

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS - UFG  
REGIONAL CATALÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO ORGANIZACIONAL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: INOVAÇÃO E TECNOLOGIA.

**Leandro Rodrigues da Silva Souza**

**Desenvolvimento de Estrutura Veicular  
do tipo *Space Frame* Construída com  
Tubos de PVC**

Catalão  
2015



**Leandro Rodrigues da Silva Souza**

**Desenvolvimento de Estrutura Veicular  
do tipo *Space Frame* Construída com  
Tubos de PVC**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Gestão Organizacional da Universidade Federal de Goiás, Regional Catalão como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Gestão Organizacional.

Área de concentração: Inovação, Desenvolvimento e Tecnologia

Orientador: Marcelo Henrique Stoppa

Coorientador: Vaston Gonçalves da Costa

Catalão  
2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Souza, Leandro Rodrigues da Silva  
Desenvolvimento de Estrutura Veicular do Tipo Space Frame  
[manuscrito] / Leandro Rodrigues da Silva Souza. - 2015.  
124 f.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Stoppa; co-orientador Dr.  
Vaston Gonçalves da Costa.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, , Catalão,  
Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional (profissional),  
Catalão, 2015.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Space Frame. 2. Método dos Elementos Finitos. 3. Simulação  
Computacional. 4. Cloreto de Polivinila (PVC). 5. Baixo Custo. I.  
Stoppa, Marcelo Henrique , orient. II. Gonçalves da Costa, Vaston , co  
orient. III. Título.

*Este trabalho é dedicado a minha família, sempre presentes, queridos, aos meus pais Ivonir e Cleide, fonte de ensinamentos, valores, princípios, a minha irmã Izadora pelo companheirismo ao longo dos anos. A minha esposa Daiane, dotada de um coração humilde e sincero e ao meu pequeno filho Matheus, todos fontes de inspiração ímpar.*



---

# Agradecimentos

A Universidade Federal de Goiás, ao programa de Gestão Organizacional pela oportunidade e credibilidade. A Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis.

Ao orientador e amigo Marcelo Henrique Stoppa pelos ensinamentos e conselhos transmitidos ao longo do estudo, ímpares para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Modelagem e Otimização, sempre firmes: Rômulo e Luiz Fernando que forma direta e indireta contribuíram para a realização deste trabalho. Aos demais colegas e amigos do mestrado que fizeram parte da primeira turma do mestrado em gestão organização.

Aqueles que sempre estiveram dispostos a contribuir com o projeto, com ideias, auxiliando nos experimentos: Núbia, Clezidan e Guilherme.

Aos Colegas e Amigos da Mitsubishi Motors LTDA do Brasil, pelo companheirismo, parceria aos longo dos tempos, fruto desta convivência, levo os ensinamentos e opiniões diversas, de um grupo tão seletivo, tanto para a vida pessoal quanto profissional, estas, são diferenciais para a postura em diferentes desafios da caminhada, a todos, minha gratidão, tanto aos presentes na equipe quanto aos já ausentes, em especial a velha guarda, pois, foram tantos os meus mestres. Ao Jeison pelo suporte e compreensão nos momentos de ausência e não menos importante ao Eduardo.

Aos meus pais, Ivonir e Cleide, que fizeram de tudo para que tivesse a oportunidade de estudar, o meu eterno agradecimento. Cabe-me também ressaltar o estímulo e compreensão de minha esposa Daiane e do pequeno filho Matheus, fonte de inspiração, melhores companhias não há.

A **Deus**, pela dádiva da Vida, me gera forças nos momentos de desânimo ou descrença, tem me revelado grandes mestres pelo caminho, proporcionado, momentos ímpares de aprendizado, comoção e alegria ao longo da caminhada.

A todos, Muito Obrigado, Sucesso pela Caminhada !



*Papai... papai... papai.. oia, oia, a ti...*



*"Um viajante que se recusa a atravessar uma ponte até que tenha pessoalmente testado a solidez de cada uma de suas partes não irá muito longe; alguma coisa tem que ser arriscada, mesmo em matemática" Horce Lamb (1849-1934).*



---

## Resumo

Souza, Leandro Rodrigues da Silva **Desenvolvimento de Estrutura Veicular do tipo *Space Frame* Construída com Tubos de PVC**. 124 p. Dissertação de Mestrado – Gestão Organizacional Catalão, Universidade Federal de Goiás, 2015.

Com o intuito de colaborar com o campo da tecnologia e acessibilidade, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma estrutura veicular do tipo *Space Frame*, construída a partir de tubos de policloreto de Vinila (PVC). Para tanto, foram utilizados tubos e conexões de PVC normalmente empregados na construção civil. Os parâmetros essenciais do PVC para a simulação foram obtidos experimentalmente. São realizadas análises de tensões e deformações da estrutura, por meio de simulação computacional, utilizando um solver de Elementos Finitos, propiciando análise do protótipo, sob condições de solicitação a flexão devido a cargas distribuídas sobre as suas regiões.

**Palavras-chave:** Space Frame, Método dos Elementos Finitos, Simulação Computacional, Cloreto de Polivinila (PVC), Baixo Custo.



---

# Abstract

Souza, Leandro Rodrigues da Silva **Structural Analysis by Finite Elements Of Vehicle Chassis Made With PVC Tubes**. 124 p. Master Thesis – Catalão Organizational Management , University of Goias, 2015.

In order to collaborate with technology and accessibility, this work proposes the development of a Space Frame chassis, constructed with polyvinyl Chloride (PVC). To the development were used PVC tubes and fittings, commonly used in civil builders. The essential parameters of the PVC were obtained experimentally and used to simulate the chassis. Along the development, analyses of tension and deformation were made in the proposed structure. Using computer simulation, the finite element analysis could provide the structure behaviour in different scenarios, as bending, tension and deformation.

**Keywords:** Space Frame, Finite Element Method, Computational Simulation, Polyvinyl Chloride, Low Cost.



---

## Lista de ilustrações

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 1  | Dimensões das conexões de PVC. Fonte: (NBR 5648, 2006) . . . . .  | 35 |
| Figura 2  | MConexões Soldáveis (a) Joelho de 90° (b) Joelho de 45° (c) Te. . .   | 36 |
| Figura 3  | Mobiliário de PVC destinado a crianças com disfunções neuromotoras, (a) Cadeira para vaso sanitário, (b) Motoca para banho, (c) Cadeira para banho, (d) Andador Fonte: (VILLARINO; BASTOS, 2007). | 37 |
| Figura 4  | Produtos comercializados via Internet pela <i>American Speedsters</i> que emprega o PVC como componente Estrutural. Fonte: (AMERICANSPEEDSTER, 2014) . . . . .                                    | 38 |
| Figura 5  | Antropometria: Estimativas de comprimentos de partes do corpo sentado, em função da estatura. Fonte: (M; BOSKER, 1979 apud IIDA, 2005) . . . . .  | 40 |
| Figura 6  | Idealização de Forças. Fonte: (HIBBELER, 2011) . . . . .  | 42 |
| Figura 7  | Decomposição da Tensão. . . . .   | 44 |
| Figura 8  | Compressão e Tração como Resultante da Tensão. Fonte: (HIBBELER, 2011) . . . . .  | 45 |
| Figura 9  | Deformação gerada sobre um corpo por uma força qualquer $P$ . Fonte: Adaptado de (PARETO, 2013) . . . . .   | 47 |
| Figura 10 | Componentes cartesianos da deformação. Fonte: (HIBBELER, 2011).   | 48 |
| Figura 11 | Barra submetida à tração (a) e compressão (b), com respectivas formas inicial e final Fonte: (HIBBELER, 2011) . . . . .   | 48 |
| Figura 12 | Deformação de um corpo por Flexão diante de uma força. Fonte: (PARETO, 2013) . . . . .  | 48 |
| Figura 13 | Deformação gerada por Torque de um corpo força. Fonte: (PARETO, 2013) . . . . .   | 50 |
| Figura 14 | Diagrama tensão x deformação. Fonte: (GERE, 2013). . . . .  | 51 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 15 | Diagrama tensão x deformação para materiais poliméricos. Fonte: (CALLISTERJR.; RETHWISCH, 2012). . . . .   | 52 |
| Figura 16 | Variação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura. Fonte: (WASILKOSKI, 2006, p. 46). . . . .   | 53 |
| Figura 17 | Comportamento deformação do PVC em corpo de prova sob solicitação de tração. . . . .   | 54 |
| Figura 18 | Transferência de calor em um corpo polimérico a partir de sua superfície. Fonte: (WASILKOSKI, 2006). . . . .   | 55 |
| Figura 19 | Tube rompido após uso do dispositivo de aprisionamento em ensaio de tração (a) vista frontal, da região de rompimento, (b) vista lateral, com o dispositivo de tração, (c) vista lateral da região de rompimento   | 60 |
| Figura 20 | Dimensões do gabarito utilizado para confecção dos corpos de prova.  | 61 |
| Figura 21 | Especificações das Dimensões dos Corpos de Prova segundo Norma (ASTM D638-10, 2010). Fonte: (ASTM D638-10, 2010), adptado . . . . .  | 62 |
| Figura 22 | Lâminas de PVC extraída do tubo Corpos de prova produzido com auxílio de uma matriz . . . . .  | 62 |
| Figura 23 | Corpos de prova produzidos a partir dos tubos de 50 mm de PVC com auxílio do gabarito. . . . .   | 63 |
| Figura 24 | Tubos de PVC em ensaio de flexão em bi-Apoio Simples em sua deflexão máxima e retorno após retirada a Força. (a) carga concentrada com conexão, flexão máxima (a) carga concentrada com conexão, retorno (b) carga distribuída, flexão máxima (b')carga distribuída com conexão, retorno (c) carga distribuída, flexão máxima (c') carga distribuída, retorno. . . . .                                     | 66 |
| Figura 25 | Corpos de Prova ensaiados com Espuma e Fita Silver Tape <sup>®</sup> em ensaio de flexão com carga concentrada em bi-Apoio Simples em sua deflexão máxima e retorno após retirada a Força. (d) carga distribuída com espuma, flexão máxima, (d') carga distribuída com espuma, retorno, (e) carga distribuída com espuma e fita, flexão máxima, (e') carga distribuída com espuma e fita, retorno. . . . . | 67 |
| Figura 26 | Variação do Módulo de Elasticidade obtido experimentalmente na Flexão de acordo com o material adotado. . . . .  | 69 |
| Figura 27 | Etapas principais no processo de análise através do Método de Elementos Finitos (MEF). Fonte: Adaptado de (RAOUFI, 2013, p. 5) .   | 73 |
| Figura 28 | Primeiro protótipo proposto para a estrutura projetada em maquete LEGO <sup>®</sup> . . . . .  | 80 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Figura 29 | Vistas do protótipo em <i>Computer Aided Design</i> (CAD), com as conexões e tubos hidráulicos: (a) perspectiva, (b) superior, (c) lateral, (d) traseira, (e) frontal. . . . .   | 81  |
| Figura 30 | Carro de golfe para dois ocupantes. Fonte: (DINIS, 1996) . . . . .   | 82  |
| Figura 31 | Deslocamento máximo do tubo sob carregamento distribuído x variação do comprimento do tubo obtido via simulação computacional. . . . .   | 84  |
| Figura 32 | Representação das condições de contorno do ensaio experimental realizadas via simulação computacional empregando MEF. . . . .  | 86  |
| Figura 33 | Elementos triangular linear e elemento triangular parabólico utilizados na geração das malhas em modo <i>Draft eHigh</i> . Fonte: (SILVA, 2010) . . . . .  | 86  |
| Figura 34 | Deslocamento devido variação do tamanho do elemento da malha sob força constante. . . . .  | 88  |
| Figura 35 | Simulação computacional do deslocamento máximo em flexão. . . . .  | 89  |
| Figura 36 | Análise estática da estrutura inicial sob carregamento distribuído (região do banco e frontal superior). . . . .   | 90  |
| Figura 37 | Segundo protótipo proposto segundo dimensões das NBR's (a) vista Lateral, (b) Vista Superior, (c) Vista Isométrica. . . . .  | 91  |
| Figura 38 | Terceiro protótipo proposto(a) vista Lateral, (b) Vista Superior, (c) Vista Isométrica em amarelo reforços adicionado. . . . .   | 92  |
| Figura 39 | Terceiro protótipo sob carregamento frontal, sobre o banco e na parte traseira.(a) Vista Isométrica, (b) Vista Lateral, (c) Vista Superior. . . . .  | 93  |
| Figura 40 | Quarto protótipo (a) vista Lateral, (b) Vista Superior, (c) Vista Isométrica. . . . .  | 94  |
| Figura 41 | Regiões de carregamento nas cores: vermelho (frontal), em azul (banco) e amarelo (traseira). . . . .   | 95  |
| Figura 42 | Regiões de maior deformação representada nas cores: Amarela - Travessa Frontal 1 ( $T_{F1}$ ), Vermelho - Travessa Frontal ( $T_{F2}$ ), Azul - Travessa Frontal do Banco ( $T_{B1}$ ) e Preto - Travessa Superior 1 ( $T_{S1}$ ). . . . . | 96  |
| Figura 43 | Configuração de Torção:(a) Traseira (b) Frontal. . . . .   | 97  |
| Figura 44 | Deformações máximas para o caso $Cc$ na configuração $Cc_{c1}$ com força aplicada por elemento. . . . .  | 99  |
| Figura 45 | Deformações máximas para $Cc$ na configuração $Cc_{c2}$ com força aplicada por elemento. . . . .   | 99  |
| Figura 46 | Regiões de Carregamento Frontal (a) $Cc_{c1}$ , (b) $Cc_{c2}$ . . . . .  | 100 |
| Figura 47 | Deformações máximas $Cc$ na configuração $Cc_{c3}$ com força aplicada por elemento. . . . .  | 100 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Figura 48 | Comparativo na intensidade da deformação para as configurações $Cc_{c1}$ - Simulação 1, $Cc_{c2}$ Simulação 2, $Cc_{c3}$ Simulação 3. . . . .   | 101 |
| Figura 49 | Deslocamento Máximo Aplicando $FDr$ . . . . .   | 101 |
| Figura 50 | Tensão Máxima:(a) $Cc_{c1}$ e (b) $Cc_{c2}$ . . . . .   | 102 |
| Figura 51 | Detalhe da região de tensão máxima para $Cc$ e $Cc_{c2}$ . . . . .  | 103 |
| Figura 52 | Tensão Máxima Observada no $Cc$ com $T_{F3}$ sendo a força aplicada de forma distribuída (a) Vista Superior (b) Vista Lateral (c) Vista Isométrica . . . . .                              | 104 |
| Figura 53 | Deformação máxima na torção frontal estando a estrutural com carregamento frontal . . . . .   | 105 |
| Figura 54 | Deformação máxima na torção frontal estando a estrutural sem carregamento frontal . . . . .   | 106 |
| Figura 55 | Região acima do limite de escoamento na tensão de vonMises na configuração de torção frontal estando a estrutura carregada. . . . .   | 107 |
| Figura 56 | Região acima do limite de escoamento na tensão de vonMises na configuração de torção traseira estando a estrutura carregada. . . . .  | 107 |
| Figura 57 | Fator de Segurança na Torção Frontal $Cc_{c1}$ . . . . .  | 108 |
| Figura 58 | Fator de Segurança na Torção Traseira $Cc_{c1}$ . . . . .   | 108 |
| Figura 59 | Diagrama Tensão x Deformação corpos de prova sem conexões em Ensaio de flexão bi-apoio simples sob carga distribuída. . . . .   | 117 |
| Figura 60 | Diagrama dos corpos de prova com conexões em Ensaio de flexão bi-apoio simples sob carga distribuída. . . . .   | 118 |
| Figura 61 | Diagrama dos corpos de prova em Ensaio de flexão de tubo de PVC em bi-apoio simples com o tubo sob Carga Concentrada . . . . .  | 119 |
| Figura 62 | Diagrama Tensão x Deformação corpos de prova em bi-apoio simples Recheados de Espuma Expansiva sob Carga Concentrada . . . . .  | 120 |
| Figura 63 | Diagrama dos corpos de prova em Ensaio de flexão de tubo de PVC em bi-apoio simples, tubo preenchido com espuma expansível envolto por Fita Silver Tape <sup>®</sup> em espiral . . . . . | 121 |
| Figura 64 | Principais medidas da vista lateral. . . . .  | 124 |
| Figura 65 | Principais medidas da vista superior . . . . .  | 124 |

---

## Lista de tabelas

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabela 1  | Dimensões dos Tubos de PVC. Fonte: (NBR 5648, 2006) . . . . .  | 34 |
| Tabela 2  | Dimensões das conexões de PVC para diferentes diâmetros de Tubo.<br>Fonte: (NBR 5648, 2006) . . . . .                                      | 35 |
| Tabela 3  | Dimensões de assentos utilizados no projeto, segundo as normas<br>NBR 13962 (2006) e NBR 14006 (2008). Fonte: (SOUZA <i>et al.</i> , 2010) | 39 |
| Tabela 4  | Desvio médio da sessão retangular das amostras geradas com o ga-<br>barito proposto. . . . .   | 63 |
| Tabela 5  | Variação do peso médio na adoção de outros materiais como reforço<br>estrutural. . . . .   | 68 |
| Tabela 6  | Tipos de Contatos de Componentes. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA,<br>2013). . . . .   | 74 |
| Tabela 7  | Acessórios de Fixação Padrão. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA, 2013).  | 74 |
| Tabela 8  | Acessórios de Fixação Avançados. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA,<br>2013). . . . .  | 75 |
| Tabela 9  | Acessórios de Fixação Avançado. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA,<br>2013). . . . .   | 75 |
| Tabela 10 | Tipos de forças externas padrão. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA,<br>2013). . . . .  | 76 |
| Tabela 11 | Tipos de forças externas avançadas. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA,<br>2013). . . . .   | 77 |
| Tabela 12 | Dimensões expressos em cm para as dimensões do modelo apresen-<br>tado por (DINIS, 1996). . . . .  | 81 |
| Tabela 13 | Resultados experimentais obtidos em ensaios de flexão. . . . .   | 85 |
| Tabela 14 | Parâmetros dos materiais utilizados na simulação. Fonte: SolidWorks <sup>©</sup><br>(2014) e o Autor. . . . .                              | 85 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tabela 15 | Resultados obtidos com elementos em modo <i>Draft</i> utilizando a definição do material obtida experimentalmente. . . . .   | 87  |
| Tabela 16 | Resultados obtidos com elementos em modo <i>High</i> utilizando a definição de material obtida em ensaio experimental . . . . .  | 87  |
| Tabela 17 | Valores Obtidos no Ensaio de Flexão de tubo de PVC em bi-apoio simples com o tubo preenchido com espuma expansível envolto por Fita Silver Tape <sup>®</sup> em espiral. . . . . | 122 |
| Tabela 18 | Discriminação dos valores e materiais utilizados na construção da estrutura empregando tubo de 50 mm. . . . .  | 123 |
| Tabela 19 | Discriminação dos valores e materiais utilizados na construção da estrutura empregando tubo de 32 mm. . . . .  | 123 |

---

## Lista de siglas

**ABNT** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ASTM** *American Society Testing and Material*

**CAD** *Computer Aided Design*

**CAE** *Computer Aided Engineering*

**CGS** Unidade de Medida em Centímetro, Grama e Segundo

**COSMOS** *Software* utilizado para Método de Elementos Finitos

**DORT** Distúrbio Osteomusculares Relacionado ao Trabalho

**FOS** Fator de Segurança

**IPS** Unidade de Medida em Polegada, Libra e Segundo

**LMEst** Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis

**LER** Lesões por Esforços Repetitivos

**MEF** Método de Elementos Finitos

**MTS** *Mechanical Testing Machine*

**MKS** Unidade de Medida em Metro, Kilo e Segundo

**MMGS** Unidade de Medida em Milímetro, Grama e Segundo

**NBR** Norma Brasileira

**PVC** Cloreto de Polivinila

**PTFE** Politetrafluoretileno ou Teflon

**PVC-U** *Unplasticised Polyvinyl Chloride*

**SolidWorks** Software de Desenho CAD/CAM/CAE que integra outras ferramentas

**UV** Ultra Violeta

**UFU** Universidade Federal de Uberlândia

---

## Lista de símbolos

|                     |   |
|---------------------|---|
| $\Delta A$          | Variação da Área  |
| $\Delta F$          | Variação de uma Força                                     |
| $\Delta_{s'}$       | Comprimento Final do Material                             |
| $\Delta_s$          | Comprimento Inicial do Material                           |
| $\epsilon_{long}$   | Deformação Longitudinal                                   |
| $\epsilon_{med}$    | Deformação normal média                                   |
| $\epsilon_{trans}$  | Deformação Transversal                                    |
| $\gamma$            | Deformação por cisalhamento                               |
| $\gamma_{nt}$       | Deformação por cisalhamento associada aos eixos $n$ e $t$ |
| $\sigma$            | Tensão  |
| $\sigma_{admin}$    | Tensão Admissível   |
| $\sigma_{limite}$   | Tensão Limite Definida                                    |
| $\sigma_{rup}$      | Tensão de Ruptura   |
| $\sigma_{vonMises}$ | Tensão de Von Mises                                       |
| $\tau$              | Força de Cisalhamento                                     |
| $\tau$              | Força de Cisalhamento                                     |
| $\tau_{admin}$      | Força de Cisalhamento Admissível                          |
| $\tau_{rup}$        | Força de Cisalhamento na Ruptura                          |

|             |   |
|-------------|---|
| $\tau_{zx}$ | Tensão de Cisalhamento no plano $zx$  |
| $\tau_{zy}$ | Tensão de Cisalhamento no plano $zy$  |
| $\nu$       | Coefficiente de Poisson   |
| $Cc$        | Caso de utilização para carregamento da estrutura   |
| $Cc_{c1}$   | Caso de Carregamento na configuração com carregamento frontal até a segunda travessa e carga traseira     |
| $Cc_{c2}$   | Caso de Carregamento na configuração com carregamento frontal até a primeira travessa e carga traseira    |
| $Cc_{c3}$   | Caso de Carregamento na configuração com carregamento frontal até a segunda travessa e sem carga traseira |
| $Ct$        | Caso de utilização na ocorrência de torção da estrutura   |
| $Ct_{cf}$   | Cenário de Torção frontal da estrutura  |
| $Ct_{ct}$   | Cenário de Torção traseira da estrutura   |
| $E$         | Módulo de Elasticidade  |
| $e_1$       | Espessura mínima para a parede em uma conexão de PVC  |
| $e_2$       | Espessura mínima para a parede da bolsa lisa em uma conexão de PVC  |
| $F$         | Força   |
| $f$         | Flecha Máxima   |
| $F_{De}$    | Força aplicada distribuída por elemento   |
| $F_{Dr}$    | Força aplicada distribuída por região   |
| $F_{lim}$   | Força média Limite  |
| $GPa$       | Giga Pascal   |
| $J$         | Momento de Inércia  |
| $Kg$        | Kilogramas  |
| $kN$        | Kilo Newton   |
| $KPa$       | Unidade de medida de pressão Kilopascal   |
| $L$         | Comprimento   |

|          |   |
|----------|---|
| $Mf$     | Momento Fletor  |
| $ml$     | Mililitro   |
| $MPa$    | Mega Pascal   |
| $P_b$    | Profundidade mínima da bolsa em uma conexão de PVC        |
| $T^n$    | Força de Superfície                                       |
| $T_{B1}$ | Travessa Frontal do Banco                                 |
| $T_{F1}$ | Travessa Frontal 1 / Primeira Travessa Frontal            |
| $T_{F2}$ | Travessa Frontal 2 / Segunda Travessa Frontal             |
| $T_{S1}$ | Travessa Superior   |
| $Tf$     | Tensão de Flexão  |
| $W$      | Distância da Linha Neutra à Superfície do Corpos de Prova |
| $W$      | Resistência da Sessão Transversal                         |
| ©        | Trabalho Original Reprodução sujeita a Direitos de Autor  |
| ®        | Marca Registrada  |
| °C       | Graus Celsius   |



---

# Sumário

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>  | <b>29</b> |
| 1.1      | Motivação e Contextualização . . . . .   | 29        |
| 1.2      | Objetivos . . . . .  | 30        |
| 1.2.1    | Objetivos Gerais . . . . .   | 30        |
| 1.2.2    | Objetivos Específicos . . . . .  | 31        |
| 1.3      | Organização do Trabalho . . . . .  | 31        |
| <b>2</b> | <b>Características do PVC e Aplicações Como Componente Estrutural</b>            | <b>32</b> |
| 2.1      | Policloreto de Vinila (PVC) . . . . .  | 32        |
| 2.2      | Especificação dos Tubos Soldáveis de PVC . . . . .                               | 33        |
| 2.3      | Utilização do PVC como Componente Estrutural . . . . .                           | 36        |
| 2.4      | Levantamento das Dimensões da Estrutura Segundo Parâmetros Ergonômicos . . . . . | 37        |
| <b>3</b> | <b>Comportamento Mecânico dos Polímeros</b>                                      | <b>41</b> |
| 3.1      | Materiais Poliméricos . . . . .  | 41        |
| 3.2      | Tensão . . . . .   | 42        |
| 3.3      | Deformação e Classes de Esforços . . . . .                                       | 46        |
| 3.4      | Diagrama tensão-deformação . . . . .   | 51        |
| 3.5      | Degradação Térmica . . . . .   | 54        |
| 3.6      | Espuma de Polímeros . . . . .  | 56        |
| <b>4</b> | <b>Ensaio Experimentais para levantamento de Parâmetros</b>                      | <b>58</b> |
| 4.1      | Ensaio de Tração e Flexão . . . . .  | 58        |
| 4.2      | Confecção de Corpos de Prova para Ensaio de Tração . . . . .                     | 59        |
| 4.3      | Confecção Corpos de Prova para Ensaio de Flexão . . . . .                        | 64        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.4      | Ensaio de Flexão Corpos de Prova em Bi-Apoio Simples . . . . .  | 65         |
| <b>5</b> | <b>Solid Works<sup>®</sup> <i>Computer Aided Engineering</i> (CAE) e Suas Peculiaridades na Simulação</b> | <b>70</b>  |
| 5.1      | <i>O Software SolidWorks<sup>®</sup> Simulation</i> . . . . .   | 70         |
| 5.2      | Etapas no Processamento das Ferramentas CAE para simulação empregando o método MEF . . . . .              | 71         |
| 5.3      | Principais Recursos e suas Aplicações Implementados do SolidWorks <sup>®</sup> Simulation . . . . .       | 72         |
| 5.4      | Malha seus Elementos e Aplicações . . . . .   | 76         |
| 5.5      | Tensão Equivalente de Von Mises . . . . .   | 78         |
| 5.6      | Análise dos Resultados . . . . .  | 79         |
| <b>6</b> | <b>Protótipo e Resultados</b>   | <b>80</b>  |
| 6.1      | Proposta Inicial da Estrutura . . . . .   | 80         |
| 6.2      | Especificações do Chassi em PVC . . . . .   | 82         |
| 6.3      | Comportamento do Comprimento do Tubo sob Flexão . . . . .   | 83         |
| 6.4      | Especificação e Refinamento da Malha . . . . .  | 84         |
| 6.5      | Desenvolvimento Ajustes e Validações Preliminares dos Protótipos . . . . .                                | 89         |
| 6.5.1    | Primeiro Protótipo e Suas Principais Características . . . . .  | 89         |
| 6.5.2    | Segundo Protótipo e Suas Principais Características . . . . .   | 90         |
| 6.5.3    | Terceiro Protótipo e Suas Principais Características . . . . .  | 91         |
| 6.5.4    | Quarto Protótipo e Suas Principais Características . . . . .  | 93         |
| 6.6      | Definição dos Casos de Simulação e Condições de Contorno Consideradas                                     | 94         |
| 6.7      | Análise da Estrutura diante de Carregamento . . . . .   | 98         |
| 6.8      | Análise de Torção Estrutural . . . . .  | 102        |
|          | <b>Conclusão e Sugestão de Trabalhos Futuros</b>  | <b>109</b> |
|          | <b>Referências</b>  | <b>111</b> |
|          | <b>Apêndices</b>  | <b>115</b> |
| .1       | Flexão do Corpo de Prova sem Conexões em Bi-Apoio Simples sob Carga Distribuída . . . . .                 | 117        |
| .2       | Flexão do Corpo de Prova com Conexões em Bi-Apoio Simples sob Carga Distribuída . . . . .                 | 118        |
| .3       | Flexão do Corpo de Prova com Conexões em Bi-Apoio Simples sob carga Concentrada . . . . .                 | 119        |

|                   |   |            |
|-------------------|---|------------|
| .4                | Flexão do Corpo de Prova Preenchido com Espuma Expansiva em Bi-Apoio Simples com o tubo em Bi-Apoio Simples sob Carga Distribuída               | 120        |
| .5                | Flexão do Corpo de Prova Recheado de espuma expansiva envolvido por Fita Silver Tape <sup>®</sup> em Bi-Apoio Simples sob Carga Distribuída . . | 121        |
| <b>APÊNDICE A</b> | <b>Custo médio para construção da estrutura</b>   | <b>122</b> |
| <b>APÊNDICE B</b> | <b>Principais Dimensões da Estrutura Proposta</b>   | <b>124</b> |



---

# Introdução

## 1.1 Motivação e Contextualização

A necessidade de se locomover de um local geográfico para outro é constante no atual estilo de vida do homem. A locomoção pode ser realizada de forma coletiva ou individual e por diferentes meios, seja por terra, água ou ar. Desse modo, os meios de transporte são concebidos conforme sua utilidade e a confecção destes demandam diferentes tecnologias, objetivando facilitar a locomoção do homem.

Dentre os meios de transporte, o terrestre possui o maior número de veículos em sua frota. Além de ser o mais comum ao homem, na maioria das vezes, os custos de aquisição ou mesmo de utilização são elevados, fator devido principalmente aos materiais ou tecnologias empregados em sua confecção, limitando a sua acessibilidade.

Das diversas partes constituintes de um veículo automotor, a estrutura é uma das mais importantes, tanto por suportar uma certa quantidade de carga, quanto por impactar a segurança, o conforto ergonômico e a forma do veículo, ou mesmo por ser o principal suporte aos demais sistemas do veículo como transmissão, motor dentre outras partes.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o estudo de uma estrutura tipo *Space Frame*, projetada para um veículo automotor de baixo custo, utilizando materiais acessíveis e de comum aplicação na construção civil, haja vista que o componente estrutural em veículos automotores hoje, em geral, é confeccionado utilizando ligas de aço, por conta de sua rigidez estrutural, projetada para veículos de diferentes finalidades como veículos de carga, transporte coletivo, competições ou passeio.

Uma estrutura de chassi veicular do tipo monobloco é utilizada na maioria dos veículos de passeio, sendo sua estrutura dotada de regiões reforçadas para suportar diferentes tipos de esforços (OLIVEIRA, 2007). Dentre suas características está a formação por peça única, soldada ou prensada, onde a carroceria é integrada ao chassi que especifica de forma geral, o tipo do veículo (CHANDRA; SREENIVASULU; HUSSAIN,

2012).

Além destes aspectos, a fabricação de um chassi monobloco demanda altos custos com ferramentais, moldes e máquinas de estampagem, inviabilizando sua produção em escala em quantidade inferior a cem mil veículos por ano (OLIVEIRA, 2007) .

Nos carros populares é comum a fabricação do tipo monobloco devido à facilidade para fabricação em serie, porém a sua implantação tem custo elevado. Por outro lado, o tipo *Space Frame* tem custo de implementação fabril reduzido, porém sem condições de produção em grande escala.

Neste contexto, é apresentada uma nova configuração diferente da usual aplicando um material que não é considerado entre os clássicos na produção veicular, o presente trabalho propõe o desenvolvimento do protótipo de um chassi *space frame* empregando tubos de PVC.

Para tanto, será empregado como material base, tubos de Policloreto de Vinila (PVC) para a construção da estrutura de um veículo a ser utilizado em pequenas distâncias e destinado ao transporte de cargas leves.

Dada que a utilização do PVC não é usual no cenário proposto, é necessária a determinação de parâmetros sob solicitações externas. Assim, são realizados experimentos reais de tração, flexão utilizando o PVC em diferentes cenários empregando tubos e conexões.

Os experimentos são realizados de modo a mensurar as propriedades do material, para ser empregado posteriormente em posterior simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) de modo a avaliar o comportamento do protótipo do chassi.

A gaiola tubular proposta é destinada à locomoção de duas pessoas, sentadas lado a lado, cujas dimensões foram adotadas segundo parâmetros ergonômicos buscando a segurança e o conforto de seus ocupantes.

É realizada a simulação de cenários estáticos, via elementos finitos, de modo a permitir identificar regiões que necessitem de reforço estrutural na gaiola priorizando segurança em virtude de uma análise do comportamento estrutural do protótipo sob os carregamentos considerados.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um chassi do tipo *Space Frame* ou também conhecido como gaiola, tubular de PVC (tubos e conexões utilizados na construção civil) de modo que o mesmo suporte uma carga mínima previamente especificada, diante de simulação estrutural pelo método de elementos finitos.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

- ❑ Propor uma gaiola tubular, confeccionada com tubos de PVC comumente utilizados na construção civil para instalações hidráulicas prediais;
- ❑ Definir a configuração estrutural para a estrutura da gaiola tubular considerando fatores ergonômicos;
- ❑ Realizar análise estática para a estrutura proposta, avaliando tensões e deformações oriundas de solicitações externas;
- ❑ Especificar os limites de carga para a estrutura;
- ❑ Avaliar o comportamento estrutural da gaiola tubular, empregando simulação estática, determinando relações ou restrições via experimentação utilizando simulações computacionais;

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- ❑ No Capítulo 1 são apresentados os objetivos gerais, específicos e contextualização do trabalho.
- ❑ No Capítulo 2 é realizada uma abordagem geral sobre o PVC e características dos tubos e conexões de PVC.
- ❑ No Capítulo 3, são apresentados os principais conceitos e propriedades do ponto de vista da ciência dos materiais ou do comportamento mecânico do material que limitam ou especificam a utilização dos tubos de PVC ao presente estudo.
- ❑ No Capítulo 4, é descrito o aparato experimental para determinação de parâmetros do PVC, bem como os resultados obtidos.
- ❑ No Capítulo 5, são exibidos os principais conceitos relacionados ao Método de Elementos Finitos empregados nas simulações.
- ❑ No Capítulo 6, são descritos os conceitos da ferramenta *Computer Aided Engineering* (CAE) utilizada, o SolidWorks<sup>®</sup> Simulation com consequente realização de uma abordagem geral dos recursos e funcionalidades disponíveis no Software.
- ❑ No Capítulo 7, são apresentados os protótipos propostos e sua evoluções.
- ❑ No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões e propostas de continuidade.

---

# Características do PVC e Aplicações Como Componente Estrutural

## 2.1 Policloreto de Vinila (PVC)

O material base para a confecção da estrutura é o PVC que historicamente, teve sua comercialização de forma expressiva durante a Segunda Guerra Mundial, principalmente, para fins militares. Produzido comercialmente nas décadas de 1920 a 1930 na Alemanha e Estados Unidos, especificamente no Brasil passou a ser fabricado em 1954 pelas Indústrias Químicas Materazzo (FORINI, 2008).

A principal utilização do PVC no mercado brasileiro é na construção civil na forma de tubos e conexões, além, de utilizado na confecção de pisos, forros, janelas e também na indústria automobilística. Dentre os processos de transformação do PVC a extrusão possui a maior representatividade dentre as técnicas empregadas em sua transformação (JR.; MEI, 2007).

No processo de fabricação do PVC parte dos insumos são provenientes do sal marinho ou da terra (salgema). Componentes considerados de grande abundância na natureza, geralmente colaboram com 57% da composição do PVC os 43% restante dos insumos têm como origem o petróleo. Existem alternativas que visam substituir o petróleo por cana-de-açúcar transformando o PVC em um material ecologicamente sustentável (JR.; NUNES; ORMANJI, 2006).

O PVC é um polímero composto por macromoléculas de origem natural ou sintética obtidas por reações químicas de polimerização, que geram estruturas moleculares a partir da repetição de pequenas unidades, chamadas meros, que do grego a palavra polímeros significa *poli* = vários e *meros* = partes. Desse modo, as características pertinentes às pequenas partes constituintes das macromoléculas determinam as propriedades mecânicas do material (JR.; NUNES; ORMANJI, 2006).

É importante salientar que as características físicas do PVC que conferem propri-

idades relevantes ao material permitem classificá-lo como um polímero termoplástico, ou seja, fica flexível sob o aumento de temperatura e ou pressão, e quando cessadas as solicitações, volta a se enrijecer (JR.; NUNES; ORMANJI, 2006) permitindo múltiplas conformações.

Estas características peculiares do PVC corroboram para que o mesmo seja passível de reciclagem, sendo possível seu reaproveitamento e a geração de diversos produtos, tais como: canos, sifões, eletrodutos, painéis, caixas, dentre outros. Outro aspecto relevante deste material é que sua vida útil pode ultrapassar 40 anos, dependendo da aplicação e das condições em que foi fabricado (PIVA; NETO; WIEBECK, 1999).

O PVC é um polímero considerado de baixo custo, quando comparado a outros polímeros projetados para finalidades específicas, tais como, suportar calor ou mesmo grandes esforços mecânicos. Desta feita, os tubos de PVC têm sido largamente utilizados na construção civil, devido à resistência mecânica geralmente aceitável para tubulações hidráulicas e ao baixo custo, quando comparado ao de outros materiais (GONÇALVES; M.ALMEIDA; NETO, 2001).

Os tubos de PVC, especialmente, podem ser fabricados segundo um grande número de técnicas que conferem ou alteram diversas propriedades relacionadas ao PVC, dentre elas, as propriedades mecânicas. O emprego da orientação molecular dos tubos de PVC é uma das técnicas que auxiliam na obtenção de tubos com propriedades mecânicas peculiares, tais como, elevada resistência à tração e ao impacto, que pode ser maior que a dos tubos convencionais de PVC (MEDEIROS; WIEBECK, 2013).

Dentre os tubos empregados na construção civil, existem os destinados à alta pressão interna de serviço, que possuem a resistência mecânica ampliada, estes tubos possuem classificações específicas a medida que a resistência mecânica é elevada.

