



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

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM
PROTÓTIPO DE CHASSI ESCADA**

**Autor: Marcos Henrique Rodrigues do Amaral
Orientador: Maura Angélica Milfont Shzu
Coorientador: Saleh Barbosa Khalil**

**Gama, DF
2017**



MARCOS HENRIQUE RODRIGUES DO AMARAL

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DE CHASSI
ESCADA**

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: Prof. Dr. Maura Angélica Milfont Shzu.

Coorientador: Prof. Msc. Saleh Barbosa Khalil.

**Gama, DF
2017**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Amaral, Marcos Henrique Rodrigues do.

Análise numérica e experimental de um protótipo de chassi escada/ Marcos Henrique Rodrigues do Amaral. Brasília: UnB, 2017. 68 p.: il.; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade UnB Gama, Brasília, 2017. Orientação: Maura
Angélica Milfont Shzu.

1. Chassi. 2. Método dos Elementos finitos. 3. PVC I. Angélica
Milfont Shzu, Maura. II. Título.

CDU Classificação



ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DE CHASSI ESCADA

Marcos Henrique Rodrigues do Amaral

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 28 de junho de 17 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Eng.: Maura Angélica Milfont Shzu, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Msc. Eng.: Saleh Barbosa Khalil, UnB/ FGA
Coorientador

Prof. Dr. Eng.: Maria Alzira de Araújo Nunes
Membro Convidado

Prof. Dr. Eng.: Rodrigo Arbey Muñoz Meneses
Membro Convidado

Esse trabalho é dedicado à minha família Letícia, Mara e Marcos, eles são os pilares do homem que sou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado vida e saúde quando precisei.

Ao meu pai Marcos e minha mãe Mara pela atenção, pelo suporte, pelo carinho e pelo amor ao longo de toda a minha vida.

À minha irmã Lettícia que me fez entender a vida aos cinco anos de idade.

À Fernanda que consegue ser mais que namorada tornando os momentos difíceis em passageiros.

Aos meus tios e primos que sempre esteve presente no meu viver.

À equipe UnBaja que me fez empolgar nos momentos complicados da faculdade.

Às repúblicas que passei e morei e seus integrantes.

Aos meus professores que de alguma forma contribuiu e contribui, vocês são minha segunda família.

“...A felicidade nada
Mais é do que
Hoje estarmos aqui, enfim.” Fernanda Byron.

RESUMO

O uso recorrente de programas nas variadas etapas do produto possibilita o menor custo e maior complexidade em projetos, porém nem todos os detalhes são impostos em um início de projeto, sendo necessário fatores de correção e cuidado com os resultados obtidos analiticamente. O presente trabalho tem o objetivo de comparar um ensaio analítico com um ensaio experimental, relacionando o deslocamento de ambos os trabalhos. A discretização conhecida como método de elementos finitos (MEF) será utilizado no programa, demonstrando a origem do raciocínio que o concebeu. Como todo início de projeto, foram feitas suposições e foram retirados dados teóricos. O protótipo já construído será ensaiado na segunda etapa e será realizado as comparações com o programa ANSYS®. As propriedades mecânicas do poli (cloreto de vinila) não foram extraídas em laboratório e o ensaio analítico foi realizado com estimativas. O protótipo é um chassi escada de PVC, montado com tubos comerciais para fins didáticos, ele será experimentado em uma bancada com esforços originados por atuadores pneumáticos.

Palavras-chave: Chassi Escada. PVC. ANSYS®. Simulação. Deslocamento. Experimento de bancada.

ABSTRACT

The recurrent use of programs in the various stages of the product allows the lowest cost and greater complexity in projects, but not all the details are imposed at the beginning of the project, and correction and carefulness of the analytical results are necessary. The present work has the objective to compare an analytical test with an experimental test, relating the displacement of both works. The discretization known as finite element method (MEF) will be used in the program, demonstrating the origin of the reasoning that conceived it. Like all project start-ups, assumptions were made and theoretical data were removed. The prototype already built will be tested in the second stage and comparisons will be made with the ANSYS® program. The mechanical properties of the poly (vinyl chloride) were not extracted in the laboratory and the analytical test was performed with estimates. The prototype is a PVC ladder chassis, assembled with commercial tubes for didactic purposes, it will be tried on a bench with efforts originated by pneumatic actuators.

Keywords: Ladder Frame. Chassis. PVC. ANSYS®. Simulation. Displacement. Bench experiment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Quantidade de carros fabricados por mês. (ANFAVEA).....	16
Figura 2.2.1 – Chassi Monobloco. (COSTA, 2001-Modificada).....	17
Figura 2.2.2 – Chassi Escada. (FURTADO & ÁVILA, 2013).....	18
Figura 2.4.1 – Reação da eteno. (A) Cloração direta. (B) Oxicloração. (NUNES Et al., 2006 – alterada)	22
Figura 2.4.2 – Reação de craqueamento do 1,2-dicloroetano. (NUNES Et al., 2006 - alterada)	22
Figura 2.4.3 – Reação completa balanceada (cloração direta + oxicloração). (NUNES Et al., 2006)	23
Figura 2.4.4 – Etapa de terminação. (A) Desproporcionamento. (B) Combinação. (NUNES Et al., 2006 – alterada)	24
Figura 2.4.5 – Resistencia mecânica x peso molecular de um polímero. (MANO & MENDES, 2004)	25
Figura 2.4.6 – Resistencia a tração para diferentes temperaturas. (SOUZA,2015) ...	26
Figura 4.1 – Chassi Escada. (CATIA)	31
Figura 4.2.1 – Elemento tipo <i>BEAM 188</i> e <i>BEAM 189</i> . (ANSYS, 2013. Adaptada) ...	33
Figura 4.2.2 – Elemento <i>BEAM 189</i> (A) com a forma elementar quadrática e <i>BEAM 188</i> com a forma elementar linear. (ANSYS)	34
Figura 4.2.3 – Exemplificação dos tipos de refinamento. Refinamento <i>h</i> altera a quantidade de elementos. Refinamento <i>p</i> altera a ordem do polinômio. (Autor)	35
Figura 4.2.4 – Divisão da seção em 8 partes (padrão) e 40 partes. (ANSYS)	36
Figura 4.2.5 – Tamanho do elemento diminuindo de (A) para (B). (ANSYS)	36
Figura 4.3.1 – Locais onde serão aplicadas as cargas e medidos os deslocamentos em Z. Relacionado à tabela (4.3.1). (ANSYS)	37
Figura 4.3.2 – Apoios (triângulos) e forças (vetores) aplicadas no ensaio de Flexão. (ANSYS)	37
Figura 4.3.3 – Forças no ensaio de Flexão-torção. (ANSYS)	38
Figura 4.3.4 – Forças e apoios no ensaio de flexão. (ANSYS)	38
Figura 5.1.1 – Exemplo do Formato da Bancada. (ANSYS)	41

Figura 5.1.2 – Exemplo do deslocamento exagerado da bancada. (ANSYS)	41
Figura 5.2.1 – Pistão da marca SHEFFER utilizado no experimento	42
Figura 5.3.1 – Relógio comparador MITUTOYO®, capacidade de 10mm.	44
Figura 5.3.2 – Paquímetro DISMA® com capacidade de 150mm. (DISMA Catálogo)	44
Figura 5.3.3 – Chapa fixada na haste para análise do deslocamento	45
Figura 6.1 – Esquema de montagem da Bancada, Pistões pneumáticos e Chassi. Esquema dos ensaios de Flexão e Flexo-torção. (CATIA)	48
Figura 6.2 – Esquema da fixação do chassi. (CATIA)	49
Figura 6.3 – Esquema de aferição dos deslocamentos, Medida inicial igual a $15,0 \pm 0,5 \text{ mm}$ e Medida final igual a $39,0 \pm 0,5 \text{ mm}$, deslocamento de $24 \pm 1 \text{ mm}$	50
Figura 6.4 – Cronograma de atividades futuras. (Autor)	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.4.1 – Módulo de elasticidade do PVC rígido	26
Tabela 4.2.1 – Relação de mudança com tamanho do elemento	35
Tabela 4.3.1 – Relação do número da fig. (4.3.1) com os nós e Keypoints.	37
Tabela 4.3.2 – Deslocamentos em “z” nos ensaios	39
Tabela 5.1 – Característica do perfil de bancada	41
Tabela 5.2.1 – Característica dos cilindros pneumáticos SHEFFER	43
Tabela 5.2.2 – Pressões necessárias para realizar o experimento	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.2. METODOLOGIA.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. HISTÓRIA DO AUTOMÓVEL.....	15
2.2. CHASSI.....	16
2.2.1. Chassi monobloco.....	17
2.2.2. Chassi escada.....	17
2.3. PROTÓTIPOS.....	18
2.4. POLI (CLORETO DE VINILA).....	19
2.4.1. Plásticos.....	20
2.4.2. O PVC.....	20
2.4.3. Obtenção do PVC.....	21
2.4.4. Propriedades mecânicas do PVC.....	25
3. ANÁLISE NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS	27
3.1. HISTÓRIA DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	27
3.2. O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	28
3.2.1. Método de Galerkin.....	29
4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	31
4.1. DADOS DO PVC.....	31
4.2. SOFTWARE.....	32
4.2.1. Elemento BEAM 189.....	33
4.2.2. Análise do elemento.....	34
4.3. ENSAIOS NUMÉRICOS.....	36
5. MÉTODO EXPERIMENTAL	40
5.1. BANCADA.....	40
5.2. PISTÕES PNEUMÁTICOS.....	42
5.3. MEDIÇÕES.....	43
5.4. MÉTODO DE MEDIDA.....	45
6. TRABALHOS FUTUROS	48
6.1. CONFECÇÃO DA BANCADA.....	48
6.2. MONTAGEM.....	49
6.3. ENSAIO.....	49
6.4. CRONOGRAMA.....	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA	52
8. ANEXOS	56
I. Anexo - Dimensões dos Tubos e Conexões.....	57
II. Anexo – Catálogo Tigre® (Montagem).....	59
III. Anexo – Roteiro numérico do chassi.....	60
IV. Anexo – Dimensões do cilindro Pneumático.....	65
V. Anexo – Tabela de medições experimentais.....	66
VI. Anexo – Cotas do Chassi.....	67
VII. Anexo – Cotas da Bancada.....	68

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da engenharia corroborou o uso de novas tecnologias, modificando materiais, métodos e o modo de compreendê-la. Os benefícios da engenharia são inúmeros, porém o mais marcante seja a acessibilidade. Meios tecnológicos proporcionaram economia na produção e aspersão para o consumidor, envolvendo várias etapas do projeto, como concepção do produto e gestão.

Os softwares se tornaram os melhores amigos dos engenheiros, mostrando de forma cada vez mais simples novos caminhos. A confiança nesses meios tornou então a engenharia mais abrangente e competitiva. No meio automotivo é possível observar com mais clareza, a evolução dos veículos, tornando mais econômicos, seguros e confiáveis.

A principal estrutura do veículo, o chassi, evoluiu constantemente e parte disso é de responsabilidade dos softwares, onde permite a criação de novas modelagens e simulações. No entanto é necessária cautela e grande *feeling* para o desenvolvimento, nos levando a questionar se tais projetos correspondem à realidade.

A realização de ensaios experimentais é um meio de confirmar se os programas são confiáveis, estes ensaios são responsáveis por mostrar as características fidedignas de um projeto qualquer. Um ensaio bastante conhecido é o *crash test*, onde os veículos são submetidos a colisões a fim de demonstrar segurança da estrutura.

Baseando nos ensaios experimentais será apresentado neste trabalho uma análise analítica com o objetivo de comprovar o uso abrangente de uma das mais antigas ferramentas computacionais, o ANSYS®. Com inúmeras aplicações esse programa torna o entendimento acadêmico simples e desenvolvimento de projeto mais baratos.

O atual trabalho consiste em desenvolver um ensaio numérico de uma estrutura já existente e comparar tais resultados com o ensaio experimental. A estrutura montada com tubos de poli (cloreto de vinila) tem a configuração de um chassi escada, configuração muito utilizada em caminhões, caminhonetes e maioria dos veículos antigos.

Com o objetivo de comparar o ensaio experimental com o ensaio numérico será apresentado a história do automóvel, os chassis mais utilizados, o que é um protótipo, como é obtido o poli (cloreto de vinila), a análise numérica, o método de elementos

finitos, a simulação numérica, o software utilizado, o método experimental e os trabalhos futuros para segunda etapa desse trabalho.

1.1. OBJETIVOS

Realizar a análise numérica estática de um protótipo de chassi, na condição de flexão, flexo-torção e torção, para uma posterior validação dos resultados através dos obtidos experimentalmente.

Está no presente trabalho:

- Os fundamentos básicos do Método dos elementos finitos (MEF)
- A modelagem e análise estática do chassi no ANSYS Mechanical APDL;
- O projeto de uma bancada para realizar a análise experimental;
- A metodologia da análise experimental
- Os futuros trabalhos.

1.2. METODOLOGIA

Etapa 1 – Definição do escopo

Etapa 2 – Revisão bibliográfica

Etapa 3 – Definição do modelo do chassi

Etapa 4 – Definição do ensaio numérico

Etapa 5 – Realização do ensaio numérico

Etapa 6 – Modelagem do experimento

Etapa 7 – Modelagem da bancada de testes

Etapa 8 – Escrita da monografia

Etapa 9 – Defesa da monografia

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRIA DO AUTOMÓVEL

O automóvel, fruto da imaginação e sonhos do homem, foi concebido no século XVIII após a criação do motor a vapor, porém apenas no século seguinte com a invenção do motor alternativo de Karl Benz, foi rotulado automóvel. Neste mesmo século os automóveis tinham o intuito restrito de transporte militar, eles foram desenvolvidos para transportar peças de artilharia. (GILLESPIE, 1992) (FURTADO & ÁVILA, 2013)

A finalidade de transporte civil só se deu prática no final do século XIX com a utilização dos motores a gasolina. No século XX a indústria automobilística já estava bem estruturada nos Estados Unidos com o Modelo T e na Europa empresas eram fundadas com mais de 600 modelos produzidos. (GILLESPIE, 1992) (FURTADO & ÁVILA, 2013)

No Brasil as indústrias demoraram mais para desenvolver, apesar do primeiro automóvel chegar ao Brasil em 1891 trazido por Santos Dumont. As indústrias desenvolveram após a medida tomada por Getúlio Vargas, em proibir a importação de “autopeças”, e Juscelino Kubitschek com a criação do Grupo Executivo da Indústria Automobilística (GEIA) em 1956. (OLIVEIRA, 2015) (CARROANTIGO, 2017)

A Perua da DKW - Vemag (Apelidado por Decavê) foi o primeiro carro com alta taxa de nacionalidade brasileira, ele foi às ruas em novembro de 1957. Nesse mesmo ano eram produzidos no Brasil cinco tipos de carros, incluindo o Romi-Isetta, Jeep Willys, Kombi e o Ford F-100. (CARROANTIGO, 2017)

Os automóveis fabricados no Brasil não eram projetados aqui e isso gerou vários problemas, os projetos estrangeiros que não obtinham sucesso eram importados e com o decorrer do tempo adaptados ao gosto brasileiro. Em 1963 houve o primeiro projeto totalmente brasileiro com o Aero Willys e em 1967 a Ford começou a fabricar o Galaxie, refinando o gosto brasileiro. (CARROANTIGO, 2017)

De 1957 para cá o número de carros produzidos aumentou, produzindo em 2016 mais de 70 milhões de carros para o consumo interno. Pertence a indústria automotiva grande parte do desenvolvimento da economia, fornecendo empregos, auxiliando a agricultura e transportando pessoas e cargas. A figura (2.1.1) nos mostra a evolução da produção no Brasil. (ANFAVEA)

Os incentivos a indústria automotiva não ficaram restrito ao governo de Juscelino Kubitscheck, atualmente o governo brasileiro investe em aspectos que influenciam a concorrência dos automóveis, o INOVAR-AUTO é um programa que coloca metas a serem alcançadas e em troca beneficia a montadora. O benefício atua na redução do imposto sobre produtos industrializados (IPI) diminuindo o preço do automóvel, beneficiando as montadoras, os comerciantes e os consumidores. (INOVAR-AUTO)

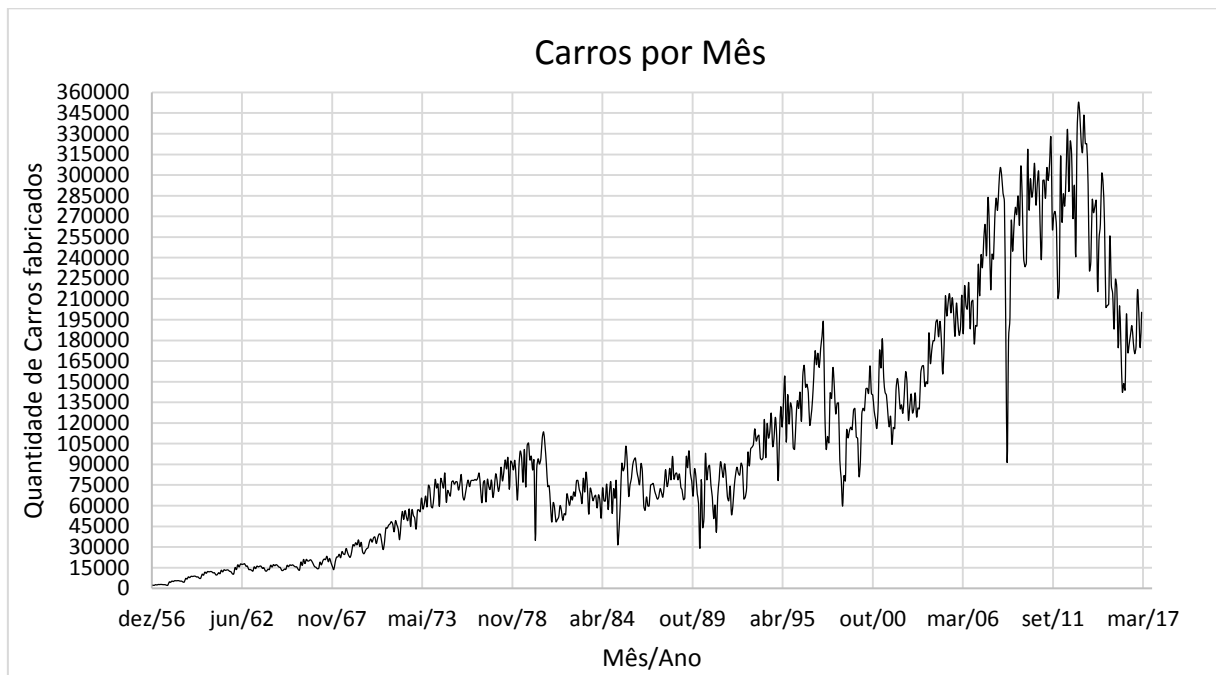


Figura 2.1.1 – Quantidade de carros fabricados por mês. (ANFAVEA)

2.2. CHASSI

Os primeiros chassis pertenciam a carruagens puxadas por cavalos, elas eram basicamente a estrutura em forma de vigas com perfil C, I ou quadrado. Estes tipos de chassi suportavam a grande quantidade de massa pontuais e recentemente são utilizados pela fácil solução de design. (WAKEHAM, 2009)

Segundo Costa (2001) o automóvel é uma viga apoiada em suas extremidades por rodas, devendo ser resistente a flexão e torção. Para Chandra Et al. (2012) o chassi é o esqueleto em que várias partes mecânicas são fixadas, como motor, pneus, suspensão e etcetera. É considerado também o componente mais importante do veículo, fornecendo rigidez e estabilidade para as mais diversas ocasiões.

