



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MALCOLM PEDROSO DE CARVALHO

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI MINI
FORMULA**

Recife
2025

MALCOLM PEDROSO DE CARVALHO

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI
MINI FORMULA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador(a): Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Carvalho, Malcolm Pedroso de.

Dimensionamento e Simulação em Elementos Finitos de um chassi mini
Formula / Malcolm Pedroso de Carvalho. - Recife, 2025.

120 p. : il., tab.

Orientador(a): Ramiro Brito Willmersdorf

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Formula SAE. 2. Chassi Tubular. 3. Simulação Estrutural. 4. Método dos
Elementos Finitos. 5. Modelagem CAD. I. Willmersdorf, Ramiro Brito.
(Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2**

Ao 14º dia do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI MINI FORMULA**, elaborado pelo aluno **Malcolm Pedroso de Carvalho**, matrícula 20220033893, sob a orientação do Prof. **Ramiro Brito Willmersdorf**. A banca foi composta pelos avaliadores: Prof. **Ramiro Brito Willmersdorf** (orientador), Prof. **Adson Beserra da Silva** (avaliador) e Prof. **José Dásio de Lira Junior** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua aprovação, atribuindo-lhe a média 9,0, julgando-o apto(x) / inapto() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador:	Prof. Ramiro Brito Willmersdorf	Nota: 9,0
Assinatura	<small>Documento assinado digitalmente</small>  RAMIRO BRITO WILLMERSDORF Data: 15/08/2025 12:54:35-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	
Avaliador: Interno	Prof. Adson Beserra da Silva	Nota: 9,0
Assinatura	<small>Documento assinado digitalmente</small>  ADSON BESERRA DA SILVA Data: 15/08/2025 12:22:32-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	
Avaliador: Externo	Prof. José Dásio de Lira Junior	Nota: 9,0
Assinatura	<small>Documento assinado digitalmente</small>  JOSE DASIO DE LIRA JUNIOR Data: 15/08/2025 11:29:10-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	

Recife, 14 de agosto de 2025.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico este trabalho, e minha formação, à minha Família, pela presença e apoio constantes mesmo nos meus momentos ausentes, como sei que continuará sendo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Arlindo Lopes, Hugo Tavares Júnior e Gabriel Llerena pelos fundamentos que me serviram de base para seguir no curso e incentivos, diretos ou indiretos, que contribuíram para me dar confiança em seguir, aprender e aperfeiçoar, e ao professor Ramiro Willmersdorf pela orientação neste trabalho. Agradeço também às universidades UEA e UFPE pela oportunidade de iniciar e concluir o curso. Por fim e não menos importante, agradeço a Deus pelo caminho percorrido até aqui.

RESUMO

Este trabalho apresenta o processo de projeto e análise estrutural de um chassi tubular para um veículo mini fórmula, conforme os regulamentos da competição Formula SAE 2025. A partir da interpretação das regras da competição, foram desenvolvidas diversas configurações geométricas do chassi, obedecendo às exigências de segurança para proteção do piloto contra capotamento. O modelo inicial foi construído em ambiente CAD com base em dados antropométricos teóricos, restrições e exigências do regulamento da competição e em seguida submetido a sucessivas modificações. As análises estruturais foram realizadas por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software Ansys com elementos de viga, guiado pelos requisitos de simulação da competição de 2017-18. Diversos modelos foram simulados com diferentes geometrias e configurações de tamanhos de tubos, visando encontrar o modelo mais leve atendendo os requisitos de projeto. Com base nos resultados obtidos, reforços foram adicionados estrategicamente e geometrias foram ajustadas para reduzir a massa total do chassi sem comprometer sua integridade. O modelo final atendeu a combinação entre regras de segurança definidas no regulamento e critérios de segurança adicionais, apresentando redução significativa de peso em relação à versão inicial e demonstrando a efetividade da abordagem iterativa de projeto. Este trabalho contribui como referência para projetos futuros de equipes iniciantes em Formula SAE, abordando desde os critérios de projeto até a validação estrutural via simulação.

Palavras-chave: Formula SAE; chassi tubular; simulação estrutural; Método dos Elementos Finitos; modelagem CAD.

ABSTRACT

This work presents the design and structural analysis process of a tubular chassis for a mini formula vehicle, in compliance with the 2025 Formula SAE competition rules. Based on the interpretation of the regulation, several chassis geometries were developed to meet the safety requirements for protecting the driver against rollover. The initial model was built in a CAD environment using theoretical anthropometric data, regulatory constraints, and technical requirements, and was then subjected to successive modifications. Structural analyses were performed using the Finite Element Method (FEM), employing beam elements in Ansys software and guided by the simulation requirements of the 2017–18 competition rules. Multiple models were simulated with different geometries and tube size configurations, aiming to identify the lightest design capable of meeting all safety and structural criteria. Based on the simulation results, reinforcements were strategically added, and geometries were adjusted to reduce the overall mass of the chassis without compromising its integrity. The final model met both the mandatory safety rules and additional safety criteria, achieving significant weight reduction compared to the initial version and demonstrating the effectiveness of the iterative design approach. This work serves as a reference for future projects by beginner Formula SAE teams, covering the entire process from design criteria to structural validation through simulation.

Keywords: Formula SAE; tubular chassis; structural analysis; Finite Element Method; CAD modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Reunião das equipes participantes da competição na Alemanha em 2019	22
Figura 2 - Esquema do circuito usado no Evento <i>Skidpad</i>	23
Figura 3 - Apontamento das principais estruturas de um chassi mini fórmula	24
Figura 4 - Demonstração de uma estrutura triangulada	25
Figura 5 - Objeto fraturado por consequência de esforços	28
Figura 6- Corpo de prova em ensaio de tração	29
Figura 7 - Gráfico Tensão x Deformação típico de ensaios de tração.....	29
Figura 8 - Representação de um estado de tensões tridimensional decomposto	31
Figura 9 - Representação do <i>Driver Template</i> no regulamento.....	35
Figura 10 - Desenho com recomendações de medidas de conforto para veículos em geral	37
Figura 11 - Posicionamento final do Driver Template.....	38
Figura 12 - Planos do MH (esquerda), FH (centro) e FB (direita) representadas por linhas verticais vermelhas	40
Figura 13 - Representação final do Driver Template com posição do FH 250 mm à frente do braço	41
Figura 14 - Gabarito da regra T.1.1	42
Figura 15- Gabarito da regra T.1.2.....	43
Figura 16 - Geometria inferior do MH	44
Figura 17- Vista frontal do MH completo	45
Figura 18 - Vista frontal do FH completo.....	46
Figura 19- Zona de permanência do <i>Upper Side Impact Member</i>	46
Figura 20- Vista lateral do SIS completo, em azul, ligando o MH na esquerda ao FH à direita, ambos em preto.....	47
Figura 21 - <i>Impact Attenuator</i> destacado em vermelho em um veículo mini Fórmula	48
Figura 22 - Vista frontal do <i>Front Bulkhead</i>	49
Figura 23 - Vista lateral dos suportes do FB e FH, em vermelho, com FH à esquerda e FB À direita, ambos em preto.....	50
Figura 24 - Modelo virtual do motor CBR600RR 2007	51

Figura 25 - Caixa do motor.....	52
Figura 26 - Restrições da geometria dos suportes do MH por regulamento	53
Figura 27 - Suportes superiores do MH destacados em vermelho e inferiores em verde	53
Figura 28 - Perfil circular tubular mínimo escolhido.....	58
Figura 29 - Modelo do chassi tubular no <i>Ansys Mechanical</i> com tubos aplicados	59
Figura 30 – Barra circular de raio 0,5 m e 1 m de comprimento sob ação de força longitudinal de 1000 N, transversal de 500 N e torção de 500 N*m simulada no <i>Ansys</i> com <i>Beam Tool</i>	60
Figura 31 – Resultado de Tensão Combinada Máxima do exemplo simulado com <i>Beam Tool</i>	61
Figura 32 - Resultado de Tensão Combinada Mínima do exemplo simulado com <i>Beam Tool</i>	61
Figura 33- Pontos de aplicação das condições de contorno, realçados em verde	63
Figura 34- Configurações de malha fornecidas pelo <i>Ansys</i> para corpos lineares, com tamanho de malhas destacado a ser testado.....	64
Figura 35 – Malha inadequada formada com elemento de tamanho 500 mm	66
Figura 36 - Sistema de coordenadas oficial e componentes da força de simulação .	67
Figura 37- Força aplicada no topo do FH, em seta vermelha	67
Figura 38 - Deformações pelas forças no topo do FH do Modelo 1	68
Figura 39 - Tensões combinadas máximas no teste do FH do Modelo 1	69
Figura 40 - Tensões combinadas mínimas no teste do FH do Modelo 1	69
Figura 41 - Força aplicada no topo do MH, em seta vermelha.....	70
Figura 42 - Deformações pelas forças no topo do MH	71
Figura 43 - Tensões combinadas máximas no teste do MH do Modelo 1	71
Figura 44 - Tensões combinadas mínimas no teste do MH do Modelo 1	72
Figura 45 - Exemplo de condições de contorno e força aplicada em um dos arcos..	73
Figura 46 - Pontos críticos das tensões máximas no FH do teste de validação	74
Figura 47 - Pontos críticos das tensões máximas no MH do teste de validação.....	74
Figura 48- Pontos críticos das tensões máximas no MH do teste de validação com força longitudinal	75
Figura 49- Vista lateral do Modelo 1.1, com linha adicional em vermelho.....	80
Figura 50 - Esboço de um FH em forma de arco no Modelo 1.2.....	81
Figura 51 - Comparação do FH no Modelo 1 (esquerda) e Modelo 1.3 (direita)	82

Figura 52 - Novo desenho do FH, presente no Modelo 1.4.....	84
Figura 53- Modelo 1.5 com FH inclinado, em vermelho, e suporte em azul.....	85
Figura 54 - Modelo 1 (esquerda) e Modelo 1.6 (direita) com suportes frontais superiores do FH destacados em vermelho	86
Figura 55 - Novo tubo de suporte ao nó crítico adicionado no Modelo 1.7, em vermelho.....	87
Figura 56 - Tubos afetados pela primeira rodada de redução de peso destacados em vermelho.....	105
Figura 57- Tubos afetados pela segunda rodada de redução de peso destacados em verde	105
Figura 58- Estrutura da caixa do motor em amarelo, alterada na última rodada de redução de peso.....	106
Figura 59 - Pontos críticos revelados pelo Teste FH, em vermelho	108
Figura 60 - Pontos críticos revelados pelo Teste MH, em vermelho	109
Figura 61 - Pontos críticos revelados pelo Teste MH, em vermelho	110
Figura 62- Pontos críticos do Modelo Final, em vermelho, no Teste MH	112
Figura 63 - Pontos críticos do Modelo Final, em vermelho, no Teste FH.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas interpoladas para o braço do <i>Driver Template</i>	37
Tabela 2 - Dimensões dos tubos classificadas pelo momento de inércia de área	40
Tabela 3 - Tubos permitidos em seções importantes do chassi.....	40
Tabela 4 - Propriedades mecânicas mínimas permitidas para aços	55
Tabela 5 - Resistências de alguns aços de baixo a médio Carbono, destacando o aço AISI 1020, em azul. As siglas representam tratamentos térmicos, laminado a quente (HR) e repuxado a frio (CD)	56
Tabela 6 - Módulo de Elasticidade de alguns aços de baixo a médio Carbono	57
Tabela 7 - Requisitos mínimos para escolha das dimensões dos tubos	58
Tabela 8 - Resultado dos testes feitos com diferentes tamanhos de malha	66
Tabela 9 - Valores das tensões registradas no teste de validação vertical	77
Tabela 10 - Valores das tensões registradas no teste de validação longitudinal	77
Tabela 11 - Resultados testes Modelo 1 com tubos 25x2,5.....	79
Tabela 12- Resultado dos testes do Modelo 1 com tubos 33x2,5	80
Tabela 13 - Resultado dos testes do Modelo 1.1 com tubos 33x2,5	81
Tabela 14 - Resultado dos testes do Modelo 1.2 com tubos 33x2,5	83
Tabela 15 - Resultado dos testes do Modelo 1.3 com tubos 33x2,5	84
Tabela 16 - Resultado dos testes do Modelo 1.4 com tubos 33x2,5	85
Tabela 17 - Resultado dos testes do Modelo 1.5 com tubos 33x2,5	87
Tabela 18 - Resultado dos testes do Modelo 1.6 com tubos 33x2,5	88
Tabela 19 - Resultado dos testes do Modelo 1.7 com tubos 33x2,5	89
Tabela 20 – Tensões dos modelos resultantes das primeiras alterações, ordenados pela tensão no Arco Frontal (FH)	89
Tabela 21 - Resultado dos testes do Modelo 2 com tubos 33x2,5	90
Tabela 22- Resultado dos testes do Modelo 3 com tubos 33x2,5	91
Tabela 23- Resultado dos testes do Modelo 4 com tubos 33x2,5	91
Tabela 24 - Resultado dos testes do Modelo 5 com tubos 33x2,5	92
Tabela 25 - Resultado dos testes do Modelo 6 com tubos 33x2,5	92
Tabela 26- Resultado dos testes do Modelo 7 com tubos 33x2,5	93
Tabela 27 - Resultado dos testes do Modelo 8 com tubos 33x2,5	93
Tabela 28- Resultado dos testes do Modelo 9 com tubos 33x2,5	94

