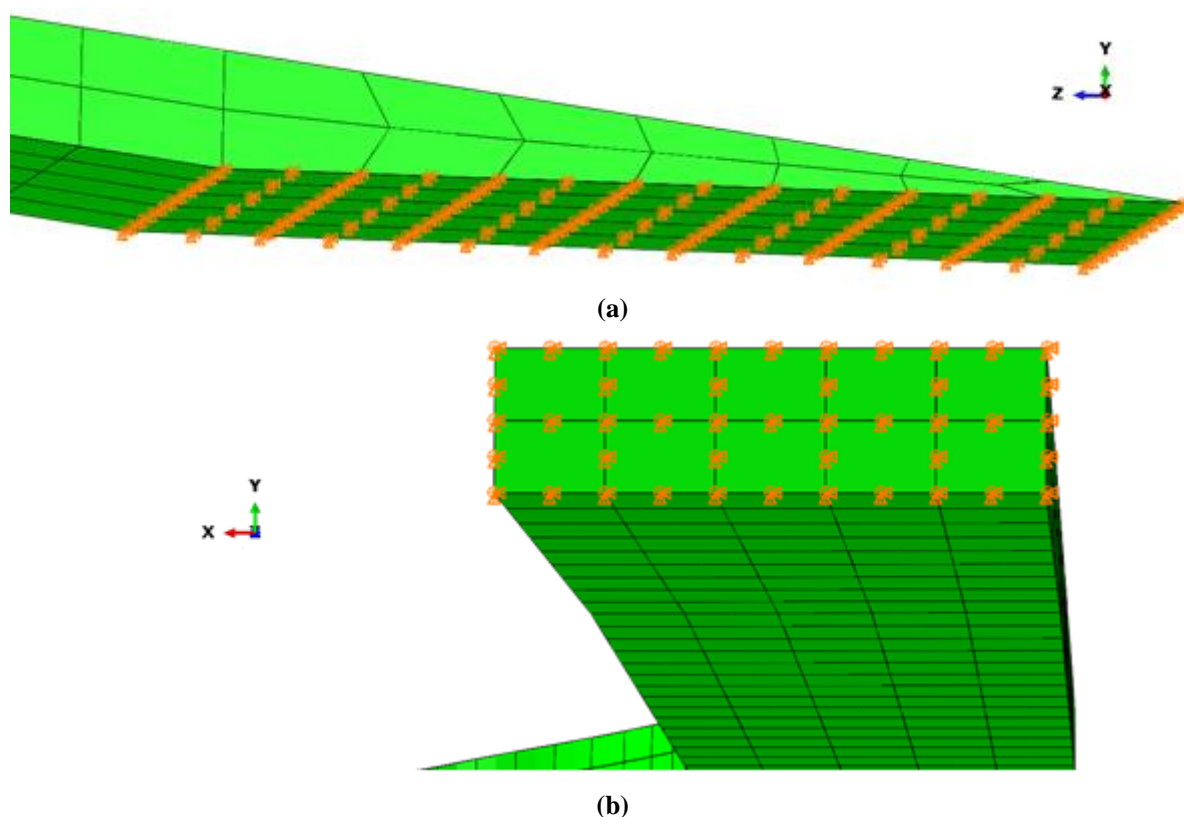


Figura 9 - Condições de apoio (a) apoio inferior, face em contato com o chão engastada (b) apoio superior, face em contato com a laje engastada

5.2 ANÁLISE MODAL

As Figuras de 10 a 14 ilustram os 5 primeiros modos de vibração da estrutura intacta, ao passo que a Tabela 1 apresenta as cinco primeiras frequências naturais da estrutura intacta (tanto obtidas utilizando o MATLAB quanto através do Abaqus).

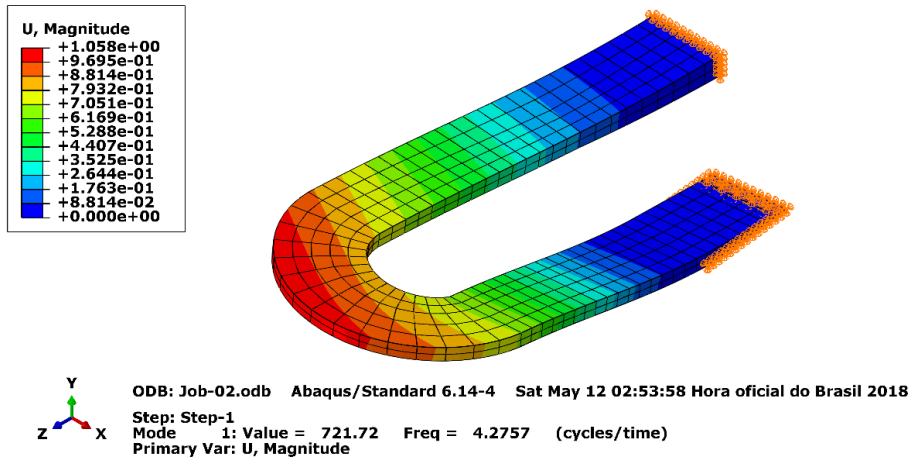


Figura 10 - 1º modo de vibração

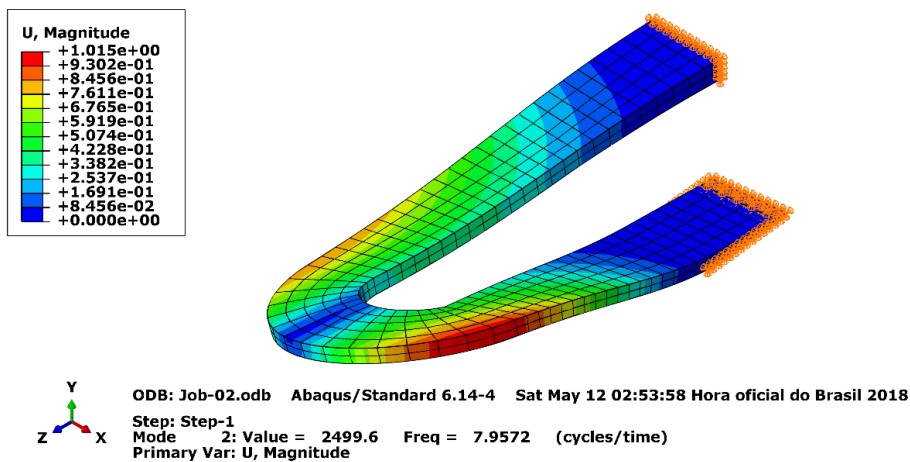


Figura 11 - 2º modo de vibração

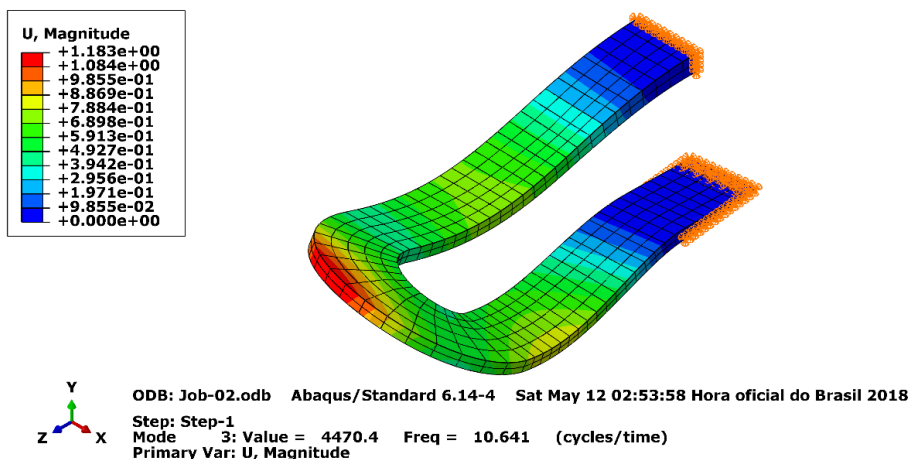


Figura 12 - 3º modo de vibração

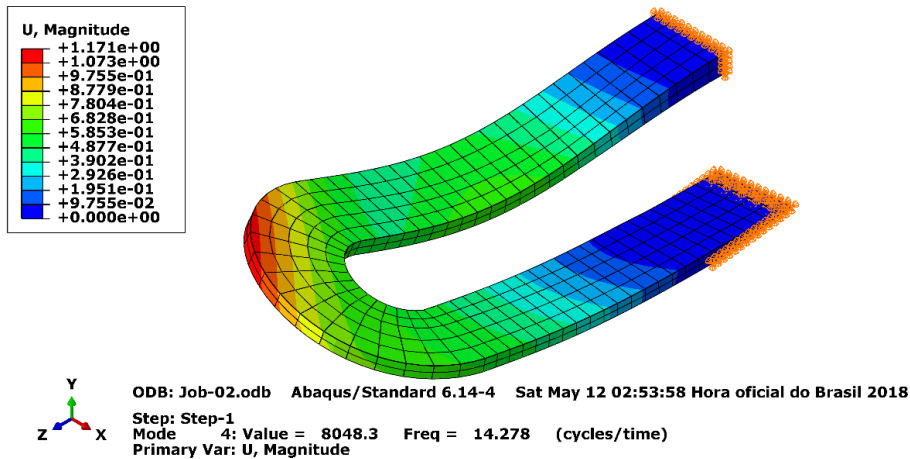


Figura 13 - 4º modo de vibração

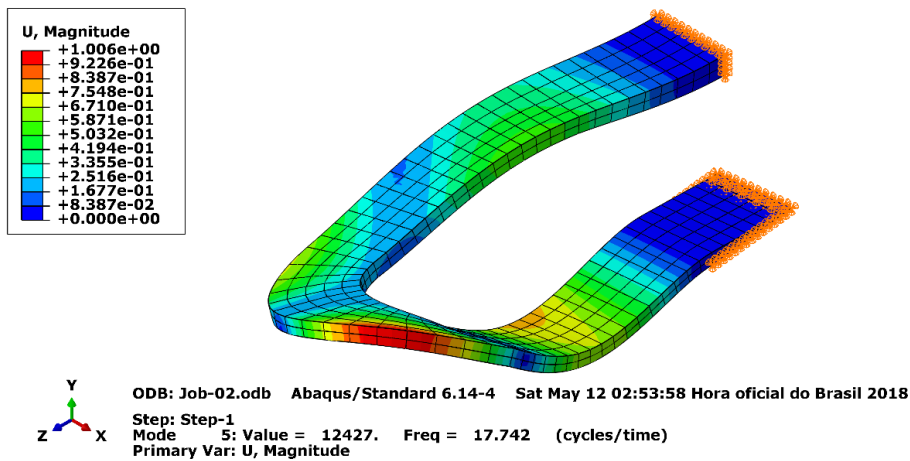


Figura 14 - 5º modo de vibração

Tabela 1 - Frequências naturais da estrutura intacta

Modo	ω (rad/s) rampa intacta - MATLAB	ω (rad/s) rampa intacta - Abaqus
1º	4,2757	4,2757
2º	7,9572	7,9572
3º	10,6413	10,6413
4º	14,2782	14,2782
5º	17,7422	17,7422

Observa-se que as frequências obtidas utilizando o código implementado foram as mesmas obtidas diretamente do modelo através do Abaqus (Tabela 1). Além disso, é possível observar que a frequência obtida do 1º modo de vibração (4,2757 Hz) é apenas 0,19% superior à obtida com a malha mais refinada testada (4,2676 Hz), o que aponta para a convergência das malhas.

Para se ter uma ideia dos valores de frequência da rampa, procedeu-se a realizar um ensaio experimental simples. Foram realizadas três medições de frequência na rampa através do aplicativo de celular *VibSensor* versão 2.1.1 da *Now Instruments and Software, Inc*. A estrutura

foi excitada por meio de uma pessoa de 70 kg dando um pulo na parte curva da rampa, a qual apresenta o maior deslocamento de acordo com o primeiro modo de vibração. Cada medição durou cerca de 30 s e os dados de acelerações (Figura 15) eram coletados a uma frequência de cerca de 100 Hz. O valor de frequência na direção vertical obtido em todas as medições foi de 4,3 Hz. Este valor devia ser próximo do valor da frequência fundamental da rampa, ou seja, do valor obtido para a frequência do primeiro modo de vibração. Como apresentado na Tabela 1, o valor obtido numericamente para a frequência fundamental da rampa foi de 4,2757 Hz. Dessa forma, se considerado o arredondamento para uma casa decimal, a frequência obtida numericamente é igual à medida pelo aplicativo, demonstrando que o modelo utilizado representa bem a realidade, além de comprovar que as propriedades, em especial o módulo de elasticidade estimado, e condições de apoio escolhidas são razoáveis.

Peak raw: X (0.73) Y (0.36) Z (10.13)
 ISD: X (0.022) Y (0.019) Z (0.061)
 Resonances:
 X: 4.3 Hz (0.00025), 13 Hz (5.5e-5)
 Y: 0.58 Hz (2.3e-5)
 Z: 4.3 Hz (0.0019), 14 Hz (0.00084)
 rms vibration: X (0.022) Y (0.018) Z (0.06)

Peak raw: X (0.65) Y (0.16) Z (9.70)
 ISD: X (0.021) Y (0.018) Z (0.049)
 Resonances:
 X: 4.3 Hz (0.00022), 13 Hz (6.1e-5)
 Y:
 Z: 4.3 Hz (0.0014), 14 Hz (0.00093)
 rms vibration: X (0.021) Y (0.018) Z (0.048)

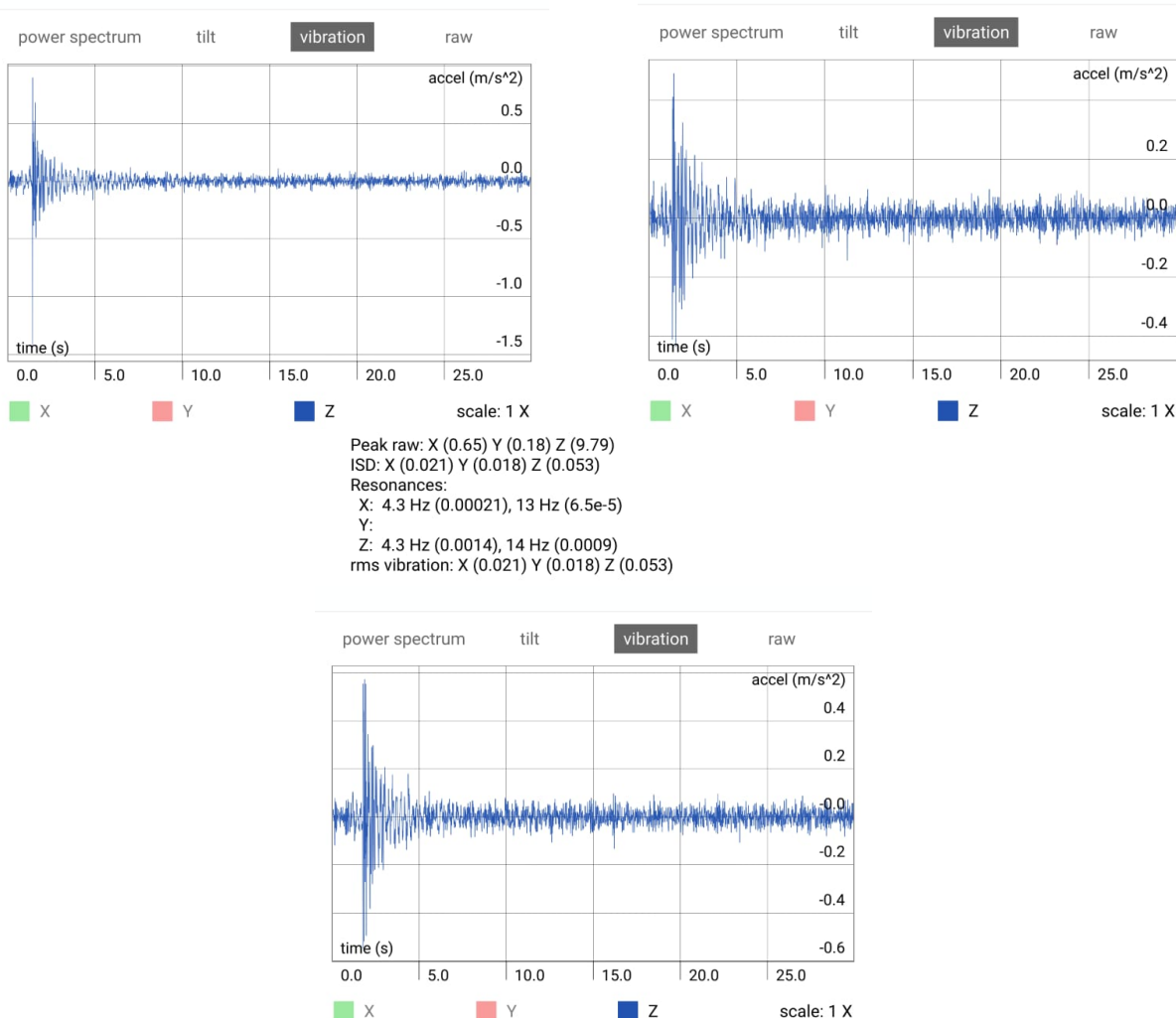


Figura 15 - Gráficos de aceleração obtidos através do aplicativo VibSensor

5.3 AVALIAÇÃO DE DANOS

Assim, uma vez modelada a estrutura e obtidas suas propriedades na condição “intacta”, considerada a atual condição da estrutura, foram criados seis cenários artificiais de dano para estudar a aplicação do Método do Erro Residual (Genovese, 2000) na avaliação de possíveis danos.

Nos cenários de 1 a 5, o dano aplicado a todos os elementos foi o mesmo, ou seja, a etapa de quantificação de dano deveria resultar em um só valor. Para cada cenário, foram analisados três casos de intensidade de dano diferentes, tendo sido escolhidos os valores de dano de 5%, 50% e de 90%. Estes valores foram escolhidos de forma a verificar se a caracterização do dano funcionaria tanto para valores extremos como para valores médios de dano. Já no cenário 6, foi estudado o caso em que existem elementos danificados em diferentes intensidades simultaneamente na estrutura, ou seja, a etapa de quantificação deveria resultar em mais de um valor de p . As Tabelas 2 e 3 apresentam as características dos cenários de dano analisados.