Segundo Furtado & Ávila (2013) o chassi não deve transferir ruídos e vibrações ao longo do percurso, sendo rígido o suficiente para não deformar muito quando

aplicadas cargas estáticas e dinâmicas. Para Costa (2001) essas estruturas não podem ser demasiadamente rígidas, pois em caso de choque ela deve absorver o impacto não transferindo para os condutores e se fraca elas podem abater-se sobre eles. Dentro dos vários tipos de chassi vamos falar dos mais utilizados.

2.2.1. Chassi monobloco

A finalidade distingue a variedade de chassis, para Furtado & Ávila (2013) o chassi mais utilizado atualmente é o chassi tipo Monobloco, ele consiste na união do chassi e carroceria em uma só peça. Para que essa peça resista como um composto de chassi-carroceria é necessário que o monobloco tenha reforços em certas regiões.

O monobloco apresenta várias vantagens, a principal é a redução de peso por não apresentar uma estrutura conjugada para aumentar a rigidez. O custo de fabricação é relativamente alto, é necessário grande investimento na parte de estampagem levando o lucro apenas para grande escala de produção. A figura (2.3.1) mostra um chassi monobloco e seus reforços estruturais. (COSTA, 2001)

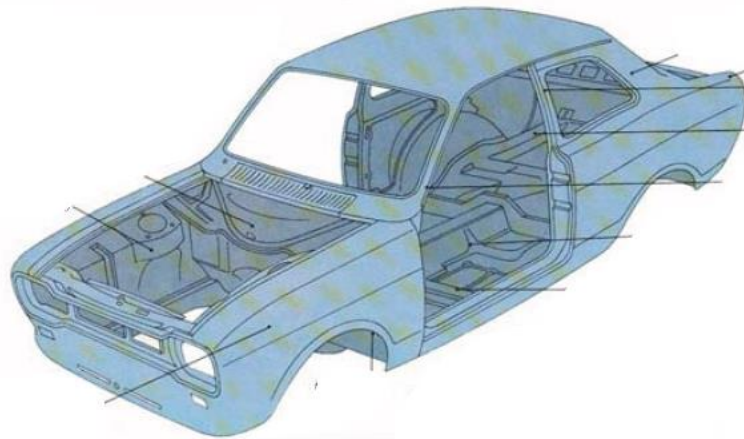


Figura 2.2.1 – Chassi Monobloco. (COSTA, 2001-Modificada)

2.2.2. Chassi escada

Esse tipo de chassi é o mais antigo, até a década de 1960 a maioria dos automóveis utilizavam-no, os principais componentes são duas barras longitudinais conhecidas como longarinas elas são ligadas por barras menores que as ligam transversalmente, chamada travessas. A quantidade de travessas está ligada proporcionalmente com a rigidez do veículo.

Oliveira (2007) diz que o formato do perfil influencia também a rigidez do veículo, para projetos mais baratos e fáceis a utilização de perfis aberto é indicada, pois são facilmente fixados componentes como a carroceria, o tanque de combustível,

a caçamba e etcetera. Perfis fechados são utilizados em veículos de passageiros pois oferecem uma melhor estabilidade e maior rigidez. O chassi tipo escada pode ser visto na figura (2.3.2).

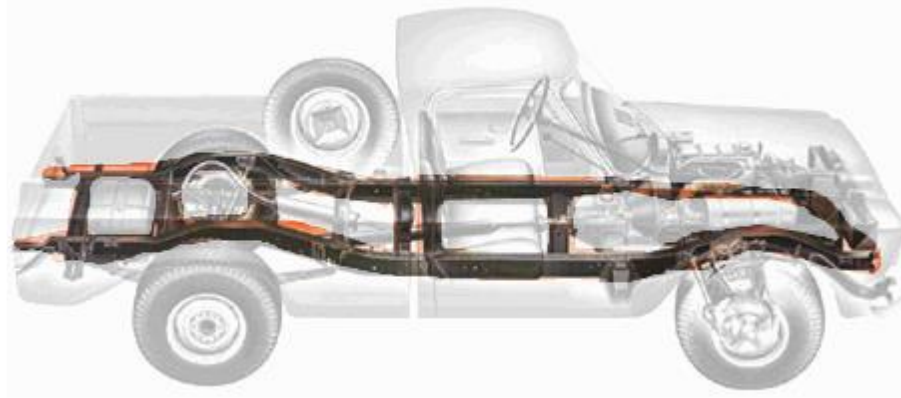


Figura 2.2.2 – Chassi Escada. (FURTADO & ÁVILA, 2013)

Em caminhonetas, caminhões e ônibus o chassi escada é muito utilizado, ele proporciona diversos tipos de combinações. Em caminhonetes e caminhões sem carreta ele disponibiliza adaptações de cabine e caçamba, em ônibus é possível aplicar diversos tipos de carroceria. É comum na montagem de ônibus o chassi, conjunto de força (power-train) e suspensão ser construído por uma empresa e a carroceria ser montada por outra.

2.3. PROTÓTIPOS

A palavra protótipo vem das palavras gregas *Protós* e *Types* que significam primeiro e tipo, respectivamente. Uma tradução mais abrangente é de primeiro modelo e é onde se aplica, estudo, testes e melhorias (SOUZA, 2012). É possível através dos protótipos perceber se as ideias serão ou não solucionadas, tendo a vantagem de falha no início do projeto, exigindo menos tempo e custo ao final do projeto (ENDEAVOR, 2015).

Os processos para construção do protótipo podem parecer trabalhosos com o decorrer do trabalho, mas vale ressaltar que imprevistos no início tem valor agregado pequeno gerando diversos benefícios como: apresentação do produto para possíveis futuros clientes, vantagem na elaboração de ferramental, logística, estimativa de valor e etcetera. (ENDEAVOR, 2015)

Segundo FUNPAR (1987) há quatro tipos de protótipos, os Exploratórios, os Evolutivos, os Comportamentais e os Estruturais. Os exploratórios são aqueles que analisando apenas uma parte, sendo na maioria das vezes informais e descartados

ao final do teste. Os evolutivos crescem conforme vão criando novos produtos, eles seguem normas e são formalizados.

Os protótipos comportamentais são aqueles que trabalham apenas com a entrada e saída de informações, eles não seguem normas e visam apenas o contato dos usuários com o produto, este tipo de protótipo é descartável. E os estruturais são desenvolvidos para atuar como produto, demonstrando características e adaptando ao ambiente onde será utilizado, este pode se tornar um protótipo evolutivo. (FUNPAR, 1987)

A criação de protótipos por meio de desenhos assistidos por computador (CAD) é conhecida por Prototipagem Rápida. Este processo é resumido pela deposição de camadas acima de camadas até que todo o volume seja formado. Atualmente há vários tipos de prototipagem rápida, sendo utilizadas não apenas na criação de protótipos (GORNI, 2001). Este não será utilizado no presente trabalho.

Os motivos para construção do protótipo com tubos e conexões comerciais de poli (Cloro de Vinila) são:

- Facilidade de encontrar as partes que o compõe;
- Facilidade de montagem
- Utilização de ferramental barato para construção
- Preço dos materiais.

Com tais benefício a construção do protótipo é realizada seguindo o manual de colagem da Tigre, onde são utilizados cola, lixa e arco de serra para montar o sistema. A parte de montagem está no Anexo II, como Catálogo Tigre®.

2.4. POLI (CLORETO DE VINILA)

Os materiais foram evoluindo conforme a evolução e necessidade do homem, a evolução iniciou na idade da pedra, quando o homem começou a utilizar ferramentas para se satisfazer. Em 1870 o celuloide (nitrato de celulose) foi utilizado para substituir a escassez do marfim, tendo como o primeiro polímero industrializado. (GUEDES, 1986)

Posteriormente o belga Leo Hendrik Baekeland produziu em grande e controladas escalas a baquelita (nome dado a sua homenagem). A baquelita foi industrializada pela vantagem comercial e sua fabricação incentivou a pesquisa sobre os plásticos, descobrindo posteriormente vários outros plásticos. O termo plástico é derivado do grego e significa moldável. (GUEDES, 1986)

2.4.1. Plásticos

Os plásticos são caracterizados por serem macromoléculas, eles são fabricados a partir dos monômeros, que é a parte do polímero que repete. Atualmente as macromoléculas são produzidas pela natureza (*polímeros naturais*) e por via sintética (*polímeros sintéticos*). Os polímeros sintéticos dependem bastante do monômero, a produção se divide em *poliadição*, *policondensação* e *modificação química*. (MANO, 1991)

Na poliadição os monômeros apresentam na maioria das vezes dupla ligação e não há formação de subproduto na reação. Na policondensação há formação de subprodutos que devem ser retirados do meio reacional. Na modificação química há reação de cadeias poliméricas já existente, podendo ser naturais ou sintéticos, essa reação pode consistir na adição de corantes, antioxidantes, em resumo *aditivos*. (MANO, 1991)

Considerando a variedade dos polímeros podemos classificá-los conforme sua origem (natural ou sintético), número de monômeros distintos (homopolímero ou copolímero), método de preparação (adição, condensação ou modificação), configuração dos átomos da cadeia polimérica, taticidade da cadeia polimérica, fusibilidade e/ou solubilidade do polímero e o comportamento mecânico do polímero. (MANO & MENDES, 2004)

Para a obtenção de um polímero é necessário que o monômero tenha grupamentos funcionais em dois ou mais pontos, isto é, propiciem o crescimento da molécula nesses pontos. Se o monômero tiver dois pontos o polímero terá uma cadeia linear, se tiver três ou mais ele poderá realizar ligações cruzadas diferenciando sua propriedade. (MANO & MENDES, 2004)

2.4.2. O PVC

O polímero apresentado neste trabalho é o Poli (Cloro de Vinila) (PVC), com inúmeras funções, podemos encontrá-lo da construção civil à bolsa de sangue. O PVC apresenta diversas características como rigidez e flexibilidade ampla, atóxico e inerte. Se o PVC for trabalhado com aditivos atóxicos pode-se encontrá-lo em usos diversos usos hospitalares e tubulações de água potável. (NUNES Et al., 2006)

A composição do PVC se resume em 57 % de sal, podendo ser de fonte marinha ou não e 43 % de insumos do petróleo e gás natural. A presença de cloro no PVC contribui em diversos fatores como propriedades antichamas e a vasta afinidades

com aditivos, tornando suas características específicas para cada aplicação. (NUNES Et al., 2006)

O PVC teve início após a descoberta do monômero cloreto de vinila (MVC) em 1835 pelo Justus von Liebig. Seu aluno, Victor Regnault, suspeitou ter criado o PVC quando deixou a mistura no sol e observou um produto esbranquiçado no fundo das ampolas. Posteriormente A. W. Hoffman em 1860 relatou a polimerização do haleto de vinila. O primeiro registro ocorreu em 1872 quando o E. Baumann descreveu o sólido branco derivado do MVC. (NUNES Et al., 2006)

Fritz Klatte em 1912 descobriu o processo de fabricação comercial na empresa que trabalhava, porém, o produto não tinha atributos usuais. Finalmente, em 1926, o pesquisador W. Semon descobriu que adicionando o *tricresil fosfato* ou o *dibutil ftalato* era possível utilizá-lo, esses aditivos atualmente são conhecidos como plastificantes. Com essa descoberta o PVC passou a ser utilizado substituindo a borracha. (NUNES Et al., 2006)

O MVC pode formar homopolímero e copolímero, a forma de homopolímero é denominada de poli (cloreto de vinila) (PVC) e um exemplo de copolímero é o copolímero de cloreto de vinila e acetato de vinila. A diferença de polímero para o copolímero é que o copolímero tem mais de um monômero. (NUNES Et al., 2006)

2.4.3. Obtenção do PVC

Para obter o MVC primeiramente temos que obter o cloro. O cloro pode ser obtido através da eletrólise do sal comum e água tendo como produtos soda, cloro e hidrogênio. É estimado que há cerca de 37 quatrilhões de cloreto de sódio. O outro componente é a eteno, ele pode ser obtido pelo petróleo, gás natural ou etanol. A porcentagem dos derivados de petróleo destinada à produção de PVC é baixa. (NUNES Et al., 2006)

O processo de obtenção do MVC é realizado em etapas, a primeira etapa tem como produto o 1,2-dicloroetano e a segunda etapa tem o produto desejado. Podemos encontrar o 1,2-dicloroetano a partir de duas reações, a cloração direta e oxicloração, as reações estão apresentadas na figura (2.4.1-A) e figura (2.4.1-B), respectivamente.

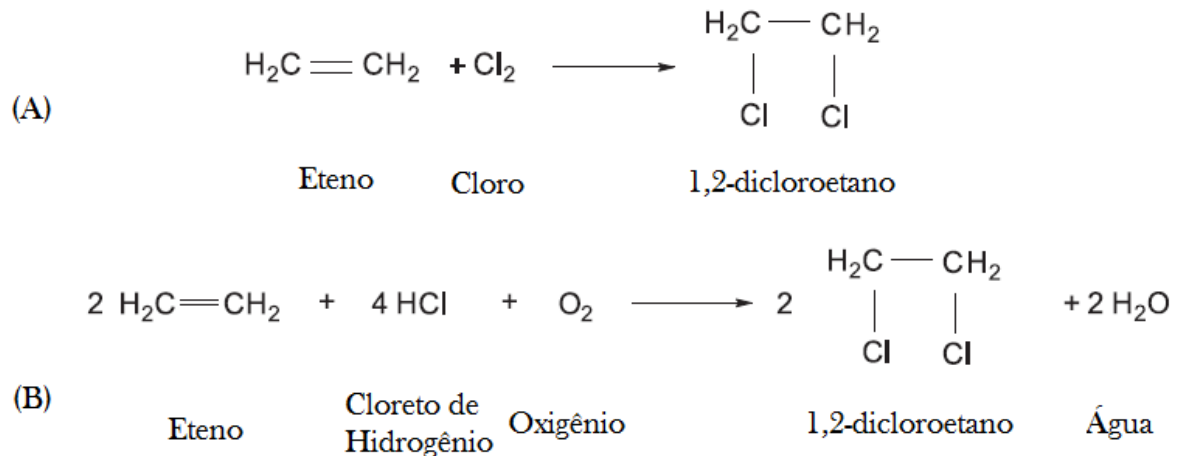


Figura 2.4.1 – Reação da eteno. (A) Cloração direta. (B) Oxicloração. (NUNES Et al., 2006 – alterada)

A segunda reação é apresentada na figura (2.4.2), podemos notar a formação do cloreto de hidrogênio, ela é conhecida como craqueamento.

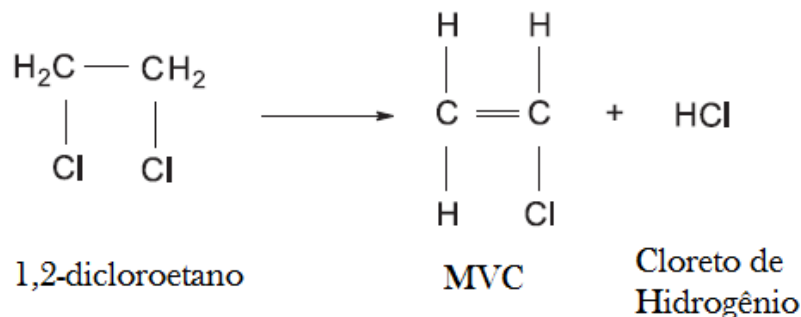


Figura 2.4.2 – Reação de craqueamento do 1,2-dicloroetano. (NUNES Et al., 2006 - alterada)

A reação completa para a formação do monômero é apresentada na figura (2.4.3), nela podemos observar que há a utilização do cloreto de cloro para a primeira etapa de reação.

