

**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**PROJETO DE UMA BANCADA DE TESTES  
ESTRUTURAIS PARA ENSAIO DE PROTÓTIPOS DE  
CHASSIS - FGA**

**Autor: Údine Rodrigues de Oliveira  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Tatiana Mota Anflor**

**Brasília, DF**

**2017**



**ÚDINE RODRIGUES DE OLIVEIRA**

**PROJETO DE UMA BANCADA DE TESTES ESTRUTURAIS PARA ENSAIO DE  
PROTÓTIPO DE CHASSIS - FGA**

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: Professora Doutora Carla  
Tatiana Mota Anflor

**Brasília, DF**

**2017**

**CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Oliveira, Údine.

Projeto de uma Bancada de Testes Estruturais para Protótipos de chassis / Údine Rodrigues de Oliveira. Brasília: UnB, 2016. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Carla Tatiana Mota Anflor.

1. Bancada de Testes. 2. Chassis. 3. Elementos Finitos. Anflor, Carla. Dra.

CDU Classificação

**PROJETO DE UMA BANCADA DE TESTES ESTRUTURAIS PARA ENSAIO DE  
PROTÓTIPO DE CHASSIS - FGA**

**ÚDINE RODRIGUES DE OLIVEIRA**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em \_\_/\_\_/2016 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr.<sup>a</sup>: Carla Tatiana Mota Anflor, UnB/ FGA**

Orientador

Brasília, DF

2017

## RESUMO

A concepção de um veículo requer bastante atenção nas etapas do projeto de todos seus sistemas, de forma que os detalhes envolvidos devem ser cuidadosamente estudados. Veículos que transmitem uma boa experiência ao dirigir são bem aceitos pelo consumidor, e costumam conquistar espaço no mercado. Dentre os sistemas automotivos, o chassi, juntamente com o sistema de suspensão, podem ser considerados. Surge então a necessidade de compreender ao máximo o comportamento do chassi quando sujeito a esforços diversos, sendo estes devido à irregularidades na estrada, a acelerações e a frenagens, bem como devidos ao peso de todos os subsistemas que são acoplados à estrutura. Nesse sentido este trabalho tem por objetivo desenvolver uma bancada para ensaios de protótipos de chassi em escala reduzida. A bancada será projetada e simulada numericamente de forma que permita o estudo do maior número possível de configurações de chassi. Após projetada e verificados os critérios de falha, a bancada será então manufaturada. Após construída a bancada, será concebido um modelo físico de um chassi, que será então ensaiado experimentalmente para obtenção de valores de deslocamentos e deformações em pontos específicos através da técnica de extensometria. Concluídas estas etapas, os dados obtidos de forma numérica serão então confrontados com os obtidos numericamente.

**Palavras-chave:** Bancada de teste, Chassis, Elementos Finitos, Extensometria, Análise Estrutural

## ABSTRACT

The conception of a vehicle entails a lot attention in the steps of a project and all your systems by the way than the details involved must be carefully studied. Vehicles which provides a good driving experience are well accepted by the consumer and normally win market space. Among the automotive systems, the chassis, jointly with the suspension system may be considered system that most influences the driver's experience. Then appears the necessity of fully understand behavior of chassis when exposed to any loads. These loads come from: irregularities in the road, accelerations and brakings, and also due all subsystems' wheight attacheds in the structure. The stand will be projected and numerically analyzed in order to provide the maximum number of chassis settings. Once projected and verified the fail criterias, the stand will be manufactured. After this step, a physical chassis model will be built and an static structural analysis will be experimentally made in order to obtain local tension and deformation values at especific areas using extensometers. The data obtained by FEA will be compared to those obtained numerically.

**Keywords:** Test bench, Chassis, Finite Element, Extensometer, Structural Analysis

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>111</b>
1.1 SISTEMAS AUTOMOTIVOS .....	111
1.1.1 SISTEMA DE POTÊNCIA.....	11
1.1.2 SISTEMA DE TRANSMISSÃO.....	12
1.1.3 SISTEMA DE SUSPENSÃO.....	13
1.1.4 CHASSI.....	13
1.2 MERCADO AUTOMOTIVO.....	14
1.3 OBJETIVO GERAL.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.4 METODOLOGIA.....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>1Error! Bookmark not defined.</b>
2.1 CONCEITOS SOBRE ESTRUTURAS .....	<b>1Error! Bookmark not defined.</b>
2.2 CONCEITOS SOBRE CHASSIS .....	<b>1Error! Bookmark not defined.</b>
2.3 TIPOS DE CHASSIS .....	19
2.3.1. CHASSI TIPO ESCADA .....	19
2.3.2. CHASSI TIPO MONOBLOCO.....	20
2.3.3. CHASSI TUBULAR.....	22
2.4.4. CHASSI BACKBONE.....	23
2.4 A ANÁLISE ESTRUTURAL.....	24
2.4.1. A ANÁLISE ESTRUTURAL.....	24
2.4.2. ANÁLISE ESTÁTICA.....	24
2.4.3. ANÁLISE DE FADIGA.....	25
2.5 MÉTODOS COMPUTACIONAIS DE ANÁLISE ESTRUTURAL.....	25
2.5.1. COMENTÁRIOS SOBRE OS MÉTODOS ANALÍTICOS.....	25
2.5.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	26
2.5.3 A ESCOLHA DO ELEMENTO .....	28
<b>3 PROJETO DA BANCADA.....</b>	<b>216</b>
3.1 REQUISITOS FUNCIONAIS .....	<b>2Error! Bookmark not defined.</b>
3.2 A BANCADA.....	32
3.2.1. EXPLICAÇÃO SOBRE AS PARTES DA BANCADA.....	33
3.3 ESPECIFICAÇÕES E LIMITAÇÕES PARA OS ENSAIOS MECÂNICOS.....	41.
<b>4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>42</b>
<b>5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>43</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos antigos o homem precisa se locomover para a realização de suas necessidades diárias. Segundo Jones & Womak (2004), a criação do automóvel foi a invenção que mais revolucionou os meios de transporte e teve grande impacto na produtividade da civilização moderna. Desde o início do século XVII as tecnologias envolvidas na criação do automóvel vêm sendo desenvolvidas muito rapidamente. Por volta de 1769, ocorreu a invenção do primeiro motor a vapor. Após uma série de aperfeiçoamentos e estudos, esta máquina passou a ser usada no âmbito industrial. Karl Benz em 1876 marcou a era dos veículos modernos com o lançamento do modelo *Benz Patent-Motorwagen*. O motor de combustão interna foi inventado no século XIX e é o tipo de motor empregado na maioria dos veículos atuais.

Um automóvel é constituído de diversos sistemas, e estes por sua vez são formados por uma série de sub-sistemas. Basicamente, um carro é composto pelo sistema de potência, sistema de transmissão e chassi. A função de cada um destes será explicada no tópico a seguir.

### 1.1. SISTEMAS AUTOMOTIVOS

#### 1.1.1 Sistema de Potência

É o motor do veículo, responsável por converter energia, geralmente química ou elétrica, em energia mecânica, tornando possível a movimentação do veículo. Este sistema está acoplado ao sistema de transmissão do veículo. A Fig. (1) traz um deste sistema:





Figura 1 - Motor de um Ford Mustang 2012. (Disponível em <http://ultradownloads.com.br/papel-de-parede/Motor-Mustang/>). Acesso em 23/08/2016 )

### 1.1.2. Sistema de Transmissão

Como sugere o nome, é responsável por transmitir às rodas a energia proveniente do sistema de potência, bem como possibilitar o controle da relação de velocidades entre o motor e as rodas do veículo. Este é mostrado na Fig. (2):

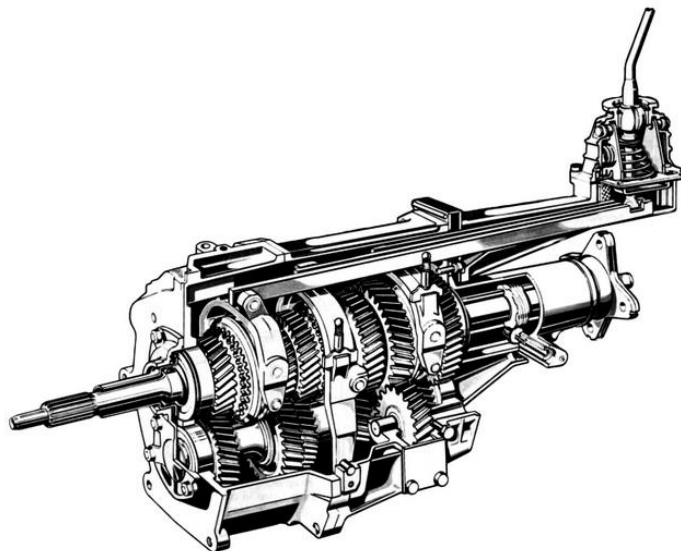


Figura 2 - Exemplo de um sistema de transmissão. (Disponível em <http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2015/10/funcionamento-e-tipos-de-caixas-de-marchas-para-sistemas-de-transmissao-automotivos/>). Acesso em 23/08/2016 )

### 1.1.3. Sistema de Suspensão

A função deste sistema é maximizar o atrito entre os pneus e o solo bem como fornecer bom controle e estabilidade ao motorista. A suspensão também serve para assegurar o conforto e segurança dos passageiros, pois o comportamento dinâmico do automóvel é altamente dependente deste sistema. A Fig. (4) mostra tipos distintos de suspensões do tipo independente.