Tabela 29 - Resultado das combinações em ordem crescente pelo Teste FH	94
Tabela 30 - Resultado dos testes do Modelo 2 com tubos 42x2,5	95
Tabela 31 - Resultado dos testes do Modelo 2 com tubos 42x2,5	96
Tabela 32 - Resultado dos testes do Modelo 2.1 com tubos 42x2,5	96
Tabela 33 - Resultado dos testes do Modelo 2.2 com tubos 42x2,5	97
Tabela 34 - Resultado dos testes do Modelo 5.1 com tubos 42x2,5	97
Tabela 35- Resultado dos testes do Modelo 5.2 com tubos 42x2,5	98
Tabela 36 - Tensões dos modelos corrigidos, com caractere final “C” indicando a versão corrigida	99
Tabela 37 - Resultado testes do Modelo 2C organizados pelo tamanho dos tubos	101
Tabela 38 - Resultado testes do Modelo 2.1C organizados pelo tamanho dos tubos	102
Tabela 39 - Resultado testes do Modelo 2.2C organizados pelo tamanho dos tubos	102
Tabela 40- Resultado testes do Modelo 5C organizados pelo tamanho dos tubos.	103
Tabela 41- Resultado testes do Modelo 5C organizados pelo tamanho dos tubos.	103
Tabela 42- Resultado testes do Modelo 5C organizados pelo tamanho dos tubos.	104
Tabela 43 - Resultados dos chassis mais leves entre as combinações de tubos, ordenadas pelo peso	105
Tabela 44 - Resultados reduções de peso do Modelo 2C com tubo inicial 42x3,25	108
Tabela 45- Resultados reduções de peso do Modelo 2C com tubo inicial 42x3,25	109
Tabela 46 - Resultados reduções de peso do Modelo 2C com tubo inicial 42x3,25	111
Tabela 47 - Resultados dos 3 modelos testados para redução de peso	112
Tabela 48 - Adaptação das medidas dos tubos	112
Tabela 49 - Resultados do modelo final	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI – *American Iron and Steel Institute*
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
CAD – *Computer Aided Design*
CAE – *Computer Aided Engineering*
FB – *Front Bulkhead*
FH – *Front Hoop*
MH – *Main Hoop*
SAE - *Society of Automotive Engineers*
SIS – *Side Impact Structure*

LISTA DE SÍMBOLOS

E- módulo de elasticidade do material (GPa)
I - momento de inércia da seção transversal (mm⁴)
K – matriz de rigidez de uma estrutura (N/mm)
kg – quilograma (unidade de medida de peso)
M - momento fletor (N·m)
mm - milímetro (unidade de medida de comprimento)
MPa – megapascal (unidade de medida de tensão)
N - Newton (unidade de medida de força)
r_e – raio externo (mm)
r_i – raio interno (mm)
u_{tot} - deslocamento total (mm)
ΔA – variação de área (m²)
ΔF – variação de força normal (N)
ΔV – variação de força cortante (N)
σ - tensão normal (MPa)
σ₁ - maior tensão principal (MPa)
σ₂ - tensão principal intermediária (MPa)
σ₃ - menor tensão principal (MPa)
σ_{Eq} - tensão equivalente de Von Mises (MPa)
σ_{min} - tensão normal mínima combinada (MPa)
σ_{max} - tensão normal máxima combinada (MPa)
ε: deformação sofrida com aplicação da tensão σ (adimensional)
τ - tensão de cisalhamento (MPa)
τ_{max} - tensão de cisalhamento máxima (MPa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
1.2	JUSTIFICATIVA.....	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	COMPETIÇÃO FORMULA SAE	24
2.2	DEFINIÇÕES ESTRUTURAIS DO CHASSI	26
2.3	ESTUDO DE TENSÕES.....	27
2.3.1	Tensões básicas.....	27
2.3.2	Tensor de Tensões.....	29
2.3.3	Resistência dos materiais.....	30
2.3.4	Teoria da Tensão Equivalente de Von Mises	32
2.3.5	Tensões Principais	34
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	34
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	DESENHO DO CHASSI	36
3.1.1	Método de início do desenho.....	36
3.1.2	Driver Template	36
3.1.3	Assoalho	40
3.1.4	Main Hoop (MH)	43
3.1.5	Front Hoop (FH).....	47
3.1.6	Side Impact Structure (SIS)	48
3.1.7	Front Bulkhead (FB)	50
3.1.8	Estrutura traseira	52
3.2	PREPARAÇÕES DAS SIMULAÇÕES.....	56
3.2.1	Escolha do material dos tubos.....	56
3.2.2	Escolha das dimensões dos tubos	59
3.2.3	Transformação do Modelo CAD	60
3.2.4	Ambiente usado na simulação.....	61
3.2.5	Análise de Tensões com o Beam Tool	61
3.3	PROCEDIMENTOS DOS TESTES DE CAPOTAMENTO	64
3.3.1	Aplicações das Condições de Contorno	65
3.3.2	Configuração de Malha.....	66
3.3.3	Aplicação das Forças e Resultados Admissíveis	68
3.3.4	Simulação FH	69
3.3.5	Simulação MH	72
3.3.6	Teste com forças menores	74
3.3.7	Coeficiente de Segurança	79

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1	PROCEDIMENTOS DE MELHORIA	80
4.2	MODELO ORIGINAL E PRIMEIRA FASE DE MELHORIAS	80
4.2.1	Modelo 1	80
4.2.2	Modelo 1.1	81
4.2.3	Modelo 1.2	83
4.2.4	Modelo 1.3	84
4.2.5	Modelo 1.4	85
4.2.6	Modelo 1.5	87
4.2.7	Modelo 1.6	88
4.2.8	Modelo 1.7	89
4.2.9	Resumo dos resultados das primeiras alterações	90
4.3	COMBINAÇÃO DE MODELOS	91
4.3.1	Modelo 2	91
4.3.2	Modelo 3	92
4.3.3	Modelo 4	92
4.3.4	Modelo 5	93
4.3.5	Modelo 6	93
4.3.6	Modelo 7	94
4.3.7	Modelo 8	94
4.3.8	Modelo 9	95
4.3.9	Conclusões das combinações de modelos	95
4.4	REFORÇOS DO MH	97
4.4.1	Modelo 2.1	97
4.4.2	Modelo 2.2	98
4.4.3	Modelo 5.1	98
4.4.4	Modelo 5.2	99
4.4.5	Resumo reforços do MH	99
4.5	CORREÇÃO DE DOBRAS	100
4.6	RODADA FINAL DE SIMULAÇÕES	101
4.6.1	Combinações Modelo 2C	102
4.6.2	Combinações Modelo 2.1C	103
4.6.3	Combinações Modelo 2.2C	103
4.6.4	Combinações Modelo 5C	104
4.6.5	Combinações Modelo 5.1C	104
4.6.6	Combinações Modelo 5.2C	105
4.6.7	Resumo dos testes dos modelos corrigidos	105
4.7	REDUÇÃO DE PESO	106
4.7.1	Modelo 2C	109
4.7.2	Modelo 2.2C	110
4.7.3	Modelo 5.1C	112
4.8	ESCOLHA DO MODELO	113
5	CONCLUSÕES	116
6	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	118

REFERÊNCIAS..... 120

1 INTRODUÇÃO

Projetos de engenharia em geral exigem o levantamento de funções, características importantes e necessárias para o funcionamento seguro do produto que se pretende projetar. Para veículos de corrida, uma das qualidades mais desejáveis é a capacidade de percorrer determinados tipos de pistas no menor tempo possível. Porém, como em qualquer projeto de engenharia, a segurança não pode ser sacrificada. No desenvolvimento de um chassi mini fórmula, peso e aceleração estão inversamente relacionados ao manter todos os outros requisitos inalterados, sendo o primeiro frequentemente reduzido para a melhoria do segundo. Maior peso pode indicar maior durabilidade e robustez tanto em termos de desgastes quanto em acidentes, porém compromete a capacidade de atingir velocidade e agilidade desejáveis para alcançar bom desempenho.

O projeto de um chassi mini fórmula deve seguir as regras da competição universitária de equipes Formula SAE, sendo publicados e atualizados em inglês anualmente pela organizadora da competição: a Sociedade de Engenheiros Automotivos. A competição é dividida em provas estáticas, avaliando o aspecto de negócio, capacidade das equipes atraírem patrocínio e decisões técnicas durante a execução do projeto, e provas dinâmicas, com testes direcionados a alguns dos atributos mais importantes dos veículos, como agilidade em um percurso de cones delimitando um formato de “8”, aceleração em arrancada testada em uma reta de 75 metros, e o Endurance, evento dinâmico mais importante que testa todos os aspectos do veículo em um circuito de 22 km valorizando o menor tempo e melhor eficiência de combustão (SAE INTERNATIONAL, 2024).

O regulamento define as principais funções do chassi e elementos que devem obrigatoriamente estar presentes. O chassi é o componente que integra todos os outros componentes do veículo, sendo o maior responsável pela segurança do piloto juntamente com os freios. Em um veículo mini fórmula, os elementos do chassi mais importantes para a segurança são dois arcos protegendo contra capotamento: o Arco Principal (denominado de Main Hoop, MH), elemento localizado em uma zona entre a linha das costas do piloto e a linha central do capacete, e o Arco Frontal (Front Hoop, FH), elemento localizado atrás do volante. Outros elementos de importância para o

chassi são a Estrutura de Impacto Lateral (*Side Impact Structure*, SIS) e os apoios e suportes dos arcos.

São oferecidos conjuntos de regras alternativas, de forma que as equipes possam escolher o grau de dificuldade do projeto. Para a área de chassi, as regras são separadas entre estrutura tubular e monobloco. Estruturas tubulares são mais fáceis de projetar e construir, podendo ser desenhadas majoritariamente com linhas retas e possíveis de serem executadas com materiais acessíveis em formas de tubos e técnicas de soldagem com grau de complexidade menor quando comparadas às empregadas na indústria de veículos comerciais, diminuindo significativamente a necessidade de oficinas com maquinário caro para equipes iniciantes. O chassi do tipo monobloco tem o potencial de assumir mais formas diferentes comparado ao tubular e ser mais leve, porém com projeto e execução aos níveis encontrados em grandes fabricantes de veículos exigindo alto orçamento.

Requisitos mínimos devem ser obedecidos para classificar o chassi como seguro. Para garantir a conformidade com a segurança, ferramentas de CAE (*Computer Aided Engineering*) podem ser usadas. Simulações pelo Método dos Elementos Finitos diminuem a necessidade de construir protótipos para testes destrutivos em laboratório, diminuindo os custos de projeto e permitindo correção de erros antes da construção. Os Elementos Finitos são resultado da divisão de um problema complexo em unidades menores, mais fáceis de resolver, com tamanho, forma e quantidade definidas pelo executor da simulação. Resultados mais precisos usam formas geométricas mais complexas e em grandes quantidades, porém resultados aceitáveis podem ser atingidos mesmo com processamentos mais modestos, tornando o método relativamente acessível com softwares de licença estudantil.