Podemos notar que na reação completa (Fig. 2.4.3) o único subproduto é a água, o cloreto de hidrogênio produzido é utilizado na reação. Há outras formas de produzir o monômero, portanto essa é a maneira mais utilizada atualmente, mesmo sendo mais complexa o valor do reagente justifica.

A polimerização em cadeia ou poliadição consistem em iniciação, propagação e terminação. A reação pode ser por radicais livres, íons e complexos de coordenação. (MANO & MENDES, 2004). Para a polimerização comercial do PVC é utilizado apenas a reação por radicais livres. Na etapa de iniciação há a decomposição do iniciador por

meio de calor, ocorre a quebra da ligação originando o radical livre. Os iniciadores mais utilizados são peroxidocarbonatos, peróxidos de diacila e os ésteres peróxidos

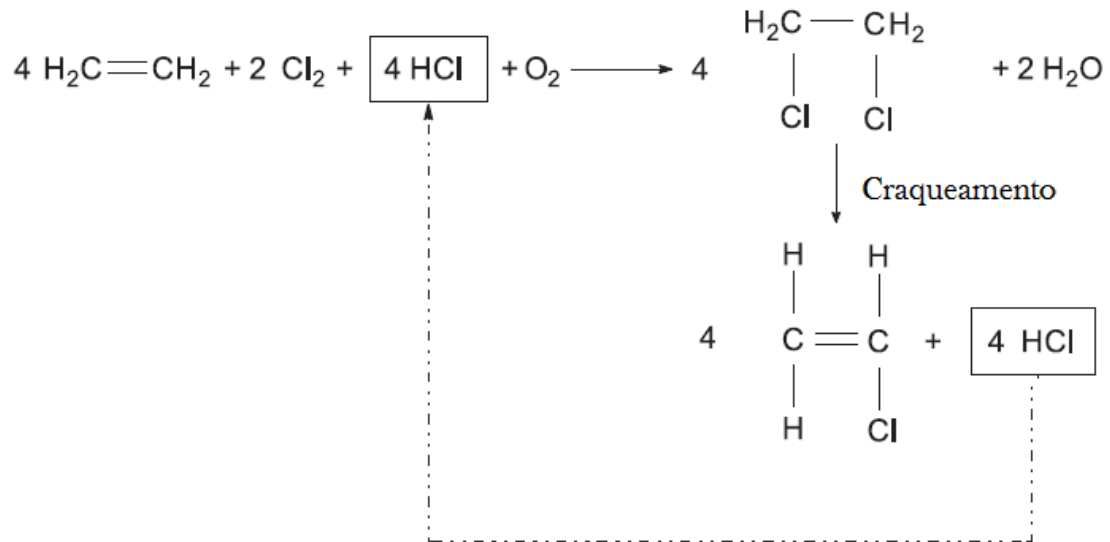


Figura 2.4.3 – Reação completa balanceada (cloração direta + oxicloração). (NUNES Et al., 2006)

Na propagação ocorre consecutivas transferências do radical livre, o iniciador se liga a um monômero transferindo o radical ao monômero que se liga, ligando a outro monômero e assim por diante, tornando-os em uma macromolécula. É nessa etapa que ocorre o crescimento. A etapa de terminação pode ocorrer de duas maneiras. Uma é o desproporcionamento, onde as macromoléculas não se unem e outra é a combinação, onde há o encontro de dois radicais livres e as macromoléculas se somam.

Na reação em cadeia é necessário fornecimento de calor para transformar a ligação dos iniciadores em radicais livres, após essa etapa é necessário regular a temperatura da reação. A reação de polimerização do PVC na segunda etapa é exotérmica, isto é, ela libera calor e é necessário então uma forma de resfriamento para evitar a degradação do polímero recém-formado. (NUNES Et al., 2006)

A figura (2.4.4) mostra as duas maneiras de terminação ocorrida no PVC. A representação do PVC é como a apresentada dentro dos colchetes.

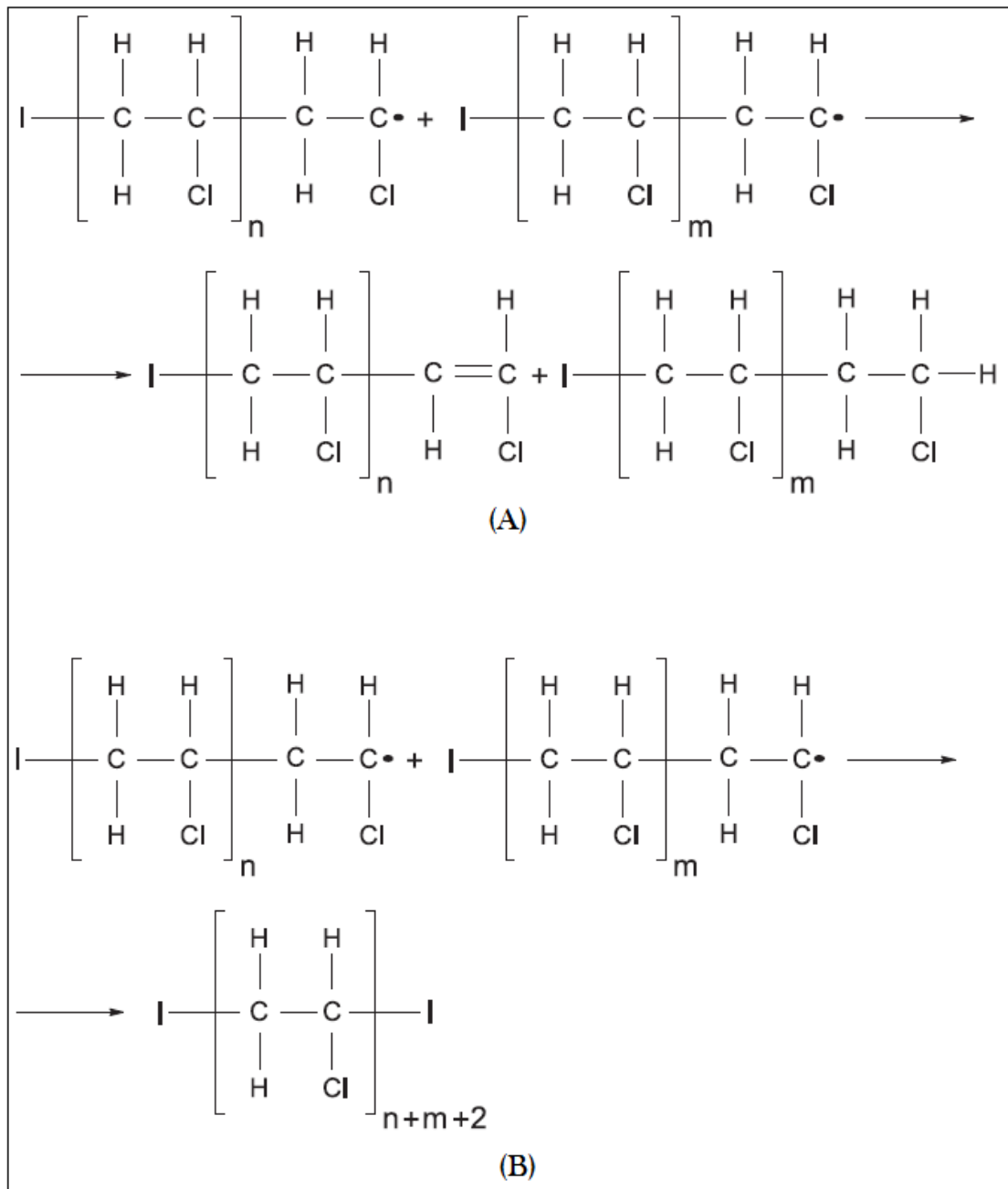


Figura 2.4.4 – Etapa de terminação. (A) Desproporcionamento. (B) Combinação. (NUNES Et al., 2006 – alterada)

No início as plantas comerciais possuíam 5 m³ e passaram para 200 m³, assim a superfície por quantidade de volume diminuiu solicitando formas mais efetivas de controlar a temperatura. A temperatura atualmente é o aspecto limitante para o crescimento das plantas, sendo que o uso de serpentinas ou outros recursos são inviáveis pela dificuldade de limpeza e incrustação. (NUNES Et al., 2006)

A temperatura influencia diretamente sobre o peso molecular médio, ou seja, na qualidade do polímero. O peso molecular afeta a resistência mecânica do polímero

conforme a figura (2.4.5) e comercialmente são produzidos os polímeros na faixa de 45 a 70 °C. O aumento da temperatura de polimerização tem efeito inverso no tamanho do polímero e na porosidade. A porosidade no polímero influencia na flexibilidade por absorver mais aditivos e plastificantes.

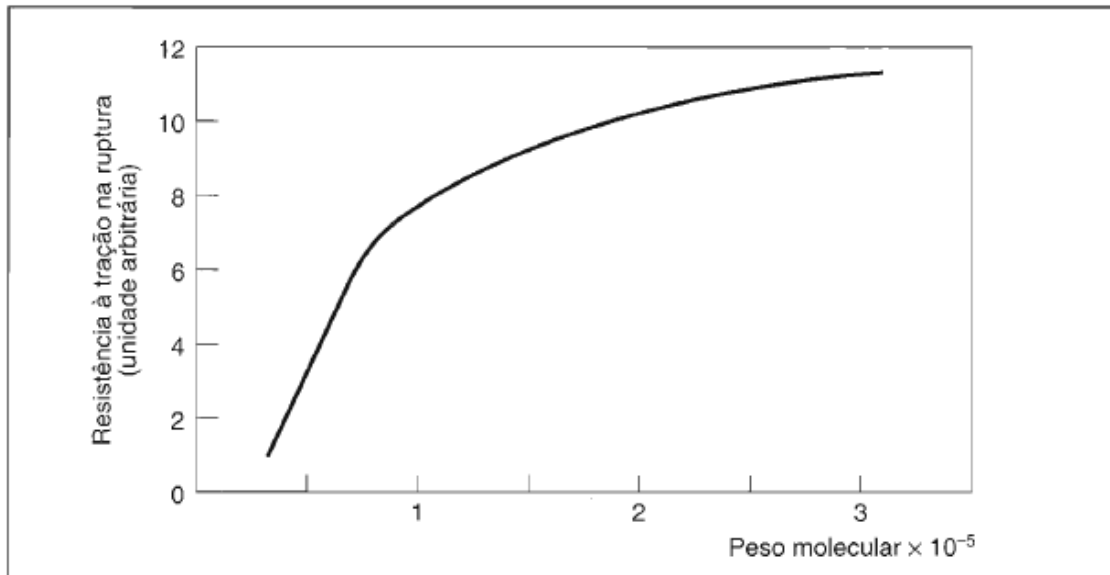


Figura 2.4.5 – Resistência mecânica x peso molecular de um polímero. (MANO & MENDES, 2004)

Há outros fatores que alteram a qualidade do polímero na polimerização, como a conversão, a dispersão, a agitação, presença de oxigênio, qualidade da água e entre outros. Além do processo de *suspensão* no qual foi baseado as explicações anteriores e que é o mais utilizado atualmente existe os processos de *emulsão* e *microsuspensão* que não serão explicados neste trabalho. (NUNES Et al., 2006)

2.4.4. Propriedades mecânicas do PVC

Para a realização dos ensaios computacionais é necessário saber as propriedades mecânicas do material, os ensaios realizados pelo Souza (2015) nos mostram que ele utilizou corpo de prova confeccionado em tamanho padronizado. Os resultados serão utilizados no presente trabalho.

Quando adicionamos calor a um material as propriedades mecânicas são alteradas, no caso do PVC isso ocorre de maneira mais acentuada por ele ser um termoplástico. Os termoplásticos fundem quando são aquecidos, isso é devido a sua estrutura linear ou ramificada. Conforme mostrada na figura (2.4.6) a resistência a tração dos materiais diminui quando submetidos ao aquecimento. (SOUZA,2015) (MANO & MENDES, 2004)

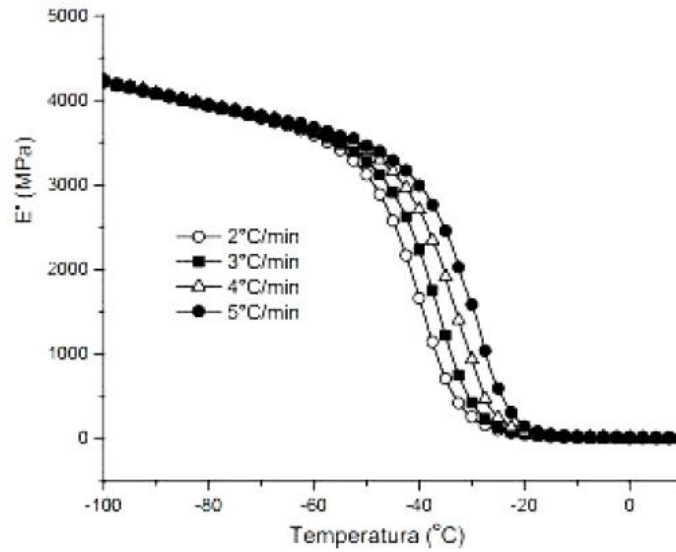


Figura 2.4.6 – Resistência a tração para diferentes temperaturas. (SOUZA,2015)

Outro fator que afeta as propriedades mecânicas é o peso molecular como citado anteriormente. O valor do módulo de elasticidade do PVC rígido é apresentado conforme a tabela (2.4.1), nele é citado o módulo obtido por três autores e no presente trabalho utilizarei menor dos valores citados, sendo conservador.

Tabela 2.4.1 – Módulo de elasticidade do PVC rígido.

Autor	Módulo de Elasticidade em (GPa)
GRIZZO, <i>Et al.</i> , 2011	2,5 – 3,5
SOUZA, 2015	3,18
NUNES, <i>Et al.</i> , 2006	2,5 – 3,5
ATCP ENGENHARIA FÍSICA, 2017	2,41 – 4,14

3. ANÁLISE NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

Atualmente temos modelos estruturais inovadores e econômicos, esse avanço está no atual patamar pelo fato do Método dos Elementos Finitos ter difundido devido ao avanço tecnológico impulsionado pelas demandas industriais [MORAES, 2015]. Hoje a ferramenta é indispensável, pois há possibilidades para alterações ainda no início, deixando o custo de todo o projeto baixo (FURTADO & ÁVILA, 2013).

Os programas que auxiliam a aplicação desse método são de acesso não só a engenheiros, há um número crescente de alunos de graduação que estão utilizando-os em planos acadêmicos, empresas júniores, disciplinas e projetos no decorrer do curso (SILVA, Et al. 2001). Os benefícios como baixo custo de projeto, soluções cada vez mais aproximadas, menor tempo de análise, interface simples e intuitiva e tratamentos de estruturas complexas, simplificam os problemas.

É de responsabilidade do projetista analisar resultados, meios que facilitem as análises feita por softwares e limitações que pertence ao modelo (SOARES, 2012). Para Silva Et al. (2001) o uso de softwares para a aplicação desse método é a saída mais simples, como citado acima há vários benefícios quando se faz o uso. O método é bastante abrangente pois trabalha além de problemas estruturais como também problemas de transferência de calor, eletromagnetismo, mecânica dos fluidos e entre outros.

3.1. HISTÓRIA DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O início do Método dos Elementos Finitos (MEF) ocorreu na de 1950 com abordagem intuitiva utilizando o computador. Em 1960 o termo MEF foi citado pela primeira vez por R. W. Clough. Os engenheiros aeronáuticos desenvolveram o método para analisar a distribuição de tensões em chapas de aviões, mísseis e cápsulas espaciais (SORIANO & LIMA, 2003).

A descoberta das aplicações do MEF foi crescendo em soluções de problemas estáticos, não lineares e dinâmicos. As soluções eram obtidas por um único método, que era composto por analisar os deslocamentos virtuais, por ser totalmente intuitivo e não existir comparações com formulações exatas ele foi posteriormente chamado de *formulação direta* (SORIANO & LIMA, 2003).

Após estudos sobre os métodos foi concluído que não passava de uma variação do método situado pelo Lord Rayleigh e Walther Ritz. Assim foi verificado critérios de convergência e a aplicação em qualquer problema contínuo, conhecido

como *Formulação Variacional*. Posteriormente foi verificado que o método de mínimos quadrados de resíduos de tensões tem semelhança com o MEF sendo nomeado de *Formulação de Resíduos* (SORIANO & LIMA, 2003).

3.2. O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O estudo de estruturas adquiriu ao decorrer do tempo os chamados modelos matemáticos, com o avanço da tecnologia e cálculo computacional esse estudo proporcionou grande desenvolvimento nos modelos físicos reais, convergindo cada vez mais para solução exata. O método numérico comumente utilizado é o de *Elementos Finitos*, esse método consegue descrever sistemas contínuos abrangendo maioria das análises da engenharia (SORIANO, 2009).

Os sistemas contínuos podem não ser tão simples, eles são simplificados a fim de obter modelo matemático fácil. Para que haja maior facilidade nesse trabalho os sistemas contínuos serão estáticos, pois este tipo de sistema despreza forças de amortecimento, forças de inércia e são incluídas somas de pequenos deslocamentos, linearizando a relação entre tensão e deformação. Pode-se com essas restrições aplicar a Lei de Hooke, mencionada mais à frente. (SORIANO, 2009) (PACHECO & SHZU, 2016).

