

Universidade de Brasília – UnB  
Campus Gama – FGA  
Engenharia Automotiva

**Identificação de danos estruturais em um chassi veicular  
a partir do Método de Energia de Deformação**

THARCÍSIO CASTRO SANTOS

Orientador: Dra. CARLA TATIANA MOTA ANFLOR



THARCÍSIO CASTRO SANTOS

**Identificação de danos estruturais em um chassi veicular  
a partir do Método de Energia de Deformação**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Dra. Carla Tatiana Mota Anflor

Brasília, DF  
2017

Brasília/DF, Julho de 2017

#### FICHA CATALOGRÁFICA

THARCÍSIO CASTRO SANTOS

Identificação de danos estruturais em um chassi veicular  
a partir do Método de Energia de Deformação

30p., 210 × 297 mm (FGA/UnB Gama, Engenharia Automotiva, 2017)

Trabalho de graduação em engenharia automotiva  
Universidade de Brasília, Campus Gama – FGA/UnB

- |                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| 1. Análise modal         | 2. Método de Energia de Deformação |
| 3. Identificação do dano | 4. Quantificação do dano           |
| I. FGA UnB/UnB.          | II. Title (series)                 |

#### REFERÊNCIA

SANTOS, THARCÍSIO CASTRO (2017). Identificação de danos estruturais em um chassi veicular a partir do Método de Energia de Deformação. Dissertação de graduação em engenharia automotiva, Universidade de Brasília, Campus Gama, DF, 30p.

**FGA/UnB – Universidade de Brasília, Campus Gama**

**Identificação de danos estruturais em um chassi veicular  
a partir do Método de Energia de Deformação**

***Tharcísio Castro Santos***

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

APROVADA POR:

---

Prof<sup>ª</sup>. Carla Tatiana Mota Anflor  
(Orientadora)

---

Prof.  
(Examinador interno)

---

Prof.  
(Examinador interno)

## Resumo

O estudo para identificação de danos em estruturas tem sofrido diversos avanços nos últimos anos, principalmente no ramo da engenharia. Com a identificação do local do dano, se torna possível tomar medidas corretivas na estrutura, de modo a garantir sua integridade antes que ocorra uma falha estrutural.

Para identificação de danos estruturais se faz necessário a utilização de métodos que utilizem parâmetros obtidos por meio de análises estáticas ou modal, sendo que para a análise estática são obtidos os valores de deslocamento da estrutura para identificação do dano, e para a análise modal tem como resultado as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura.

Neste sentido, será apresentado neste trabalho uma forma de identificação de dano estrutural, por meio do Método de Energia de Deformação (do inglês, *Strain Energy Method* - SEM), o qual se utiliza parâmetros obtidos por meio de análise modal. Esta análise é executada utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), via ANSYS (18).

Primeiramente, foi executada uma análise para um modelo de viga, composta por 5 elementos, sendo implementado um dano no elemento 4. Dessa maneira foi possível verificar a alteração nos valores das frequências naturais da viga, após incluso um dano.

Os resultados obtidos para essa análise foram satisfatórios para essa aplicação. A partir de uma série de equações calculadas via MATLAB®, foi localizado o elemento o qual foi implementado o dano.

Diante disso, nas próximas etapas dessa pesquisa, será executada a mesma análise para outros modelos de viga, contendo dano em outros elementos, e para um chassi veicular. Será feita também, uma quantificação dos danos presentes nas vigas e no chassi.

**Palavras-chave:** Identificação de danos, Método dos Elementos Finitos, Método de Energia de Deformação e Análise Modal.

## **Abstract**

A versão final do documento incluirá o resumo em inglês.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>10</b>
1.1	Contextualização . . . . .	10
1.2	Problematização e proposta . . . . .	11
1.3	Objetivos . . . . .	12
1.3.1	Objetivo Geral . . . . .	12
1.3.2	Objetivos Específicos . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>13</b>
2.1	Tipos de chassi . . . . .	13
2.1.1	Chassi Monobloco . . . . .	13
2.1.2	Chassi Escada . . . . .	13
2.1.3	Chassi Tubular . . . . .	14
2.2	Detecção de danos . . . . .	14
2.2.1	Análise Modal . . . . .	15
2.2.2	Método dos Elementos Finitos - MEF . . . . .	17
2.2.3	Método de Energia de Deformação (SEM) . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>23</b>
3.1	Análise numérica . . . . .	23
3.1.1	Elemento BEAM 188 . . . . .	23
3.2	Aplicação do Método de Energia de Deformação . . . . .	24
3.2.1	Localizar dano . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Resultados Preliminares</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Considerações finais: Próximas etapas e cronograma</b>	<b>28</b>
5.1	Cronograma de atividades . . . . .	28

# Lista de Tabelas

3.1	Propriedades mecânicas da viga. . . . .	24
3.2	Dimensões da viga com e sem dano. . . . .	24
4.1	Modos de vibração e frequências naturais da viga com e sem dano. . . . .	25
4.2	Parâmetros para modos de vibração . . . . .	26
5.1	Cronograma de atividades para o TCC2. . . . .	28



# Lista de Figuras

2.1	Chassi Monobloco. . . . .	13
2.2	Chassi Escada. . . . .	14
2.3	Chassi Tubular. . . . .	14
2.4	Frequências naturais e modos de vibração de uma viga. . . . .	16
2.5	Formas de elementos finitos. . . . .	19
2.6	Discretização de uma chapa tracionada. . . . .	19
3.1	BEAM188 (ANSYS, 18). . . . .	23
3.2	Representação da viga. . . . .	24
4.1	7º modo de vibração da viga sem dano. . . . .	26
4.2	7º modo de vibração da viga com dano. . . . .	26
4.3	Gráfico do indicador de dano na viga. . . . .	27

# 1 Introdução

Este trabalho tem como objetivo identificar e quantificar danos estruturais em um chassi veicular do tipo escada numericamente. Sendo utilizado para a análise um modelo de chassi com e sem a presença de um dano.

## 1.1 Contextualização

Nas últimas décadas houveram diversos avanços na engenharia, principalmente pela necessidade de se desenvolver sistemas para monitorar o desempenho de estruturas, garantindo o seu funcionamento durante sua vida útil. Os sistemas estruturais devem ser desenvolvidos de modo a suportar solicitações tanto estáticas como dinâmicas, permanentes ou variáveis, as quais podem danificar a estrutura [9].