O método será empregado para determinar se o chassi projetado é seguro contra capotamento, permitindo a tomada de decisões a partir da interpretação dos resultados em duas fases: durante o projeto e análise final. Durante o projeto, com desenho executado em software CAD (*Computer Aided Design*), surgem diferentes possibilidades de configuração de geometrias permitidas pelo regulamento. As maiores mudanças são candidatas a gerar modelos distintos de chassi, necessitando de simulações para comparação. Além da geometria, cada modelo será testado com

diferentes tamanhos de tubos baseados nas propriedades conferidas ao chassi e disponibilidade dos fornecedores. Cada modelo será modificado na tentativa de reforçá-los nas regiões mais afetados pelos esforços. O modelo mais vantajoso será o mais leve entre os modelos capazes de atingir os requisitos de segurança definidos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar e analisar um chassi mini fórmula obedecendo as regras da competição Formula SAE de 2025, levando em consideração a segurança do piloto contra acidentes de capotamento. Para bom desempenho, é necessário evitar adições desnecessárias de peso com tubos excedentes e/ou de grandes dimensões sem função estrutural útil. Para garantir a segurança, o projeto deve passar por simulações através de softwares adotando o Método dos Elementos Finitos, com esforços, direções e restrições determinados pelo regulamento da competição dos anos 2017-18, última edição em que regras de simulação foram fornecidas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar um modelo inicial base de chassi de acordo com o regulamento Formula SAE 2025 (SAE INTERNATIONAL, 2024)
- Determinar o tamanho dos elementos de malha para a simulação
- Projetar diferentes modelos de chassi a partir de ramificações importantes nas regras e necessidade de reforços
- Determinar através das simulações a segurança de cada modelo ao sofrer cargas equivalentes a capotamento, definidas pelo regulamento Formula SAE 2017-18 (SAE INTERNATIONAL, 2016)
- Escolher material e dimensões mínimas dos tubos baseados nas regras e simulações

- Projetar um modelo final composto dos melhores resultados e testar novamente
- Fazer modificações finais com os últimos resultados e validar com novas simulações

1.2 Justificativa

Este trabalho apresenta o processo de projeto de um chassi mini fórmula desde o início, considerando o que é possível realizar sem as informações iniciais de outras áreas e conhecimento prévio de projetos anteriores. Algumas generalizações são feitas para conclusão em tempo hábil, balanceando regras, os objetivos de segurança e desempenho, e a facilidade de execução com ferramentas acessíveis. Frequentemente são publicados trabalhos na área com modelos de chassi iniciais prontos, metodologia focada apenas nas simulações com validação em testes de bancada e uso dos resultados para inclusão de reforços, como os estudos de (CANUT, 2014) e (MIURA, 2017) mencionando tomadas de decisões entre diferentes formas de desenho, mas ainda assim sem detalhes sobre as opções. Embora testes de bancada sejam de grande importância para confirmar as simulações e fornecer maior grau de confiança nos resultados, equipes com poucos recursos ou executando o primeiro projeto podem encontrar na simulação uma forma simplificada de identificar e corrigir possíveis erros antes de comprometer tempo e recursos em laboratório ou oficina.

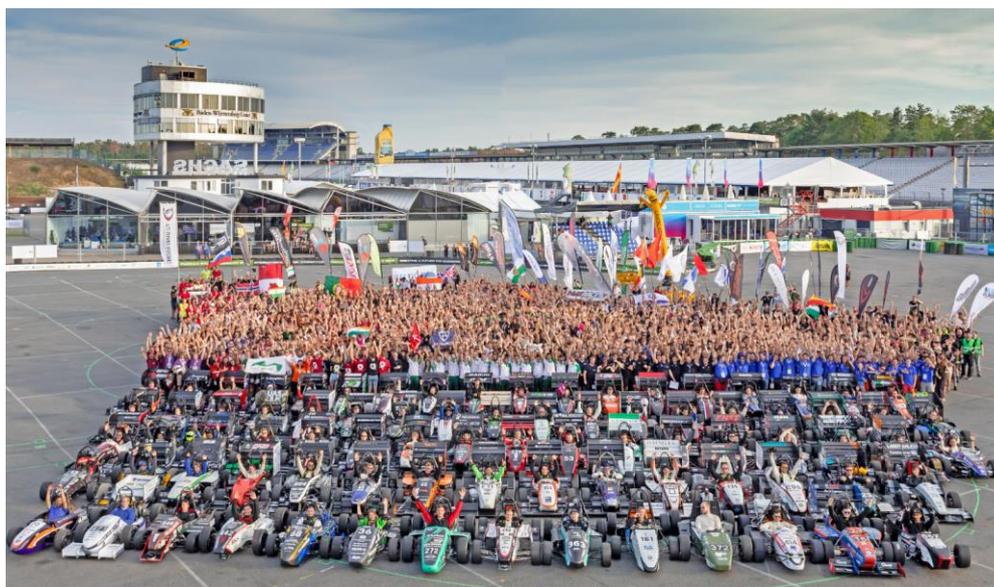
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Competição Formula SAE

A competição *Formula SAE* ocorre anualmente com etapas regionais, nacionais e internacionais, sob a organização da SAE (Sociedade de Engenheiros Automotivos). Os participantes devem estar em equipes, devendo participar na competição com projeto de autoria própria de um veículo mini fórmula, seja ele totalmente físico e funcional ou apenas teórico.

As equipes se dividem como uma empresa, entre áreas técnicas e administrativas. As áreas técnicas se dividem de acordo com os principais componentes do veículo: Estrutural (chassi), Suspensão, Freio, Aerodinâmica, *Powertrain* e Telemetria. Áreas administrativas se encarregam de atrair patrocínio, mídias sociais, financeiro, gerenciar equipamentos e espaço para a equipe, entre outros.

Figura 1 - Reunião das equipes participantes da competição na Alemanha em 2019



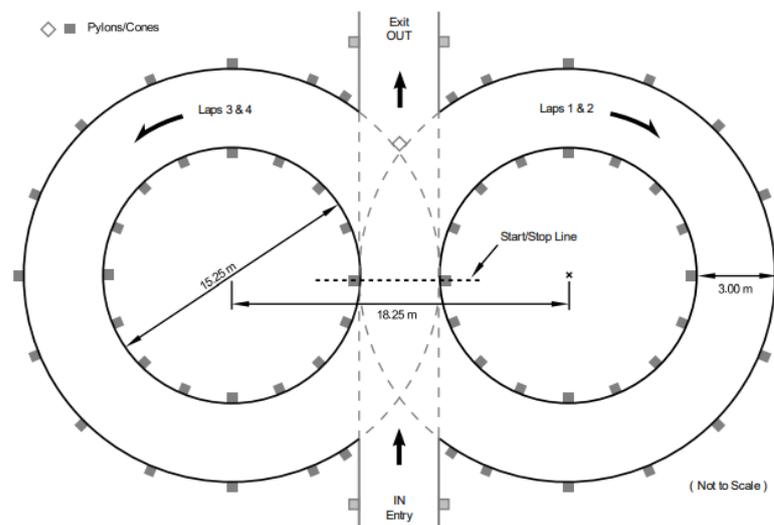
Fonte: (ANDERSON, 2019)

A competição se divide em duas etapas: Eventos Estáticos e Eventos Dinâmicos, ambos com sub etapas valendo pontuações determinadas pela SAE. Os Eventos

Estáticos consistem em apresentar o projeto como um produto para potenciais investidores, com seus aspectos técnicos e administrativos. Entre as apresentações estão a Geral, Custos e *Design*, estando a Engenharia relacionada a todas as apresentações. Nesta etapa, o protótipo construído ainda não é julgado.

Os Eventos Dinâmicos medem em pista as capacidades do veículo construído em diferentes etapas com pontuações. O Evento de Aceleração testa a aceleração dos veículos em uma linha reta de 75 metros, com possibilidade de mais de uma tentativa. O Evento de *Skidpad*, mostrado na Figura 2, testa a capacidade de manter o percurso em manobras com raio constante, com dois grandes círculos delimitados por cones. Duas voltas são feitas em cada círculo, com a pontuação calculada a partir do tempo dos percursos.

Figura 2 - Esquema do circuito usado no Evento *Skidpad*



Fonte: *Formula SAE Rules 2025*, pág. 134

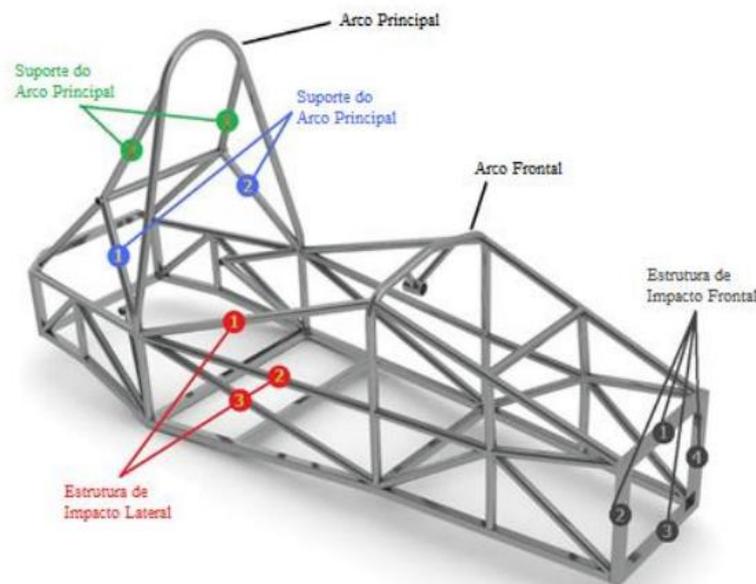
Ainda entre os Eventos Dinâmicos, o *Autocross* avalia a agilidade e facilidade de pilotagem do veículo em curvas fechadas, realizado em um circuito com a seguinte sequência: retas de 60 metros com curvas fechadas em "U" no final, retas de 45 metros com curvas abertas no final, curvas longas de 23 a 45 metros com diâmetro constante, curvas fechadas em "U" com 9 metros de diâmetro externo, percurso de ziguezague com cones espaçados a no máximo 12 metros, múltiplas curvas com formatos e diâmetros diferentes (SAE INTERNATIONAL, 2024, p. 134).

Ao fim o Evento Dinâmico mais importante é feito, o *Endurance* mede a resistência e eficiência dos veículos em um circuito de 22 km, podendo conter os mesmos citados no *Autocross* em diferentes configurações. Duas pontuações são calculadas a partir deste evento: uma para o tempo de finalização e outra para a eficiência de uso de combustível.

2.2 DEFINIÇÕES ESTRUTURAIS DO CHASSI

Um chassi tubular mini fórmula obrigatoriamente é composto pelas seguintes partes: *Main Hoop* (MH, Arco Principal), *Front Hoop* (FH, Arco Frontal), *Side Impact Structure* (SIS, Estrutura de Impacto Lateral), *Front Bulkhead* (FB, Estrutura de Impacto Frontal), *Main Hoop braces & supports* (suportes do MH), *Front Hoop braces & supports* (suportes do FH), mostrados na Figura 3.

Figura 3 - Apontamento das principais estruturas de um chassi mini fórmula



Fonte: (CANUT, 2014)(CANUT, 2014)

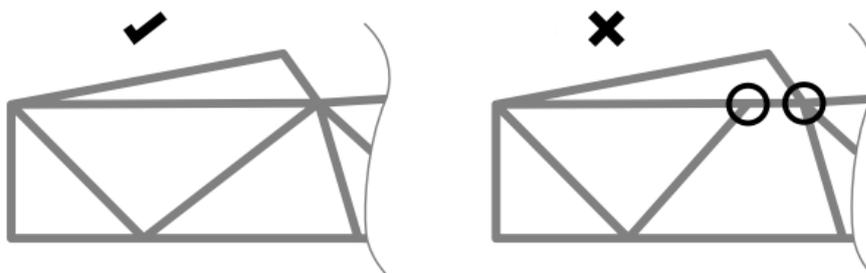
De acordo com a seção F.1 do regulamento *Formula SAE* de 2025, o *Main Hoop* (MH) e *Front Hoop* (FH) são os arcos principais do chassi, responsáveis por proteger o piloto contra capotamento. Seus suportes ajudam a transferir os

carregamentos de um potencial capotamento a outros membros reforçados da estrutura.