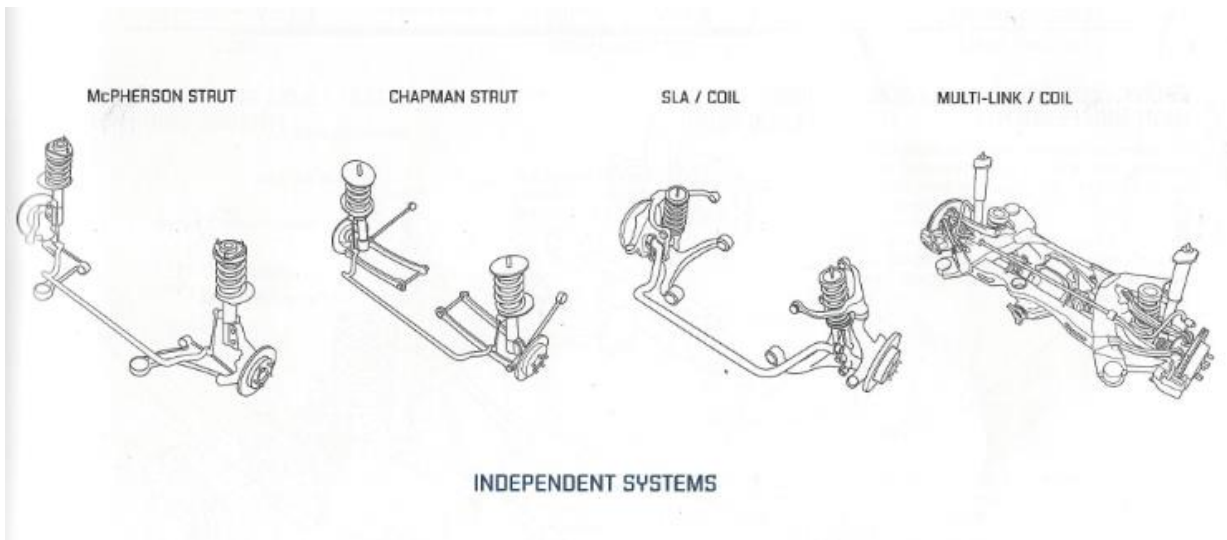


Figura 3 - Exemplos de sistemas de suspensão (MACEY & STUART, 2009)

### 1.1.4. Chassi

É a estrutura na qual são montados todos os demais sistemas automotivos. É uma das partes de maior importância no projeto automotivo.



Figura 4 - Exemplo de chassi. (Disponível em <<http://www.4x4brasil.com.br/forum/toyota-bandeirante/34820-fabricar-chassis.html>> Acesso em 30/08/2016)

## 1.2. O MERCADO AUTOMOTIVO

A indústria automotiva é um mercado extremamente competitivo onde detalhes podem fazer grande diferença. Detectar, compreender e aperfeiçoar estes detalhes se fazem necessários para que o consumidor do automóvel tenha uma experiência singular ao dirigir. Segundo Danielsson & Cocaña (2015) com as crescentes exigências em produzir carros cada vez mais leves, a rigidez da estrutura do veículo acaba por ser prejudicada, comprometendo seu comportamento dinâmico.

Fica evidente a necessidade de dedicar bastante esforço no projeto do chassi ou do monobloco de um veículo, pois a dirigibilidade do automóvel é completamente dependente de parâmetros do chassi. Conclui-se então que um bom projeto da estrutura do veículo trará como consequência uma boa experiência ao dirigir.

## 1.3. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é avaliar variáveis de projeto de uma bancada didática para a realização de ensaios de flexão em protótipos de chassis e construí-la. Os resultados de deformações e tensões destes ensaios serão obtidos através da técnica de extensometria, e serão posteriormente comparados com os resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos.

#### 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar a revisão bibliográfica referente aos temas a serem tratados ao longo deste trabalho.
2. Levantar os requisitos da bancada com base nas especificações técnicas de veículos comerciais que são montados sobre chassis do tipo escada
3. Desenhar um chassi tipo escada genérico
4. Modelar numericamente a análise estática deste chassi, para saber a carga que poderá ser aplicada no ensaio de forma a manter a integridade desta estrutura
5. Utilizar este valor de carga como parâmetro de resistência para o projeto da bancada de testes
6. Desenhar uma bancada de testes que permita o apoio de chassis de diferentes dimensões, dentro de uma determinada faixa.
7. Elaborar uma estrutura capaz de suportar o pistão de um esticador hidráulico, e que tenha posição ajustável
8. Realizar a análise estática desta bancada numericamente a fim de verificar se esta apresentou valores de tensões suficientemente abaixo de sua tensão de escoamento.
9. Construir o chassi e a bancada de testes
10. Instrumentar o chassi com os extensômetros
11. Realizar o ensaio de flexão e obter os dados de deformações e tensões nos locais especificados
12. Realizar o ensaio de flexão computacional, e comparar os resultados obtidos

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CONCEITOS SOBRE ESTRUTURAS

Estruturas: são sistemas físicos com capacidade de receber e transmitir esforços, como por exemplo pontes, torres e edifícios. Segundo Lima & Soriano, (2006), um dos principais objetivos de análise de estruturas é relacionar as forças externas atuantes com os deslocamentos, reações de apoio e tensões, de forma que seja possível identificar eventuais deficiências de comportamento do material que constitui a estrutura como um todo, assim como de suas partes.

A análise estrutural requer um modelo de análise que é descrito por equações matemáticas nas quais seus resultados devem representar o comportamento da estrutura, seja de forma exata ou aproximada.

### 2.2. CONCEITOS SOBRE CHASSIS

Um chassi de um automóvel é uma estrutura e segundo Chandra, et al (2012) é o esqueleto no qual todos os demais sistemas mecânicos de um veículo são acoplados. Sua importância também se estende ao comportamento dinâmico do veículo, ou seja, a sensação do mesmo ao ser dirigido. Este deve ser suficientemente rígido para reagir a cargas estáticas e dinâmicas sem deformação excessiva. No que se refere à segurança passiva, o chassi em casos de impacto deve se deformar de forma a minimizar quaisquer tipos de riscos para os ocupantes internos do veículo.

A carroceria é a estrutura que abriga os ocupantes e os sistemas do veículo. Esta é montada sobre o chassi, exceto em veículos com monobloco, e também tem função importante na segurança passiva e na rigidez do veículo

Figura 5. Sistema de Coordenadas de um veículo, (GILLEPSIE, 1992)

## 2.3. TIPOS DE CHASSIS

### 2.3.1. Chassi Tipo Escada

É o tipo de chassi mais antigo. Foi utilizado na maioria dos veículos até a década de 60. Consiste em duas barras longitudinais, chamadas longarinas diversas barras transversais, chamadas transversinas. Dispõe da possibilidade de que sejam montados tipos variados de carroceria num mesmo chassi. Por causa deste fato ele é amplamente empregado em veículos utilitários, como pick-ups, SUVs e veículos pesados, como ônibus e caminhões. Segue abaixo um exemplo deste tipo de estrutura:

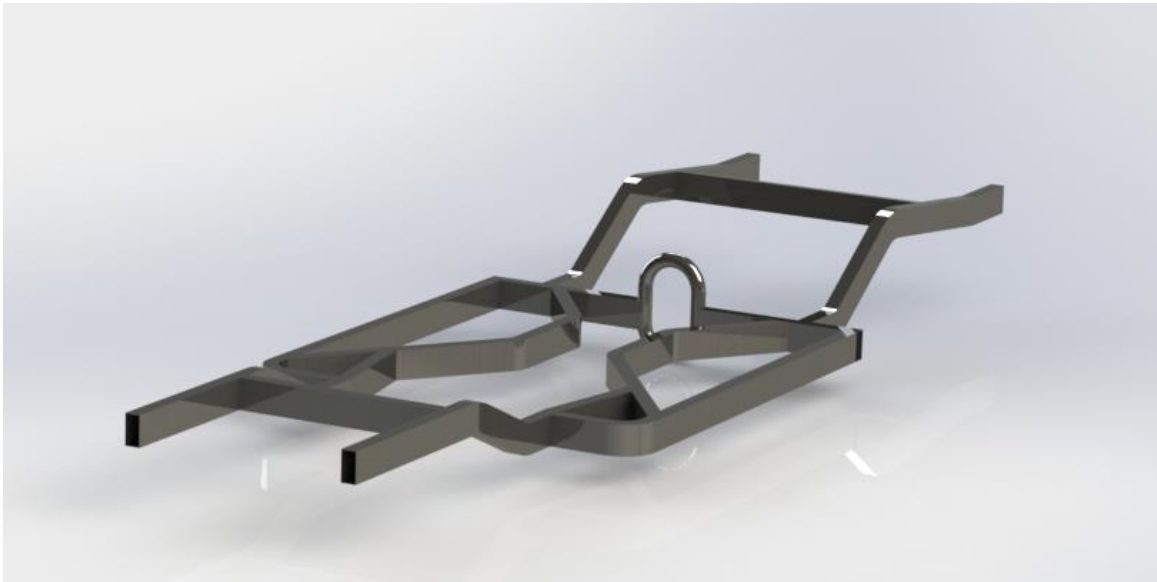


Figura 8 - Chassi Escada Modificado de um Mustang 1967

As vantagens de uma estrutura do tipo escada são que esta possui rigidez flexional satisfatória, e sua fabricação é mais simples e barata do que dos demais tipos de chassis, e consiste basicamente na calandragem e solda de perfis de aço estrutural. Seu reparo em caso de acidentes é também mais simples do que os demais tipos.

Em contrapartida sua rigidez torcional se desfavorece, pelo fato de configuração geométrica praticamente plana, o centro de massa do veículo é mais alto e em caso de colisões este chassi não absorve tanto o impacto devido à sua pouca deformação, desfavorecendo a segurança passiva. (HAPPIAN-SMITH et al, 2002).

### 2.3.2. Chassi Tipo Monobloco (monocoque)

O monobloco é uma estrutura na qual o chassi e a carroceria são integrados formando uma peça única. Diferentemente do chassi tipo escada, sua fabricação não consiste simplesmente da calandragem e da soldagem de perfis de aço estrutural. A fabricação de um chassi monocoque requer a estampagem, prensagem e a soldagem de diversas chapas metálicas, geralmente feitas de aço estrutural ou alumínio (MACEY, 2009). A figura(9) ilustra este tipo de chassi.



Figura 9 - Estrutura do tipo monobloco

(Disponível em <<http://www.fgracing.com.br/#Chassi-Saiba-mais-sobre-o-esqueleto-do-carro/c1oh6/55b7acc70cf2d0bb156bf551>>. Acesso em 03/09/2016 )

Atualmente esta é a estrutura mais utilizada em veículos de passeio. tem como vantagem uma alta eficiência na proteção contra impactos (CHANDRA et al, 2012). Nesta estrutura também há regiões mais reforçadas ao longo de todo o monobloco, que podem ser associadas às transversinas e longarinas dos chassis tipo escada.

Este tipo de configuração possui as vantagens de diminuir o centro de gravidade do veículo, e oferecer uma boa rigidez torcional em comparação ao tipo escada, fazendo com que o veículo ofereça melhor dirigibilidade.

As desvantagens deste tipo de estrutura são a alta complexidade de sua fabricação, que exige alto custo ferramentário, pois requer moldes e máquinas de estampagem, fazendo com que a produção em escala abaixo de 100.000 veículos por anos seja inviável (OLIVEIRA, 2007).

### **2.3.3. Chassi Tubular (Spaceframe)**

Estruturas tubulares são bastante utilizadas na construção civil, principalmente quando deseja-se cobrir grandes vãos. Estas estruturas também chamadas de treliças tridimensionais são a resposta quando baixo peso, e alta rigidez são requisitos (Lan, 1999).