Tabela 2 - Descrição dos cenários de dano analisados

Cenário	Elementos danificados	Nós danificados	Número de casos analisados	Descrição dos casos
1	231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240	16 17 18 19 20 21 87 88 89 90 91 92 93 94 108 109 123 150 401 402 403 404 457 458 459 460 513 514 515 516 530 544 993 994 995 996 2185 2186 2187 2188 2193 2194 2195 2198 2199 2200 2203 2204 2206 2207 2208 2211 2212 2214 2215 2216 2219 2220 2222 2223 2224 2227 2228 2230 2231 2232 2233 2234 2235 2236 2237 2238 2239 2240 2241 2242 2243 2244 2245 2246 2247 2248 2249 2250 2251 2252 2253 2254 2255 2256 2257 2258 2259 2260 2261 2262 2263 2264 2265 2266 2267 2268 2269 2270 2271 2272 2273 2274	3	Todos os elementos com dano de 5%
		Todos os elementos com dano de 50%		
		Todos os elementos com dano de 90%		
2	616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625	10 11 12 13 14 15 79 80 81 82 83 84 85 86 253 280 294 295 397 398 399 400 821 822 823 824 877 878 879 880 894 908 1137 1138 1139 1140 1577 1578 1579 1580 1588 1589 1590 1596 1597 1598 1603 1604 1609 1610 1611 1616 1617 1622 1623 1624 1629 1630 1635 1636 1637 1642 1643 3912 3913 3914 3915 3920 3921 3922 3925 3926 3927 3930 3931 3933 3934 3935 3938 3939 3941 3942 3943 3946 3947 3949 3950 3951 3954 3955 3957 3958 3959 3960 3961 3962 3963 3964 3965 3966 3967 3968 3969 3970 3971 3972 3973 3974	3	Todos os elementos com dano de 5%
		Todos os elementos com dano de 50%		
		Todos os elementos com dano de 90%		

Tabela 3 - Descrição dos cenários de dano analisados (continuação)

Cenário	Elementos danificados	Nós danificados	Número de casos analisados	Descrição dos casos
3	241, 242, 275, 276, 309, 310, 343, 344, 377, 378	22 25 151 152 183 184 200 201 217 218 219 220 545 561 577 593 609 625 641 657 673 689 705 706 707 708 997 1013 1029 1045 2275 2276 2277 2278 2279 2280 2281 2282 2283 2284 2285 2286 2287 2288 2289 2290 2291 2292 2294 2496 2497 2498 2499 2500 2501 2502 2503 2504 2505 2506 2508 2632 2633 2634 2635 2636 2637 2638 2639 2640 2641 2642 2644 2768 2769 2770 2771 2772 2773 2774 2775 2776 2777 2778 2780 2904 2905 2906 2907 2908 2909 2910 2911 2912 2913 2914 2916	3	Todos os elementos com dano de 5%
				Todos os elementos com dano de 50%
				Todos os elementos com dano de 90%
4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	47 62 70 71 317 325 333 334 335 336 365 366 367 368 909 910 911 912 1141 1142 1143 1144 1149 1150 1151 1152 1153 1154 1155 1159 1160 1161 1162 1163 1167 1168 1169 1170 1171 1175 1176 1177 1178 1179 1183 1184 1185 1186 1187 1191 1192 1193 1194 1197 1198 1199 1202 1203 1204 1207 1208 1209 1212	3	Todos os elementos com dano de 5%
				Todos os elementos com dano de 50%
				Todos os elementos com dano de 90%
5	161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170	101 102 115 116 129 130 143 144 429 430 431 432 433 434 435 436 485 486 487 488 489 490 491 492 523 524 537 538 965 966 967 968 969 970 971 972 1870 1871 1872 1873 1878 1879 1880 1883 1884 1885 1888 1889 1891 1892 1893 1896 1897 1899 1900 1901 1904 1905 1907 1908 1909 1912 1913 1915 1916 1917 1918 1919 1920 1921 1922 1923 1924 1925 1926 1927 1928 1929 1930 1931 1932 1933 1934 1935 1936 1937 1938 1939 1940 1941 1942 1943 1944 1945 1946 1947 1948 1949 1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959	3	Todos os elementos com dano de 5%
				Todos os elementos com dano de 50%
				Todos os elementos com dano de 90%
6	161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170	101 102 115 116 129 130 143 144 429 430 431 432 433 434 435 436 485 486 487 488 489 490 491 492 523 524 537 538 965 966 967 968 969 970 971 972 1870 1871 1872 1873 1878 1879 1880 1883 1884 1885 1888 1889 1891 1892 1893 1896 1897 1899 1900 1901 1904 1905 1907 1908 1909 1912 1913 1915 1916 1917 1918 1919 1920 1921 1922 1923 1924 1925 1926 1927 1928 1929 1930 1931 1932 1933 1934 1935 1936 1937 1938 1939 1940 1941 1942 1943 1944 1945 1946 1947 1948 1949 1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959	1	Elementos 161, 162, 169 e 170 com dano de 90%, elementos 163, 164, 167 e 168 com dano de 50% e elementos 165 e 166 com dano de 5%

5.3.1 Cenário 1

No primeiro cenário, foram considerados danificados os elementos 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239 e 240, conforme ilustrado na Figura 16.

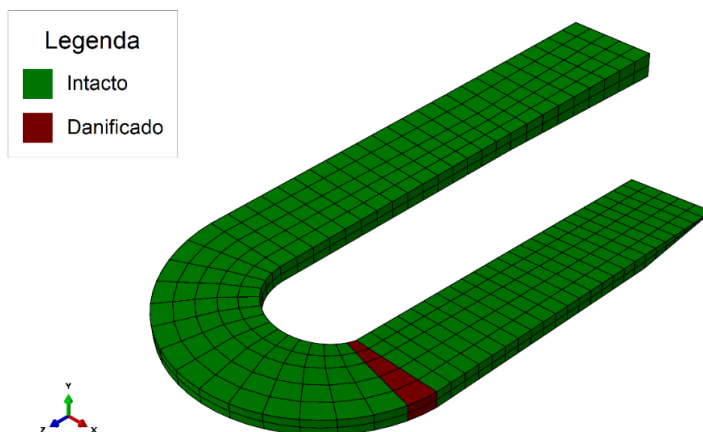


Figura 16 - Elementos danificados, cenário 1

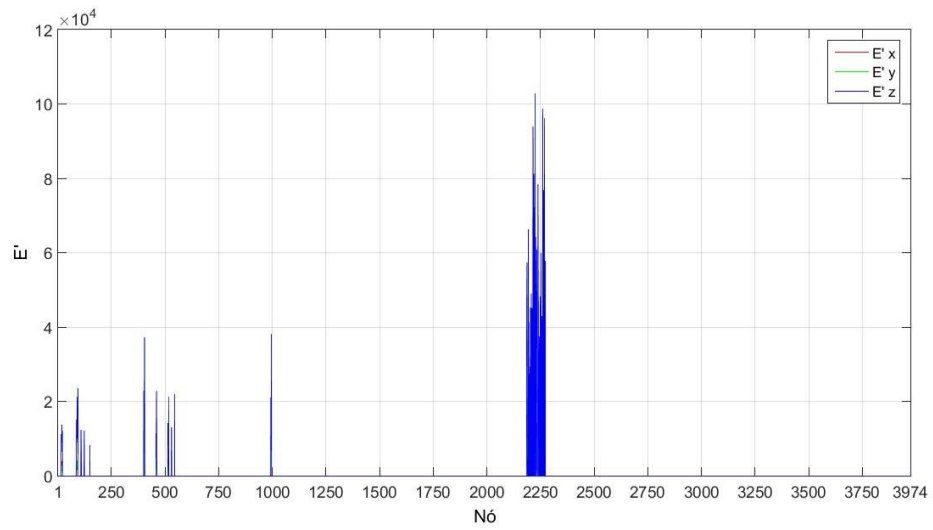
As frequências da estrutura danificada para os três casos de intensidade de dano podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 1

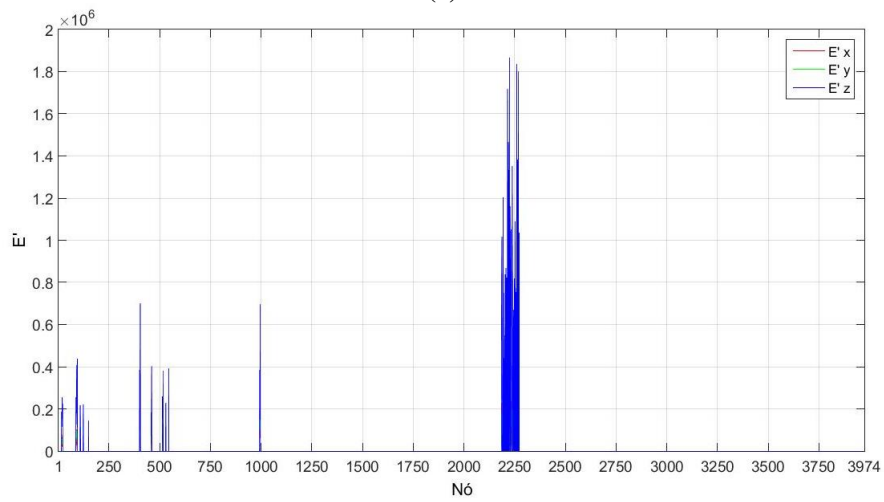
Modo	ω (rad/s) para			
	Caso intacto	Dano de 5%	Dano de 50%	Dano de 90%
1°	4,2757	4,2735	4,2365	4,0100
2°	7,9572	7,9548	7,9183	7,7209
3°	10,6413	10,6369	10,5634	10,1389
4°	14,2782	14,2712	14,1558	13,5047
5°	17,7422	17,7410	17,7233	17,6392

É possível observar que, para todos os casos e para todos os modos, as frequências diminuem com a presença de dano na estrutura, sendo que, quanto maior a intensidade do dano, maior a diminuição da frequência.

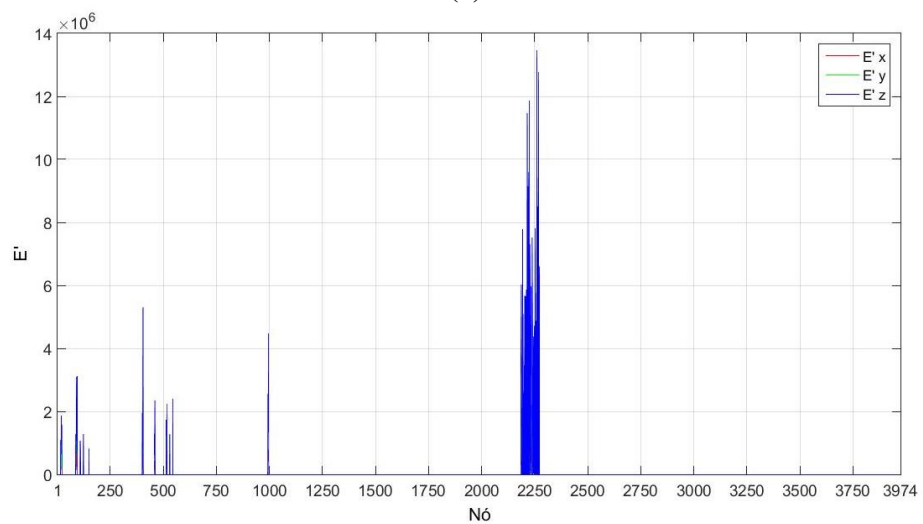
Uma vez obtidas as propriedades dinâmicas das estruturas danificadas, o Método do Erro Residual (Genovese, 2000) é aplicado. Primeiramente, foi obtido o erro da equação de cada nó, conforme a Figura 17. No gráfico, E' representa o somatório dos erros dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó.



(a)



(b)



(c)

**Figura 17 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 1
(a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%**

Para que o nó fosse considerado danificado, foi escolhida a precisão de $E' \geq 0,01$. Após a definição dos nós danificados, a condição escolhida para que o elemento fosse considerado danificado foi que todos os seus 20 nós estivessem danificados. Como nos três casos analisados, os elementos danificados eram os mesmos, foi gerado apenas um gráfico de localização de dano (Figuras 18 e 19). Nos gráficos, o valor no eixo y ser igual a 0 significa que não há presença de dano, ao passo que se o valor for igual a 1, há presença de dano.

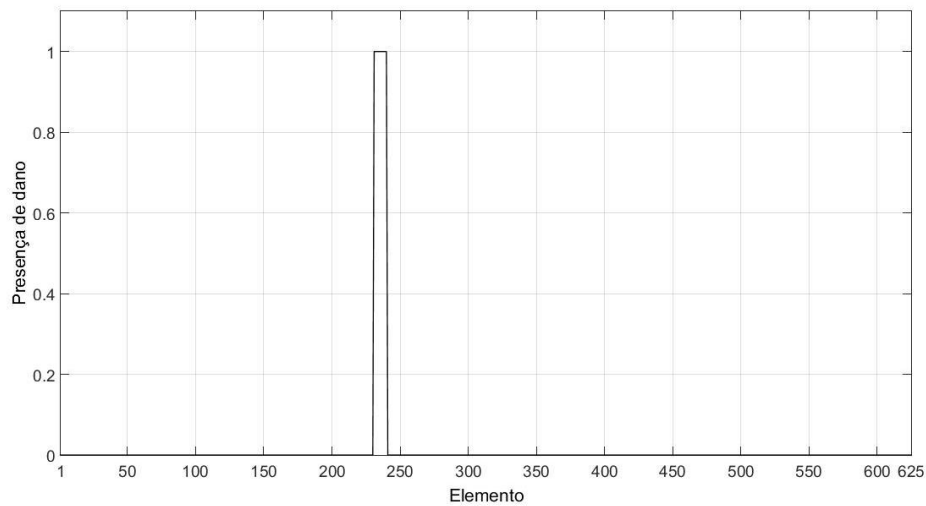


Figura 18 – Localização dos elementos danificados, cenário 1

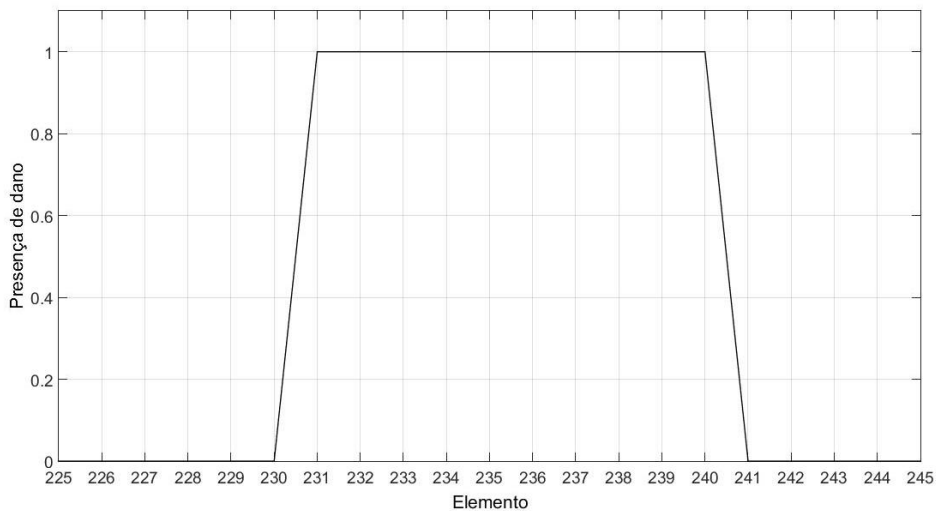
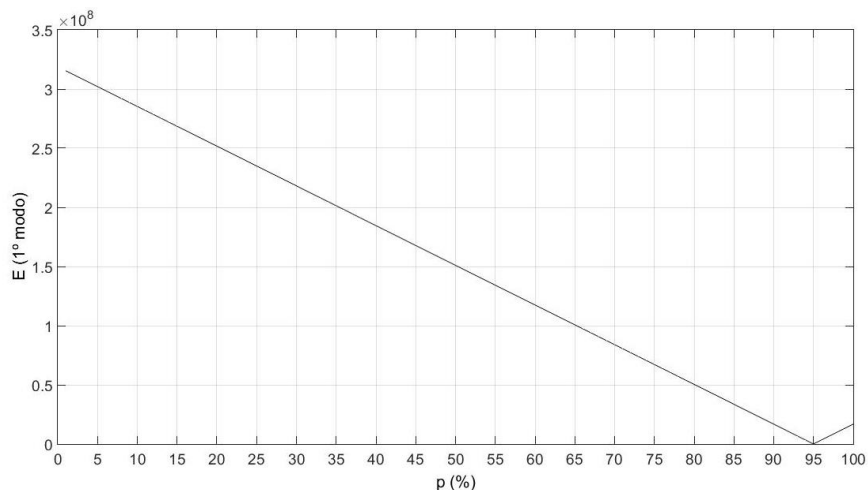
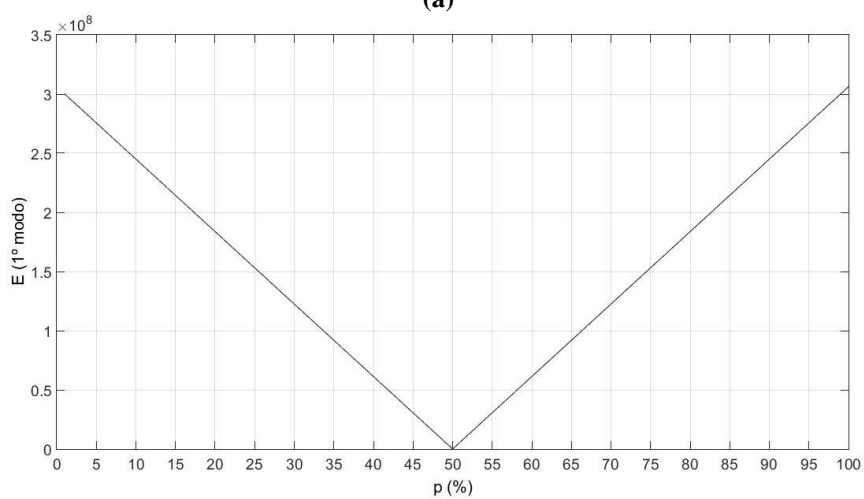


Figura 19 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 1

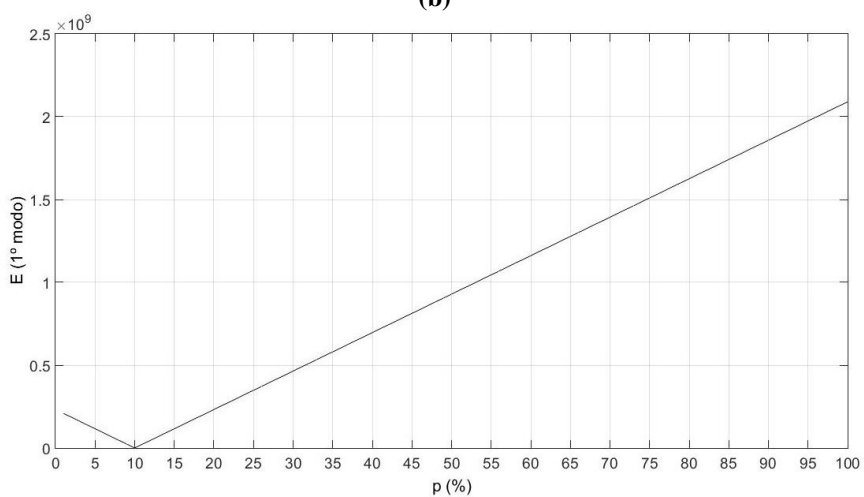
Após a localização do dano, é realizada a quantificação por meio da minimização do erro da equação do movimento como explicado anteriormente, tendo sido obtidos os resultados apresentados na Figura 20. No gráfico, E (1º modo) representa o somatório do módulo de todos os elementos do vetor erro.