O dano em uma estrutura é visto como uma degradação de suas propriedades, como por exemplo rigidez, amortecimento e massa [17]. Este dano pode ser formado a partir da soldagem, usinagem ou mesmo durante o uso da própria estrutura.

A identificação destes danos é de grande importância na área de engenharia, principalmente no setor automotivo. Com a detecção da localização antecipada do dano será possível tomar medidas de precaução para se evitar falha da estrutura [6].

Um veículo automotivo é composto por diversos sistemas e subsistemas, os quais podem possuir danos. Dentre esses sistemas, encontra-se o chassi que é a estrutura principal de um veículo, onde são acoplados todo os sistemas, como por exemplo powertrain e suspensão, sendo assim responsável por suportar os esforços exercidos por estes [8].

A presença de danos estruturais em um chassi podem diminuir sua rigidez, seu desempenho e sua durabilidade, diminuindo sua capacidade de suportar os esforços que são exercidos sobre ele. Estes defeitos podem aparecer no chassi devido ao seu processo de fabricação ou durante a sua utilização, devido aos esforços que os outros sistemas exercem sobre ele ou devido a uma situação de impacto [7].

As frequências naturais indicam a taxa que a estrutura oscila livremente, após ter sido cessada a força que provocou sua movimentação. Como a estrutura pode vibrar livremente, esta possui diversas frequências naturais. A primeira frequência natural é a mais importante, sendo a menor dentre todas e mais influente ao movimento oscilatório. Para cada frequência natural existe o seu modo de vibração, que corresponde a forma da estrutura ao vibrar [4].

Toda estrutura possui suas próprias frequências naturais e seus devidos modos de vibração, correspondente às suas propriedades mecânicas e físicas. Dessa forma quando se a uma alteração nessas propriedades, as suas frequências naturais também sofrem

mudança [6].

## 1.2 Problematização e proposta

Para a segurança dos passageiros é necessário que chassi esteja em um ótimo estado. Desta forma se neste estiver presente um dano de grande escala, a segurança dos passageiros poderá estar em risco. Por isso é necessário localizar e quantificar os danos presentes na estrutura, caso esta possua.

Um bom método para identificação de dano deve ser capaz de identificar de forma rápida a sua ocorrência, localizá-lo, e assim estimar o quão severo este é para a estrutura. Um ponto importante, é a necessidade deste método ser facilmente ajustável, de modo a automatizá-lo, não sendo susceptível à subjetividade do usuário [9].

Outra característica importante dos métodos utilizados para identificação de danos, é a capacidade de se poder utilizar informações obtidas à partir de sistemas modelados em elementos finitos, para identificar se houve alterações nas propriedades físicas ou mecânicas da estrutura real [9].

Normalmente para identificação de danos estruturais são utilizados métodos que utilizam os valores de suas frequências naturais e seus modos de vibração. Com isso, é possível identificar que o chassi possui um dano, a partir da variação das frequências naturais deste. Esta variação de valores e modos de vibração em uma estrutura, ocorre devido a mudança de suas propriedades mecânicas e/ou físicas [6].

A obtenção das frequências naturais e dos modos de vibração, se tem a partir da realização de uma Análise Modal, onde o chassi é submetido a vibrações livres, recebendo uma perturbação inicial, e permanecendo a vibrar por conta própria [8, 14]. Esta análise será feita por meio do software de simulação numérica, Ansys APDL, o qual utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), para elaborar e solucionar problemas complexos [7].

Existem diversos métodos e algoritmos para se identificar a presença de danos em estruturas, geralmente esta identificação é composta por três fases, a detecção da existência do dano, em seguida a determinação do local onde este dano se encontra na estrutura, e finalmente a quantificação dele [10].

Para esta identificação será utilizado Método de Energia de Deformação (do inglês, *Strain Energy Method* - SEM) que utiliza apenas dois estágios. Onde o primeiro estágio consiste basicamente em determinar a localização do dano a partir do desvio de energia de deformação entre os modos de vibração do chassi com e sem a presença do dano. O segundo estágio consiste em quantificar o dano à partir da análise das frequências naturais do chassi que possui o dano com o chassi que não possui [6].

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é identificar e quantificar danos estruturais em um chassi veicular, a partir dos seus modos de vibração e de suas frequências naturais. Sendo aplicado o Método de Elementos Finitos (MEF) para executar a análise modal e o Método de Energia de Deformação (SEM) para identificação e quantificação do dano.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para identificação e quantificação do dano, é necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Realização de análise modal, primeiramente para os casos de uma viga com e sem a presença de danos, e em seguida para um chassi com e sem dano, por meio de métodos numéricos via MEF, utilizando o software de simulação ANSYS, para a obtenção dos seus modos de vibração e de suas frequências naturais;
- Obtenção das funções de modo de vibração para a viga e para o chassi com e sem dano;
- Implementação do SEM, para identificar e quantificar o dano presente nas vigas e nos chassis, a partir das frequências naturais obtidas da viga com e sem dano. [Completar]

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Tipos de chassi

#### 2.1.1 Chassi Monobloco

Este é modelo de chassi mais utilizado na construção de veículos de passeio, como representado na Figura 2.1. Sua construção é feita a partir da prensa de peças metálicas e em seguida se utiliza o processo de soldagem para uní-las, formando assim uma única estrutura [13].

Os chassis monoblocos devem suportar muitos esforços, assim como os demais tipos de chassi, dessa forma este apresenta regiões com reforços estruturais para aumentar suas resistência, mas também possui regiões que não sofrem muitos esforços, onde se pode fazer alívio de peso [13].

#### 2.1.2 Chassi Escada

É um tipo de chassi que possui formato de uma escada, como na Figura 2.2, construído de um material metálico para suportar diversos carregamentos verticais. Constituído por 2 vigas paralelas longitudinalmente, chamadas de longarinas, e interligadas por diversos travamentos transversais, chamados de transversinas. Possui estruturas com seções transversais do tipo "C" e do tipo "X", as quais aumentam sua rigidez estrutural e sua resistência a torção, respectivamente [13].

São estruturas que possui uma boa resistência à flexão, uma baixa rigidez de torção e uma boa resistência à deformação. Dessa forma, esta estrutura é normalmente utilizadas em caminhões, ônibus e caminhonetes, que são veículos que sofrem carregamentos de alta intensidade [13].