Ainda pela seção F.1 o *Front Bulkhead* (FB) é uma estrutura plana protegendo os pés do piloto contra impacto. O *Side Impact Structure* (SIS) tem função similar, protegendo o piloto contra impactos laterais, necessitando de um elemento superior, um médio e um inferior. A combinação de todos os elementos citados forma a *Primary Structure* (Estrutura Primária), termo citado em outras regras. Similar a este é o *Major Structure* (Estrutura Principal) que é um reflexo da Estrutura Primária desconsiderando elementos que estejam acima do membro superior do SIS.

Todos os membros da Estrutura Primária devem estar “devidamente triangulados”, termo abordado pela regra F.1.17 apontando que as estruturas devem formar triângulos, compartilhando nós com vários membros, como na Figura 4.

Figura 4 - Demonstração de uma estrutura triangulada



Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra F.1.17, adaptada

2.3 ESTUDO DE TENSÕES

2.3.1 Tensões básicas

Ao aplicar uma força externa em um objeto temos a ocorrência de tensão. A tensão é definida a partir da direção em que ocorre em relação à área da seção do objeto. Tensões normais, representadas de forma geral pela Equação (1), atuam perpendicularmente a uma superfície, nomeada tração (+) ou compressão (-) dependendo da direção, podendo alongar ou comprimir o corpo na direção de

aplicação da força. Uma tensão atuando em seção interna do objeto, paralela à seção, separando-a de outra seção, é denominada tensão de cisalhamento, mostrada de forma geral na Equação (2).

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta A} \right) \quad (1)$$

Onde:

- σ : tensão normal a uma superfície
- ΔF : força normal aplicada na superfície
- ΔA : área superficial

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta V}{\Delta A} \right) \quad (2)$$

Onde:

- τ : tensão cisalhante
- ΔV : força cortante aplicada na superfície
- ΔA : área superficial

Estas tensões podem ser resultado diretos ou indiretos das forças atuantes no corpo. A tensão normal, por exemplo, pode ser causada por uma carga diretamente aplicada perpendicularmente a uma superfície do objeto ou como consequência do tracionamento ou compressão das fibras de um corpo em flexão, como na Equação (3). Igualmente a tensão de cisalhamento pode ocorrer por efeitos diretos, com uma mesma força perpendicular à superfície causando efeitos entre seções internas do corpo, ou por consequência de uma torção com tendência a separar as superfícies de dois corpos diferentes com um deles relativamente fixo.

$$\sigma = \frac{4M \cdot r_e}{\pi(r_e^4 - r_i^4)} \quad (3)$$

Onde:

- σ : tensão axial devido à flexão M (MPa)
- M: flexão causada por uma força externa perpendicular ao eixo do tubo (N.m)
- r_e : raio externo do tubo
- r_i : raio interno do tubo

$$\tau = \frac{2T \cdot r_e}{\pi(r_e^4 - r_i^4)} \quad (4)$$

Onde:

- τ : tensão cisalhante devido à torção T (MPa)
- T: torção causada por uma força externa radial (N.m)
- r_e : raio externo do tubo
- r_i : raio interno do tubo

2.3.2 Tensor de Tensões

Em um estado de tensões tridimensional usando o sistema cartesiano de coordenadas, é necessária uma nova notação para representar as tensões. Um tensor de segunda ordem, a exemplo da Equação (5), equivalente a uma matriz, representa as tensões atuantes nos planos e direções de um corpo representado por um cubo unitário. Quando aplicado ao estudo de tensões, o tensor construído é uma matriz simétrica.

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde:

- $\boldsymbol{\sigma}$: tensor de tensões em estado tridimensional (MPa)
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: tensões normais atuantes na direção dos respectivos eixos (MPa)
- $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$: tensões cisalhantes atuantes nos respectivos planos (MPa)

2.3.3 Resistência dos materiais

Os materiais podem ser divididos em grupos de acordo com suas propriedades. Algumas destas propriedades têm relação com a forma que estes se comportam ao sofrerem a influência de esforços. As propriedades mecânicas mais básicas dos materiais indicam as intensidades de forças que podem suportar antes de deformar permanentemente (tensão de escoamento) e como chegam à ruptura (tensão de ruptura ou tensão última), exemplificado pela Figura 5.

Figura 5 - Objeto fraturado por consequência de esforços



Fonte (LUZ, 2017):

Os valores correspondentes a estas tensões são adquiridos em laboratório através de ensaios padronizados, regulados por órgãos nacionais e internacionais como ASTM (Sociedade Americana de Teste de Materiais) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). A Figura 6 mostra um destes ensaios.

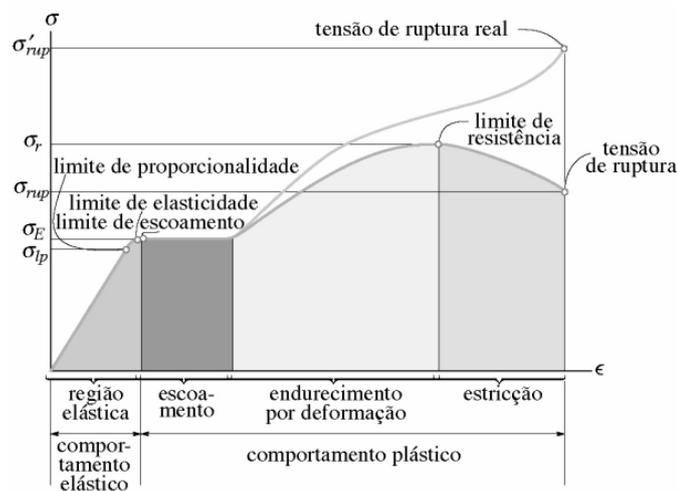
Figura 6- Corpo de prova em ensaio de tração



Fonte: (W&W SERVIÇOS TÉCNICOS E ENSAIOS INDUSTRIAIS)

O resultado dos ensaios de materiais dúcteis é um gráfico Tensão x Deformação com duas regiões de diferentes comportamentos: zona elástica do material, região em que cessar a aplicação de cargas resulta em retorno do material ao seu estado inicial; zona de plástica, região em que as deformações apenas se acumulam, sem retorno ao estado inicial, sendo sucedidas pela ruptura após aplicação de carga suficiente, representados graficamente na Figura 7.

Figura 7 - Gráfico Tensão x Deformação típico de ensaios de tração



Fonte: (HIBBELER, 2010, p. 58)

A relação entre a tensão e deformação dos materiais na zona elástica é apresentada pela Lei de Hook, descrita na Equação (6), introduzindo mais uma propriedade mecânica: o Módulo de Elasticidade (E). Materiais considerados dúcteis apresentam baixo módulo de elasticidade, sofrendo grandes deformações ao aplicar forças relativamente baixas, retornando facilmente ao estado original. No espectro oposto estão os materiais rígidos, apresentando alto módulo, porém frequentemente em troca de ruptura repentina pouco depois de ser atingida a tensão de escoamento, motivo pelo qual são mais conhecidos como frágeis.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

- σ : tensão normal (GPa)
- E: módulo de elasticidade do material (GPa)
- ε : deformação específica (adimensional)

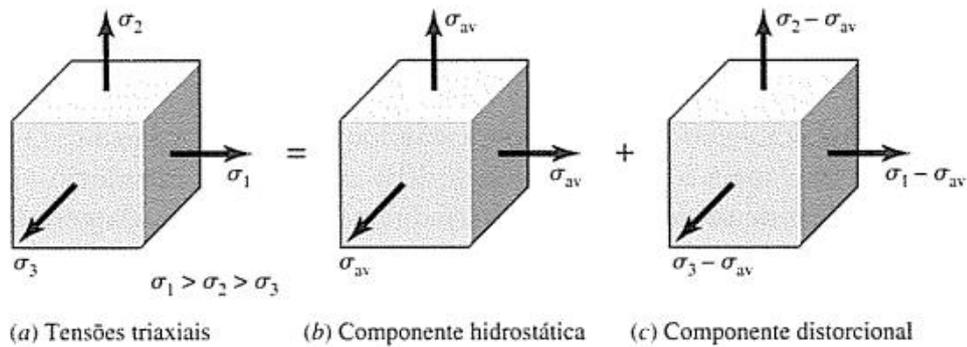
Materiais frágeis frequentemente apresentam tensões de escoamento maiores do que os dúcteis, mostrando que há relação entre as tensões de escoamento, de ruptura e elasticidade. Os aços apresentam variação de propriedades em consequência das possibilidades de composições e tratamentos térmicos, podendo resistir ao escoamento com valores de tensão de 170 MPa (AISI 1006 laminado a quente) a 1590 MPa (AISI 4340 temperado e revenido) (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2008, p. 930)

2.3.4 Teoria da Tensão Equivalente de Von Mises

Segundo Shigley (2008, pág. 262) todo elemento em um estado de tensões tridimensional sujeito a tensões principais pode ser descrito pela ação de dois tipos de tensões: tensões hidrostáticas, representadas por tensões normais iguais atuando em todas as faces simultaneamente de um corpo causando variação de volume sem alteração de forma; e tensões residuais, com módulos diferentes atuando nas faces

do corpo, causando diferentes distorções em cada face, alterando a forma do corpo. As tensões podem ser expressas visualmente por exemplos como o da Figura 8.

Figura 8 - Representação de um estado de tensões tridimensional decomposto



Fonte: (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2008, p. 262)

Foi teorizado que ao calcular a energia de distorção do estado representado e comparar à energia de distorção de um corpo em ensaio de tração simples, encontra-se uma expressão para as tensões tridimensionais equivalentes à tensão de escoamento encontrada em teste de tração de laboratório, sendo possível descrever o escoamento do material mesmo em um estado tridimensional, representado na Equação (7). A teoria é bem representada quando aplicada a materiais dúcteis, como alguns metais que se encaixam na classificação

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)]} \quad (7)$$

Onde:

- σ_{Eq} : tensão equivalente de Von Mises (MPa)
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: tensões normais atuantes na direção dos respectivos eixos (MPa)
- $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$: tensões cisalhantes atuantes nos respectivos planos (MPa)

2.3.5 Tensões Principais

As tensões principais ocorrem em planos orientados de forma que as tensões de cisalhamento desaparecem e restam apenas componentes normais. Estas são as tensões máximas e mínimas em um ponto do corpo analisado e são importantes para avaliar se uma estrutura poderá ou não falhar. Vários critérios de análise estrutural utilizam as tensões principais como base para a verificação de segurança (BEER, JOHNSTON JR. , et al., 2015).

A mesma tensão equivalente mencionada no tópico anterior também pode ser calculada a partir das tensões principais, como mostrado na Equação (8). As tensões são ordenadas de 1 a 3 do maior valor para o menor valor.

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (8)$$

Onde:

- σ_{Eq} : tensão equivalente de Von Mises (MPa)
- σ_1 : maior tensão principal (MPa)
- σ_2 : tensão principal intermediária (MPa)
- σ_3 : menor tensão principal (MPa)

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica de solução aproximada para problemas descritos por equações diferenciais parciais. O método permite prever com precisão o comportamento mecânico de estruturas sob diversas condições de carregamento, contribuindo para o dimensionamento, análise estrutural e validação do projeto.

O princípio básico do MEF consiste em dividir uma forma complexa em um conjunto de pequenos elementos, chamados de elementos finitos. Estes elementos,

conectados por nós, são descritos por funções de forma que aproximam as variáveis de interesse dentro de cada elemento.

Uma possível formulação matemática parte da forma fraca da equação diferencial do problema, e a solução global é obtida pela junção das equações de todos os elementos, resultando em um sistema de equações algébricas, onde \mathbf{K} é matriz de rigidez global da estrutura, \mathbf{u} o vetor de deslocamentos dos nós e \mathbf{f} é vetor de forças aplicadas aos nós, mostrado na Equação (9) abaixo.