(a)



(b)



(c)

Figura 20 – Quantificação do dano, cenário 1 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%

Como visto anteriormente, a intensidade do dano é dada por ‘1-p’. Os valores de p obtidos foram de 95%, 50% e 10% resultando, respectivamente, nos valores esperados de dano de 5%, 50% e 90%.

Por fim, o programa em MATLAB gerou no Abaqus a Figura 21, ilustrando os nós danificados em vermelho. Comparando com a seção em destaque na Figura 16, observa-se que a localização foi realizada de forma correta.

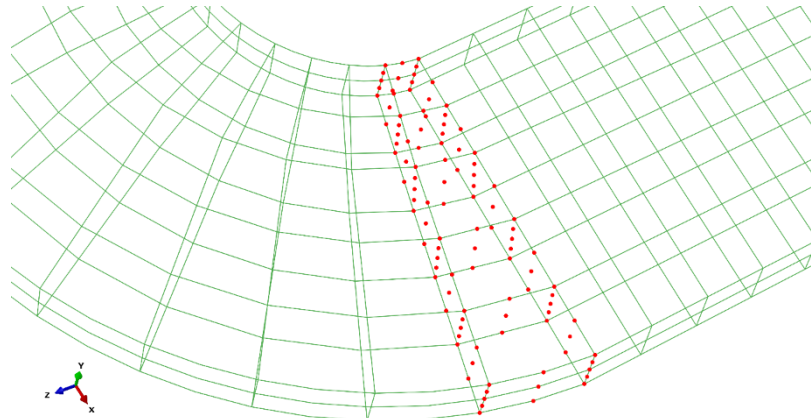


Figura 21 – Nós identificados como danificados, cenário 1

5.3.2 Cenário 2

No segundo cenário, foram considerados danificados os elementos 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624 e 625, conforme ilustrado na Figura 22.

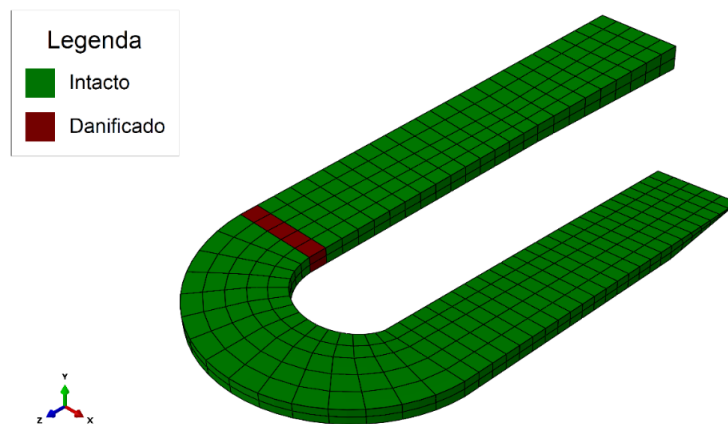


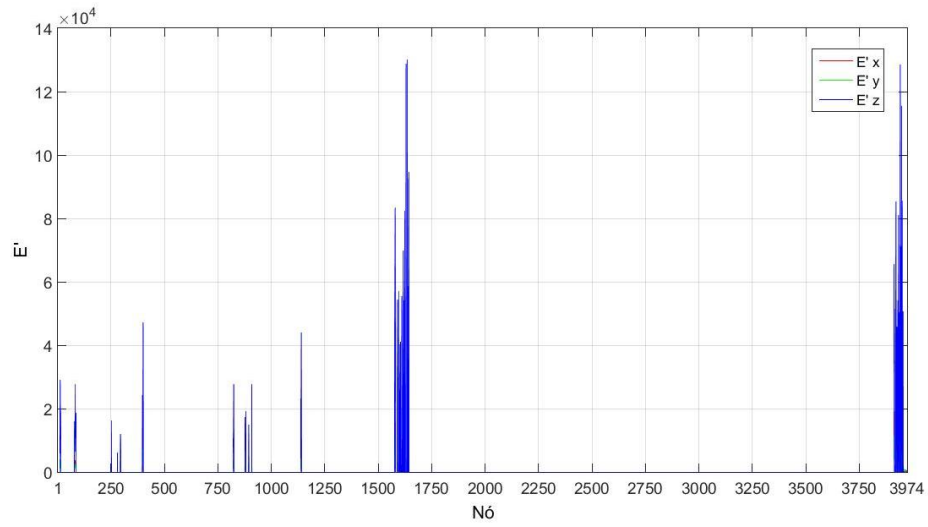
Figura 22 - Elementos danificados, cenário 2

As frequências da estrutura danificada para os três casos de intensidade de dano podem ser observadas na Tabela 5.

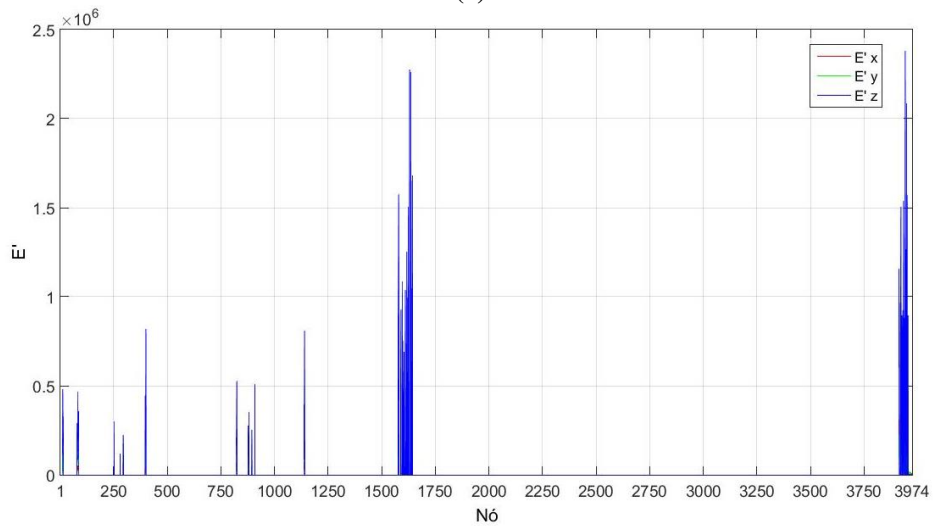
Tabela 5 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 2

Modo	ω (rad/s) para			
	Caso intacto	Dano de 5%	Dano de 50%	Dano de 90%
1º	4,2757	4,2739	4,2434	4,0511
2º	7,9572	7,9521	7,8720	7,4412
3º	10,6413	10,6389	10,5985	10,3601
4º	14,2782	14,2745	14,2126	13,8489
5º	17,7422	17,7352	17,6187	16,9440

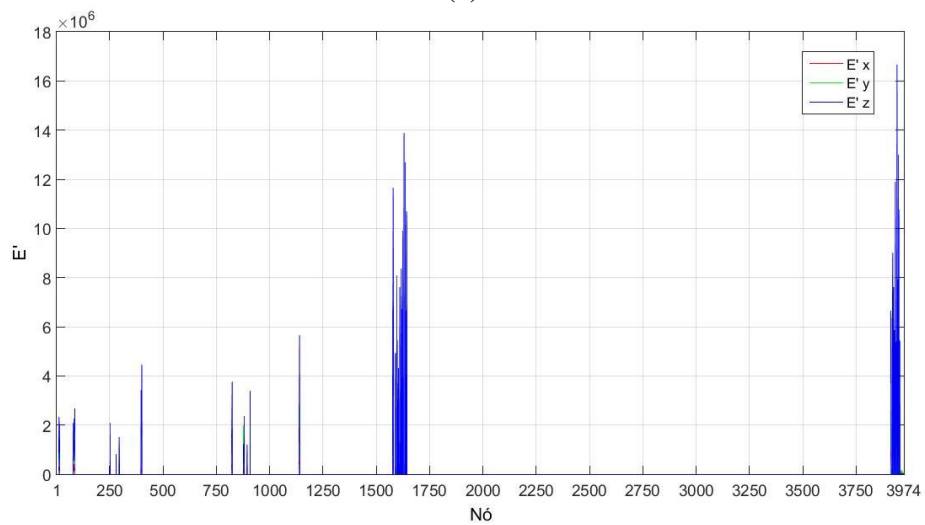
A Figura 23 apresenta os gráficos de E' , utilizados para a identificação dos nós danificados.



(a)



(b)



(c)

Figura 23 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 2
(a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%

Os critérios utilizados para a identificação de elementos danificados foram os mesmos apresentados para o cenário 1, tendo sido obtidos os resultados apresentados nas Figuras 24 e 25.

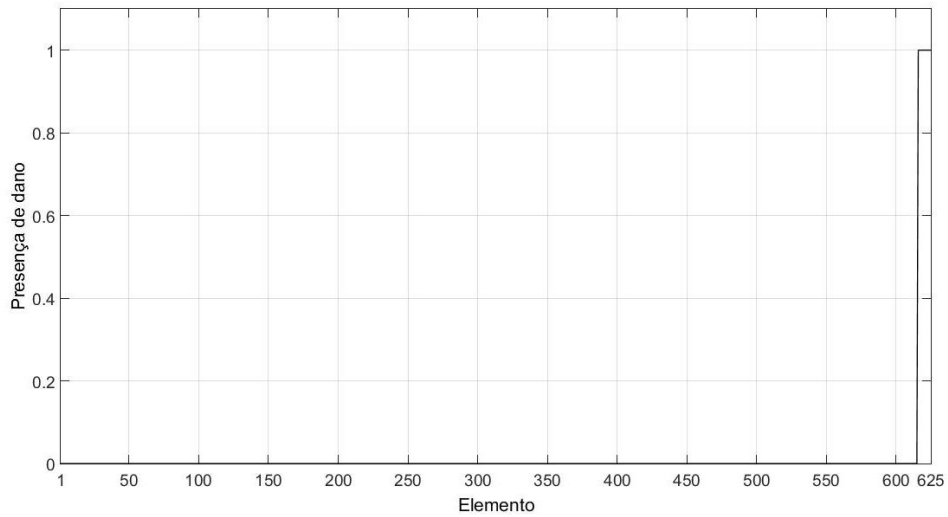


Figura 24 – Localização dos elementos danificados, cenário 2

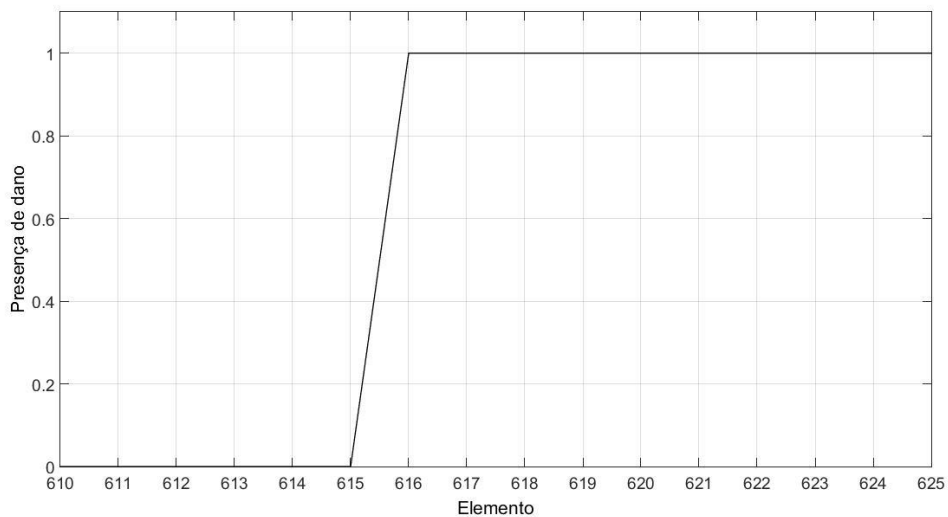
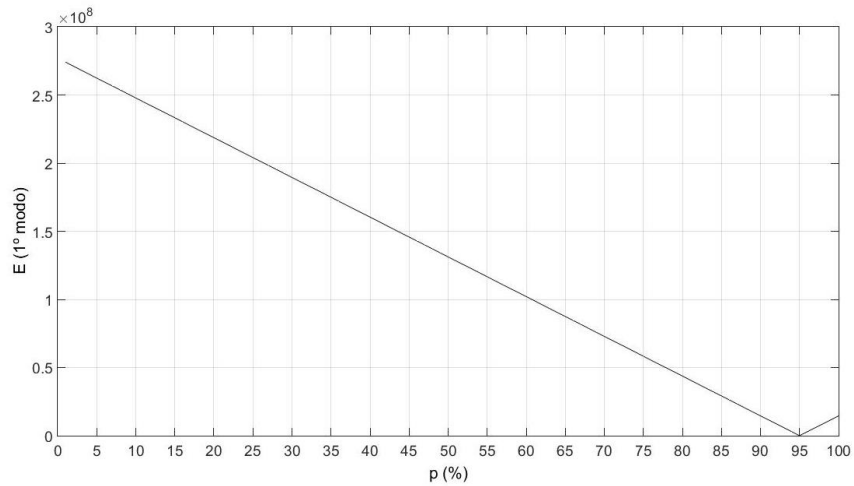
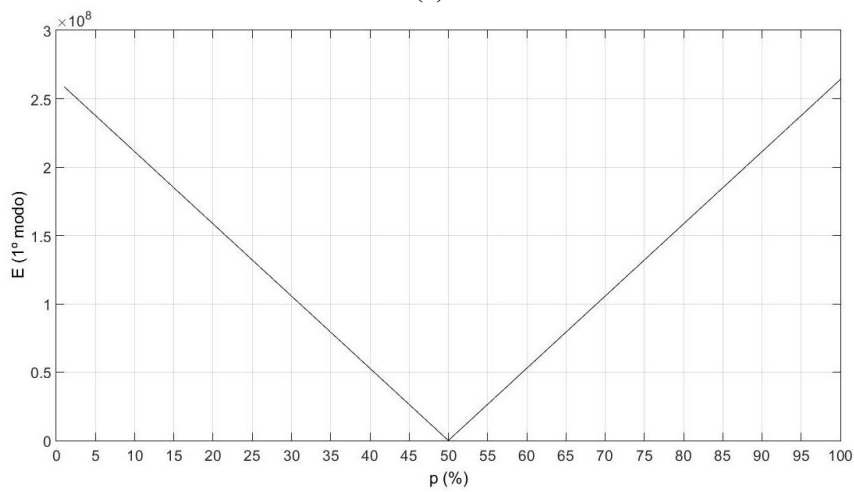


Figura 25 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 2

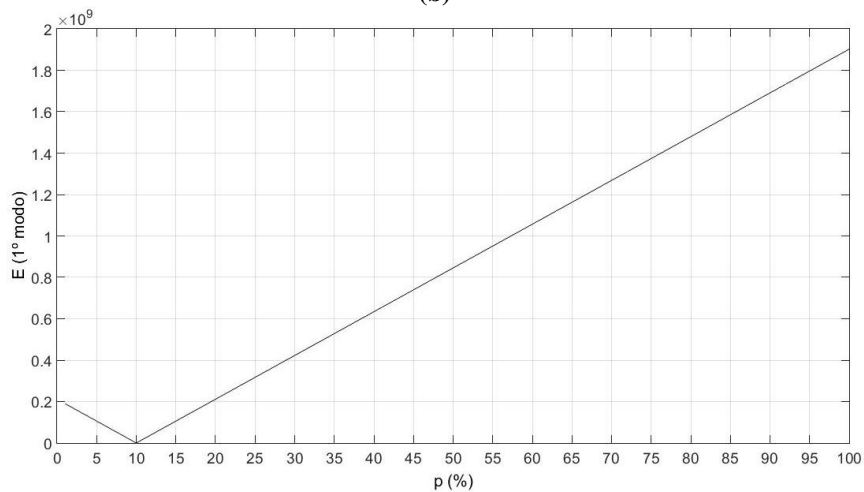
Após a localização dos nós danificados, é realizada a etapa da quantificação, estando os resultados apresentados na Figura 26.



(a)



(b)



(c)

Figura 26 – Quantificação do dano, cenário 2 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%

Como visto anteriormente, a intensidade do dano é dada por ‘1-p’. Os valores de p obtidos foram de 95%, 50% e 10% resultando, respectivamente, nos valores esperados de dano de 5%, 50% e 90%.