**Figura 2.1.** Chassi Monobloco.



**Figura 2.2.** Chassi Escada.

### 2.1.3 Chassi Tubular

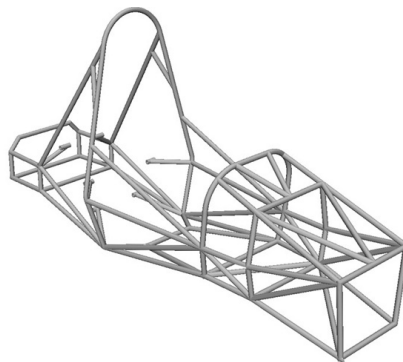
São modelos de chassi compostos por tubos, formando diversas triangulações, como na Figura 2.3. Dessa forma todos os esforços aplicados nos vértices são decompostos para suas arestas na forma de esforço de tração e compressão [13].

Este tipo de construção é bastante resistente ao impacto, no qual o chassi absorve de forma progressiva o impacto, minimizando possíveis lesões que o condutor poderia sofrer [12].

## 2.2 Detecção de danos

A detecção dos danos estruturais são de grande importância na engenharia, pois estes podem diminuir a vida útil da estrutura. Diminuindo sua rigidez, provocando desconforto aos usuários, ou até mesmo provocando a falha da estrutura. Dessa forma, a sua identificação permite aplicar medidas corretivas, antes da falha estrutural, para garantir a segurança da estrutura [7, 11, 5].

Os danos podem ser identificados por meio de análises estáticas e análises dinâmicas, a partir das mudanças das propriedades físicas da estrutura. A sua presença altera os parâmetros modais desta, como suas frequências modais e seus devidos modos de vibração, os quais podem ser obtidos por análise de vibração [9, 7].



**Figura 2.3.** Chassi Tubular.

Este é visto como perda de rigidez estrutural, de modo a diminuir o valor das frequências naturais. Caso contrário, se houver um aumento no valor das frequências naturais, pode ser devido à presença de um apoio mais rígido do que o esperado [9].

Os métodos utilizados para identificação de danos, possuem como objetivos detectar, localizar e quantificar os danos. Neste trabalho, a detecção do dano será subdividida em duas etapas, consistindo em identificar e quantificar o dano, onde pesquisas recentes afirmam que subdividindo o método de detecção do dano em duas etapas, se obtém uma melhor performance [6, 7].

### 2.2.1 Análise Modal

Quando uma estrutura sai da sua posição de equilíbrio, a partir de uma alteração do seu modo de vibração, esta irá vibrar livremente com este modo e com sua respectiva frequência natural, como representado na Figura 2.4 [2].

Para muito sistemas mecânicos se faz necessário mais de uma coordenada para descrever seu movimento e sua vibração, resultando em um sistema com múltiplos graus de liberdade [3].

Com isso, um sistema pode ser representado pela rigidez e a massa associada aos  $n$  graus de liberdade que este possuir. Sendo assim, cada grau de liberdade irá apresentar uma vibração livre similar à um sistema massa-mola, onde cada grau de liberdade exerce um Movimento Harmônico Simples durante uma vibração livre [2].

Para um sistema com  $n$  graus de liberdade, cada grau de liberdade descreve um movimento para cada modo de vibração, possuindo uma frequência natural para este modo de vibração, a partir de uma Função Horária [2].

$$U = U_0 \times \sin(w \times t), \quad (2.1)$$

onde  $w$  é a frequência natural deste modo de vibração.

A representação para todos os pontos nodais da estrutura é dada pela equação:

$$U(t) = \begin{Bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ \dots \\ U_n(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{01}(t) \times \sin(w \times t) \\ U_{02}(t) \times \sin(w \times t) \\ \dots \\ U_{0n}(t) \times \sin(w \times t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{01}(t) \\ U_{02}(t) \\ \dots \\ U_{0n}(t) \end{Bmatrix} \times \sin(w \times t), \quad (2.2)$$

Todos os nós do modelo representado em elementos finitos vibram com a mesma frequência natural e harmonicamente, dessa forma simplificando a equação 2.2 para:

$$\{U(t)\} = \{U_0\} \times \sin(w \times t), \quad (2.3)$$

onde  $\{U(t)\}$  é a matriz que contém todos os deslocamentos da estrutura associados aos  $n$

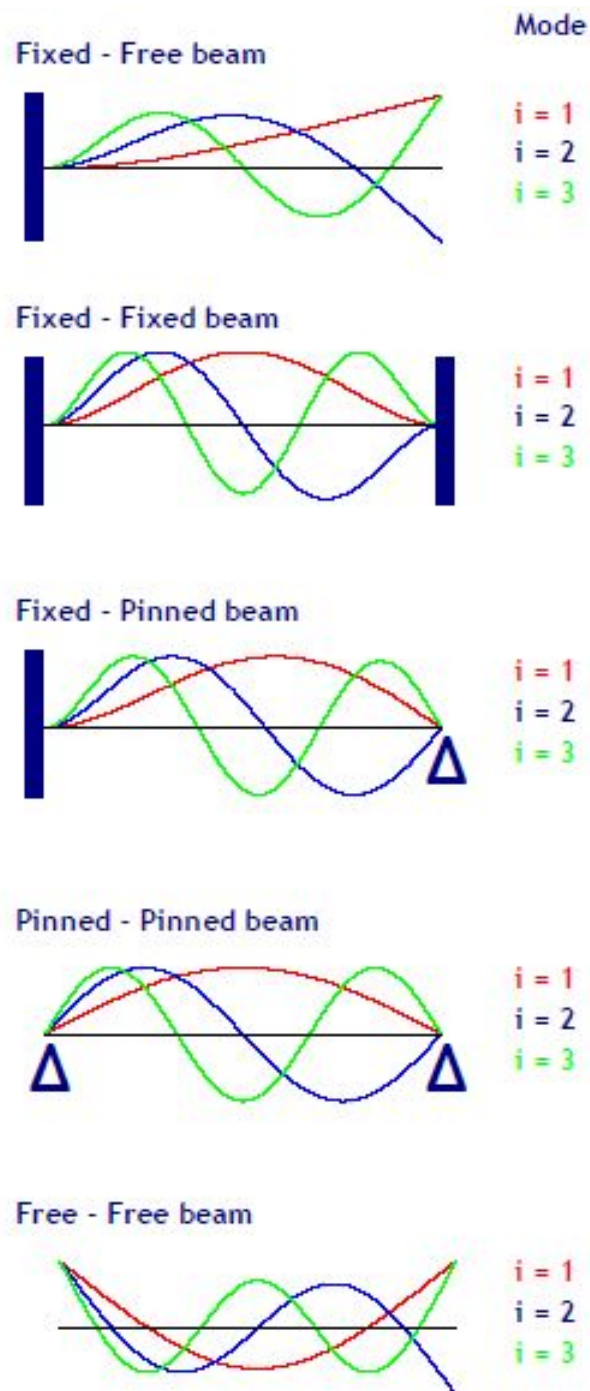


Figura 2.4. Frequências naturais e modos de vibração de uma viga.



graus de liberdade, e  $\{U_0\}$  é a matriz que contém as amplitudes de oscilação devida aos graus de liberdade [2].