O processo de discretização é a transformação de um sistema contínuo com infinitos pontos para um sistema com vários elementos pequenos (SOARES Et al. 2012). Porém quanto maior o número de elementos mais próximo da solução real ele chegará, contudo mais incógnitas ele terá. O erro nesse processo pode ser estimado comparando com a solução exata conhecida ou com discretizações mais refinadas, obtendo a convergência de solução (SORIANO, 2009).

É necessário também que o analista saiba desenvolver o modelo e aplicar o método a fim de estabelecer eficiência, deixando-o o menos complexo possível e posteriormente saber interpretar e empregar os resultados obtidos (SOARES Et, al. 2012). O escopo é obter modelos robustos e eficazes, isto é, obter modelos que atendem uma variedade de combinações e forneça resultados de maneira aceitável (SORIANO, 2009).

3.2.1. Método de Galerkin

Boris Grigorievitch Galerkin desenvolveu seu método depois de preso, na cadeia ele teve oportunidade continuar seus estudos em ciência e engenharia e esquecer as ideias revolucionárias. Após ser solto ele começou a trabalhar com I. G. Bubnov e após a influência do amigo ele publicou o método de aproximação de equações diferenciais parciais, conhecida atualmente como Método de Galerkin. (REZENDE, 2005)

O método de Galerkin é um dos métodos de resíduos ponderados mais utilizados (CYRINO, 1989). Ele consiste em aproximar a solução (função incógnita) u por meio de um somatório, como mostrado na equação 3.2.1, aplicando o somatório na média ponderada de resíduos, como mostrado na equação 3.2.2.

$$u = \sum_{j=1}^n a_j \varphi_j \quad (3.2.1)$$

Onde a_j são os parâmetros desconhecidos (incógnitos); n é a dimensão finita de um subespaço finito; φ_j são funções linearmente independente.

$$\int_V A[u] \varphi_j dV = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.2.2)$$

Onde A é um operador diferencial; V é o domínio total do elemento.

A principal ideia do método é dividir o domínio em diversos pedaços interligados, ampliando a equação 3.2.1 para a equação 3.2.3.

$$u^e(x) = \sum_{j=1}^N a_j^e \psi_j^e(x) \quad (3.2.3)$$

Na equação 3.2.3 é utilizado ψ para diferenciar as funções de globais e locais, onde φ representa as funções globais e ψ representa as locais; N é o número de pedaços do domínio. Se aplicarmos os domínios locais e os contornos dos domínios locais na integral ponderada de resíduos é possível encontrar a equação 3.2.4.

$$\sum_{j=1}^N [k_{ij}^{(e)} \cdot u_j^{(e)} = F_i^{(e)}] \quad (3.2.4)$$

Onde $k_{ij}^{(e)}$ é a representação da matriz de rigidez, e $F_i^{(e)}$ o vetor de cargas. Observando a equação e concordando que ela é aplicável para cada elemento percorrendo o todo, se torna lógico a aplicação no meio computacional. O

desenvolvimento das equações foi baseado em Rezende (2005), Cyrino (1989) e Pacheco e Shzu (2016).

A equação 3.2.4 é a aplicação da lei de Hooke em cada elemento, fazendo analogia a uma mola temos rigidez, deslocamento e força. A associação de vários elementos se torna semelhante à associação de várias molas assumindo cada elemento como uma pequena mola que tem a sua rigidez relacionada com a característica do material, um fator importante é o módulo de elasticidade (E).

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A estrutura estudada no presente trabalho é um chassi tipo escada construído de tubos PVC, ela foi confeccionada para que as análises realizadas numericamente possam também ser realizada experimentalmente. A figura (4.1) abaixo mostra o chassi em estudo.

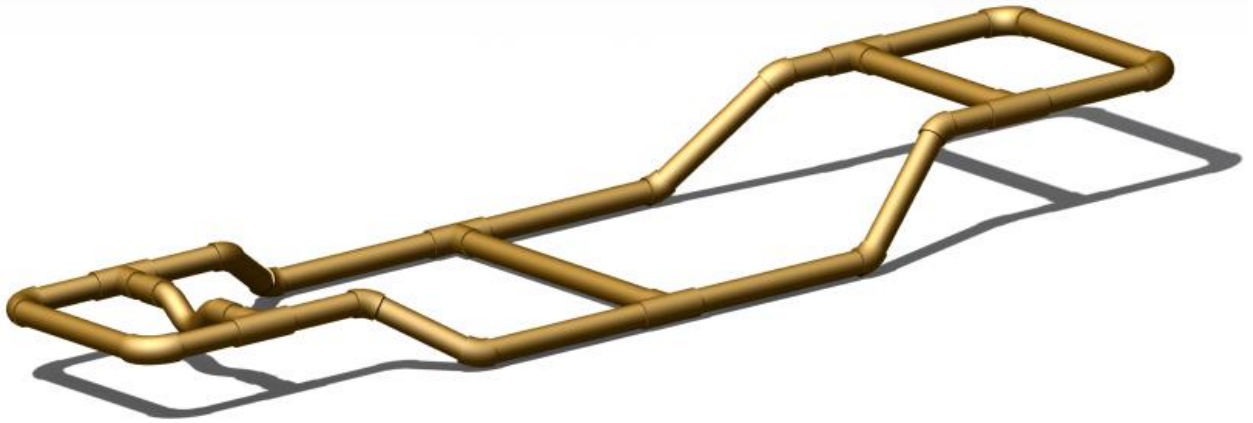


Figura 4.1 – Chassi Escada. (CATIA)

4.1. DADOS DO PVC

Os tubos e conexões utilizados são de PVC soldáveis das marcas AMANCO® e TIGRE® de 25, nome comercial. Os tubos podem ser adquiridos em lojas de construção ou ferragistas, as dimensões são apresentadas no Anexo I. Neste trabalho não utilizamos a bolsa, o lado do tubo que tem diâmetro maior. Ambos os catálogos seguem a NBR 5648 para montagem.

A densidade do PVC foi retirada de NUNES, *ET AL.* (2006) página 311, na tabela que ele apresenta pode-se notar que os valores apresentados não devem ser empregados em projetos estruturais e devem ser utilizados de boa-fé. O valor do Coeficiente de Poisson foi retirado do ATCP ENGENHARIA FÍSICA (2017), o valor da densidade adotado é de $1,45 \text{ g/cm}^3$ e coeficiente de Poisson de 0,38.

A partir da estrutura e informações do material pode-se iniciar a utilização do software. O primeiro passo importante foi a aquisição das coordenadas dos nós para realizar o desenho do chassi, após esta etapa foi conferido os raios das conexões utilizadas, esta etapa foi facilitada com base nos desenhos do CATÁLOGO TIGRE (2016).

4.2. SOFTWARE

Conforme a evolução dos softwares a aplicação do MEF está sendo utilizado correntemente, a interpretação dos resultados nos ajuda a compreender o comportamento do sistema diminuindo o número de protótipos, testes físicos e tempo de desenvolvimento. O software escolhido para o presente trabalho é o ANSYS®, o foco da companhia é a solução de projetos na área de trabalho desde o conceito de projeto até a fase final de teste e validação. (MÜLLER, 2002)

A empresa que criou o ANSYS® foi desenvolvida na década de 1970 com o nome de *Swanson Analysis Systems* pelo engenheiro John Swanson. O engenheiro foi pioneiro no uso do MEF e desenvolveu seu principal produto, o software. Posteriormente a empresa passou a ser chamada de ANSYS, Inc. e estendeu seu principal produto em várias áreas, como na dinâmica dos fluidos.

O ANSYS® foi utilizado em larga escala no final dos anos de 1970 para o desenvolvimento de usinas nucleares, foram abordados cargas transitórias, variações de temperaturas e outros fatores que tornaria o projeto mais oneroso. Antes da utilização dos softwares os sistemas eram divididos em componentes e tratados como elementos de viga, porém era complicado realizar um pós-processamento como hoje, pois não haviam gráficos que apontavam pontos críticos. (MÜLLER, 2002)

Em 2013 a FERRARI® utilizou o software ANSYS® para realizar testes de aerodinâmica para participar de competições melhorando confiabilidade, segurança e velocidade. O ponto chave da simulação é a variedade de alternativas e o tempo reduzido. (CARDILE, 2013)

O funcionamento do ANSYS® resume em três grandes etapas *pré-processamento*, *“solver”* e *pós-processamento*. O pré-processamento é a etapa responsável por identificar a região de trabalho, desenho da geometria e processo de criação de malha. Nessa primeira etapa pode-se definir *pontos*, *linhas*, *áreas* e *volumes* do sistema, outro ponto importante é decidir o tipo de malha que será utilizada e o tamanho dessa malha. Como já falado anteriormente o tamanho da malha pode ser uma variável importante no pós-processamento. (REYNOL, 2008)

A etapa *“solver”* corresponde a aplicação de cargas e restrições do sistema, isso resume a condições de contorno do sistema, lembrando que nessa etapa a malha já está pronta. A última etapa é o pós-processamento, essa é feita automaticamente, não há interação. Essa etapa faz a associação das equações diferenciais parciais

sobre todo o volume especificado transformando essa associação em um sistema de equações e resolvendo esse sistema de equações. (REYNOL, 2008)

Como foi falado anteriormente, através da aproximação as soluções desse método também serão aproximações, porém no método computacional é possível alterar o tipo de elemento e o grau de refinamento, investindo menos tempo e obtendo resultados convergentes.

4.2.1. Elemento *BEAM 189*

O tipo de elementos utilizado no presente trabalho é o *BEAM 189*. Na biblioteca do Ansys o *BEAM 189* é uma derivação do *BEAM 188* onde é acrescentado ao primeiro a forma quadrática (não linear) no elemento de linha. Este tipo de elemento é aplicado para aplicações lineares em rotação e não lineares na deformação. Para deformação plástica é necessário que haja uma análise mais detalhada, pois, o elemento não possui opções para recalcular. [ANSYS, 2013]

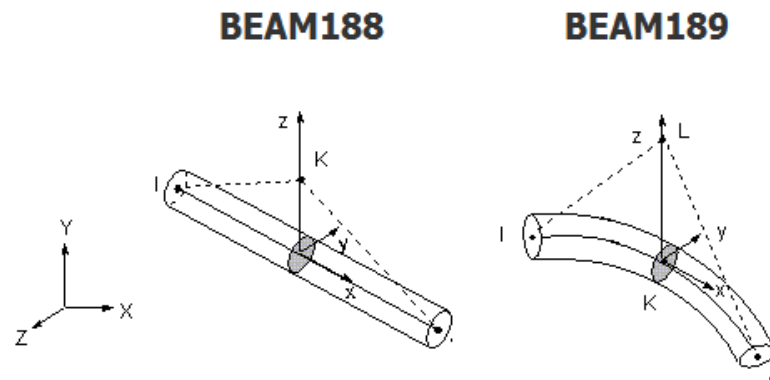


Figura 4.2.1 – Elemento tipo *BEAM 188* e *BEAM 189*. (ANSYS, 2013. Adaptada)

O estudo do tipo de elemento foi realizado pelo Alba, et al (2015), ele nos mostra que para cada elemento pode ser avaliado custo computacional, aproximação e necessidade de refinamento para convergência de resultado. O tipo de elemento dito mais sugestivo para o presente trabalho foi o *BEAM 189*.

O elemento *BEAM 189* é recomendado para ser utilizado em estruturas de feixe fino, ele segue a teoria de feixe de Timoshenko incluindo os efeitos de deformação e cisalhamento. Ele é recomendado para estruturas com encurvamentos de seções transversais. Ele também dá suporte a propriedades e efeitos não lineares, como elasticidade, cargas flutuantes, massas e materiais diferente.

A diferença dos dois tipos de elementos utilizados é demonstrada na Fig. (4.2.2), podemos perceber que para o elemento de *BEAM 188* é assumido sempre a

forma linear, sobrepondo elementos no interior da curva e deixando vazios na parte externa da curva. Já no elemento *BEAM 189* não ocorre tais erros.

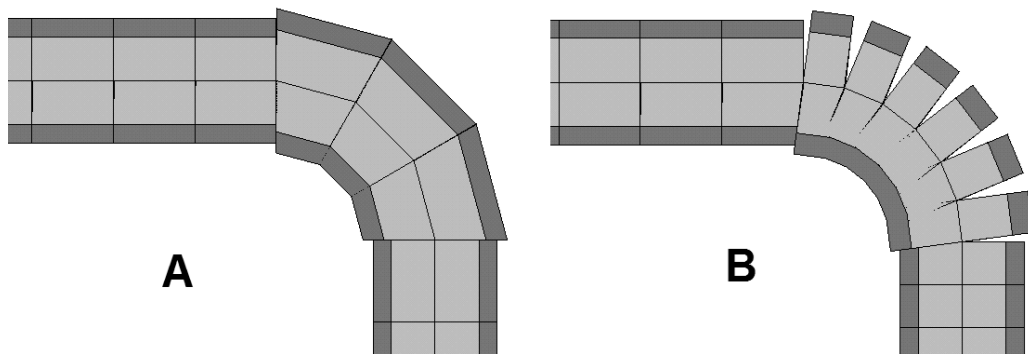


Figura 4.2.2 – Elemento *BEAM 189* (A) com a forma elementar quadrática e *BEAM 188* com a forma elementar linear. (ANSYS)

4.2.2. Análise do elemento

As etapas para o desenvolvimento de uma estrutura foram faladas anteriormente, é na etapa do *pré-processamento* que vamos ajustar o elemento para que fique ideal. É necessário realizar a revisão do modelo, analisando as respostas (*pós-processamento*) e gráficos e alterando os elementos para obter resultados eficientes, desta forma fica com o analista a responsabilidade de escolher tais estratégias.

Conforme Cyrino (1989), a maioria das estratégias para obter malhas eficientes estão no enriquecimento de malhas já especificada. Os principais meios de enriquecimento são os *refinamentos h* e *p*. O *refinamento h* é responsável por aumentar a quantidade de elementos deixando a ordem do polinômio constante. O *refinamento p* é responsável por aumentar a ordem do polinômio sem alterar o número de elementos.

Há também o *refinamento hp*, onde são combinados o refinamento *h* e *p* obtendo o método mais eficiente. Neste tipo de refinamento é possível realizar um refinamento *p* até atingir uma precisão pré-estabelecida e após, realizar o refinamento *h* onde alcance uma precisão aceitável para o projeto. Outra maneira é realizar simultaneamente os refinamentos até que consiga alcançar a precisão aceitável. (NOVOTNY & FANCELLO, 1998)

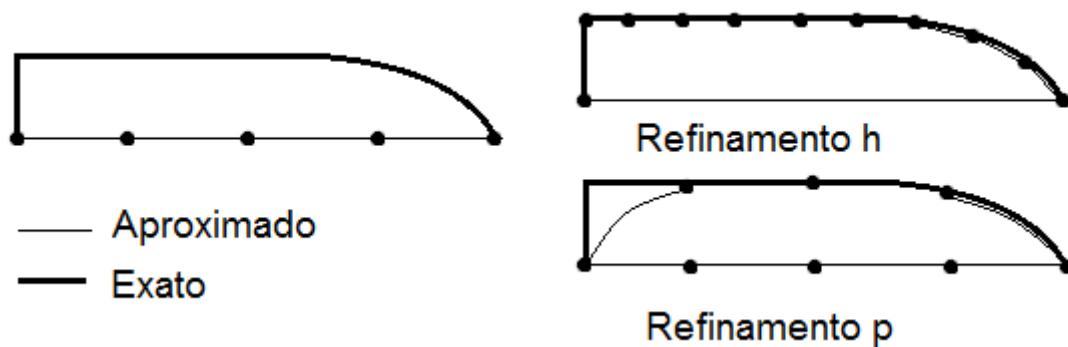


Figura 4.2.3 – Exemplificação dos tipos de refinamento. Refinamento h altera a quantidade de elementos. Refinamento p altera a ordem do polinômio. (Autor)

O refinamento tipo h ou hp deve ser utilizado com atenção pelo analista, ao aumentar o número de elementos ou a ordem dos elementos de um sistema buscando aproximar a solução a exata, aumenta também o custo computacional, essa é a desvantagem, pois requer mais tempo e mais investimento tecnológico. (PACHECO & SHZU, 2016)

Partindo de um tamanho “Default” existente no ANSYS® onde o programa sugere fomos alterando o tamanho do elemento e comparando os resultados. Esta análise é relevante quando vamos analisar o valor computacional e a convergência dos resultados. Na malha será apresentado a divisão do perfil e o tamanho dos elementos dos tubos e conexões. Para o ensaio de flexão temos os seguintes resultados, admitindo que a rigidez é igual a 1GPa.

A tabela (4.2.1) nos mostra que não é preciso de elementos tão pequenos para que o valor do deslocamento máximo convirja. Podemos ver a divisão das partes e o tamanho dos elementos nas Fig. (4.2.4) e Fig. (4.2.5), respectivamente.

Tabela 4.2.1 – Relação de mudança com tamanho do elemento.