Por fim, o programa em MATLAB gerou no Abaqus a Figura 27, ilustrando os nós danificados em vermelho. Comparando com a seção em destaque na Figura 22, observa-se que a localização foi realizada de forma correta.

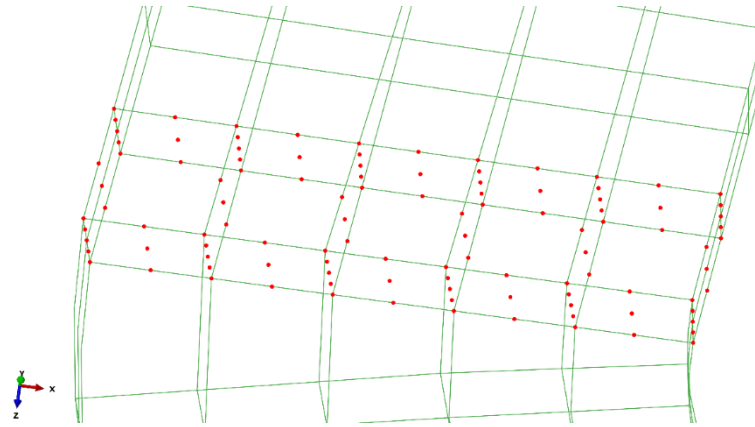


Figura 27 – Nós identificados como danificados, cenário 2

5.3.3 Cenário 3

No terceiro cenário, foram considerados danificados os elementos 241, 242, 275, 309, 310, 343, 344, 377 e 378, conforme ilustrado na Figura 28.

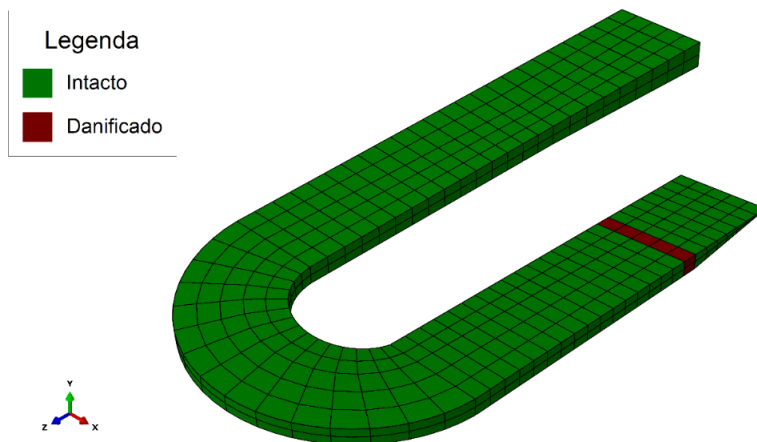


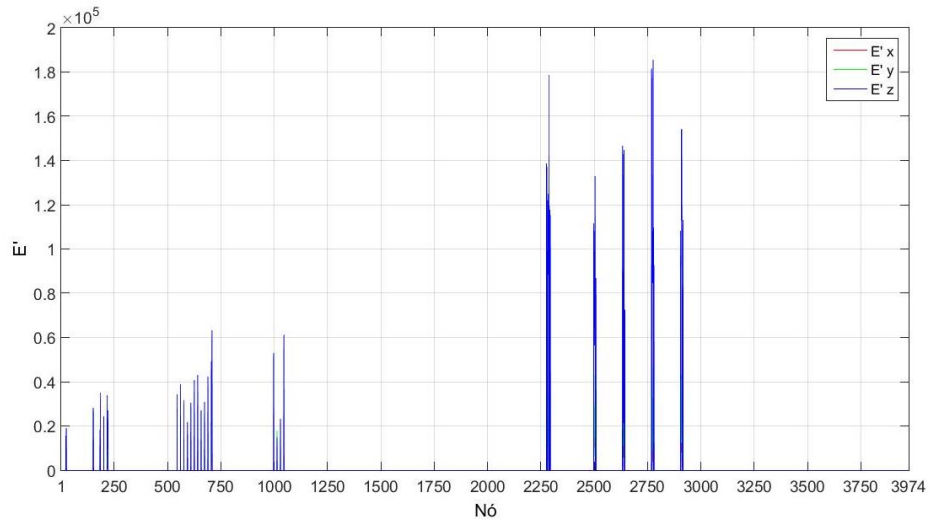
Figura 28 - Elementos danificados, cenário 3

As frequências da estrutura danificada para os três casos de intensidade de dano podem ser observadas na Tabela 6.

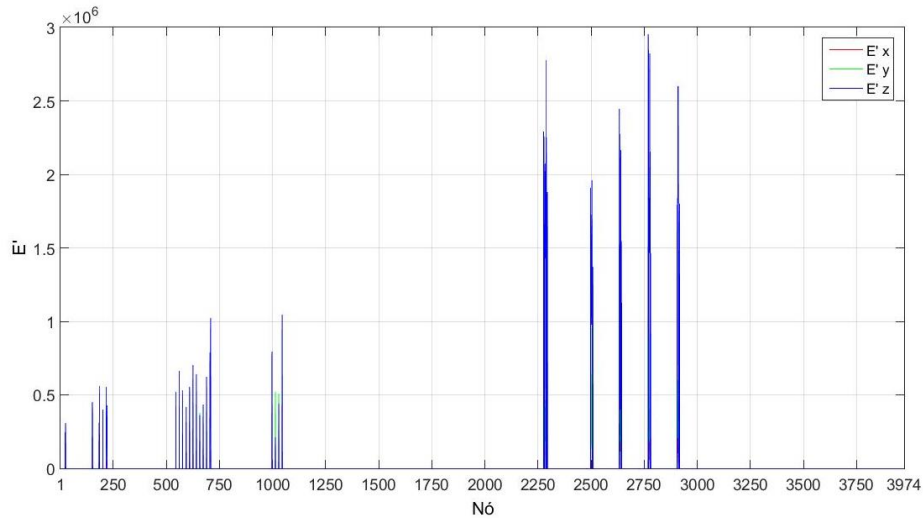
Tabela 6 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 3

Modo	ω (rad/s) para			
	Caso intacto	Dano de 5%	Dano de 50%	Dano de 90%
1°	4,2757	4,2705	4,1886	3,8152
2°	7,9572	7,9500	7,8416	7,4477
3°	10,6413	10,6241	10,3596	9,2955
4°	14,2782	14,2552	13,9082	16,1197
5°	17,7422	17,7092	17,2494	12,6706

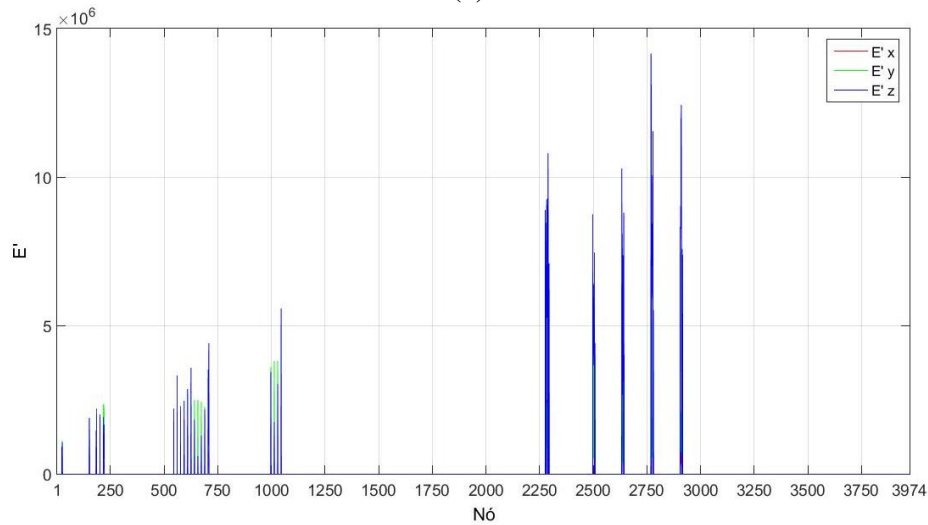
A Figura 29 apresenta os gráficos de E' , utilizados para a identificação dos nós danificados.



(a)



(b)



(c)

Figura 29 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 3
(a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%

Para que o nó fosse considerado danificado, foi escolhida a precisão de $E' \geq 0,01$. Após a definição dos nós danificados, a condição escolhida para que o elemento fosse considerado danificado foi que 17 de seus nós estivessem danificados, já que 3 nós de cada elemento encontravam-se engastados e, logo, não apresentaram valor de erro. Como nos três casos analisados, os elementos danificados eram os mesmos, foi gerado apenas um gráfico de localização de dano (Figuras 30 e 31).

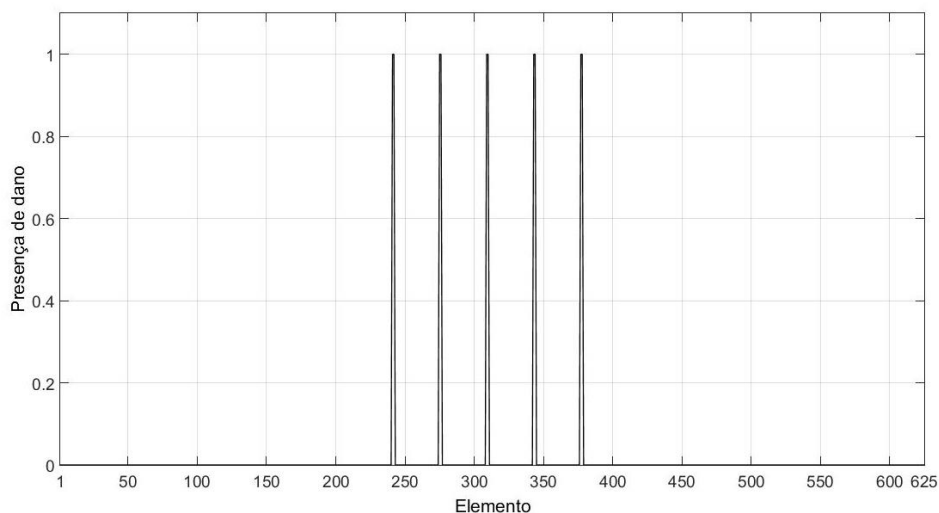


Figura 30 – Localização dos elementos danificados, cenário 3

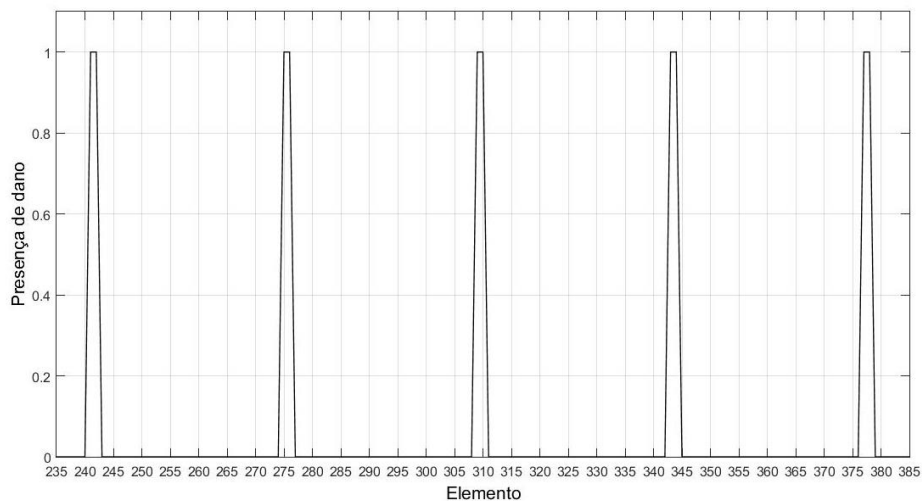
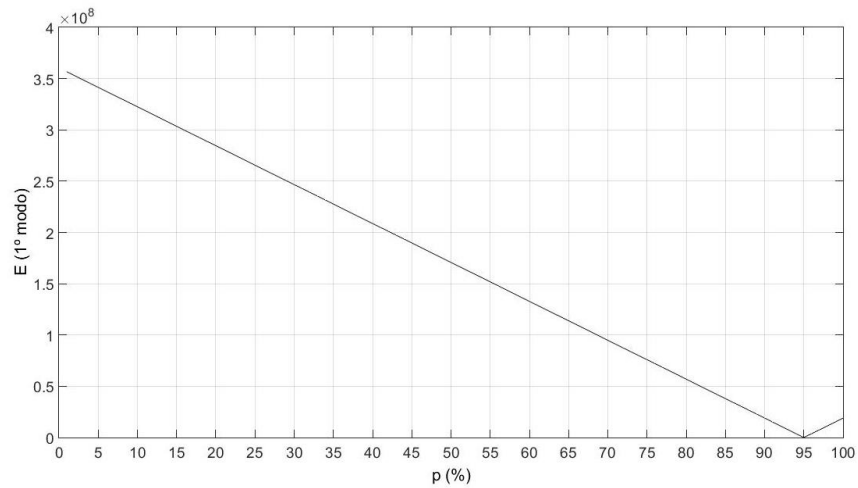
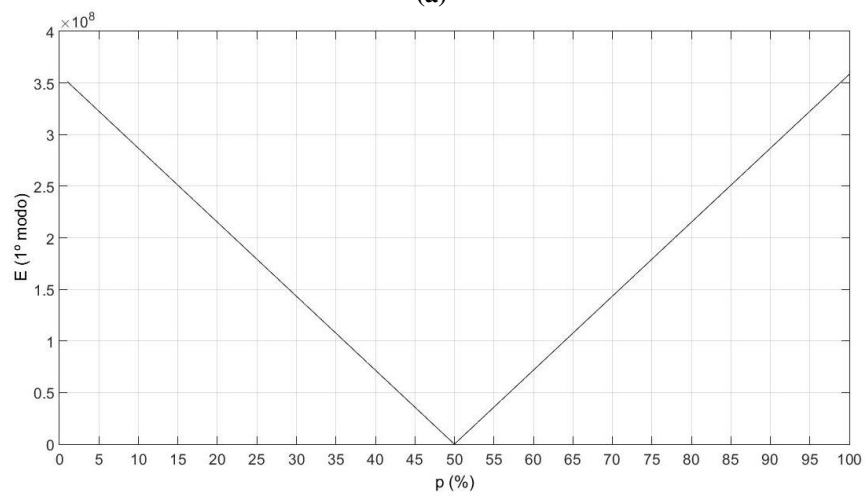


Figura 31 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 3

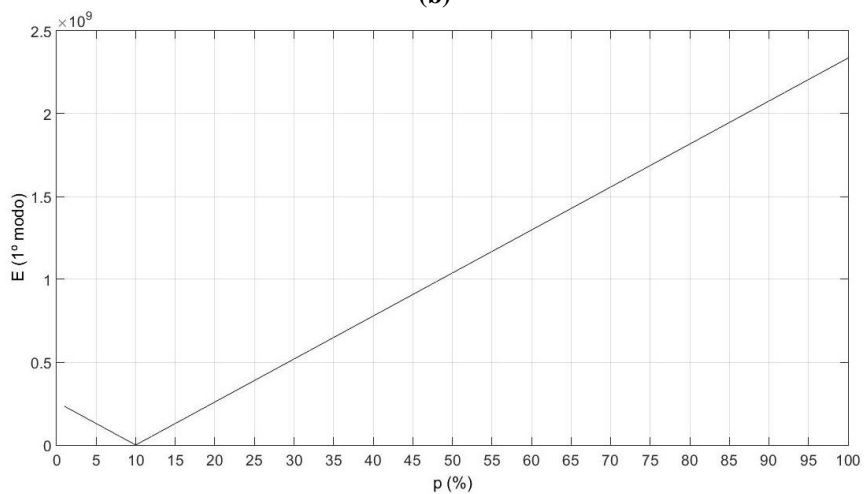
Após a localização dos nós danificados, é realizada a etapa da quantificação, estando os resultados apresentados na Figura 32.



(a)



(b)



(c)

Figura 32 – Quantificação do dano, cenário 3 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%

Como visto anteriormente, a intensidade do dano é dada por ‘1-p’. Os valores de p obtidos foram de 95%, 50% e 10% resultando, respectivamente, nos valores esperados de dano de 5%, 50% e 90%.

Por fim, o programa em MATLAB gerou no Abaqus a Figura 33, ilustrando os nós danificados em vermelho. Em laranja, são mostrados os nós engastados. Comparando com a seção em destaque na Figura 28, observa-se que a localização foi realizada de forma correta.

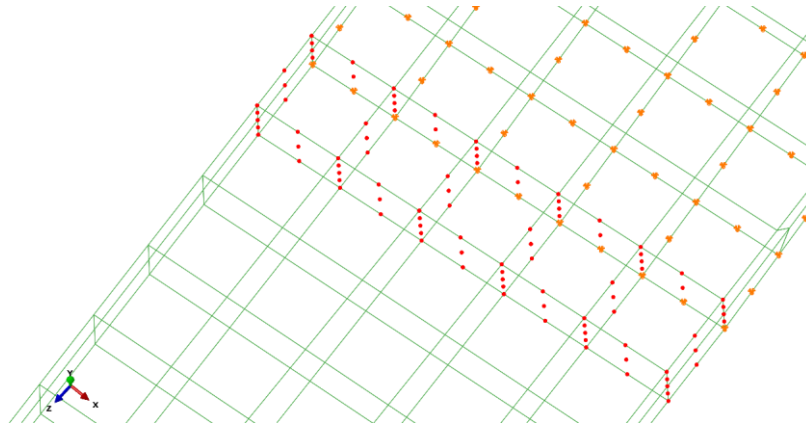


Figura 33 – Nós identificados como danificados, cenário 3

5.3.4 Cenário 4

No quarto cenário, foram considerados danificados os elementos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, conforme ilustrado na Figura 34.