Substituindo a equação 2.3 na equação matricial diferencial, equação 2.4, que representa as vibrações livres sem amortecimento de um sistema massa-mola, obtemos a Equação de Equilíbrio Dinâmico do Sistema Vibrando Harmonicamente, equação 2.5 [2]:

$$[M] \times \{\ddot{U}\} + [K] \times \{U\} = 0, \quad (2.4)$$

$$([K] - w^2 \times [M]) \times \{U_0\} = 0, \quad (2.5)$$

A solução trivial da equação 2.5 ocorre quando  $\{U_0\} = 0$ . Nessa situação, nenhuma deformação é imposta, não gerando vibrações livres na estrutura.

Já a solução trivial se dá para

$$[K] - w^2 \times [M] = 0. \quad (2.6)$$

A partir disto, para se obter os valores das frequências naturais da estrutura de vários graus de liberdade, é gerada a Equação de Frequência do Sistema:

$$\det([K] - w^2 \times [M]) = 0. \quad (2.7)$$

Sendo comum substituir  $w^2$  por  $\lambda$ , obtem-se:

$$\det([K] - \lambda \times [M]) = 0. \quad (2.8)$$

Verificando essa equação para um modo "i" de vibração, obtemos a equação:

$$([K] - \lambda_i \times [M]) \times \{modo_i\} = \{0\}, \quad (2.9)$$

onde  $\lambda_i$  são os autovalores correspondentes às raízes do polinômio  $p(\lambda)$  (equação 2.8),  $w_i$  são as frequências naturais sem amortecimento e  $modo_i$  são os autovetores correspondentes aos modos de vibração da estrutura.

## 2.2.2 Método dos Elementos Finitos - MEF

Muitas vezes a resolução analítica de alguns sistemas se mostra com grandes dificuldades, podendo ser até mesmo impossível. Dessa forma uma alternativa é a utilização de métodos de simulação numérica, os quais buscam soluções aproximadas por meio de subdomínios ou de pontos de contorno ou do domínio [15].

Um dos métodos numéricos utilizados para analisar modelos matemáticos, é o MEF. Este método consiste em utilizar um modelo computacional formado por vários elementos,

para simular o comportamento da estrutura real, que se deseja analisar [15].

A partir do cálculo diferencial iniciado por Leibnitz e Newton, a matéria foi vista como uma distribuição contínua, formada por infinitos "pontos materiais", adjacentes entre si, os quais podem se afastarem ou se aproximarem um dos outros sem a formação de vazios ou de sobreposição, denominada assim de meio contínuo [15].

Os elementos são conectados entre si através de pontos nodais no seus contornos. Diferente do modelo matemático que possui infinitos pontos modais, o modelo numérico utiliza finitos pontos modais [15].

O MEF opera com parâmetros nodais, ocorrendo a interação dos elementos dentro de uma malha, a qual substitui o modelo matemático. Dessa forma, o comportamento da estrutura se dá a partir da combinação do comportamento do seus elementos, onde a solução exata é substituída por soluções aproximadas locais. A medida que se é feito um refinamento na malha, variando assim o tamanho dos elementos, mais as soluções locais se aproximam das soluções reais [15, 1].

Os elementos finitos podem ser unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, e também de diversas formas e possuindo números específicos de pontos nodais para suas faces e lados, e diferentes tipos e números de graus de liberdade por cada ponto nodal, como na Figura 2.5 [15].

A posição dos pontos nodais da malha é definida a partir de coordenadas globais XYZ, já o posicionamento dos elementos é definido através da correspondência entre a numeração local e global de seus pontos nodais [15].

Para analisar a geometria, deve-se discretizar o domínio de modo a ele se aproximar com o contorno da geometria, discretizando também as condições geométrica e mecânica (condições de contorno), como mostrado na Figura 2.6 para um caso de um chapa retangular engastada [15].

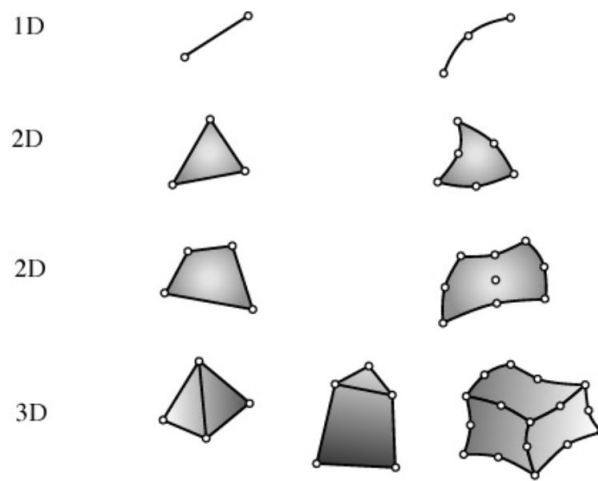
A partir desta discretização, o programa terá as informações necessárias para se efetuar o cálculo para o sistema de equações descritos para o comportamento de cada elemento, a partir da equação:

$$[K] \times \{d\} = \{f\}, \quad (2.10)$$

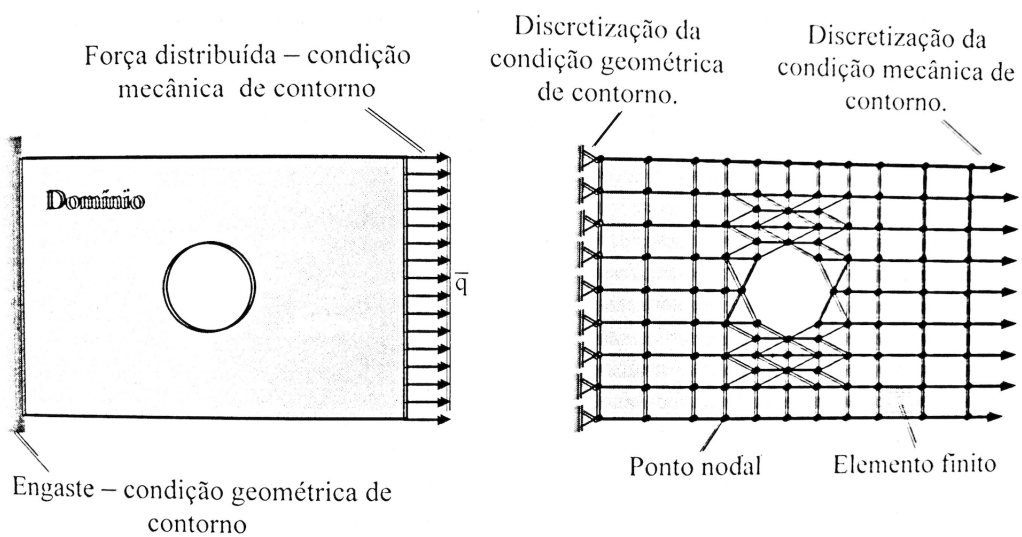
onde  $[K]$  corresponde a matriz de rigidez global, referente a todos os elementos,  $\{d\}$  é o vetor global correspondente aos deslocamentos de cada ponto nodal e  $\{f\}$  é o vetor global referente às forças nos pontos nodais [15].

### 2.2.3 Método de Energia de Deformação (SEM)

Este método consiste de dois estágios para detecção do dano, no qual o primeiro consiste em localizar o dano a partir de um desvio entre a energia de deformação da estrutura com e sem dano. Já o segundo estágio tem o objetivo de quantificar o dano, a partir dos



**Figura 2.5.** Formas de elementos finitos.



**Figura 2.6.** Discretização de uma chapa tracionada.

resultados das frequências naturais da estrutura com e sem dano [6].

### Localizar dano

Neste estágio é aplicado o SEM, o qual se baseia na variação de energia de deformação da estrutura antes e após a presença do dano, utilizando os seus devidos modos de vibração. Bernoulli-Euler apresenta a formulação para o cálculo de energia de deformação para uma viga:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx, \quad (2.11)$$

onde  $U$  representa a energia de deformação da viga,  $L$  é o seu comprimento,  $EI(x)$  é a sua rigidez à flexão, e  $v$  corresponde a sua deflexão vertical [6].

O cálculo de energia pode ser associado ao modo de vibração, neste caso substituindo a deflexão vertical pelo modo de vibração da viga.

$$U_i = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) \left( \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx, \quad (2.12)$$

Em uma análise de elemento finitos, a viga é subdividida em elementos, logo a energia de deformação associada para um elemento pode ser dada por:

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \int_{a_j}^{a_{j+1}} EI(x) \left( \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx, \quad (2.13)$$

onde  $a_j$  e  $a_{j+1}$  são os limites de integração corresponde aos limites do elemento  $j$  [6].

A fração de energia de deformação é obtida a partir da razão entre a energia do elemento pela energia da viga [6].

$$F_{ij} = \frac{U_{ij}}{U_i}, \quad (2.14)$$

Essas equações também são aplicadas às vigas que possuem dano:

$$F^*_{ij} = \frac{U^*_{ij}}{U^*_i}, \quad (2.15)$$

$$U^*_i = \frac{1}{2} \int_0^L EI^*(x) \left( \frac{\partial^2 \phi_i^*}{\partial x^2} \right)^2 dx, \quad (2.16)$$

$$U^*_{ij} = \frac{1}{2} \int_{a_j}^{a_{j+1}} EI^*(x) \left( \frac{\partial^2 \phi_i^*}{\partial x^2} \right)^2 dx, \quad (2.17)$$

Sabe-se que:

$$1 = \frac{U^*_{ij}/U^*_i}{U_{ij}/U_i} = \frac{\int_{a_j}^{a_{j+1}} EI_j^*(x) \left( \frac{\partial^2 \phi_{*i}}{\partial x^2} \right) dx / \int_0^L EI^*(x) \left( \frac{\partial^2 \phi_{*i}}{\partial x^2} \right) dx}{\int_{a_j}^{a_{j+1}} EI_j(x) \left( \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right) dx / \int_0^L EI(x) \left( \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right) dx}, \quad (2.18)$$

Dessa forma, calculando-se o indicador de dano para cada elemento, representado por  $\beta_j$ , temos:

$$\beta_j = \frac{\hat{E}I_j}{\hat{E}I_{*j}} = \frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^n \frac{\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left( \frac{\partial^2 \phi_{*i}}{\partial x^2} \right) dx / \int_0^L \left( \frac{\partial^2 \phi_{*i}}{\partial x^2} \right) dx}{\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left( \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right) dx / \int_0^L \left( \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \right) dx}, \quad (2.19)$$

Para normalizar e retirar os valores negativos:

$$Z_j = \frac{\beta_j - \bar{\beta}}{\sigma_\beta}. \quad (2.20)$$

onde  $\bar{\beta}$  representa a média dos valores de  $\beta_j$ , e  $\sigma$  representa o desvio padrão. Dessa forma,  $Z$  indicará a localização do dano na estrutura, onde os valores positivos serão visto como regiões danificadas, e os valores negativos serão aproximados à 0, sendo vistas como regiões sem danos [6].

## Quantificar dano

A segunda etapa na aplicação do Método de Energia de Deformação, consiste em quantificar o quão severo o dano é para a estrutura, após sua localização ter sido encontrada [6].

A quantificação do nível do dano é obtida a partir da utilização de uma representação analítica da estrutura que não possui dano e das frequências naturais correspondentes à estrutura que possui dano [6].

Os problemas do autovalor correspondentes à estrutura com dano, identificadas por  $d$ , e para estrutura sem dano, identificadas por  $u$ , são mostrados nas equações:

$$\left( [K]^d - \lambda_i^d [M] \right) \phi_i^d = 0, i = 1, \dots, n_m \quad (2.21)$$

e

$$\left( [K]^u - \lambda_i^u [M] \right) \phi_i^u = 0, i = 1, \dots, n_m, \quad (2.22)$$

onde  $[M]$  representa a matriz de massa da estrutura e  $[K]$  correspondente a sua matriz de rigidez. Já o parâmetro  $\lambda_i$  corresponde ao  $i$ -ésimo autovalor para seu devido  $i$ -ésimo autovetor  $\phi_i$ , e  $n_m$  correspondente ao número de modos de vibração utilizados na análise [6].