O primeiro projeto de chassi *spaceframe* foi utilizado em um avião e foi desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial por um aviador da Inglaterra. Esta invenção fez com que estas aeronaves tivessem capacidade de suportar uma quantidade muito maior de danos em relação aos demais aviões convencionais, além de proporcionar melhor controle aos pilotos (OLIVEIRA, 2007).

Em automóveis a estrutura tubular costuma ser utilizado em veículos de alta performance e de competição. Consiste em diversas barras, em sua maioria cilíndricas com diâmetros relativamente pequenos, sendo que cada ponto de junção deve ser comum entre no mínimo 3 barras. Esta configuração faz com que estes membros estejam sujeitos apenas a esforços de tração e de compressão, evitando torção e flexão nas barras (OLIVEIRA, 2007). Segue um exemplo de chassis *spaceframe*.



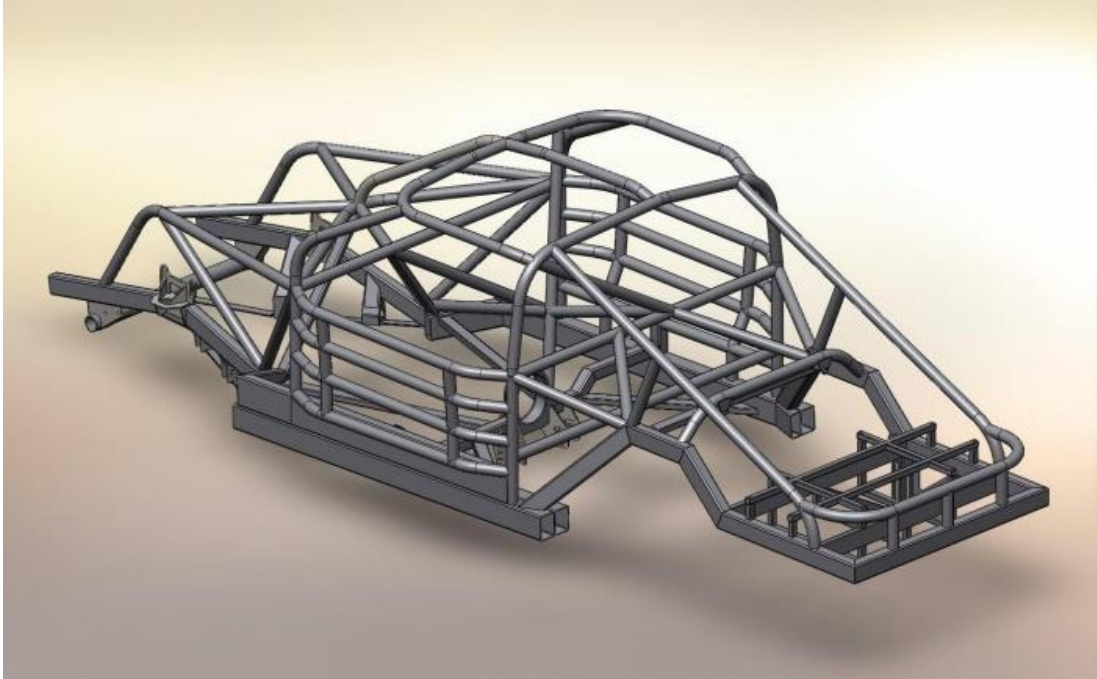


Figura 10 - Chassi tubular. (Disponível em <http://www.coroflot.com/thoke/motorsport>> Acesso em: 05/09/2016)

Esta configuração de chassi faz com que o veículo apresente valores maiores de rigidez torcional e flexional em relação aos tipos escada e monobloco, oferecendo melhor dirigibilidade. A desvantagem é que o espaço do habitáculo fica comprometido devido à grande quantidade de barras dispostas ao longo de toda estrutura.

#### **2.3.4. Chassi Coluna Vertebral (Backbone)**

É um tipo de chassi cujo único membro estrutural é um túnel robusto. Consiste num tubo retangular centralizado no veículo, semelhante a uma coluna vertebral, no qual em suas extremidades são conectados os eixos dianteiro e traseiro, conforme mostra a Fig. (11). O motor e câmbio são localizados na cavidade desta estrutura.

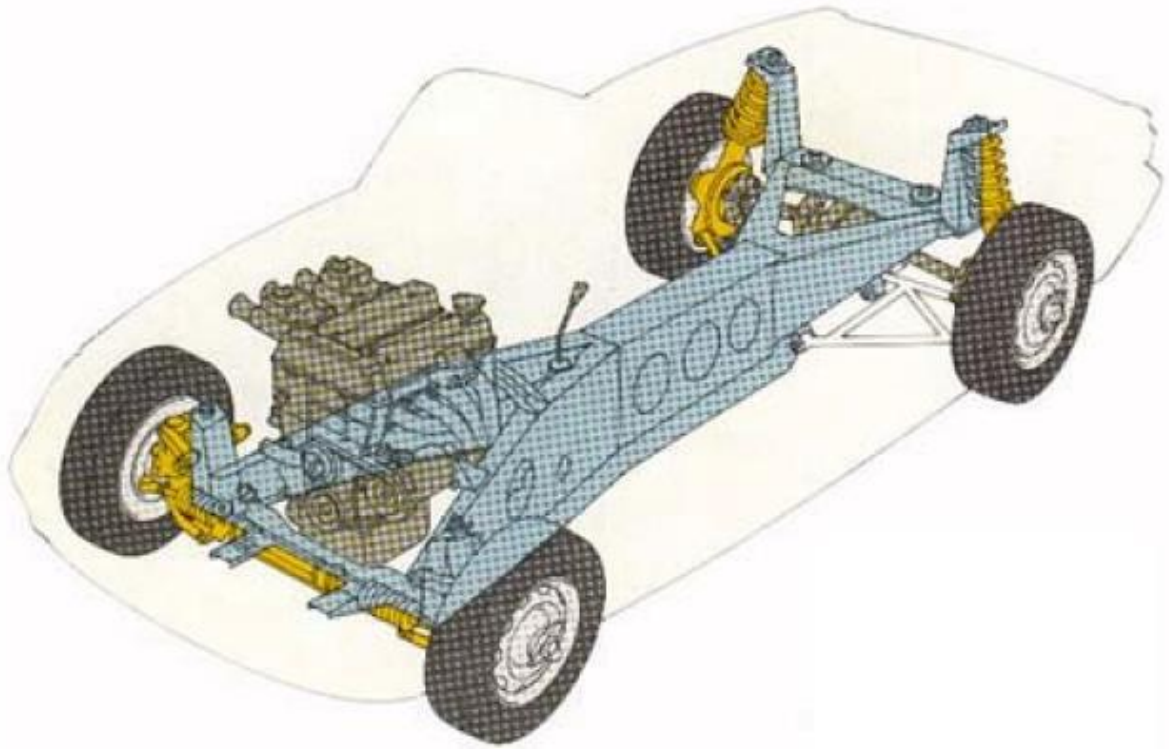


Figura 11 - Chassi Backbone (COSTA, 2001)

Segundo Chandra et al (2012), este tipo de chassi é de fácil fabricação, possui boa resistência e costuma ser utilizado em veículos esportivos pequenos. Suas desvantagens são o difícil acesso para manutenções ao motor e caixa de mudanças e a pouca proteção contra impactos laterais, o que requer uma carroceria bastante rígida nestas regiões.

## 2.4. A ANÁLISE ESTRUTURAL

### 2.4.1. A Análise Estrutural

A durabilidade de componentes mecânicos depende bastante de como o projetista ajusta as tensões máximas na estrutura, para que estas sejam menores que as resistências limite desta em locais específicos. Deve-se fazer com que a tensão máxima seja menor que a resistência por uma margem suficiente, para que a ocorrência de falha seja o mais próxima de zero possível, mesmo com todas as incertezas presentes.

### 2.4.2. Análise Estática

A análise estática consiste no cálculo dos efeitos em estruturas de carregamentos que não variam com o tempo, chamados de cargas estáticas, considerando desprezíveis os efeitos de amortecimento e de inércia.. A partir de uma análise estática pode-se obter valores de deslocamentos, deformações e tensões na estrutura e em seus componentes. As cargas aplicadas num corpo de prova em um ensaio de tração, por exemplo, podem ser consideradas como estáticas, pois apesar da magnitude da carga aplicada no CP aumentar de forma gradual, ela aumenta de forma lenta o suficiente para que a tensões e deformações de desenvolvam de forma plena (SHIGLEY, 2005).

Na pior condição de carregamento estático, a tensão na estrutura não deverá exceder 67% de sua tensão de escoamento (HAPPIAN-SMITH et al, 2002). Este requisito é chamado de critério de integridade. Se uma estrutura em sua condição mais severa de operação apresentar valores de tensão que obedeçam ao critério de integridade, é dito que esta foi validada na análise estática.

### 2.4.3. Análise de Fadiga

É possível que um componente estrutural tenha sido validado na análise estática e ainda assim falhar em suas condições de operação. Isto ocorre devido à falha por fadiga. As falhas por fadiga ocorrem devido a carregamentos cíclicos, ou seja, que variam no tempo e são aplicados segundo uma frequência específica. Este tipo de falha ocorre geralmente em níveis de tensão bastante menores que os valores de resistência ao escoamento dos materiais (NORTON, 2013). O objetivo da análise de fadiga é determinar o número de ciclos que um componente mecânico sujeito a uma determinada tensão poderá ser submetido até que ocorra a falha.

A forma gráfica de representar o número de ciclos em função da tensão variante aplicada é chamada de Diagrama S-N, ou diagrama de Wöhler, em homenagem a August Wöhler, engenheiro alemão que conduziu durante 12 anos os primeiros trabalhos na área de fadiga. Este diagrama mostra a relação entre a tensão  $S$  aplicada a uma peça e sua vida correspondente, expressa em  $N$  números de ciclos.

Considera-se aprovado na Análise de Fadiga todo componente que não apresentar falhas em até  $10^6$  ciclos quando submetido às suas condições de trabalho.

## 2.5. MÉTODOS COMPUTACIONAIS DE ANÁLISE ESTRUTURAL

### 2.5.1. Comentários sobre os Métodos Analíticos

Os Métodos Analíticos Clássicos de solução de problemas permitem a partir de equações diferenciais calcular as soluções exatas de dados como deformações, deslocamentos e tensões para qualquer ponto de uma estrutura contínua. Segundo Filho (2012), a desvantagem do uso de soluções analíticas é o fato destas se limitarem a um pequeno leque de aplicações, pois as soluções exatas, em geral, se restringem a sistemas de geometria simples e com condições de carregamento "bem comportadas". Para contornar estes problemas, recorre-se para as técnicas de discretização de sistemas contínuos.