Existem tubos fabricados em PVC que possuem maior resistência mecânica, conseqüente maior custo. Assim, no presente trabalho serão utilizados tubos destinados à baixa pressão, soldáveis, de utilização na construção civil, portanto, de baixo custo e de fácil aquisição, quando comparados às demais possibilidades e tecnologias existentes no mercado empregando PVC.

## 2.2 Especificação dos Tubos Soldáveis de PVC

A utilização dos tubos de PVC como componentes base para a estrutura veicular, geraram algumas questões que precisaram ser avaliadas. Dentre estas, como aumentar a rigidez da estrutura, utilizando reforço estrutural sob às cargas especificadas para a estrutura.

Neste contexto, para a análise do comportamento mecânico da estrutura foi realizada a simulação computacional, via elementos finitos, de modo a comportamento o

comportamento da estrutura sob solicitações externas de carga, avaliando a necessidade de reforços estruturais ou mesmo identificar possíveis restrições à sua utilização ou carregamentos.

Vale salientar, além dos fatores mencionados anteriormente, a forma geométrica do chassi possui restrições diante do limitado número de arranjos geométricos das conexões de PVC comercializadas no Brasil.

Esta restrição geométrica não acontece para estruturas confeccionadas com tubos de aço ou outro material que possa ser moldado, apresentando maior liberdade geométrica, o que não ocorre com as conexões de PVC.

Em outros países, o sistema de padronização vigente não é o da Norma Brasileira (Norma Brasileira (NBR)), existe uma variada gama de conexões além das comumente encontradas no mercado Brasileiro. Estas conexões, como as produzidas para fabricação de móveis, possuem formas geométricas específicas, muitas vezes patenteadas que possibilitam uma maior flexibilidade na construção dos arranjos geométricos utilizando tubos de PVC.

Para a escolha do tubo foram realizadas simulações estáticas de flexão utilizando tubos de PVC rígido nos diâmetros de 25 mm, 32 mm, 40 mm e 50 mm, que suportam pressão de serviço de até 750 KPa fabricados segundo a norma (NBR 5648, 2006). É observada uma acentuada flexão para os tubos de menores diâmetros, fato esperado devido à espessura da parede dos tubos de maior diâmetro ser mais grossa que os tubos de menores diâmetros, o que pode ser visualizado na Tab.(1).

Tabela 1 – Dimensões dos Tubos de PVC. Fonte: (NBR 5648, 2006)

| Diâmetro nominal<br>DN | Diâmetro externo<br>DE | Diâmetro externo médio<br>mm |            | Espessura da parede<br>mm |            |
|------------------------|------------------------|------------------------------|------------|---------------------------|------------|
|                        |                        | $d_{em}$                     | Tolerância | $e$                       | Tolerância |
| 15                     | 20                     | 20,0                         | + 0,2      | 1,5                       | +0,3       |
| 20                     | 25                     | 25,0                         |            | 1,7                       |            |
| 25                     | 32                     | 32,0                         |            | 2,1                       | +0,4       |
| 32                     | 40                     | 40,0                         |            | 2,4                       |            |
| 40                     | 50                     | 50,0                         |            | 3,0                       |            |
| 50                     | 60                     | 60,0                         |            | 3,3                       | +0,5       |
| 65                     | 75                     | 75,0                         | + 0,3      | 4,2                       | +0,6       |
| 75                     | 85                     | 85,0                         |            | 4,7                       |            |
| 100                    | 110                    | 110,0                        |            |                           | 6,1        |

Segundo a norma NBR 5648 (2006) a fabricação de tubos soldáveis destinados a água fria, as conexões devem seguir uma especificação quanto a espessura mínima da parede da bolsa lisa ( $e_1$ ) espessura mínima de parede no corpo ( $e_2$ ) e profundidade

mínima da bolsa  $p$  que é representado pela Fig.(1) as variações quanto ao tamanho das conexões são apresentadas na Tab. (2).

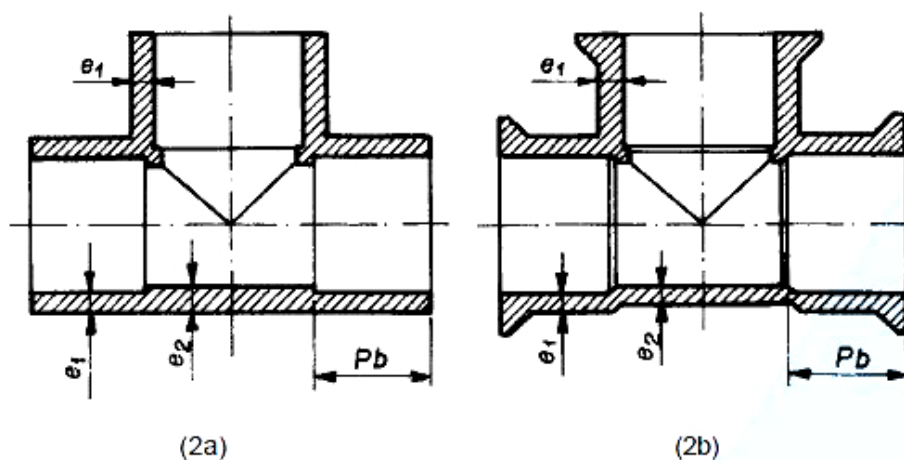


Figura 1 – Dimensões das conexões de PVC. Fonte: (NBR 5648, 2006)

Tabela 2 – Dimensões das conexões de PVC para diferentes diâmetros de Tubo. Fonte: (NBR 5648, 2006)

| Diâmetro externo<br>DE | Espessura mínima<br>de parede da bolsa<br>mm | Espessura mínima<br>de parede do corpo<br>mm | Profundidade mínima<br>de bolsa<br>mm |
|------------------------|--|--|---------------------------------------|
|                        | (e1)   | (e2)   | (Pb)                                  |
| 20                     | 2,4  | 3,0  | 16,0                                  |
| 25                     | 2,6  | 3,2  | 18,5                                  |
| 32                     | 2,9  | 3,6  | 22,0                                  |
| 40                     | 3,2  | 4,0  | 26,0                                  |
| 50                     | 3,6  | 4,5  | 31,0                                  |
| 60                     | 3,9  | 4,9  | 36,0                                  |
| 75                     | 5,2  | 6,5  | 43,5                                  |
| 85                     | 5,5  | 6,9  | 48,5                                  |
| 110                    | 6,0  | 7,5  | 61,0                                  |

Outro aspecto relevante que limita a utilização do tubo como componente estrutural é a quantidade limitada de conexões que permitem a mudança de ângulo entre uma projeção do tubo, que são ilustradas na Fig.(2). A conexão do tipo cruzeta, não é listada abaixo devido ao seu difícil acesso para todas as dimensões de tubo, alguns dos principais fabricantes de tubo no Brasil já não fabricam este tipo de conexão, o que torna a aquisição mais fácil para tubos de 50 mm de diâmetro ou superior.

Assim, considerando o custo superior ao das demais conexões na maioria das comparações, que chega a ser mais que o dobro em relação aos outros tipos de conexões,

os protótipos utilizam apenas conexões do tipo joelhos de 45°, 90° e conexões do tipo T.



Figura 2 – MConexões Soldáveis (a) Joelho de 90° (b) Joelho de 45° (c) Te.

## 2.3 Utilização do PVC como Componente Estrutural

Os tubos de PVC vem sendo utilizados em diferentes situações como componente estrutural, devido ao baixo custo e facilidade de aquisição. Têm sido empregados em projetos de reabilitação física, neurológica, auxílio a locomoção, o PVC é utilizado por ser um material de baixo custo, facilidade na regulagem, manuseio, transporte e higienização das peças produzidas com o material. A Fig.(3) apresenta parte do mobiliário produzido com tubos e conexões de PVC (VILLARINO; BASTOS, 2007).

Outra proposta que utiliza o PVC de alta densidade como componente estrutural para cadeiras destinadas a crianças, fabricação de móveis, ou meio de locomoção é sugerido pelo site *American Speedster* que comercializa projeto de carros de PVC pela Internet. A Fig. (4) apresenta alguns produtos vendidos pela empresa.

Todos os projetos comercializados pela *American Speedster* necessitam de itens adicionais para confecção do protótipo, componentes metálicos, tubos de ferro e madeira são empregados na base da estrutura de modo a aumentar a sua rigidez.

Outra característica de diversos projetos encontrados na Internet é a utilização de conexões de formatos proprietários, conexões multi-angular ou poligonal que não são encontradas no mercado brasileiro, as quais possuem ângulos e desenhos diferenciados, proporcionando uma maior liberdade nos ângulos e configuração geométrica do projeto.

A proposta do presente trabalho se diferencia dos projetos mencionados anteriormente, pois não serão empregados reforços metálicos ou de madeira de modo a aumentar a rigidez da estrutura, além do mais, serão utilizadas apenas três tipos de conexões o que demanda um projeto específico e peculiar de modo a permitir o arranjo geométrico da estrutura.

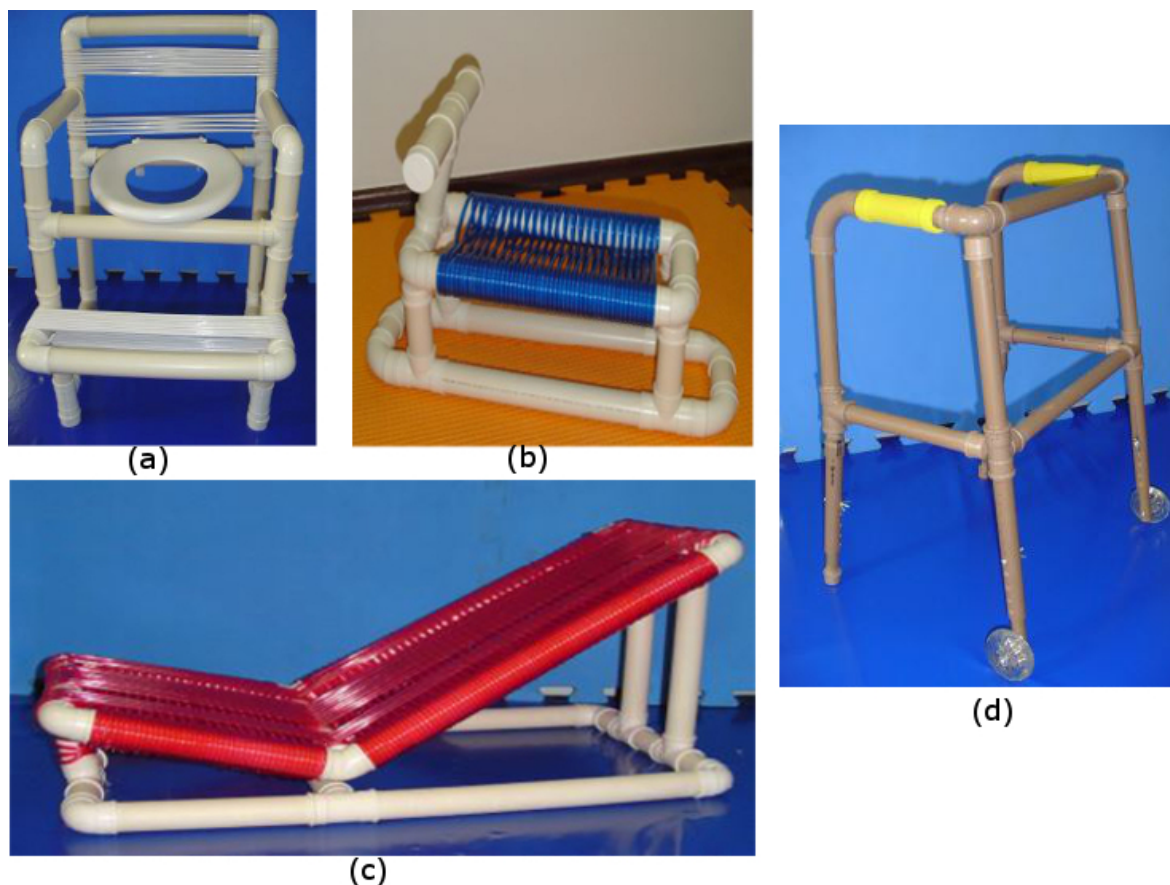


Figura 3 – Mobiliário de PVC destinado a crianças com disfunções neuromotoras, (a) Cadeira para vaso sanitário, (b) Motoca para banho, (c) Cadeira para banho, (d) Andador Fonte: (VILLARINO; BASTOS, 2007).

## 2.4 Levantamento das Dimensões da Estrutura Segundo Parâmetros Ergonômicos

A adoção dos parâmetros ergonômicos é interessante, pois segundo Filho (2004), a percepção de uma informação pelos órgãos dos sentidos (visão, audição, paladar, olfato, tato, cinestésico) de um indivíduo, pode estar passível de ruídos (interferências, distorções, contaminações) as quais, podem gerar distorções na interpretação dos resultados por parte dos órgãos dos sentidos, tais como, problemas de ordem transitórias, stress, transtornos psicológicos ou mesmo problemas definitivos, como, Distúrbio Osteomusculares Relacionado ao Trabalho (DORT) (Distúrbio Osteomusculares Relacionado ao Trabalho), Lesões por Esforços Repetitivos (LER) (Lesões por Esforços Repetitivos) para tanto são utilizados meios para eliminar ou reduzir a atenuação ou a origem dos ruídos, neste contexto, significando tudo aquilo que pode interferir na percepção adequada do indivíduo.



Figura 4 – Produtos comercializados via Internet pela *American Speedsters* que emprega o PVC como componente Estrutural. Fonte: (AMERICANSPEEDSTER, 2014)

A ergonomia, pode colaborar gerando melhorias, adequação ou adaptação de objeto aos seres vivos, uma vez que o homem possui capacidades, habilidades e limitações, estes fatores quando levados em consideração no projeto de uma máquina, equipamentos, postos de trabalho, auxiliam na segurança, conforto ou mesmo na eficácia do uso, dentre outros, conseqüentemente, pode melhorar a produtividade (FILHO, 2004).

Vários são os campos de atuação da ergonomia, especialmente um projeto que considere especificações ergonômicas emprega a ergonomia projetual, segundo Filho (2004). Deve levar em conta vários parâmetros, dentre eles, a definição do usuário (criança, adulto, idoso), as características e peculiaridades de cada tipo de usuário e seu biótipo.

Segundo Filho (2004) dentre as fontes de informações utilizadas para o estudo ergonômico está a Antropometria, ciência que estuda as medidas do corpo humano. Afim de estabelecer diferenças e proporções entre as medidas dos indivíduos de um dado grupo, as informações são geradas por meio da amostragem.

Serão adotados para o desenvolvimento dos protótipos as medidas segundo a norma (NBR 13962, 2006) que regulamenta a fabricação de cadeiras e prevê a utilização diária de 8 horas para pessoas de até 110 kg com altura entre 1.51, 1.92 metros e a norma (NBR 14006, 2008), que regulamenta a fabricação de mobílias escolar, são comparadas quanto as suas especificações nas dimensões do assento. A Tab.(3) apresenta uma comparação entre as principais medidas de interesse.

Tabela 3 – Dimensões de assentos utilizados no projeto, segundo as normas NBR 13962 (2006) e NBR 14006 (2008). Fonte: (SOUZA *et al.*, 2010)

| Normas - NBR | Dimensões   |      |              |               |                       |      |                        |      |              |                          |                            |      |              |              |             |                |
|--------------|-------------|------|--------------|---------------|-----------------------|------|------------------------|------|--------------|--------------------------|----------------------------|------|--------------|--------------|-------------|----------------|
|              | Assento     |      |              |               |                       |      | Encosto                |      |              |                          |                            |      | Apóia-Braços |              |             |                |
|              | Altura (cm) |      | Largura (cm) | Profund. (cm) | Ângulo Inclinação (°) |      | Extensão Vertical (cm) |      | Largura (cm) | Ângulo de Inclinação (°) | Ângulo Assento Encosto (°) |      | Altura (cm)  | Largura (cm) | Compr. (cm) | Distância (cm) |
|              | Min.        | Máx. |              |               | Min.                  | Máx. | Min.                   | Máx. |              |                          | Min.                       | Máx. | Min.         | Máx.         |             |                |
| 13962        | 42          | 50   | 40           | 38            | 0                     | 7    | 36                     | 30   | 15           | -                        | -                          | 20   | 25           | 4            | 20          | 46             |
| *14006       | 42          |      | 39           | 38            | 2                     | 4    | 33                     | 36   | 35           | -                        | 95                         | 106  | -            | -            | -           | -              |

Para as medidas que não são abordadas pelas nas normas (NBR 13962, 2006) e (NBR 14006, 2008) tais como a altura do cotovelo, altura esperada para a barra de direção, dentre outras medidas são adotadas referências antropométricas a Fig. (2.4) (M; BOSKER, 1979 apud IIDA, 2005) representa as medidas em relação a altura de um indivíduo.

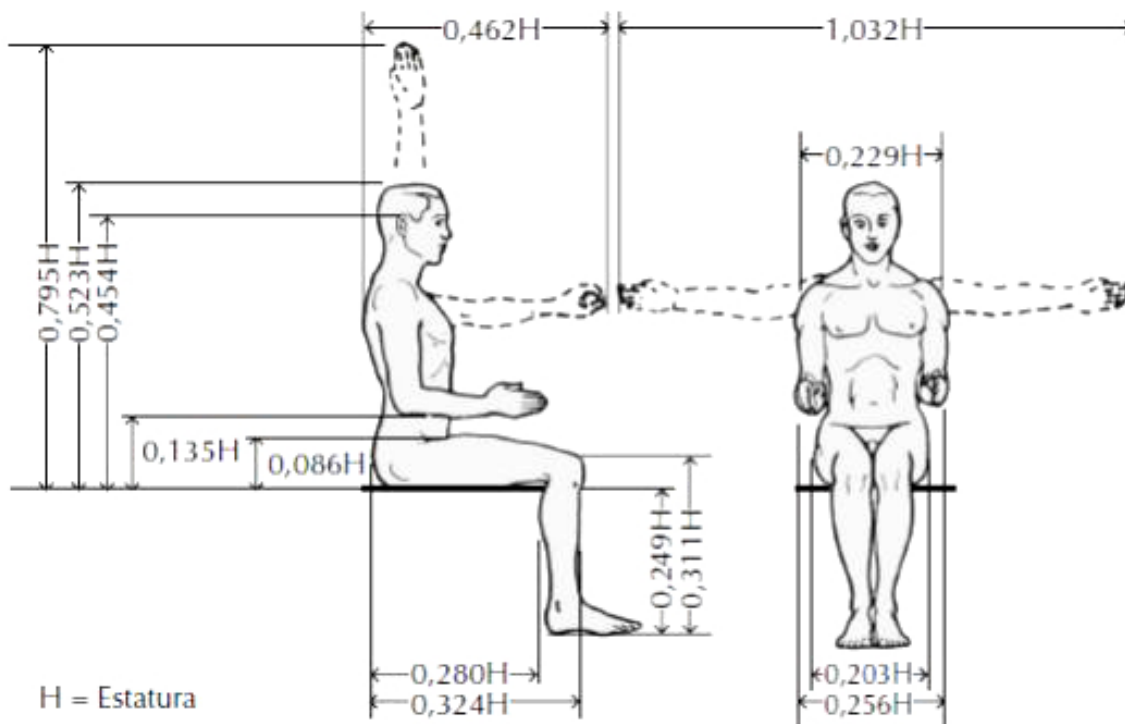


Figura 5 – Antropometria: Estimativas de comprimentos de partes do corpo sentado, em função da estatura. Fonte: (M; BOSKER, 1979 apud IIDA, 2005)

---

# Comportamento Mecânico dos Polímeros

A mecânica dos corpos deformáveis, também conhecida como mecânica dos materiais ou mecânica dos sólidos é estudada pela resistência dos materiais, área que pesquisa a relação entre as forças externas, internas e deformações de um sólido (HIBBELER, 2011) .

O comportamento mecânico de cada material possui grande importância na identificação de riscos associados à deformação ou ruptura de um material. Diante disso, são necessárias a compreensão e a determinação das propriedades dos materiais (HIBBELER, 2011).

Neste contexto, este capítulo apresenta os conceitos que restringem a utilização do PVC como componente base para desenvolvimento de um chassi tubular. Discutindo os conceitos relacionados ao comportamento mecânico e as principais propriedades dos materiais.

## 3.1 Materiais Poliméricos

As propriedades mecânicas dos materiais determinam qual a capacidade que o material tem para transmitir ou resistir a esforços que lhe são aplicados (HIBBELER, 2011).

Dentre elas o módulo de elasticidade ou módulo de *Young* o qual representa a rigidez de um material sólido, propriedade está que pode sofrer variações, tanto relacionadas ao processo, quanto aos insumos aplicados em sua fabricação.

Tais propriedades possibilitam ao material a capacidade de resistir ou manter macro características físicas, tais como, suas dimensões diante da ação de esforços. Sendo a elasticidade a capacidade do material de se deformar quando submetido a um esforço e de retornar ao estado inicial quando cessado o esforço.

Dentre os aspectos relacionados a fabricação, composição química ou tecnologias empregadas na confecção dos polímeros como, por exemplo, influência do peso molecular, adição de estabilizantes, plastificantes, dentre outros, geralmente exerce influência na resistência mecânica.

No entanto, como os tubos e conexões de PVC já possuem tais propriedades mecânicas definidas para o material, as particularidades do/ou relacionadas ao processo de fabricação e materiais empregados na confecção dos tubos e conexões de PVC não serão abordadas no presente trabalho.

## 3.2 Tensão

Para entender o conceito de tensão é preciso discorrer sobre a interação das componentes de força e momentos de forças atuantes sobre um dado corpo na presença de uma carga externa. As cargas externas geram cargas resultantes internas ao corpo, e aqui serão abordadas sucintamente, as relações entre forças e resultantes sobre o corpo para posterior análise sobre a tensão e suas componentes.

Um corpo sólido deformável pode ser submetido a vários tipos de cargas externas; todavia, qualquer um dos tipos de cargas pode ser classificado como uma força, sendo de superfície quando ocorre apenas contato entre corpos já a força de corpo é desenvolvida quando um corpo exerce força sobre o outro corpo, sem contato físico direto entre os corpos (HIBBELER, 2011). A Fig.(6) ilustra os tipos de carga a que um corpo pode estar submetido.

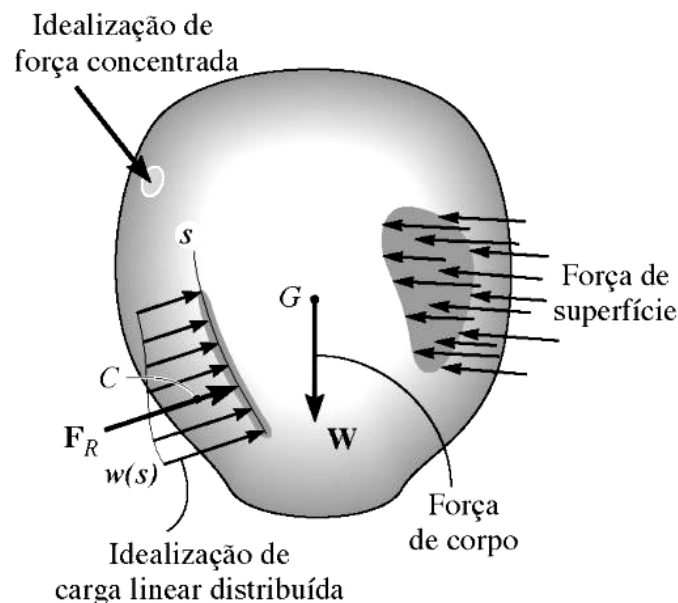


Figura 6 – Idealização de Forças. Fonte: (HIBBELER, 2011)

Sendo que a força de superfície é gerada pelo contato direto de um corpo com a superfície de outro corpo ela é distribuída pela área de interação entre estes corpos. Caso a área de contato seja considerada pequena em relação à área total da superfície de um corpo, a força de superfície é idealizada como uma força concentrada, aplicada a um único ponto do corpo, todavia, se é aplicada ao longo de uma área estreita, ela é idealizada como uma carga distribuída linear (HIBBELER, 2011).

As forças de superfície geram forças de reação tanto na área de contato entre as superfícies quanto na área de apoio dos corpos, quando estas forças colaboram para impedir a translação ou rotação de um corpo, o processo é denominado equilíbrio de forças, podendo ser mensurado dentro ou fora dos corpos onde a componente resultante da força e o somatório dos momentos de forças se anulam (BEER F. P.; JOHNSTON, 1995).

Os efeitos resultantes da distribuição de força sobre um corpo geram a distribuição da carga interna ao corpo, sendo que, para mensurar a carga interna, são adotadas algumas premissas: o material é contínuo na distribuição da matéria e coeso em todas suas partes constituintes sem trincas ou separações. Tais premissas permitem realizar a discretização matemática necessária na distribuição das forças atuantes sobre as partes constituintes de um corpo (HIBBELER, 2011).

Vale salientar que, nos experimentos realizados neste trabalho, é aplicada tanto força concentrada, quanto força distribuída sobre o tubo, com e sem o emprego de conexões.

Segundo (KIM, 2011, p. 15) , a intensidade ou módulo que a força de superfície  $T^n$  atua em um ponto P é definida como sendo a força  $\Delta F$  que atua sobre uma pequena área  $\Delta A$ , o que é definido pela Eq. (3.1). Como  $T^n$  é um vetor, que pode ser definido conforme Eq. (3.2).

$$T^n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (3.1)$$

$$T^n = T_x i + T_y j + T_z k \quad (3.2)$$

Portanto, a tensão, representada pela letra grega sigma ( $\sigma$ ), pode ser entendida como o quociente obtido a partir de uma força distribuída pela área de uma dada seção. A tensão pode ser decomposta em várias componentes conforme representada pela Eq. (3.3) segundo o plano e componente de atuação da força. A tensão normal é definida pela força que atua de forma perpendicular à área  $\Delta A$ , o que pode ser representado pela Eq. (3.3).

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (3.3)$$

Quando a força atua de forma tangente ou paralela à área de fixação ou apoio do corpo, este está sujeito a um esforço de cisalhamento que tende a deslizar as seções

compreendidas entre a fixação e a força (PARETO, 2013) à área  $\Delta A$ , é possível obter a tensão de cisalhamento, definida pelas Eq. (3.4) e (3.5), que representam a orientação do sentido da força segundo o plano em que a força é aplicada.

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (3.4)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (3.5)$$

Onde  $\tau_{zx}$  e  $\tau_{zy}$  representam as tensões de cisalhamento atuantes nos planos  $z$  nas direções  $x$  e  $y$ .

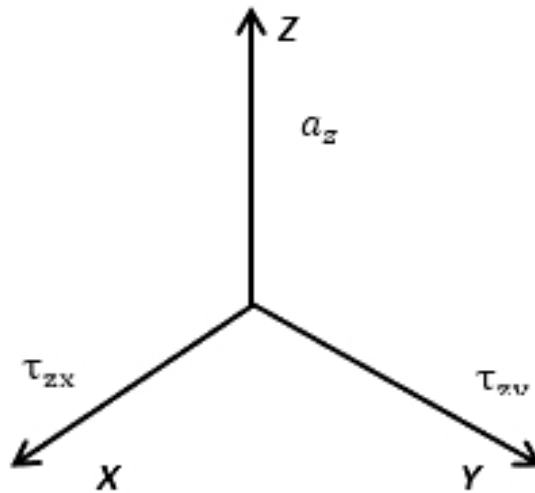


Figura 7 – Decomposição da Tensão.

Ao se considerar uma barra submetida a uma deformação longitudinal uniforme constante, sua tensão normal média na área de seção transversal é dada pela soma das forças Eq. (3.7) que agem em toda a área da seção transversal Eq. (3.8), sendo seu valor numérico mensurado ainda segundo o valor da força aplicada pela área Eq. (3.9).

$$F_R z = \sum F z \quad (3.6)$$

$$\int d_F = \int_a \sigma dA \quad (3.7)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.8)$$

Onde:

- $\sigma$  é a tensão normal média em qualquer ponto da área da seção transversal;
- $A$  é a área de seção transversal;

Sendo a área de seção transversal  $A$  de um tubo dada pela Eq. (3.9):

$$A = \Pi \frac{(D_e^2 - D_f^2)}{4} \quad (3.9)$$

Onde:

- $D_e$  diâmetro externo do tubo;
- $D_f$  diâmetro interno do tubo;

Quando um sistema de forças atua sobre um corpo, o efeito produzido pode gerar resultados diferentes segundo o sentido, direção e ponto de aplicação da força, gerando esforços normais ou axiais que, conseqüentemente, altera a análise da tensão sobre o material em estudo.

A tensão a que um corpo pode ser submetido pode ser de compressão ou tração, sendo que a primeira ocorre quando as forças atuantes agem na mesma direção e sentidos opostos apontando para o interior do corpo, gerando a tensão compressiva, e a tração ocorre quando as forças tem mesmo sentido, entretanto, apontando para o exterior do corpo, que é submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo. Estas situações podem ser visualizadas na Fig.(8).

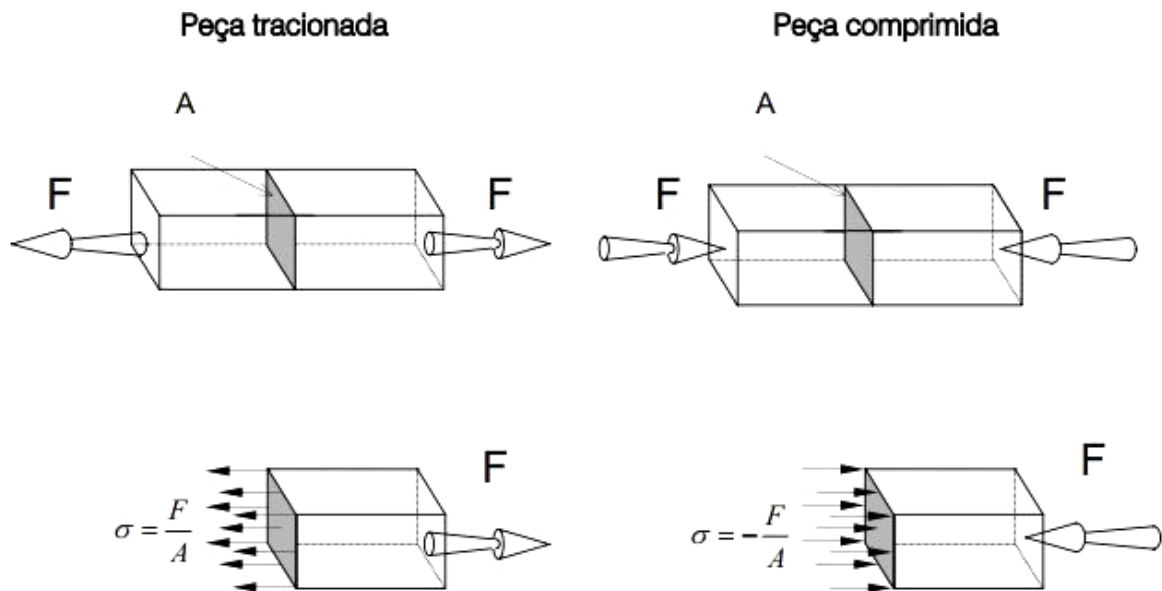


Figura 8 – Compressão e Tração como Resultante da Tensão. Fonte: (HIBBELER, 2011)

Segundo Hibbeler (2011), em projetos estruturais é interessante restringir a tensão atuante sobre um corpo a um nível seguro suportada pelo elemento constituinte do corpo, sendo que a tensão aplicada deve ser menor que a tensão admissível.

O método utilizado para especificar a carga admissível é o valor numérico, conhecido como fator de segurança ( $F_S$ ), também chamada de carga de ruptura ou resistência à ruptura, dado pela razão entre a carga que ocasiona fratura em um teste de tensão, pela carga ou tensão considerada segura também chamada de carga admissível, assim, quanto maior o fator de segurança menor esforço de tensão o material será submetido.

O fator de segurança é um número maior que 1 sendo os valores específicos dependente do tipo de material e da aplicação da estrutura ou máquina, podendo seu número ser mensurado matematicamente a partir da tensão conforme representado pela Eq. (3.11), pela força Eq. (3.12) ou mesmo a partir da força de cisalhamento Eq. (3.13).

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Resistência real}}{\text{Resistência Exigida}} \quad (3.10)$$

$$F_S = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{admin}} \quad (3.11)$$

ou

$$FS = \frac{F_{rup}}{F_{admin}} \quad (3.12)$$

ou

$$FS = \frac{\tau_{rup}}{\tau_{admin}} \quad (3.13)$$

### 3.3 Deformação e Classes de Esforços

Quando uma força é aplicada sobre um corpo sólido, tende a mudar sua forma ou o tamanho, essas mudanças são chamadas deformações. Muitas vezes as deformações podem ser visíveis, sem necessidade de equipamentos específicos para mensurar a deformação.

A deformação pode ser compreendida com o resultado de uma força  $P$  que atua sobre um corpo. Esta força pode ser decomposta em uma força  $P_n$  perpendicular à superfície, força  $P_t$  tangente, produzindo diferentes deformações sobre o corpo. A Fig.(9) ilustra a ação de uma força e suas resultantes sobre um corpo.

A deformação relativa pode ser expressa pela Eq. (3.14).

$$\epsilon_{med} = \frac{\Delta_{s'} - \Delta_s}{\Delta_s} \quad \text{ou} \quad \Delta_{s'} = (1 + \epsilon_{med}) * \Delta_s \quad (3.14)$$

Onde:

- $\Delta_s$  - Representa o comprimento inicial do material
- $\Delta_{s'}$  - Representa o comprimento final do material

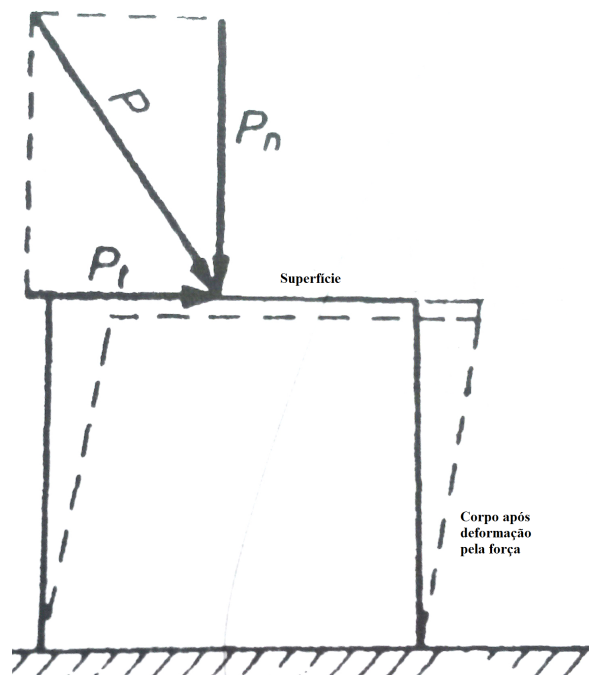


Figura 9 – Deformação gerada sobre um corpo por uma força qualquer  $P$ . Fonte: Adaptado de (PARETO, 2013)

Sendo que: Se  $\epsilon_{med} > 0$  a reta inicial alonga-se; Se  $\epsilon_{med} < 0$  a reta inicial contrai-se;

Uma força que atua sobre um corpo produz diferentes efeitos, dependentes da direção, sentido, ponto de aplicação da força, dentre outros, o que fundamentalmente gera esforços de tração, compressão, flexão, cisalhamento e torção, onde os três primeiros são normais e os dois últimos transversais ao ponto de aplicação da força (PARETO, 2013).

A deformação normal expressa a relação do comprimento, representando o alongamento ou a contração de um segmento de reta, enquanto que a deformação por cisalhamento representa a variação angular entre dois segmentos de reta perpendiculares entre si, assim, a deformação normal causa uma mudança em um segmento de reta gerando o alongamento ou contração, a Fig.(10) representa as mudanças geradas em um elemento retangular.

As medições quanto a deformação, quando obtidas de forma experimental, comumente são realizadas por meio de um extensômetro. Quando um corpo deformável é submetido a uma força de tração axial ele se deforma gerando o alongamento em seu comprimento e se contrai lateralmente, provocando uma mudança em seu comprimento e na sessão transversal, o que pode ser observado na Fig.(11).

Um outro tipo de deformação, denominada flexão, é gerada quando uma força paralela é aplicada á seção de fixação do corpo, há uma tendência de curvatura devido ao esforço de flexão, o que é ilustrado na Fig.(12).

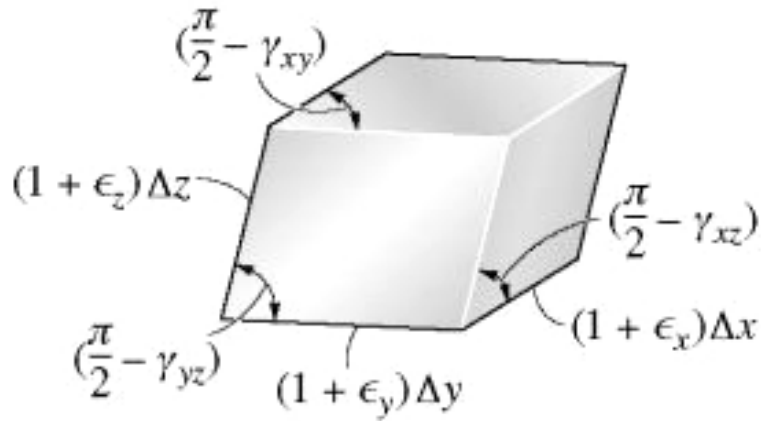


Figura 10 – Componentes cartesianos da deformação. Fonte: (HIBBELER, 2011).