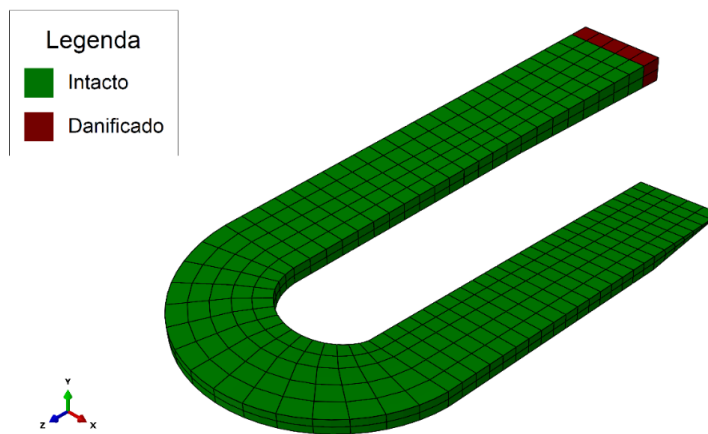


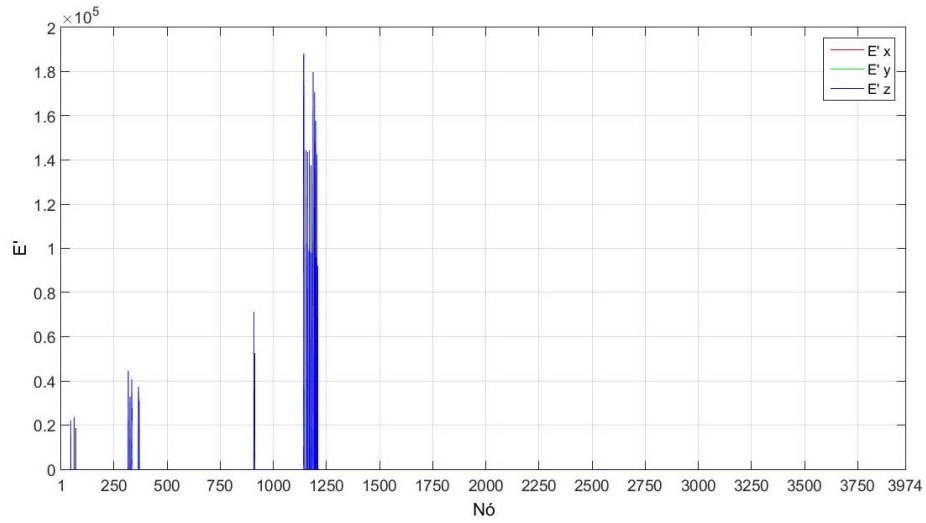
Figura 34 - Elementos danificados, cenário 4

As frequências da estrutura danificada para os três casos de intensidade de dano podem ser observadas na Tabela 7.

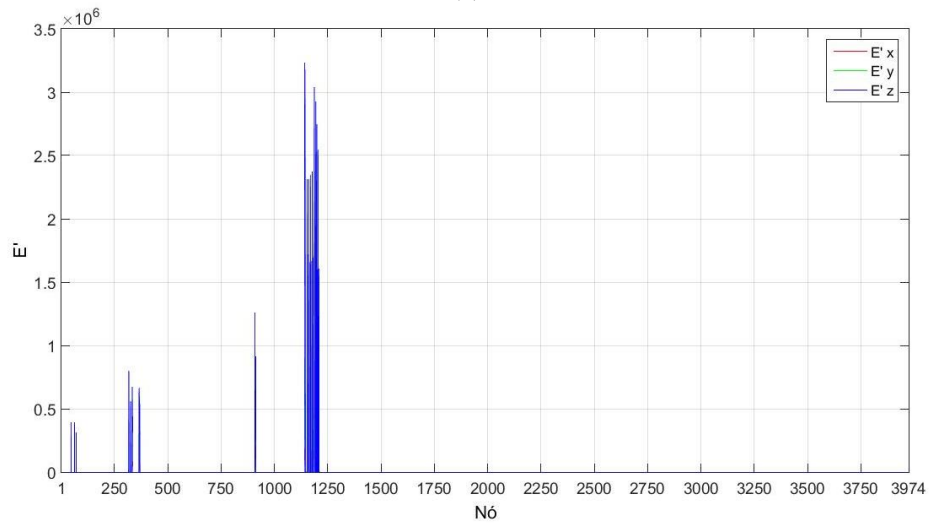
Tabela 7 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 4

Modo	ω (rad/s) para			
	Caso intacto	Dano de 5%	Dano de 50%	Dano de 90%
1º	4,2757	4,2726	4,2212	3,9311
2º	7,9572	7,9506	7,8419	7,3124
3º	10,6413	10,6265	10,3853	9,3400
4º	14,2782	14,2589	13,9520	12,7284
5º	17,7422	17,7263	17,4808	16,6352

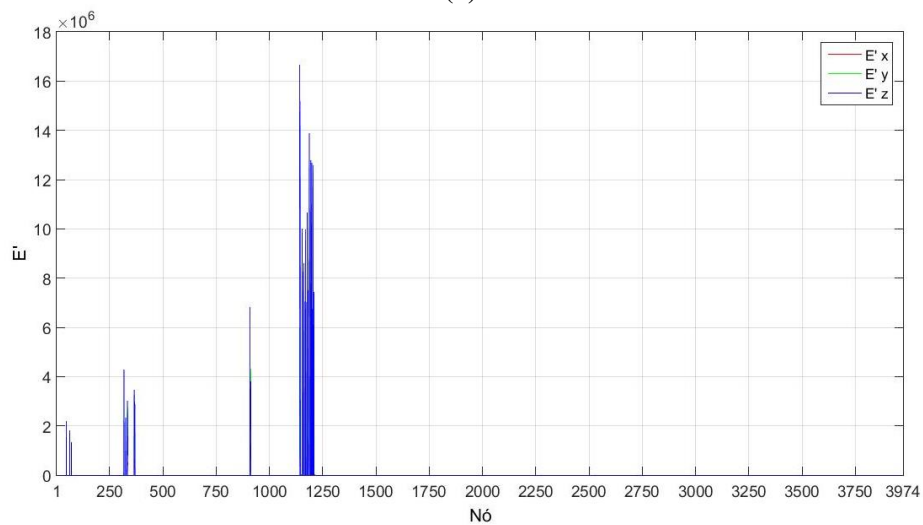
A Figura 35 apresenta os gráficos de E' , utilizados para a identificação dos nós danificados.



(a)



(b)



(c)

**Figura 35 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 4
(a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%**

Para que o nó fosse considerado danificado, foi escolhida a precisão de $E' \geq 0,01$. Após a definição dos nós danificados, a condição escolhida para que o elemento fosse considerado danificado foi que 12 de seus nós estivessem danificados, já que 8 nós de cada elemento encontravam-se engastados e, logo, não apresentaram valor de erro. Como nos três casos analisados, os elementos danificados eram os mesmos, foi gerado apenas um gráfico de localização de dano (Figuras 36 e 37).

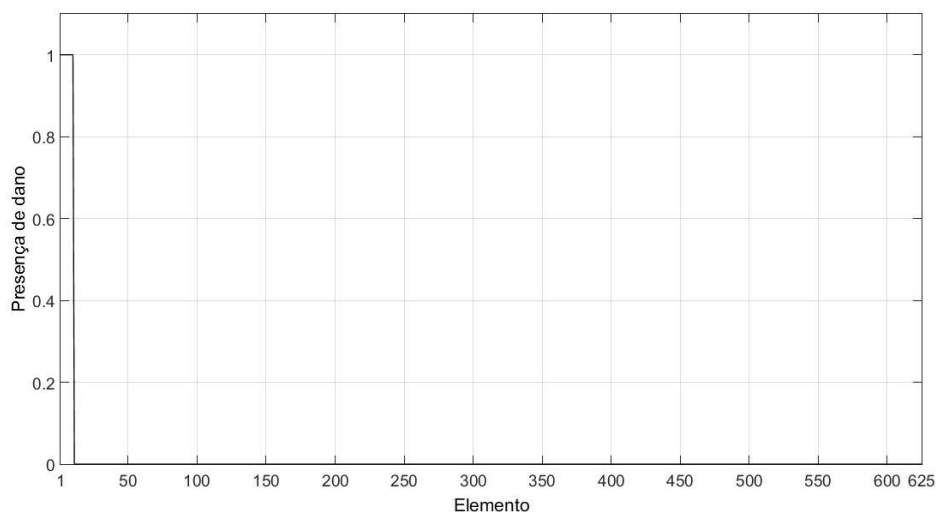


Figura 36 – Localização dos elementos danificados, cenário 4

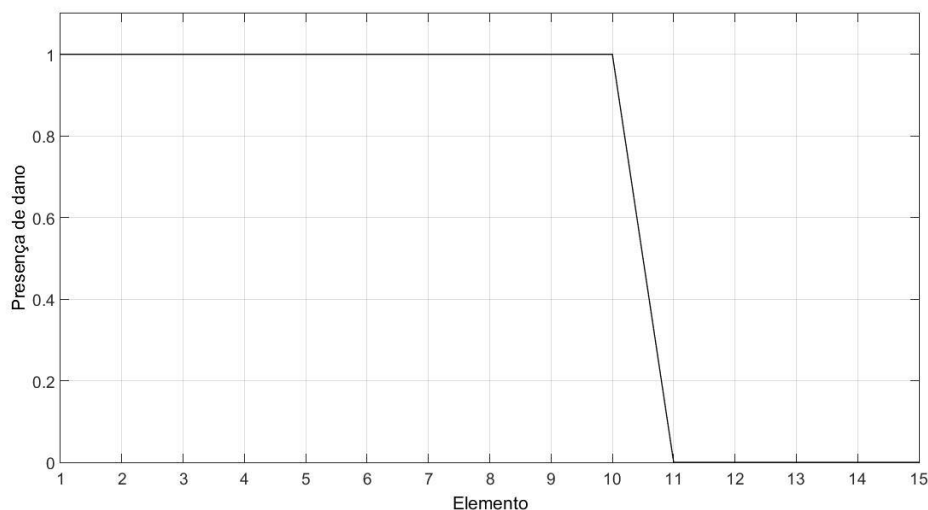
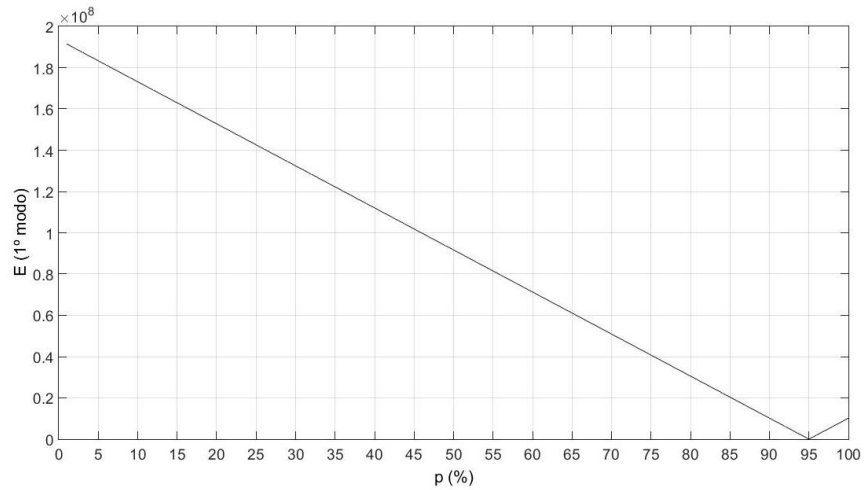
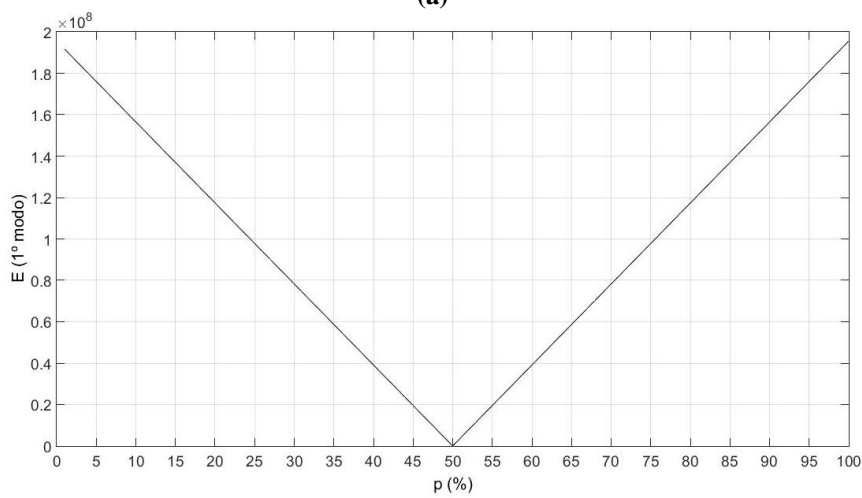


Figura 37 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 4

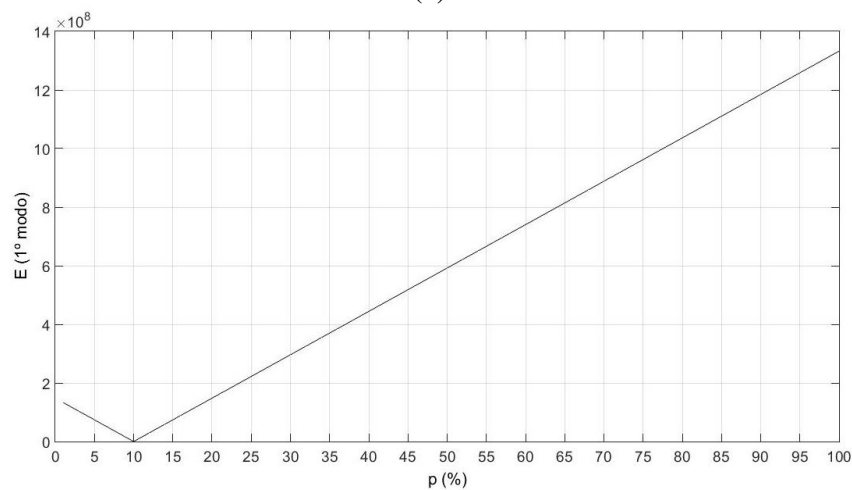
Após a localização dos nós danificados, é realizada a etapa da quantificação, estando os resultados apresentados na Figura 38.



(a)



(b)



(c)

Figura 38 – Quantificação do dano, cenário 4 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%

Como visto anteriormente, a intensidade do dano é dada por '1-p'. Os valores de p obtidos foram de 95%, 50% e 10% resultando, respectivamente, nos valores esperados de dano de 5%, 50% e 90%.

Por fim, o programa em MATLAB gerou no Abaqus a Figura 39, ilustrando os nós danificados em vermelho. Em laranja, são mostrados os nós engastados. Comparando com a seção em destaque na Figura 34, observa-se que a localização foi realizada de forma correta.

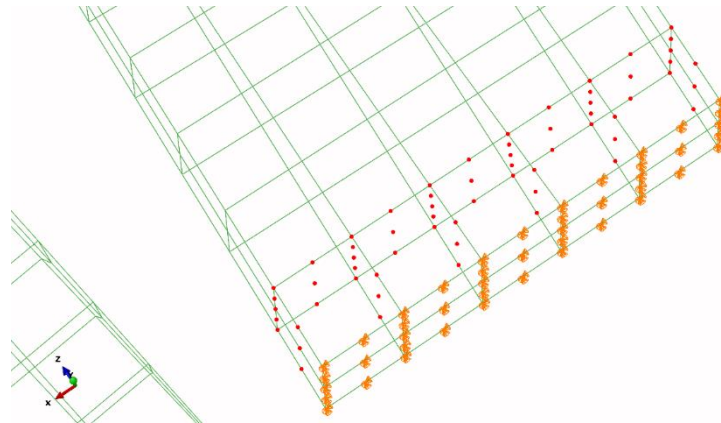


Figura 39 – Nós identificados como danificados, cenário 4

5.3.5 Cenário 5

No quinto cenário, foram considerados danificados os elementos 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169 e 170, conforme ilustrado na Figura 40.

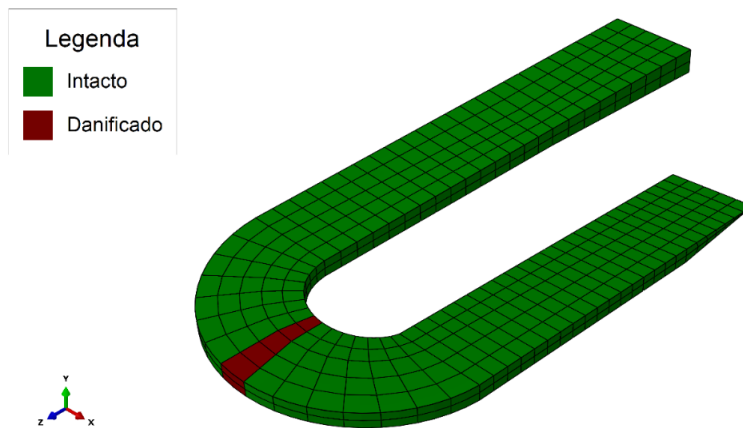


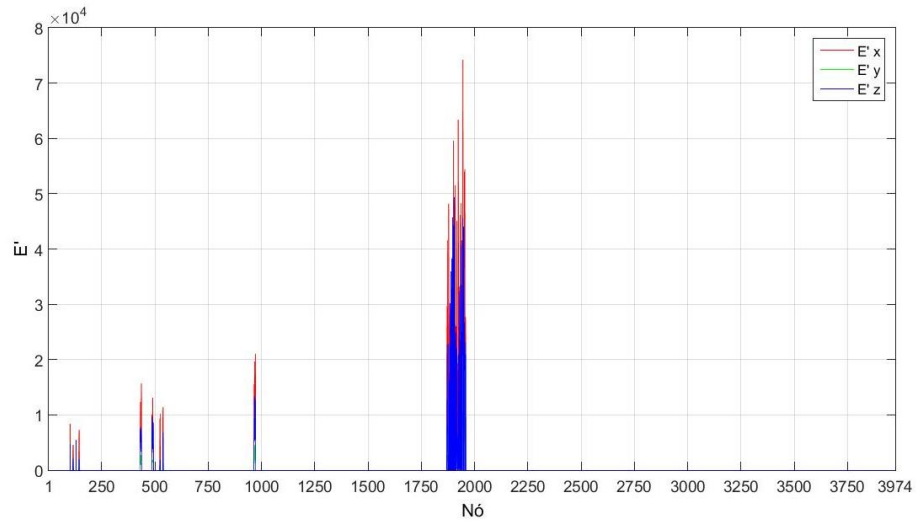
Figura 40 - Elementos danificados, cenário 5

As frequências da estrutura danificada para os três casos de intensidade de dano podem ser observadas na Tabela 8.