### 2.5.2. Método dos Elementos Finitos

Sabe-se que as tensões são variáveis através do contínuo de qualquer componente estrutural. A discretização de um sistema contínuo consiste em representá-lo pela sucessão de diversos pequenos elementos, chamados elementos finitos. Estes elementos estão conectados entre si através de pontos, estes chamados de nós. A Fig.(12) ilustrará os conceitos citados neste tópico.

Os softwares de elementos finitos oferecem uma biblioteca de diversos grupos de elementos finitos, como por exemplo elementos de placa, de viga, de membrana, sólidos, dentre outros, cada um adequado a um diferente comportamento físico. Cada grupo de elementos finitos possuirá um diferente comportamento e um diferente número de graus de liberdade. O número de graus de liberdade significa o número de coordenadas independentes necessárias para descrever o movimento de qualquer corpo (RAO, 2009). O comportamento de uma estrutura é descrito por intermédio de funções matemáticas que contabilizam a rigidez de cada elemento. Cada tipo de elemento apresentará uma combinação de rigidezes axial, de flexão, cisalhamento ou torção, descritos por sua matriz de rigidez. Ao dispor de uma biblioteca de elementos, o projetista poderá construir um modelo adequado de uma estrutura, desde que haja conhecimento da forma como cada elemento trabalha. Segue abaixo uma imagem que representa uma viga de perfil "C" sendo estudada pelo método FEA.

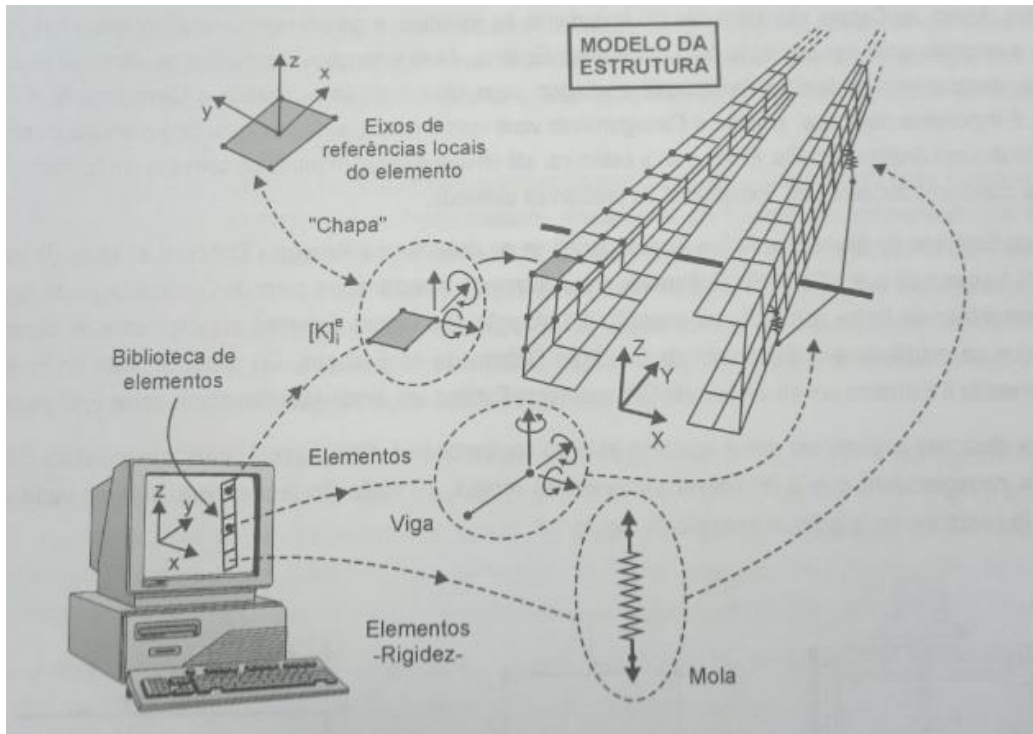


Figura 12 - Esquema do procedimento computacional para o método dos elementos finitos (FILHO, 2012).

Cada elemento será descrito através de álgebra matricial por um sistema de um sistema de equações da seguinte forma:

$$\{F\}_e = [K]_e\{\Delta\}_e$$

sendo que  $\{F\}_e$  é o vetor força no qual o elemento está sujeito,  $[K]_e$  a matriz de rigidez do elemento e  $\{\Delta\}_e$  o vetor deslocamento associado ao elemento.

A figura a seguir esquematiza o seguinte processo: através dos sistemas de equação de cada elemento finito, gera-se um sistema global que representa a estrutura. Tendo conhecimento das condições de contorno nas quais a estrutura será imposta calculam-se os deslocamentos nodais.

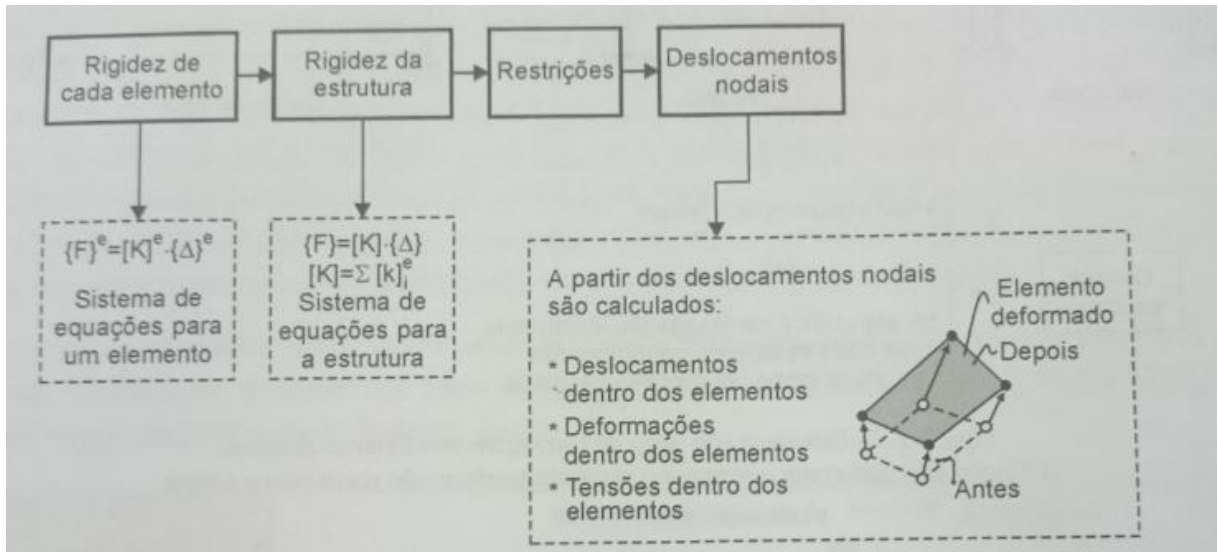


Figura 13 - Esquema do Método *FEA* (FILHO, 2012).

Este método nos permite obter valores aproximados das tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto do componente sujeito às condições de contorno especificadas (NORTON, 2013).

### 2.5.3. Escolha do Elemento

A escolha do elemento finito que descreve de forma adequada o comportamento trecho a trecho de uma estrutura depende do conhecimento da natureza física do problema que nos propusermos a representar (FILHO, 2012). Por exemplo, um elemento de linha 1D possui 2 GDL e pode ser usado para modelar barras de uma treliça, pois esta recebe apenas esforços axiais. Porém uma viga longa com cargas simétricas de flexão ou axial, em relação a sua largura, pode ser analisada com elementos 2D. Já uma estrutura axi-simétrica de paredes finas sujeita a carregamentos simetricamente distribuídos, como em uma tubulação por exemplo, pode ser modelada através de elementos de casca, já que o gradiente de tensão ao longo da espessura das paredes é pequeno. Já a maioria dos elementos de máquinas, devido a complexidade de sua geometria e de suas condições de contorno, requerem o uso de elementos 3D para uma modelagem confiável (NORTON, 2013).

## 2.6. EXTENSOMETRIA

Existem diversos métodos e dispositivos criados com o objetivo de medir deformações em peças e componentes estruturais. Os primeiros dispositivos criados funcionavam pro princípios puramente mecânicos, e como consequência apresentavam certas limitações e erros de medição. Por volta do século 19, *Charles Wheatstone* constatou através de experimentos que os efeitos da variação de resistência elétrica em um condutor sujeito à tensões mecânicas poderiam ser utilizados para medir deformações. Posteriormente, *Eduard E. Simons e Artur Claude Ruge* desenvolveram os primeiros dispositivos eletroeletrônicos para medição de deformações mecânicas, os Extensômetros, ou *Strain Gages*.

### 2.6.1. Estrutura básica de um *Strain Gage*

Existem vários tipos de extensômetros. Em geral, sua estrutura consiste em um filamento metálico contínuo com espessura pequena, de cerca de 4,5 micrômetros, em formato de grade sobre uma camada de um fino material plástico, cobertos com uma fina camada plástica protetora, conforme ilustra a Fig. (21):

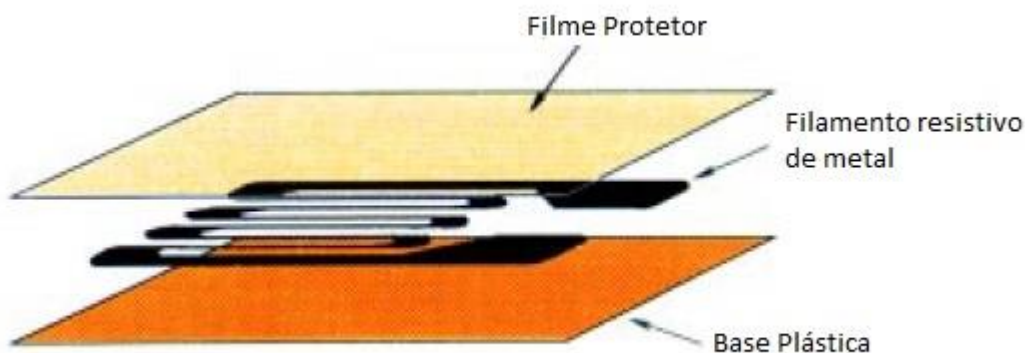


Figura 21 - Estrutura geral de um extensômetro

### 2.6.2. O Uso do Extensômetro

O extensômetro é colado ao objeto no local onde se deseja realizar a medição de deformação, e este irá deformar juntamente da peça ou estrutura na qual for colado. Seu valor de resistência elétrica irá aumentar caso este esteja sujeito a tensões de tração, ou diminuir, no caso de estar sujeito a tensões de compressão. A



magnitude da variação de resistência elétrica em função da deformação mecânica é dada pela Eq.):

$$\delta R = R * K * \epsilon$$

sendo que:

$\delta R$  = variação de resistência elétrica

$R$  = resistência elétrica do extensômetro em repouso em Ohms

$K$  = coeficiente adimensional de sensibilidade do extensômetro

$\epsilon$  = deformação do extensômetro, em *strains*

Observa-se pela Eq.() que é simples obter a deformação  $\epsilon$  de um extensômetro acoplado em uma peça ou componente. Porém, os valores de  $\delta R$ , que são geralmente entre 0,0004 e 0,4 ohms, são pequenos demais para poderem ser medidos por um multímetro. Surge então a necessidade do emprego de um circuito elétrico para medição desta variação de resistência.

