

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Isabela N. Mori

Ítalo Bernardes da Silva

Silvio Roberto Peres Ramos

**Análise dos modos de vibrar do chassi para  
redução de danos estruturais**

São Carlos  
2018

## Resumo

Este estudo visa a redução de danos estruturais em Bajas SAE através da análise dos modos de vibrar de seu chassi spaceframe (Gaiola de Proteção). Uma estrutura está sujeita a vibrações, decorrentes de um carregamento ou de outra vibração que excita o corpo. Essas vibrações serão nas frequências naturais que dependem da geometria, material e restrições impostas no chassi. E no Baja SAE o motor a combustão pode acabar excitando a gaiola e assim acelerar danos estruturais. Dessa maneira foram feitas duas Análises Modais, uma Computacional e outra Experimental para validação. Sendo a variação média próxima de 5 a 6%, validando a Análise Modal Computacional. E comparando a faixa de frequência do motor (180 - 400 Hz) com a do chassi (50 - 105 Hz) conclui-se que esse não será excitado e assim reduzirá danos estruturais.

**Palavras-chave:** Modos de Vibrar, Chassi (Gaiola), Baja SAE, Elementos Finitos, Vibração, Motor, Ressonância.

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>4</b>
1.1	Baja: Origem, SAE, Competição . . . . .	4
1.2	Análise Modal: Modos de vibração e frequência de ressonância - estrutura e conforto . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>6</b>
2.1	Desenho Assistido por Computador (CAD) . . . . .	6
2.2	Métodos dos Elementos Finitos . . . . .	7
2.3	Modelos de Simulações . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Análise Modal Computacional</b>	<b>7</b>
3.1	Procedimentos . . . . .	7
3.2	Resultados . . . . .	7
3.2.1	7º Modo de Vibrar . . . . .	7
3.2.2	8º Modo de Vibrar . . . . .	8
3.2.3	9º Modo de Vibrar . . . . .	8
3.2.4	10º Modo de Vibrar . . . . .	8
3.2.5	Módulo11 . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Análise Modal Experimental</b>	<b>9</b>
4.1	Procedimentos . . . . .	9
4.2	Resultados . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Análise e Validação</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>11</b>

## Lista de Figuras

1	Baja Bug [2]. . . . .	4
2	Baja Bug California [3]. . . . .	4
3	Veículo da SCORE International Baja 1000 de 2016 [1]. . . . .	5
4	Baja da EESC-USP. . . . .	6
5	7º Módulo de vibração. . . . .	7
6	8º Módulo de vibração. . . . .	8
7	9º Modo de vibração. . . . .	8
8	10º Modo de vibração. . . . .	8
9	11º Modo de vibração. . . . .	9
10	Chassi suspenso no Laboratório de Dinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos. . . . .	9
11	Acelerômetros dispostos no chassi. . . . .	10
12	Gráfico frequência x aceleração. . . . .	11
13	Tabela comparativa computacional x experimental. . . . .	11

# 1 Introdução

## 1.1 Baja: Origem, SAE, Competição

Baja é um veículo *off-road*, no português brasileiro fora de estrada. O termo surgiu do Estado mexicano *Baja California* que apresenta praias, dunas e o *Baja California Desert*, local onde esses veículos percorrem até os dias atuais.

Devido o alto custo dos *buggies*, surgiu os carros adaptados que futuramente se nomeariam de Baja, sendo o Fusca (*Beetle*) um dos carros mais populares até hoje.



Figura 1: Baja Bug [2].



Figura 2: Baja Bug California [3].

Dentre as competições mais populares pode-se citar a Baja 500 e a Baja 1000 que ocorrem no México e a Baja SAE.



Figura 3: Veículo da SCORE International Baja 1000 de 2016 [1].

A Society of Automotive Engineers (SAE) promove competições ao redor do mundo e os veículos que competem são nomeados de Baja SAE. No Brasil ocorrem três regionais, Baja SAE BRASIL Etapa Sul, Sudeste e Nordeste; e um nacional, Baja SAE BRASIL, este vencido sete vezes pela equipe da EESC-USP (1995, 1996, 1997, 2006, 2003, 2008, 2018). Atualmente, as três melhores equipes no Baja SAE BRASIL ganham uma vaga para o mundial [4, 5].

## 1.2 Análise Modal: Modos de vibração e frequência de ressonância - estrutura e conforto

Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação e essas podem causar desde desconforto até falhas mecânicas devido a fadiga resultante da variação cíclica da tensão induzida. Além de provocarem o desgaste mais rápido e ruídos [6].