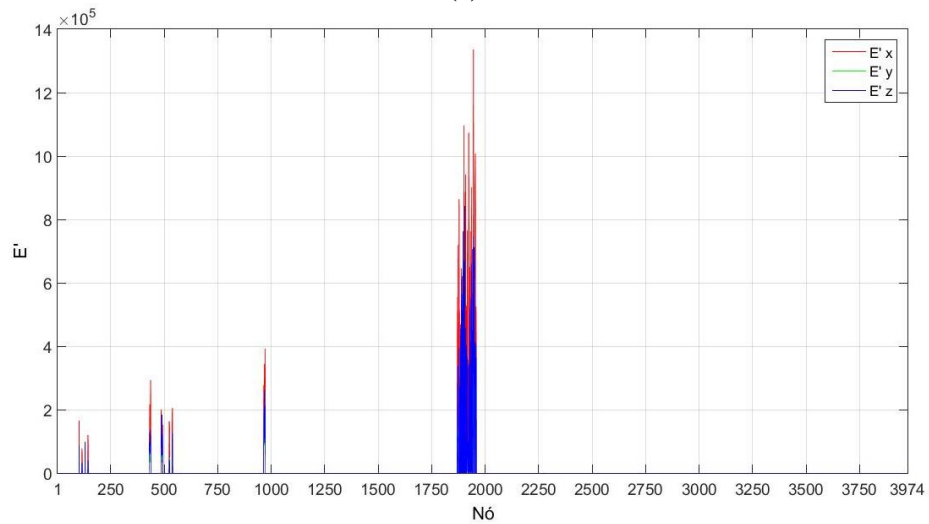
Tabela 8 - Frequências naturais da estrutura danificada, cenário 5

Modo	ω (rad/s) para			
	Caso intacto	Dano de 5%	Dano de 50%	Dano de 90%
1°	4,2757	4,2749	4,2611	4,1693
2°	7,9572	7,9531	7,8855	7,5073
3°	10,6413	10,6403	10,6240	10,5277
4°	14,2782	14,2741	14,2082	13,8303
5°	17,7422	17,7354	17,6424	17,3057

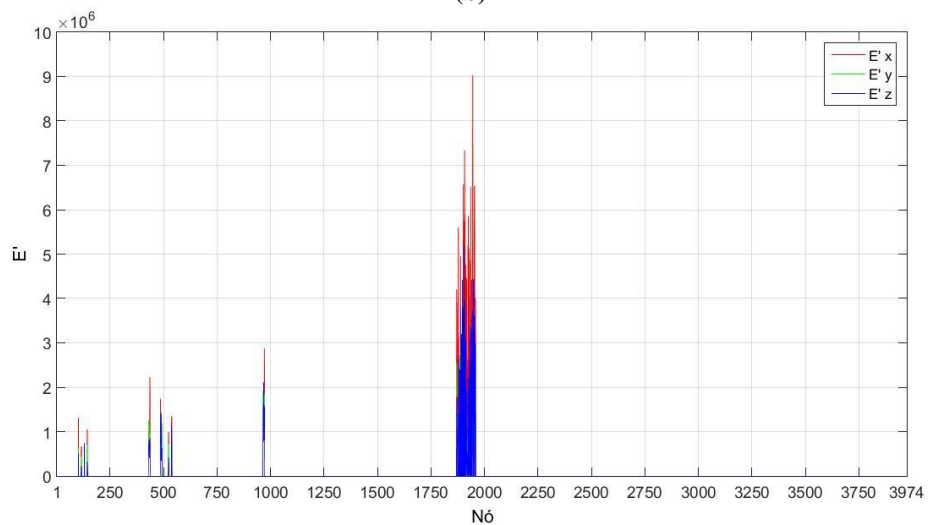
A Figura 41 apresenta os gráficos de E' , utilizados para a identificação dos nós danificados.



(a)



(b)



(c)

**Figura 41 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 5
(a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%**

Os critérios utilizados para a identificação de elementos danificados foram os mesmos utilizados nos cenários 1 e 2, estando os resultados ilustrados nas Figuras 42 e 43.

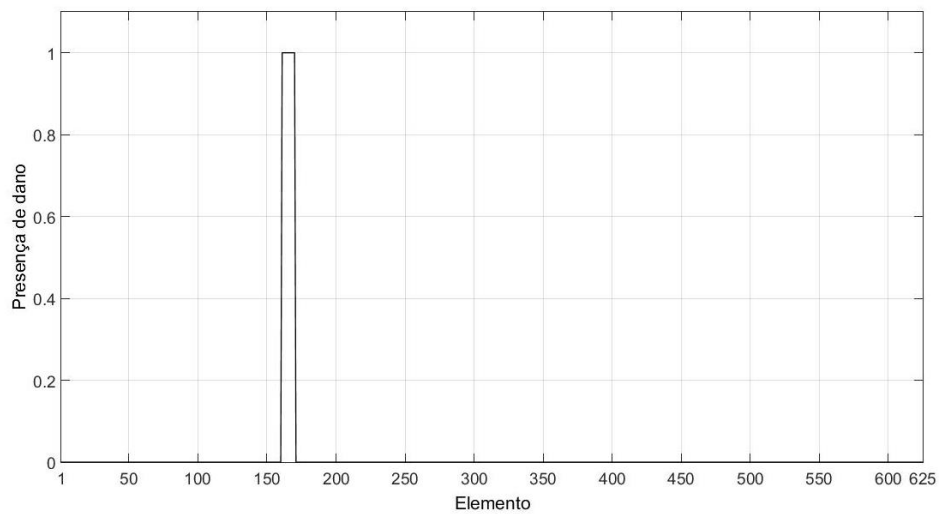


Figura 42 – Localização dos elementos danificados, cenário 5

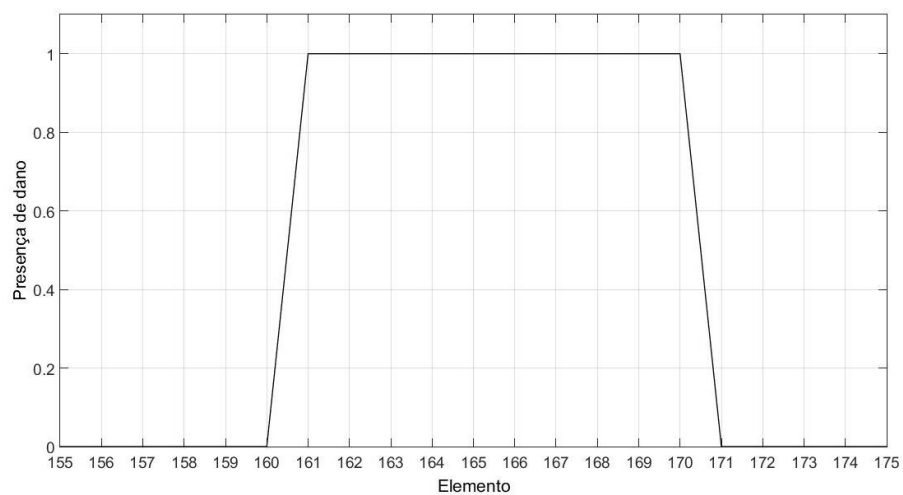
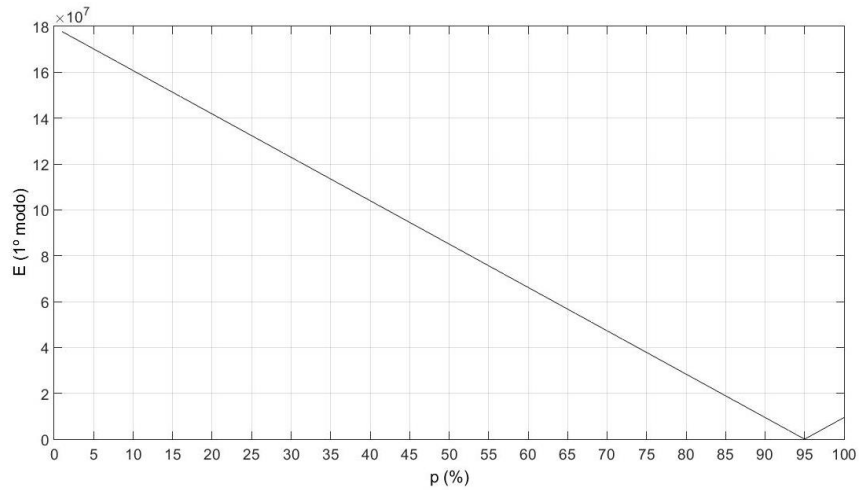
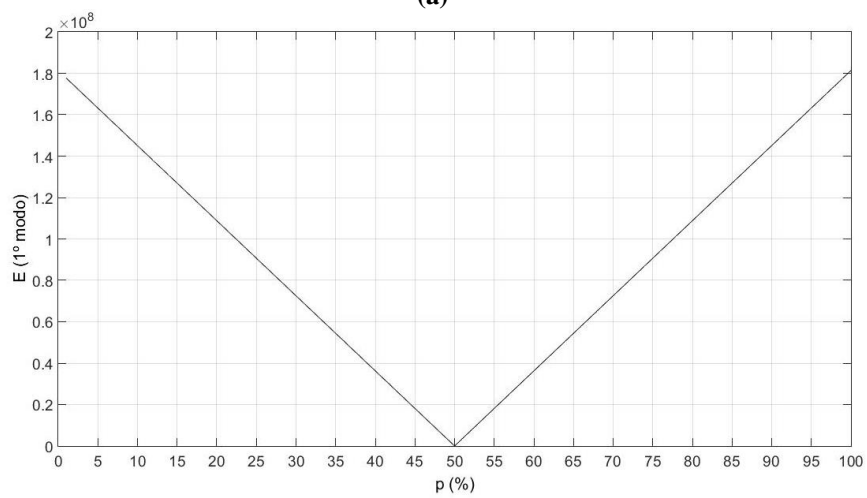


Figura 43 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 5

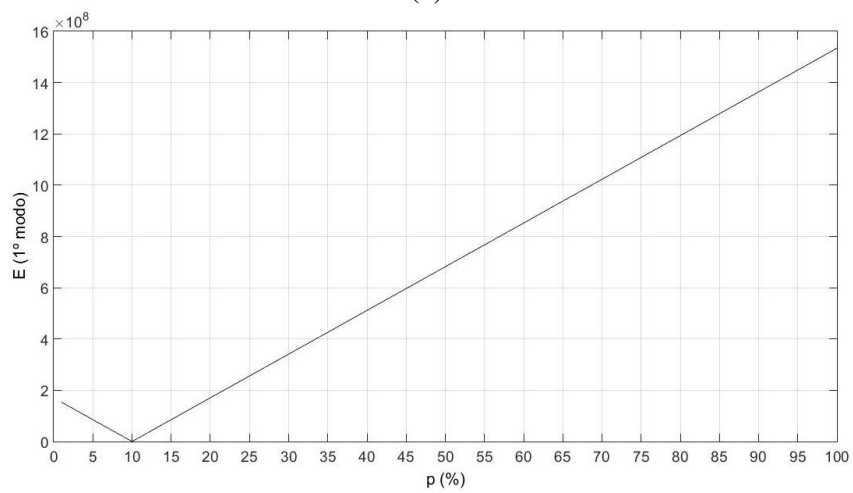
Após a localização dos nós danificados, é realizada a etapa da quantificação, estando os resultados apresentados na Figura 44.



(a)



(b)



(c)

Figura 44 – Quantificação do dano, cenário 5 (a) Dano de 5% (b) Dano de 50% (c) Dano de 90%

Como visto anteriormente, a intensidade do dano é dada por '1-p'. Os valores de p obtidos foram de 95%, 50% e 10% resultando, respectivamente, nos valores esperados de dano de 5%, 50% e 90%.

Por fim, o programa em MATLAB gerou no Abaqus a Figura 45, ilustrando os nós danificados em vermelho. Comparando com a seção em destaque na Figura 40, observa-se que a localização foi realizada de forma correta.

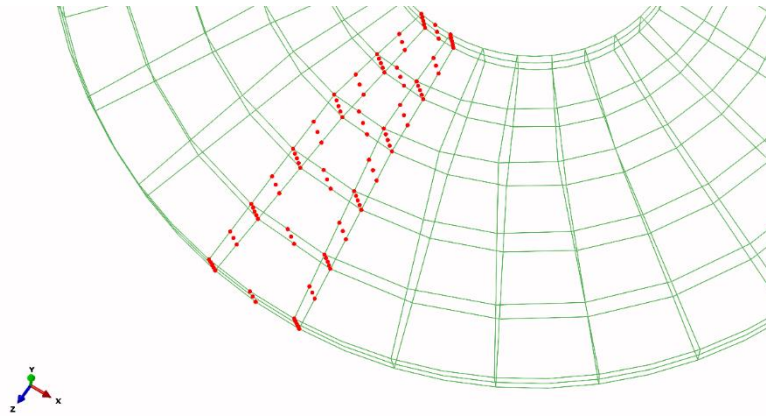


Figura 45 – Nós identificados como danificados, cenário 5

5.3.6 Cenário 6

No sexto cenário, novamente foram considerados danificados os elementos 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169 e 170. Como dito anteriormente, neste cenário existiriam de forma simultânea na estrutura elementos com intensidades de danos diferentes. Assim, o cenário consistia nos elementos 161, 162, 169 e 170 com dano de 90%, elementos 163, 164, 167 e 168 com dano de 50% e elementos 165 e 166 com dano de 5%, conforme ilustrado na Figura 46.

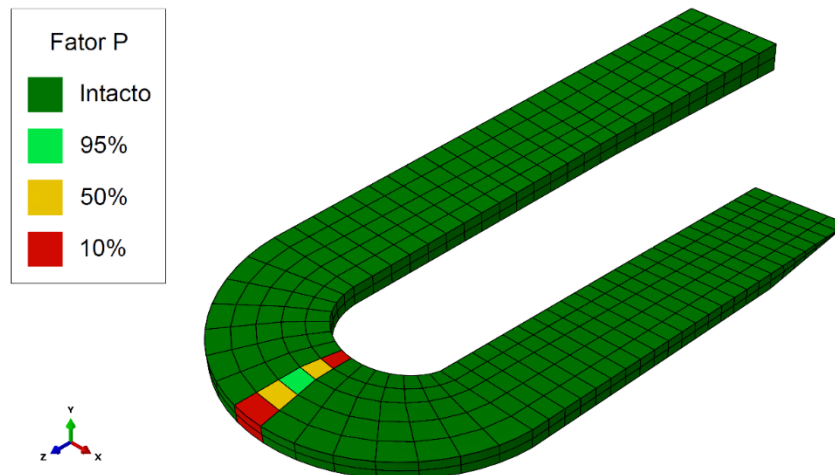


Figura 46 - Elementos danificados, cenário 6

As frequências da estrutura danificada podem ser observadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Frequências naturais da estrutura danificada: cenário 6

Modo	ω (rad/s) para	
	Caso intacto	Caso danificado
1°	4,2757	4,2526
2°	7,9572	7,6690
3°	10,6413	10,6103
4°	14,2782	14,1387
5°	17,7422	17,5502

A Figura 47 apresenta o gráfico de E' , utilizado para a identificação dos nós danificados.

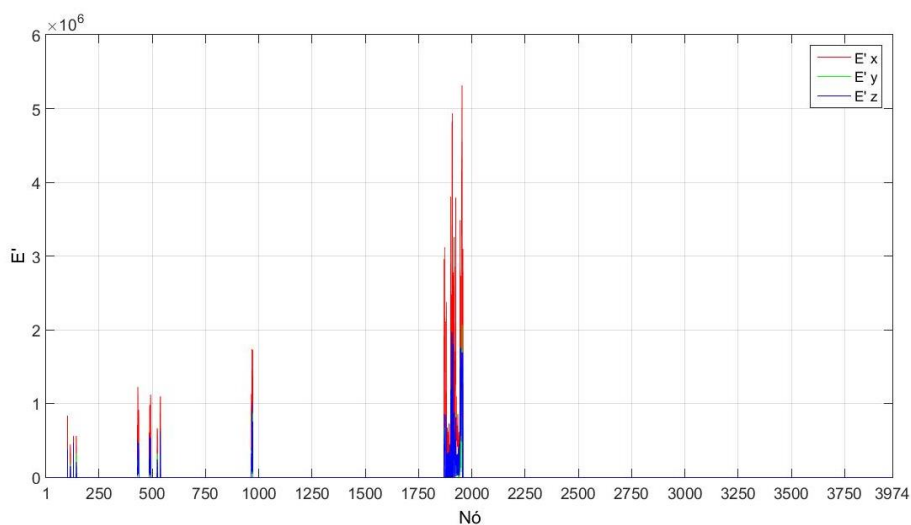


Figura 47 - Somatório do erro dos cinco primeiros modos de vibração de cada nó, cenário 6

Para que o nó fosse considerado danificado, foi escolhida a precisão de $E' \geq 0,01$. Após a definição dos nós danificados, a condição escolhida para que o elemento fosse considerado danificado foi que todos os seus 20 nós estivessem danificados. O gráfico de localização do dano pode ser observado nas Figuras 48 e 49.