### 2.6.3. Ponte de Wheatstone

A ponte de *Wheatstone* consiste num circuito formado por quatro resistores dispostos de forma a permitir medições de pequenas variações de resistência. Seu esquemático é mostrado na Fig.(22):

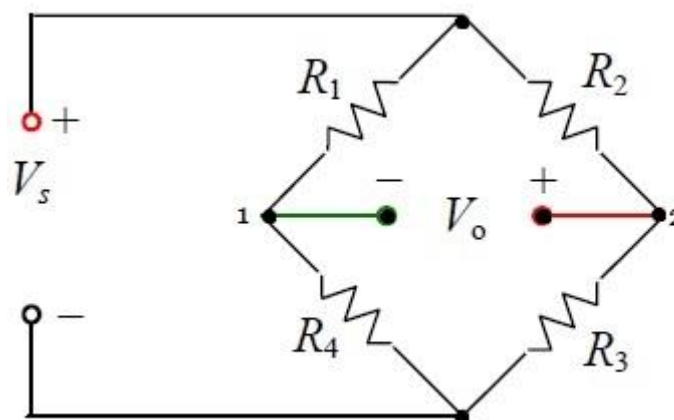


Figura 22 - Ponte de Wheatstone

Sendo que:

$V_s$  = Tensão na fonte de alimentação;

$R_1, R_2, R_3, R_4$  = Resistores;

$V_o$  = Tensão entre os nós 1 e 2

Para realizar as medições de deformação, substitui-se um, dois ou todos os resistores por extensômetros. Estas configurações são chamadas de  $\frac{1}{4}$  de ponte,  $\frac{1}{2}$  ponte e ponte completa, respectivamente, conforme ilustrados na Fig. (23).

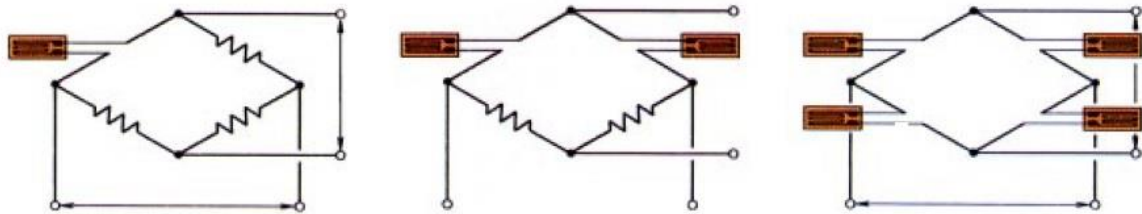


Figura 23 - 1/4 de ponte, 1/2 ponte e ponte completa

Todas estas configurações possibilitam que pequenas variações na resistência elétrica do *Strain Gauge* possam ser medidas através dos valores de  $V_o$  e  $V_s$ . Surge então a possibilidade de correlacionar diretamente os valores de  $V_s$ ,  $V_o$  com o valor de deformação  $\epsilon$  no qual o extensômetro está sujeito. Esta relação é obtida pela Eq.():

$$\epsilon = \frac{4}{n} * \frac{V_o}{V_s} * \frac{1}{K}$$

sendo  $n = 1$  para a configuração de  $\frac{1}{4}$  de ponte,  $n = 2$  para a configuração de  $\frac{1}{2}$  ponte e  $n = 4$  para a ponte completa.

### 3. PROJETO DO CHASSI E DA BANCADA

#### 3.1 O ENSAIO

Serão realizados neste trabalho ensaios de flexão de forma numérica e de forma experimental por extensometria, os quais seguirão as mesmas condições de contorno. O objetivo será comparar resultados obtidos pelos dois métodos. Os resultados a serem comparados serão valores pontuais de deformação axial, e de deflexão correspondentes à diferentes magnitudes de carregamento.

#### 3.1. PROJETO DO CHASSI

O projeto do chassi, assim como o da bancada, tem como objetivo principal possibilitar a realização de um ensaio de flexão. Baseado nisso, foi feita uma verificação dos materiais disponíveis para proceder com a manufatura do chassi. O material escolhido para sua construção foi o aço ASTM A36, devido a suas características mecânicas e à sua ampla disponibilidade no mercado. Suas propriedades mecânicas são descritas na Tab.(1):

Tensão de Ruptura	450 MPa
Tensão de Escoamento	250 MPa
Módulo Elástico ( <i>Young</i> )	200 GPa
Módulo de Cisalhamento	79,3 GPa
Coeficiente de <i>Poisson</i>	0,26
Densidade	7,85 g/cm <sup>3</sup>

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A36

A geometria do chassi escolhida para este trabalho foi o tipo escada, com objetivo de simplificar o ensaio e eliminar possíveis erros provenientes do processo de fabricação. Este é constituído por duas longarinas, duas transversinas, conforme segue na Figs.(14):

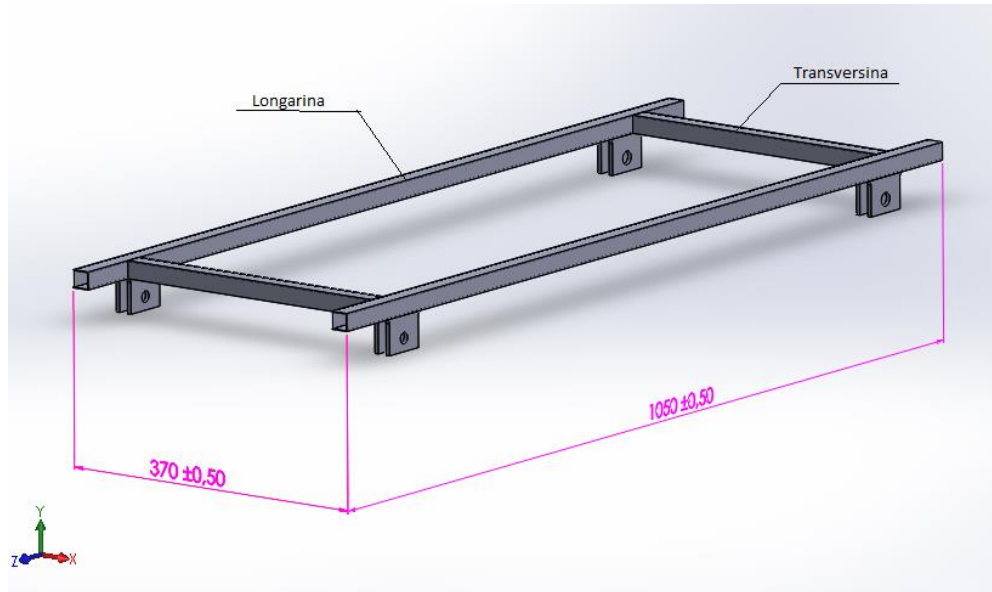


Figura 14 - Chassi para ensaio de flexão - Cotas principais em milímetros

Para permitir que este chassi fosse apoiado sobre uma bancada, este foi construído de forma a possuir regiões de apoio conforme segue nas Figs. (15).

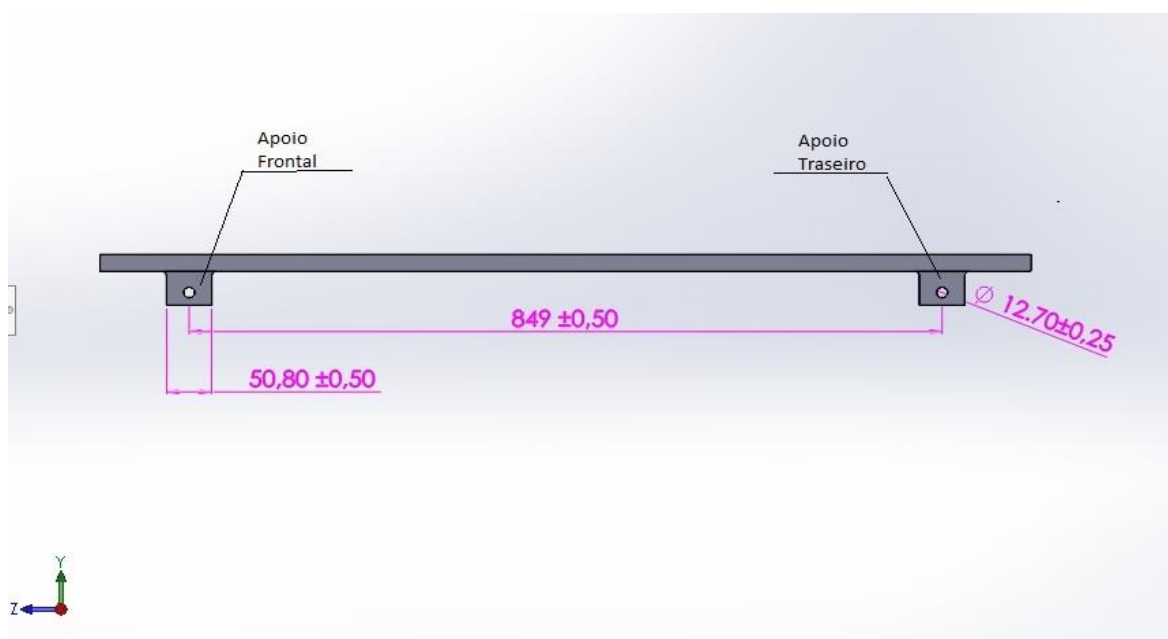


Figura 15 - Vista lateral do chassi com cotas nos apoios - modelo CAD

Com a geometria do chassi definida, estabeleceram-se os parâmetros e condições de contorno nos quais as análises estática experimental quanto a numérica seriam realizadas. As condições de contorno são as seguintes: o chassi deve estar apoiado em todos seus 4 apoios de 2º gênero, de forma que o único movimento possível seja a rotação em torno dos eixo X – comum aos furos dos apoios. O ponto de aplicação de carga são duas regiões de 4,6cm<sup>2</sup>, destacadas em amarelo na Fig.(16), localizadas nos centros das duas longarinas. Garantindo estas condições, o chassi estará sujeito a flexão pura. A Fig.(16) ilustra estas condições de contorno.