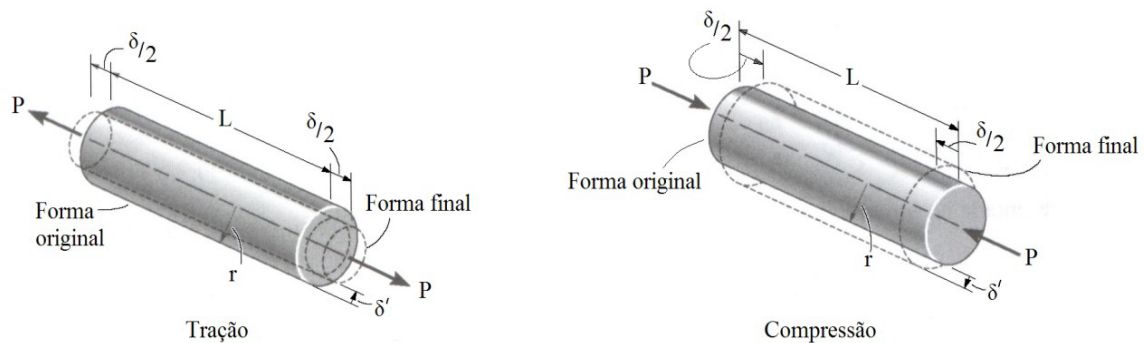


Figura 11 – Barra submetida à tração (a) e compressão (b), com respectivas formas inicial e final. Fonte: (HIBBELER, 2011)

A deformação por encurvamento de um corpo também é chamada de flexão lateral, corpos de grande comprimento, de seção pequena necessitam de uma força menor para que haja flambagem (PARETO, 2013).

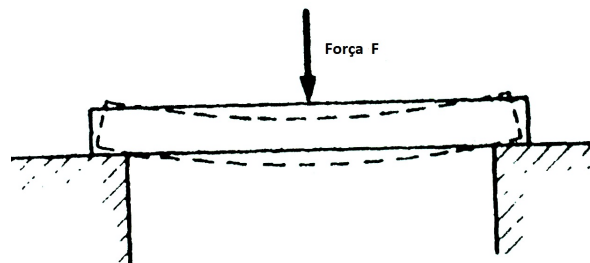


Figura 12 – Deformação de um corpo por Flexão diante de uma força. Fonte: (PARETO, 2013)

A flexão é provocada por uma força transversal do corpo o que gera o momento fletor, seu calculo pode realizado pode ser realizado de acordo com a Eq. (3.15)

considerando que a força é aplicada ao meio de uma sessão transversal.

$$Mf = \frac{F}{2} \cdot x \cdot \frac{L}{2} \Rightarrow \frac{FL}{4} \quad (3.15)$$

Além do momento é possível mensurar numericamente a tensão de flexão, para tanto precisamos calcular o momento de inércia, especificamente para corpos de sessão circular é dado pela Eq. (3.18):

$$J = \frac{\Pi D^4}{64} \quad (3.16)$$

Outro parâmetro necessário nos cálculos é o módulo de resistência da sessão transversal representado por  $W$ , que é a medida de resistência em relação a um momento e seu valor é obtido dividindo o momento de inércia pela distância da linha neutra à superfície do corpo de prova ( $c$ ).

$$W = \frac{J}{c} \quad (3.17)$$

A tensão de flexão pode ser calculada por:

$$Tf = \frac{Mf}{W} \quad (3.18)$$

Já flecha máxima para uma viga bi-apoiada pode ser calculada segundo a Eq. (3.19), devendo se atentar para o módulo de elasticidade  $E$  para materiais dúcteis ou frágeis é considerada a força obtida no limite de elasticidade enquanto que para materiais frágeis considera-se a força registrada no limite de ruptura.

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{FL^3}{EI} \quad (3.19)$$

Dessa maneira o módulo de elasticidade pode ser dado ela Eq. (3.20)

$$E = \frac{1}{48} \cdot \frac{FL^3}{fxj} \quad (3.20)$$

Outro tipo de esforço que pode, induzir a deformação é o torque que é produzida por uma força paralela à sessão de fixação que passa pelo eixo do corpo, gerando um momento de rotação que tende a gerar uma força helicoidal paralela ao eixo do corpo o que é ilustrado pela Fig.(13) (PARETO, 2013).

A relação entre as deformações axial e longitudinal Eqs. (3.21) e (3.22) é definida pelo Coeficiente de Poisson uma constante relativa a cada material expressa pela Eq. (3.23).

$$\epsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \quad (3.21)$$

Onde:

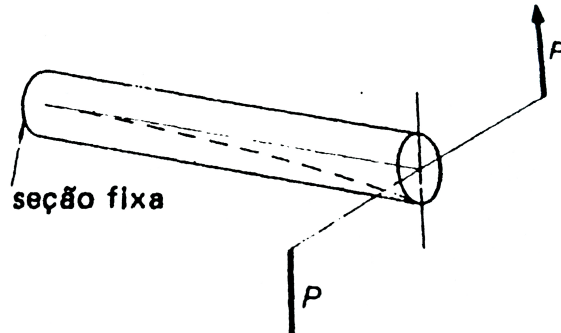


Figura 13 – Deformação gerada por Torque de um corpo força. Fonte: (PARETO, 2013)

- $\delta$  e  $\delta'$  a variação da dimensão longitudinal;
- $L$  e  $L'$  São as dimensões iniciais,
- $\epsilon_{long}$  e  $\epsilon_{trans}$  São as deformações, ambas respectivamente, longitudinais e transversal;

$$\epsilon_{trans} = \frac{\delta'}{L} \quad (3.22)$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}} \quad (3.23)$$

Os tubo de PVC pode sofrer variações em sua forma ou dimensão, diante de um carregamento é de interesse a compreensão de quais os componentes da estrutura tubular proposta sofrerá deformação e qual a sua intensidade, uma vez que o excesso desta numa dada região, como o banco, por exemplo, poderá comprometer ou limitar a sua utilização.

Dentre as deformações observadas a fluência é o acréscimo de deformação onde um corpo é submetido a um carregamento constante por um longo período de tempo. Geralmente a fluência é um fenômeno indesejável que compromete a vida útil de um dado objeto, pois se manifesta com a redução progressiva da tensão o que pode diminuir o tempo de vida ou gerar a ruptura do material. Este tipo de fenômeno pode ser observado em todos os tipos de materiais polímeros.

A deformação gerada pela fluência é dependente da estrutura molecular que compõe o sólido, com frequência dependente da temperatura e do carregamento aplicado sobre o material. A fluência pode ser representada a partir da relação que expressa a deformação em função do tempo.

A fluência observada em materiais poliméricos pode gerar deformações além de seu limite de escoamento atingindo um estágio irrecuperável. É uma propriedade que deve ser observada no presente estudo, principalmente, por limitar a utilização do projeto de um chassi do tipo *Space Frame* utilizando o PVC como componente estrutural.

Como uma força externa de longa duração pode ampliar o valor da fluência a níveis inadequados para a estrutura, é recomendável que a força empregada sobre a estrutura não seja permanente, o que contribui para aumentar a vida útil do chassi.

### 3.4 Diagrama tensão-deformação

A relação entre o comportamento da tensão e a deformação pode ser expressa em forma de diagrama, sendo que, para cada tipo de material, há um dado comportamento. O diagrama de tensão e deformação Fig.(14) exhibe as fases que expressam o comportamento do material, desde o início da aplicação da tensão até a fase em que o material se rompe sob a uma tensão específica imediatamente antes de romper chamada tensão de ruptura.

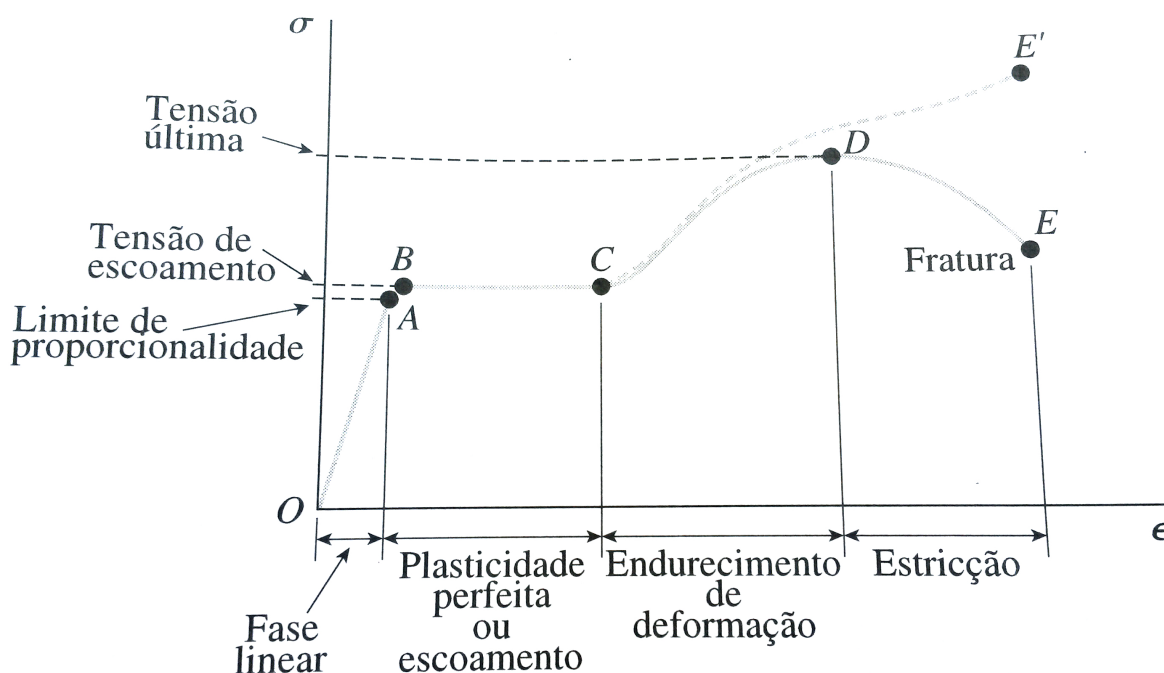


Figura 14 – Diagrama tensão x deformação. Fonte: (GERE, 2013).

Avaliando as fases de deformação de um corpo, conforme exibido na Fig.(14) é possível observar diversas fases no diagrama de tensão e deformação. Na primeira

fase ocorre à deformação elástica ou deformação reversível, ou seja, retirada a força, o material retorna às suas dimensões originais.

A deformação plástica é a fase em que o material se deforma de forma irreversível, mesmo quando retirada a carga sobre o material, este não recupera suas dimensões e formas originais. Esta fase se inicia logo que o limite de deformação elástica é atingido, comportamento que pode ser observado no diagrama de tensão da Fig.(14). Ao ultrapassar o limite de deformação elástica é observado o estreitamento da seção transversal do material.

Mantendo o carregamento de um dado material após o início da fase plástica, este atingirá a fase de tensão de resistência com rompimento do material no limite da fase, não oferecendo mais resistência à força sobre ele exercida.

O comportamento da relação Tensão-Deformação nos materiais poliméricos apresenta características diferentes daquele apresentado pelos metais, sendo agrupado em três diferentes grupos. A Fig.(15) apresenta o comportamento da classe de polímeros frágeis (vermelho); a curva dos plásticos que aceitam de certa deformação(azul); e os elastômeros, característica de materiais extremamente macios, comportamento típico encontrado em borrachas (CALLISTERJR.; RETHWISCH, 2012).

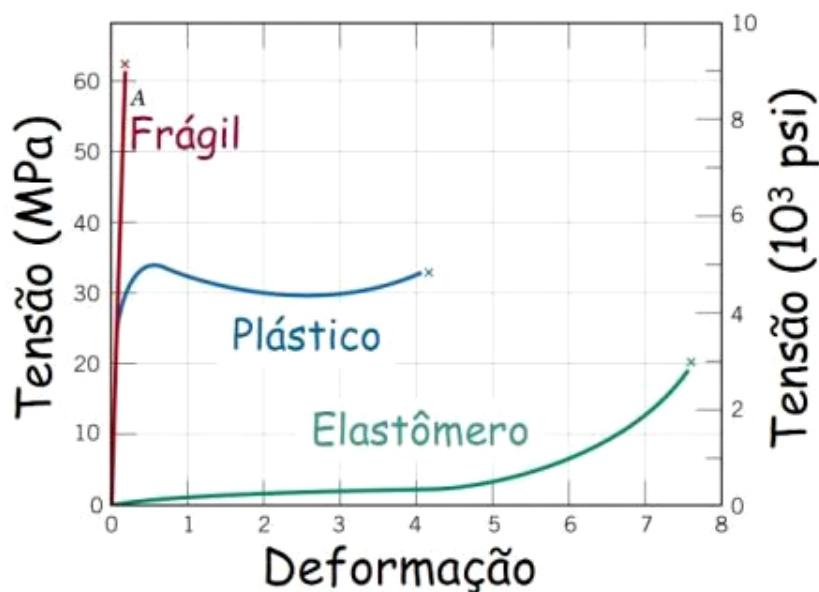


Figura 15 – Diagrama tensão x deformação para materiais poliméricos. Fonte: (CALLISTERJR.; RETHWISCH, 2012).

As propriedades mecânicas dos polímeros são sensíveis à mudança de temperatura, especificamente os plásticos que se tornam maleáveis sob aquecimento, são chamados termoplásticos. As mudanças observadas sob aquecimento são: diminuição do módulo de elasticidade, redução da resistência à tração e melhora na ductilidade

(CALLISTERJR.; RETHWISCH, 2012). A variação do módulo de elasticidade diante do aumento de temperatura é representada pela Fig.(16).

Quando o polímero é tensionado há o estriamento, ou seja, o plástico cede num ponto determinado (ponto de cedência), formando uma estrição associada ao aparecimento de micro vazios e, conseqüente, o embranqueamento (MELO, 2004) aspecto que pode ser observado na Fig.(17) quando o corpo de prova é tensionado durante os experimentos de tração.

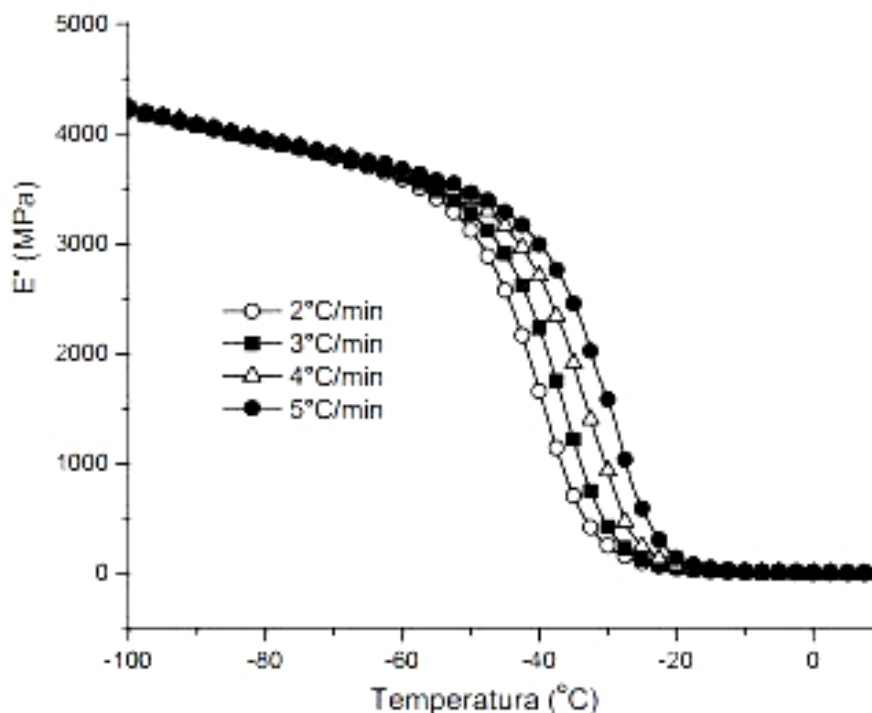


Figura 16 – Variação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura. Fonte: (WASILKOSKI, 2006, p. 46).

Estruturalmente, as moléculas deslizam umas em relação às outras e se alinham na direção de tensão, ocasionando uma conformação do material, o que provoca a cristalização induzida e torna o material resistente na direção da orientação.

O estriamento do material pode continuar à medida que a tensão aumenta, chegando a se romper ao atingir a tensão limite, quando o material apresenta fibrilação na zona de ruptura. Todas as fases descritas anteriormente podem ser visualizadas pela Fig.(17), da amostra tensionada até a sua ruptura, a Fig.(17) representa a relação tensão x deformação representada no comportamento do ponto de vista do PVC.

O PVC responde a solicitações de maneira instantânea elástica e retarda a fase viscoelástica, sendo sua deformação total, instantânea elástica e uma parcela de retardo para posterior início da fase (COVAS *et al.*, 2005).

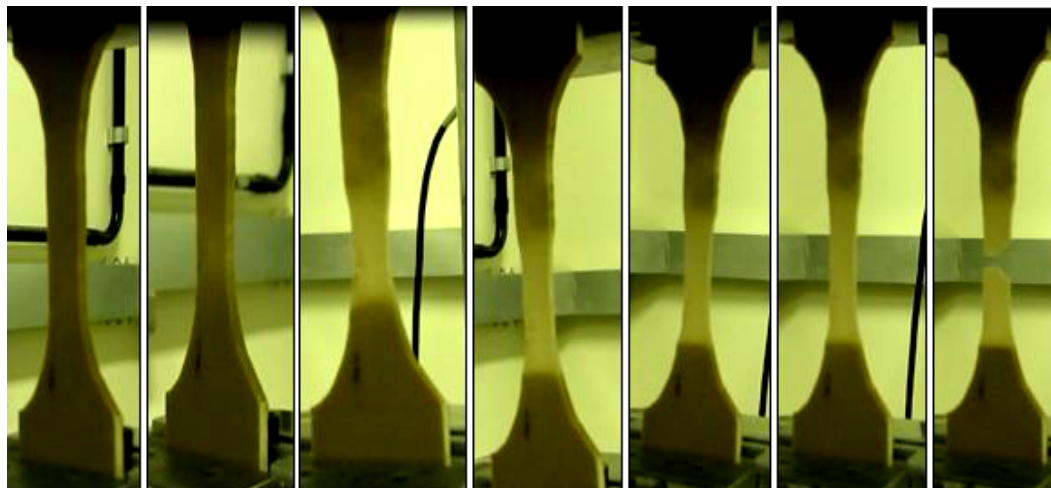


Figura 17 – Comportamento de deformação do PVC em corpo de prova sob solicitação de tração.

### 3.5 Degradação Térmica

A exposição do polímero PVC sem a adição de estabilizantes ao calor, à radiação ultravioleta ou, ainda, à radiação gama, pode, alterar a sua estrutura molecular (MELO, 2004) o que pode ser observado pela mudança de coloração do material para amarelo ou marrom escuro, processo conhecido como desidrocloração (JR.; MEI, 2007).

A exposição a luz solar além de induzir a descoloração dos tubos de PVC reduz a resistência a impacto, no entanto, o quanto a resistência a impacto é comprometida está relacionado a vários fatores como o tempo de exposição, condições climáticas, diâmetro e espessura do tubo, tipo do material empregado em sua fabricação o que o torna de difícil previsão ou mensuração prévia.

Sendo que a transferência de calor para um corpo a partir de sua área de contato externa possibilita que o calor seja irradiado para o centro da amostra com dissipação da temperatura observada em sua área de contato externa, assim, à medida que se penetra no material seu módulo de elasticidade sofre variação. A Fig.(18) ilustra este cenário.

Se a variação de temperatura estiver acima de uma temperatura especificada para um dado material, pode ocorrer à degradação do material (CALLISTERJR.; RETHWISCH, 2012). A degradação do PVC modifica a estrutura molecular, resultando na diminuição da resistência mecânica dando início ao fenômeno denominado quebra de stress. Além disso, propriedades como força de ruptura, tração e alongamento estão fortemente correlacionadas à degradação (LODI; BUENO; VILAR, 2013).

A degradação do PVC ocorre em temperaturas inferiores a 100 °C e pode ter seu processo acelerado na faixa de temperaturas entre 140 - 220 °C (JR.; MEI, 2007).

Assim, ao realizar o aquecimento de um polímero ele atinge um estado chamado de temperatura de transição vítrea em que o polímero formado por uma estrutura

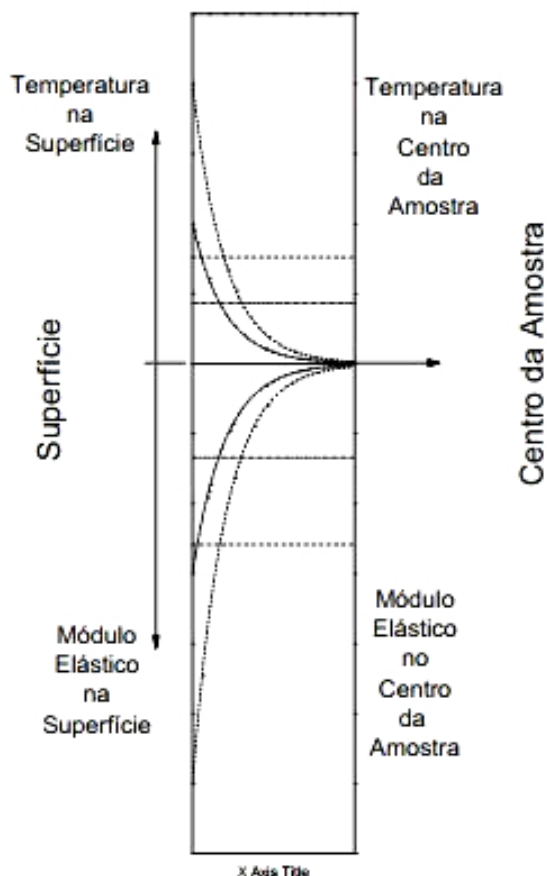


Figura 18 – Transferência de calor em um corpo polimérico a partir de sua superfície. Fonte: (WASILKOSKI, 2006).

desordenada e não cristalina conhecida como sólido amorfo. Assim, ele muda para um estado borrachoso quando a temperatura chega a 87 °C. Continuando o processo de aquecimento, o polímero atinge a fase de fusão, quando passa do estado sólido para o viscoso. A temperatura de fusão para o Cloreto de Polivinila é de 212 °C (CALLISTERJR.; RETHWISCH, 2012).

O conhecimento da temperatura de transição vítrea é um importante parâmetro na utilização de um polímero, acima desta temperatura, o material passa a ter outro comportamento mecânico, dessa forma, a aplicação do chassi monobloco fabricado a partir de tubos de PVC fica restrito a uma temperatura de trabalho inferior à temperatura de transição vítrea.

Portanto, a temperatura ambiente ou de condicionamento da estrutura desenvolvida utilizando o PVC deverá ser tal que não se aproxime do limiar da transição vítrea por comprometer a rigidez da estrutura. Além disso, não poderá ser submetido à radiação ultravioleta ou gama, por interferirem nas propriedades mecânicas dos polímeros (JR.; MEI, 2007).

Pois, conforme representa pela Fig.(18) a exposição externa a que um corpo

polímero está exposto pode ser irradiada para o interior do corpo conseqüentemente comprometendo suas estruturas internas.

## 3.6 Espuma de Polímeros

Os materiais polímeros podem se apresentarem de diversas formas físicas, inclusive como espumas que são materiais considerados plásticos e possuem uma quantidade elevada de poros e bolhas de gás aprisionado. Comumente, Polietileno, borrachas, poliestireno e cloreto de polivinila podem ser empregados em sua fabricação. As espumas são geradas pelo processo de espumação, ou seja, há a condução pela inserção de um agente de insuflação que, ao reagir com o material, promove a liberação de gás e conseqüentemente, bolhas no material, que permanecem após o processo de secagem (CALLISTERJR.; RETHWISCH, 2012).

As propriedades mecânicas das espumas estão condicionadas à definição aplicada para os polímeros, sendo caracterizadas pela densidade da estrutura celular e pelo processo de fabricação, pois elas podem ser fabricadas em uma variedade de densidades e suporte de cargas para diferentes tipos de utilização.

Nos experimentos foi empregada uma espuma expansiva à base de poliuretano e Diphenyl 4,4, e di-isocianato e polióis, comercializada em tubos de 500 ml, que ao ser expandida possui rendimento de até 30 litros, é aderente à madeira, metal, alvenaria, PVC, mármore, granito, ferro e alumínio.

Contudo, não pode ser aplicada ao polietileno, polipropileno e Politetrafluoretileno também conhecido como teflon ou Politetrafluoretileno ou Teflon (PTFE). Seu tempo de secagem leva de 2 a 5 horas, sendo que a cura total é de 24 horas. A espuma suporta acabamento, como lixar, cortar e também aceita massa para acabamento ou pintura, podendo ser utilizada como isolante térmico e acústico.

A temperatura de operação está entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e a espuma deve ser protegida da incidência dos raios Ultra Violeta (UV) sendo insensível ao toque e sua densidade está compreendida entre  $0,022\text{ g/cm}^3$  a  $0,024\text{ g/cm}^3$ .

Os tubos de PVC quando utilizados como componente hidráulico na maioria das vezes é esperado que o interior oco do tubo esteja preenchido, o que aumenta a rigidez e resistência mecânica do tubo. Neste contexto considerando as características de um material apresentado como espuma o que confere baixo peso colabora para não incitar o fenômeno de deformação por fluência, por conta do peso.

Os ensaios para fluência utilizando os tubos de PVC não foi realizado, devido ao tempo demandado nos ensaios, segundo a norma (ASTM D 2990-01, 2009) para a mensuração da fluência é necessário um carregamento constante, durante um período mínimo de 1000 horas (ASTM D 2990-01, 2009).

Além de tais aspectos, a espuma pode aumentar a absorção de energia frente a impactos ou mesmo colaborar no aumento da resistência mecânica fruto de sua densidade. Optou-se pela espuma de maior densidade dentre as disponíveis comercialmente.

Foi realizado inicialmente o ensaio de flexão, o levantamento do comportamento físico e mensuração numérica na resistência mecânica, para o tubo preenchido com espuma.

---

## Ensaio Experimentais para levantamento de Parâmetros

O levantamento das propriedades mecânicas dos tubos de PVC tem por finalidade sua utilização em simulações computacionais. Em virtude da inexistência dos parâmetros específicos para os tubos de PVC que é utilizado na confecção do chassi.

Os experimentos realizados utilizaram uma máquina de tração, para avaliar o comportamento mecânico do tubo PVC e suas conexões, determinar os parâmetros característicos do material, tanto com ensaios de tração quanto de flexão, em diferentes configurações.

Nos ensaios de Tração foi caracterizado o módulo de elasticidade dos tubos de PVC enquanto que na flexão é avaliado o comportamento mecânico do tubo solicitado por uma força crescente tanto carga distribuída quanto para carga concentrada.

### 4.1 Ensaio de Tração e Flexão

Em ambos os ensaios de tração e Flexão foi empregada uma força crescente com taxa de 2 Newton/minuto, até que o tubo de PVC não mostrasse resistência à força aplicada transversalmente ao tubo para os ensaios de flexão, ou se rompesse para os testes de tração .

A temperatura ambiente média durante os ensaios foi de 26 °C. Foram encontrados o limite de resistência à flexão, na fase elástica, e o máximo deslocamento vertical, no ponto médio longitudinal da amostra. Para a realização deste ensaio, foi utilizado o Sistema de Ensaio *Mechanical Testing Machine* (MTS) (modelo 793), disponível no Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis (LMEst), da Faculdade de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Nos ensaios foi utilizado um extensômetro com comprimento de 50 mm para a medição dos deslocamentos. Foram realizados cinco ensaios para cada um dos grupos,

de onde foi obtido o módulo de elasticidade da amostra. Os diferentes grupos de ensaio permitiram determinar os valores do módulo de elasticidade em tração, limite de escoamento, resistência à tração e percentual de alongamento até ruptura. Os grupos de ensaio avaliados foram:

- ❑ ensaio de tração com tubos de dois fabricantes do mercado brasileiro;
- ❑ ensaio de tração com tubos exposto ao calor para planificação das amostras;
- ❑ Flexão do tubo em bi apoio simples;
- ❑ Flexão em bi apoio simples com conexões nas extremidades;
- ❑ flexão do tubo em bi-apoio simples preenchido com espuma expansiva;
- ❑ flexão do tubo em bi-apoio simples preenchido com espuma expansiva e recoberto por fita SilverTape<sup>®</sup>;

Cada um dos grupos de ensaio será descrito em detalhes seus resultados exibidos nas sessões seguintes.

## 4.2 Confeção de Corpos de Prova para Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste em submeter o corpo de prova a uma força crescente em um espaço de tempo pré-determinado. Comumente, na caracterização de um dado material a força é aplicada até a ruptura do corpo de prova.

Nesse sentido, os ensaios de tração foram conduzidos aplicando uma velocidade de 2 mm por minuto com o intuito de determinar parâmetros utilizados pelo software na simulação computacional.

Para o primeiro grupo de ensaios sob tração foram utilizados o tubos de PVC no diâmetro de 25 mm, sendo necessário o desenvolvimento de um dispositivo para prender o tubo ao sistema de fixação da máquina de tração.

A Fig.(19 (a)) ilustra o dispositivo proposto, a parte chanfrada de maior diâmetro é inserida no tubo, afixada por abraçadeiras. A região recartilhada do dispositivo tem por finalidade aumentar a área de atrito entre a peça e a máquina de ensaio.

O dispositivo utilizado não mostrou-se adequado, para o ensaio de tração do tubo, pois, diante da tração, em todos os ensaios foi observado o rompimento do tubo nos pontos de contato entre o dispositivo projetado para o ensaio de tração e a parte interna do tubo, este evento ocorre sempre que é empregada uma força de modo a tracionar o tubo. A Fig.(19) ilustra o evento relatado.

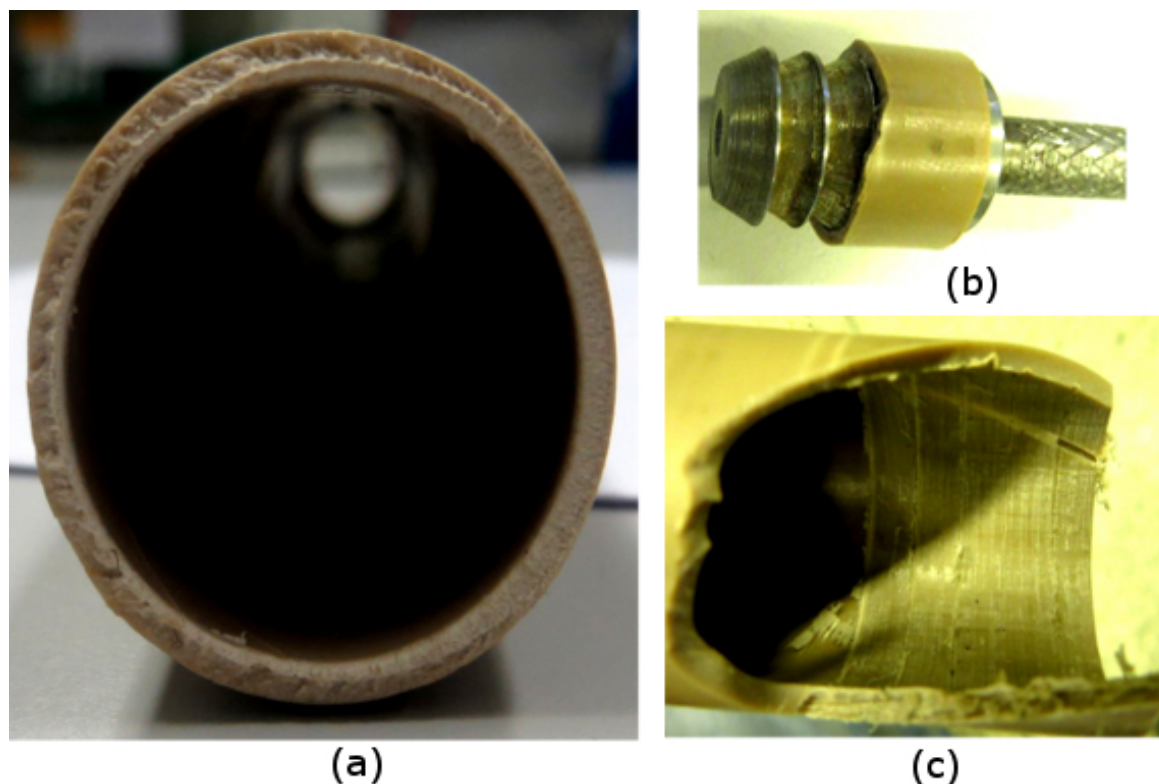


Figura 19 – Tubo rompido após uso do dispositivo de aprisionamento em ensaio de tração (a) vista frontal, da região de rompimento, (b) vista lateral, com o dispositivo de tração, (c) vista lateral da região de rompimento

Apesar do experimento não atingir os seus objetivos quanto ao ensaio de tração, foi observado experimentalmente que, o tubo sob tensão e existindo uma força em um dado ponto do tubo, o mesmo pode sofrer o colapso na região, conseqüentemente se romper.

Foram realizados diversos procedimentos para contornar o rompimento, no entanto, todos os procedimentos se mostraram ineficientes, assim, foram adotados outros procedimentos para o ensaio de tração.

Para os demais ensaios de tração, foram adotados a norma da *American Society Testing and Material (ASTM)* (*American Society for Testing and Materials*) para o Ensaio de Tração, (ASTM D638-10, 2010) (*Standard test method for tensile properties of plastics*), adotada, norma que discrimina as características para confecção dos corpos de prova.

Durante a confecção da geometria determinada pela norma ASTM, de forma artesanal sem a utilização de um gabarito, houve desalinhamento das lâminas ao serem desbastadas, o que comprometeu a padronização dos corpos de prova. Diante disso, foi confeccionado um gabarito empregado como matriz no processo de fabricação dos corpos de prova, para minimizar os problemas mencionados.

O projeto do gabarito foi realizado empregando o *software* SolidWorks<sup>©</sup> ele possui duas partes, uma destinada ao encaixe das lâminas a serem trabalhadas e outra que permite compressão destas, presas por parafusos, impedem o desalinhamento da lâminas obtidas do tubo de PVC Fig.(20).

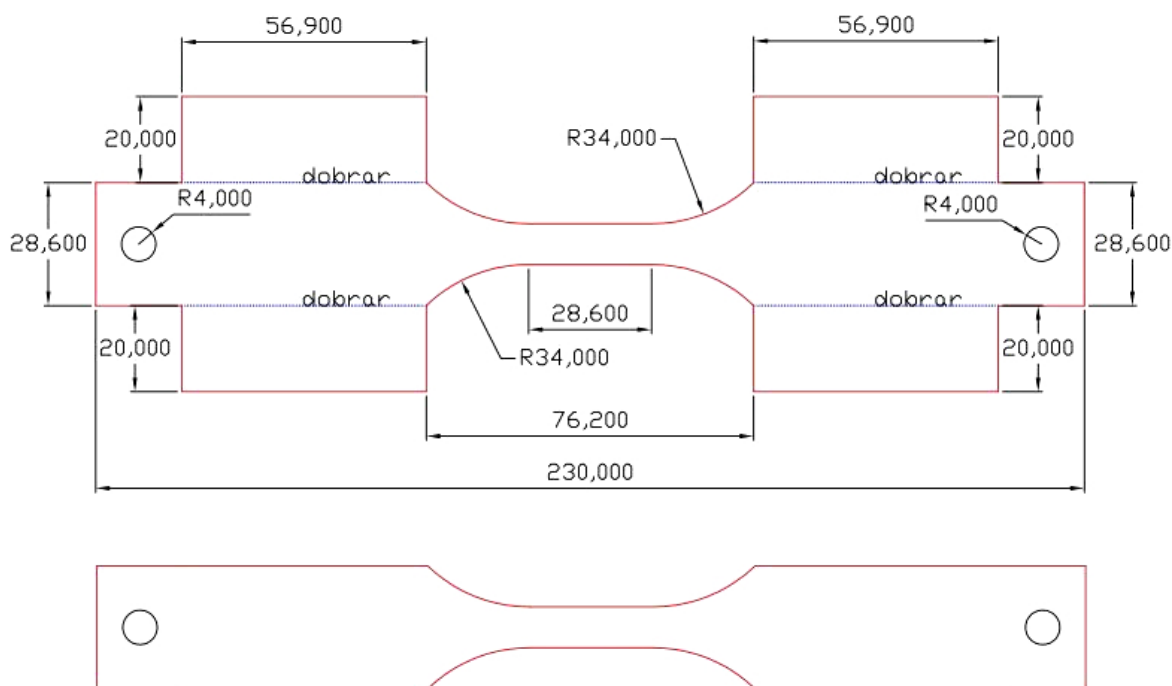


Figura 20 – Dimensões do gabarito utilizado para confecção dos corpos de prova.

O gabarito foi construído em chapa de aço de 2 mm utilizando uma máquina de corte a plasma, com acabamento por limagem. Com a utilização do gabarito proposto foi possível a construção dos corpos de prova padronizados segundo dimensões e forma especificados pela norma da ASTM, na Fig.(21) são apresentados os corpos de prova gerados via gabarito.

Inicialmente, foram utilizados tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, planificados sob ação de soprador térmico de 2000W (mod. STV2000N - Vonder<sup>©</sup>), com temperatura superficial de 160 °C, e posteriormente, cortados em uma guilhotina, o que gerou lâminas que foram trabalhadas de forma sobreposta, presas por uma morsa de bancada, desbastadas com o auxílio de um disco de lixa *flap* curvo de 180 mm x 22 mm.

Durante a experimentação constatou-se que os corpos de prova sofreram considerável modificação estrutural molecular em virtude do aquecimento descrita anteriormente. Isto alterou as características intrínsecas do PVC, como o módulo de elasticidade, por exemplo que ficou com o valor limiar abaixo do valor mínimo especificado

para o material, maiores detalhes sobre os valores obtidos durante os ensaios podem ser visualizados no Apêndice 6.8.