Uma parte da Análise Modal é o estudo dos modos de vibrar do corpo para se evitar a Ressonância, quando a frequência natural de vibração de uma estrutura coincide com uma frequência de excitação externa.

No Baja SAE, o motor *Briggs Stratton OHV Intek Model 19* ou o *20* pode excitar o chassi (gaiola) e assim acelerar o desgaste, propiciando uma falha mecânica como uma fratura e gerar desconforto para o piloto.



Figura 4: Baja da EESC-USP.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Desenho Assistido por Computador (CAD)

A primeira etapa do projeto foi a criação de um modelo 3D do chassi no software de projetos Creo, também utilizado na etapa posterior de modelos de simulações. O desenho 3D foi desenvolvido a partir da criação dos pontos de fixação, ou seja, os vértices do desenho. Em seguida foram criadas linhas conectando os vértices do modelo, que posteriormente, em outra etapa do desenho se tornariam os tubos que compõem o chassi em propriamente dito.

Em seguida foi realizada a simulação de excitação do chassi em diversas frequências naturais e a partir disso analisado diferentes modos de vibrar. Os primeiros 6 modos de vibrar foram descartados pois são modos de vibrar de corpo rígido e seus valores se aproximam de zero, portanto o sétimo modo de vibrar da simulação foi considerado o primeiro modo na prática, e assim por

diante.

## 2.2 Métodos dos Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos consiste em subdividir o corpo rígido a ser estudado em pequenas partes, denominadas elementos. A partir disso o método substitui infinitas variáveis desconhecidas por finitos elementos de comportamento conhecido a serem analisados computacionalmente. A aplicação do Método de Elementos Finitos neste projeto concerne a análise estrutural, apesar do método também possuir outras utilidades.

## 2.3 Modelos de Simulações

Nas simulações determina-se as frequências naturais da estrutura (frequências de ressonância) e as seções que apresentarão maiores tensões e deslocamentos (seções críticas), essas que tendem a danificar primitivamente.

# 3 Análise Modal Computacional

## 3.1 Procedimentos

Com o projeto desenhado no Creo (CAD), aplica-se uma carga ou uma determinada frequência de vibração, geralmente a dos modos de vibrar (modos naturais) para analisar as deformações e tensões máximas impressa na estrutura. Na análise do chassi, foi utilizado a frequência do 7º ao 11º modo de vibrar da estrutura.

## 3.2 Resultados

### 3.2.1 7º Modo de Vibrar



Figura 5: 7º Módulo de vibração.





Figura 6: 8º Módulo de vibração.

### 3.2.2 8º Modo de Vibrar

### 3.2.3 9º Modo de Vibrar



Figura 7: 9º Modo de vibração.

### 3.2.4 10º Modo de Vibrar

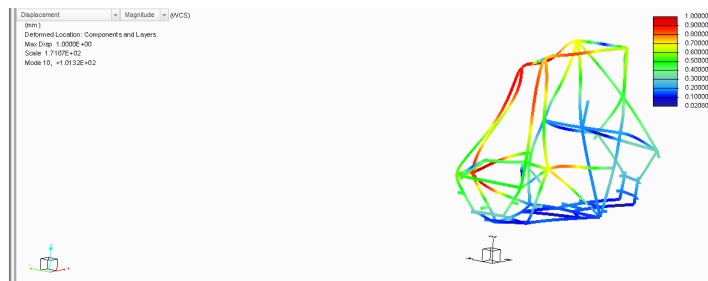


Figura 8: 10º Modo de vibração.

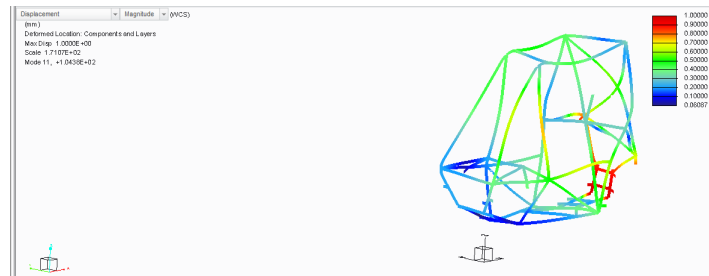


Figura 9: 11º Modo de vibração.