Ensaio	Malha	Tensão Max (Pa)	Deslocamento Max (mm)
1	8 partes e 20 mm	846539	0.945
2	10 partes e 10 mm	888680	0.944
3	15 partes e 5 mm	873206	0.943
4	20 partes e 1 mm	888019	0.943
5	40 partes e 5 mm	887968	0.943
6	40 partes e 10 mm	887949	0.943

Para realização do presente trabalho foi escolhido o ensaio 3 da tabela (4.3.1). Tendo isso definido é possível selecionar os nós onde serão averiguados os deslocamentos, pois será usado sempre a mesma configuração de malha

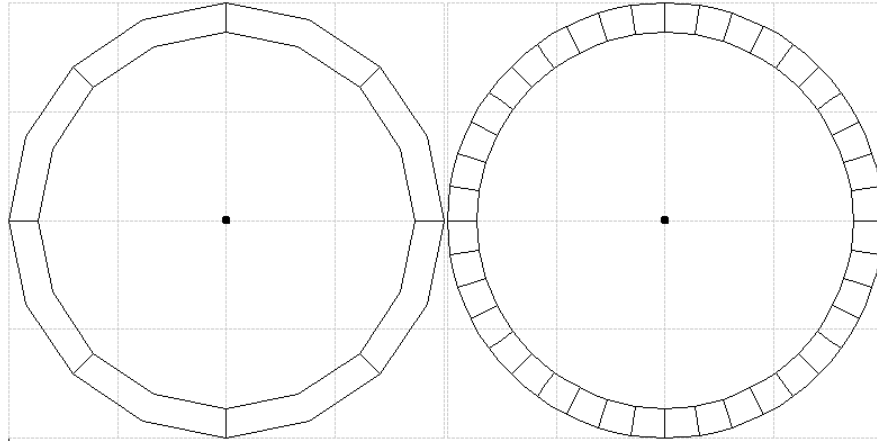


Figura 4.2.4 – Divisão da seção em 8 partes (padrão) e 40 partes. (ANSYS)

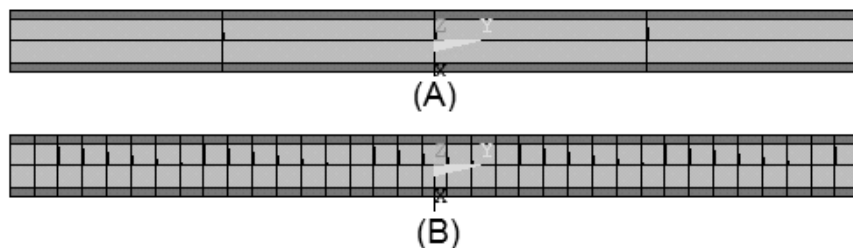


Figura 4.2.5 – Tamanho do elemento diminuindo de (A) para (B). (ANSYS)

4.3. ENSAIOS NUMÉRICOS

Os ensaios numéricos nos fornecerão os dados que serão comparados com os experimentais. Esta etapa consiste em esboçar o método experimental que será futuramente realizado e coletar as informações de maneira correta. A primeira ideia é realizar diversas etapas, submetendo a estrutura a esforços diferentes. A priori foi decidido três tipos de ensaio, flexão, flexo-torção e torção, na qual será aplicado apenas forças horizontais no chassi.

A primeira etapa no ensaio de flexão foi encontrar a força máxima que poderia ser aplicada na estrutura de modo que a estrutura não deformasse plasticamente. O limite de escoamento foi retirado de Alba Et al. (2015), com o valor de 40 Mpa. A sequência de cargas aplicada para esse ensaio foram duas cargas de 70, 140 e 210 N conforme a figura (4.3.2).

Os pontos onde serão apurados os deslocamentos estão apontados na figura (4.3.1). São quatro pontos e eles são representados pelos nodais e keypoints, apresentados na tabela (4.3.1).

Tabela 4.3.1 – Relação do número da fig. (4.3.1) com os nós e Keypoints.

Número na Figura (4.4.1)	Pontos nodais	Keypoints
1	1	1
2	578	10
3	170	4
4	746	13

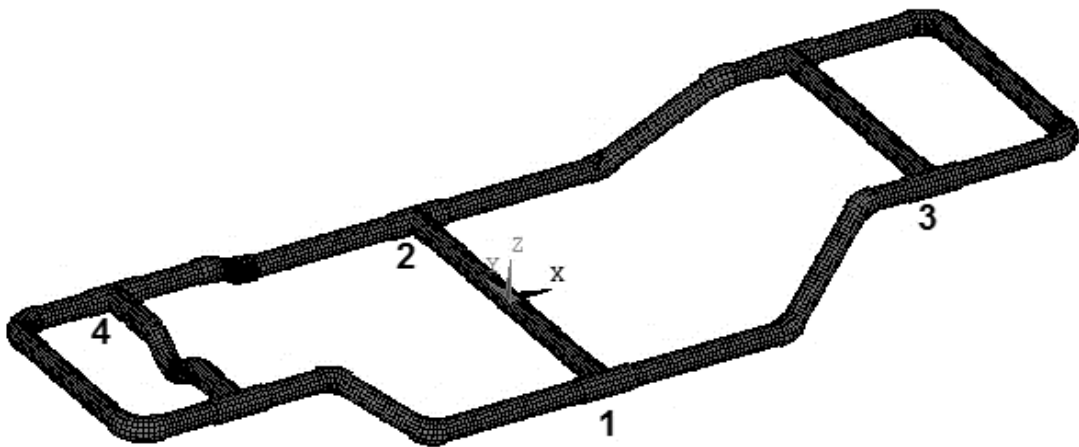


Figura 4.3.1 – Locais onde serão aplicadas as cargas e medidos os deslocamentos em Z. Relacionado à tabela (4.3.1). (ANSYS)

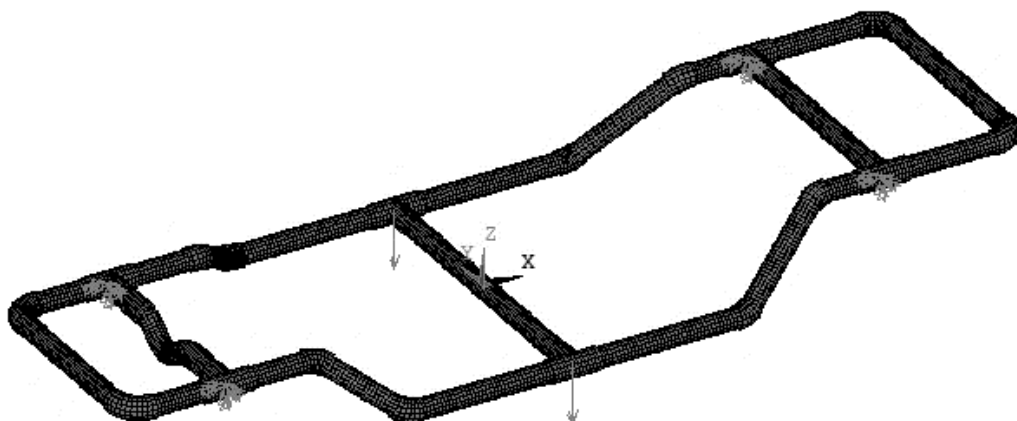


Figura 4.3.2 – Apoios (triângulos) e forças (vetores) aplicadas no ensaio de Flexão. (ANSYS)

O segundo ensaio que será realizado será chamado de flexão-torção por apresentar o mesmo desenho do anterior, porém com forças contrárias de mesma intensidade. Uma das forças estará no sentido positivo do eixo Z enquanto a outra estará no sentido negativo. A figura (4.3.3) mostra as forças aplicadas em sequência nos valores de 70, 140 e 210 N.

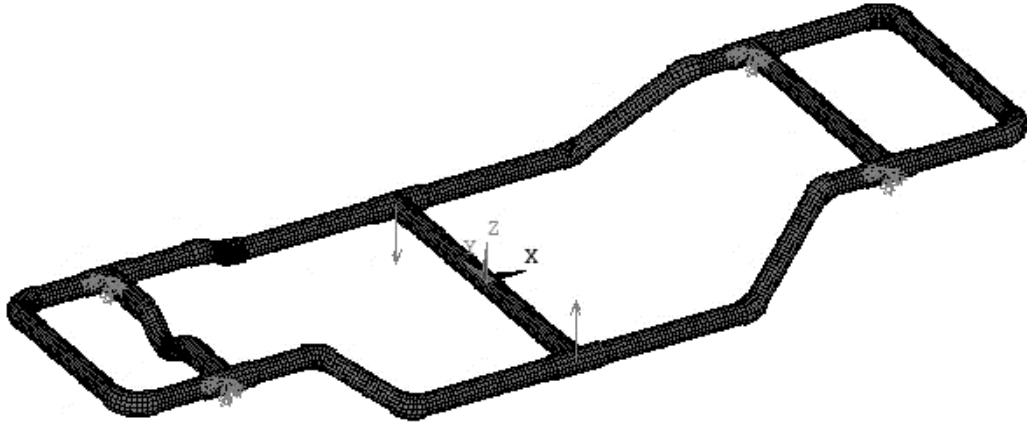


Figura 4.3.3 – Forças no ensaio de Flexão-torção. (ANSYS)

O terceiro e último ensaio será o de torção pura, dois dos engastes serão retirados e aplicadas duas forças de sentidos opostos como mostrado na figura (4.3.4). A força com sentido contrário de Z foi colocada na parte traseira do chassi propositalmente, pois nesta região que são colocadas maiores cargas nesse tipo de veículo. As forças aplicadas nesse ensaio serão de 30, 60 e 90 N para que a tensão fique em torno de 20 Mpa.

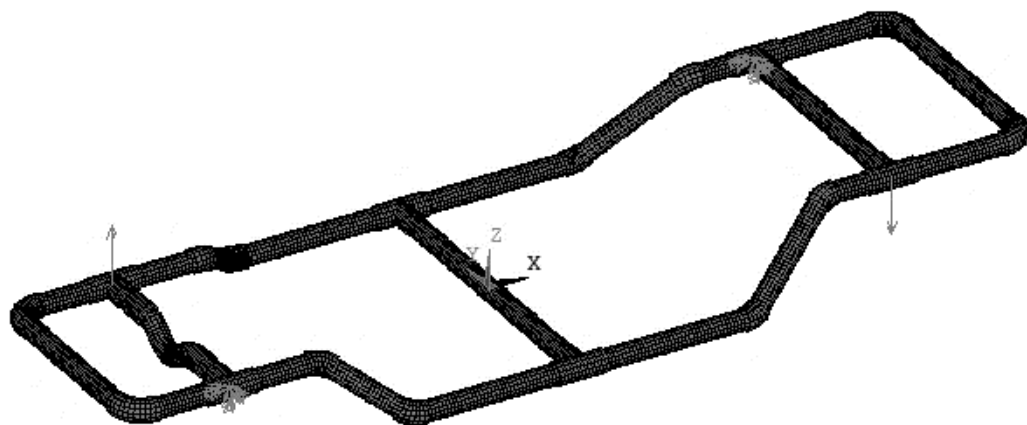


Figura 4.3.4 – Forças e apoios no ensaio de flexão. (ANSYS)

Na tabela (4.3.2) é apresentado o sinal negativo para identificar deslocamento no sentido oposto do eixo Z, sabendo que não há deslocamentos negativos. Com os

valores presentes na tabela (4.3.2) é possível realizar os passos experimentais para comparar os valores. O roteiro numérico está apresentado no Anexo III com todos os ensaios: flexão, flexão-torção e torção.

Tabela 4.3.2 – Deslocamentos em “z” nos ensaios.

Ensaio	Carga (N)	Deslocamento / Nó (mm)			
		1/1	2/578	3/170	4/746
Flexão	70	-2,9306	-2,9306	-	-
Flexão	140	-5,5964	-5,5964	-	-
Flexão	210	-8,0491	-8,0491	-	-
Flexão-Torção	70	5,1095	-4,7812	-	-
Flexão-Torção	140	10,777	-9,0935	-	-
Flexão-Torção	210	16,992	-13,034	-	-
Torção	30	-3,5676	2,1501	-6,4529	3,5310
Torção	60	-6,7279	4,5877	-12,458	7,2821
Torção	90	-9,8310	7,0510	-18,427	11,013

5. MÉTODO EXPERIMENTAL

A análise pelo MEF em alguns casos pode não representar a realidade, é sugestivo então realizar experimentos afim de comprovar os resultados obtidos (WEIS & PINTO, 2016). Os ensaios experimentais que serão realizados no presente trabalho têm como objetivo validar os ensaios numéricos realizados via ANSYS®.

A coleta de dados, as características físicas e as dificuldades de montagem, são benefícios que podem ser avaliados através do ensaio experimental, porém se o intuito é apenas analisar, o protótipo pode não ser sugestivo, pois requer tempo de construção e geralmente não há muita flexibilidade em alterar a geometria.

O método como se prepara um experimento define o experimento como um todo. O planejamento é muito importante, ele faz com que o experimento forneça todas as informações que precisamos, então para que essa etapa seja útil é necessário saber o que estamos procurando. (NETO Et al., 2001)

O planejamento é essencial para que os erros sejam evitados. Em qualquer experimento há uma quantidade xis de erros é desejado que eles sejam relativamente pequenos, e não sejam sistemáticos ou grosseiros. Para evitar tais erros o experimento deverá ser repetido de modo a montar uma amostra com intuito de atenuar os erros aleatórios. (NETO Et al., 2001)

O objetivo do experimento é extrair os deslocamentos verticais do chassi para posteriores análises comparativas, então é intuitivo que no experimento seja averiguado os mesmos pontos que foram analisados nos ensaios numéricos. A lista dos pontos analisados está presente na Tab. (4.3.1) e Fig. (4.3.1).

5.1. BANCADA

Uma bancada será construída para dar suporte ao protótipo no experimento, ela terá que ter rigidez muito superior, isto é, quando aplicado as cargas no protótipo a estrutura não deve sofrer deslocamentos que influencie na medição. A escolha do material foi baseada na facilidade de encontrar os componentes e na facilidade de manusear.

Os tubos com perfil circular não serão escolhidos pois a montagem é trabalhosa e requer mais detalhes. O perfil selecionado foi o retangular com as dimensões da tabela (5.1), eles foram escolhidos por resistir aos esforços impostos no experimento e pela pouca influência na medição. A estrutura da bancada pode ser analisada na Fig. (5.1.1).

Tabela 5.1 – Característica do perfil de bancada.

	Medida (mm)
Largura	30
Altura	50
Largura da chapa	1,2
Número comercial da chapa	18

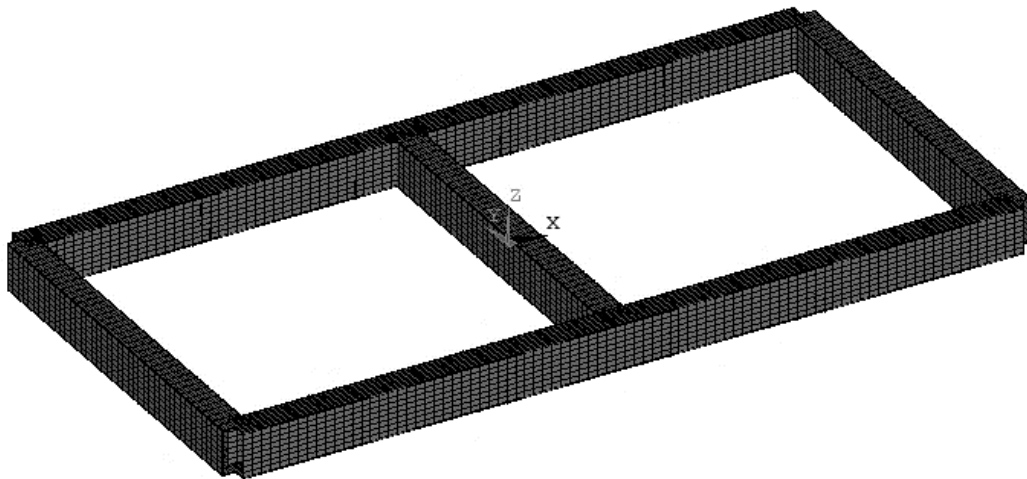


Figura 5.1.1 – Exemplo do Formato da Bancada. (ANSYS)

Os esforços foram repassados para a bancada e nos casos mais críticos obtivemos deslocamentos muito pequenos, na flexão foi obtido 0,66% do deslocamento do protótipo. A figura (5.1.2) mostra de forma ilustrativa o ensaio de torção realizado na bancada. Assim deverá ser computado as influências da bancada quando realizado o experimento.

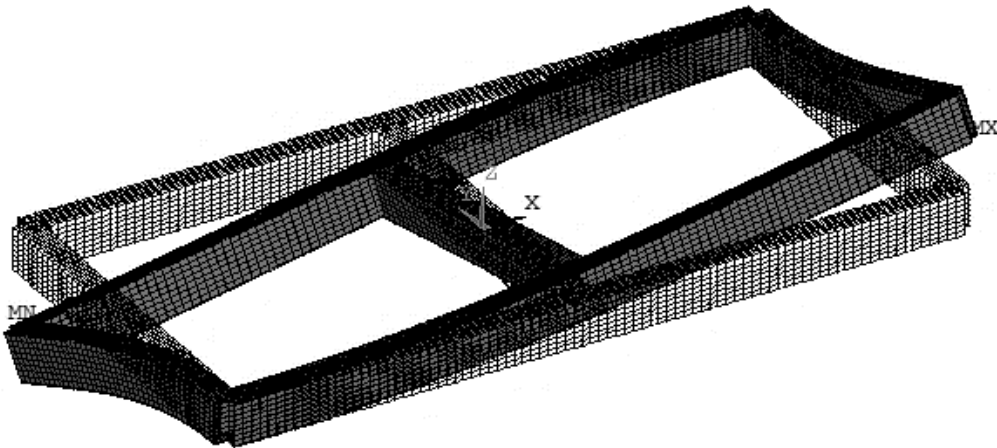


Figura 5.1.2 – Exemplo do deslocamento exagerado da bancada. (ANSYS)

5.2. PISTÕES PNEUMÁTICOS

Os responsáveis por realizar as forças no protótipo serão dois atuadores hidropneumáticos Fig. (5.2.1).



Figura 5.2.1 – Pistão da marca SHEFFER utilizado no experimento.