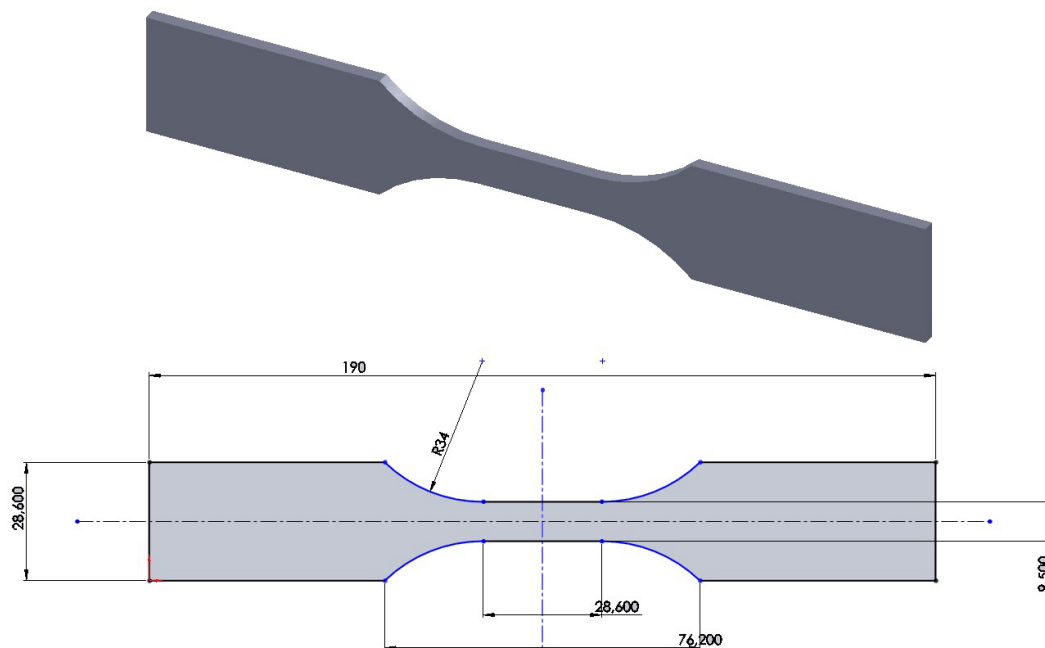


Figura 21 – Especificações das Dimensões dos Corpos de Prova segundo Norma (ASTM D638-10, 2010).  
Fonte: (ASTM D638-10, 2010), adaptado

Diante disso, foi necessária a construção de novos corpos de prova, obtidos do tubo de PVC sem aquecimento. Para tanto, foram extraídas lâminas do PVC Fig.(22) a partir do tubo de 50 mm de diâmetro, em serra de bancada as quais foram confeccionadas Fig.(23) posteriormente, com o auxílio do gabarito, de acordo com as especificações da norma (ASTM D638-10, 2010).



Figura 22 – Lâminas de PVC extraída do tubo Corpos de prova produzido com auxílio de uma matriz

A partir das lâminas representadas na Fig. (22) serem desbastadas com o auxílio do gabarito, foram obtidos os corpos de prova exibidos na Fig.(23).

A adoção do gabarito além de conferir agilidade ao processo de confecção dos corpos de prova, colaborou para obter a simétricas dos ângulos em ambos os lados dos



Figura 23 – Corpos de prova produzidos a partir dos tubos de 50 mm de PVC com auxílio do gabarito.

corpos de prova o que é ilustrado na Fig.(23). A Tab.(4) apresenta a variação obtida nos corpos de prova segundo a sessão retangular dos corpos de prova e seu respectivo desvio médio, o desvio padrão obtido com adoção da matriz é de 1,308 mm.

Tabela 4 – Desvio médio da sessão retangular das amostras geradas com o gabarito proposto.

| Corpo de Prova | Sessão Retangular (mm) | Desvio Médio |
|----------------|------------------------|--------------|
| 1              | 21,900                 | 2,043        |
| 2              | 24,300                 | 0,942        |
| 3              | 21,600                 | 2,991        |
| 4              | 25,500                 | 4,711        |
| 5              | 24,300                 | 0,942        |
| 6              | 24,600                 | 1,614        |
| 7              | 24,600                 | 1,614        |
| 8              | 24,000                 | 0,450        |
| 9              | 21,300                 | 4,119        |
| 10             | 24,300                 | 0,942        |
| 11             | 24,000                 | 0,450        |
| 12             | 21,300                 | 4,119        |
| 13             | 22,500                 | 0,688        |
| 14             | 24,000                 | 0,450        |
| 15             | 22,200                 | 1,276        |
| 16             | 24,000                 | 0,450        |
| 17             | 22,200                 | 1,276        |

Os resultados de cada ensaio realizado utilizando os corpos de prova sem planificação das amostras por calor pode ser observado no Apêndice 6.8. Posteriormente aos ensaios de tração, foram realizados os ensaios de flexão para compreensão do comportamento do tubo, sob carregamentos concentrado e distribuído.

### 4.3 Confecção Corpos de Prova para Ensaio de Flexão

Para a confecção dos corpos de prova utilizados nos ensaios foram empregados tubos de PVC com 50 mm de diâmetro, fabricados segundo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)) NBR 5648:2010 (Tubos e conexões de *Unplasticised Polyvinyl Chloride* (PVC-U) com junta soldável para sistemas predial de água fria). Todos os corpos de prova utilizados possuem 30 cm de comprimento com espessura do tubo de 4,5 mm.

Foram utilizados tubos de diferentes datas de fabricação, considerados novos, com data de fabricação inferior a 2 meses, e tubos com até 5 anos de fabricação. Vale ressaltar que os tubos mais velhos foram estocados em ambiente ventilado, sem incidência direta de raios solares ou chuva sobre os mesmos, uma vez que estas condições podem interferir em sua estrutura molecular, como o processo de clorodesidratação (JR.; MEI, 2007) .

Foram construídos quatro cenários diferentes empregando o tubo de PVC, sendo eles: apenas tubo de PVC, o tubo com conexões em suas extremidades, tubo preenchido com espuma expansível de poliuretano, e, por fim, o tubo preenchido com espuma expansiva de poliuretano recoberto por fita Silver Tape<sup>®</sup> da 3M<sup>©</sup> do Brasil (fabricada em filme de polietileno na cor prata e trama de tecido com adesivo à base de resina e borracha) fita comumente utilizada para empacotamento, proteção contra umidade e resíduos, isolamento.

Para os corpos de prova com conexões foram confeccionados segundo a sequência de passos e materiais descritos na ficha técnica fornecida pelo fabricante Ficha Técnica (2013) de acordo com o fabricante são necessárias 12 horas para teste de pressão, devido a aplicação em outro contexto, os tubos ficaram em repouso por 72 horas para cura da cola, para posterior ensaio de ensaios de flexão.

Os corpos de prova preenchidos com espuma expansiva sua aplicação se deu de baixo para cima do tubo em camadas, afim de evitar a formação de regiões sem o material, a sequência de passos adotada é segundo a sequência de passos especificados pelo fabricante, a densidade da espuma utilizada segundo o fabricante é compreendida entre 0,022 g/cm<sup>3</sup> a 0,024 g/cm<sup>3</sup>, o tempo de cura aguardado foi de 72 horas.

Por fim, os corpos de prova que empregam espuma e fita Silver Tape<sup>®</sup>, a fita foi disposta de forma helicoidal ao corpo de prova de modo a cobrir toda área do tubo, sendo a fita colocada no momento antes da realização do ensaio.

## 4.4 Ensaio de Flexão Corpos de Prova em Bi-Apoio Simples

Nos diferentes experimentos de flexão, as conexões ficaram simplesmente apoiadas em uma base rígida de aço. De forma geral, os tubos não se romperam com a máxima deflexão (considerada além do limite da fase elástica, com situação visível de esmagamento bastante acentuado), nem geraram estilhaços, mesmo para os corpos de prova com diferentes idades de fabricação apresentaram comportamentos semelhantes.

Outro aspecto constatado é o fato de não haver quebra e nem geração de estilhaço na região de contato entre o tubo e a conexão soldada em todos os ensaios de flexão, havendo apenas a ocorrência de deformações plásticas.

Os ensaios de Flexão aconteceram tanto para uma carga concentrada como para a carga distribuída, carga distribuída é simulada por uma peça de 7 cm que transmite a força ao tubo sendo centralizada longitudinalmente no tubo, representando cerca de 30% do comprimento livre entre as conexões ou apoio utilizado para o cano sem conexões. Para os ensaios com uma carga concentrada é utilizado um cilindro maciço em aço com 25mm de diâmetro, o qual transmite a força ao corpo de prova.

Para todos os ensaios realizados, assim que retirada a aplicação da força, nota-se a recuperação da sua posição original, para os tubos contendo conexões nas extremidades o retorno ocorreu de forma mais acentuada em relação aos demais corpos de prova o que pode ser verificado na Fig.(24) e na Fig.(25)

Durante os ensaios de flexão tanto na aplicação de uma força concentrada quanto distribuída não é verificada a ocorrência de estilhaços, ou rompimento do tubo, sob uma força aplicada até que o tubo não ofereça mais resistência mecânica também, não foi observado qualquer sinal visível de comprometimento da solda durante ou posterior ao ensaio, onde o tubo cede em um módulo maior na região de aplicação da força o que pode ser visualizado na Fig.(24).

O grupo representado pelos corpos de prova preenchidos com espuma expansiva apresentou um aumento de 11% no módulo de elasticidade em relação aos corpos de prova confeccionados apenas com tubo, enquanto que os tubos preenchidos com espuma e recobertos por fita Silver Tape<sup>®</sup> não apresentaram alteração no módulo de elasticidade pela utilização da fita Silver Tape<sup>®</sup> a Fig.(25) apresenta este grupo de ensaio.

Anterior a realização dos ensaios acreditava-se que os tubos poderiam se romper por conta disso, parte dos corpos de prova empregaram a da fita Silver Tape<sup>®</sup>. No entanto, mesmo empregando tubos com diferentes datas de fabricação, não romperam ou estilhaçaram, também não é observada mudanças representativas no módulo de elasticidade dos tubos de maior data de fabricação.

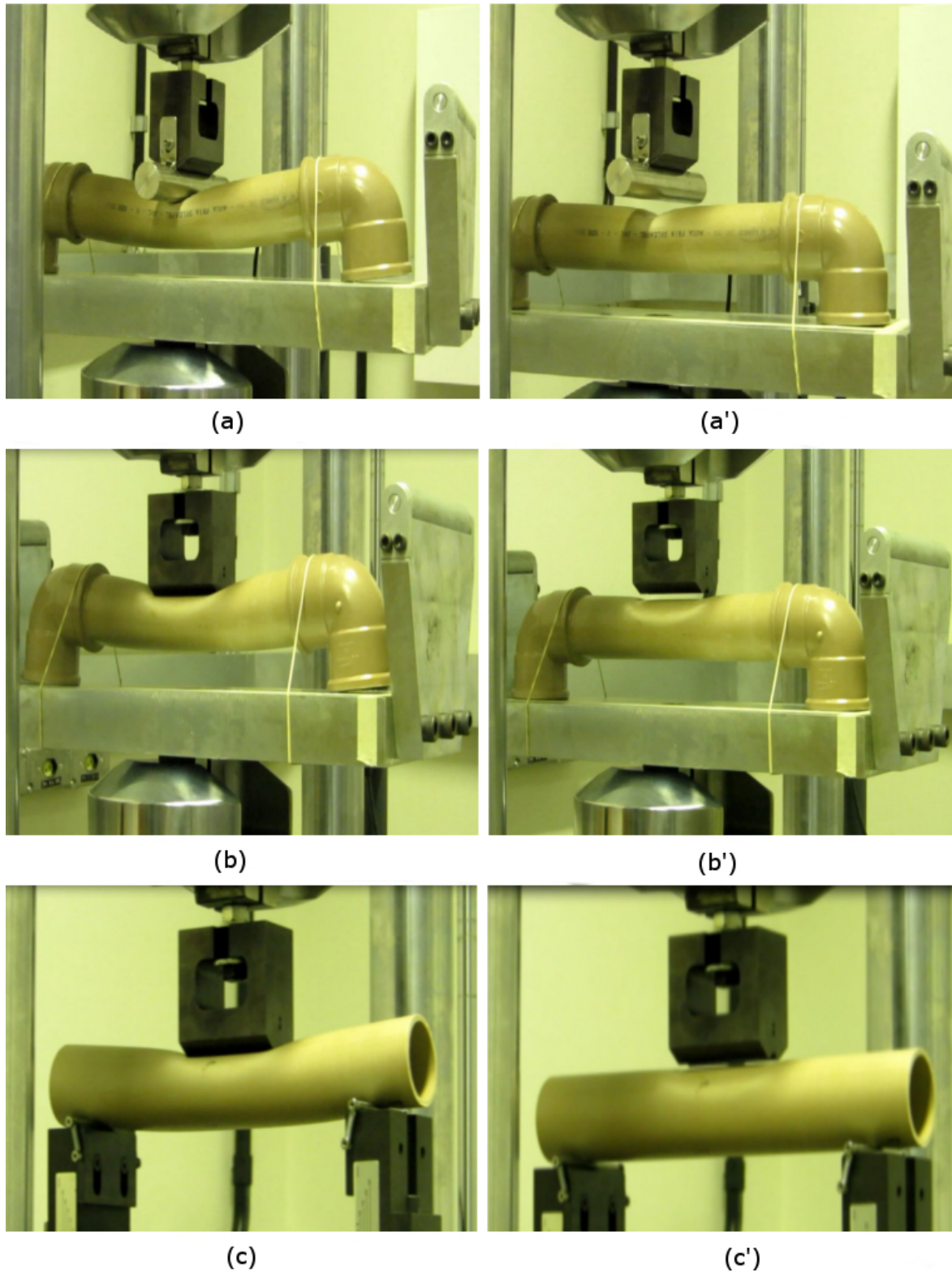


Figura 24 – Tubos de PVC em ensaio de flexão em bi-Apoio Simples em sua deflexão máxima e retorno após retirada a Força. (a) carga concentrada com conexão, flexão máxima (a') carga concentrada com conexão, retorno (b) carga distribuída, flexão máxima (b') carga distribuída com conexão, retorno (c) carga distribuída, flexão máxima (c') carga distribuída, retorno.

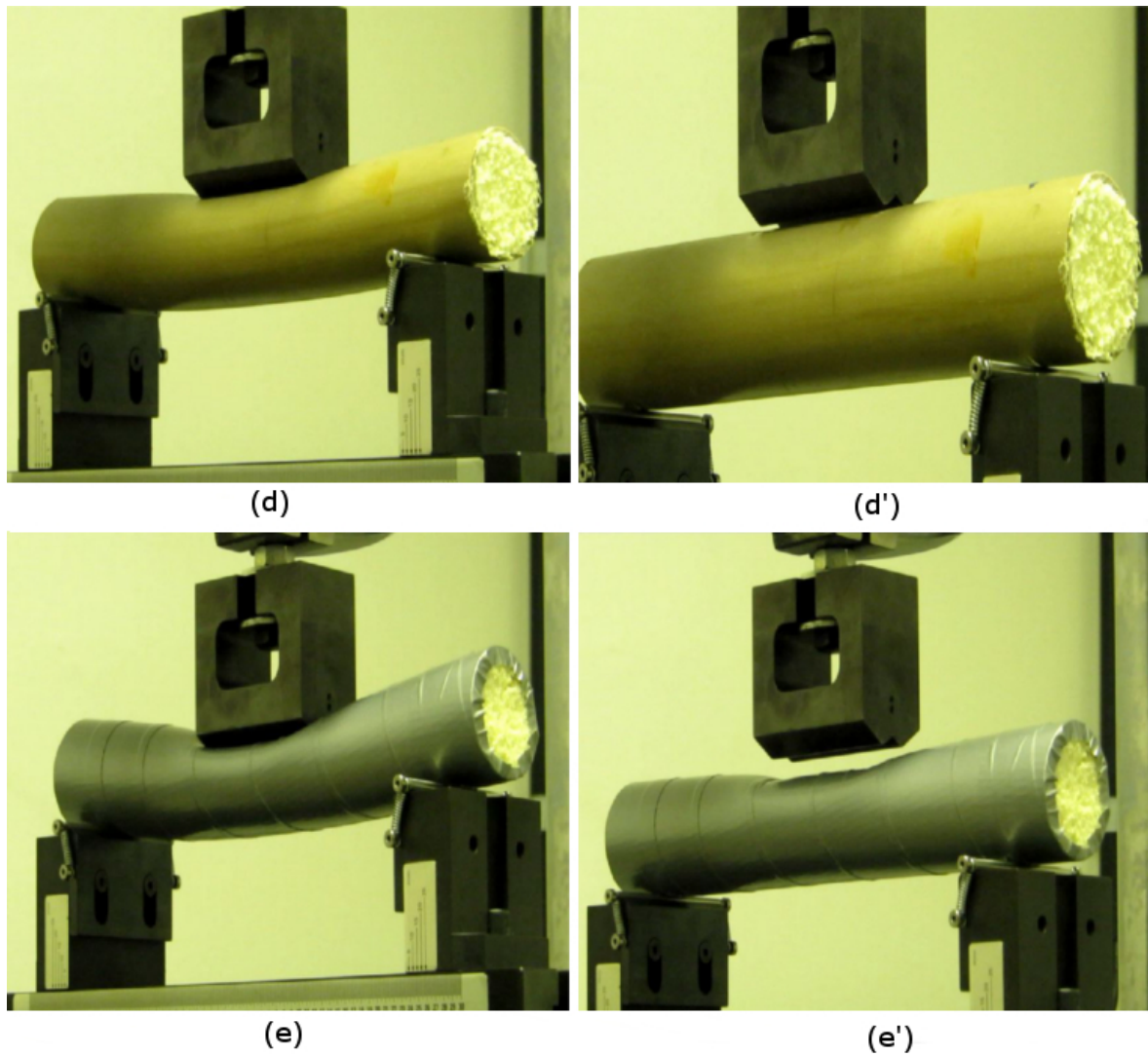


Figura 25 – Corpos de Prova ensaiados com Espuma e Fita Silver Tape<sup>®</sup> em ensaio de flexão com carga concentrada em bi-Apoio Simples em sua deflexão máxima e retorno após retirada a Força. (d) carga distribuída com espuma, flexão máxima, (d') carga distribuída com espuma, retorno, (e) carga distribuída com espuma e fita, flexão máxima, (e') carga distribuída com espuma e fita, retorno.

Foram realizados ensaios com a utilização do tubo associado ou não a outros materiais (espuma expansível, fita Silver Tape<sup>®</sup>) de modo avaliar o aumento da resistência mecânica do tubo. A utilização destes novos componentes influencia diretamente no peso do conjunto, o que pode ser visto na Tab.(5), conforme utilização de cada material empregado. Para todos os casos, foi utilizado tubo de 50 mm de diâmetro com 30 cm de comprimento.

A adoção de outros materiais (espuma expansível, fita Silver Tape<sup>®</sup>), associado ao tubo para confecção dos corpos de prova, influência diretamente no peso dos corpos de prova, quando comparado com o corpo de prova caracterizado apenas pelo tubo a Tab.(5) apresenta as variações médias.

Outro fator associado na adoção a outros materiais para o corpo de prova é a variação no módulo de elasticidade na flexão, a Fig.(26) apresenta os diferentes valores obtidos em cada grupo.

Tabela 5 – Variação do peso médio na adoção de outros materiais como reforço estrutural.

| <b>Material</b>      | <b>Peso Médio</b> | <b>Acréscimo em Relação ao Tubo</b> | <b>Acréscimo Proporcional</b> |
|----------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Tubo                 | 207,33 g          | -                                   | -                             |
| Tubo x Fita          | 221,33 g          | 14,00 g                             | 6,73% g                       |
| Tubo x Espuma        | 214,66 g          | 7,33 g                              | 3,54% g                       |
| Tubo x Espuma x Fita | 228,66 g          | 21,33 g                             | 10,30% g                      |

A espuma apresenta um acréscimo de 3,54 g. ao peso da estrutura e um ganho de 73,42 % na rigidez em relação aos corpos de prova formado apenas pelo tubo, a utilização da fita confere um acréscimo de 4,34% em relação aos corpos de prova com espuma, porém, nesta configuração gera um adicional de 10,30 % ao peso da estrutura. Os corpos de prova contendo conexões possuem um aumento no módulo de elasticidade, fruto da geometria diferente dos corpos de prova, seu módulo de elasticidade é maior quando comparado apenas com o tubo.

Nos ensaios de tração foram observadas mudanças no módulo de elasticidade, resultado da utilização do calor para planificação dos tubos, para posterior fabricação dos corpos de prova, segundo CallisterJr. e Rethwisch (2012), o módulo de elasticidade secante tomado em 25% para o PVC deve estar compreendido entre 2,41 a 4,14 GPa, onde foi obtido o módulo de elasticidade médio de 1,69 Gpa aquém dos valores segundo a literatura.

Ao realizar a aferição da temperatura superficial e interna do tubo na utilização do soprador térmico para planificar os tubos, sendo constatada a temperatura superficial de 140° C e 90°C interna, o que pode ter induzido a degradação térmica, fruto

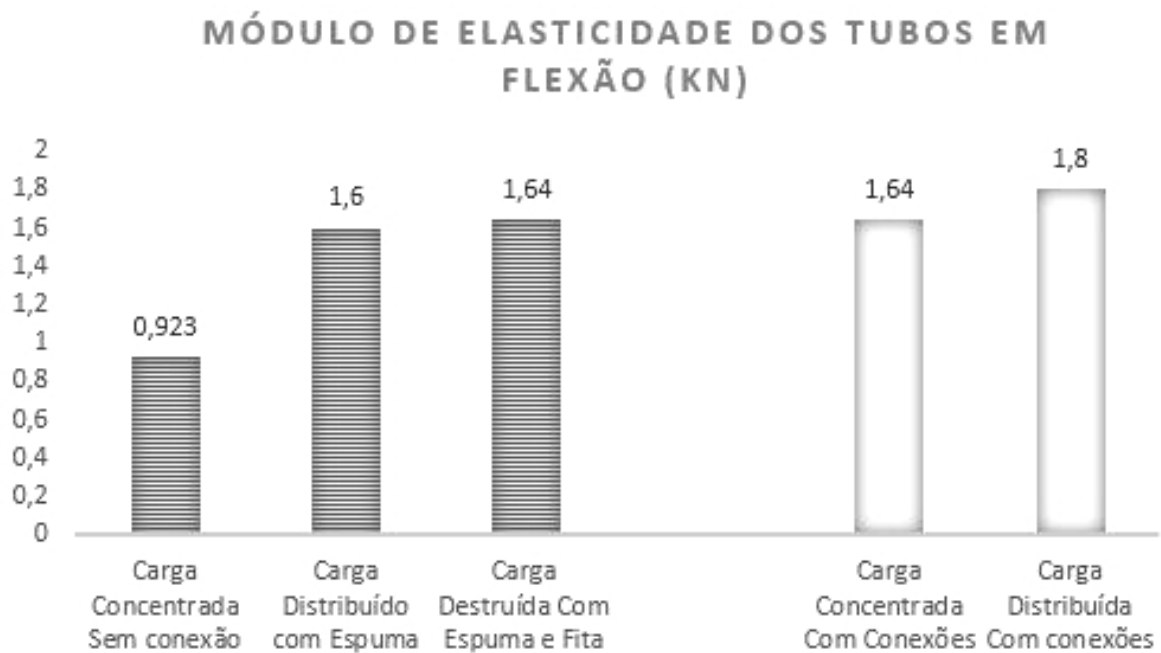


Figura 26 – Variação do Módulo de Elasticidade obtido experimentalmente na Flexão de acordo com o material adotado.

da temperatura e da pressão empregada sobre o tubo, pois, segundo (JR.; MEI, 2007) a degradação pode ter seu processo acelerado na faixa de temperaturas entre 140 - 220.

Ao realizar o experimento de tração sem utilizar o calor para a planificação dos corpos de prova, foi obtido o módulo de elasticidade de 3,18 GPa, valor próximo aos obtido por Grizzo (2009, p. 89).

Os valores numéricos para cada grupo utilizado nos ensaios, bem como os valores obtidos para cada corpo de prova nos ensaios de flexão, podem ser visualizados a partir da sessão (.2), com mais detalhes.

---

# Solid Works<sup>©</sup> CAE e Suas Peculiaridades na Simulação

## 5.1 *O Software SolidWorks<sup>©</sup> Simulation*

A adoção de um software de simulação contribui para a redução de tempo e custos associados ao desenvolvimento de protótipos, testes, dentre outras demandas aplicadas a cenários específicos (CADWORKS, 2014).

Atualmente, os recursos do método dos Elementos Finitos (MEF) está disponível como um produto de softwares, muitas vezes, apresentado como uma ferramenta intuitiva que permite a abstração dos cálculos aos projetistas, simplificando a aplicação do método, cabendo aos usuários o conhecimento das funcionalidades disponibilizadas pelo software e suas peculiaridades quanto à sua forma de trabalho, associado a este ponto é de fundamental importância para compreensão dos resultados gerados pelo *software* de modo a colaborar com a interpretação das análises realizadas (AZEVEDO, 2013) .

Cada vez é mais comum softwares que de forma intuitiva implementam o MEF, fator que auxiliar principalmente a projetistas, fruto da simplificação na aplicação do método.

A utilização de uma abordagem computacional para o MEF possui como vantagem que a maioria das matrizes utilizadas na resolução da maioria dos problemas são simétricas e esparsas, para este contexto tem-se uma fundamentação matemática e algoritmos computacionais com desempenho para a sua resolução (TORII, 2012, p. 34).

Apesar da discretização matemática do MEF é necessário que o usuário do software tenha conhecimento das bases teóricas do MEF de modo que possibilite identificar erros, na adoção de parâmetros incorretos, modelagem adequada ao contexto, dentre outros, podem gerar inconsistências nos resultados esperados pelos cálculos fornecidos pelo *software*, comprometendo a análise estrutural (AZEVEDO, 2013).

No âmbito estrutural o Método dos Elementos Finitos MEF tem como objetivo determinar o estado de tensão e ou deformação de um sólido de dada geometria arbitrária (AZEVEDO, 2013), deformações internas, ou tensões atuantes no sistema, o que auxilia na compreensão do comportamento de uma estrutura ou parte dela .

O MEF é um procedimento de discretização de meios contínuos comumente aplicado a problemas clássicos da mecânica estrutural-linear. Segundo o método, a estrutura global é particionada em componentes individuais chamados de elementos, conectados entre si por nós, a repetição desta estrutura gera o que é chamado de malha.

Dentre as ferramentas computacionais de simulação existentes no mercado, o grupo Dassault Systèmes S.A possui os direitos do *software* SolidWorks<sup>©</sup> uma plataforma de CAD que possui vários módulos integrados a ferramenta, dentre eles, o de simulação, conhecido como SolidWorks<sup>©</sup> *Simulation*, uma ferramenta CAE que possui como base o método de elementos finitos MEF.

O SolidWorks<sup>©</sup> possui uma interface intuitiva comparada as demais ferramentas CAE (CUNHA; ZIRBES; CUNHA, 2008). O núcleo matemático do software possui contribuição de várias empresas ou grupos, dentre as contribuições os recursos de MEF do Software de Desenho CAD/CAM/CAE que integra outras ferramentas (SolidWorks) possui como motor de simulação o *Software* utilizado para Método de Elementos Finitos (COSMOS).

## 5.2 Etapas no Processamento das Ferramentas CAE para simulação empregando o método MEF

Independente da complexidade do projeto seja em análise estrutural, térmica ou acústica por MEF, é utilizada a mesma sequência de passos empregada na simulação: definição do modelo geométrico, definição das propriedades dos materiais, cargas e restrições, discretização do modelo, onde a geometria do modelo geométrico é dividida em entidades relativamente pequenas que interconectadas gerarão a malha que envolve o modelo geométrico (FILHO, 2007).

Os *Softwares* que implementa o MEF, valem-se basicamente de 3 passos em seu processo de resolução: pré-processamento, processamento e pós-processamento(FILHO, 2007).

Estas etapas possuem finalidades específicas (COSMOSWORKS DESIGNER, 2008), a saber:

- Pré-processamento: as propriedades do material, cargas e restrições são definidos e o modelo é dividido em elementos finitos.

- ❑ Processamento: onde são realizados os cálculos matriciais, para determinar esforços e deslocamentos;
- ❑ Pós-processamento: onde é realizada a verificação dos resultados obtidos, bem como a formatação das informações;

As ações descritas anteriormente, implementam, no contexto da metodologia do MEF, uma sequência de passos com finalidades específicas:

- ❑ Construção do modelo Matemático;
- ❑ Construção do modelo de Elementos Finitos;
- ❑ Resolução do modelo de Elementos Finitos;
- ❑ Análise dos Resultados.

O SolidWorks<sup>©</sup> permite a utilização de forma parametrizável de diferentes sistemas de unidades para que possam ser fornecidos como parâmetros de entrada ou que sejam adotados como sistema de unidade em seus cálculos sendo estes parametrizáveis.

- ❑ Unidade de Medida em Metro, Kilo e Segundo (MKS);
- ❑ Unidade de Medida em Centímetro, Grama e Segundo (CGS);
- ❑ Unidade de Medida em Milímetro, Grama e Segundo (MMGS);
- ❑ Unidade de Medida em Polegada, Libra e Segundo (IPS);

A Fig.(27) ilustra as etapas no desenvolvimento utilizando o MEF.

### 5.3 Principais Recursos e suas Aplicações Implementados do SolidWorks<sup>©</sup> Simulation

Segundo (CADWORKS, 2014) é necessário definir um modelo sobre o qual serão realizados os estudos, onde se faz necessário aplicar a sequência de passos relacionada abaixo:

- ❑ Definir um estudo;
- ❑ Definir as propriedades do Material;
- ❑ Caso exista, aplicar contato de componentes ou acessórios de fixação;
- ❑ Especificar Restrições e Cargas;

- ❑ Gerar a malha;
- ❑ Executar o estudo;

Os tipos de contato podem ser classificados e especificados segundo a Tab.(6). Os acessórios de fixação, restringem a movimentação do objeto, sua utilização pode ser

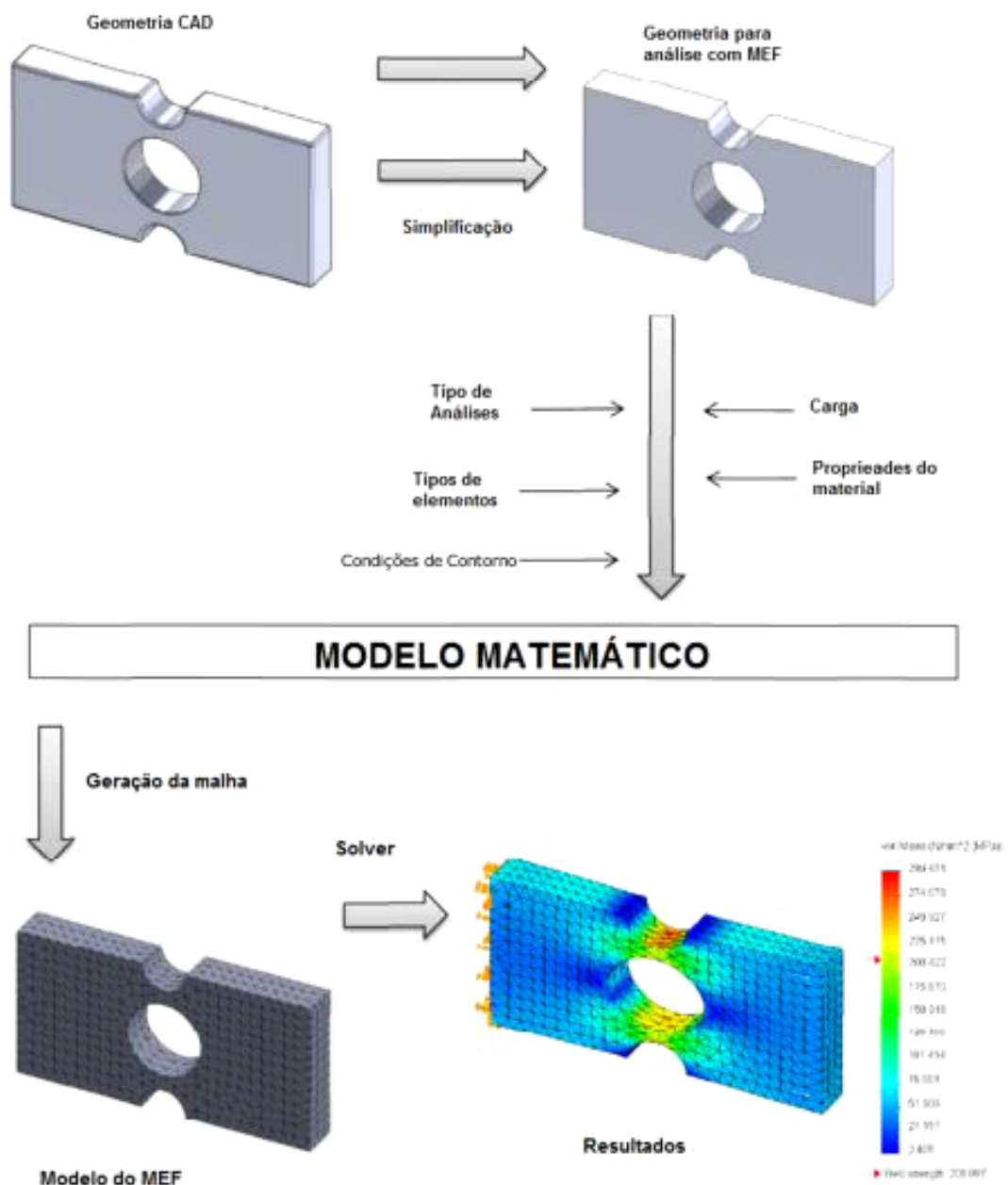


Figura 27 – Etapas principais no processo de análise através do MEF. Fonte: Adaptado de (RAOUFI, 2013, p. 5)

Tabela 6 – Tipos de Contatos de Componentes. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA, 2013).

| <b>Tipos de contato de componente</b> | <b>Definição</b>   |
|---------------------------------------|--|
| <b>Unido</b>                          | Esta é a opção predeterminada. Selecionar esta opção quando todas as faces em contato estiverem unidas e a montagem se comportar como uma única peça. A única diferença entre uma peça e uma montagem com peças unidas é que na montagem podemos atribuir diferentes propriedades de material a componentes individuais. |
| <b>Permitir penetração</b>            | Selecionar esta opção quando a montagem for uma série de componentes soltos, sem conexão estrutural entre eles.  |
| <b>Sem penetração</b>                 | Selecionar esta opção quando os componentes em contato puderem se separar, mas não puderem penetrar um no outro. O coeficiente de atrito pode ser especificado no gerenciador de propriedade do contato do componente.   |

aplicada a faces, arestas e vértices, A Tab.(7) apresenta os tipos acessórios de fixação e suas restrições.

As Tabs.(8) e (9) apresentam, respectivamente, os acessórios de fixação padrão e avançados do SolidWorks<sup>®</sup> Simulation.

Tabela 7 – Acessórios de Fixação Padrão. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA, 2013).

| <b>Tipo de acessório</b>  | <b>Definição</b>   |
|---------------------------|--|
| <b>Geometria fixa</b>     | Também chamado de suporte rígido; todos os graus de liberdade de translação e rotação estão restritos. Geometria fixa não requer nenhuma informação sobre direção na qual as restrições são aplicadas.                       |
| <b>Rolante/Deslizante</b> | Usar a restrição rolante e deslizante para especificar que uma face plana pode se mover livremente na direção do seu plano, mas não pode mover na direção normal a ele. A face pode se contrair ou expandir no carregamento. |
| <b>Articulação fixa</b>   | Usar a restrição articulação para especificar que uma face cilíndrica mova-se apenas sobre seu eixo. O raio e o comprimento da fase cilíndrica permanecem constantes sob o carregamento.                                     |

Tabela 8 – Acessórios de Fixação Avançados. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA, 2013).

| <b>Tipo de acessório de fixação</b> | <b>Definição</b>   |
|-------------------------------------|--|
| <b>Simetria</b>                     | Esta opção está disponível para ser usada em faces planas. São permitidos deslocamentos no plano e rotação na direção normal ao plano.                             |
| <b>Simetria circular</b>            | Esta opção é usada para restringir seguimentos que formariam um corpo simétrico em rotação se girassem periodicamente em torno de um eixo específico de revolução. |

Após a fixação das partes são aplicadas as forças essa, sobre a faces, arestas ou vértices utilizando diferentes métodos. As forças externas e suas características, respectivamente, tipo padrão e avançadas são representadas nas Tabs.(10) e (11).

## 5.4 Malha seus Elementos e Aplicações

Para utilizar um *Software* de simulação, a geometria da peça ou modelo deve permitir a geração de uma malha com grande número de elementos de pequenas dimensões, de modo a encontrar resultados aceitáveis para o deslocamento, tensões, dentre outros.

A geração da malha pode demandar simplificações para remover ou suprimir recursos considerados insignificantes na análise, ou mesmo idealizações na geometria CAD. Tais artifícios, colaboram para reduzir a dificuldade ou impossibilidade de gerar a malha (SILVA, 2013).

Segundo Silva (2013), um malha bem elaborada, está diretamente relacionada à simplificação da geometria, mais do que da sofisticação de uma ferramentas de geração da malha (SILVA, 2013).

A quantidade de elementos empregados em uma malha é um fator que influencia diretamente nos resultados ou no tempo de processamento, e dependem do tipo de

Tabela 9 – Acessórios de Fixação Avançado. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA, 2013).

| <b>Tipo de acessório<br/>De fixação</b> | <b>Definição</b>   |
|---|--|
| <b>Usar geometria de referêcia</b>      | Esta opção restringe uma face, uma aresta ou um vértice apenas nas direções desejadas, enquanto deixa as outras direções livres para mover. Pode-se especificar as direções desejadas em relação ao plano, eixo, aresta ou face de referêcia (planos e eixos).   |
| <b>Em faces planas</b>                  | Esta opção define restrições nas direções selecionadas, que são definidas pelas três direções principais da face plana onde as restrições estão sendo aplicadas.   |
| <b>Em faces cilíndricas</b>             | Esta opção é semelhante em face plana, exceto pelo fato de que as três direções principais de uma face de referêcia cilíndricas definem as direções de um sistema de coordenadas cilíndrico. Esta opção é muito útil, pois você pode aplicar uma restrição que permite a rotação no eixo associado na face cilíndrica. |
| <b>Em faces esféricas</b>               | Semelhante a em face plana e em face cilíndricas. As três direções principais de uma face esférica definem as direções das restrições aplicadas em um sistema de coordenadas esféricas.  |

Tabela 10 – Tipos de forças externas padrão. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA, 2013).

| <b>Tipo de força</b> | <b>Definição</b>  |
|----------------------|---|
| <b>Força</b>         | <p>Esta opção aplica forças ou momentos a faces, arestas e vértices na direção definida pela geometria de referencia selecionada (plano, aresta, face ou eixo).</p> <p>Observe que um momento só pode ser aplicado se elementos de casca forem usados. Elemento de casca tem seis graus de liberdade por nó (translações e rotações) podem assumir uma carga de momento. O elemento sólido tem apenas três graus de liberdade por nó em translações e não podem assumir uma carga de momento diretamente.</p> <p>Se precisar aplicar uma carga de momento a elementos sólidos, isto deve se representado por forças ou cargas remotas distribuídas apropriadamente.</p> |
| <b>Torque</b>        | <p>Esta opção aplica torque em torno de um eixo de referência usando a regra da mão direita. Esta opção requer um eixo que seja definido.</p>   |

análise a ser realizada. Estes elementos podem ser tetraédricos para gerar malha de geometrias sólidas ou elementos triangulares para gerar malhas em superfícies (AZEVEDO, 2013).