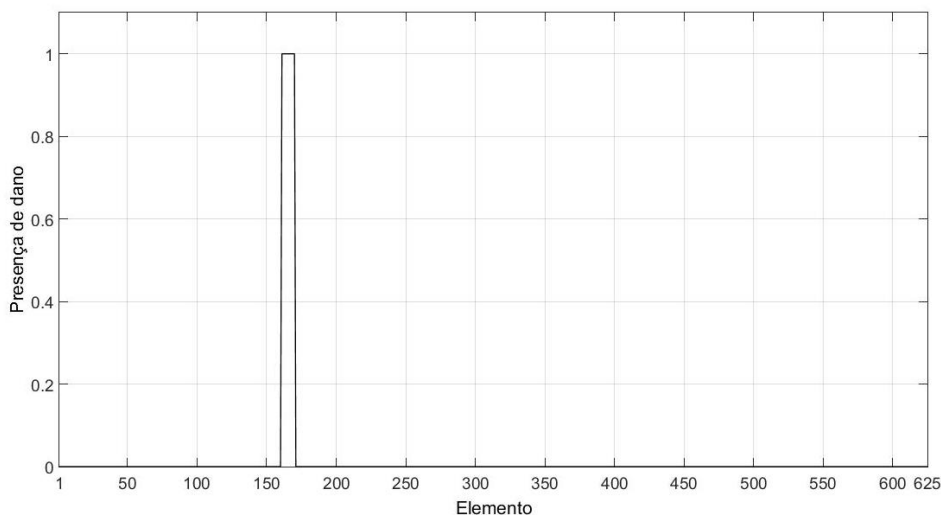


Figura 48 – Localização dos elementos danificados, cenário 6

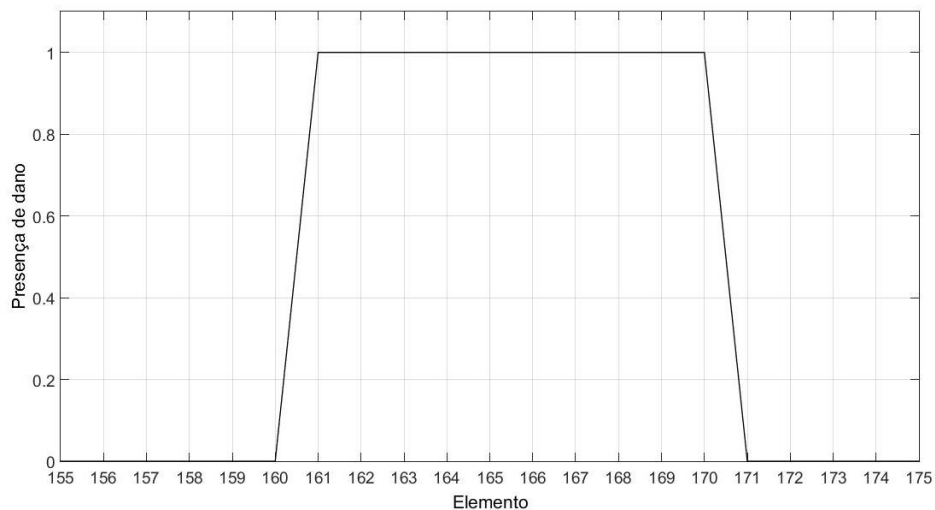


Figura 49 – Detalhe da localização dos elementos danificados, cenário 6

Como explicado no Capítulo 4 deste trabalho, a etapa de quantificação do dano é realizada de forma separada para cada elemento identificado como danificado, podendo ser necessária mais de uma tentativa de quantificação. Os resultados obtidos através da primeira tentativa podem ser observados nas Figuras de 50 a 59.

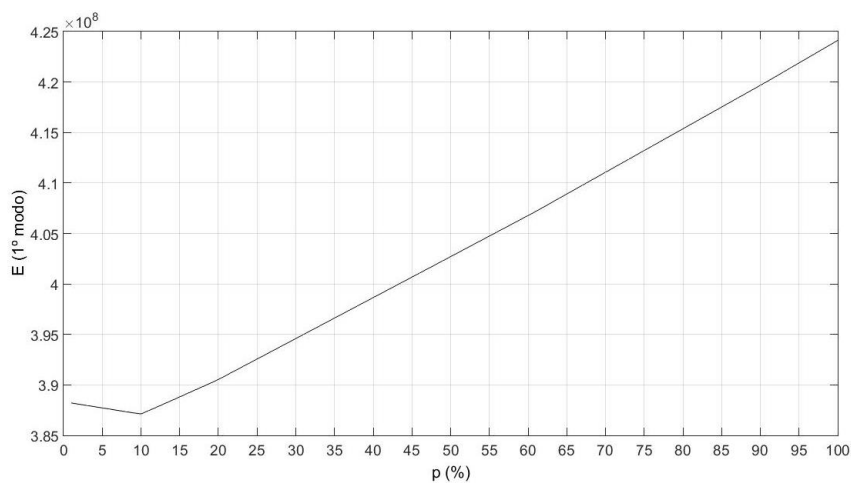


Figura 50 – Quantificação do dano, elemento 161, 1ª tentativa, cenário 6

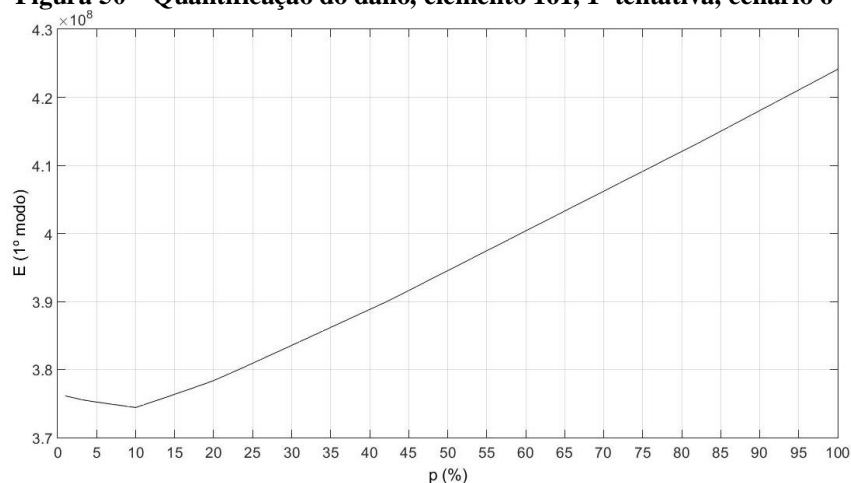


Figura 51 – Quantificação do dano, elemento 162, 1ª tentativa, cenário 6

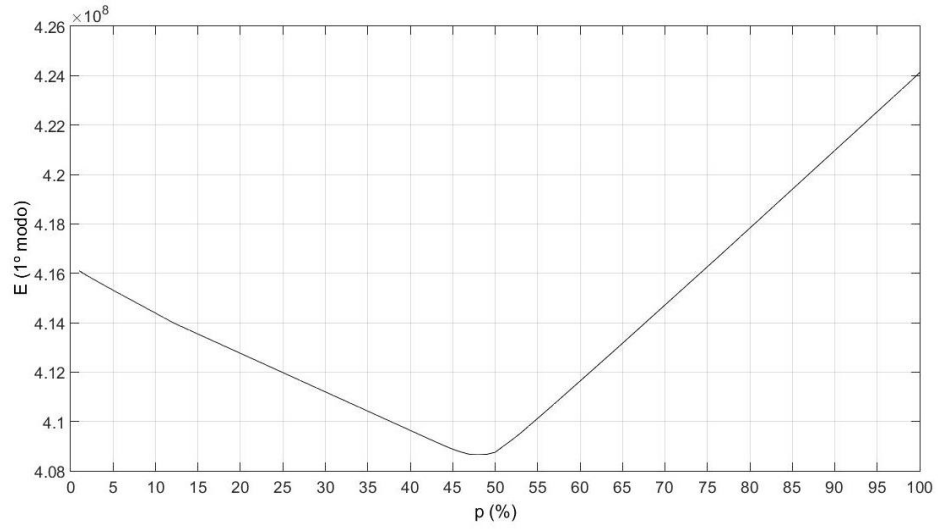


Figura 52 – Quantificação do dano, elemento 163, 1ª tentativa, cenário 6

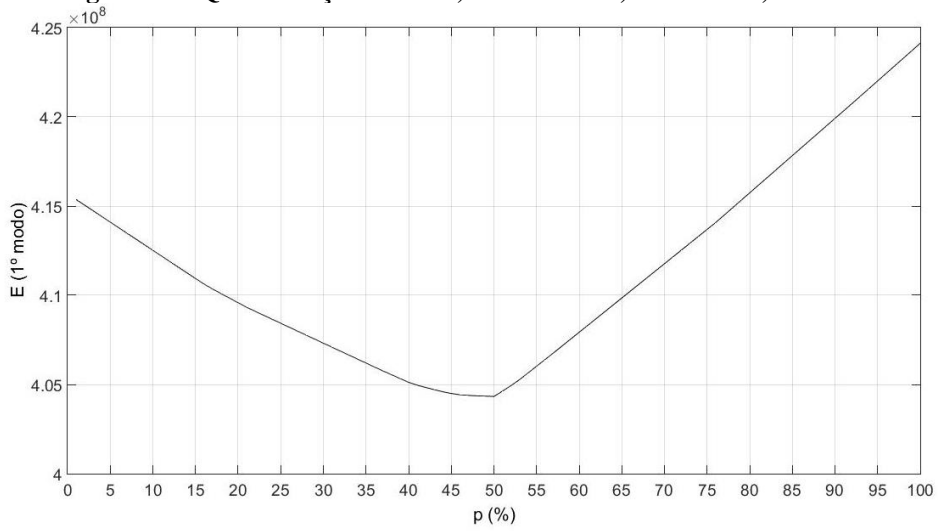


Figura 53 – Quantificação do dano, elemento 164, 1ª tentativa, cenário 6

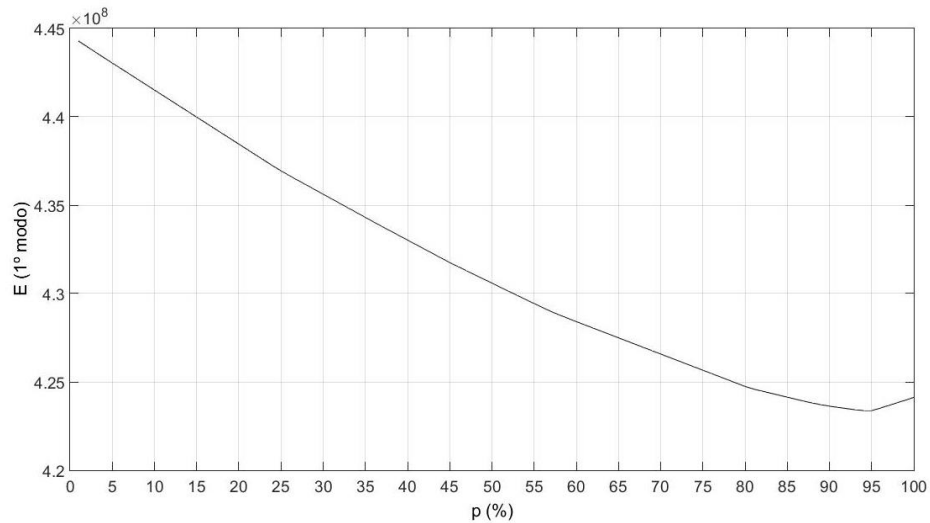


Figura 54 – Quantificação do dano, elemento 165, 1ª tentativa, cenário 6

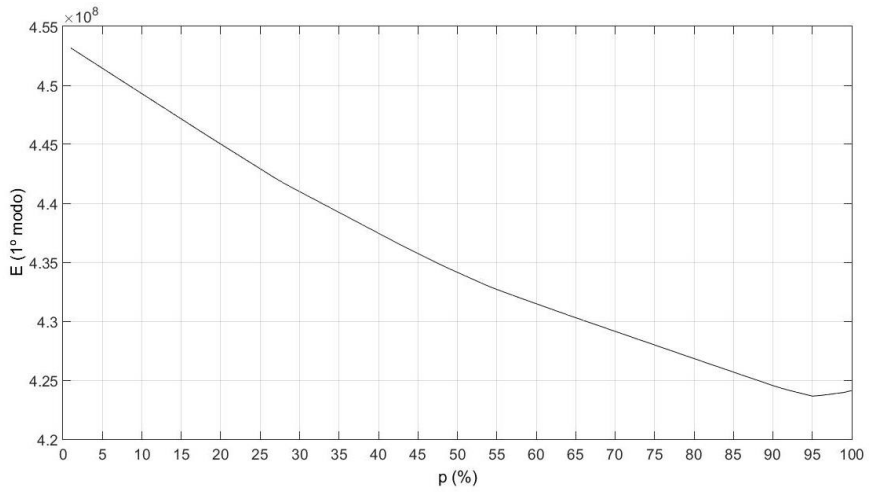


Figura 55 – Quantificação do dano, elemento 166, 1ª tentativa, cenário 6

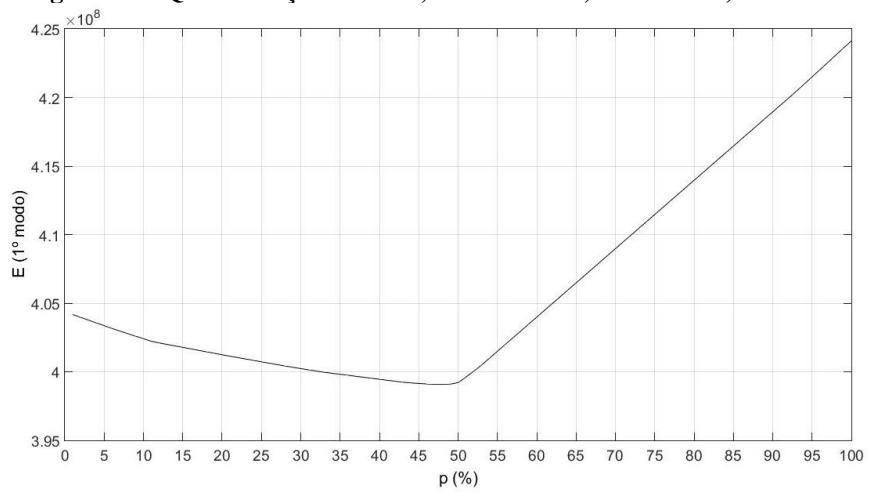


Figura 56 – Quantificação do dano, elemento 167, 1ª tentativa, cenário 6

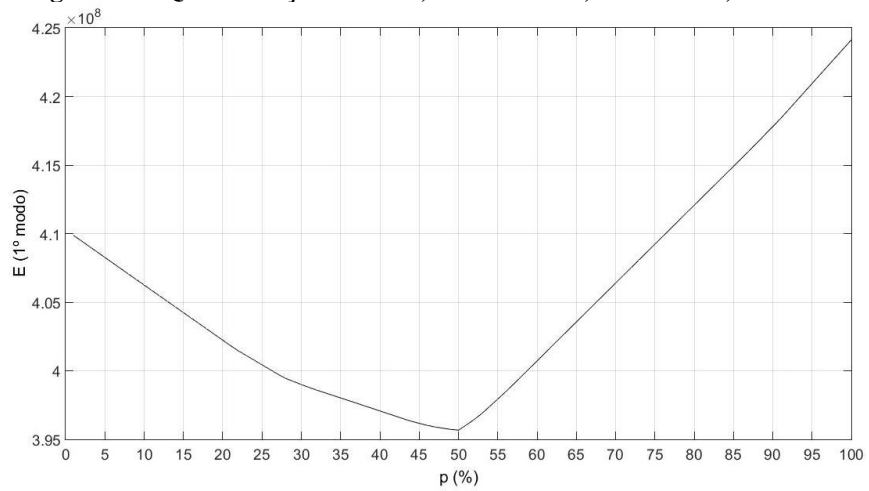


Figura 57 – Quantificação do dano, elemento 168, 1ª tentativa, cenário 6

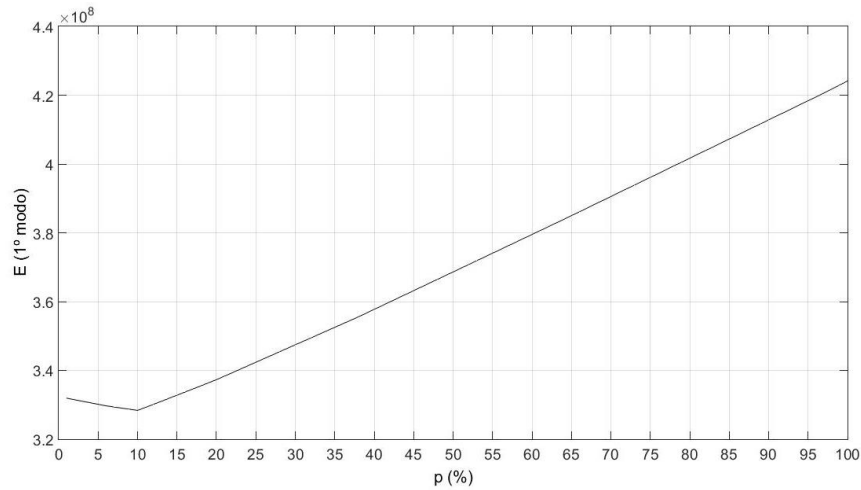


Figura 58 – Quantificação do dano, elemento 169, 1ª tentativa, cenário 6

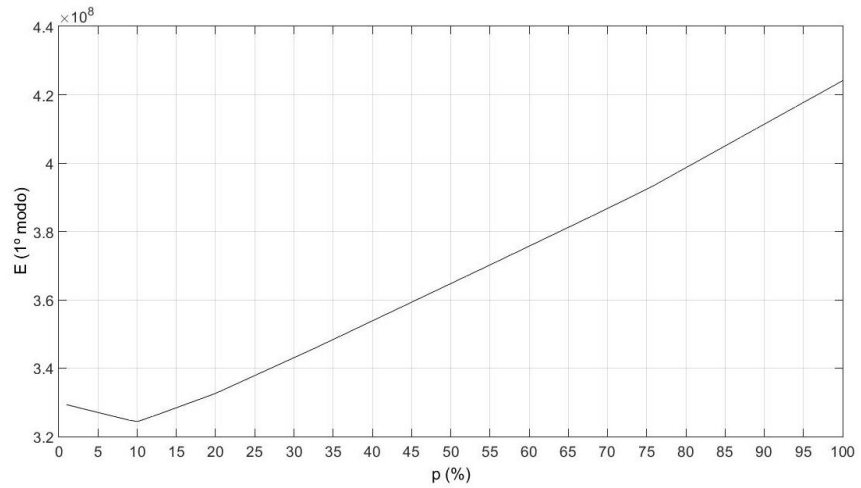


Figura 59 – Quantificação do dano, elemento 170, 1ª tentativa, cenário 6

Observa-se que apenas os gráficos dos elementos 161, 162, 169 e 170 apresentaram um mínimo bem definido, ou seja, apenas para esses elementos foi possível definir o valor do fator p. Dessa forma, a matriz de rigidez $\mathbf{K}''(p_{EDA})$ é atualizada e é realizada uma segunda tentativa de quantificação dos demais elementos, conforme apresentado nas Figuras de 60 a 65.