### 3.2.5 Módulo11

## 4 Análise Modal Experimental

### 4.1 Procedimentos

Foi utilizado um martelo de impacto e três acelerômetros 352A24 da PCB Piezotronics e um analisador de sinal da Data Physics Corporation. Primeiro, o chassi foi suspenso para ter a translação e rotação livres nas três dimensões quando excitado pelo martelo de impacto. Depois, fixa os acelerômetros com

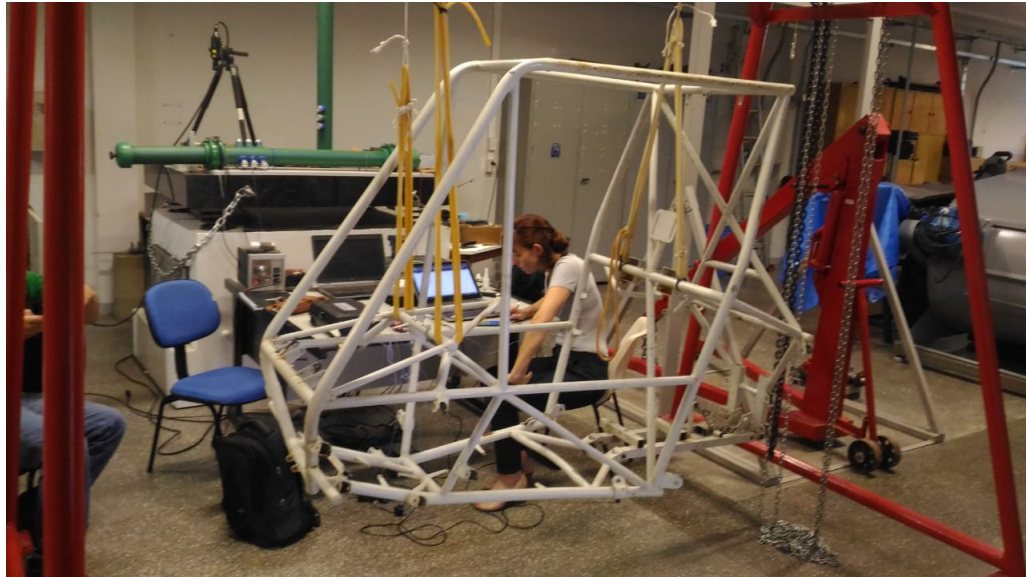


Figura 10: Chassi suspenso no Laboratório de Dinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos.

base na Análise Modal Computacional escolhendo os tubos onde há maior de-

formação para melhor eficácia. Por fim, bate o martelo que fornece energia à estrutura e os acelerômetros captam a aceleração do sistema e os dados vão para o analisador de sinal que em conjunto com o Matlab, pode-se plotar o gráfico para análise.

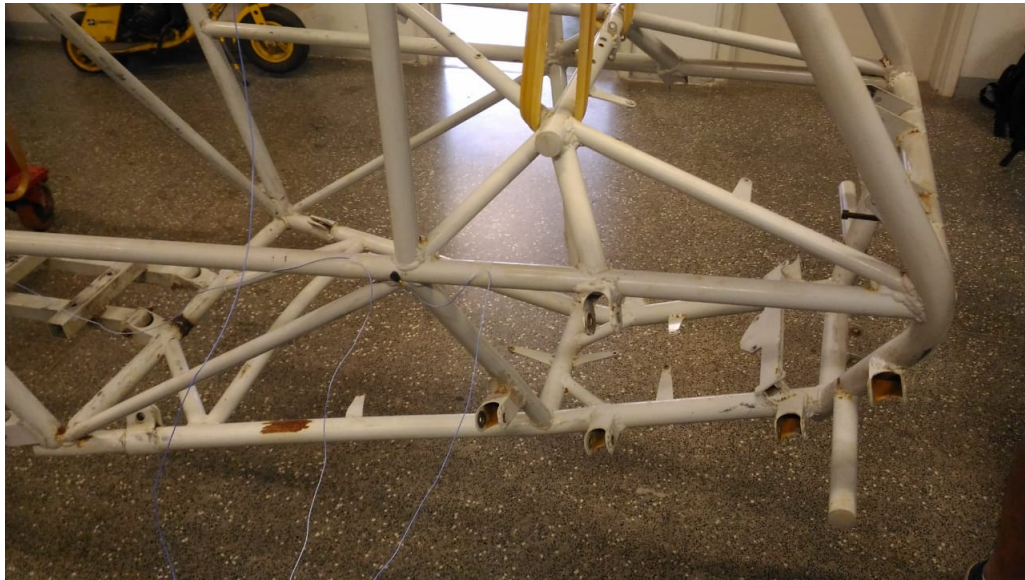


Figura 11: Acelerômetros dispostos no chassi.