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (9)$$

Onde:

- \mathbf{K} : matriz de rigidez global da estrutura (N/mm)
- \mathbf{u} : vetor deslocamento dos nós (mm)
- \mathbf{f} : vetor de forças aplicadas aos nós (N)

A aplicação do MEF segue as seguintes etapas fundamentais (ALVES FILHO, 2000):

1. Modelagem geométrica: representação da estrutura em um ambiente CAD/CAE.
2. Discretização do domínio: geração da malha de elementos finitos (1D, 2D ou 3D, dependendo da geometria e da complexidade).
3. Definição de propriedades dos materiais: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, limite de escoamento etc.
4. Aplicação das condições de contorno: restrições e carregamentos.
5. Resolução numérica: solução do sistema
6. Pós-processamento: visualização dos resultados em termos de deslocamentos, deformações, tensões e critérios de falha (ex.: Von Mises).

Para um chassi tubular, elementos simples de viga ou treliça podem considerar efeitos de flexão, torção e flambagem. Em softwares de simulação como Ansys, SolidWorks Simulation ou Abaqus, também podem ser utilizados elementos de casca ou elementos sólidos, com maior nível de detalhe e complexidade entre elementos.

3 METODOLOGIA

3.1 DESENHO DO CHASSI

3.1.1 Método de início do desenho

O desenho do chassi pode ser iniciado de duas formas: a partir dos pontos de apoio da suspensão ou da cabine do piloto. O primeiro exige ter uma suspensão pronta, o segundo pode ser iniciado a partir das regras F.5.6.5 - *Driver Template* e F.5.6.6 - *Driver Template Position* (SAE INTERNATIONAL, 2024). Considerando um projeto feito sem modelos prévios ou outras partes executadas antecipadamente por uma equipe, é escolhido o segundo método.

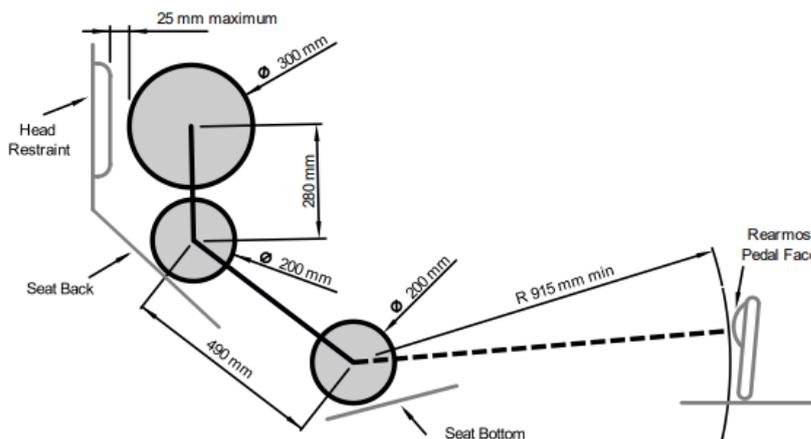
3.1.2 *Driver Template*

O chassi deve ser capaz de acomodar um piloto com medidas entre o percentil 95 masculino e o percentil 5 feminino (regra V.2.1.1), ou seja, medidas mínimas equivalentes ou abaixo de 5% da população norte-americana feminina e máximas equivalentes ou abaixo de 95% da população masculina norte-americana.

O *Driver Template* fornecido pela SAE considera as medidas masculinas demonstradas por cotas em um esboço. Uma geometria que acomoda o *Driver Template* juntamente com ajustes móveis no banco, volante e pedais estará de acordo com o regulamento. Portanto, o primeiro passo para o desenho da cabine é executar o desenho 2D do *Driver Template*, assumindo a forma vista na Figura 9.

Este esboço serve como importante referência para o posicionamento de duas das mais importantes partes da estrutura do chassi: o Arco Principal (*Main Hoop*, MH) e o Arco Frontal (*Front Hoop*, FH).

Figura 9 - Representação do *Driver Template* no regulamento



Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra F.5.6.6

3.1.2.1 Inclinação do Piloto

Dentro do chassi o piloto pode ficar acomodado de forma reta ou angular. Deixar o assento do piloto reto (encosto perpendicular ao chão) exige que os arcos e seus apoios sejam mais altos por exigência da regra F.5.6.4, deixando o centro de gravidade do veículo mais alto como consequência. Além disso, pela altura maior, tubos mais longos foram usados, aumentando o peso total. Portanto, foi escolhida uma posição inclinada com ângulo de 45 graus em relação ao eixo Y.

Do ponto de vista do tamanho dos tubos a serem usados nos arcos, maiores inclinações resultam em tubos mais curtos, sendo mais desejável do ponto de vista de peso. Porém o conforto do piloto e a capacidade de manusear adequadamente o volante e pedais durante o tempo necessário para as provas também são fatores importantes. A forma mais minuciosa de determinar a posição ideal seria obter os valores das forças que o piloto deve aplicar ou resistir no volante e pedais e testar a várias inclinações diferentes se as condições são satisfeitas. Pelo escopo deste projeto, estes testes não foram realizados.

3.1.2.2 Posição do Volante

O *Driver Template* oferecido pela SAE não especifica dimensões detalhadas necessárias para representar o braço do piloto. Dados adicionais para completar o modelo são encontrados nos estudos antropométricos de Tilley e Dreyfuss (1993),

representando medidas masculinas no percentil 99 e 50. As medidas de percentil 95 da SAE são usadas em uma tabela em junção com as medidas dos percentis 99 e 50 medidas por Tilley e Dreyfuss (1993) para interpolar a extensão total do braço, dividido entre a distância do ombro ao cotovelo (braço superior) e do cotovelo ao pulso (antebraço), mostrados na Tabela 1. A altura, conhecida no modelo da SAE, foi usada como medida inicial das interpolações.

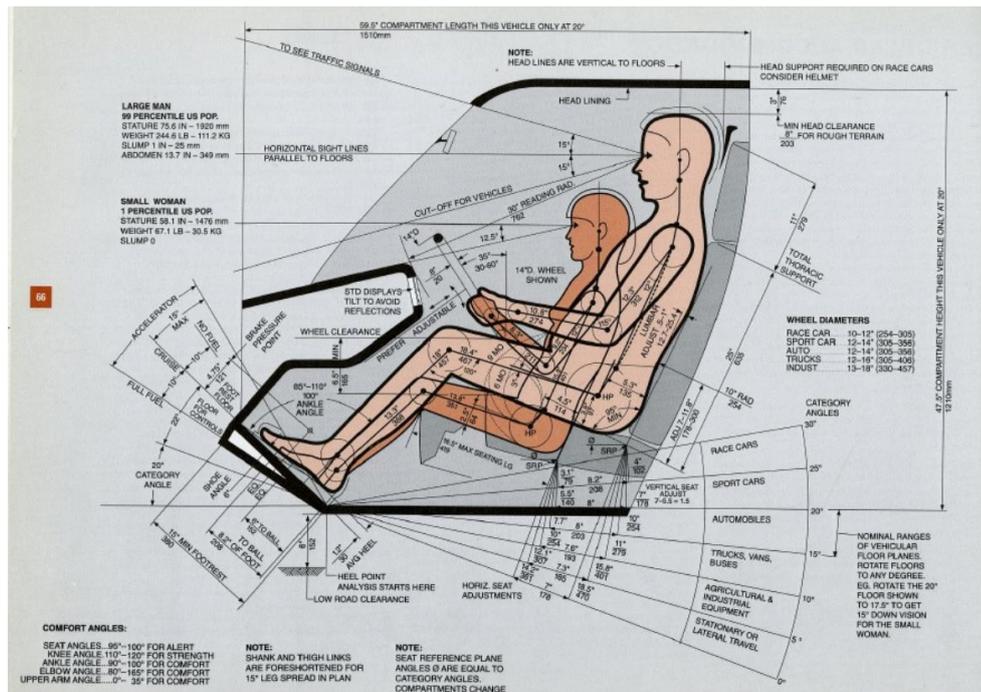
Tabela 1 – Medidas interpoladas para o braço do *Driver Template*

Dados	P₉₉	P₅₀	P₉₅
Altura (m)	1,92	1,76	1,84
Braço superior (mm)	312	279	294,4
Antebraço (mm)	274	257	266,6
Mão (mm)	213	190	201,0

Fonte: (TILLEY e HENRY DREYFUSS ASSOCIATES, 2001, p. 12, adaptado)

Com estas medidas é possível determinar a posição do volante, que pela regra F.5.7.5 vincula o *Front Hoop* a 250 mm de distância máxima da face mais próxima do volante. Além de medidas em diferentes percentis, os estudos de Tilley e Dreyfuss incluem definições de acomodação homem-máquina para diversos tipos de projetos, que podem ser vistos na Figura 10.

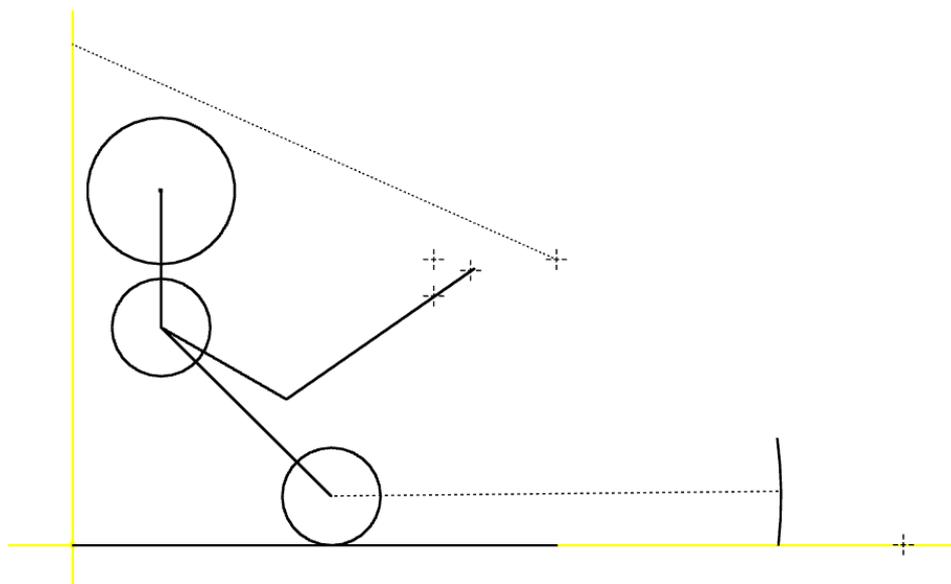
Figura 10 - Desenho com recomendações de medidas de conforto para veículos em geral



Fonte: (TILLEY e HENRY DREYFUSS ASSOCIATES, 2001, p. 66)

Para veículos de passeio e de corrida, os autores recomendam um ângulo de 115 graus entre o braço e antebraço, e ângulo de inclinação do volante entre 30 e 60 graus com o eixo vertical. Neste projeto foi adotado o ângulo recomendado do braço e 55 graus do volante com a vertical. Com o volante posicionado abaixo do pulso do piloto com o braço inclinado, o Driver Template é finalizado, podendo ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Posicionamento final do Driver Template



Fonte: Autor

3.1.3 Assoalho

O assoalho do veículo deve comportar o espaço da cabine do piloto e outros dois elementos que os delimitam: o Arco Principal (*Main Hoop*, MH) e o Arco Frontal (*Front Hoop*, FH). Com o objetivo de manter o menor espaço possível, três regras devem ser consideradas: a regra F.5.8.4, definindo que o espaço mínimo em vista lateral entre as faces internas dos tubos do MH ligados à *Major Structure* do chassi deve ser de 380 mm e o cruzamento de informações entre as regras F.3.4.1, mostrada na Tabela 2 e F.3.2.1 mostrada na Tabela 3, delimitando o diâmetro mínimo dos tubos em 25 mm. Será trabalhada com a hipótese de que um diâmetro externo máximo de 33,33 mm é suficiente para a integridade estrutural do chassi. Caso provado através das simulações que um diâmetro maior é necessário sem possibilidade de reforços, a hipótese será revisada.