Um modelo paramétrico que demonstra o nível de dano no elemento é visto à partir

da matriz de rigidez do  $j$ -ésimo elemento com dano:

$$[K]_j^d = \psi_j \times [K]_j^u, \quad (2.23)$$

onde o escalar  $\psi_j$  representa a redução da matriz de rigidez,  $[K]^u$ , do  $j$ -ésimo elemento não danificado [6].

Assim é possível verificar que o dano afeta a rigidez da estrutura, provocando uma alteração insignificante na matriz de massa, podendo assim desconsiderar essa alteração. A variação da matriz de rigidez é:

$$[K]^d = [K]^u + \Delta [K], \quad (2.24)$$

A partir da equação anterior é possível representar as equações para os valores modais:

$$\lambda_i^d = \lambda_i^u + \Delta\lambda_i, i = 1, \dots, n_m \quad (2.25)$$

e

$$\phi_i^d = \phi_i^u + \Delta\phi_i, i = 1, \dots, n_m \quad (2.26)$$

onde  $\Delta\lambda_i$  representa a variação dos autovalores e  $\Delta\phi_i$  representa a variação dos autovetores [6].

Substituindo as Equações 2.24 e 2.26 na Equação 2.22 e multiplicando por "modo  $i$  transposto não danificado", é obtida a equação: [1]

$$\phi_i^{uT} ([K]^u + \Delta [K] - \lambda_i^u [M] - \Delta\lambda_i [M]) (\phi_i^u + \Delta\phi_i) = 0. \quad (2.27)$$

Considerando que os modos de vibração estão normalizados em relação a matriz de massa da estrutura e ignorando os termos de maior ordem, temos:

$$\phi_i^{uT} \Delta [K] = \Delta\lambda_i, i = 1, \dots, n_m, \quad (2.28)$$

onde esta equação permite quantificar o dano, após ter conhecimento da sua localização. Para o elemento que não apresenta dano, o valor de  $\phi_i$  é definido como 0. Dessa forma, não contribuindo para a variação da matriz de rigidez da estrutura  $\Delta [K] (\psi)$  [6].

## 3 Metodologia

### 3.1 Análise numérica

Para identificação do dano por meio de uma análise modal numérica, primeiramente é necessário discretizar o modelo de viga para ser executada uma simulação via ANSYS (18). Para representar o modelo de viga, será utilizado o Elemento BEAM 188 na simulação.

#### 3.1.1 Elemento BEAM 188

O elemento BEAM 188, Figura 3.1, é utilizado para analisar estruturas desde finas até as mais grossas. Este se baseia na teoria de viga de Timoshenko, considerando deformações por cisalhamento. É um elemento linear 3-D, o qual possui 2 nós por elemento e 6 graus de liberdade por nó, sendo três de translação (nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ ) e três de rotação (nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ ).

Para representar a viga com e sem dano foi gerada uma malha com 5 elementos, de mesmas dimensões, com comprimento de 1m cada, para simplificar a simulação. Para inserir o dano, foi feita uma redução da área da seção transversal do elemento 4, como mostra a Figura 3.2.

As propriedades mecânicas do material da viga inseridas na simulação, são mostradas na Tabela 3.1. Já a Tabela 3.2, apresenta as dimensões, peso e o momento de inércia para a seção transversal da viga com e sem dano.

A viga será analisada na situação livre-livre, considerando nenhum apoio ou fixação. Dessa forma as suas primeiras frequências naturais serão iguais ou próximas à 0. Sendo utilizado para identificação do dano, a sétima frequência natural, e o seu devido modo de vibração. Dessa forma, será feita uma análise modal no ANSYS (18), obtendo as frequências naturais e os modos de vibração da viga com e sem dano.

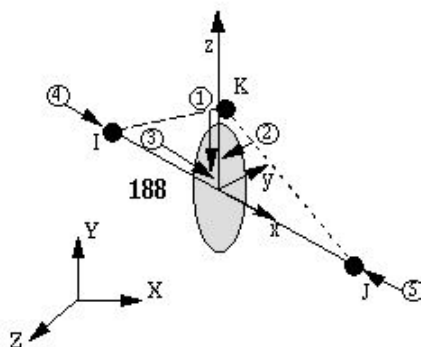
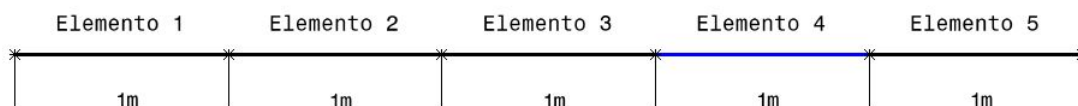


Figura 3.1. BEAM188 (ANSYS, 18).



**Figura 3.2.** Representação da viga.

**Tabela 3.1.** Propriedades mecânicas da viga.

Material	Aço
Módulo de Young "E"	$2 \times 10^{11} Pa$
Coefficiente de Poisson "ν"	0,266
Densidade	$7860 kg/m^3$

## 3.2 Aplicação do Método de Energia de Deformação

### 3.2.1 Localizar dano

A identificação do dano por meio do Método de Energia de Deformação se deu a partir do software MATLAB®, utilizando os valores obtidos pela simulação feita em ANSYS.

Para obtenção da função do modo de vibração da viga com e sem dano foram utilizados os valores de massa por unidade da viga e sua rigidez à flexão, obtendo assim as funções do modo de vibração da viga sem dano e da viga com dano.

Em seguida essas funções são inseridas nos cálculos da energia de deformação, sendo identificada a localização da região danificada.

**Tabela 3.2.** Dimensões da viga com e sem dano.

	Viga sem dano	Viga com dano
Altura seção transversal	$0.5m$	$0.3m$
Largura seção transversal	$0.5m$	$0.5m$
Comprimento de cada elemento	$1m$	$1m$
Comprimento da viga	$5m$	$5m$
Momento de inércia da seção transversal	$0,0052083m^4$	$0,0011250m^4$
Peso	9825kg	9039kg



## 4 Resultados Preliminares

A partir da análise modal feita no ANSYS (18), foi possível obter as frequências naturais e os modos de vibração da viga com e sem dano, os quais são apresentados na Tabela 4.1.

É possível verificar que as seis primeiras frequências naturais são iguais ou próximas a 0, devido a viga estar na situação livre-livre. Dessa forma, foi utilizada a sétima frequência natural e o seu devido modo de vibração, para que se possa identificar o dano na estrutura. Nas Figuras 4.1 e 4.2 é possível observar os modo de vibração para viga sem dano e com dano, respectivamente, de como as estruturas reagem a sua sétima frequência natural.