## 4.2 Resultados

Através dos gráficos se observa os picos de aceleração dos acelerômetros e encontram-se as frequências de ressonância.

## 5 Análise e Validação

Compara-se os valores obtidos na Análise Modal Computacional e Experimental obtendo para os seis primeiros modos o valor próximo de zero, ou seja, o mesmo valor, o décimo-primeiro foi de 1% e para os outros modos a diferença foi de 5 a 6%, exceto para o oitavo que apresentou variação de 17%. Mas sabe-se o intervalo que esse está compreendido. Dessa maneira, a variação média está dentro do esperado e o modelo ratificado para outras simulações e experimentos. A variação entre as análises deve-se às soldas, ferrugens e deformações na gaiola que não constam no CAD, aos acelerômetros dispostos no chassi e às forças de amortecimento como o atrito com o ar e com as borrachas que estabilizam a gaiola. Sendo a faixa de vibração do motor de 180 - 400 Hz, pode-se garantir que o chassi não será excitado pelo motor.

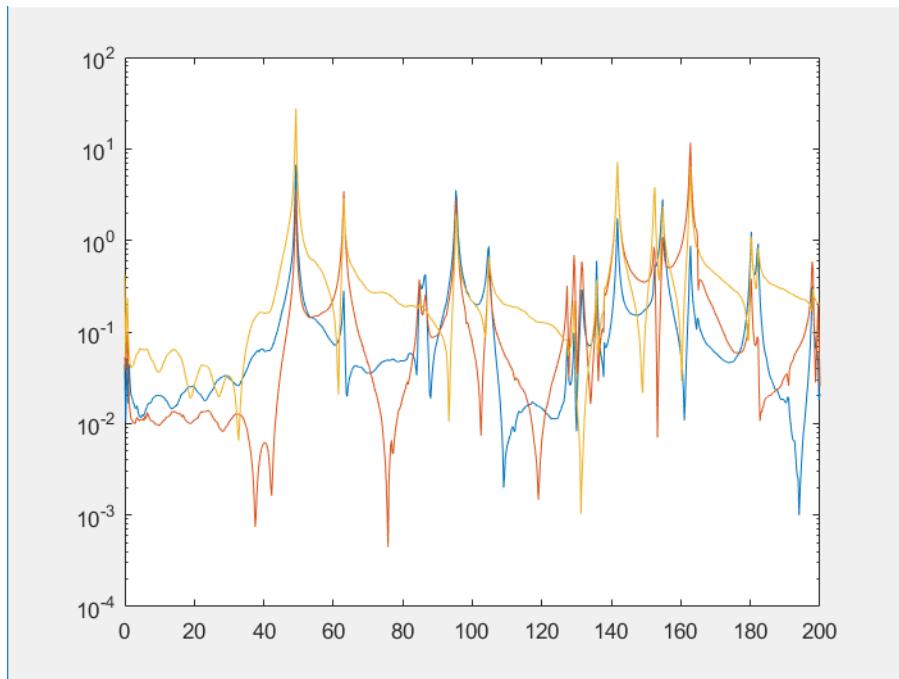


Figura 12: Gráfico frequência x aceleração.

Figura 13: Tabela comparativa computacional x experimental.

Modos (Hz)	Computacional	Experimental	C/E
1º	0	0	1*
2º	0	0	1*
3º	0	0	1*
4º	0	0	1*
5º	0	0	1*
6º	0	0	1*
7º	53,83	50,5	1,06
8º	73,87	63	1,17
9º	90,65	85,7	1,05
10º	101,3	95,5	1,06
11º	104,4	105	0,99

## 6 Conclusão

Através das Análises Modais, Computacional e Experimental pode-se afirmar que o motor não excitará a estrutura, pois a faixa de frequência é distinta,

a do chassi é de 50 - 105 Hz e a do motor 180 - 400 Hz. Além de que o modelo computacional foi validado devido a paridade com o experimental, assim pode-se usá-lo (constante de rigidez, geometria e outros elementos) para outros experimentos e simulações.

## Referências

- [1] Baja 1000 kernel description. Acessado: 22/06/22.
- [2] Baja Bug kernel description. Acessado: 22/06/22.
- [3] Baja California kernel description. Acessado: 22/06/22.
- [4] Baja California kernel description. <https://www.britannica.com/place/Baja-California-state-Mexico>. Acessado: 2018-06-22.
- [5] MiniBaja kernel description. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Minibaja>. Acessado: 22/06/22.
- [6] Singiresu Rao. *Vibrações Mecânicas*. Pearson, 4ª edição edition, mês 2014. Anotação.