O modelo do cilindro é 2AA1 onde o 2 significa o diâmetro do embolo em polegadas, AA significa a série, sendo a série 200 PSI Pneumatic, e o 1 Significa o Curso em polegadas. As dimensões do cilindro podem ser vistas no Anexo IV.

A força dos atuadores pode ser calculada através da equação (5.1) a seguir:

$$P = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Onde P é a pressão do fluido, F é a força e A é a área do embolo. Como os atuadores são cilíndricos, a área será calculada através das equações (5.2) e (5.3):

$$A = \pi R^2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.2)$$

$$A = \pi(R^2 - r^2) = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (5.3)$$

Onde R e D é, respectivamente, o raio e o diâmetro do embolo e r e d é respectivamente o raio e o diâmetro do eixo. Como as forças já foram estabelecidas no ensaio numérico resta apenas ajustar a pressão do fluido conforme a equação (5.1). A equação (5.2) é utilizada quando estamos utilizando o avanço do embolo, a equação (5.3) é utilizada quando estamos utilizando o recuo do embolo.

Os pistões hidropneumáticos foram escolhidos pela disponibilidade e facilidade em fazer esforços quanto para cima ou para baixo, eles são da marca SHEFFER, e possuem as seguintes características disponíveis na tabela (5.2.1).

Tabela 5.2.1 – Característica dos cilindros pneumáticos SHEFFER.

	Medida (mm)
Comprimento total encolhido	158
Comprimento total estendido	183
Comprimento do corpo	98,425
Curso do embolo	25,4
Diâmetro do eixo	12,70
Diâmetro do embolo	50,80

A pressões que serão utilizadas para realizar as forças serão apresentadas na tabela (5.2.2), nela está presente a força que desejamos e a pressão que deve ser ajustada no regulador de pressão.

Tabela 5.2.2 – Pressões necessárias para realizar o experimento.

Força	Pressão de avanço (kN/m ²)	Pressão de Recuo (kN/m ²)
30	14,80	15,78
60	29,60	31,57
70	34,54	36,84
90	44,40	47,38
140	69,10	73,68
210	103,61	110,52

5.3. MEDIÇÕES

A ferramenta de medição para alguns ensaios será o relógio comparador MITUTOYO®, o funcionamento dele é bastante simples, ele mede a diferença de distância de uma coordenada inicial. O relógio comparador disponível tem capacidade de medição de 10 milímetros, é apresentado na Fig. (5.3.1).

A priori foi cogitado a utilização de relógios comparadores em todo o experimento, porém há um modelo disponível em laboratório e tem o curso máximo de 10 mm, então será necessário fazer um arranjo para que seja possível mensurar com paquímetro. O arranjo será simples, sendo um pedaço de metal acoplado ao eixo do cilindro.



Figura 5.3.1 – Relógio comparador MITUTOYO®, capacidade de 10mm.

O paquímetro utilizado será da marca DISMA®, Fig. (5.3.2), de aço carbono com capacidade de medir 150 milímetros. As medidas serão aferidas no início do experimento onde não haverá esforço das forças e a cada etapa de aplicação de força serão conferidos os deslocamentos. Assim de forma indireta será medido o deslocamento do embolo.



Figura 5.3.2 – Paquímetro DISMA® com capacidade de 150mm. (DISMA Catálogo)

A medição com o paquímetro se dará satisfatória se dois requisitos forem cumpridos, o primeiro é que a haste movimentada pelo embolo movimentará também

junto com o chassi, o segundo é que a placa metálica adicionada não será flexível de modo a evitar divergências ou erros na medição.

Analisando o primeiro requisito podemos concluir que se há movimento no chassi onde a haste é fixada, a haste também é movimentada, então o deslocamento do chassi e da haste naquele ponto será o mesmo podendo ser conferido na haste. O arranjo poderá ser entendido conforme a Fig. (5.3.3).

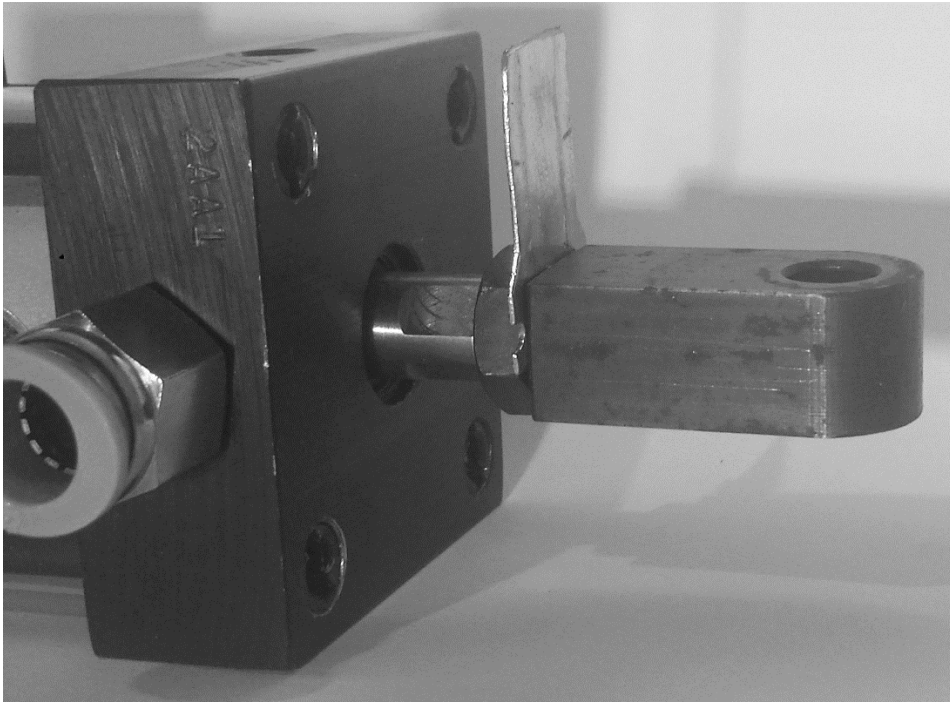


Figura 5.3.3 – Chapa fixada na haste para análise do deslocamento.

5.4. MÉTODO DE MEDIDA

O erro está implícito na medida, não é possível medir sem cometer algum tipo de erro; o sistema de medição, o operador, o ambiente, a medida de grandeza influencia na medição. A medição, contudo, é afetada por estes erros, combinados ou não, então é necessário que haja uma análise dos erros para que as informações retiradas sejam confiáveis. (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008)

A média aritmética é a soma de todos os valores de toda a amostra dividido pela quantidade total de indivíduos. Portanto se há uma quantidade infinita de elemento não há como realizar a média aritmética, apenas a média amostral. A média amostral (\bar{x}) será utilizada no presente trabalho e ela pode ser calculada pela equação (5.4)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5.4)$$

Onde o \bar{x} é a média de N elementos da amostra.

O desvio da amostra (d_i) pode ser calculado pela equação (5.5). A variância amostral (s^2) pode ser calculada através da equação (5.6) e o desvio padrão amostral (s) através da equação (5.7)

$$d_i = x_i - \bar{x} \quad (5.5)$$

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N d_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.6)$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (5.7)$$

O Desvio padrão é a medida do grau de dispersão aleatório, é utilizado para fazer um intervalo em torno da média. Conforme a distribuição normal 66,6% dos resultados estão no intervalo de $\bar{x} - s$ a $\bar{x} + s$, é possível utilizar tal distribuição, pois os valores entre as outras distribuições são próximos. Ou seja, a probabilidade de retirar outro valor aleatório e ele pertencer a esse intervalo é grande, tornando o experimento confiável. (NETO Et.al., 2001)

Como serão utilizados dois métodos de medida, inicialmente com o relógio comparador e depois com o paquímetro, temos também dois métodos de medição. O relógio comparador utiliza o método de medição diferencial, ele compara uma medida inicial padrão com uma outra nova medida. O paquímetro utiliza o método da comparação, pois ele compara a medida padrão do paquímetro com o mensurando. (NETO Et al., 2001)

O intervalo compreendido entre o menor e o maior valor do instrumento de medição é conhecido como Faixa de indicação. A Faixa de medição é a faixa determinada confiável pelo fabricante, ela em equipamentos analógicos pode coincidir com a Faixa de indicação ou ser inferior.

O valor de uma divisão é a diferença entre duas marcas sucessivas em um equipamento analógico, nos equipamentos digitais ele é a menor medida incremental

(incremento digital). A resolução é a menor indicação percebível, para equipamentos digitais ela iguala ao incremento digital, para os equipamentos analógicos ela representa a metade do valor de uma divisão. (NETO Et al, 2001)

O erro de calibração (C) do sistema quando não indicado pode ser considerado como a metade da resolução para equipamentos analógicos e para os digitais o erro é o incremento digital. Assim temos abaixo a soma de erros como erro máximo desconsiderando que há falhas de manuseio e erros ambientais será conforme a equação (5.8)

$$E_{max} = \pm(s + C) \quad (5.8)$$

O valor do C será igual a 0,025 e 0,005 mm para o paquímetro e para o relógio comparador respectivamente.

6. TRABALHOS FUTUROS

Será realizado no Trabalho de Conclusão de Curso dois (TCC2) o procedimento experimental onde serão analisados todos os deslocamentos retirados dos ensaios. Todo o experimento será realizado de modo a representar na realidade o ensaio virtual.

6.1. CONFECÇÃO DA BANCADA

Primeiramente a bancada será montada, será utilizado o perfil 30x50mm com chapa número 18 para a fabricação. A solda utilizada no processo de montagem será de eletrodo revestido ou MIG. Ambos estarão disponíveis, o benefício para o uso de eletrodo revestido é o custo e para a MIG é a praticidade.

Serão utilizadas cantoneiras de 1 polegada com perfil de 1/8' para segurar os cilindros pneumáticos e o chassi na bancada conforme a Fig. (6.1).

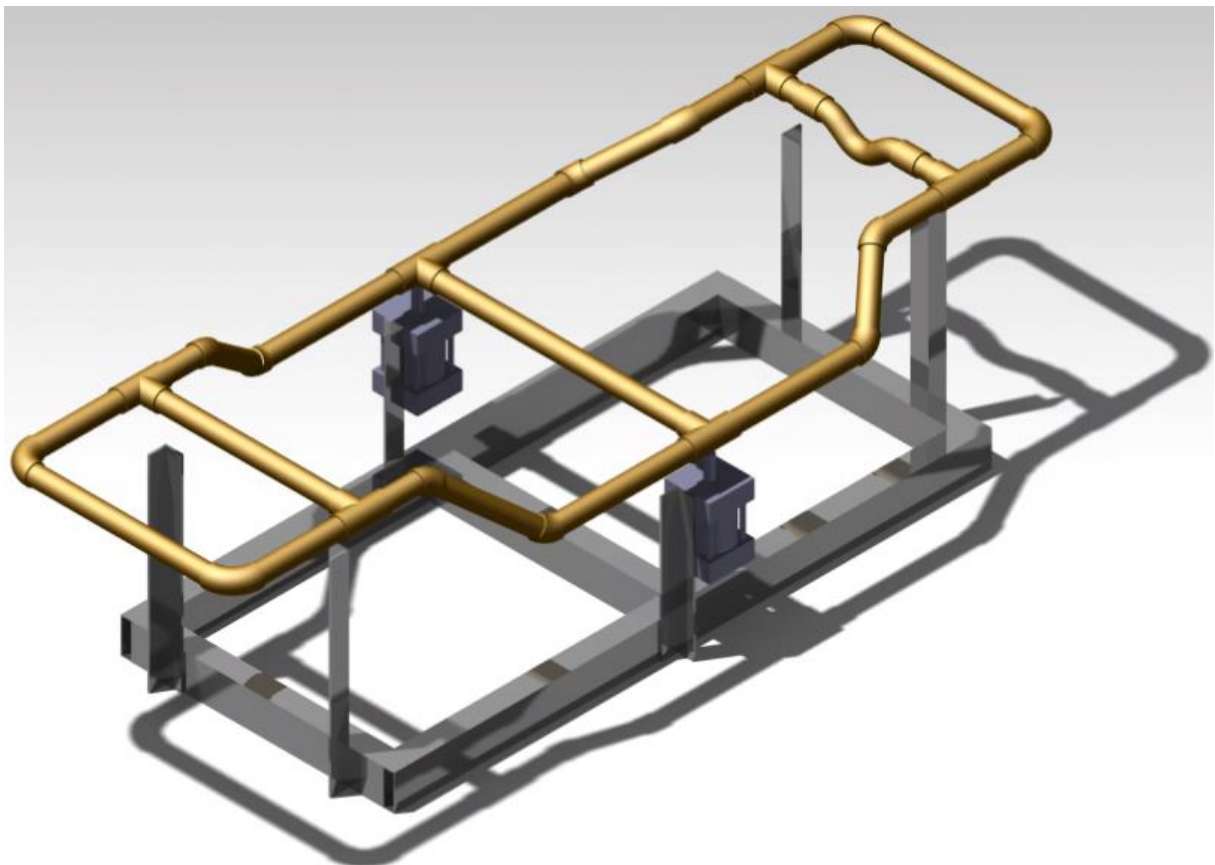


Figura 6.1 – Esquema de montagem da Bancada, Pistões pneumáticos e Chassi.
Esquema dos ensaios de Flexão e Flexo-torção. (CATIA)

Os pistões serão parafusados nas cantoneiras, será feito um furo oblongo que permitirá ajustes em diferentes alturas, esses ajustes permitirão que o cilindro não

chegue ao fim de curso em determinado experimento. Esse detalhe deve ao pequeno curso do pistão, de apenas uma polegada (25,4 mm). Para alívio de tensões internas no chassi, originados por falhas de montagem, será também feito furos oblongos nas cantoneiras responsáveis por realizar o engaste dos pontos do chassi Fig(6.2).

6.2. MONTAGEM

Após a montagem da bancada será iniciado a montagem dos sistemas que compõe o experimento. Inicialmente as pressões serão calibradas para cada experimento, o sistema de ar comprimido e dois reguladores de pressão da FESTO® disponível no galpão da Faculdade UnB Gama serão utilizados. Utilizaremos dois para permitir mesma força tanto no avanço quanto no recuo dos cilindros pneumáticos, como apresentado na tabela (5.2.2).

Para os dois primeiros experimentos os pontos engastados serão os mesmos, já no terceiro experimento dois apoios serão substituídos por forças. Sabendo disso utilizaremos chapas parafusadas nas cantoneiras para que seja fácil a substituição do ponto de engaste por um cilindro. Essas chapas podem ser assemelhadas conforme a Fig. (6.2).

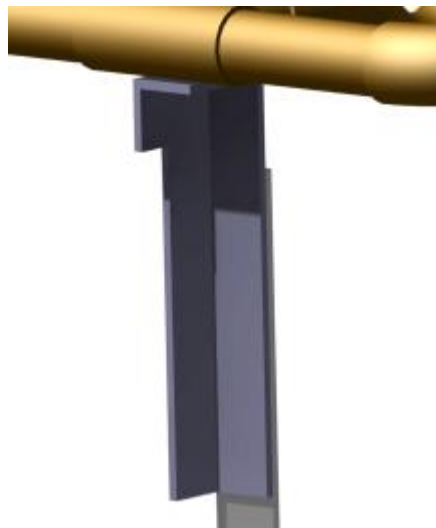


Figura 6.2 – Esquema da fixação do chassi. (CATIA)

6.3. ENSAIO

O ensaio será realizado de forma descontínua, para cada arranjo será aplicado esforços de forma crescente até que todos os valores de forças sejam aferidos, isto é, será aplicado a força “xis”, retirada e aplicada a força conseguinte. Essa opção foi escolhida por ter que analisar a pressão nos cilindros a cada mudança de força, evitando propagação de erros do operador e do sistema.

As medições serão retiradas no início do experimento, onde teremos o deslocamento inicial conhecido e ao final da aplicação da força faremos outra medição, retirando aí com a diferença das duas medições o deslocamento do chassi. A equação (6.1) mostra como será efetuado. E a figura (6.3) mostra como pode ser realizado

$$\text{Deslocamento} = \text{Medida Final} - \text{Medida inicial} \quad (6.1)$$



Figura 6.3 – Esquema de aferição dos deslocamentos, Medida inicial igual a $15,0 \pm 0,5 \text{ mm}$ e Medida final igual a $39,0 \pm 0,5 \text{ mm}$, deslocamento de $24 \pm 1 \text{ mm}$.

A tabela presente no Anexo V será preenchida conforme a realização do experimento, ela foi desenhada para facilitar a coleta de dados quando for realizada o procedimento experimental.