A partir da obtenção dos valores de frequências naturais, foram obtidos os valores de  $\lambda$ ,  $\sigma$  e a equação do modo de vibração para a viga com e sem dano, sendo apresentados na Tabela 4.2:

Com esses parâmetros, obtêm-se as funções para os modos de vibração da viga sem dano:

$$\phi = \left( \cosh \left( \frac{23.5619 \times x}{5} \right) + \cos \left( \frac{23.5619 \times x}{5} \right) \right) - \left( \sinh \left( \frac{23.5619 \times x}{5} \right) + \sin \left( \frac{23.5619 \times x}{5} \right) \right) \quad (4.1)$$

e com dano:

$$\phi^* = \left( \cosh \left( \frac{4.0025 \times x}{5} \right) + \cos \left( \frac{4.0025 \times x}{5} \right) \right) - \left( \sinh \left( \frac{4.0025 \times x}{5} \right) + \sin \left( \frac{4.0025 \times x}{5} \right) \right) \quad (4.2)$$

Ao inserir essas funções no Método de Energia de Deformação foi possível identificar a localização do dano a partir de um gráfico (Figura 4.3), onde o eixo Y corresponde aos valores de  $Z$  e o eixo X corresponde ao comprimento da viga.

Os valores positivos de  $Z$  localiza os elementos que possuem dano. Já os elementos que

**Tabela 4.1.** Modos de vibração e frequências naturais da viga com e sem dano.

Modos de vibração	Viga sem dano	Viga com dano
	Frequências Naturais (Hz)	Frequências Naturais (Hz)
1	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000
4	0.13638E-04	0.15628E-04
5	0.15744E-04	0.20925E-04
6	0.17467E-04	0.28045E-04
7	100.21	74.254
8	110.21	94.768
9	261.03	215.77
10	261.03	240.13

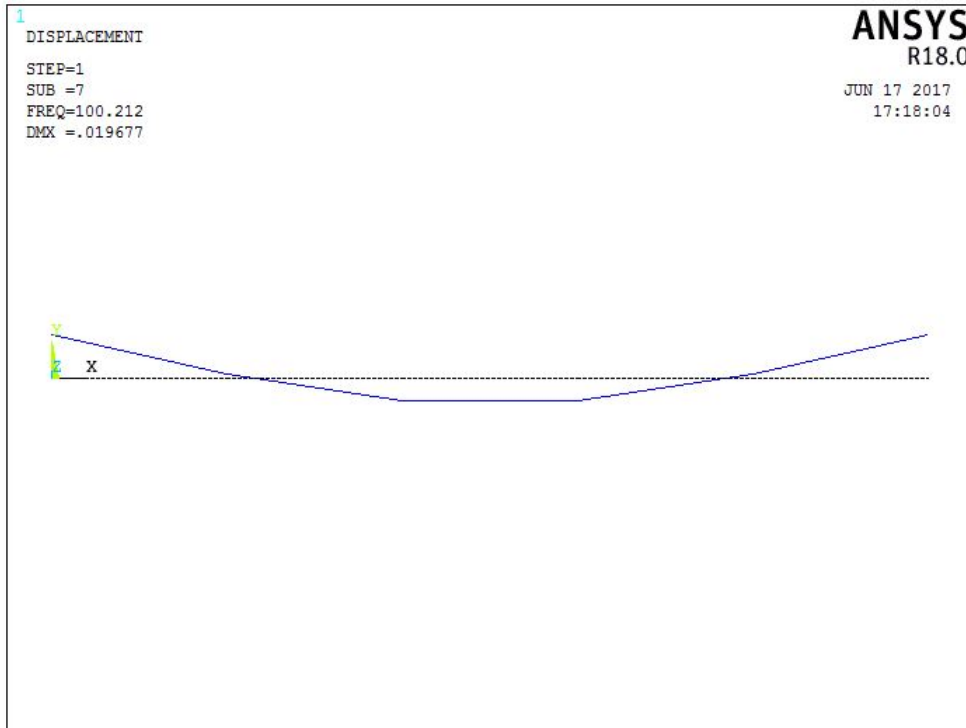


Figura 4.1. 7º modo de vibração da viga sem dano.

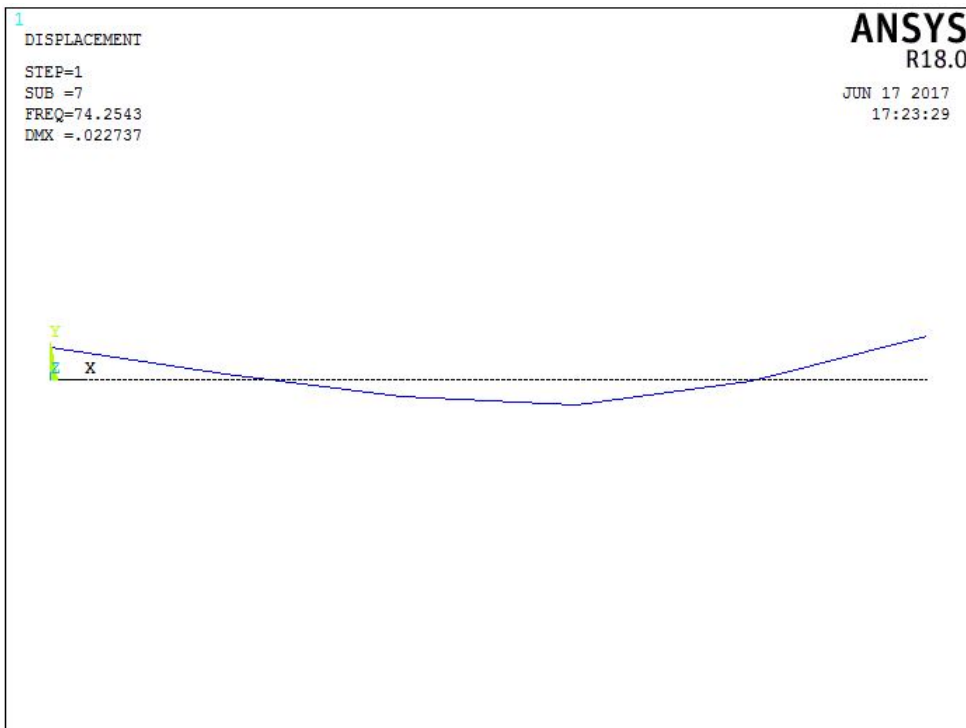
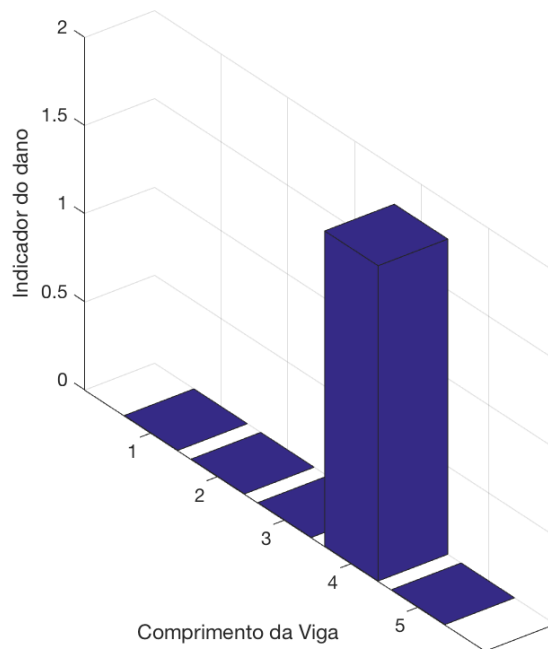