Uma malha com menor quantidade de elementos ou densidade, possibilita que os tempos necessários para resolução dos cálculos sejam menores. Malhas simplificadas dependem mais da qualidade da representação geométrica realizada em CAD do que sofisticadas ferramentas de geração de malha (AZEVEDO, 2013).

Segundo ISTM (apud SILVA, 2013), os elementos que serão aplicados em uma malha no SolidWorks<sup>®</sup> podem ser de cinco tipos:

- ❑ Elementos Tetraédricos de Primeira Ordem ou rascunho - Possuem quatros nós com três graus de liberdade para cada nó. Quando aplicados a geometrias curvilíneas podem não realizar o mapeamento adequado do sólido, devido às arestas e faces planas do elemento, modelam deslocamento de primeira ordem (linear) em seu volume;
- ❑ Elementos tetraédricos de Segunda Ordem ou alta qualidade - Possuem dez nós

com 3 graus de liberdade para cada nó. Podem assumir formas curvilíneas, modelam o deslocamento de segunda ordem (parabólico) em um volume, para resultados de tensão mais precisos, recomenda-se utilizar duas camadas de segunda ordem ;

- Elemento de Casca de Primeira ordem ou rascunho - Possuem três nós, sendo todos vértices com seis graus de liberdade para cada nó. Quando aplicado a formas curvilíneas podem não realizar o mapeamento adequado do sólido devido às arestas e faces planas do elemento. Modelam o deslocamento de primeira ordem (linear) ao longo das faces e arestas dos elementos;
- Elemento de Casca de Segunda Ordem ou rascunho - Possuem seis nós de extremidade e três no meio das arestas, podem assumir formas curvilíneas. Elementos de casca de segunda ordem exigem malhas menos refinadas que elementos do tipo casca de primeira ordem;

Tabela 11 – Tipos de forças externas avançadas. Fonte: (ISTM, 2009 apud SILVA, 2013).

| <b>Tipo de força</b>       | <b>Definição</b>  |
|----------------------------|---|
| <b>Pressão</b>             | Aplica pressão a uma face. Pode ser direcional e variável, como por exemplo, pressão hidrostática.                                |
| <b>Gravidade</b>           | Aplica acelerações lineares a peças montagens.  |
| <b>Força centrífuga</b>    | Aplica velocidade angular e aceleração a uma peça ou montagem.  |
| <b>Carga do rolamento</b>  | As cargas do rolamento surgem no contato entre faces cilíndricas.   |
| <b>Carga/ massa remota</b> | As cargas remotas são aquelas que normalmente são transferidas pela estrutura conectora.  |
| <b>Massa distribuída</b>   | Massas distribuídas são aplicadas a faces selecionadas para simular a massa de componentes suprimidos ou não incluídos no modelo. |

- Elemento de Viga - diferem dos elementos do tipo casca e tetraédricos. Possuem dois nós, com seis graus de liberdade para cada nó, modelam flexões, translações axiais e rotações torcionais como lineares.

Os elementos de primeira ordem normalmente são utilizados em estudos preliminares para, verificar direção das cargas, restrições ou para calcular as forças de reação. Os elementos de segunda ordem onde há interesse em um maior refinamento, como obtenção da distribuição da tensão devem empregar elementos de alta qualidade (AZEVEDO, 2013).

Normalmente os elementos do tipo casca são aplicados para gerar a malha de peças finas e de chapas metálicas (CADWORKS, 2014). Para a análise dos tubos de PVC será utilizado este tipo de elemento.

Além das características relacionadas ao tipo de elemento utilizado na malha, é necessária a compreensão dos resultados fornecidos como solução das simulações via o SolidWorks<sup>©</sup>.

## 5.5 Tensão Equivalente de Von Mises

O Software de simulação utiliza a tensão equivalente de Von Mises no escoamento para avaliar se, sob solicitação, se material irá ou não escoar. A tensão de Von Mises é utilizada para materiais dúcteis. O material começa a escoar em um local onde a tensão de Von Mises se torna igual ao limite da tensão. O SolidWorks<sup>©</sup> ainda permite a definição dos limites de tensão:  $\sigma_{vonMises}$  e  $\sigma_{limite}$  (COSMOSWORKS DESIGNER, 2008).

O critério de Von Mises pode ser definido considerando as três tensões principais como:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2}} \quad (5.1)$$

O limite de escoamento é uma propriedade dependente da temperatura, portanto, o valor especificado do limite de escoamento deve levar em consideração a temperatura do componente (COSMOSWORKS DESIGNER, 2008).

## 5.6 Análise dos Resultados

Fornecidos os parâmetros de entrada, condições de contorno, tipo de força, fixação, contato de componentes, dentre outros parâmetros, estes serão utilizados para configurar como será o comportamento da estrutura sob análise. A escolha errada ou inadequada de tais parâmetros pode gerar inconsistências nos resultados.

Além das particularidades da entrada de parâmetros, em uma simulação é necessário um entendimento completo da teoria que fornece a fundamentação do MEF de modo a evitar erros (KIM, 2011).

O SolidWorks<sup>©</sup> Simulation oferece várias gráficos como padrão, apresentados em escalas de cores, diferentes tonalidades, representando o deslocamento ou a tensão. Estes são específicas para o tipo de estudo, especificamente os estáticos. Existem alguns tipos de gráfico padrão: tensão nodal, tensão no elemento, deslocamento, deformação nodal, deformação do elemento, fator de segurança, verificação de pino ou parafusos.

O *software* também dispõe de ferramentas para auxiliar nas análises, tais como, identificação de regiões com menor fator de segurança, salientando as regiões de forma visual no desenho CAD. Permite gerar uma análise em eDrawings, animada, salientar um resultado de interesse, dentre outros recursos, como suporte para a análise dos resultados.

- ❑ O material é Linear (a tensão é linearmente proporcional ao esforço);
- ❑ As deformações podem ser mensuradas;
- ❑ As Cargas são estáticas;

Deve-se ter em mente que o MEF é um método de aproximação e seus resultados possuem limitações.

---

## Protótipo e Resultados

### 6.1 Proposta Inicial da Estrutura

O primeiro protótipo foi construído utilizando um kit robótico Mindstorms NXT da LEGO® com o intuito de avaliar a proporção das dimensões e a Fig.(28) ilustra a proposta inicial.

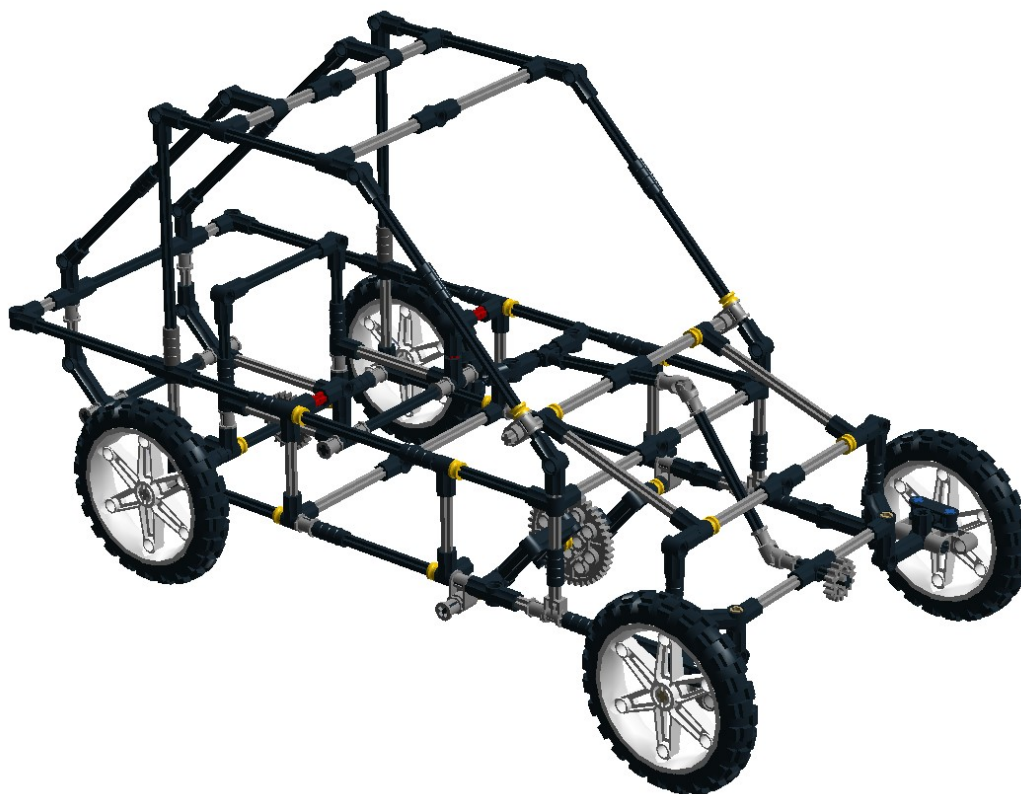


Figura 28 – Primeiro protótipo proposto para a estrutura projetada em maquete LEGO®.

Tomando como base a maquete LEGO® foi construída uma estrutura utilizando as conexões soldáveis de PVC fabricadas segundo a norma da (NBR 5648, 2006),

empregando um software *computer aided design* CAD. A estrutura utilizando os tubos e conexões de PVC pode ser visualizada na Fig.(29) em diferentes vistas.

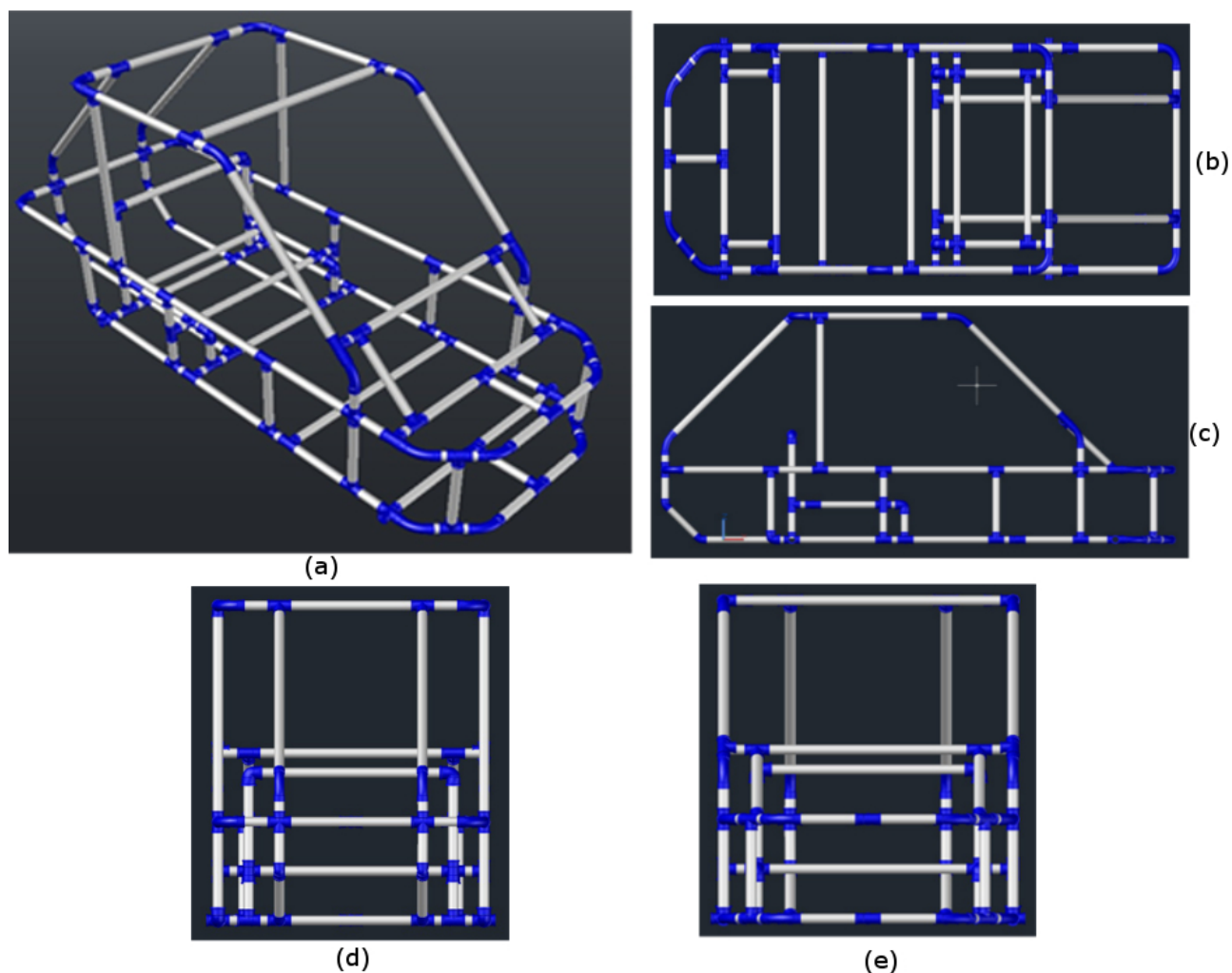


Figura 29 – Vistas do protótipo em CAD, com as conexões e tubos hidráulicos: (a) perspectiva, (b) superior, (c) lateral, (d) traseira, (e) frontal.

O protótipo tem como referência a estrutura proposta por Dinis (1996) ilustrada na Fig.(30), cujas principais dimensões são descritas na Tab. (12).

Tabela 12 – Dimensões expressos em cm para as dimensões do modelo apresentado por (DINIS, 1996).

| Compr. Máx | Largura Máx. | Altura do solo | Altura do banco | Diâmetro das rodas | a         | b         | c              | d       | e         |
|------------|--------------|----------------|-----------------|--------------------|-----------|-----------|----------------|---------|-----------|
| 230 - 240  | 100 - 110    | 20             | 40 - 50         | 43 (golfe)         | 210 - 220 | 210 - 220 | 40 - 45        | 45 - 50 | 10° - 20° |
| <b>F</b>   | <b>g</b>     | <b>H</b>       | <b>i</b>        | <b>j</b>           | <b>l</b>  | <b>m</b>  | <b>Largura</b> |         |           |
| 40 - 45    | 40 - 45      | 40 - 45        | 55 - 65         | 60 - 70            | 20        | 0 - 5     | 100 - 110      |         |           |

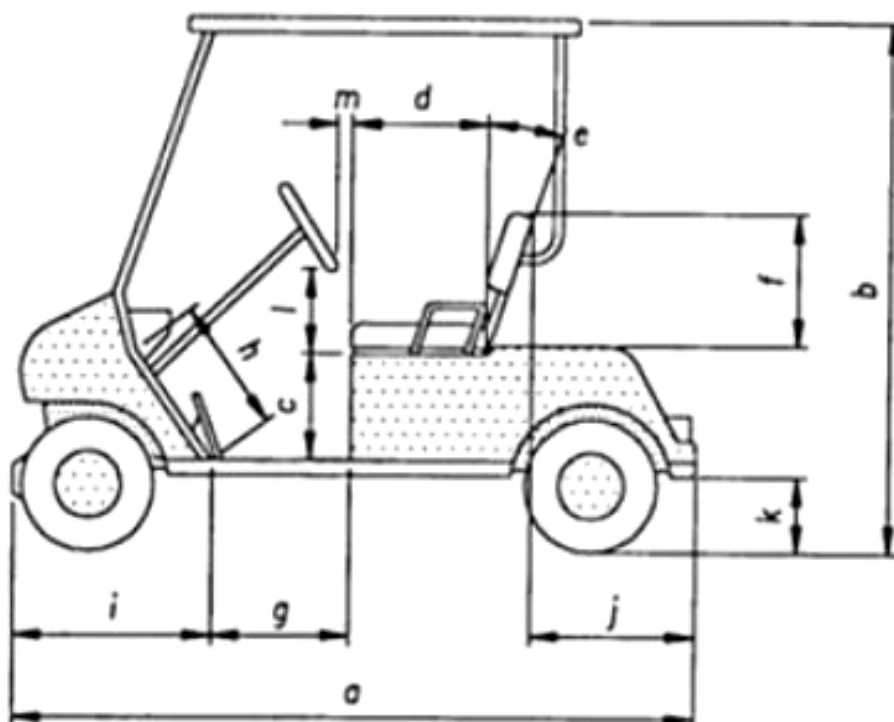


Figura 30 – Carro de golfe para dois ocupantes. Fonte: (DINIS, 1996)

## 6.2 Especificações do Chassi em PVC

O protótipo confeccionado em PVC será um veículo de pequeno porte, como o projeto realizado por Soares *et al.* (2012), que também é destinado a dois ocupantes, para trafegar dentro de instituições ou organizações, fora das vias urbanas, em ambientes empresariais ou universitários. Apresenta uma geometria simples.

O chassi do tipo *space frame* tem por finalidade o transporte ou locomoção em pequenas distâncias, em baixa velocidade. Devido à ausência de um sistema de suspensão e as características dos polímeros, sob carregamento por um longo período de tempo pode sofrer deformações permanentes (Capítulo 3). Para a definição da estrutura é realizada a análise por MEF com intuito de avaliar a rigidez da estrutura, situações de carregamento, torção dentre outros.

A geometria de um chassi tem relação direta com o comportamento estrutural, conforto, estabilidade, aceleração dentre outros fatores. Análise da rigidez torsional, pode colaborar com a estabilidade, como o desempenho nas curvas, condições sob irregularidades do piso, dentre outros. Um chassi multi-tubular, para oferecer rigidez, precisa empregar tubos de maior seção. A durabilidade do chassi tubular, está relacionada ao peso, uma vez que as juntas soldadas recebem a ação de forças e podem estar sujeitas a falhas estruturais (SANTOS, 2013).

É desejável que alguns parâmetros possam ser evitados ou controlados na estru-

tura Hibbeler (2011) afirma que, componentes estruturais que apresentam descontinuidade, tais como furos ou variação brusca de seção, quando solicitados, desenvolvem tensões e deformação não lineares nestes pontos gerando região de descontinuidade se comparada ao restante do corpo.

Além da distorção nas simulações, fruto da geometria e do tipo de malha, segundo os experimentos realizado por Leão, Deus e Alves (2013), quanto maior a quantidade de furos radiais ao longo do tubo, menor será a sua rigidez e tensão suportada pelo PVC. Assim, furos radiais ao tubo deverão ser evitados, ou pelo menos, em quantidade reduzida.

### 6.3 Comportamento do Comprimento do Tubo sob Flexão

A simulação computacional se apresenta como uma importante ferramenta na análise do comportamento estrutural, fornecendo informações para compreensão do cenário proposto o que permite a redução de tempo e custo na caracterização do comportamento de um dado material ou mesmo por possibilitar a redução na experimentação física.

Esta é empregada na escolha do tamanho dos tubos a serem utilizados na estrutura, o tubo pode fletir com seu próprio peso. Quanto maior o seu comprimento, maior será a flexão. Isto pode ser observado, experimentalmente, em uma barra de tubo de PVC que apoiada nas extremidades, tende a fletir simplesmente pela ação da força gravitacional.

Diante deste fato, surge o questionamento sobre qual a relação existente entre o comprimento do tubo e as solicitações de flexão. Para tanto, foi realizada simulação computacional, empregando uma força fixa de 400 N, distribuída ao longo de um tubo de 50 mm de diâmetro.

Considerada a variação de comprimento do tubo no intervalo [200 mm, 1200 mm], com incrementos de 100 mm, como condições de contorno foi considerado bi-engaste nas extremidades. A Fig.(31) ilustra o comportamento exponencial a medida que o comprimento do tubo foi, aumentado. Este fato é evidenciado para comprimentos acima de 600 mm.

Como o PVC não classicamente componente estrutural e considerando os resultados da Fig.(31), é adotada a medida máxima de 600 mm. Considera-se exceções de tubos com maior comprimento em casos de extrema necessidade.

Na estrutura de PVC será necessária a utilização de reforços estruturais de modo a aumentar a rigidez da estrutura, no entanto, estes utilizam formas geométricas triangulares (conceito de treliça) contudo, isto não pode ser aplicado no presente projeto,

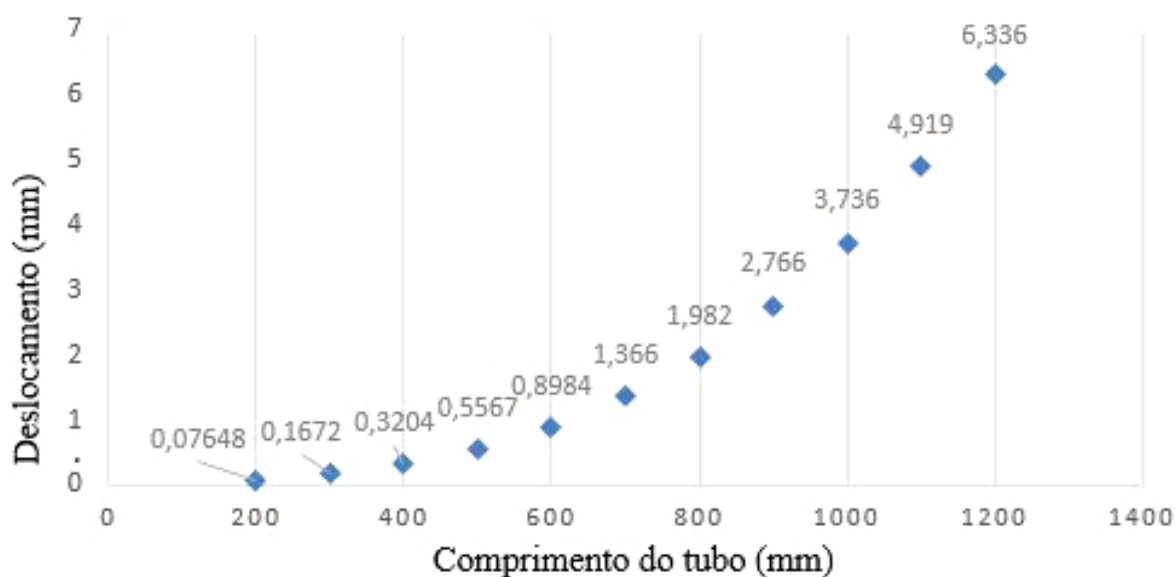


Figura 31 – Deslocamento máximo do tubo sob carregamento distribuído x variação do comprimento do tubo obtido via simulação computacional.

em virtude da quantidade limitada de conexões com ângulos de 45° e 90° limitantes do arranjo geométrico.

Também foi empregada a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT 13962:2006 (Móveis para escritório e Cadeiras) que especifica as características físicas e dimensionais para cadeiras de escritório. Os padrões adotados pela norma baseiam-se em um uso de 8 horas ao dia por pessoas com peso de até 110 kg, com altura entre 1,51 m e 1,92 m. Isto prevê conforto e ergonomia na definição das dimensões do assento, encosto, acomodação das pernas para a estrutura proposta, disposição também proposta por (TEOTÔNIO, 2011).

## 6.4 Especificação e Refinamento da Malha

De posse dos parâmetros obtidos experimentalmente, apresentados na Tab.(13), força média limite  $F_{lim} = 0.923$  kN é o deslocamento limite médio de  $\delta_{lim} = 2.718$  mm obtidos no limite da fase elástica no modo de flexão com carga concentrada.

Estes parâmetros são utilizados como base para comparação da simulação de flexão em bi apoio, empregando as mesmas condições de contorno do experimento físico.

Para a simulação computacional são consideradas duas partes: o corpo de prova, representando o tubo de PVC, e o dispositivo para a aplicação da carga, em formato de um tubo de aço, semelhantes ao utilizados nos ensaios experimentais.

Tabela 13 – Resultados experimentais obtidos em ensaios de flexão.

| Corpo de Prova                                      | Corpo de Prova - 1 | Corpo de Prova - 2 | Corpo de Prova - 3 | Corpo de Prova - 4 | Corpo de Prova - 5 | Valor Médio   |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| Carga Limite - Fase Elástica ( <i>kN</i> )          | 0,913              | 0,902              | 0,929              | 0,930              | 0,939              | <b>0,9226</b> |
| Deflexão do material sob Força Limite ( <i>mm</i> ) | 2,729              | 2,543              | 2,829              | 2,652              | 2,756              | <b>2,718</b>  |

Os parâmetros do material aplicado no PVC terá os valores obtidos experimentalmente (método e técnicas de obtenção são tratados no Capítulo 4). Para o dispositivo que transmite a força ao tubo é definida uma liga de aço carbono de maior rigidez que o tubo, os parâmetros utilizados para ambos os materiais na simulação são apresentados na Tab. (14).<sup>1 2</sup>

Tabela 14 – Parâmetros dos materiais utilizados na simulação. Fonte: SolidWorks<sup>©</sup> (2014) e o Autor.

| Tubo em Liga de Aço Carbono    |           |                   | Tubo de PVC (dados experimentais) |        |                   |
|--------------------------------|-----------|-------------------|-----------------------------------|--------|-------------------|
| Propriedade                    | Valor     | Unidade           | Propriedade                       | Valor  | Unidade           |
| Módulo elástico                | 2,00E+11  | N/m <sup>2</sup>  | Módulo elástico <sup>1</sup>      | 1800   | N/m <sup>2</sup>  |
| Coefficiente de <i>Poisson</i> | 0,32      | N/A               | Coefficiente de <i>Poisson</i>    | 0,3825 | N/A               |
| Módulo de cisalhamento         | 7,60E+10  | N/m <sup>2</sup>  | Módulo de cisalhamento            | 866,7  | N/m <sup>2</sup>  |
| Massa específica               | 7800      | Kg/m <sup>3</sup> | Massa específica                  | 1300   | Kg/m <sup>3</sup> |
| Resistência à tração           | 482549000 | N/m <sup>2</sup>  | Resistência à tração              | 40,7   | N/m <sup>2</sup>  |
| Limite de escoamento           | 248168000 | N/m <sup>2</sup>  | Limite de escoamento <sup>2</sup> | 40     | N/m <sup>2</sup>  |
| Condutividade térmica          | 30        | W/(m·K)           | Condutividade térmica             | 0,147  | W/(m·K)           |

A disposição geométrica das peças na modelagem computacional é disposta conforme o experimento físico, no entanto, a geometria da conexão é simplificada de modo a evitar comprometimento na geração da malha (simplificações de geometrias são discutidas no capítulo 6). Para o posicionamento e restrições quanto à disposição das partes, tubo e conexão é empregado o recurso de montagem disponibilizado pelo SolidWorks<sup>©</sup>.

As condições de contorno são exibidas na Fig.(32), onde o tubo está apoiado por suas extremidades, representadas em verde. Em magenta, observa-se a força considerada pontual é aplicada ao cilindro atuador o qual irá transmitir a carga da força ao tubo.

<sup>1</sup>Obtido Experimentalmente<sup>2</sup>Segundo Callister.Jr. e Rethwisch (2012) 45 MPa, será adotado 40

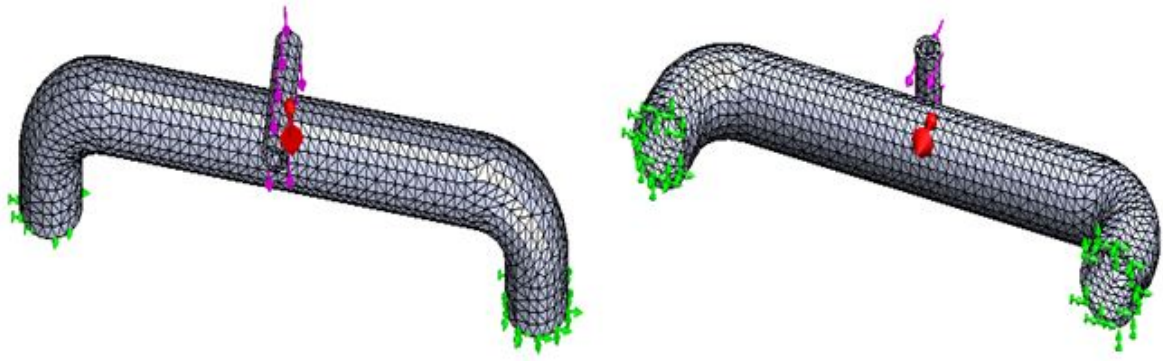


Figura 32 – Representação das condições de contorno do ensaio experimental realizadas via simulação computacional empregando MEF.

Para que malhas do tipo triangular ofereçam valores de boa convergência, é necessário um maior refinamento quando comparado a outros tipos de elementos para a malha. Assim, são empregados dois tipos de elementos triangulares, tipo casca, fruto da característica geométrica do tubo.

A composição da malha utiliza os elementos exibidos na Fig. (33), de acordo com os mesmos parâmetros analisados por Silva (2010), cujas características são:

- *Draft ou Rascunho*: Malha comumente utilizada para uma rápida avaliação, não sendo gerada com base em curvatura. Seu modo padrão gera uma malha utilizando elementos em forma de um triângulo linear, com três arestas.
- *High ou Fina*: malha de alta qualidade, gerada com base em curvatura, onde os pontos jacobianos são o número de pontos a serem utilizados na distorção dos elementos tetraédricos. E seu modo padrão utiliza 6 nós, três por arestas, gerando elementos de casca triangular parabólico.

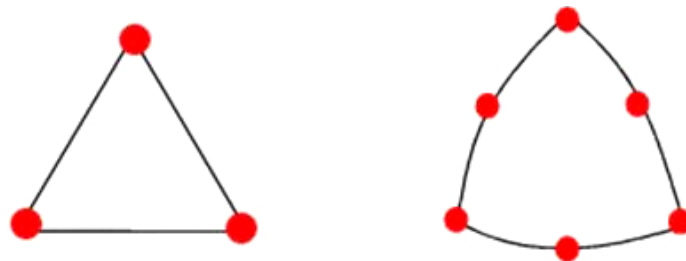


Figura 33 – Elementos triangular linear e elemento triangular parabólico utilizados na geração das malhas em modo *Draft e High*. Fonte: (SILVA, 2010)

Para cada tipo de malha gerada, seja pela variação no tamanho ou forma do elemento, são comparados os resultados da simulação e os experimentais sempre é

empregada uma força constante e idêntica ao experimento físico. Os resultados para o tipo de malha *Draft* são exibidos na Tab.(15) bem como a convergência ao experimento físico.

Tabela 15 – Resultados obtidos com elementos em modo *Draft* utilizando a definição do material obtida experimentalmente.

| Ensaio | Dimensão do Elemento (mm) | Nº de Elementos | Deslocamento Máximo PVC Ensaio (mm) | Tensão Máxima de <i>von Mises</i> PVC Ensaio (MPa) | Deslocamento relativo à malha PVC Ensaio High | Von Mises relativo à Malha High PVC Ensaio |
|--------|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|--|---|--|
| 1      | 8 mm                      | 7569            | 1,743                               | 8,956  | <b>73%</b>                                    | <b>64,13 %</b>                             |
| 2      | 7 mm                      | 9493            | 1,764                               | 8450   | <b>70%</b>                                    | <b>64,90 %</b>                             |
| 3      | 6 mm                      | 13944           | 1,808                               | 9,742  | <b>74%</b>                                    | <b>66,52 %</b>                             |
| 4      | 5 mm                      | 22078           | 1,889                               | 11,41  | <b>75%</b>                                    | <b>69,50 %</b>                             |
| 5      | 4 mm                      | <u>47797</u>    | 1,970                               | 11,95  | <b>79%</b>                                    | <b>72,48 %</b>                             |
| 6      | 3 mm                      | 97576           | 2,134                               | 117,8  | <b>85%</b>                                    | <b>78,51 %</b>                             |
| 7      | 2 mm                      | 310473          | 2,2622                              | 29,21  | <b>89%</b>                                    | <b>83,23 %</b>                             |

O resultado de melhor convergência na adoção da malha *Draft*, diante da deformação máxima, obtida via simulação computacional, atinge cerca de 70% dos valores reais obtidos experimentalmente Tab.(15).

Dentre os ensaios executados aplicando as duas configurações diferentes para gerar a malha, a melhor aproximação dos resultados ocorreu na utilização da malha *High*, ficando a deformação máxima obtida via simulação computacional estando em cerca de 92 % dos valores reais obtidos experimentalmente(Tab.(16)).

Tabela 16 – Resultados obtidos com elementos em modo *High* utilizando a definição de material obtida em ensaio experimental

| Ensaio | Dimensão do Elemento (mm) | Nº de Elementos | Deslocamento Máx. (mm) | Tensão Máx. <i>von Mises</i> (MPa) | Deslocamento percentual (experimento) |
|--------|---------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1      | 8 mm                      | 6779            | 2,381                  | 23,63                              | <b>87,60%</b>                         |
| 2      | 7 mm                      | 12756           | 2,668                  | 30,03                              | <b>98,16%</b>                         |
| 3      | 6 mm                      | 17059           | 2,505                  | 25,11                              | <b>92,16%</b>                         |
| 4      | 5 mm                      | 23346           | 2,510                  | 38,19                              | <b>92,35%</b>                         |
| 5      | 4 mm                      | 49840           | 2,505                  | 38,21                              | <b>92,16%</b>                         |
| 6      | 3 mm                      | 148434          | 2,599                  | 46,59                              | <b>95,62%</b>                         |
| 7      | 2 mm                      | 310882          | 2,564                  | 55,61                              | <b>87,60%</b>                         |

Na adoção deste tipo de malha a redução do tamanho do elemento para dimensões inferiores a 4 mm já não oferece resultados representativos para a convergência tanto do deslocamento, quanto da tensão máxima de von Mises.

Dentre os resultados para a malha do tipo *High* a utilização do elemento com 7 mm é o de melhor convergência, apresentando um deslocamento de 2,668 mm enquanto que o experimental é 2,718 mm o que representa 98,16% de convergência no deslocamento do tubo de PVC em relação ao experimento físico.

À medida que o tamanho do elemento utilizado para geração da malha tem suas dimensões reduzidas para cada malha *Draft* e *High* têm-se um comportamento específico.

- *Draft*: à medida que o tamanho do elemento é reduzido, se observa uma melhora na aproximação da distensão gerada pela malha em relação ao valor anteriormente obtido com o elemento em dimensões maiores,
- *High*: a redução no tamanho do elemento, necessariamente não irá gerar valores com melhor aproximação quando comparado com resultados obtidos com o elemento de maiores dimensões.

O comportamento para para cada tipo de malha quanto a convergência na redução do tamanho do elemento é representado na Fig.(34).

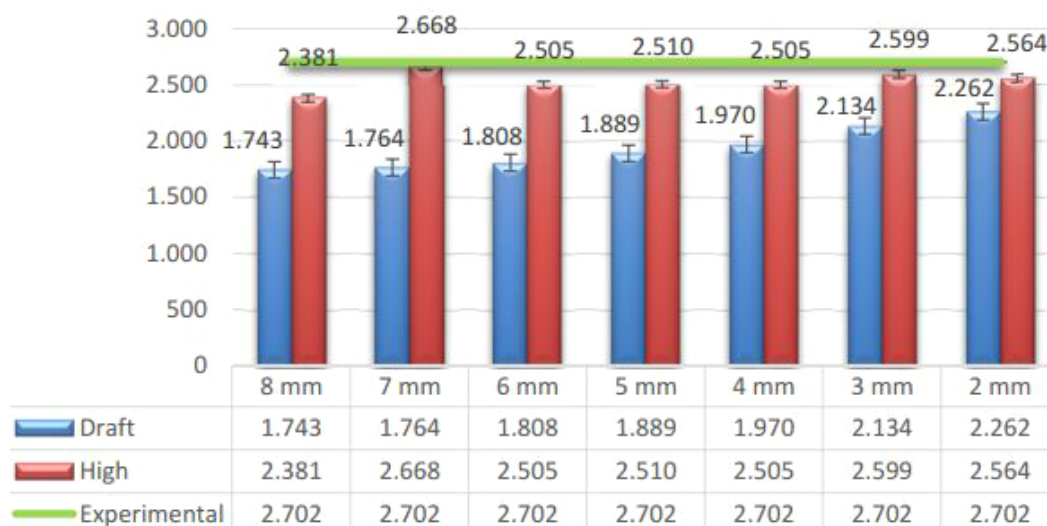


Figura 34 – Deslocamento devido variação do tamanho do elemento da malha sob força constante.

A Fig.(35) ilustra os resultados de uma das simulações.

O relacionamento ao tamanho do elemento bem como a quantidade de pontos jacobianos adotados na geração da malha também é objeto de análise no trabalho de Júnio (2014) onde apenas a redução do elemento não necessariamente gera resultados melhores.

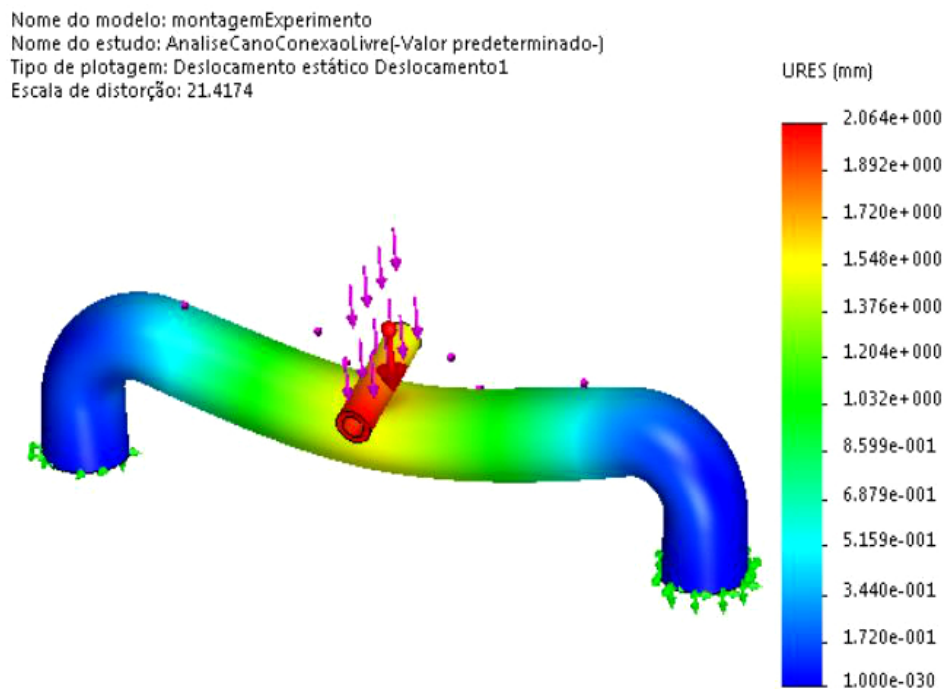


Figura 35 – Simulação computacional do deslocamento máximo em flexão.