6.4. CRONOGRAMA

Atividade	Julho 2017	Agosto 2017	Setembro 2017	Outubro 2017	Novembro 2017	Dezembro 2017
Montagem do Chassi.						
Montagem da Bancada						
Montagem do conjunto utilizado						
Realização do Experimento						
Análise comparativa dos resultados						
Resultados e discussões						

Figura 6.4 – Cronograma de atividades futuras. (Autor)

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

- ALBA, M. H. M.; AGUIAR, L. R. C.; CAS, J. L. K.; RIBEIRO, A. S.; DAHER, S. L.; KHALIL, S. B.; SHZU, M. A. M.; **“Análise Estrutural de um Modelo em Escala Reduzida de Chassi Automotivo pelo Método dos Elementos Finitos”**. In: VII ENCONTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA FACULDADE UNB GAMA, 2015, Gama/Brasília. Anais do VII ENCONTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA FACULDADE UNB GAMA, 2015.
- ALBERTAZZI JR, A. G.; SOUSA, A. R. de; **“Fundamentos de Metrologia Científica e industrial”** Ed. Manole. 2008.
- ANFAVEA; Disponível em < <http://www.anfavea.com.br/anuarios.html>>. Acessado em abril de 2017.
- CARDILE, E.; **“ON THE FAST TRACK Ferrari pushes the limits of simulation in improving aerodynamic performance of racing cars”**. Ansys Advantage, Vol. VII, Issue 3, 2003 pg. 32-35.
- CARROANTIGO. **“História do Carro Brasileiro”**. Disponível em http://www.carroantigo.com/portugues/indice_ccal.htm . Acessado em abril de 2017.
- CHANDRA, M. R., SRINIVASULU, 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, Vol.2, Issue.4, July-Aug. 2012 pg. 2594-2600.
- COSTA, P. G.; **“A Bíblia do Carro”**. Livro digital. 2001. Disponível em <http://mecatronicadegaragem.blogspot.com.br/2011/06/biblia-do-carro.html>. Acessado em abril de 17.
- CYRINO, J. C. R.; **“Convergência Acelerada Pela Relocalização De Nós E Refinamento De Malhas De Elementos Finitos”** Tese para título de Doutor em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.
- DISMA CATÁLOGO; **“Catálogo Disma”**. Disponível em < <http://www.dismaferramentas.com.br/site2011/catalogo/default.asp?busca=&marca=DISMA&categoria=6&pagina=12.pdf>>. Acessado em maio de 2017.
- ENDEAVOR; **“5 dúvidas básicas sobre fazer um protótipo para seu negócio”**. Endeavor Brasil 2015. Disponível em <https://endeavor.org.br/prototipo/>. Acessado em abril de 2017.
- FURTADO, D. C; ÁVILA S. M., **“Análise Estrutural de Chassi de Veículos Automotivos”**. Dissertação para título de graduação de Engenharia Automotiva, Faculdade UnB Gama, Brasília, 2013.
- GILLESPIE, T. D. **“Fundamentals of Vehicle Dynamics”**, Society of Automotive Engineers Inc., USA, 1992.

- GORNI, A. A.; “**Introdução à Prototipagem Rápida e Seus Processos**”. Revista Plástico Industrial, pág. 230-239. 2001. Disponível em < <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>>. Acessado em abril de 2017.
- GUEDES, B., FILKAUSKAS, M. E., “**O Plástico**”, São Paulo: Érica, 1986
- INOVAR-AUTO; Disponível em < http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/login.jspx?_adf.ctrl-state=v6viwa74_29>. Acessado em abril de 2017.
- MANO, E. B., MENDES, L. C., “**Introdução a Polímeros**”, 2ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2004.
- MANO, E. B., “**Polímeros como materiais de engenharia**”, São Paulo: Edgard Blucher. 1991
- MORAES, A. J.; “**O Método dos Elementos Finitos e a Engenharia Civil**”, Revista On-Line IPOG, Dezembro de 2015, Instituto do Pós-Graduação, IPOG, Cuiabá-MT, 2015. Disponível em < <https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n10-2015/o-metodo-dos-elementos-finitos-e-a-engenharia-civil/>>. Acessado em abril de 2017.
- MÜLLER, G.; “**Engineering Applications of ANSYS® Inside Siemens AG**”. ANSYS® Incorporated. Erlangen, Germany 2002. Disponível em < http://www.auc-ev.de/fileadmin/ANSYS_in_DACH-und-Geschichte/wp_siemens.pdf>. Acessado em Abril de 2017.
- NETO, B. de B.; SCARMINIO I. S.; BRUNS, R. E.; “**COMO FAZER EXPERIMENTOS: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**” 2 ed. Campinas, São Paulo, Editora Unicamp, 2001.
- NOVOTNY, A. A.; FANCELLO, E. A.; “**Um refinamento h , p e hp adaptativo na análise de flexão de placas semi-espessas**”. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol 14,1. Pág 25-48. 1998.
- NUNES, L. R., RODOLFO JÚNIOR, A., ORMANJI, W., HAGE JÚNIOR, E., AGNELLI, J. A. M., PESSAN, L. A., “**Tecnologia do PVC**”. 2 ed. São Paulo: ProEditores/Braskem. 2006.
- OLIVEIRA, A. de; “**A Relação de Santos Dumont Com O Primeiro Veículo De São Paulo**”. 2015. Disponível em <http://www.saopauloinfoco.com.br/a-relacao-de-santos-dumont-com-o-primeiro-veiculo-de-sao-paulo/>. Acessado em abril de 17.
- OLIVEIRA, F. C. G. de; “**Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica**”, Dissertação para obtenção do título de Pós-Graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- PACHECO, G.; SHZU, M. A. M.; “**Análise Numérica e Experimental Em Placa De Material Compósito De Aplicação Na Indústria Automotiva**”. Dissertação para título de graduação em Engenharia Automotiva, Faculdade UnB Gama, Brasília, 2016.

- REYNOL, A.; “**Modelagem e simulação de micromisturadores**”. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-24092008-141009/pt-br.php>>. Acesso em Maio de 2017.
- REZENDE, V.; “**O Método de Galerkin**”. Dissertação para título de mestre em Ciências. Departamento de matemática da Universidade de Maringá, Maringá. 2005.
- SILVA, J. G. S. da; SOEIRO. F. J. da C. P.; VELLASCO, P. C. G. da S.; GUIMARÃES, L. P.; VELOZO, L. T.; “**Uma experiência acadêmica nos cursos de graduação da Faculdade de Engenharia da UERJ a partir da utilização do programa ANSYS**” Cobenge, Pág. 96-105, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- SILVA, J. G. S. DA, SOEIRO, F. J. DA C. P., TRIGUEIRO, G. S., ROBERTO, M. A. R., “**Análise estrutural de chassi de veículos pesados com base no emprego do programa ANSYS**”, Cobenge, Pág. 88-95, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2001.
- SOARES, F. S., GERTZ, L. C., CERVIERI, A., AIRES, A. F. R., SILVEIRA, M. A. da, “**Desenvolvimento de um chassi automotivo para um veículo elétrico de pequeno porte**”, Revista de Iniciação científica de ULBRA, Pág. 93-101, Nº 10/2012.
- SORIANO, H. L.; LIMA, S. de S.; “**Métodos de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**”. 48ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- SORIANO, H. L.; “**Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas**”, Ciência Moderna, São Paulo, 2009.
- SOUZA, G.; “**O que é um Protótipo**”. TrankTana’s. 2012. Disponível em <http://traktanas.com/o-que-um-prototipo/>. Acessado em abril de 2017.
- SOUZA, L. R. DA S.; “**Desenvolvimento de Estrutura Veicular do tipo Space Frame Construída com Tubos de PVC**”. Dissertação para título de Mestrado na Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional (profissional), Catalão, 2015.
- TOMAZ, P.; “**Livro conservação da água**”, Cap. 9 – Cargas em tubos de PVC. Livro digital, Curso de manejo de águas pluviais. 2010. Disponível em <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/livro_conservacao/capitulo9.pdf>. Acessado em abril de 17.
- WAKEHAM, K. J., “**Introdution To Chassis Design – Revision 1.0**”. Mechanical Engineerign Undergraduate, Memorial University of Newfoundland And Labrador, Newfoundland And Labrador, Canada, 2009.
- WEIS, G. H. E.; PINTO F. A. de N. C.; “**Análise Computacional E Experimental De Rigidez À Torção De Um Chassi De Fórmula Sae**” Dissertação para título de

graduação de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

8. ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Dimensões dos Tubos e Conexões	57
Anexo II	Catálogo Tigre® (Montagem)	59
Anexo III	Roteiro numérico	60
Anexo IV	Dimensões do cilindro pneumático	65
Anexo V	Tabela de medições experimentais	66
Anexo VI	Cotas Chassi	67
Anexo VII	Cotas da Bancada	68

I. Anexo - Dimensões dos Tubos e Conexões

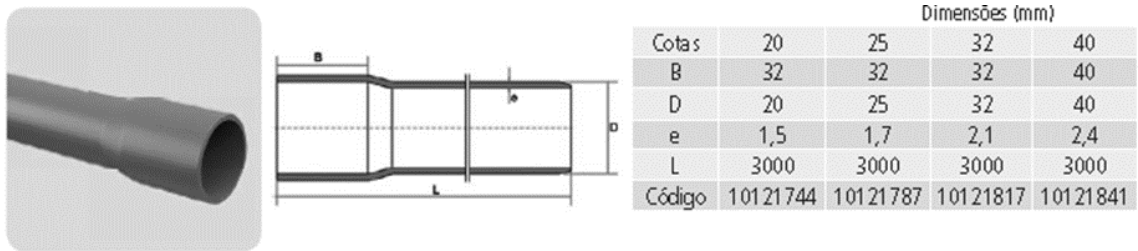


Figura A.1.1 – Dimensões do tubo de PVC soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

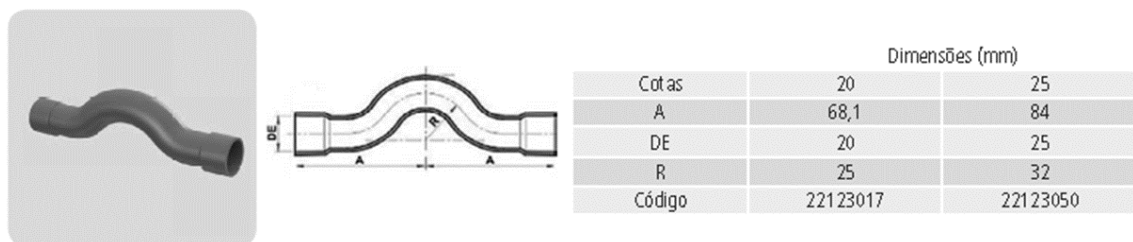


Figura A.1.2 – Curva tipo transposição soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

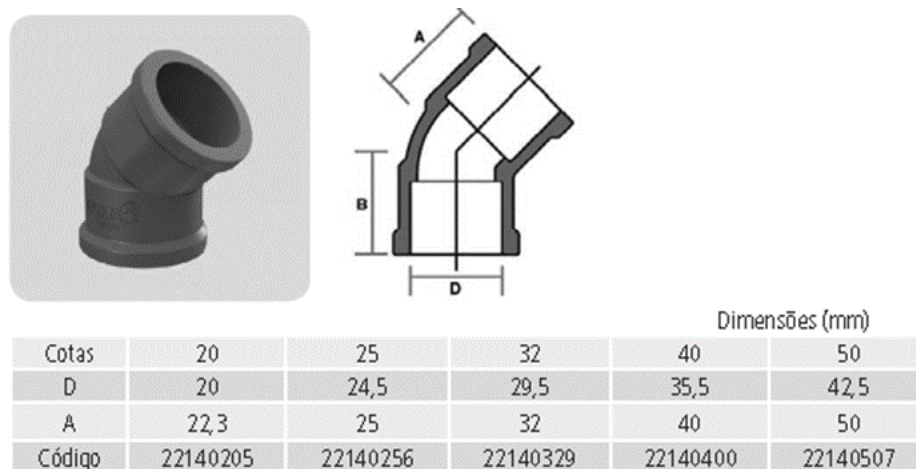


Figura A.1.3 – Joelho de 45° soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

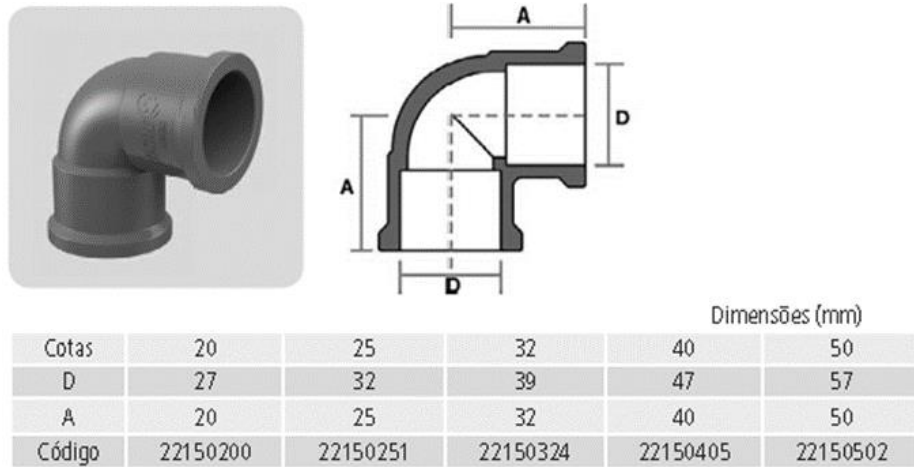


Figura A.1.4 – Joelho de 90° soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

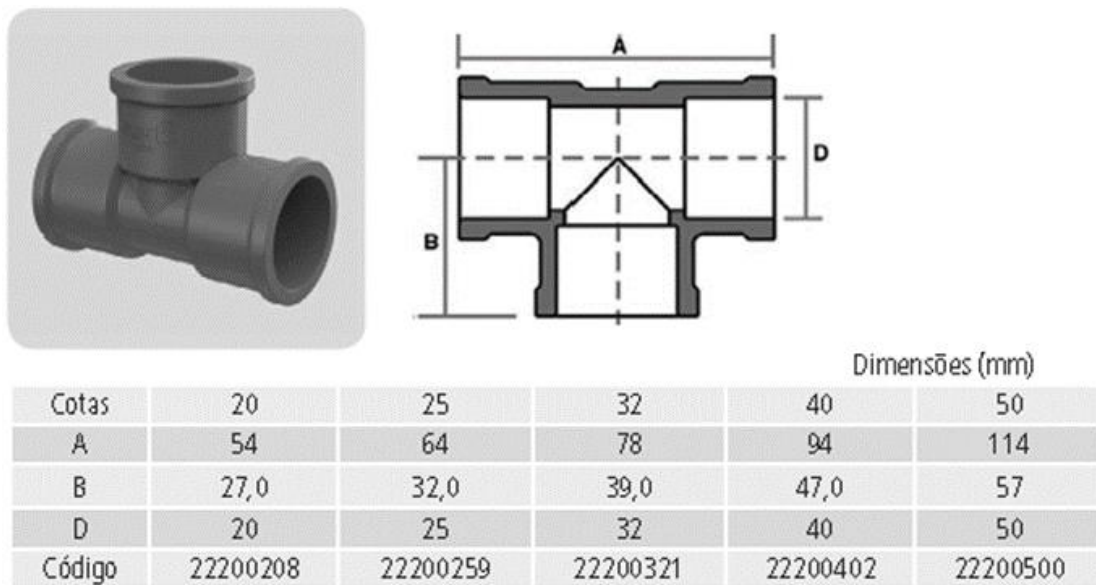


Figura A.1.5 – Tê soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

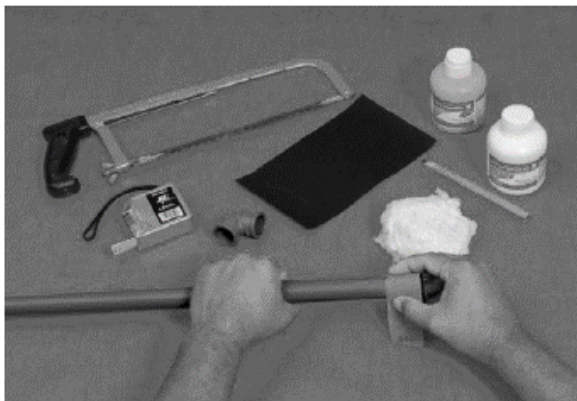
II. Anexo – Catálogo Tigre® (Montagem)

Água Fria
Soldável



Execução das Juntas Soldáveis

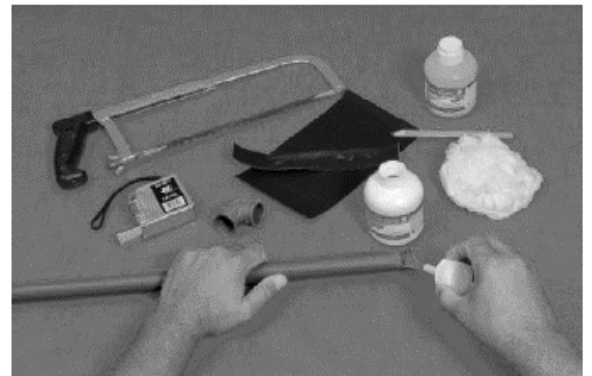
Passo 1: Corte o tubo no esquadro e lixe as superfícies a serem soldadas. Observe que o encaixe deve ser bastante justo, quase impraticável sem o adesivo, pois sem pressão não se estabelece a soldagem.



Passo 2: Limpe as superfícies lixadas com Solução Preparadora TIGRE, eliminando impurezas e gorduras.



Passo 3: Distribua uniformemente o adesivo com um pincel ou com o bico da própria bisnaga nas bolsas e nas pontas a serem soldadas. Evite excesso de adesivo.



Passo 4: Encaixe de uma vez as extremidades a serem soldadas, promovendo, enquanto encaixar, um leve movimento de rotação de 1/4 de volta entre as peças, até que estas atinjam a posição definitiva. Remova o excesso de adesivo e espere 1 hora para encher a tubulação de água e 12 horas para fazer o teste de pressão.