Tabela 2 - Dimensões dos tubos classificadas pelo momento de inércia de área

Tubo	Momento de Inércia Mínimo (mm⁴)	Área da Seção Mínima (mm²)	Ø Externo Mínimo (mm)	Espessura da Parede Mínima (mm)	Exemplos de tubos permitidos
Tamanho A	11.320	173	25	2	25 x 2,5 mm
Tamanho B	8.509	114	25,4	1,2	25,4 x 1,6 mm
Tamanho C	6.695	91	25,4	1,2	25,4 x 1,2 mm
Tamanho D	18.015	126	35	1,2	35 x 1,2 mm

Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra F.3.4.1 adaptada

Tabela 3 - Tubos permitidos em seções importantes do chassi

Aplicação	Tamanho Mínimo do Tubo
a. Front Bulkhead	Tamanho B
b. Front Bulkhead Support	Tamanho C
c. Front Hoop	Tamanho A
d. Front Hoop Bracing	Tamanho B
e. Side Impact Structure	Tamanho B
f. Bent / Multi Upper Side Impact Member	Tamanho D
g. Main Hoop	Tamanho A
h. Main Hoop Bracing	Tamanho B
i. Main Hoop Bracing Supports	Tamanho C
j. Driver Restraint Harness Attachment	Tamanho B
k. Shoulder Harness Mounting Bar	Tamanho A
l. Shoulder Harness Mounting Bar Bracing	Tamanho C
m. Accumulator Mounting and Protection	Tamanho B
n. Component Protection	Tamanho C
o. Structural Tubing	Tamanho C

Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra F.3.2.1 adaptada

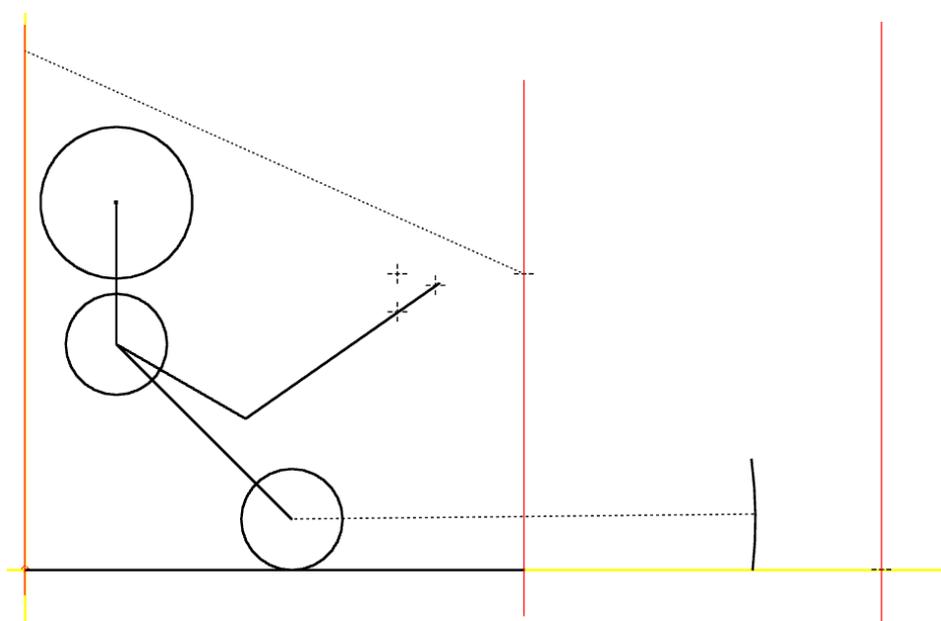
Dois fatos a serem lembrados durante o desenho no software são que as linhas representam os eixos dos tubos a serem futuramente posicionados e muitas regras comparam distâncias mínimas entre as faces de tubos, de forma que o diâmetro dos

tubos deve ser considerado, como nas regras recém mencionados. Somando a delimitação de 380 mm entre as faces internas ao assoalho do MH, a hipótese de diâmetro máximo 33,33 mm e facilidade de manipulação dos tubos, será definida a largura do assoalho em 430 mm. O comprimento do chassi será dimensionado a partir da posição dos planos que abrigarão o MH e o FH.

3.1.3.1 Posição do Plano do FH

A regra F.5.7.4 proíbe que o ponto mais alto do FH esteja mais baixo do que o ponto mais alto do volante, e a regra F.5.7.5 vincula a face mais à frente do volante (em relação à frente do veículo) a uma distância máxima de 250 mm da face mais recuada do FH. Com as dimensões do volante indefinidas, pode ser usado o ponto que representa o fim do braço do piloto para representar também a posição aproximada do volante em vista lateral e seu ponto mais alto. Sendo a distância de regra um valor máximo, as incertezas da espessura do volante e do diâmetro real final dos tubos não oferecem risco de violação. Portanto, será definido o plano do FH a 250 mm à frente do fim do braço do *Driver Template*, com ponto mais alto na mesma direção, com posições relativas vistas na Figura 12.

Figura 12 - Planos do MH (esquerda), FH (centro) e FB (direita) representadas por linhas verticais vermelhas

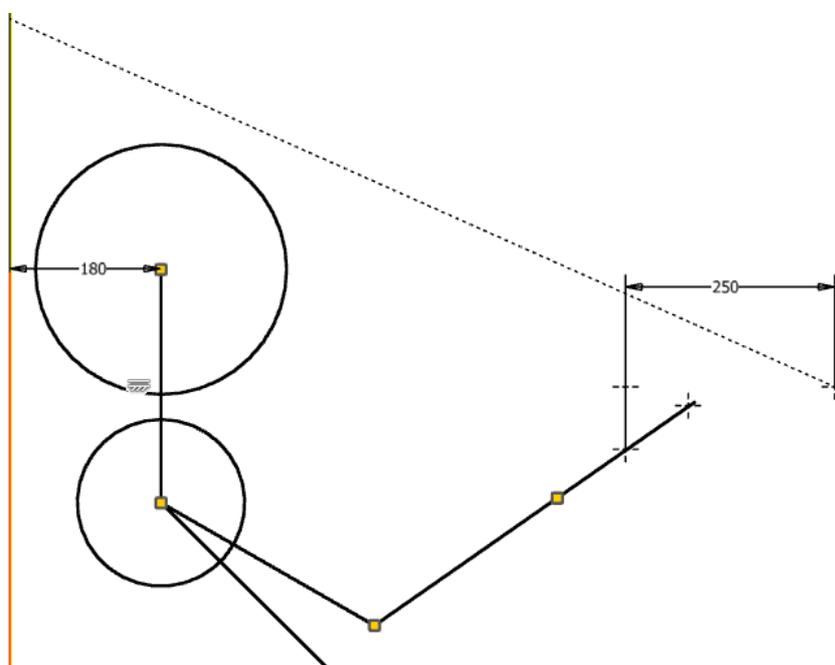


Fonte: Autor

3.1.3.2 Posição do Plano do MH

A regra F.5.6.6 representada na Figura 13 restringe a distância entre o encosto da cabeça do piloto (*Head Restraint*) e o capacete em 25 mm, e a regra F.5.6.4 traça uma linha entre o ponto mais alto do MH e o ponto mais alto do FH devendo ser paralela a uma linha tangencial ao capacete e estar a no mínimo 50 mm de distância deste, como na Figura 13. Das referências usadas para construir a reta, apenas o ponto mais alto do MH será uma incógnita, visto que o plano do MH estará localizado 30mm atrás do encosto da cabeça do piloto. O ponto de interseção entre a reta de ligação dos arcos e o plano do MH definirá o próprio MH.

Figura 13 - Representação final do Driver Template com posição do FH 250 mm à frente do braço



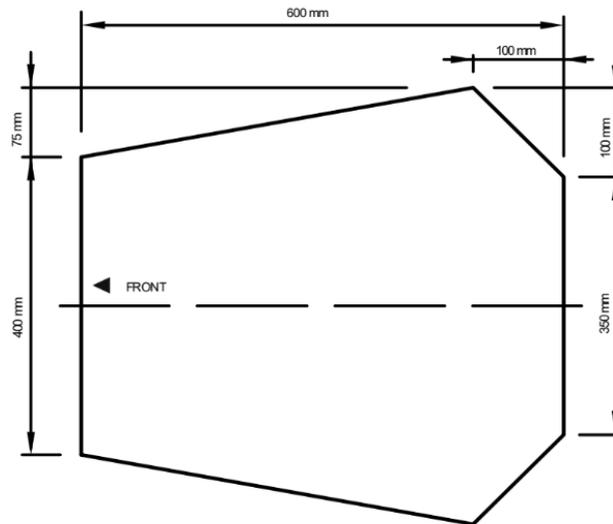
Fonte: Autor

3.1.4 Main Hoop (MH)

Para que a cabine do piloto tenha o menor espaço possível aceitável pelo regulamento, a geometria do MH deve antecipadamente ser pensada para integrar adequadamente a SIS, que fecha as laterais se juntando com o FH para fechar o cockpit. Há regras dedicadas a verificar se o espaço interno do veículo comporta bem

o suficiente um piloto: T.1.1 e T.1.2. Estas foram usadas como base para projetar o menor espaço possível.

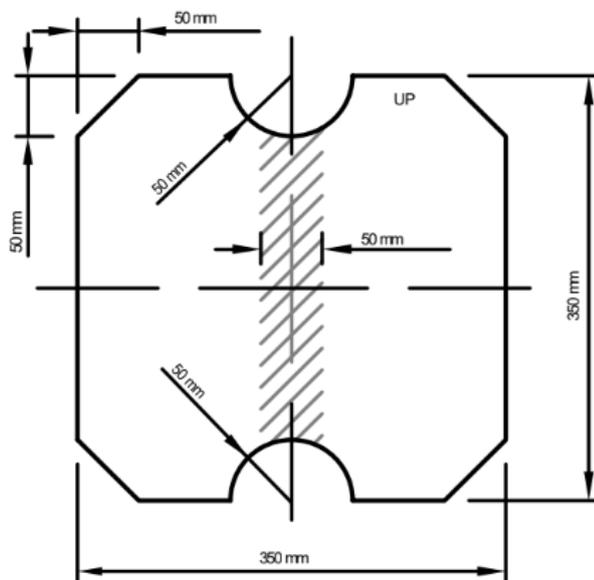
Figura 14 - Gabarito da regra T.1.1



Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra T.1.1

A seção T.1.1, representada visualmente na Figura 14 acima, regula o primeiro teste feito com um gabarito de dimensões especificadas. O gabarito deve ser inserido na cabine do piloto até uma altura 320 mm acima do ponto mais baixo, ou seja, o assoalho. A altura mencionada e a maior dimensão do gabarito de 550 mm foram usadas como referência para determinar a geometria da parte inferior do MH. O espaço compatível com a ideia pretendida será um trapézio com o lado mais curto virado para baixo, com a mesma dimensão da largura do assoalho. A altura do trapézio será de 353 mm, considerando o diâmetro dos tubos.