## 6.5 Desenvolvimento Ajustes e Validações Preliminares dos Protótipos

### 6.5.1 Primeiro Protótipo e Suas Principais Características

Tomando como base as dimensões e formas definidas, foi proposta uma primeira estrutura a fim de avaliar seu comportamento mecânico de modo a identificar as partes do chassi que poderiam necessitar de reforço estrutural, além de avaliar o comportamento geral das partes estruturais.

A estrutura apresentada na Fig.(36) ilustra a simulação computacional da estrutura, nas dimensões projetada em CAD via MEF, utilizando um estudo estático com o software SolidWorks<sup>®</sup> *Simulation*. São aplicadas forças distribuídas na base do assento do banco, encosto do banco, região frontal do chassi, simulando um motor ou bateria.

Os níveis de deformação gerado pela estrutura foram considerados indesejáveis, e ponto de vista estrutural com elevada flexão em regiões tais como, travessas, encosto do banco. A deformação é ilustrada por graduações de cores com legenda à direita da figura especificando cada cor.

Para minimizar este problema, seria necessário a utilização de muitos reforços estruturais elevando o custo da estrutura, em virtude do maior custo das conexões em relação aos tubos.

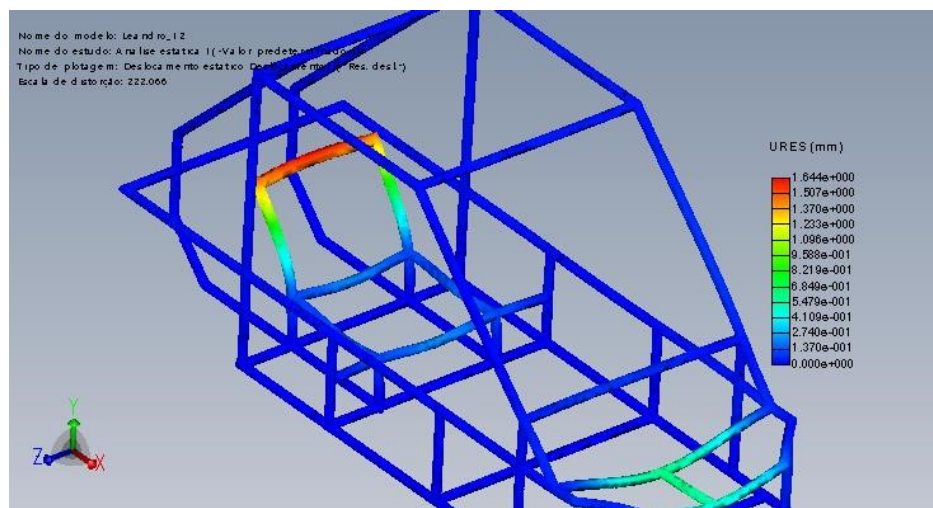


Figura 36 – Análise estática da estrutura inicial sob carregamento distribuído (região do banco e frontal superior).

Na ocasião em que foi proposta a primeira estrutura não eram conhecidos os resultados relação do comprimento do tubo em flexão (Sessão 6.3).

Devido a grande deformação da estrutura Fig.(36) a proposta foi descontinuada, dando maior importância ao reforço estrutural de modo a aumento da rigidez estrutural, além deste aspecto, é esperada a utilização de referências dimensionais que corroborem com a ergonomia da estrutura.

### 6.5.2 Segundo Protótipo e Suas Principais Características

A segunda proposta toma como base o carro definido por (DINIS, 1996) onde os condutores ficam sentados como se estivessem em uma cadeira. Para tanto, foram utilizadas as referências para a confecção de móveis NBR 13962 (2006) e NBR 14006 (2008) as quais implementam fatores ergonômicos. Para as dimensões não definidas pelas normas, foi utilizado o cálculo definido por (M; BOSKER, 1979 apud IIDA, 2005) que especifica as dimensões de uma pessoa sentada segundo a sua altura.

Além do amparo fornecido pelas Normas, as dimensões são adotadas outras condições que colaboram para aumento da rigidez da estrutura, como:

- ❑ Deve ser priorizada a utilização de tubos com menos de 600 mm principalmente na base da estrutura. O embasamento utilizado para esta definição provém da relação do comprimento em a flexão (Seção 6.3);
- ❑ Na ocorrência de mais de uma conexões em sequência, que elas estejam dispostas uma ao final da outra sem a existência de espaço entre as conexões. Pois, existe um incremento de massa nesta região (Tubo+Conexão);

- ❑ Comprimento dos tubos utilizados devem ter medidas inteiras o que colabora com o processo de corte e montagem da estrutura.
- ❑ Deve ser priorizada a simetria, evitando o deslocamento do centro de massa da estrutura quando comparada em relação a uma face e outra;

Tomando como base os parâmetros anteriores foi proposta a estrutura exibida na Fig.(37).

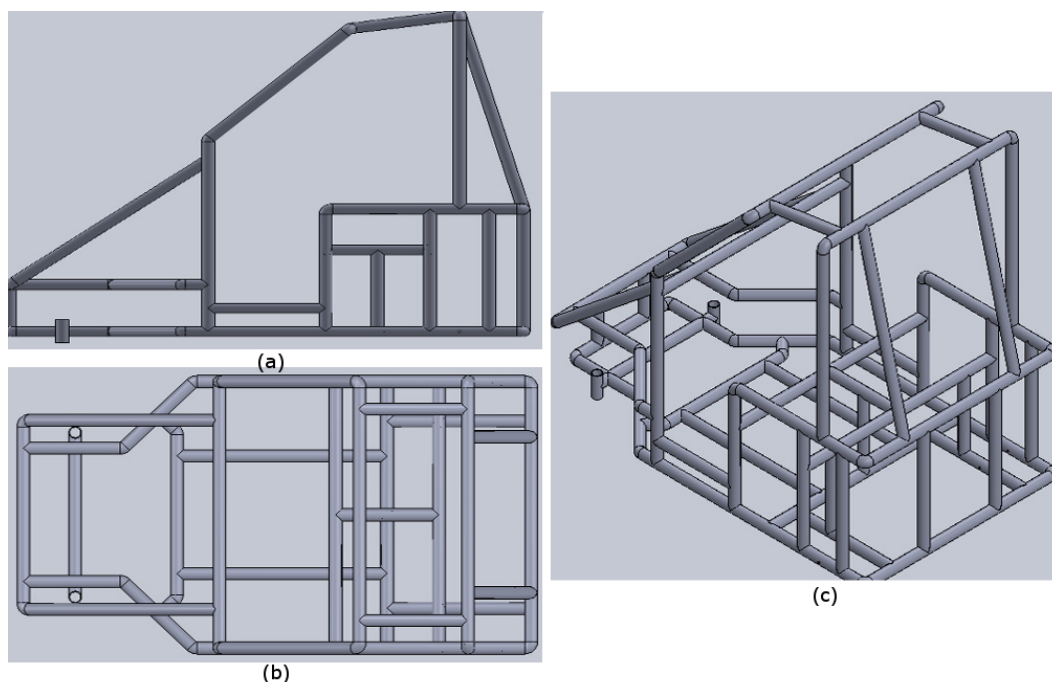


Figura 37 – Segundo protótipo proposto segundo dimensões das NBR's (a) vista Lateral, (b) Vista Superior, (c) Vista Isométrica.

### 6.5.3 Terceiro Protótipo e Suas Principais Características

O Terceiro Protótipo, originou de alterações do segundo protótipo, que possuem como motivação a adoção de um sistema automatizado de tração, conforme o seguinte:

- ❑ A altura da frente da estrutura foi aumentada de modo a gerar mais espaço interno, na adoção de um motor, será disposto na região frontal.
- ❑ A travessa lateral que sobe da roda traseira ao teto foi mudada de local a fim de reduzir o tamanho livre do tubo o que colabora na redução da flexão.
- ❑ A projeção do teto teve um prolongamento, para tanto se fizeram necessárias modificações na frente da estrutura para permitir o fechamento frontal que necessitou de um ângulo maior que  $45^\circ$  e menor de  $90^\circ$ .

- ❑ As travessa frontal foi deslocada para trás eliminando a conexão do tipo cruzeta existente na parte frontal por uma conexão do tipo Tê, fruto do valor econômico superior aos demais tipos de conexão e sua difícil acessibilidade.
- ❑ O ângulo de entrada das rodas dianteiras permite girar  $23.85^\circ$  em relação à estrutura.

A estrutura com as alterações citadas anteriormente implementadas é representada na Fig.(38).

Considerada a estrutura Fig.(38), com um carregamento na região frontal e assento do banco é observada uma expressiva deformação (Fig.(39)).

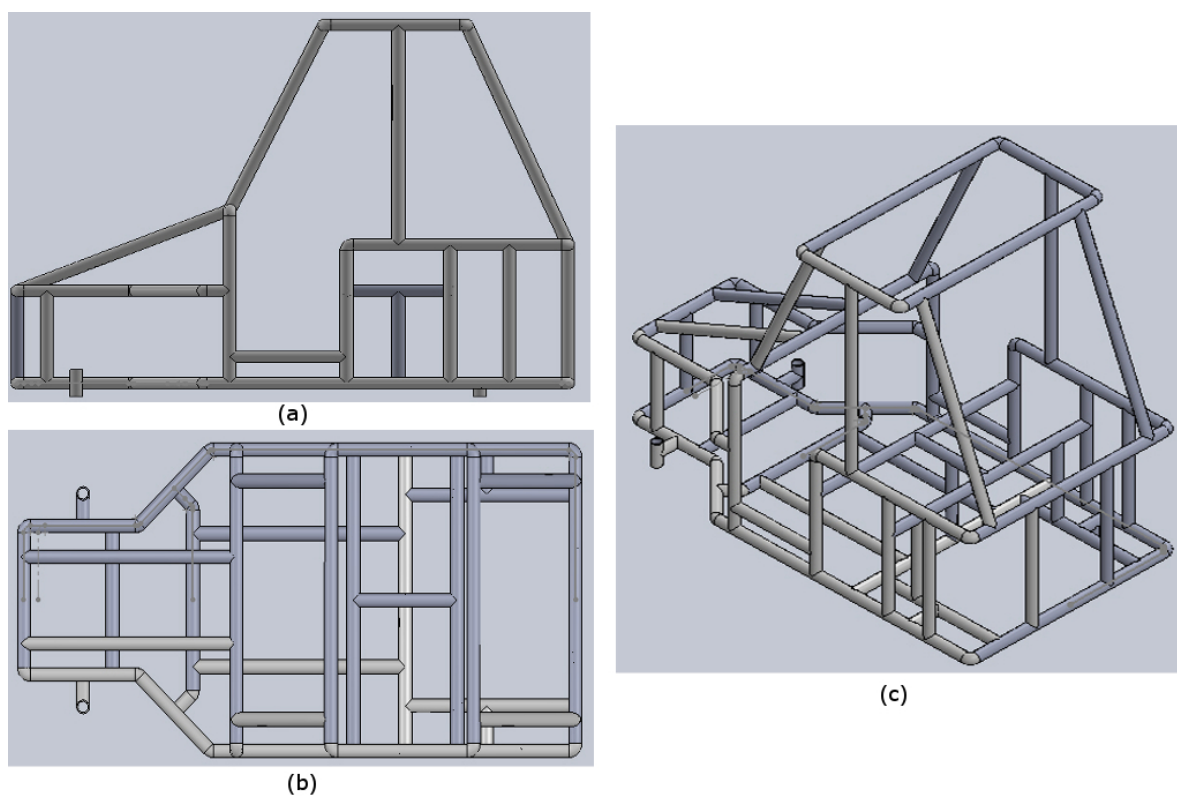


Figura 38 – Terceiro protótipo proposto(a) vista Lateral, (b) Vista Superior, (c) Vista Isométrica em amarelo reforços adicionado.

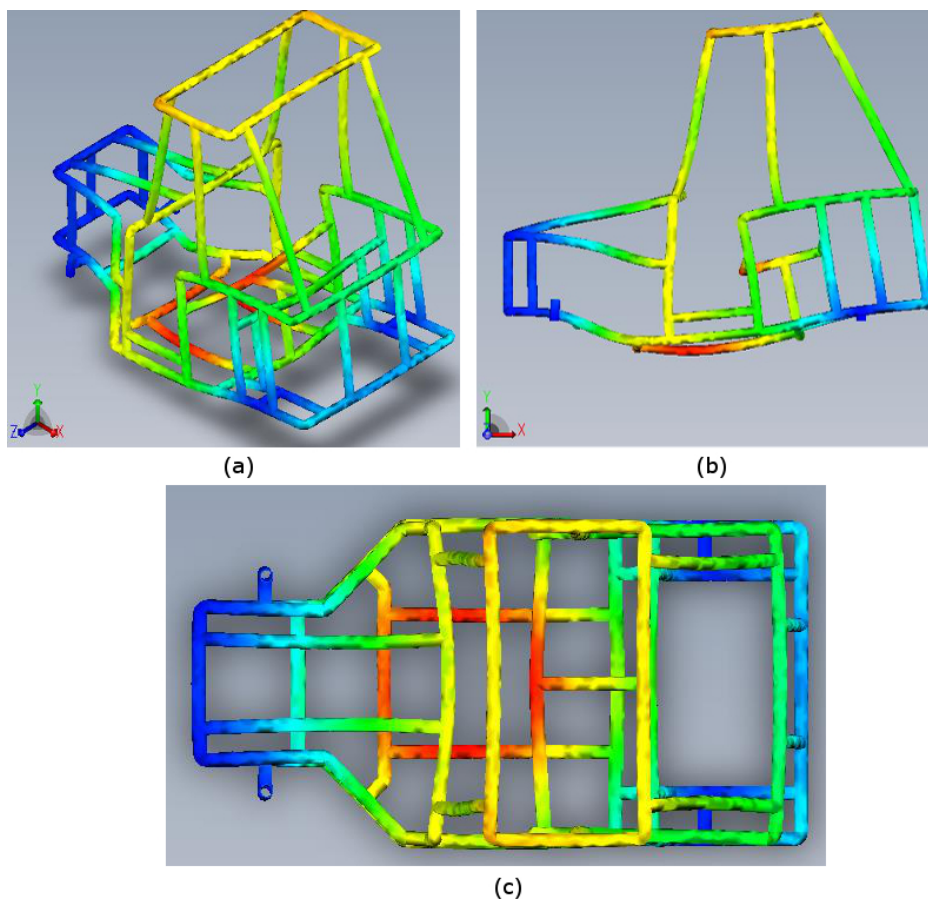


Figura 39 – Terceiro protótipo sob carregamento frontal, sobre o banco e na parte traseira.(a) Vista Isométrica, (b) Vista Lateral, (c) Vista Superior.

#### 6.5.4 Quarto Protótipo e Suas Principais Características

O quarto protótipo surge como uma evolução do terceiro, caracterizado pela necessidade de reforços estruturais em sua parte frontal, diante da deformação observada na travessa dianteira. A nova estrutura é ilustrada na Fig.(40).

A estrutura da Fig.(40) é a estrutura adotada como base para especificação dos limites de carga por região e análise de torção. Os parâmetros para as análises são adotados segundo os resultados da seção(6.4). Isto auxilia a definição das propriedades do material e especificação do tamanho do elemento utilizado na malha.

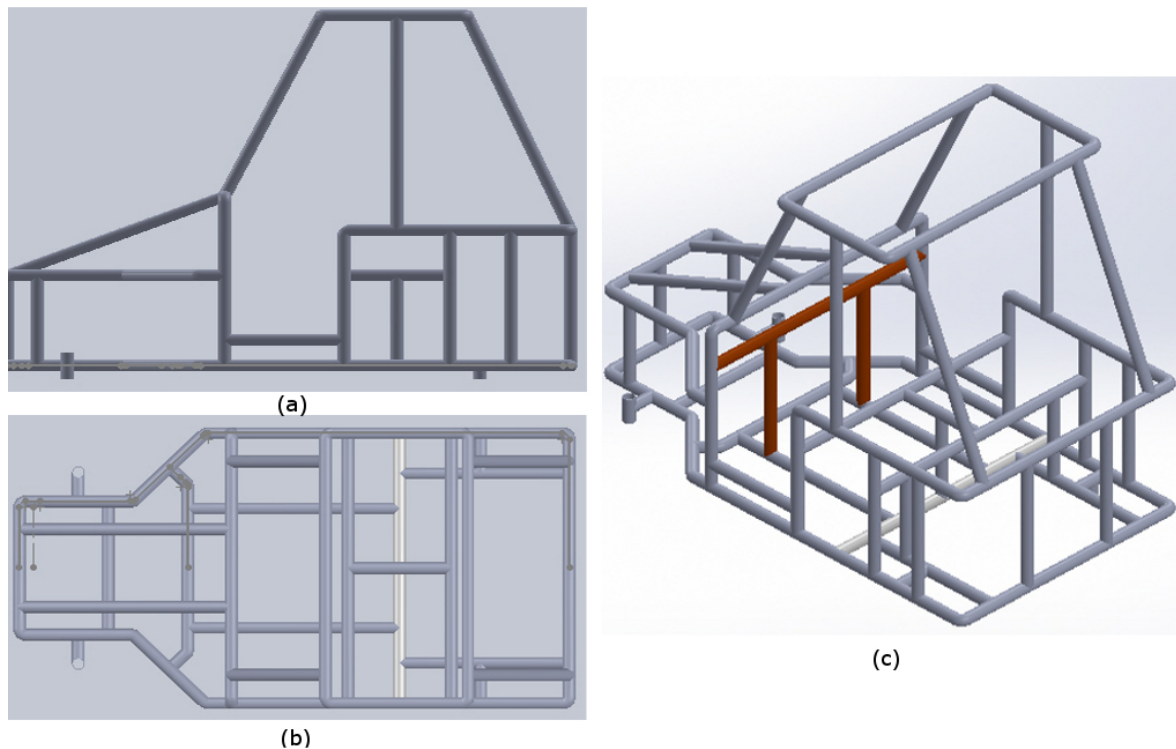


Figura 40 – Quarto protótipo (a) vista Lateral, (b) Vista Superior, (c) Vista Isométrica.

## 6.6 Definição dos Casos de Simulação e Condições de Contorno Consideradas

Para as simulações foram utilizados diferentes casos de carregamento, sendo que a aplicação das forças acontecerá em regiões específicas da estrutura. Foi avaliado o comportamento da estrutura sob torção e carregamento em diferentes configurações.

As regiões que receberão os carregamentos (aplicação de força) foram determinadas em função do caso e da configuração adotada. As regiões onde são considerados os carregamentos são: a região frontal da estrutural (destinada ao carregamento que representa um sistema motriz), o assento do banco e a região de carregamento traseira (destinada ao transporte de uma dada carga). A Fig.(41) destaca as regiões de carregamento, utilizadas nas simulações, onde as regiões que recebem a atuação de um força tem seus elementos destacados segundo cada região.

A intensidade da força aplicada em cada uma das regiões na Fig.(41) possui sua intensidade especificada segundo:

- ❑ Massa dos passageiros no intervalo [500 N, 1800 N](Região Carregamento do Banco);
- ❑ Sistema Motriz 700 N (Região Carregamento Frontal);

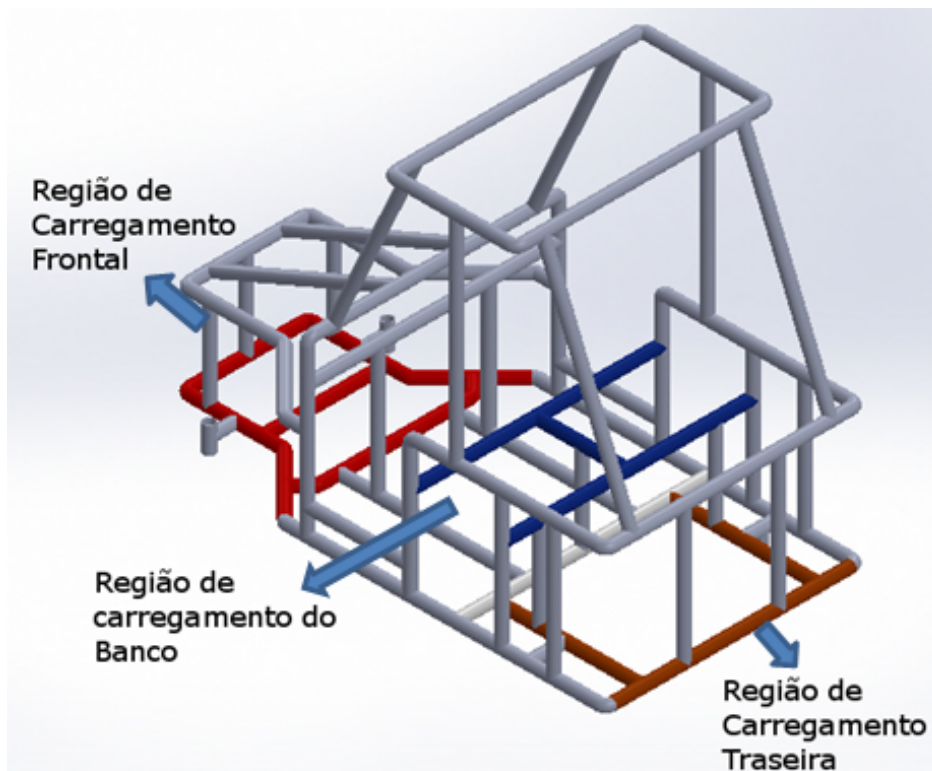


Figura 41 – Regiões de carregamento nas cores: vermelho (frontal), em azul (banco) e amarelo (traseira).

- ❑ Carga traseira transportada 500 N (Região de Carregamento Traseira);
- ❑ Força que simula a torção da estrutura 600 N (Sobre as regiões de fixação das rodas que para simplificar serão denominadas simplesmente rodas);

As simulações foram realizadas adotando casos de utilização da estrutura, com possibilidade de variações no carregamento nos casos, Estas variações serão chamadas de configuração de carregamento. As variações tiveram como finalidade, avaliar o comportamento estrutural diante de diferentes condições de carregamento, identificando, carregamento máximo e relações entre carregamentos e o comportamento da estrutura. Os dois casos avaliados são descritos abaixo.

- ❑ Caso-1 de Carregamento da Estrutura: Considerando a variação de peso dos condutores num intervalo [500 N, 1800 N] que a estrutura possui um sistema motriz situado na parte frontal, com ou sem carregamento traseiro (carga), este caso é denotado por  $Cc$ .
- ❑ Caso-2 de Torção da Estrutura: Considera a torção frontal e a torção traseira, com a estrutura totalmente ou parcialmente carregada. É considerada a massa do sistema motriz, esta caso é denotado por  $Ct$ .

Para todos os casos foi considerado um carregamento na região do assento do banco, cuja intensidade da força varia no intervalo [500 N, 1800 N] com incremento de 100 N. A Fig.(42) ilustra as regiões que sofreram a maior deformação, travessa frontal-1 ( $T_{F1}$ ), travessa frontal-2 ( $T_{F2}$ ), Travessa Frontal do Banco ( $T_{B1}$ ) e Travessa Superior 1 ( $T_{S1}$ ).

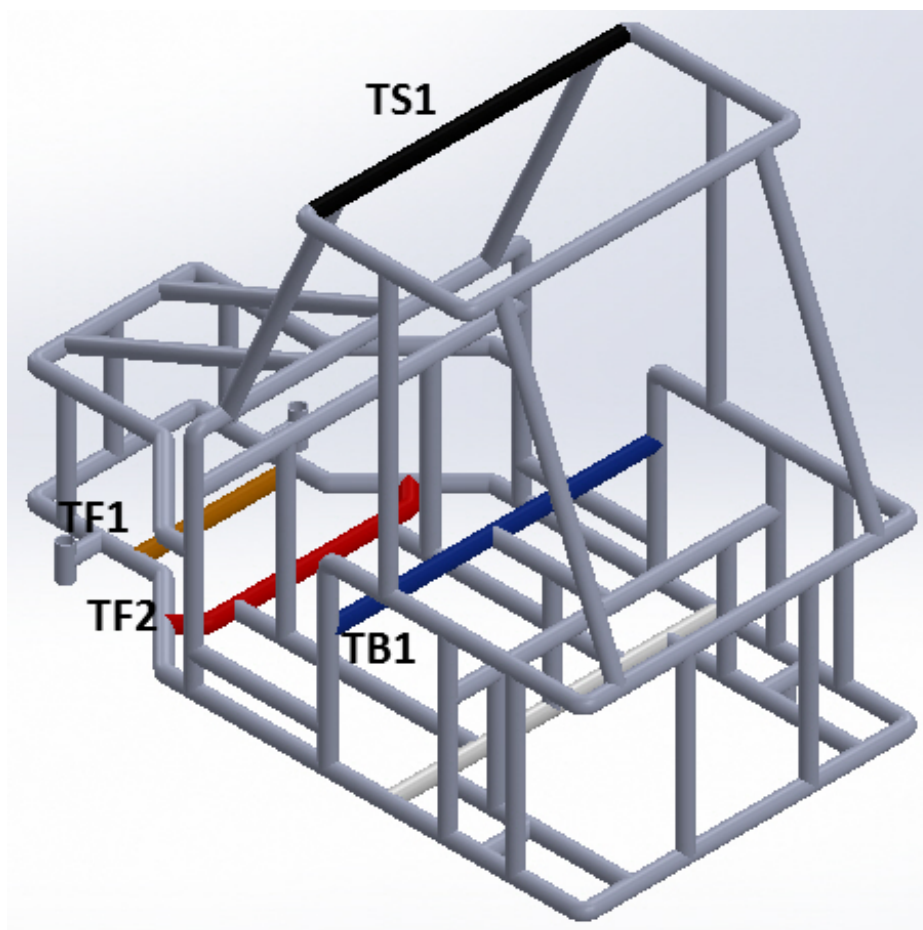


Figura 42 – Regiões de maior deformação representada nas cores: Amarela - Travessa Frontal 1 ( $T_{F1}$ ), Vermelho - Travessa Frontal ( $T_{F2}$ ), Azul - Travessa Frontal do Banco ( $T_{B1}$ ) e Preto - Travessa Superior 1 ( $T_{S1}$ ).

As condições de contorno no caso  $Cc$  consideram fixação das rodas dianteira e traseira. A especificação das forças e regiões de aplicação são descritas abaixo:

1. Configuração - 1: O carregamento é disposto em três regiões da estrutura. Aplicado até a **segunda travessa frontal**  $T_{F2}$  (sistema de tração), sobre a região do banco [500 N, 1800 N] (carregamento traseiro), esta configuração é denotada  $Cc_{c1}$ ;
2. Configuração - 2: O carregamento é disposto em três regiões da estrutura. Aplicado até a **primeira travessa frontal**  $T_{F1}$  (sistema de tração) sobre a região do

banco [500 N, 1800 N] traseiro. Esta configuração é denotada por  $Cc_{c2}$ ;

3. Configuração - 3: O carregamento é disposto em duas regiões da estrutura. Aplicado até a **primeira travessa frontal**  $T_{F1}$  (sobre a região do banco) [500 N, 1800 N], esta configuração é denotada por  $Cc_{c3}$ ;

Para cada uma das configurações  $Cc$  a força foi aplicada de duas formas por elemento nas regiões de carregamento ou de forma distribuída nas regiões de carregamento. O caso  $Cc$  possui três variações de carregamento:

- $F_{De}$  Força distribuída por elemento;
- $F_{Dr}$  Força distribuída por região de carregamento;

Para o cenário de torção  $Ct$  foram realizadas simulações segundo as configurações de torção frontal e traseira segundo especificações abaixo:

- Torção Frontal: As rodas traseiras são consideradas engastadas são aplicadas forças transversais de sentido oposto nas rodas dianteiras, o módulo (600 N). Esta configuração foi denotado por  $Ct_{c1}$ ;
- Torção Traseira: As rodas dianteira foram engastadas e são aplicadas forças transversais de sentido oposto nas rodas traseiras, de mesmo módulo (600 N). Esta configuração é denotado por  $Ct_{c2}$ ;

A Fig.(43) representa os cenários utilizados nas simulações de torção.

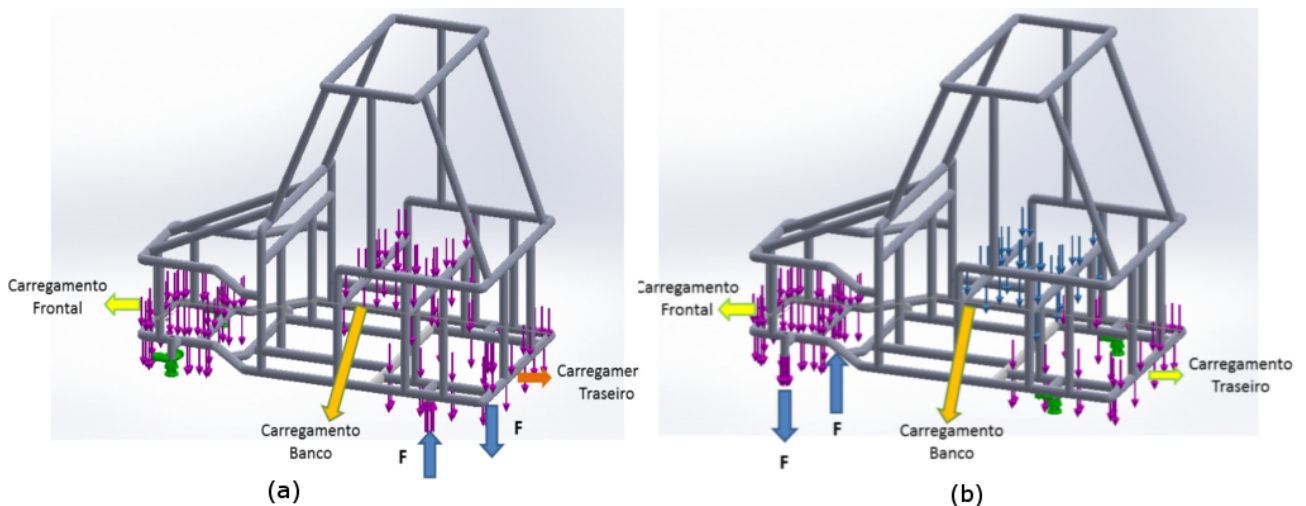


Figura 43 – Configuração de Torção:(a) Traseira (b) Frontal.

Para as simulações foi utilizado um computador com disponibilidade exclusiva durante as simulações, com as seguintes configurações:

- Processador Xeon E5-2650L 0 1.8Gz (2 Processadores);
- Memória RAM de 16 GB;

Para os critérios de falha foi adotado Fator de Segurança (FOS) segundo a tensão de cisalhamento máxima estando o limite superior para o fator de segurança definido como 5. Também foi utilizada a tensão de vonMises em relação a tensão de escoamento do material.

Os resultados obtidos nas simulações são discutidos na próxima sessão de modo a avaliar a deformação, tensão e fator de segurança da estrutura nos diferentes casos e suas configurações.

## 6.7 Análise da Estrutura diante de Carregamento

O caso  $Cc$  é caracterizado por três variações de carregamento cada uma delas com uma configuração específica  $Cc_{c1}$ ,  $Cc_{c2}$  e  $Cc_{c3}$  conforme apresentado na sessão (6.6).

As diferentes formas de aplicação da força em uma região de carregamento procura auxiliar na compreensão do comportamento da estrutura. Em um primeiro contexto, são simuladas as variações de carregamento do cenário de utilização  $Cc$  aplicando as condições de contorno especificadas na sessão(6.6).

A região que apresentou maior deformação empregando a configuração  $Cc_{c1}$  com força aplicada segundo  $F_{De}$ , foi a travessa frontal superior  $T_{S1}$ . Este comportamento foi observado para todos os carregamentos acima de 600 N. Para valores menores, que 600 N a travessa frontal  $T_{F2}$  foi quem apresentou a maior deformação.

A Fig.(44) exhibe as deformações obtidas via simulação computacional para as diferentes intensidades de carregamentos na configuração  $Cc_{c1}$

Para  $Cc_{c2}$ , a região que apresentou maior deformação foi a travessa frontal do banco, para todas as intensidades de carregamento utilizadas nas simulações. A Fig.(45) apresenta a relação e valores dos deslocamentos por região, onde é possível observar que houve deformação apenas em  $T_{B1}$ .

O deslocamento máximo observado na configuração  $Cc_{c1}$  em relação a configuração  $Cc_{c2}$  possui diferenças quanto à região de ocorrência apesar de empregarem as mesmas intensidades de carregamento. As diferenças são devido ao fato da realização do deslocamento da carga frontal da segunda travessa frontal  $T_{F2}$  para a primeira travessa frontal  $T_{F1}$ . Isto colabora com a redução da intensidade do deslocamento quando comparado com o cenário de carregamento a  $Cc_{c1}$ .

Um terceiro grupo de simulações é realizado segundo a configuração  $Cc_{c3}$  cujos resultados são apresentados na Fig.(47). As deformações na configuração  $Cc_{c3}$  não

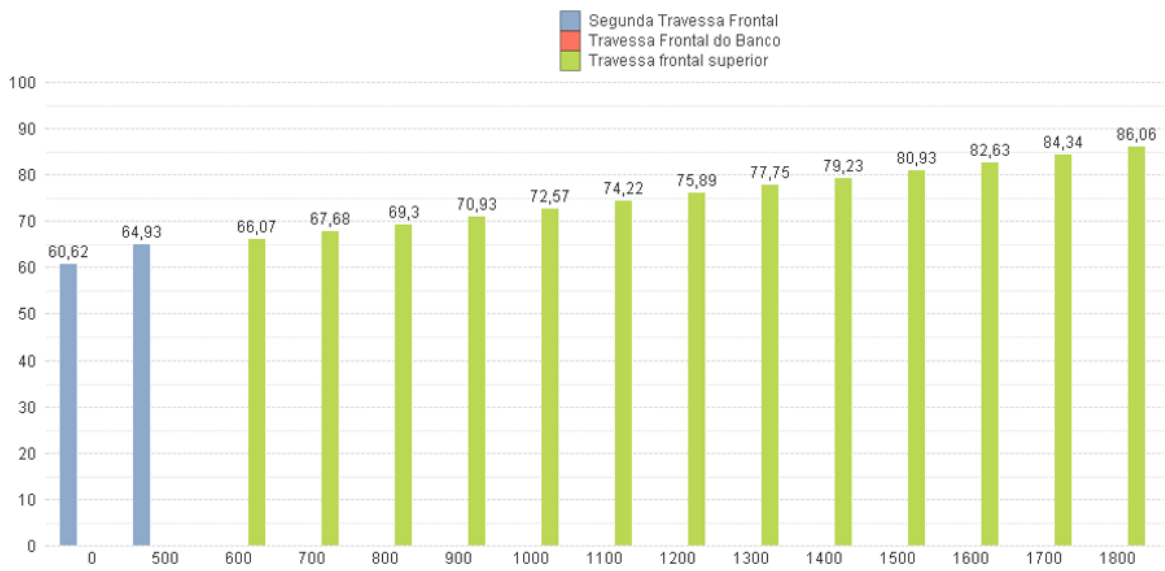


Figura 44 – Deformações máximas para o caso  $C_c$  na configuração  $C_{c1}$  com força aplicada por elemento.