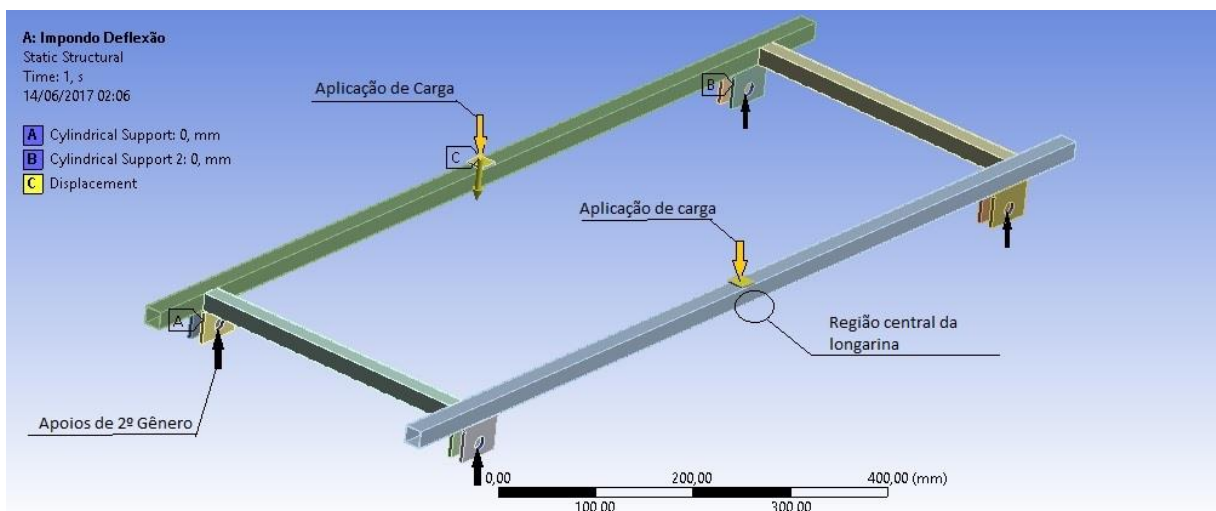


Figura 16 - Condições de Contorno do ensaio de flexão

Quando submetido a estas condições de contorno, espera-se que a região central das longarinas, destacadas na figura anterior, apresentem a maior deflexão da estrutura. Observa-se também que todo o chassi estará sob tensão. Foi estabelecido, atendendo ao critério de integridade citado na seção 2.4.2, que a tensão admissível para o chassi neste ensaio deverá ser de, no máximo, 67% da tensão de escoamento deste material, ou seja, 167,5 Mpa.

Após realizar ensaios na plataforma ANSYS, foi obtido um valor limite de carregamento, igual a 50kgf, de forma a garantir que as tensões ao longo do chassi não ultrapassem a tensão admissível. A distribuição de tensões no chassi proveniente desta carga é mostrada a seguir na Fig.(17).

O valor máximo de tensão na estrutura foi de 277,78MPa, porém, esta tensão está localizada de forma pontual próxima a uma região de concentração de tensões e de aplicação de carga. Levando em consideração o Princípio de *Saint Venant*, este valor de tensão poderá ser desprezado sem trazer prejuízo aos demais resultados desta análise.

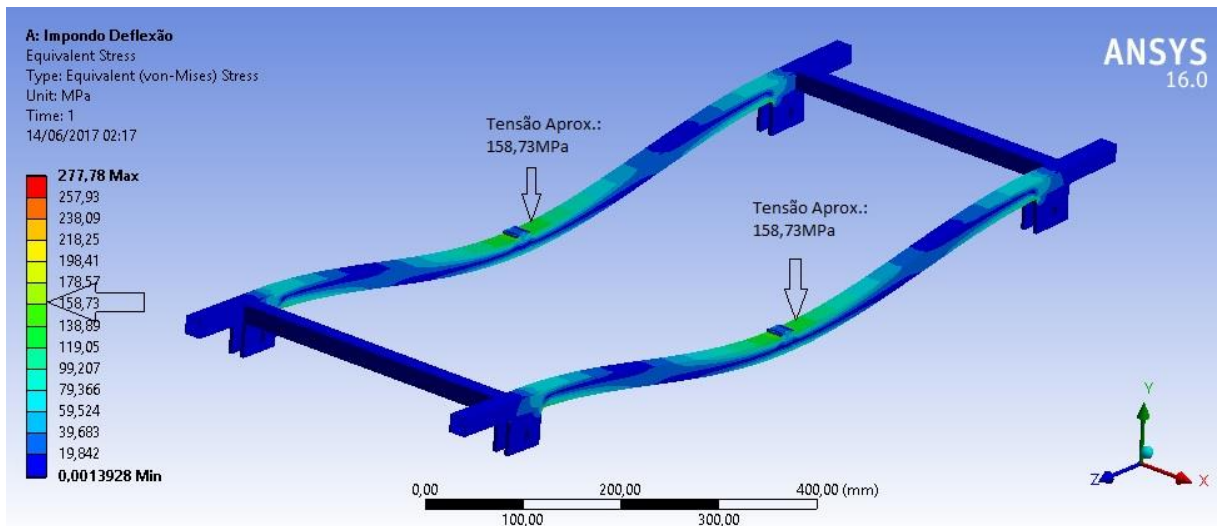


Figura 17 - Distribuição de tensões no chassi

Após o projeto do chassi e sua análise estática estarem concluídos, fornecendo o valor limite de carregamento que poderá ser imposto no ensaio experimental, este pôde ser manufaturado.

### 3.2 PROJETO DA BANCADA

Uma vez concluídos o projeto e a manufatura do chassi, iniciou-se o projeto da bancada. Assim como no projeto do chassi, foram verificados os materiais disponíveis para proceder com sua manufatura. O material escolhido para construção da bancada também foi o aço ASTM A36, cujas propriedades mecânicas foram descritas na Tab.(1).

. O principal requisito de seu projeto é que esta deve possibilitar que o chassi seja ensaiado segundo as condições de contorno impostas na análise estática numérica definidas na seção 3.1. O segundo requisito é: quando sujeita às solicitações provenientes da aplicação de carga no chassi, a bancada deverá apresentar valores de tensão suficientemente baixos, isto é, que garantam um coeficiente de segurança  $C_s$  de no mínimo  $C_s = 3$ . Sua geometria foi definida levando em conta os requisitos descritos acima. A partir disto, gerou-se a geometria da bancada, mostrada nas Figs.(18) e (19).

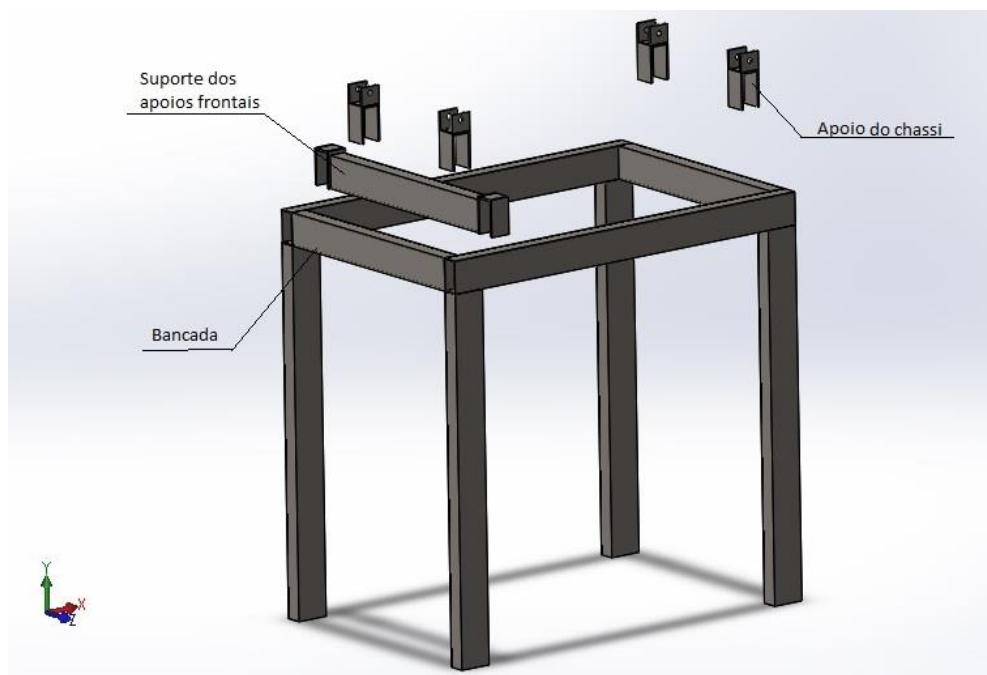


Figura 18 - Vista explodida da bancada e suas partes

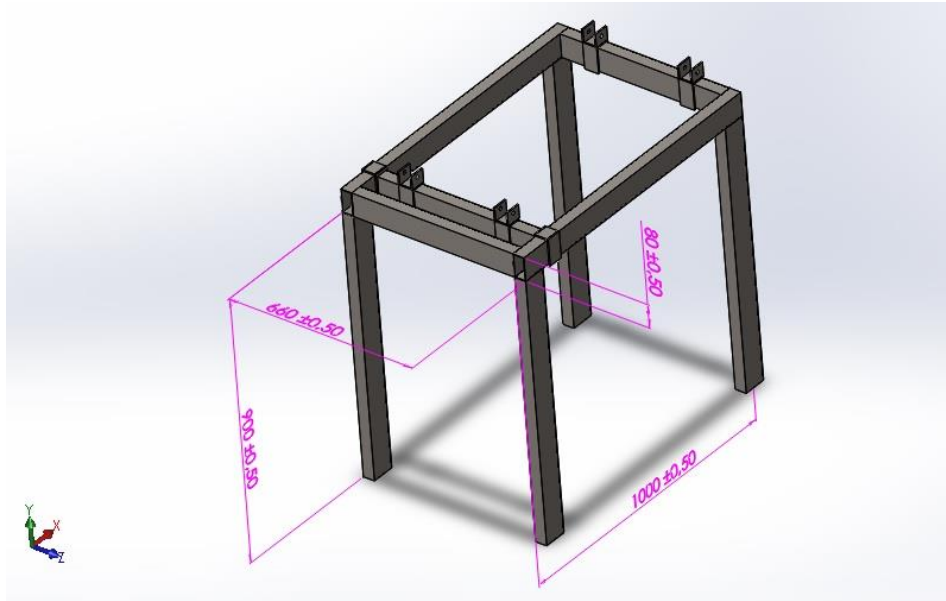


Figura 19 - Bancada e suas partes montadas - com cotas

Abaixo, na Fig.(20) segue uma figura mostrando como o chassi se posiciona sobre a bancada e suas partes.