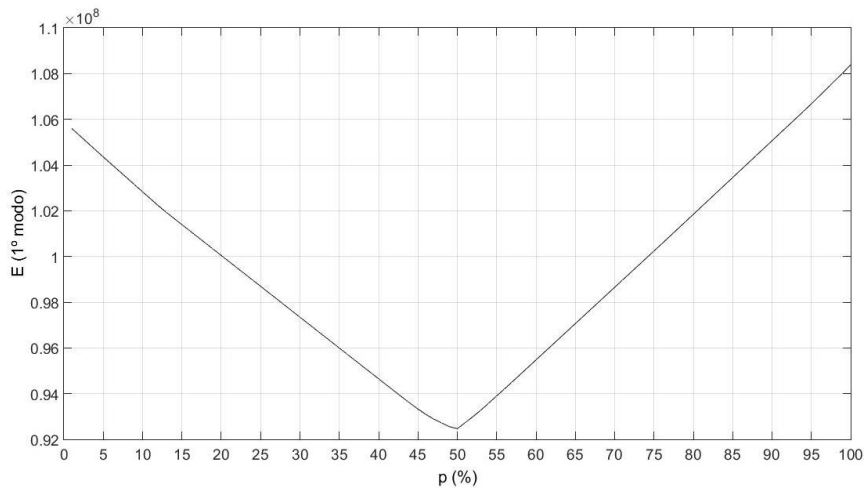


Figura 60 – Quantificação do dano, elemento 163, 2ª tentativa, cenário 6

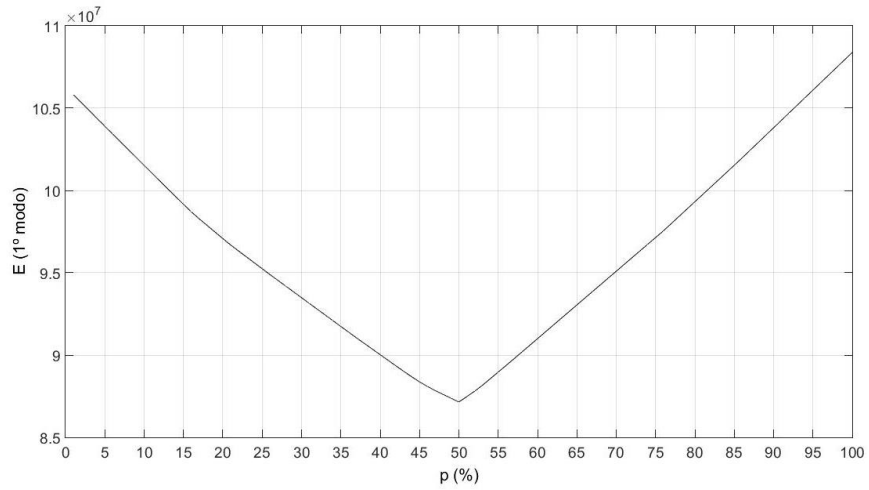


Figura 61 – Quantificação do dano, elemento 164, 2ª tentativa, cenário 6

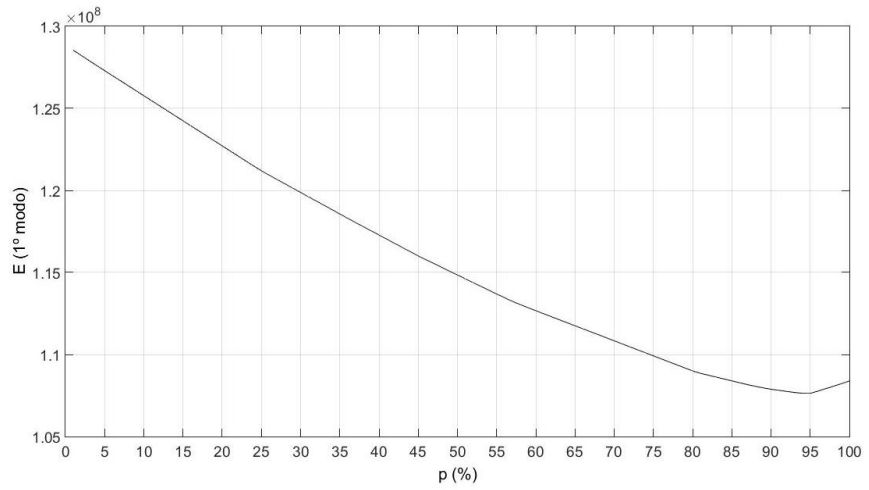


Figura 62 – Quantificação do dano, elemento 165, 2ª tentativa, cenário 6

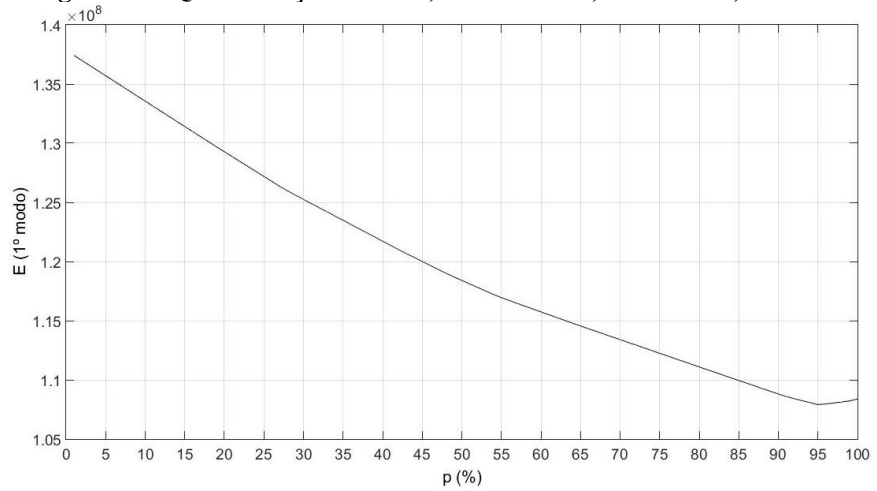


Figura 63 – Quantificação do dano, elemento 166, 2ª tentativa, cenário 6

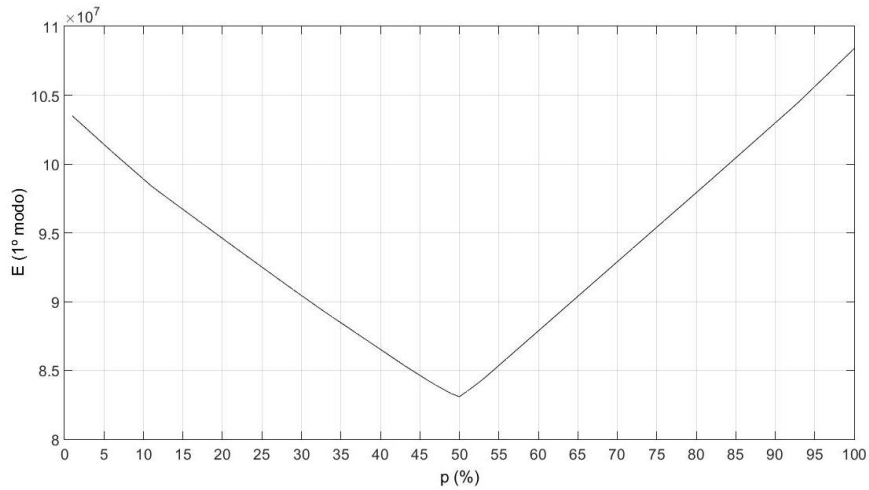


Figura 64 – Quantificação do dano, elemento 167, 2ª tentativa, cenário 6

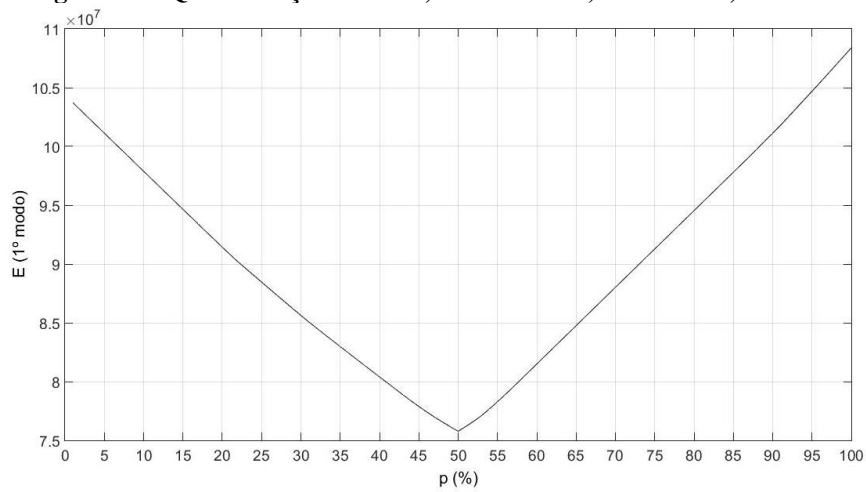


Figura 65 – Quantificação do dano, elemento 168, 2ª tentativa, cenário 6

Assim, com a segunda tentativa, foi possível identificar o fator p dos elementos 163, 164, 167 e 168. Para os demais elementos, foi realizada uma terceira tentativa, apresentada nas Figuras 66 e 67.

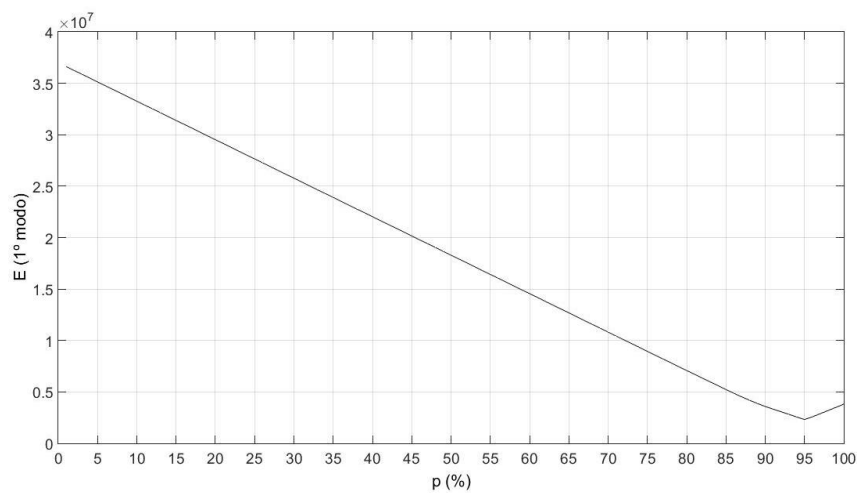


Figura 66 – Quantificação do dano, elemento 165, 3ª tentativa, cenário 6

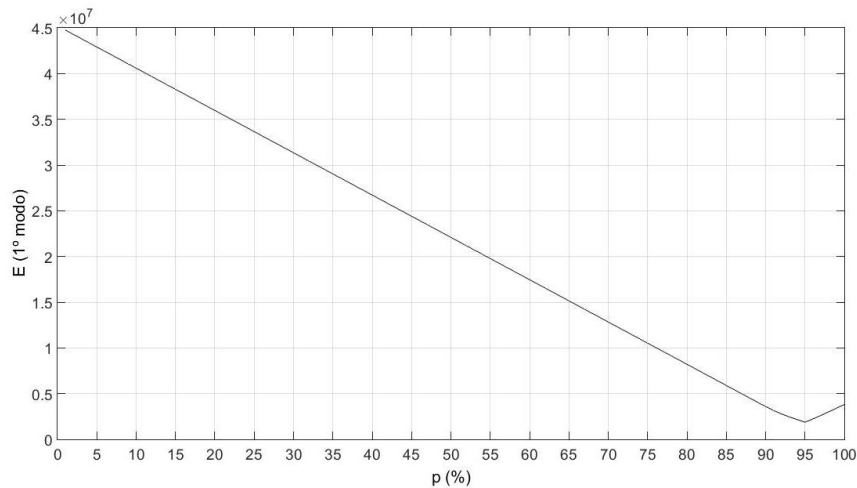


Figura 67 – Quantificação do dano, elemento 166, 3ª tentativa, cenário 6

Após a terceira tentativa, o fator p de todos os elementos foi identificado de forma clara, estando os valores obtidos apresentados na Figura 68.

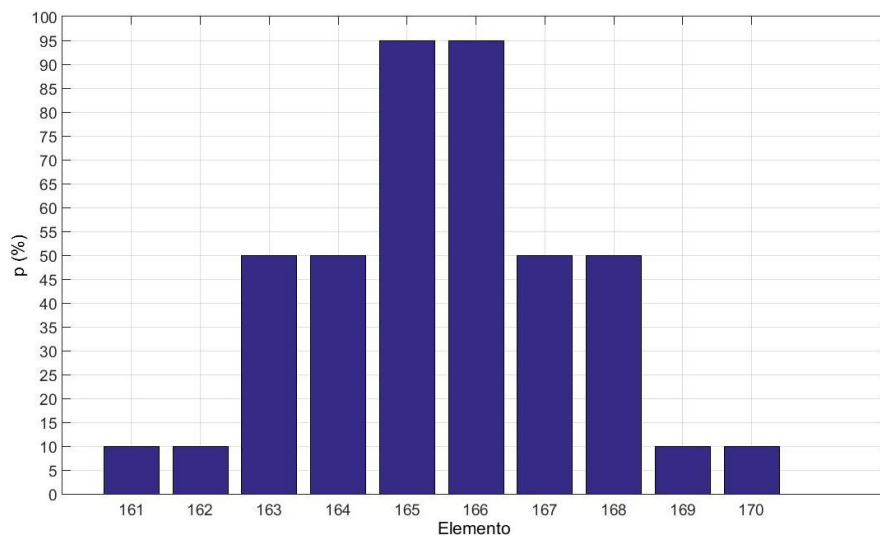


Figura 68 – Fator p obtido para cada elemento danificado

Como visto anteriormente, a intensidade do dano é dada por '1-p'. Assim, considerando os valores de p obtidos (Figura 68), as intensidades de dano obtidas pela quantificação foram de 5% para os elementos 165 e 166, 50% para os elementos 163, 164, 167 e 168 e de 90% para os elementos 161, 162, 169 e 170. Logo, os valores de dano obtidos foram os esperados, mostrando o sucesso da etapa de quantificação para múltiplas intensidades de dano simultâneas.

Por fim, o programa em MATLAB gerou no Abaqus a Figura 69, ilustrando os nós danificados em vermelho. Comparando com a seção em destaque na Figura 46, observa-se que a localização foi realizada de forma correta.

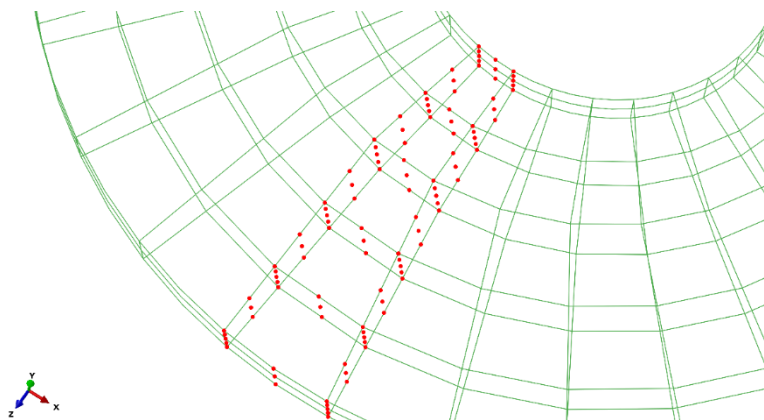


Figura 69 – Nós identificados como danificados, cenário 6

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo expandir o Método do Erro Residual (Genovese, 2000) para estruturas tridimensionais complexas, mais especificamente para uma rampa de concreto armado em curva.

Foram analisados seis cenários artificiais de danos, considerando diferentes localizações e intensidade de perda da integridade estrutural mediante a redução do módulo de elasticidade do elemento considerado. Os resultados obtidos para todos os cenários mostraram a eficiência do MER na localização e quantificação do dano, independentemente da intensidade do mesmo.

Em relação a conclusões mais específicas, observou-se que o método caracteriza de forma correta múltiplas intensidades simultâneas de dano na estrutura de forma correta. Além disso, observou-se que, trabalhando com dados puramente numéricos, o método permite a correta identificação de danos nos apoios, o que costuma ser complexo quando trabalhando com dados experimentais.

Dessa forma, o trabalho permite concluir que o Método do Erro Residual (Genovese, 2000) pode ser aplicado em estruturas tridimensionais complexas modeladas por meio de elementos isoparamétricos do tipo hexaedro de 20 nós utilizando dados puramente numéricos.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se trabalhar com estruturas tridimensionais a partir de dados experimentais, de forma a ser possível analisar a eficiência do método utilizando dados reais.

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.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

Bastos, A. B. B. (2017). “Caracterização da degradação estrutural baseada no estudo das propriedades dinâmicas de uma estrutura”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Estruturas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal, 88p.

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

Cardoso, C.G. (2005). “Identificação de Danos em Estruturas de Viga Por Meio de Suas Propriedades Dinâmicas”. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-006A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 129p.

Clough, R. W. e Penzien, J. (2003). “Dynamics of structures, Computers & Structures”, Inc., Third Edition, Califórnia, Estados Unidos da América.

Ferrufino Veizaga, J. E. (1993). “Identificação de dano em estruturas pela variação das características modais”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 77p.

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.

Guerreiro, M. A. J. (2014). “Identificação de dano estrutural com base em análise modal”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Estruturas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal, 118p.

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

Lieven, N. A. J. 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.

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

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.

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.