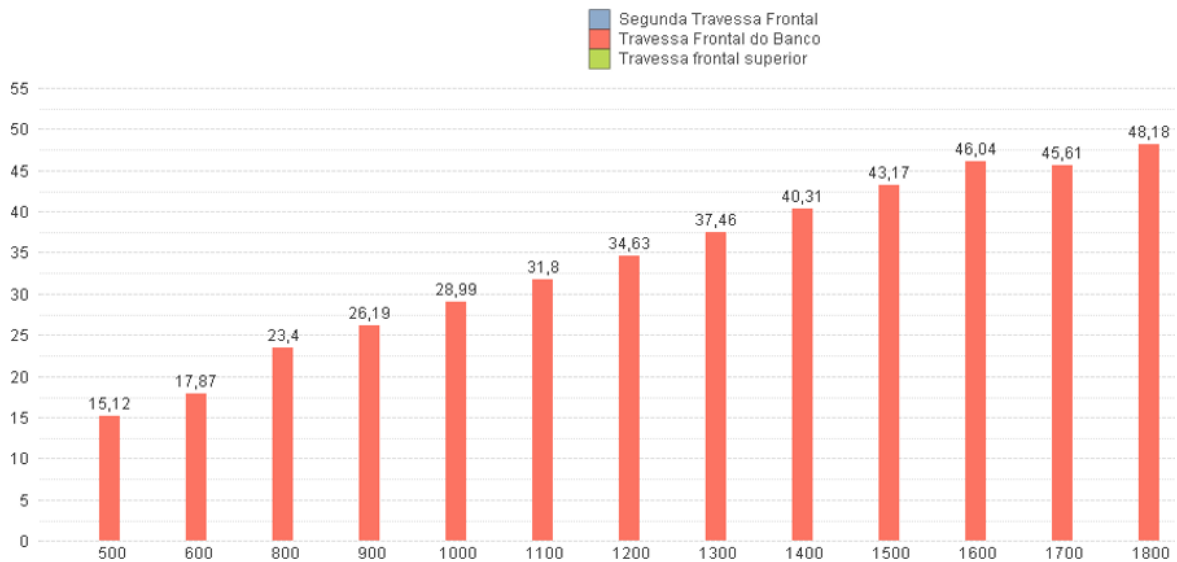
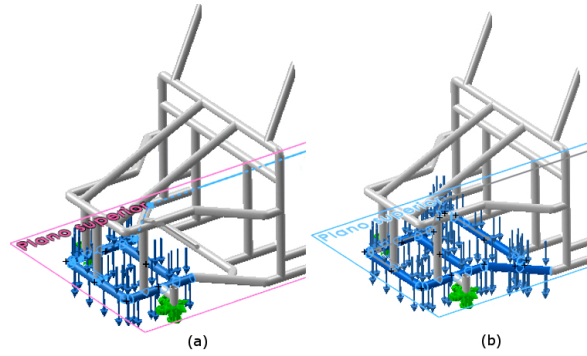
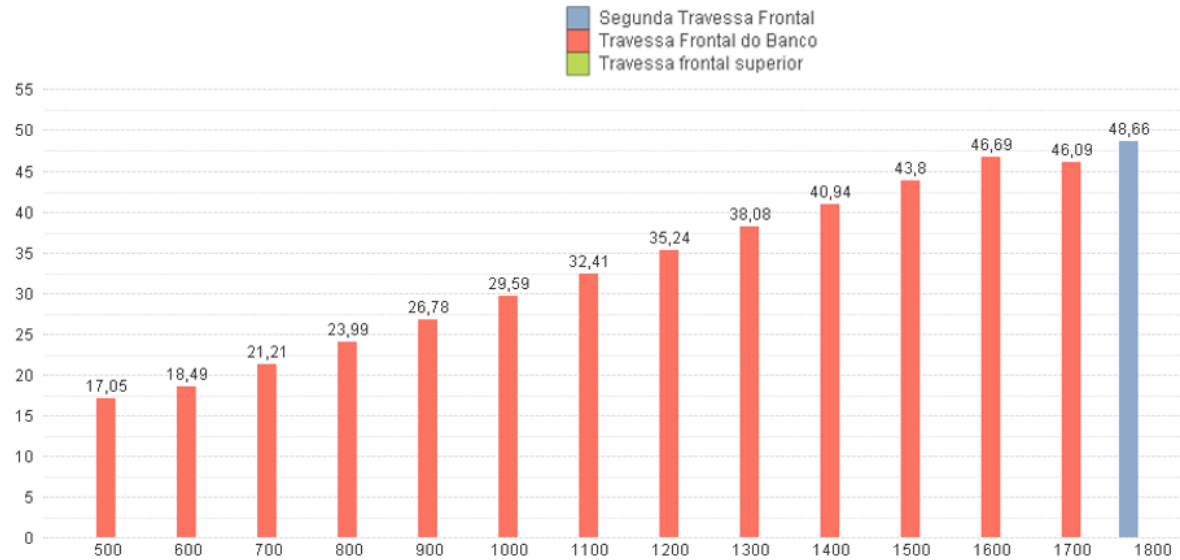


Figura 45 – Deformações máximas para  $C_c$  na configuração  $C_{c2}$  com força aplicada por elemento.

Figura 46 – Regiões de Carregamento Frontal (a)  $C_{c1}$ , (b)  $C_{c2}$ 

sofreram alterações significativas em relação à intensidade da deformação comparada com  $C_{c2}$ . A região do banco se deforma até a força de 1700 N, e acima disso a deformação é observada na travessa  $T_{F2}$ .

Figura 47 – Deformações máximas  $C_c$  na configuração  $C_{c3}$  com força aplicada por elemento.

A intensidade da deformação para as diferentes configurações é apresentada na Fig.(48).

Sob maior carregamento, com a tensão de cisalhamento máxima o menor FOS ocorre em  $C_{c1}$  com valor 4,3, nas rodas traseiras, para  $C_{c2}$  e  $C_{c3}$  o FOS é de 5 na região frontal da estrutura.

Portanto, as deformações na estrutura ocorrem de acordo com a intensidade e região de carregamento, ao atingirem o limite de uma dada região, a deformação máxima por região ocorre em outra parte da estrutura.

É observada a seguinte ordem de deformação por região: travessa do banco ( $T_{B1}$ ), segunda travessa frontal  $T_{F2}$ , primeira travessa superior ( $T_{S1}$ ). É recomendável

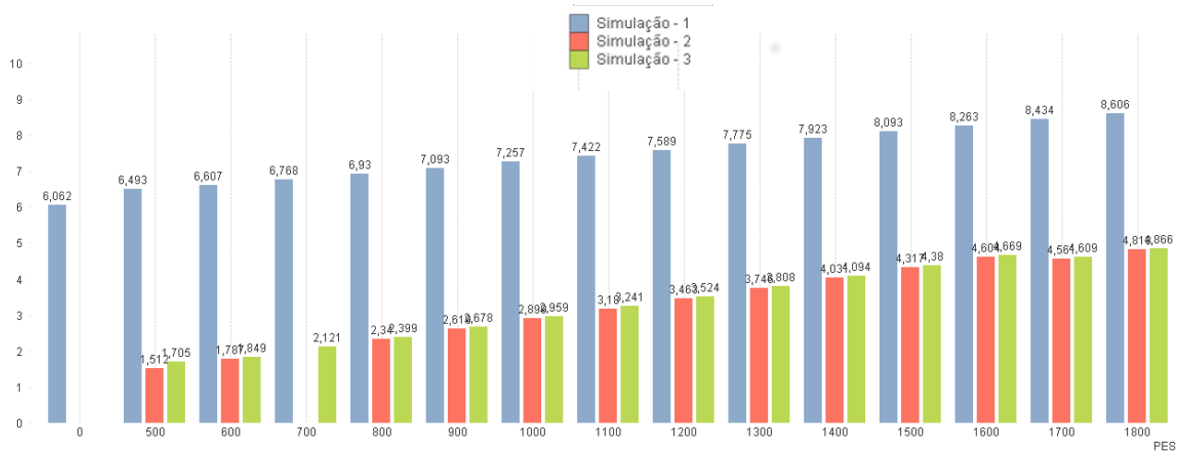


Figura 48 – Comparativo na intensidade da deformação para as configurações  $C_{c1}$  - Simulação 1,  $C_{c2}$  Simulação 2,  $C_{c3}$  Simulação 3.

que o sistema de tração esteja na primeira travessa frontal  $T_{F1}$ . Além disso reduz as deformações as deformações transmitidas à travessa superior.

Considerando a força distribuída por região  $FDr$ , os resultados são exibidos na Fig.(49) os os casos  $C_{c1}$   $C_{c2}$  e  $C_{c3}$ , são respectivamente renomeados por simulação1, simulação2 e simulação3

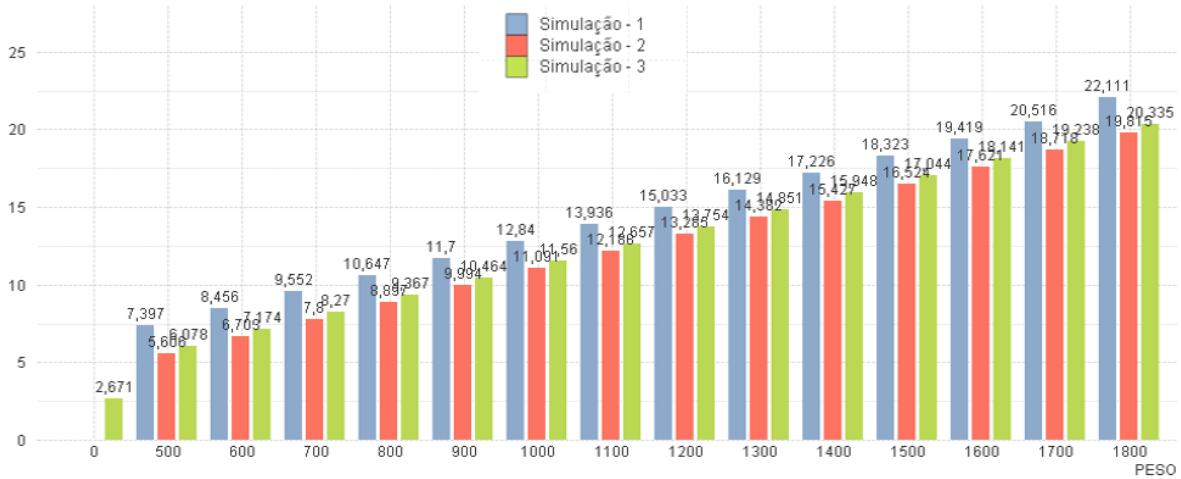


Figura 49 – Deslocamento Máximo Aplicando  $FDr$

Em todas as simulações utilizando  $F_{Dr}$ , o deslocamento máximo por região ocorre em  $T_{B1}$ , o caso  $C_{c1}$  teve a maior deformação comparado aos demais,  $C_{c2}$  apresenta a menor deformação.

O caso  $C_{c2}$  tem deformações menores mesmo sob carregamento traseiro, quando comparado com  $C_{c3}$ . Isto acontece pois o carregamento traseiro colabora para reduzir

a flexão da travessa do banco.

A tensão máxima observada para  $Cc_{c1}$  e  $Cc_{c2}$  está situada nas rodas traseiras, apesar da elevada deformação na região do banco (Fig.(50)).

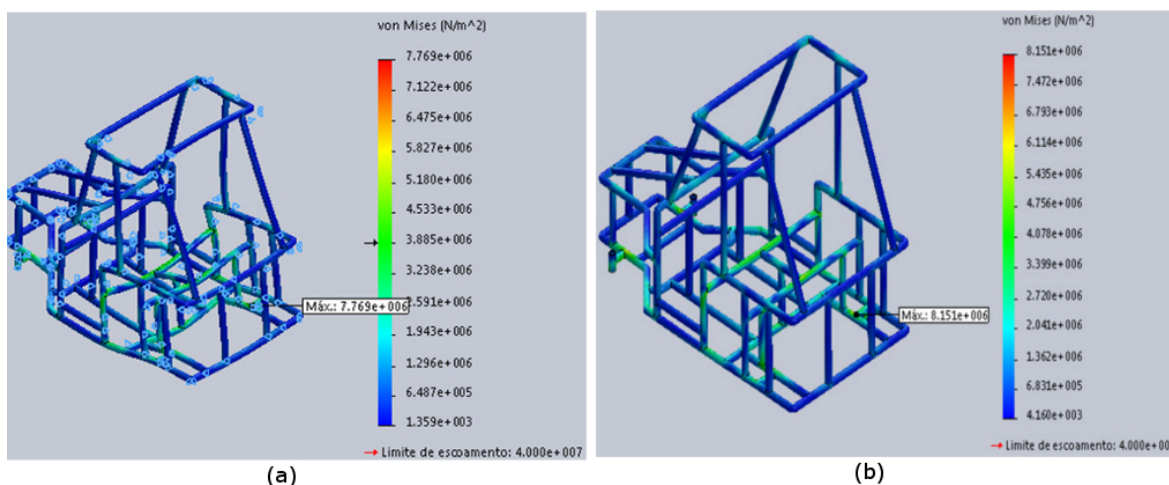


Figura 50 – Tensão Máxima:(a) $Cc_{c1}$  e (b)  $Cc_{c2}$

A Fig.(51) apresenta com maior detalhe a região de máxima tensão observada em  $Cc_{c1}$  e  $Cc_{c2}$ . A região em destaque foi criada para as simulações, e está onde serão acoplados os eixos das rodas.

Ao remover o carregamento traseiro configuração  $Cc_{c3}$  a tensão máxima passa a ser observada na região de conexão das rodas dianteiras a Fig.(52) apresenta este evento, a tensão observada nesta região está abaixo do limite de escoamento do material.

O material não atinge o limite de escoamento em qualquer das simulações. Nas simulações apresentadas até aqui de processamento de 192 segundos sendo a malha composta por 299.159 nós e 910.667 elementos. Na seção seguinte serão avaliados casos de torção.

## 6.8 Análise de Torção Estrutural

Para simular a torção frontal são aplicadas forças em sentido contrário nas rodas dianteiras considerando a base traseira fixa. Um processo análogo é efetuado para torção traseira considerando as configurações de torção apresentados na sessão (6.6) para a torção frontal, com carregamento  $Cc_{c1}$  é observada uma acentuada deformação na parte frontal (Fig.(53)) por sua vez, apresenta o mesmo caso anterior, porém, sem carregamento  $Cc_{c1}$ , considerando apenas forças na região frontal (700 N).

Apesar da acentuada deformação na parte dianteira a tensão máxima de vonMises está concentrada na região traseira de fixação das rodas (engastada). Outra região

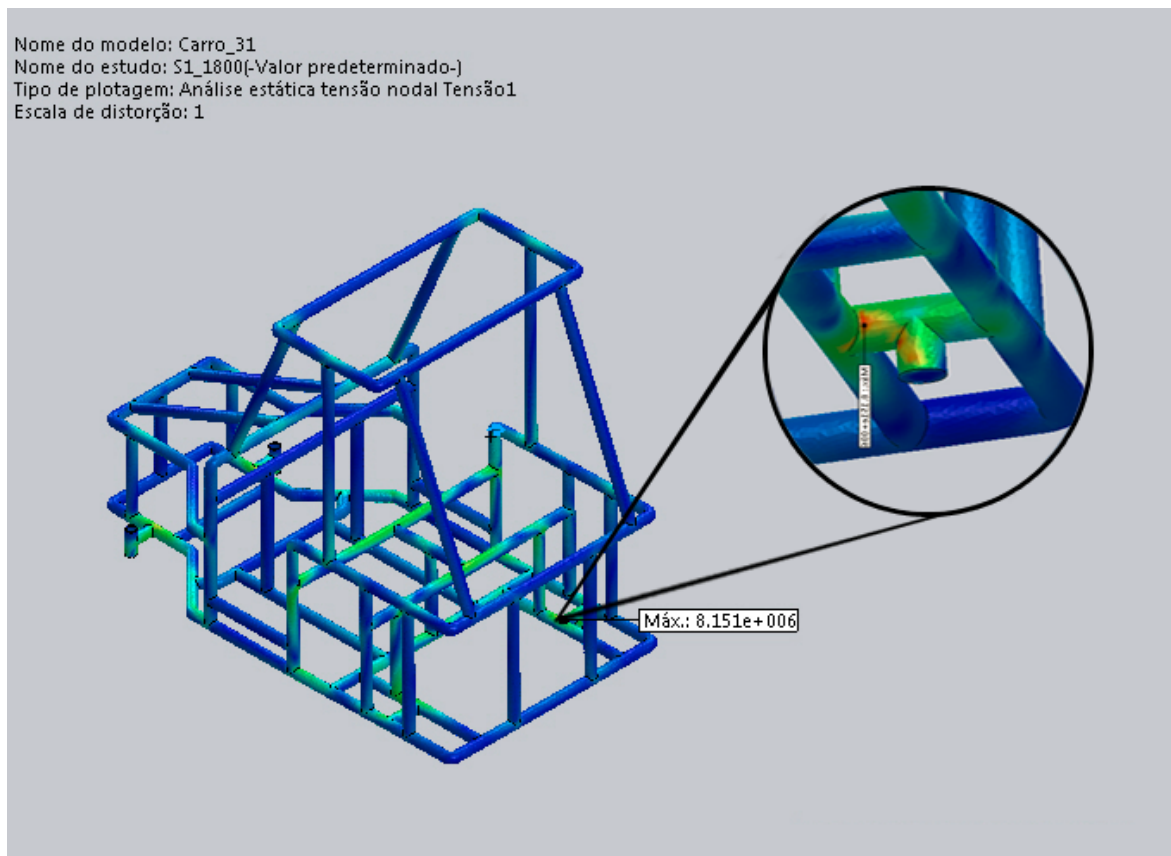


Figura 51 – Detalhe da região de tensão máxima para  $Cc$  e  $Cc_{c2}$

de tensão é a parte frontal (rodas dianteiras).

Para a torção frontal o limite da tensão de escoamento é ultrapassado na região traseira (engastada). A Fig.(55) apresenta as partes da estrutura que possuem o limite da tensão de escoamento acima dos parâmetros adotados para o material.

A análise de torção traseira, a maior tensão ocorre nas rodas dianteiras (engastada). O limite de escoamento nesta regiões é ultrapassado. A Fig.(56) apresenta o comportamento da tensão de vonMises nesta situação.

O FOS mínimo para a torção frontal é de 2.622 enquanto que para a torção traseira é de 2.918. Como ambos os valores são maiores que um a estrutura é considerada segura.

No entanto, para as configurações de torção frontal e traseira considerando o carregamento  $Cc_{c1}$ , o fator de segurança mínimo distribuído é menor que 1.

As Figs.(58) e (57) exibem os casos, respectivamente, de torção frontal e traseira, com suas regiões com FOS 0.2.

A estrutura completamente carregada tanto na torção traseira quanto na torção frontal ultrapassou o limite de escoamento do material indicando que o tubo de PVC poderá romper nas proximidades da região exibida. Assim, não é recomendável que

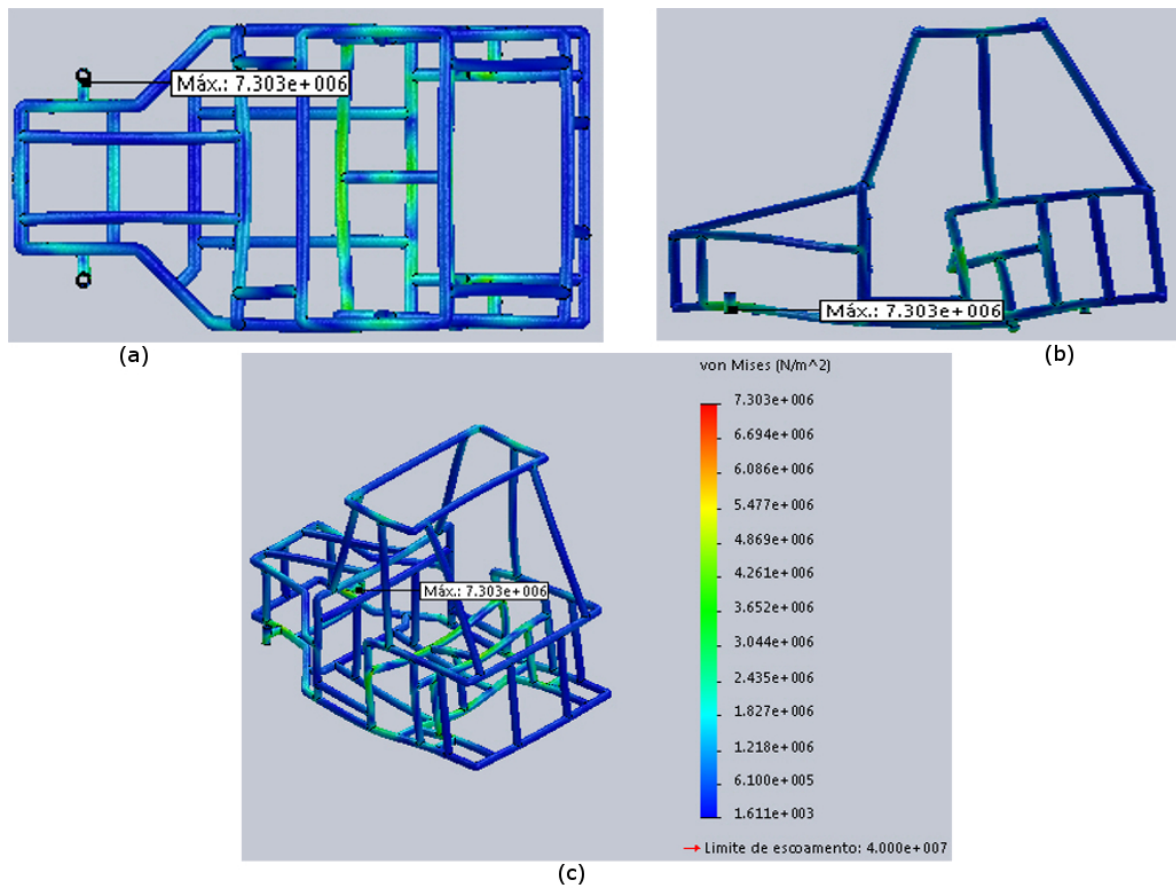


Figura 52 – Tensão Máxima Observada no  $Cc$  com  $T_{F3}$  sendo a força aplicada de forma distribuída (a) Vista Superior (b) Vista Lateral (c) Vista Isométrica

a estrutura esteja completamente carregada e sofra esta tensão, que aqui é hipotética (600N).

Contudo, é importante ressaltar que todas as simulações foram realizadas em um modelo simplificado onde não foram consideradas as conexões. No modelo real a utilização destas certamente conferirá maior rigidez à estrutura devido ao acréscimo de material justamente nos pontos de conexão dos elementos de parte estruturais.

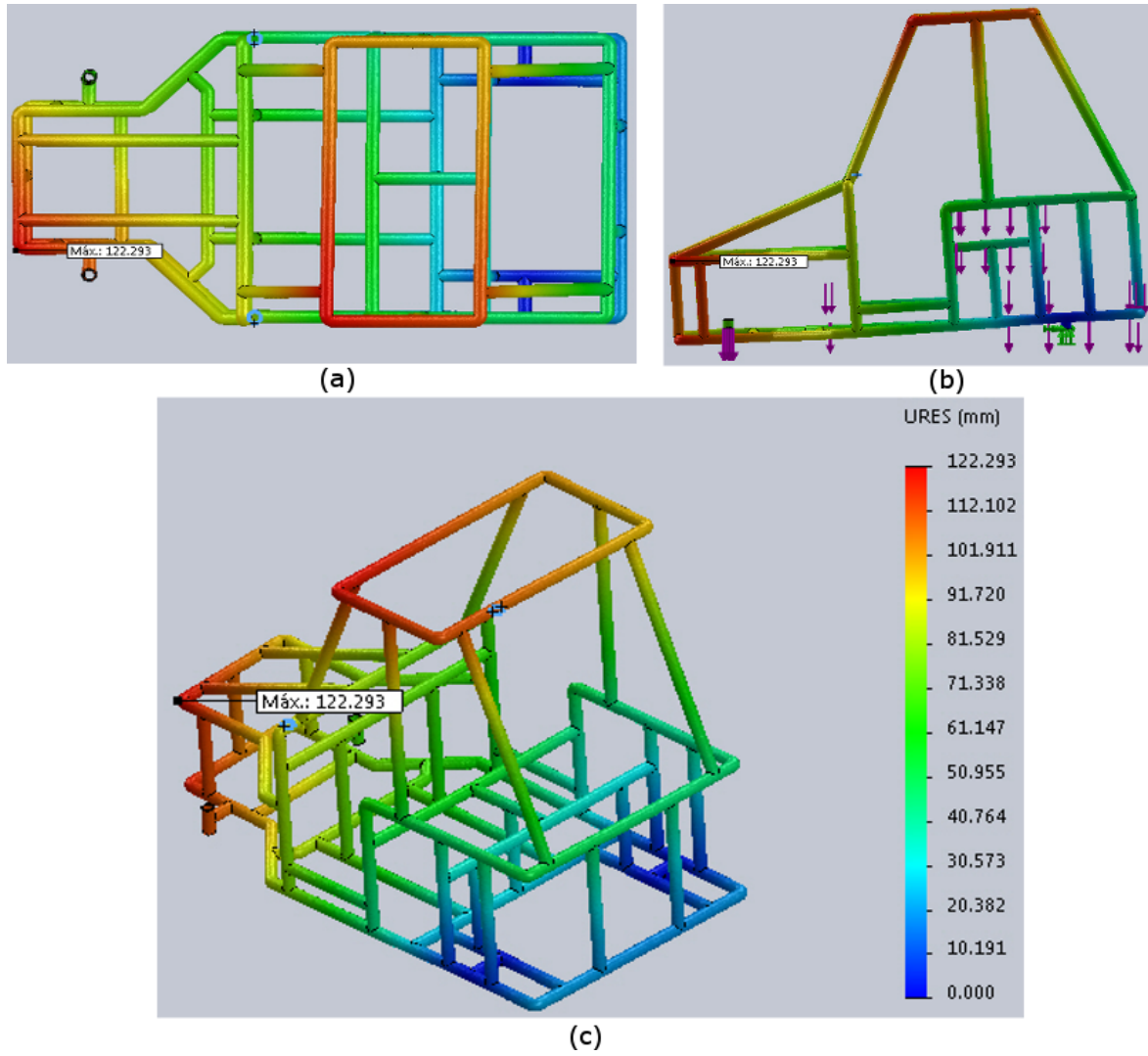


Figura 53 – Deformação máxima na torção frontal estando a estrutural com carregamento frontal

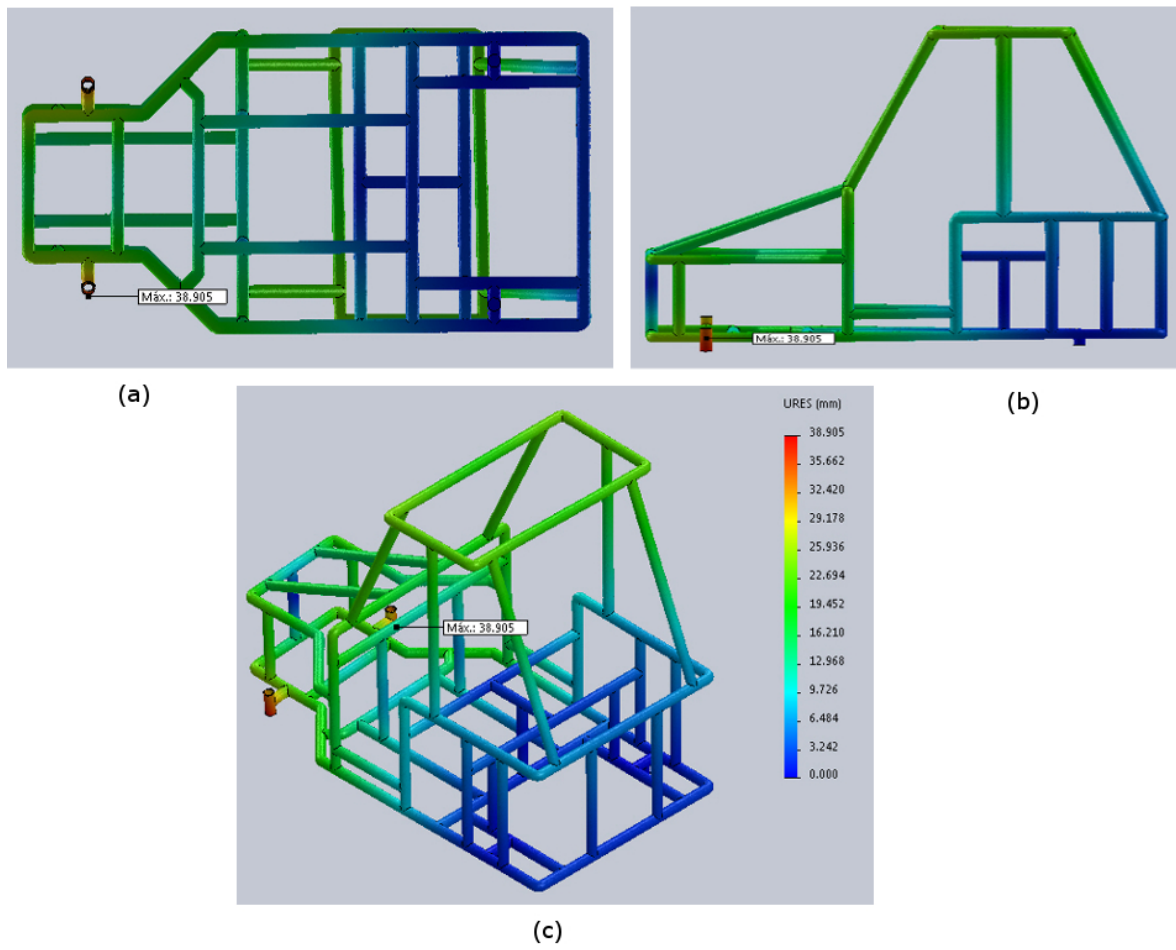


Figura 54 – Deformação máxima na torção frontal estando a estrutural sem carregamento frontal

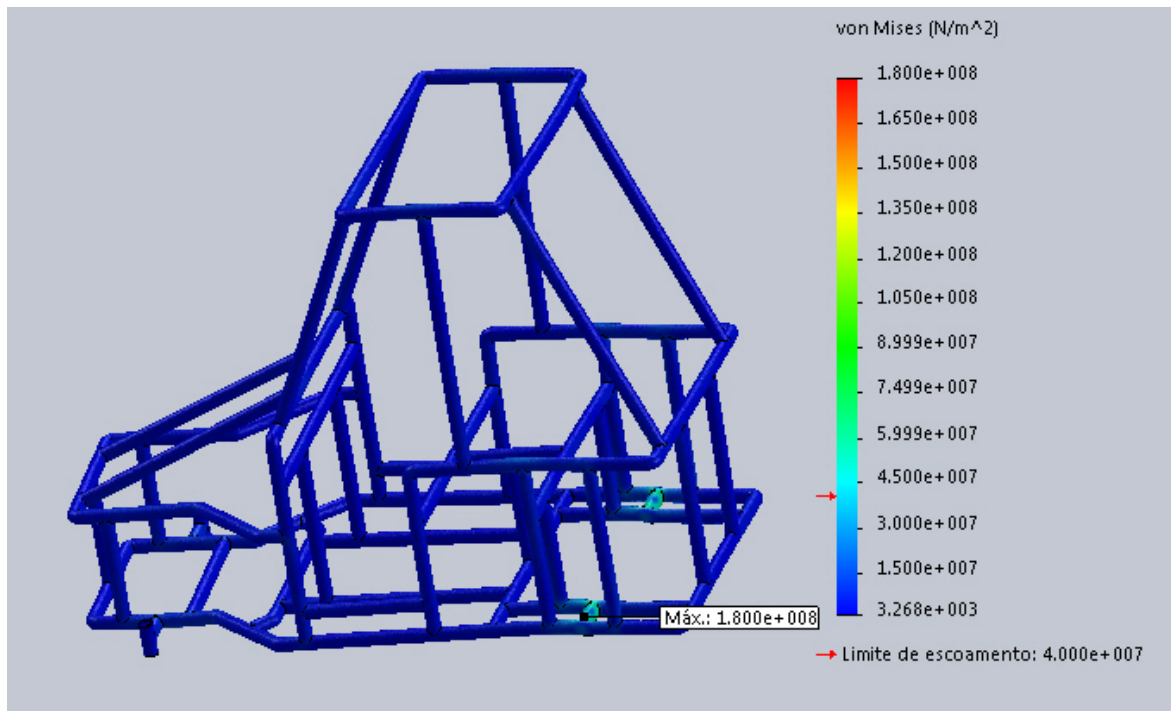


Figura 55 – Região acima do limite de escoamento na tensão de vonMiseses na configuração de torção frontal estando a estrutura carregada.

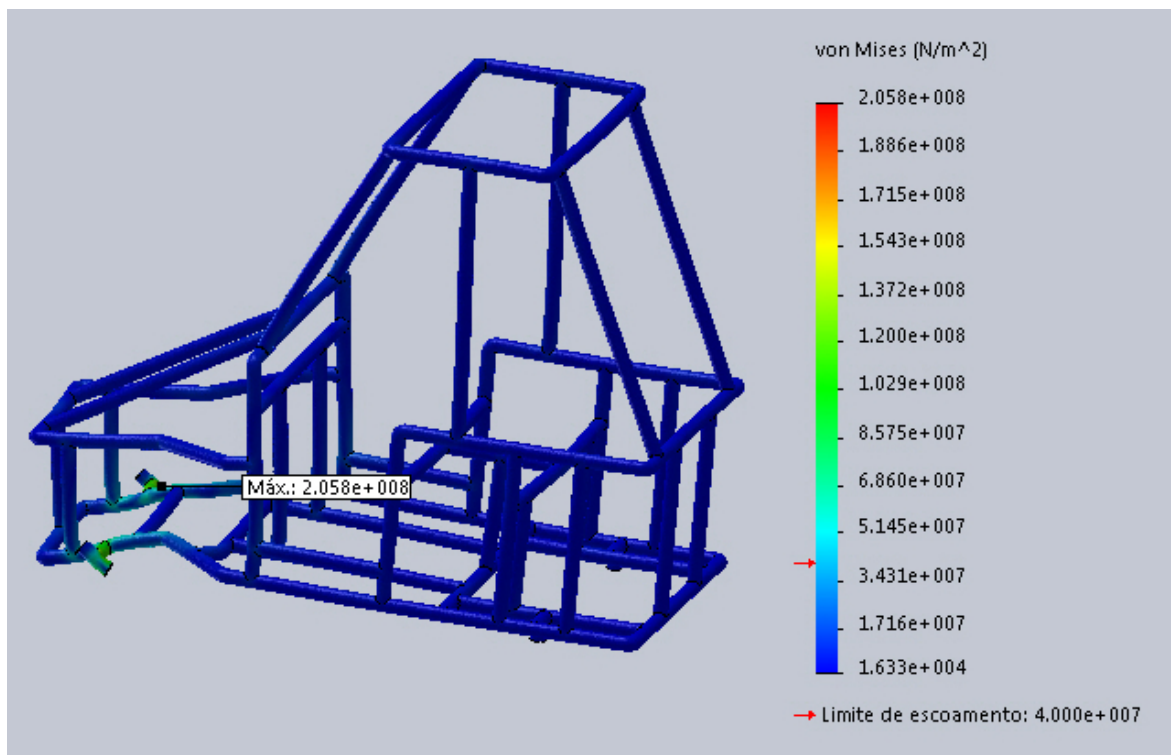


Figura 56 – Região acima do limite de escoamento na tensão de vonMiseses na configuração de torção traseira estando a estrutura carregada.

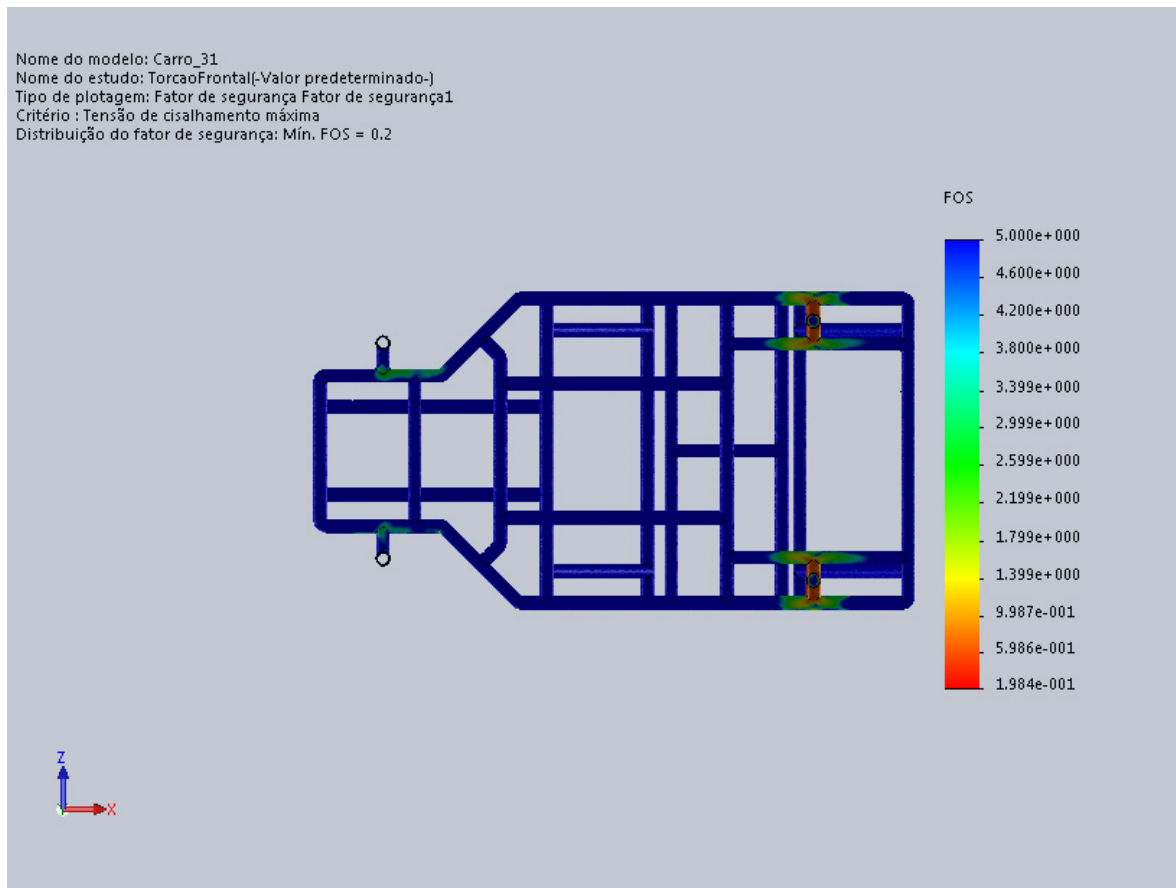


Figura 57 – Fator de Segurança na Torção Frontal  $Cc_{c1}$

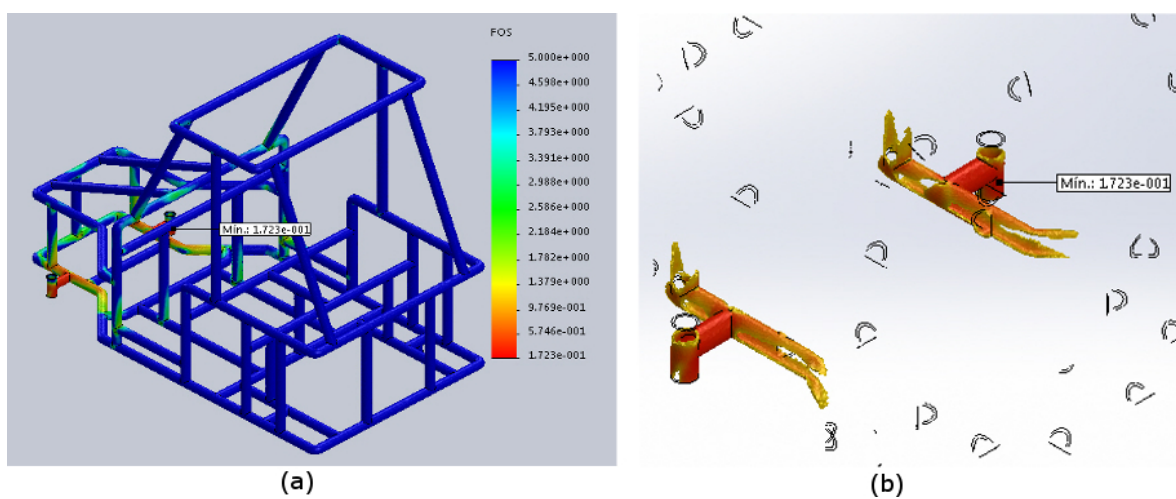


Figura 58 – Fator de Segurança na Torção Traseira  $Cc_{c1}$

---

# Conclusões e Propostas de Continuidade

Este trabalho propôs o desenvolvimento de uma estrutura veicular do tipo *Space Frame* construída com tubos de PVC convencionais. Foram realizadas várias simulações dos protótipos com o intuito de avaliar deformação e tensões sob determinados carregamentos, em configuração estática.