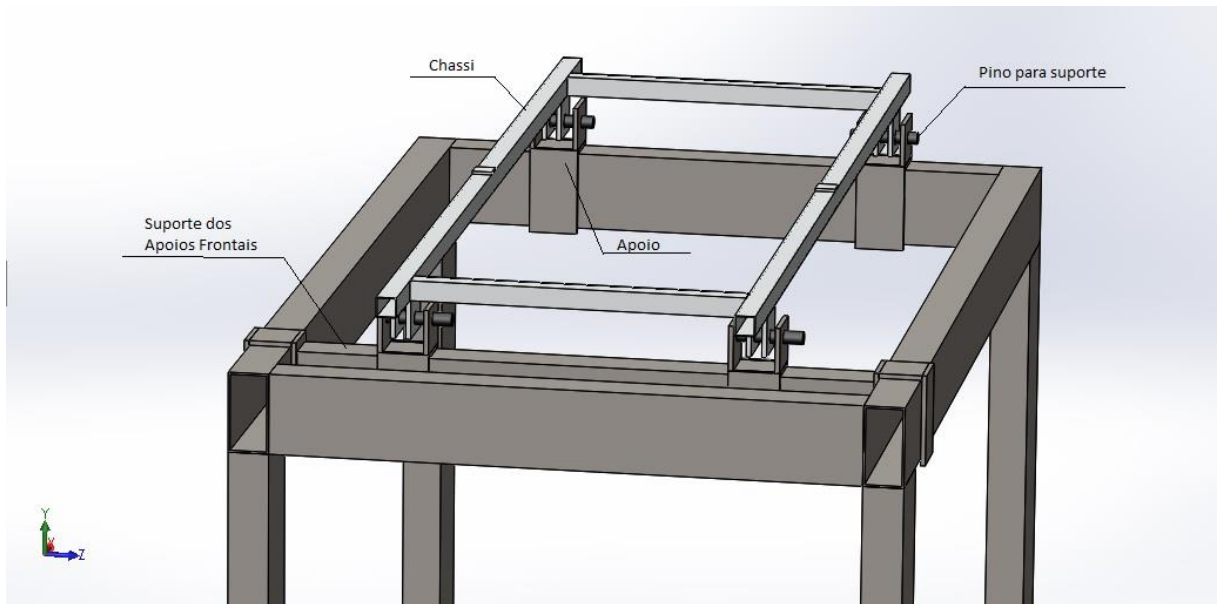


Figura 20 - Chassi em posição de ensaio sobre a bancada - Modelo CAD

Sua geometria foi pensada de forma que não só o chassi usado neste trabalho pudesse ser ensaiado, mas sim chassis de diferentes dimensões. O suporte dos apoios frontais tem posição longitudinal regulável, e os apoios traseiros e



dianteiros são móveis transversalmente. As limitações de largura comprimento entre os apoios dos protótipos de chassis para esta bancada são descritas na Tab.(2)

	Máxima	Mínima
Distância Longitudinal (Entre eixos)	960 mm	450 mm
Distância Transversal (Bitola)	560 mm	-----

Tabela 2 - Dimensões limite de chassis para ensaios na bancada.

## 4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após construídos o chassi, a bancada e suas partes, antes de realizar as análises e obter resultados, foi necessário colar os *strain gages* no chassi e definir os locais nos quais as deformações seriam medidas, bem como o local de medição de deflexão.

### 4.1. - COLAGEM DOS STRAIN GAGES

Para garantir qualidade na colagem dos extensômetros, foi necessário seguir um procedimento de preparação da superfície do chassi onde estes seriam colados. Primeiramente, como mostrado na Fig.(21), os fios foram soldados aos dois terminais de cada SG.



Figura 21 - *Strain gage* com fios soldados nos terminais.

Após isso, poliu-se com uma lixa de açós de rugosidade #300, com movimentos circulares, a superfície do chassi onde cada SG seria colado, para eliminar resíduos indesejados de óxidos e tintas. Esta etapa é ilustrada na Fig. (22) a seguir:

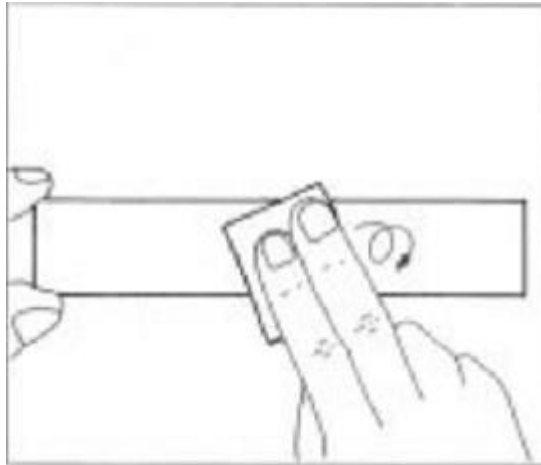


Figura 22 - Esquemático do polimento da superfície

Com a primeira fase de limpeza realizada, foram feitas suaves marcações em formato de cruz com grafite do local exato do colagem do SG. Após isto, com objetivo de limpar gorduras, graxas e demais resíduos químicos na superfície, passou-se no local um pano de algodão embebido em álcool isopropílico 99,8%. Com a superfície completamente preparada, aplicou-se uma pequena quantidade de cola à base de resina epóxi no Strain Gage, e este foi rapidamente colado no local demarcado. Ver Fig.(23):

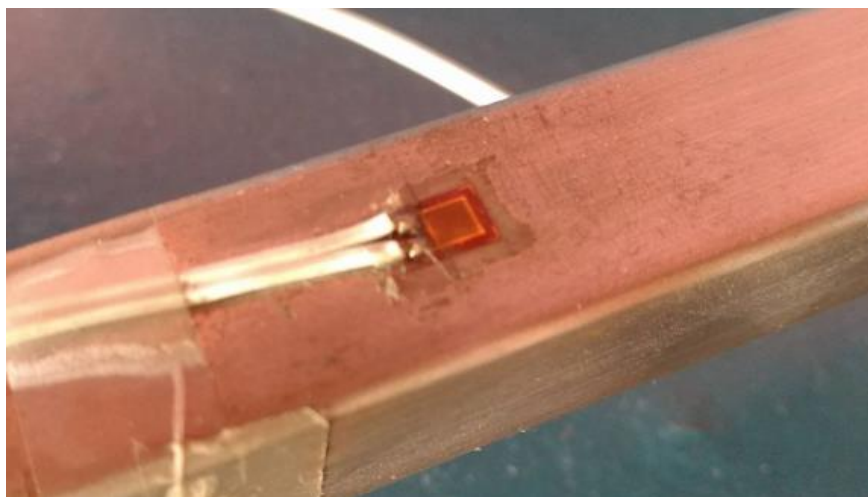


Figura 23 - Extensômetro colado à superfície

Para maior aderência da cola na superfície, o extensômetro foi mantido sob pressão durante cerca de 10 minutos. Após isto, esperou-se o processo de cura total

da resina epóxi, que leva cerca de 10 horas. Concluídas estas etapas, o *strain gage* está pronto para realizar medições.

Foram definidos 3 locais de medição de deformação no chassi. Os extensômetros 1 e 2 estão localizados na face inferior da longarina, e o extensômetro 3 está localizado na face superior desta longarina, conforme mostrado nas Figs.(24) e (25).

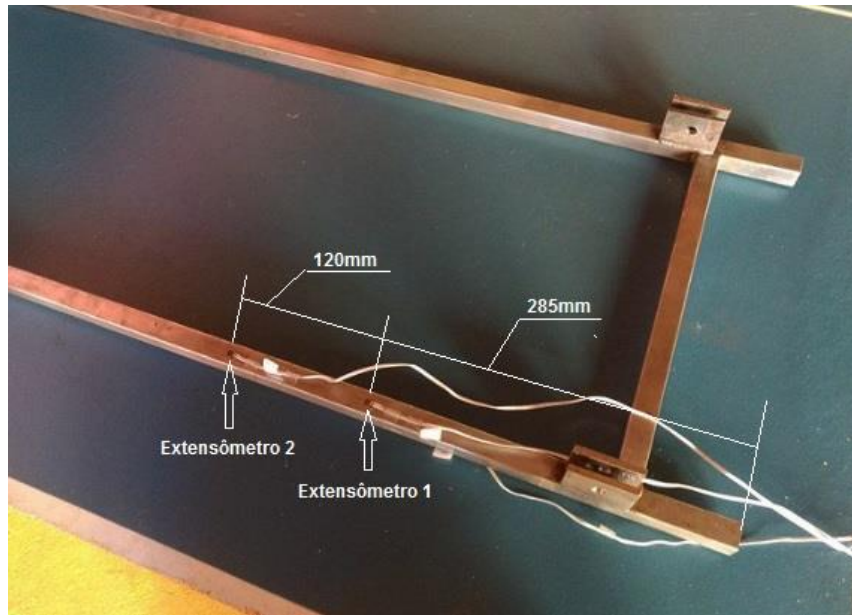


Figura 24 - Posicionamento dos extensômetros 1 e 2 na face inferior

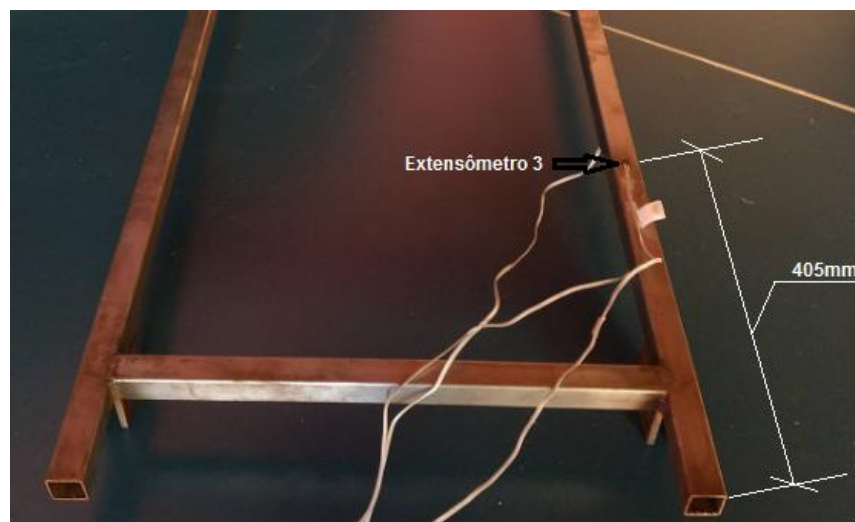


Figura 25 - Posicionamento do extensômetro 3 na face superior

Os extensômetros foram posicionados especificamente nestas posições por que estas estão distantes de pontos de aplicação de carga e pontos de apoios, regiões que segundo (colocar referência) são concentradoras de tensões, e poderiam reduzir a qualidade dos dados de deformações medidos.