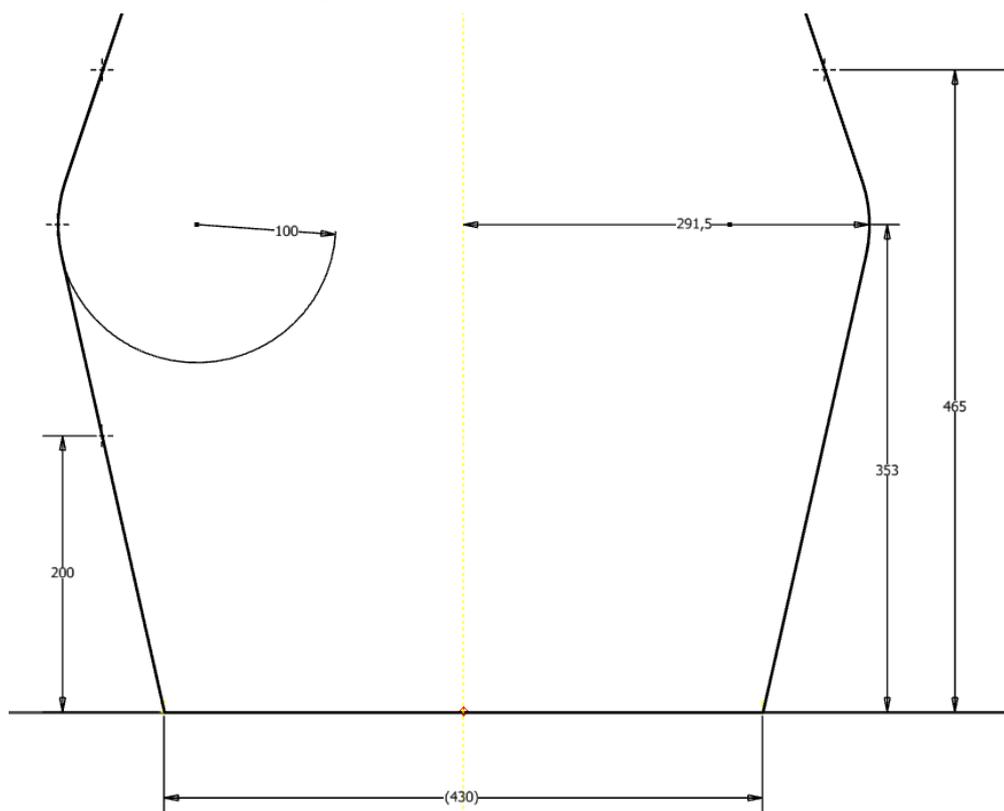
Figura 15- Gabarito da regra T.1.2



Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra T.1.2

Pela regra F.5.8.1, cujo gabarito tem a forma vista na Figura 15, é proibido que os arcos tenham cortes entre os pontos que estão ligados ao assoalho, sendo formados por um único tubo. Por isso deve ser feita uma curvatura para a transição da parte mais aberta da seção inferior para a seção superior com menor distância ao lado oposto. Na prática, esta curvatura é uma dobra feita no tubo com uma máquina dobradora adequada. Considerando a hipótese de diâmetro máximo dos tubos de 33,33 mm e a regra F.5.2.1 (o raio mínimo de qualquer dobra nos tubos deve ser de 3 vezes o diâmetro externo), será usado um raio de curvatura de 100 mm para a transição.

Figura 16 - Geometria inferior do MH

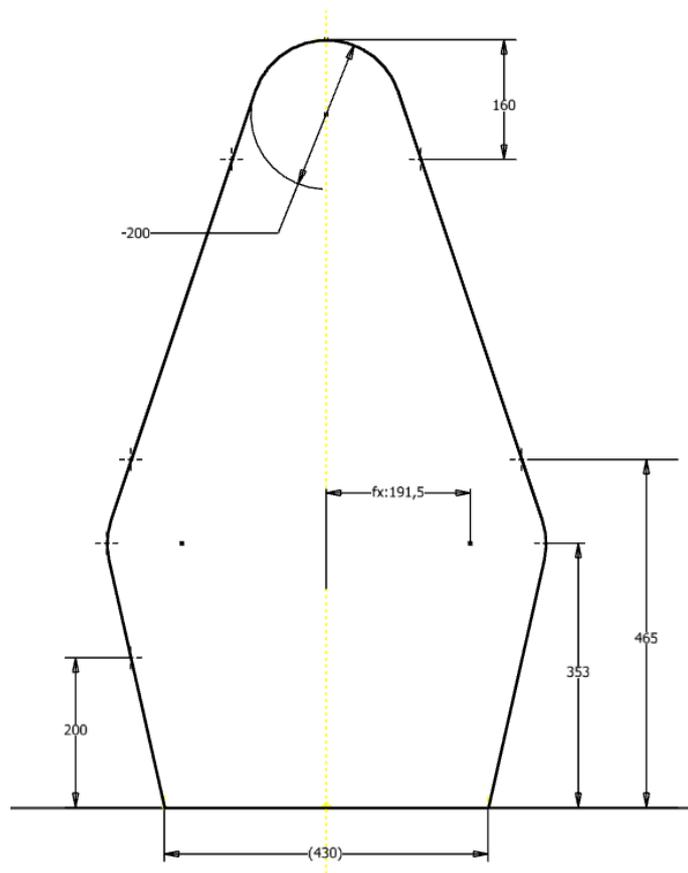


Fonte: Autor

Conhecendo o ponto de altura máxima do MH e o ponto onde deve ser feita a transição de medida, um círculo de raio 100 mm em cada lado com suas tangentes verticais mais externas ocupando o ponto da transição deve ser ligado ao assoalho por uma reta, formando o desenho parcial visto na Figura 16. Esta reta irá tangenciar o círculo.

Para representar o arco superior do MH será feito um círculo de diâmetro 200 mm, que mantém o piloto inteiramente dentro da estrutura do chassi, com a tangente horizontal superior coincidindo com o ponto de ápice definido anteriormente. Outra reta tangencial a ambos os círculos (arco superior do MH e dobra da seção de transição) deve ser traçada, completando a forma do MH. Com esta geometria, mostrada na Figura 17, o teste de gabarito da regra T.1.2 também será obedecido.

Figura 17- Vista frontal do MH completo

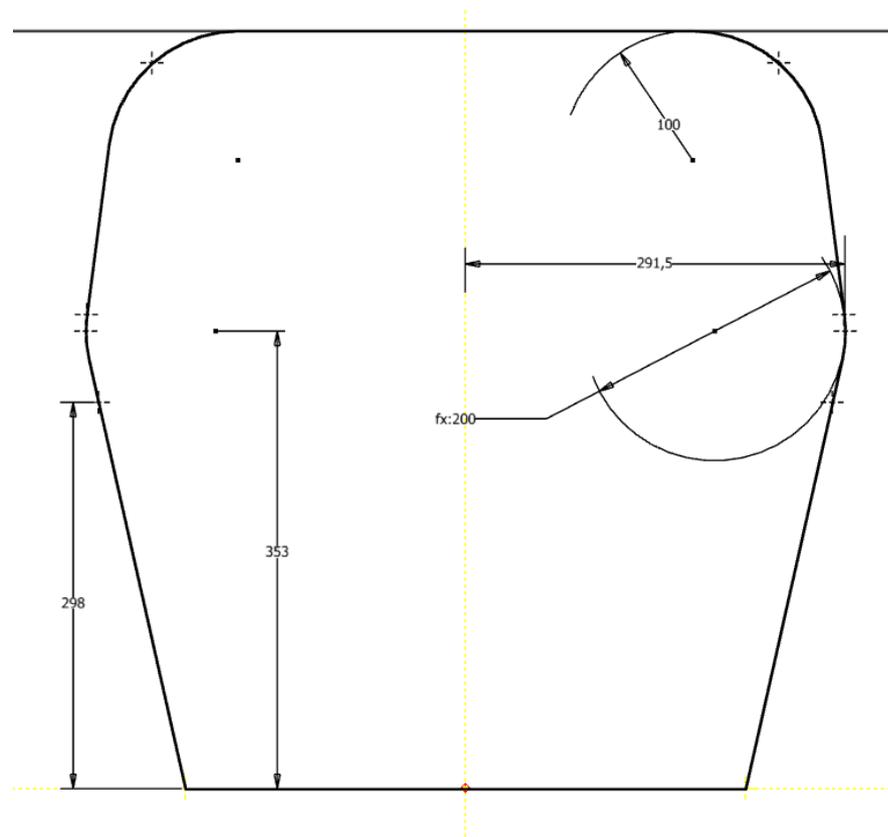


Fonte: Autor

3.1.5 Front Hoop (FH)

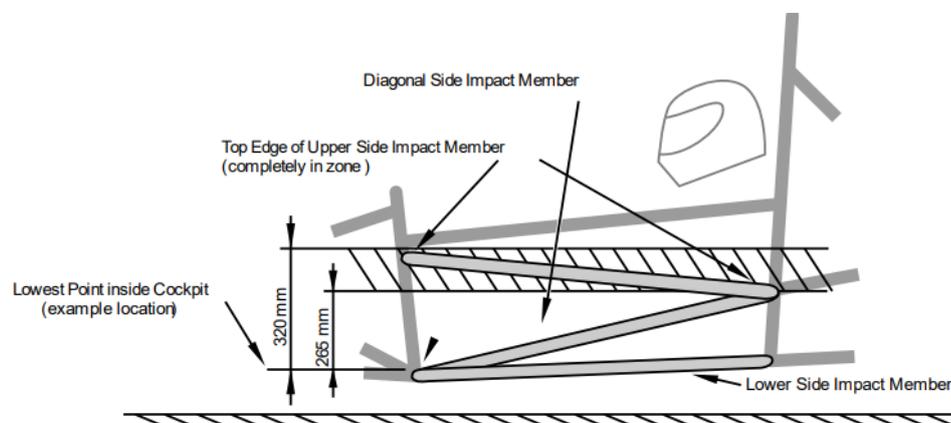
Esta estrutura terá o mesmo desenho da seção inferior do MH, com transição para uma largura maior a partir de dobras de 100 mm de raio em cada lado. Na linha horizontal em que estará localizado o ponto mais alto do FH será traçada uma reta, terminando em cada lado por outras duas dobras com arco de curvatura de 100 mm, mantendo a uniformidade com os outros arcos, mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Vista frontal do FH completo



Fonte: Autor

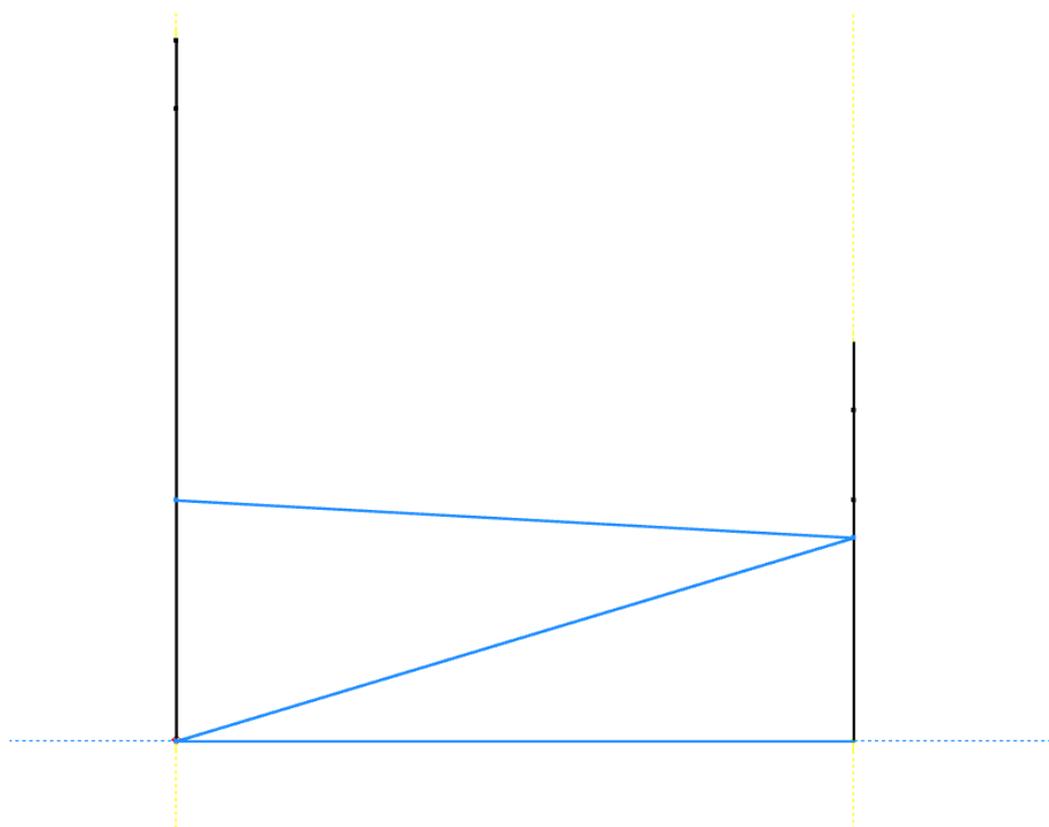
3.1.6 Side Impact Structure (SIS)

Figura 19- Zona de permanência do *Upper Side Impact Member*

Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra F.6.4.4

O plano ligando as seções inferiores das estruturas MH e FH será o plano que abrigará os tubos de proteção ao impacto lateral, efetivamente conectando as duas estruturas. Os arcos de transição na altura de 353 mm foram ligados por uma reta representando o membro superior de impacto lateral (*Upper Side Impact Member*). Esta posição obedece a regra F.6.4.4, com representação visual na Figura 19, mantendo a face mais externa superior dentro de uma zona entre 320 e 265 mm acima do membro inferior de impacto lateral (*Lower Side Impact Member*). Este membro terá a função exercida pelo tubo do próprio assoalho. Para completar a estrutura, o membro diagonal exigido pelo regulamento ligará diretamente os membros superior e inferior, formando a triangulação necessária, podendo ser visto na Figura 20.