Para as simulações foi utilizado o Solid Works Simulation, após sucessivas análises empregando o refinamento, foi possível determinar a malha mais adequada para o prototipo proposto.

A análise por Elementos Finitos possibilitou identificar não só as regiões de tensão e deformação como, uma vez especificadas regiões de carga, o comportamento da estrutura sob estas condições. Os resultados mostraram que os limites de escoamento do material, foram bem tolerados.

Os ensaios experimentais foram essenciais para determinação dos parâmetros dos tubos de PVC. As condições observadas nos ensaios experimentais foram simuladas e obteve-se convergência dos resultados de forma satisfatória. Deste modo, os parâmetros foram utilizados para simulação da estrutura como um todo.

O refinamento da malha ou a repetição do processo de geração da malha não gerou variações significativas tanto para o deslocamento quanto para a tensão de von-Mises. A compreensão do comportamento dos tubos de PVC nas diferentes configurações de ensaio ou mesmo simuladas computacionalmente colaboraram para a escolha adequada do melhor arranjo geométrico a ser adotado nos reforços da estrutura.

A evolução dos protótipos ocorreu em virtude da informações fornecidas pelas simulações o que auxiliou na distribuição de tensão observada em determinadas regiões de forma eficaz. Nas simulações, considerado o protótipo completo com suas condições de contorno, aumenta consideravelmente a demanda de processamento computacional. Diante dos recursos computacional disponíveis, pode ser necessário empregar simplifi-

cações ou restrições nos modelos.

Para a estrutura de PVC proposta, as deformações acontecem naturalmente, no entanto, o material possui uma característica elástica que possibilita considerável deformação percentual do material contudo, sem que haja deformação permanente. Desde que os carregamentos que não sejam de longa duração, o material retorna à seu estado, ou geometria inicial.

Uma vez que a estrutura proposta não considera um sistema de amortecimento, levando em conta a plasticidade do PVC, isto pode colaborar na absorção de impacto na estrutura. De certo modo, a condução do protótipo por terrenos acidentados poderá ter uma conformação natural, adaptando-se, dentro do limite de sua plasticidade.

É importante salientar que foram consideradas regiões para aplicação das condições de contorno que não existem no protótipo real. Isto foi necessário para que a simulação pudesse ser efetuada na parte da estrutura onde serão acopladas as rodas.

Uma vez que todas as simulações foram efetuadas de modo estático, e as conexões reais não foram consideradas, seguem algumas propostas de continuidade:

- ❑ Realizar análise dinâmica da estrutura;
- ❑ Colocação das conexões nos pontos de interseção dos tubos;
- ❑ Simulação da estrutura considerando as rodas;
- ❑ Avaliar o comportamento da estrutura, considerando tubos de outros diâmetros;
- ❑ Considerar a aplicação de espuma expansível com o intuito de aumentar a rigidez estrutura;

Apesar da elevada deformação nos diversos cenários de carregamento o protótipo suportou os carregamentos segundos as simulações estática realizada.

---

## Referências

AMERICAN NATION STANDARD ON MECHANICAL PROPERTIES. *ASTM D 2990-01*: Standard test methos for tensile, compressive, and flexural creep and creep rupture of plastics. West Conshohocken, 2009. 16 p. Citado na página 56.

\_\_\_\_\_. *ASTM D638-10*: Standard test method for tensile properties of plastics. Pennsylvania, 2010. 16 p. Citado 3 vezes nas páginas 14, 60 e 62.

AMERICANSPEEDSTER. *American Speedster*. 2014. [Http://americanspeedster.com/](http://americanspeedster.com/). Accessed: 2014-01-18. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 38.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13962:2006*: Móveis para escritório - cadeiras. Rio de Janeiro, 2006. 44 p. Citado 4 vezes nas páginas 17, 38, 39 e 90.

\_\_\_\_\_. *NBR 5648*: Tubos e conexões de pvc-u com junta soldáveis para sistemas prediais de água fria requisitos. Rio de Janeiro, 2006. 25 p. Citado 5 vezes nas páginas 13, 17, 34, 35 e 80.

\_\_\_\_\_. *NBR 14006:2008*: Móveis escolares - cadeiras e mesas para o conjunto aluno individual. Rio de Janeiro, 2008. 30 p. Citado 4 vezes nas páginas 17, 38, 39 e 90.

AZEVEDO, I. F. M. *Método dos Elementos Finitos*. 1. ed. [S.l.]: Portugal, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 70, 71, 76, 77 e 78.

BEER F. P.; JOHNSTON, R. *Resistência dos materiais*. 3. ed. [S.l.]: São Paulo, 1995. Citado na página 43.

CADWORKS. *SolidWorks Simulation Help online do SolidWorks*. 2014. [http://help.solidworks.com/2012/English/SolidWorks/sldworks/r\\_welcome\\_sw\\_online\\_help.htm](http://help.solidworks.com/2012/English/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm). Accessed: 2014-01-12. Citado 3 vezes nas páginas 70, 72 e 78.

CALLISTERJR., W.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. [S.l.]: São Paulo, 2012. Citado 7 vezes nas páginas 13, 52, 54, 55, 56, 68 e 85.

CHANDRA, M. R.; SREENIVASULU; HUSSAIN, S. A. Modeling and structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, v. 2, 2012. Disponível em: <[http://ijmer.com/papers/Vol2\\_Issue4/DS2425942600.pdf](http://ijmer.com/papers/Vol2_Issue4/DS2425942600.pdf)>. Citado na página 29.

COVAS, D. *et al.* The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. part ii model development, calibration and verification. *Journal of Modern Hydraulic Research*, International Association of Hydraulic Engineering and Research, v. 43, p. 56 – 70, 2005. Disponível em: <[https://www.infrasense.net/pub/Viscoelastic\\_PartII.pdf](https://www.infrasense.net/pub/Viscoelastic_PartII.pdf)>. Citado na página 53.

CUNHA, V. P. d.; ZIRBES, C. F.; CUNHA, R. R. M. Estudo comparativo de sistemas computacionais de simulação e análise de flambagem no projeto mecânico de uma unidade de movimentação linear. In: *XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. São Paulo: [s.n.], 2008. Citado na página 71.

DINIS, P. M. W. dos S. *Optimização de juntas de perfis de alumínio para uma estrutura automóvel*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 1996. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 81, 82 e 90.

FILHO, A. A. *Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE*. 5. ed. [S.l.]: São Paulo, 2007. Citado na página 71.

FILHO, J. G. *Ergonomia do Objeto*. 1. ed. [S.l.]: São Paulo, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

FORINI, S. H. *Incorporação de Argilas Esmectíticas em Plastisol*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-11112008-103904/publico/Sergio\\_H\\_Forini.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-11112008-103904/publico/Sergio_H_Forini.pdf)>. Citado na página 32.

GERE, J. M. *Mecânica dos Materiais*. [S.l.]: São Paulo, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 51.

GONÇALVES, A.; M. ALMEIDA, S. F.; NETO, F. L. Comportamento de cilindros de carbono/ep Epóxi Submetidos a Cargas Compressivas Axiais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, scielo, v. 11, n. 2, p. 94 – 101, 06 2001. ISSN 0104-1428. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v11n2/6159.pdf>>. Citado na página 33.

GRIZZO, L. H. *Desenvolvimento de PVC Reforçado Com Fibra de Vidro Longas Para Fabricação de Produtos Moldados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://juno.unifei.edu.br/bim/0036327.pdf>>. Citado na página 69.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. [S.l.]: São Paulo, 2011. Citado 7 vezes nas páginas 13, 41, 42, 43, 45, 48 e 83.

IIDA, I. *Ergonomia - Projeto e Produção/ 2ª Edição Revista e Ampliada*. 2. ed. [S.l.]: São Paulo, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 13, 38, 40 e 90.

ISTM, S. *Apostila de SolidWorks*. [S.l.], 2009. Citado 5 vezes nas páginas 17, 74, 75, 76 e 77.

JÚNIO, J. d. M. *Redução de falhas em haste polida: proposta de uma nova forma de fixação à unidade de bombeamento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2014. Disponível em: <<http://juno.unifei.edu.br/bim/0036327.pdf>>. Citado na página 88.

JR., A. R.; MEI, L. H. I. Mecanismos de degradação e estabilização térmica do PVC copyrightrmica do PVC: a review. *Polímeros*, scielo, v. 17, p. 263 – 275, 09 2007. ISSN 0104-1428. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282007000300018&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282007000300018&nrm=iso)>. Citado 5 vezes nas páginas 32, 54, 55, 64 e 69.

JR., A. R.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. *Tecnologia do PVC*. 2ª. ed. [S.l.]: BRASKEM, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

KIM, N.-H. S. B. *Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos*. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 79.

LEÃO, P. B. P.; DEUS, E. P.; ALVES, R. J. F. Comportamento estrutural de tubos de pvc considerando o aumento de concentradores de tensão. In: *12º Congresso Brasileiro de Polímeros*. Florianópolis - Brasil: [s.n.], 2013. Citado na página 83.

LODI, P. C. A.; BUENO, B. d. S.; VILAR, O. M. The effects of weathering exposure on the physical, mechanical, and thermal properties of high-density polyethylene and poly (vinyl chloride). *Materials Research*, scielo, v. 16, p. 1331 – 1335, 12 2013. ISSN 1516-1439. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392013000600016&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392013000600016&nrm=iso)>. Citado na página 54.

M, A. R.; BOSKER, R. G. W. A theoretical model to estimate some ergonomic parameters from age, height and weight. *Ergonomics*, v. 22, 1979. Disponível em: <[http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00140137908924588#.VLvN\\_Eff9W4](http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00140137908924588#.VLvN_Eff9W4)>. Citado 4 vezes nas páginas 13, 38, 40 e 90.

MEDEIROS, F. A.; WIEBECK, H. PVC Orientado: avaliação de processo de orientação e das propriedades mecânicas em função da razão de estiramento. *Polímeros*, scielo, v. 23, p. 636 – 643, 00 2013. ISSN 0104-1428. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282013000500012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282013000500012&script=sci_arttext)>. Citado na página 33.

MELO, N. S. D. *Comportamento Mecânico Do Policarbonato Exposto À Radiação Gama*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, 2004. Disponível em: <[http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/naylor\\_dissertmest.pdf](http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/naylor_dissertmest.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.

OLIVEIRA, F. C. G. *Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo Spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurístico*

*de otimização numérica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/42/1-/Contribui%C3%A7%C3%A3oDesenvolvimentoEstrutura.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

PARETO, L. *Resistência e Ciência dos Materiais*. [S.l.], 2013. Citado 6 vezes nas páginas 13, 43, 47, 48, 49 e 50.

PIVA, A. M.; NETO, M. B.; WIEBECK, H. A. A reciclagem de PVC no Brasil. *Polímeros*, sciELO, v. 9, p. 195 – 200, 12 1999. ISSN 0104-1428. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v9n4/6204.pdf>>. Citado na página 33.

RAOUFI, C. *Finite Element Analysis of Parts with SolidWorks Simulation*. [S.l.]: Canada, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 73.

SANTOS, H. d. O. *Projeto de um chassi tubular para um veículo de competição "Single Seater"*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2013. Disponível em: <<http://juno.unifei.edu.br/bim/0036327.pdf>>. Citado na página 82.

SILVA, E. P. d. *Elementos Finitos como Ferramenta Auxiliar na análise Estrutural Estática de uma Colhedora de Café Tipo Automotriz*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 17, 74, 75, 76 e 77.

SILVA, L. A. H. *Avaliação Numérica do Comportamento Estrutural da Bancada de um Elevador*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Coimbra, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 86.

SOARES, F. S. *et al.* Desenvolvimento de um chassi automotivo para um veículo elétrico de pequeno porte. *Revista de Iniciação Científica da ULBRA*, v. 10, 2012. Disponível em: <[http://ijmer.com/papers/Vol2\\_Issue4/DS2425942600.pdf](http://ijmer.com/papers/Vol2_Issue4/DS2425942600.pdf)>. Citado na página 82.

SOLIDWORKS CAD 3D WORKS. *COSMOSWorks Designer: Cosmos treinamento: Sistema de tubulação rígida e confiabilidade da vedação analisadas usando o cosmosworks*. São Paulo, 2008. 16 p. Citado 3 vezes nas páginas 71, 78 e 79.

SOUZA, M. O. A. d. *et al.* Avaliação do uso de normas técnicas na fabricação de cadeiras de eucalipto. *Revista Estudos em Design*, v. 15, 2010. Disponível em: <[http://ijmer.com/papers/Vol2\\_Issue4/DS2425942600.pdf](http://ijmer.com/papers/Vol2_Issue4/DS2425942600.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 39.

TEOTÔNIO, K. L. *Estudo preliminar de estrutura para veículo elétrico destinado a coleta seletiva de materiais recicláveis*. 57 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Citado na página 84.

TIGRE. *Ficha Técnica: Ficha técnica linha soldável*. Brasil, 2013. 7 p. Citado na página 64.

TORII, A. J. *Análise dinâmica de estruturas com o método dos elementos finitos generalizado*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2012. Disponível em: <<http://www.ppgmne.ufpr.br/arquivos/teses/39.pdf>>. Citado na página 70.

VILLARINO, T. P.; BASTOS, T. R. *Projeto de Implantação Para Produção de Mobiliários Adaptados em PVC no Centro de Reabilitação Física Dom Bosco de Lins no Setor de Terapia Ocupacional*. 73 f. Monografia (Terapia Ocupacional) — Centro Universitário Católico Salesiano, São Paulo, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 13, 36 e 37.

WASILKOSKI, C. M. *Comportamento Mecânico dos Materiais Poliméricos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2006. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/tese/013.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 13, 14, 53 e 55.

# Apêndices



sectionResultados Obtidos via Ensaio Experimental Utilizando o PVC

## .1 Flexão do Corpo de Prova sem Conexões em Bi-Apoio Simples sob Carga Distribuída

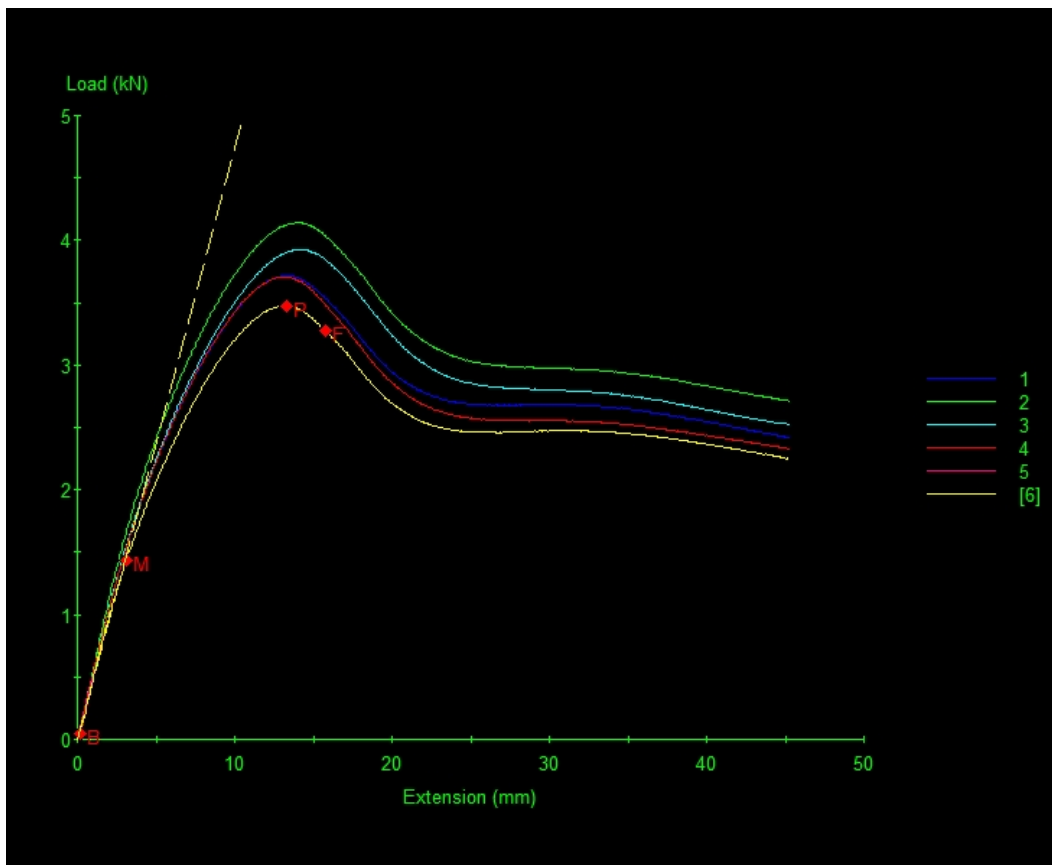


Figura 59 – Diagrama Tensão x Deformação corpos de prova sem conexões em Ensaio de flexão bi-apoio simples sob carga distribuída.

## .2 Flexão do Corpo de Prova com Conexões em Bi-Apoio Simples sob Carga Distribuída

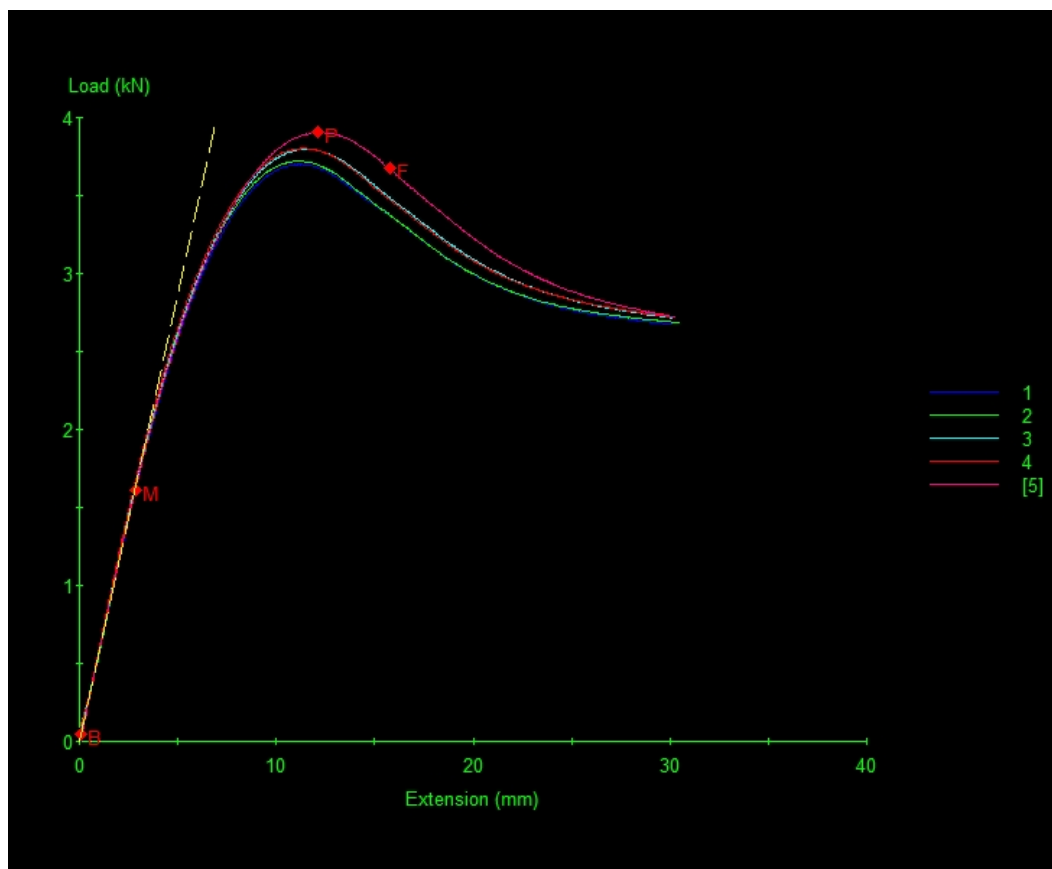


Figura 60 – Diagrama dos corpos de prova com conexões em Ensaio de flexão bi-apoio simples sob carga distribuída.

### .3 Flexão do Corpo de Prova com Conexões em Bi-Apoio Simples sob carga Concentrada

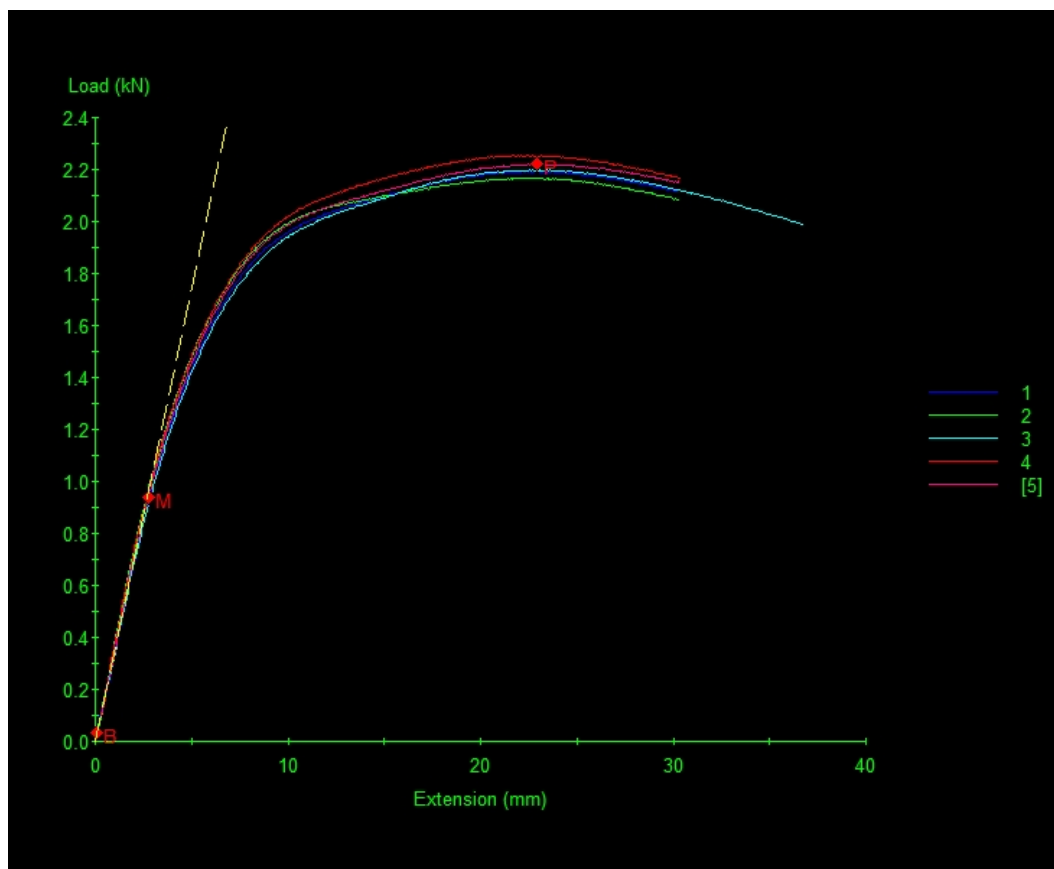


Figura 61 – Diagrama dos corpos de prova em Ensaio de flexão de tubo de PVC em bi-apoio simples com o tubo sob Carga Concentrada

#### .4 Flexão do Corpo de Prova Preenchido com Espuma Expansiva em Bi-Apoio Simples com o tubo em Bi-Apoio Simples sob Carga Distribuída

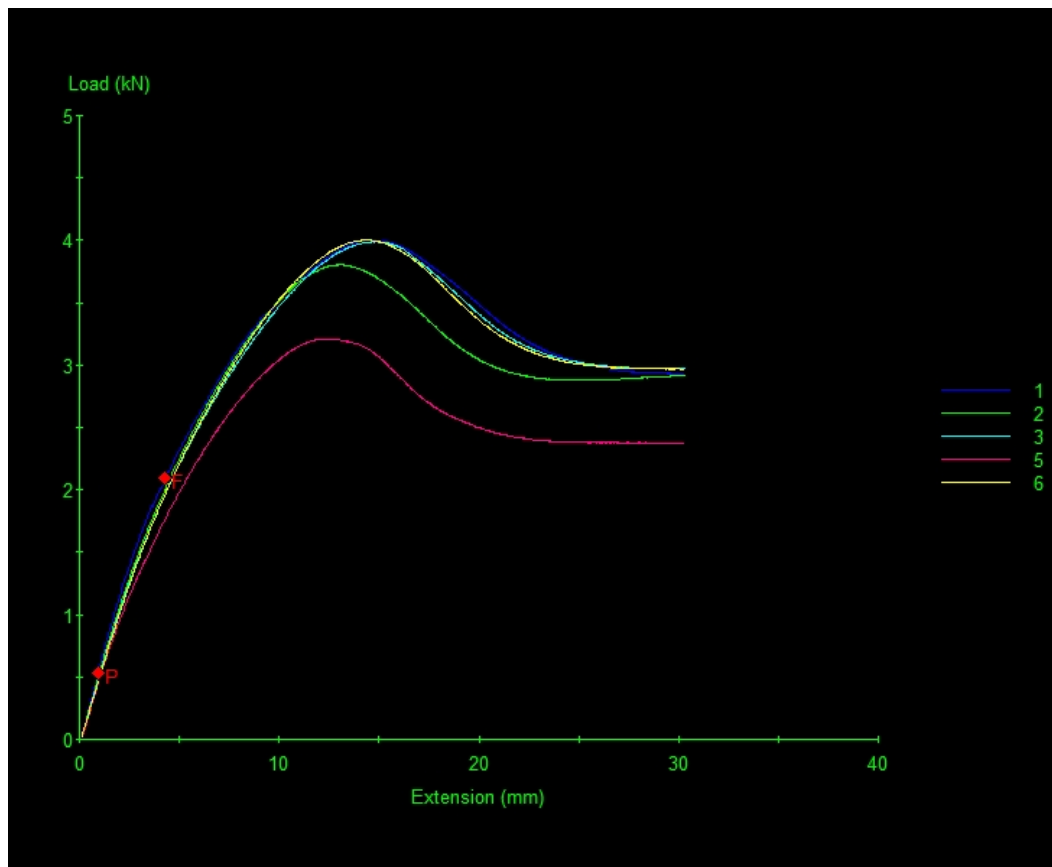


Figura 62 – Diagrama Tensão x Deformação corpos de prova em bi-apoio simples Recheados de Espuma Expansiva sob Carga Concentrada

## .5 Flexão do Corpo de Prova Recheado de espuma expansiva envolvido por Fita Silver Tape<sup>®</sup> em Bi-Apoio Simples sob Carga Distribuída

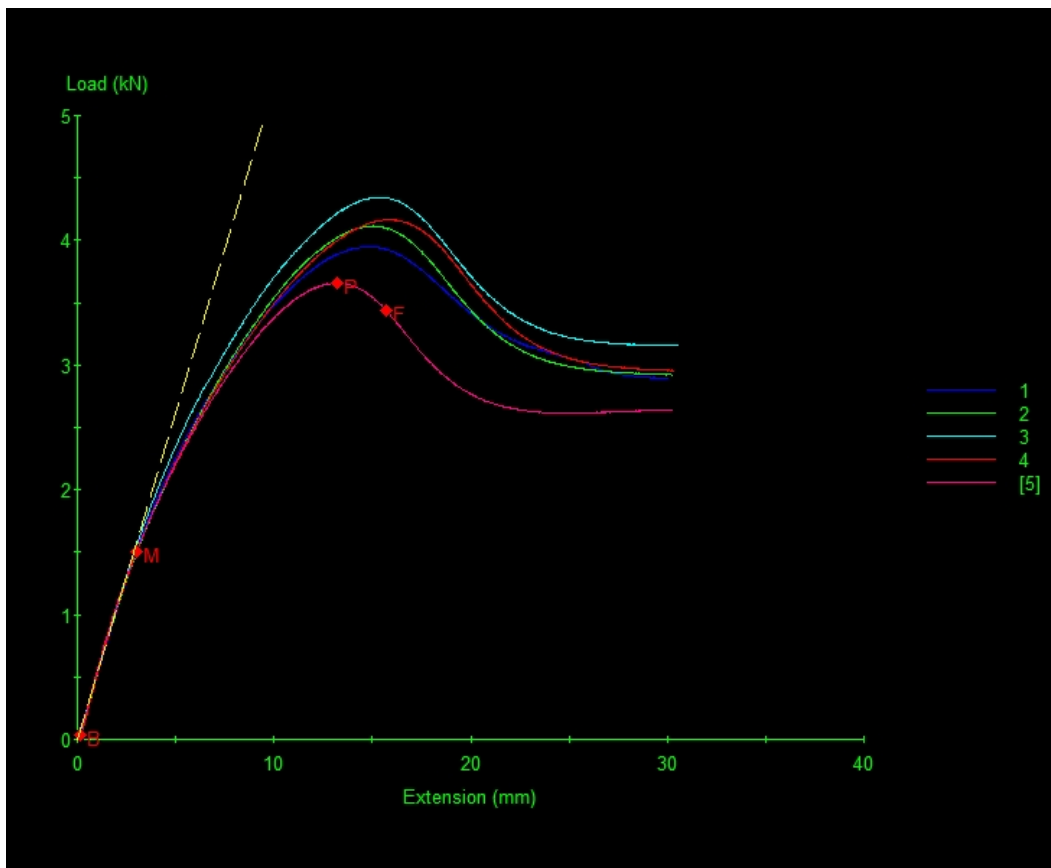


Figura 63 – Diagrama dos corpos de prova em Ensaio de flexão de tubo de PVC em bi-apoio simples, tubo preenchido com espuma expansível envolto por Fita Silver Tape<sup>®</sup> em aspiral

A partir dos valores obtidos na Tab(17) é apresentado o diagrama 65 para melhor visualizar os valores obtidos nos diferentes ensaios.

Tabela 17 – Valores Obtidos no Ensaio de Flexão de tubo de PVC em bi-apoio simples com o tubo preenchido com espuma expansível envolto por Fita Silver Tape<sup>®</sup> em espiral.

| Corpo de Prova | Pico de Carga kN | Máxima Resistência a Tração MPa | Carga de Ruptura kN | F limite fase elástica kN |
|----------------|------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------|
| 1              | 3,948            | 64,17                           | 3,71                | 1,604                     |
| 2              | 4,115            | 66,88                           | 3,87                | 1,676                     |
| 3              | 4,344            | 70,61                           | 4,09                | 1,77                      |
| 4              | 4,165            | 67,69                           | 3,92                | 1,698                     |
| 5              | 3,659            | 59,47                           | 3,44                | 1,501                     |
| Média:         |                  |                                 |                     | 1,650                     |

## APÊNDICE **A**

---

# Custo médio para construção da estrutura

Custo médio, calculado a partir da cotação em cinco estabelecimentos comerciais para Confeção da Primeira Estrutura, empregando diferentes diâmetros de tubo a Tab.(18).

A cruzeta de 32 mm teve a sua fabricação descontinuada pelos principais fabricantes considerados líderes de mercado no Brasil. Tal diâmetro não foi considerado nas simulações, apesar do valor considerado inferior quando comparado com os tubos de 50 mm conforme representado pela Tab(19).

Tabela 18 – Discriminação dos valores e materiais utilizados na construção da estrutura empregando tubo de 50 mm.

| 50 MM               |                     |            |                 |
|---------------------|---------------------|------------|-----------------|
| Descrição           | Valor               | Quantidade | Valor Tot. Peça |
| 50 mm 90°           | R\$ 4,90            | 6          | R\$ 29,40       |
| 50 mm 45°           | R\$ 5,90            | 6          | R\$ 35,40       |
| 50mm Curva Longa    | R\$ 7,95            | 4          | R\$ 31,80       |
| 50 mm T             | R\$ 8               | 54         | R\$ 432,00      |
| Metro Tubo 50       | R\$ 10,80           | 36         | R\$ 388,80      |
| Cruzeta 50 mm       | R\$ 11,80           | 12         | R\$ 141,60      |
| Cola 850 Gr         | R\$ 39,50           | 2          | R\$ 79,00       |
| Solução Preparadora | R\$ 32              | 2          | R\$ 64,00       |
| Estopa              | R\$ 3               | 4          | R\$ 10,00       |
| Lixa 150            | R\$ 1               | 5          | R\$ 2,50        |
| Variação 5 %        | R\$ 1               |            | R\$ 60,35       |
| <b>Valor Total</b>  | <b>R\$ 1.274,85</b> |            |                 |

Tabela 19 – Discriminação dos valores e materiais utilizados na construção da estrutura empregando tubo de 32 mm.

| 32 MM               |                   |            |                 |
|---------------------|-------------------|------------|-----------------|
| Descrição           | Valor             | Quantidade | Valor Tot. Peça |
| 32 mm 90°           | R\$ 3,70          | 6          | R\$ 22,20       |
| 32 mm 45°           | R\$ 2,30          | 6          | R\$ 13,80       |
| 32 mm Curva Longa   | R\$ 3,15          | 4          | R\$ 12,60       |
| 32 mm T             | R\$ 2             | 54         | R\$ 129,60      |
| Metro Tubo 32       | R\$ 6,60          | 36         | R\$ 237,60      |
| Cruzeta 32 mm       | R\$ 8,00          | 12         | R\$ 96,00       |
| Cola 850 Gr         | R\$ 39,50         | 2          | R\$ 79,00       |
| Solução Preparadora | R\$ 32            | 2          | R\$ 64,00       |
| Estopa              | R\$ 32            | 4          | R\$ 128,00      |
| Lixa 100            | R\$ 1             | 5          | R\$ 2,50        |
| Variação 5 %        | R\$ 1             |            | 39,25           |
| <b>Valor Total</b>  | <b>R\$ 824,55</b> |            |                 |

# Principais Dimensões da Estrutura Proposta

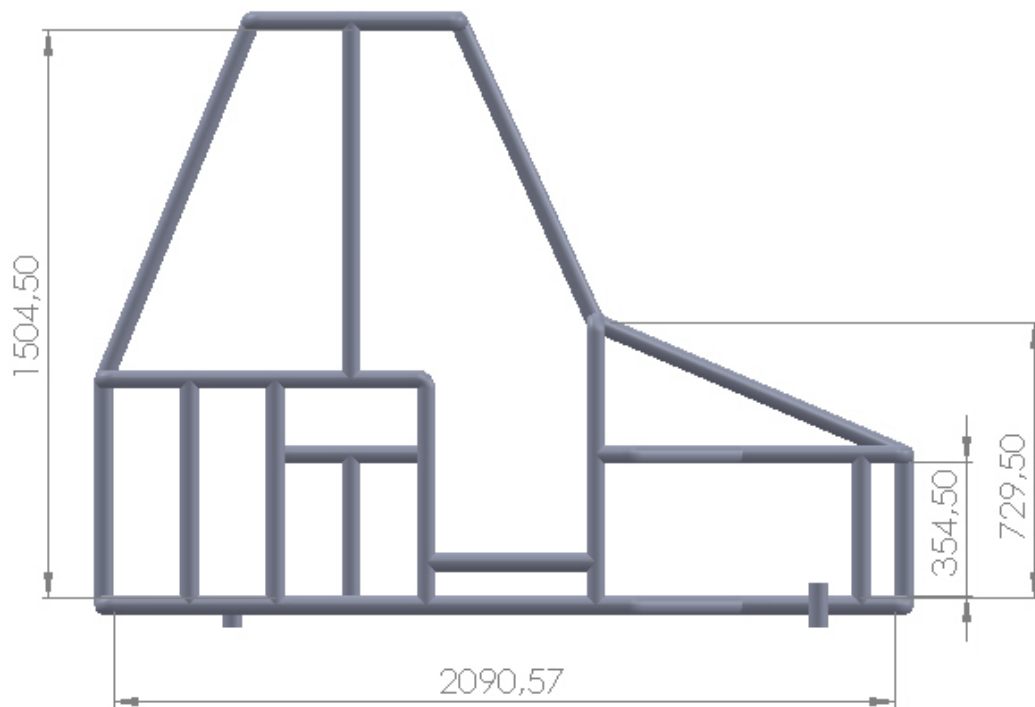


Figura 64 – Principais medidas da vista lateral.

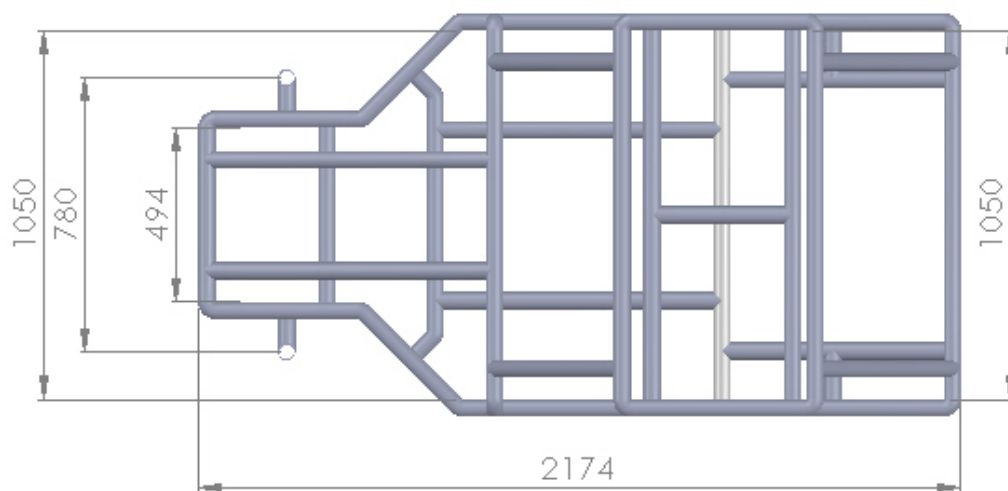


Figura 65 – Principais medidas da vista superior