Com o chassi instrumentado, todo o conjunto foi montado em posição de ensaio, mostrada na Fig.(26):

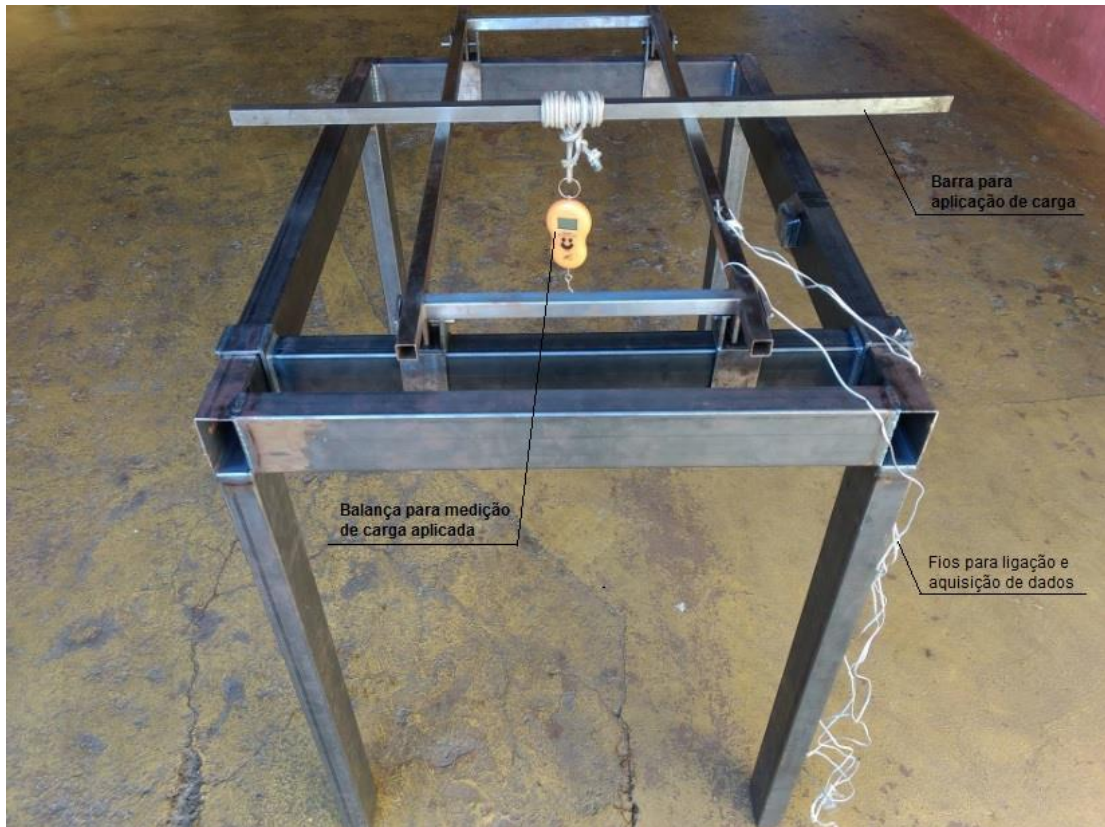


Figura 26 - Conjunto de ensaio montado

A balança utilizada para medir cargas neste ensaio tem resolução de 5g, e suporta carregamentos de até 50kg.

## 4.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Com o conjunto de ensaio montado, os cabos do extensômetro foram ligados na placa de aquisição de dados *HBM - Spider8*. Esta placa comunica-se com um computador através do *software HBM - Catman*. Esta interface fornece diretamente os dados de deformação em *microstrains* em cada extensômetro. Após todo o conjunto montado e os extensômetros ligados à placa de aquisição, foram penduradas ao conjunto massas de diversos valores. Para cada valor de carga aplicada, medi-se o valor de deformação em cada extensômetro através da placa de aquisição e a deflexão do centro da longarina correspondentes. As deformações e deflexões numéricas foram obtidos através do *ANSYS Workbench*, enquanto as deformações experimentais foram obtidos por extensometria, e as deflexões através de um paquímetro acoplado à estrutura.

Segue Tab.(3) os valores obtidos:

	Carga (kgf)	Deflexão maxima (mm)	Defomação SG 1 (microstrains)	Deformação SG 2 (microstrains)	Deformação SG3 (microstrains)
1	7,0	0,2308	41,54	15,17	30,58
2	12,0	0,3874	66,41	21,21	53,07
3	16,0	0,51658	71,87	28,37	71,87
4	19,5	0,6322	77,26	32,81	92,52
5	23,0	0,7740	94,23	38,75	116,58
6	28,0	0,9030	126,02	45,06	136,02
7	33,0	1,0743	148,33	51,12	153,47

Tabela 3 - Resultados obtidos numericamente

Sob as mesmas condições, foram realizadas medidas destes dados de forma experimental, conforme segue na Tab.(4):

	Carga (kgf)	Deflexão maxima (mm)	Defomação SG 1 (microstrains)	Deformação SG 2 (microstrains)
1	7,0	0,30	17	35
2	12,0	0,45	25	62
3	16,0	0,60	33	84
4	19,5	0,75	38	107
5	23,0	0,95	45	133
6	28,0	1,15	52	154
7	33,0	1,25	60	175

#### 4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base no que foi apresentado, nota-se que o projeto de uma estrutura requer bastante atenção, e é um processo iterativo, pois a cada nova solução encontrada podem surgir novos problemas que não foram notados anteriormente.

O chassi, ao receber uma carga centralizada de 50kgf, apresentou resultados de tensões acima de seu limite de escoamento, que é 250Mpa. Porém, estes valores foram localizados pontualmente, e podem ser desprezados devido ao princípio de *Saint Venant*. A bancada, ao receber os carregamentos provenientes do ensaio de flexão, apresentou coeficiente de segurança superior a 3.

É interessante notar que apesar desta bancada ter sido concebida com objetivo de realizar testes estruturais em protótipos de chassis, ela poderá ser uma excelente ferramenta didática para o ensino de disciplinas como Mecânica dos Sólidos, Elasticidade e Plasticidade Aplicada, Projeto de Elementos Automotivos, Projeto de Sistemas Automotivos, Projeto de Estruturas de Veículos, dentre outras, pois permitirá que o estudante visualize de forma prática o comportamento de diversos componentes estruturais, como chassis, vigas, treliças e demais estruturas que possam ser apoiadas na bancada.

Comparando os resultados obtidos de forma numérica com os obtidos de forma experimental, foi notado que os valores dos dados experimentais são maiores do que os obtidos numericamente. Esta divergência é proveniente de diversos fatores. O principal destes são as não homogeneidades nas propriedades mecânicas do chassi construído. Estas diferenças são provenientes do processo de fabricação, que envolve cortes, soldagens, fresamentos, dentre outros. O modelo numérico considera que o chassi tem propriedades mecânicas homogêneas ao longo de toda sua geometria, e considera junções perfeitas entre as longarinas e transversinas do chassi, bem como entre as partes da bancada. Outra provável fonte de erros são as divergências entre as propriedades mecânicas informadas pelo fornecedor de aço, *Ferragens Pinheiro*, e suas reais propriedades mecânicas. Isso se reflete nos *inputs* usados como parâmetros para a realização da análise por elementos finitos no *ANSYS Workbench*.



Para trabalhos futuros pretende-se fabricar uma placa de aquisição de dados para realizar as mesmas análises realizadas neste trabalho, e então comparar os resultados obtidos com os resultados da *HBM Spider8*.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) BEER, Ferdinand P.;JOHNSTON JR., E. Russel. Resistência dos materiais. Tradução e revisão técnica Celso Pinto Morais Pereira. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 1995. 1255p.
- 2) Chandra, M. R., Sreenivasulu, S., Hussain, S. T., “Modeling and Structural Analysis of Heavy Vehicle Chassis Made of Polymeric Composite Material by Three Different Cross Sections”, Journal of Mechanical and Production Trans Stellar, 2012
- 3) Filho,Avelino Alves, "Elementos Finitos - a Base da Tecnologia Cae - Análise Não Linear", 2012
- 4) Gillespie, Thomas D. “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, Society of Automotive Engineers Inc., USA, 1992.
- 5) Happian-Smith, J., “An Introduction to modern vehicle desing”, Butterworth Heinemann, 2002
- 6) Jones, D. P., Womack, J. P., "A Máquina que Mudou o Mundo" Gulf Professional Publishing, 2004
- 7) Lan, T. T., "Space Frame Structures - Structural Engineering Handbook" Ed. Chen Wai-Fah Boca Raton: CRC Press LLC, 1999
- 8) NORTON, Robert L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. Tradução João Batista de Aguiar, ... [et al.]. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 931 p.
- 9) Rao, S. “Vibrações Mecânicas”, Quarta edição, Pearson, 2008

- 10) SHIGLEY, Joseph E. Elementos de máquinas. Tradução de Edival Ponciano de Carvalho. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. 347 p. Volume 1.
- 11) Stuart, M., "H Point - The Fundamentals of Car Design & Packaging" 2009
- 12) Tebby, S., Esmailzadeh, E., Barari, A., "Methods to Determine Torsional Stiffness in Automotive Chassis" Computer Aided Design and Applications, 2011
- 13) Danielsson O., Cocaña A., " Influence of Body Stiffness on Vehicle Dynamics Characteristics in Passenger Cars" Master's thesis in Automotive Engineering, 2015
- 15) W. Milliken & D. Milliken, Race Car Vehicle Dynamics, 1995, Society of ... Automotive Handbook, 5th edition. 2002