Figura 4.2. 7º modo de vibração da viga com dano.

Tabela 4.2. Parâmetros para modos de vibração

	Viga sem dano	Viga com dano
$\sigma$	1	1
$\lambda$	23.5619	4.0025



**Figura 4.3.** Gráfico do indicador de dano na viga.

possuem valores negativos de  $Z$ , estes são aproximados a 0, dessa forma não apresentando dano. Com isso é possível verificar pela Figura 4.3, que o elemento 4 é o único que possui dano, exatamente onde este foi imposto, e os demais elementos não apresentam dano.

## 5 Considerações finais: Próximas etapas e cronograma

Diante dos resultados preliminares obtidos, nota-se que foi possível realizar a localização do dano estrutural na viga em questão a partir de uma análise modal, onde viga danificada sofre uma diminuição dos valores de suas frequências naturais devido a uma diminuição da sua rigidez causada pelo dano, alterando assim os seus modos de vibração. Isso indica que, para essa aplicação, essa análise obteve um desempenho desejável, sendo identificado o dano.

Para trabalhos futuros, propõe-se a quantificação do dano encontrado para a mesma viga, além de uma análise completa (identificação e quantificação de dano) para um chassi veicular, utilizando o mesmo método já abordado.

### 5.1 Cronograma de atividades

A Tabela 5.1 apresenta o cronograma de todas as atividades a serem desenvolvidas para o TCC2, a fim de finalizar a análise proposta.

**Tabela 5.1.** Cronograma de atividades para o TCC2.

<b>Atividades</b>	<b>Período de realização</b>
Teste para outros modelos de viga, com dano em outros elementos	07/08 - 21/08
Estudo sobre quantificação de dano utilizando o SEM	22/08 - 05/09
Implementação do SEM para quantificar o dano na viga estudada	06/09 - 20/09
Escolha e modelagem do modelo do chassi	21/09 - 05/10
Análise modal do chassi	06/10 - 13/10
Implementação do SEM para identificar o dano no chassi	14/10 - 04/11
Implementação do SEM para quantificação do dano no chassi	05/11 - 26/11
Documentação dos resultados obtidos e finalização do documento	27/11 - 04/11
Apresentação do trabalho final	05/11 - 08/11

# Referências Bibliográficas

- [1] Aloísio Ernesto Assan. *Método dos elementos finitos: primeiros passos*. Ed. da UNICAMP, 2003.
- [2] Alves AVELINO Filho. *Elementos finitos: A base da tecnologia cae: Análise dinâmica*. Érica, 2008.
- [3] A Bianco. *Aplicação dos Métodos de Continuação e Análise Modal ao Problema da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*. PhD thesis, Dissertação de Mestrado, PUC/Rio, Setembro, 1994.
- [4] CC Bolina, EUL Palechor, e MPR Vásquez. Vibrações: As frequências naturais estimada e experimental de uma estrutura. *Blucher Mathematical Proceedings*, 1(1):186–194, 2015.
- [5] Cleverson Gomes Cardoso. Identificação de danos em estruturas de viga por meio de suas propriedades. *Science*, 20(2):93–100, 2005.
- [6] Alexandre A Cury, Carlos CH Borges, e Flávio S Barbosa. A two-step technique for damage assessment using numerical and experimental vibration data. *Structural Health Monitoring*, 10(4):417–428, 2011.
- [7] Brunno Emidio Sobrinho. *Algoritmos de otimização e o problema inverso aplicados à identificação de danos estruturais com o uso do MEF*. PhD thesis, Universidade de Brasília - Campus Darcy Ribeiro, 2016.
- [8] Daniel Canongia Furtado. *Análise estrutural de chassi de veículos automotivos*. PhD thesis, Universidade de Brasília - Campus Gama, 2014.
- [9] Mauro Alexandre Janeiro Guerreiro. *Identificação de dano estrutural com base em análise modal*. PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [10] N Hu, X Wang, H Fukunaga, ZH Yao, HX Zhang, e ZS Wu. Damage assessment of structures using modal test data. *International Journal of solids and structures*, 38(18):3111–3126, 2001.
- [11] Patrícia da Silva Lopes. Detecção de danos em estruturas por meio de técnicas de redes neurais artificiais e algoritmos genéticos. *Itajubá: Universidade Federal de Itajubá*, 2007.

- [12] Francisco José Neves et al. *Projeto de melhoria de um chassi tubular para um veículo de competição Single Seater*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2014.
- [13] Clezidan Núcio Pereira et al. *Análise estrutural estática por elementos finitos de um chassi veicular tipo spaceframe*. PhD thesis, Universidade Federal de Goiás, 2016.
- [14] SR SINGIRESU. *Vibrações mecânicas*, 4ª edição, 2008.
- [15] Humberto Lima Soriano. *Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas*. Ciência Moderna, 2009.
- [16] Humberto Lima Soriano e SILVIO DE SOUZA LIMA. *Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas Vol. 48*. EdUSP, 2003.
- [17] Jesús Daniel Villalba Morales. *Deteção de dano em estruturas via inteligência computacional e análise dinâmica*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2012.