Figura A.2.1 – Passos para montagem das conexões. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

III. Anexo – Roteiro numérico do chassi

FINISH	!escolha das seção do tubo
/CLEAR	ISECTYPE(1) = NÚMERO DE IDENTIFICAÇÃO
	ISECTYPE(2) = TIPO DO ELEMENTO
!Título	ISECTYPE(3) = TIPO DA SEÇÃO DO ELEMENTO
/title, TCC-Marcos	ISECTYPE(4) = NOME DA SEÇÃO
/filemame, TCC-Marcos	ISECTYPE(5) = GRAU DE REFINAMENTO(0~5)
!-----	SECTYPE,1,BEAM,CTUBE,TUBO,3
!-----Pré-processamento-----	!Dimensões do raio interno e externo do tubo e
!-----	!divisões
	SECDATA,0.0108,0.0125,15
!Variáveis	!Plotando
!Densidade em kg/m^3	SECPLOT,1,1
d = 1450	
!Módulo de elasticidade 2.5 Gpa	
E = 2500000000	!escolha das seção das conexões
! Coeficiente de Poisson	SECTYPE,2,BEAM,CTUBE,CONEXOES,3
p = 0.38	!Dimensões do raio interno e externo das juntas
	SECDATA,0.0108,0.0145,15
!Iniciando o tipo de Pré-processamento	!Plotando
/PREP7	SECPLOT,2,1
! Visualização dos elementos discretizados	!Definindo os keypoints:
/ESHAPE,1	k,001, 0.000,-0.205,0.00
	k,002, 0.230,-0.205,0.00
!Escolha do Elemento	k,003, 0.350,-0.155,0.10
ET,1,BEAM189	k,004, 0.440,-0.155,0.10
	k,005, 0.620,-0.155,0.10
!Incluindo uma deflexão em larga escala	k,006, 0.620, 0.155,0.10
NLGEOM,ON	k,007, 0.440, 0.155,0.10
	k,008, 0.350, 0.155,0.10
!Graus de liberdade conforme o BEAM189	k,009, 0.230, 0.205,0.00
!KEYOPT,(1),(2),(3),(4)	k,010, 0.000, 0.205,0.00
!KEYOPT(1) = 1; 6 graus de Liberdade mais	k,011,-0.220, 0.205,0.00
!envergadura	k,012,-0.300, 0.135,0.06
!KEYOPT(2) = 1; Assume Seção rígida	k,013,-0.420, 0.135,0.06
!KEYOPT(4) = 2; Mostra um estado combinado de	k,014,-0.550, 0.135,0.06
!cisalhamento (Torção e flexão)	k,015,-0.550,-0.135,0.06
	k,016,-0.420,-0.135,0.06
KEYOPT,1,1,,2	k,017,-0.300,-0.135,0.06
	k,018,-0.220,-0.205,0.00
!Propriedades do Material	k,071, 0.408, 0.155,0.10
!Módulo de Elasticidade	k,072, 0.472, 0.155,0.10
MP,EX,1,E	k,073, 0.440, 0.123,0.10
!Densidade	k,041, 0.408,-0.155,0.10
MP,DENS,1,d	k,042, 0.472,-0.155,0.10
!Coeficiente de Poisson	k,043, 0.440,-0.123,0.10
MP,PRXY,p	k,131,-0.452, 0.135,0.06
	k,132,-0.388, 0.135,0.06
	k,133,-0.420, 0.103,0.06

k,134,-0.420, 0.084,0.06
 k,135,-0.420, 0.042,0.06
 k,110,-0.032,-0.205,0.00
 k,120, 0.032,-0.205,0.00
 k,130, 0.000,-0.173,0.00
 k,101,-0.032, 0.205,0.00
 k,102, 0.032, 0.205,0.00
 k,103, 0.000, 0.173,0.00
 k,161,-0.452,-0.135,0.06
 k,162,-0.388,-0.135,0.06
 k,163,-0.420,-0.103,0.06
 k,164,-0.420,-0.084,0.06
 k,165,-0.420,-0.042,0.06
 k,106,-0.420, 0.000,0.028

!Linhas ligando o keypoints

L,001,120
 L,120,002
 L,002,003
 L,003,041
 L,041,004
 L,004,042
 L,042,005
 L,005,006
 L,006,072
 L,072,007
 L,007,071
 L,071,008
 L,008,009
 L,009,102
 L,102,010
 L,010,101
 L,101,011
 L,011,012
 L,012,132
 L,132,013
 L,013,131
 L,131,014
 L,014,015
 L,015,161
 L,161,016
 L,016,162
 L,162,017
 L,017,018
 L,018,110
 L,110,001
 L,001,130
 L,130,103
 L,103,010
 L,004,043
 L,043,073
 L,073,007

L,016,163
 L,133,013
 L,133,134
 L,134,135
 L,135,106
 L,163,164
 L,164,165
 L,165,106

!linhas curvas para os cantos

LFILLT,02,03,0.032
 LFILLT,03,04,0.032
 LFILLT,07,08,0.032
 LFILLT,08,09,0.032
 LFILLT,12,13,0.032
 LFILLT,13,14,0.032
 LFILLT,17,18,0.032
 LFILLT,18,19,0.032
 LFILLT,22,23,0.032
 LFILLT,23,24,0.032
 LFILLT,27,28,0.032
 LFILLT,28,29,0.032
 LFILLT,40,41,0.032
 LFILLT,41,44,0.032
 LFILLT,43,44,0.032

!Selecionando as linhas com SECTYPE1-TUBOS

!LSEL(1)= Selecciona(S), Adiciona(A)

!LSEL(4)= Linha inicial

!LSEL(5)= Linha final

LSEL,S,,,02,04

LSEL,A,,,07,09

LSEL,A,,,12,14

LSEL,A,,,17,19

LSEL,A,,,22,24

LSEL,A,,,27,29

LSEL,A,,,02,04

LSEL,A,,,32,32

LSEL,A,,,35,35

LSEL,A,,,57,59

LSEL,A,,,41,42

LSEL,A,,,44,44

LSEL,A,,,39,39

!Fazendo a discretização dos tubos

!Se não for apresentado é admitido um

!tamanho padrão

!LESIZE(1)= Selecciona a linha, ou todas linhas
 !seleccionadas (ALL)
 !LESIZE(2)= Tamanho da linha
 LESIZE,ALL,0.005

!Criando a malha
 !Seleccionando o ,Material,Real,type,,,,Section
 !TYPE é definido no ET
 LATT,1,1,1,,,,1

!Seleccionando as linhas com SECTYPE2-CONEXÕES
 LSEL,S,,,01,01
 LSEL,A,,,30,31
 LSEL,A,,,45,46
 LSEL,A,,,05,06
 LSEL,A,,,33,34
 LSEL,A,,,47,48
 LSEL,A,,,36,38
 LSEL,A,,,10,11
 LSEL,A,,,15,16
 LSEL,A,,,20,21
 LSEL,A,,,25,26
 LSEL,A,,,51,54
 LSEL,A,,,20,21
 LSEL,A,,,55,56
 LSEL,A,,,40,40
 LSEL,A,,,43,43
 LSEL,A,,,49,50

!Fazendo a discretização das Conexões
 LESIZE,ALL,0.005

!Criando a malha
 !Seleccionando o ,Material,Real,,,,,
 LATT,1,1,1,,,,2

!Reseleccionando todas as linhas
 LSEL,ALL
 !Gerando os elementos de linha discretizados
 LMESH,ALL

!-----
 !-----FLEXÃO-----
 !-----

FINISH
 /SOL

!Aplicando as restrições para ensaio de Flexão
 !DK(1)= Nó em que será restringido
 !DK(2)= Tipo de restrição

DK,04,ALL
 DK,07,ALL
 DK,13,ALL
 DK,16,ALL

!Aplicando forças no meio para ensaio de Flexão
 !FK(1)= Nó em que será aplicado a força
 !FK(2)= Direção da força
 !FK(3)= Magnitude da força

FK,01,FZ,-70
 FK,10,FZ,-70

!Aplicando a aceleração da gravidade.
 !ACEL(1)= Na direção X
 !ACEL(2)= Na direção Y
 !ACEL(3)= Na direção Z

ACEL,,,9.81

!Apresentando o status do Programa

/STATUS

!Iniciando a Solução

SOLVE
!SE ESCOLHER ESSE VÁ PARA O PÓS-PROC.

!-----
 !-----FLEXÃO-TORÇÃO-----
 !-----

FINISH
 /SOL

!Aplicando as restrições para esse ensaio
 !DK(1)= Nó em que será restringido
 !DK(2)= Tipo de restrição

DK,04,ALL
 DK,07,ALL
 DK,13,ALL
 DK,16,ALL

!Aplicando forças no meio para esse ensaio
 !FK(1)= Nó em que será aplicado a força
 !FK(2)= Direção da força
 !FK(3)= Magnitude da força

FK,01,FZ,**70**
 FK,10,FZ,-**70**

!Aplicando a aceleração da gravidade.
 !ACEL(1)= Na direção X
 !ACEL(2)= Na direção Y
 !ACEL(3)= Na direção Z

ACEL,,,9.81

!Apresentando o Estatoss do Programa

!/STATUS

!Iniciando a Solução

SOLVE
ISE ESCOLHER ESSE VÁ PARA O PÓS-PROC.

!-----
 !-----TORÇÃO-----
 !-----

FINISH
 /SOL

!Aplicando as restrições para ensaio de Torção
 !DK(1)= Nó em que será restringido
 !DK(2)= Tipo de restrição

DK,07,ALL
 DK,16,ALL

!Aplicando forças no meio para ensaio de Torção
 !FK(1)= Nó em que será aplicado a força
 !FK(2)= Direção da força
 !FK(3)= Magnitude da força

FK,04,FZ,-**30**
 FK,13,FZ,**30**

!Aplicando a aceleração da gravidade.
 !ACEL(1)= Na direção X
 !ACEL(2)= Na direção Y
 !ACEL(3)= Na direção Z

ACEL,,,9.81

!Apresentando o Estatoss do Programa

!/STATUS

!Iniciando a Solução

SOLVE
ISE ESCOLHER ESSE VÁ PARA O PÓS-PROC.


```
!-----  
!-----Pós-processamento -----  
!-----
```

```
!Insere os dados de resultado no  
!Pósprocessamento
```

```
/POST1
```

```
!Define o conjunto de dados a ser lido a partir dos  
!resultados
```

```
SET,FIRST
```

```
!-----Tensões-----
```

```
!Plotagem das Tensões  
/EFACET,1
```

```
!Plota os esforços  
PLESOL,S,EQV,1,1.0  
!Lista os esforços  
PRESOL,s,COMP
```

```
!-----Deformações-----
```

```
!Plota os Deslocamentos  
PLNSOL,U,Z,0,1.0  
!Lista os Deslocamentos  
PRNSOL,U
```

IV. Anexo – Dimensões do cilindro Pneumático

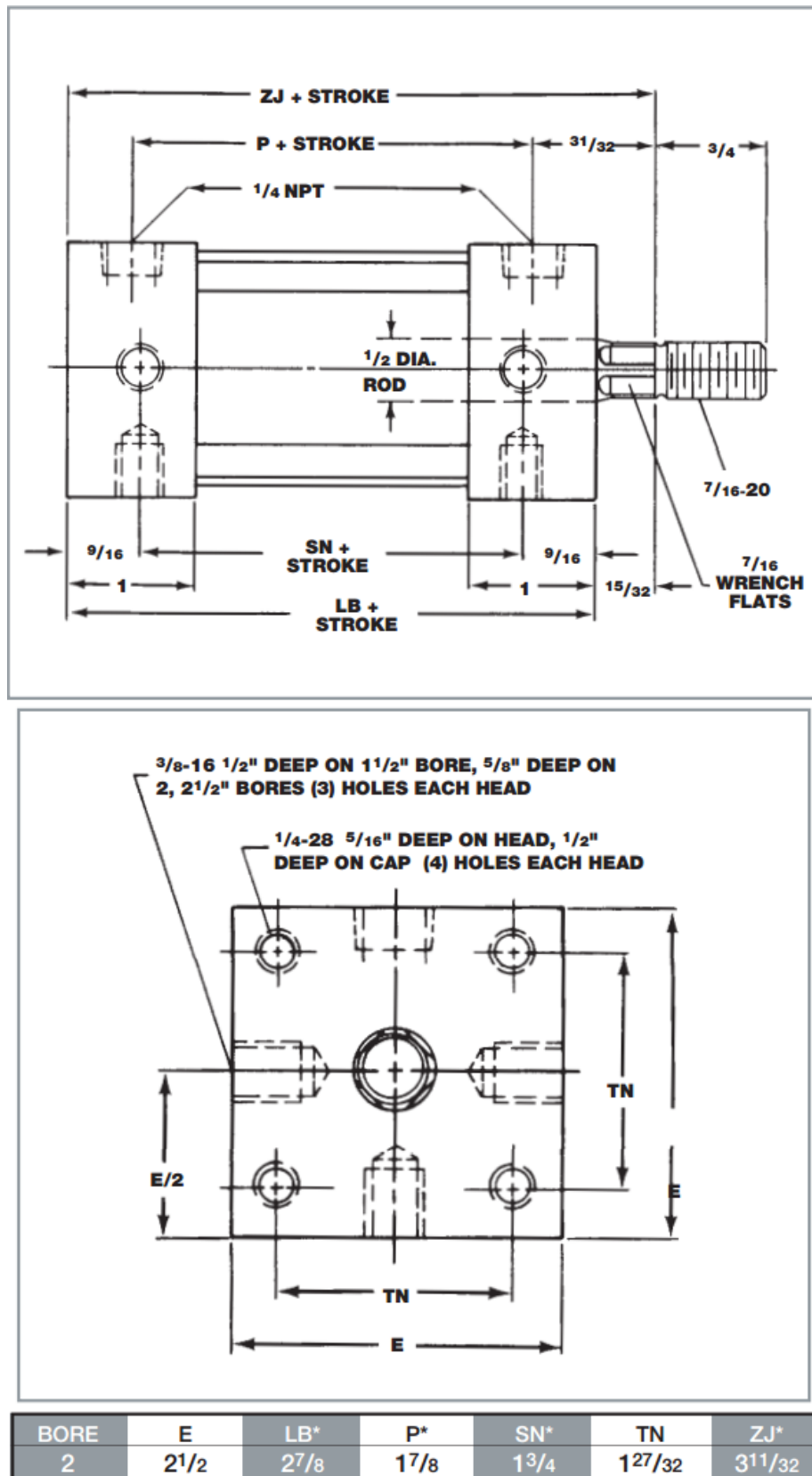
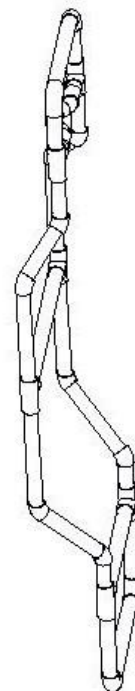
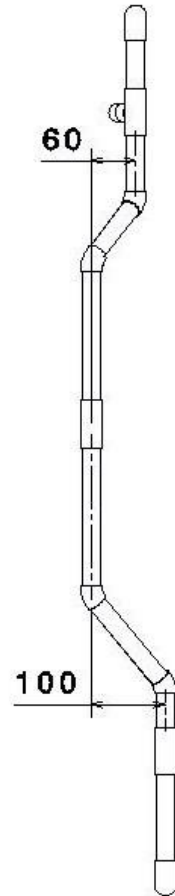
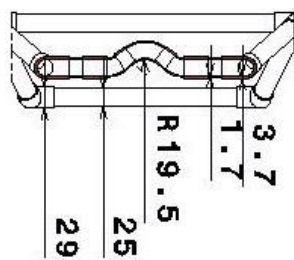
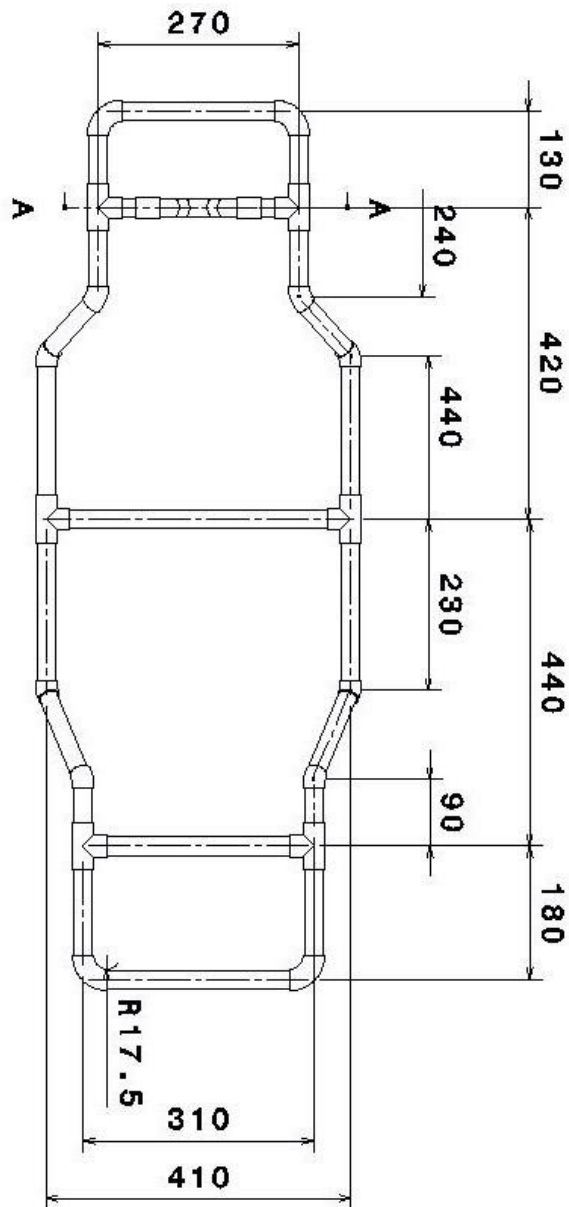


Figura A.4.1 – Dimensões do cilindro pneumático em polegadas. Stroke é uma polegada para o atual modelo. (SHEFFER - Alterada)

VI. Anexo – Cotas do Chassi



VII. Anexo – Cotas da Bancada