Figura 20- Vista lateral do SIS completo, em azul, ligando o MH na esquerda ao FH à direita, ambos em preto

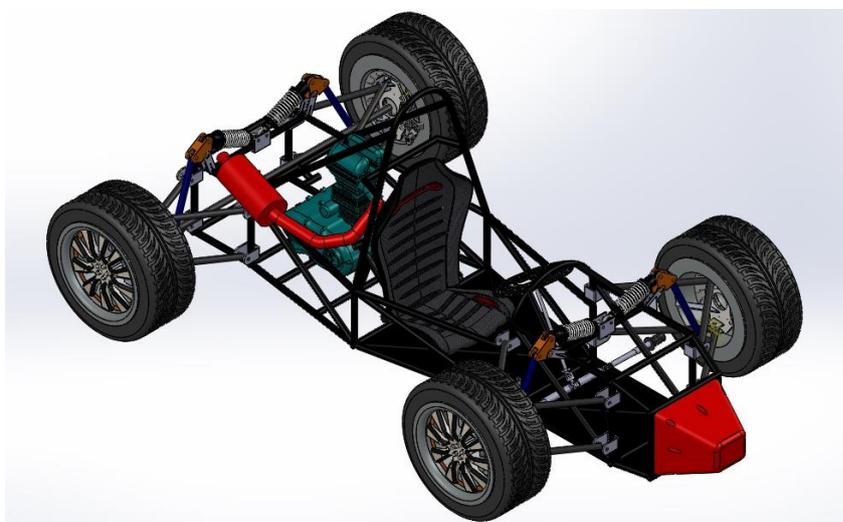


Fonte: Autor

3.1.7 Front Bulkhead (FB)

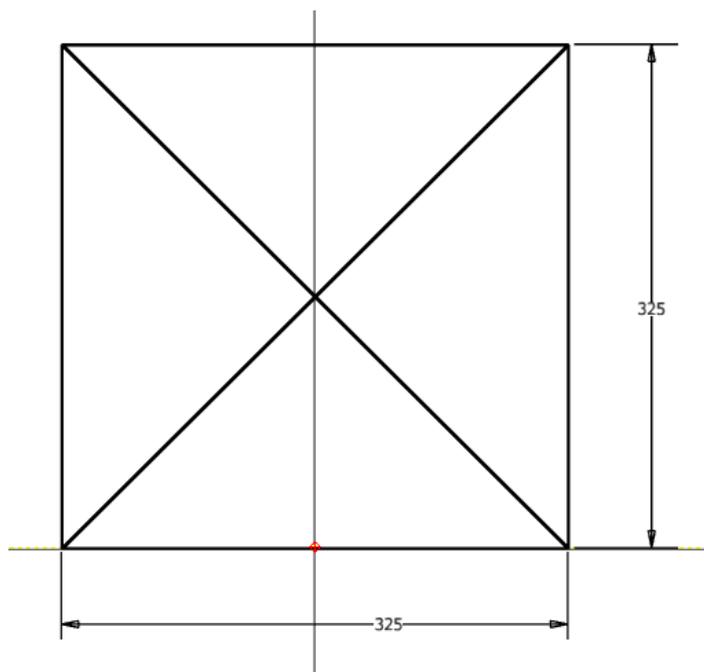
Não há regras delimitando a posição do *Front Bulkhead* (FB) em relação a outras estruturas. Portanto, o plano da estrutura será posicionado de forma a permitir que exista espaço suficiente entre os pés do piloto e o próprio FB para acomodar itens necessários como pedais, coluna de direção, suspensão dianteira e outros possíveis apêndices. Sem acesso a projetos prontos das áreas relacionadas, define-se inicialmente o plano do FB 25 cm à frente dos pés do piloto, perpendicular ao assoalho. Esta dimensão, em um projeto executado em equipe, pode ser facilmente alterada conforme a necessidade surgir.

Figura 21 - *Impact Attenuator* destacado em vermelho em um veículo mini Fórmula



Fonte: (KHAN, 2014)

As dimensões do FB estarão em função do *Impact Attenuator*, destacado na Figura 21, com est medindo 100 x 200 mm de acordo com a regra F.8.4.2. Assim, um FB com seção de 325 x 325 será suficiente para comportar o atenuador. Uma linha ligando arestas diagonalmente opostas completa a estrutura, triangulando como necessário, com desenho final visto na Figura 22.

Figura 22 - Vista frontal do *Front Bulkhead*

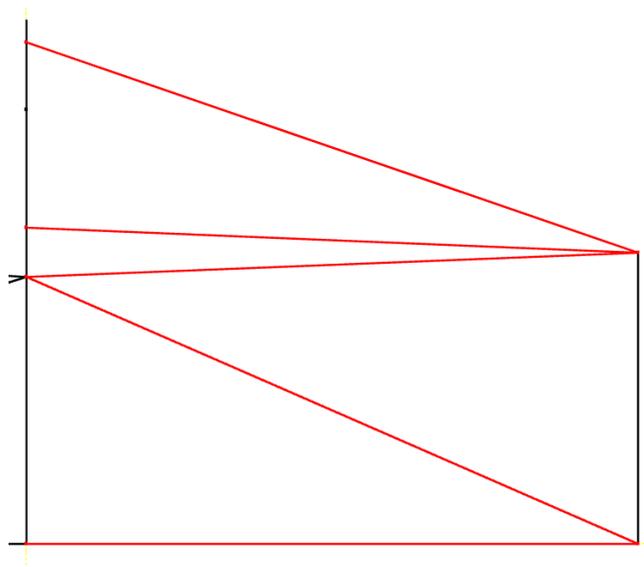
Fonte: Autor

3.1.7.1 *Front Bulkhead e Front Hoop Supports*

A estrutura frontal deve ser ligada ao FH através de suportes por no mínimo 3 tubos. Pela regra F.6.2.3a, o suporte superior ligará a aresta superior do FB e o FH pela aresta do *Upper Side Impact Member*. Pela regra F.6.2.3b, o suporte inferior ligará a aresta inferior do FB e o FH pela aresta do *Lower Side Impact Member*, ou seja, o assoalho. Como também requerido pela regra, um terceiro membro deve ligar diagonalmente os dois suportes para providenciar triangulação.

Os apoios do FH têm a função de reforçar o arco, devendo ligá-lo a outros nós da estrutura para compartilhar cargas e impedir grandes deformações. Esta triangulação, de acordo com juízes voluntários experientes da competição como Skitter Yaeger, pode ser feita ligando as curvas dos arcos aos nós mais próximos da estrutura (YAEGER, 2024). Neste modelo, os nós mais próximos estarão no próprio FB, sendo, portanto, esta a ligação escolhida. A Figura 23 ajuda a compreender o posicionamento dos apoios.

Figura 23 - Vista lateral dos suportes do FB e FH, em vermelho, com FH à esquerda e FB À direita, ambos em preto



Fonte: Autor

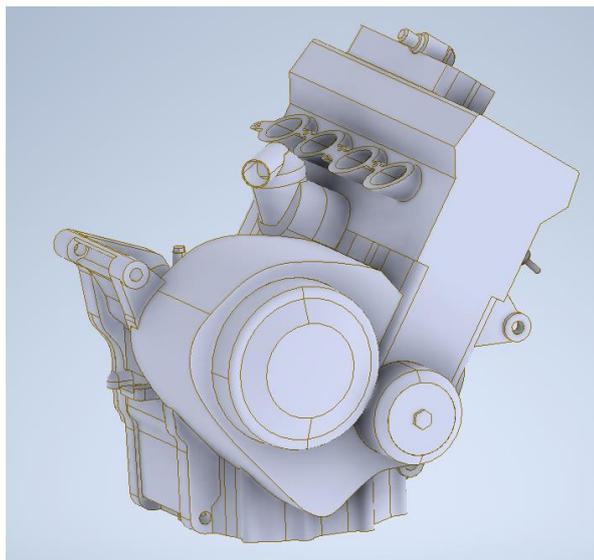
3.1.8 Estrutura traseira

3.1.8.1 Caixa do motor

Entre as regras não há definições sobre a posição do motor, porém, com todo o resto da estrutura desenhada, o espaço faltante será a região da traseira do chassi. Assim como o motor, não há regras específicas sobre estruturas na região. Ao ponderar sobre outro possível posicionamento, como o frontal, é chegada a conclusão de que as estruturas feitas por meio do restante das regras sofrerão grandes alterações em cascata. Com estas duas considerações, a posição mais prática, do ponto de vista do projeto do chassi, é posicionar o motor na traseira.

Motores de até 710 cilindradas podem ser usados no veículo, pela regra IC.1.1.1b, porém, informações sobre motores de cerca de 600 cilindradas estão disponíveis mais abertamente em sites de projetos CAD/CAM como *GrabCAD*. Ao projetar a estrutura que abrigará o motor, é necessário conhecer as dimensões e posição, e com um modelo aproximado do motor em um software de desenho o projeto pode seguir sem pausas ou grandes riscos de erros de dimensionamento. O motor a ser usado como referência, por questões de disponibilidade de informações, será o CBR600RR 2007, representado na Figura 24.

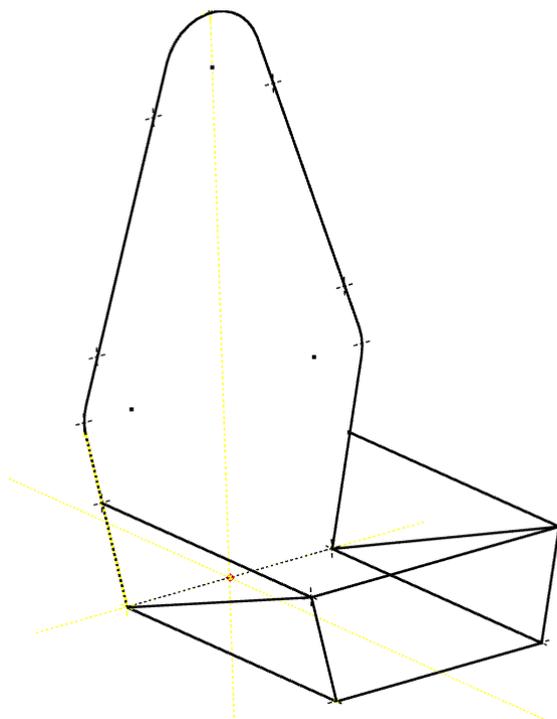
Figura 24 - Modelo virtual do motor CBR600RR 2007



Fonte: (MATUSKO, 2013)

Com o uso da função de Medir do Autodesk *Inventor*, foi estimado que uma caixa de 475 x 450 x 415 mm (X,Y,Z) no sistema de coordenadas do chassi é o suficiente para abrigar o motor, com base apontada para o assoalho. Além do motor, o espaço ocupado pelo eixo traseiro e o sistema de transmissão de potência ao eixo traseiro deve ser levado em consideração, sendo posicionados na direção do eixo Z. É estimado um espaço de 185 mm no eixo citado para os componentes adicionais, podendo ser alterado com informações precisas da equipe especializada de *Powertrain*. Acompanhando a inclinação dos tubos inferiores do MH e a medida do assoalho, será feita uma caixa com dimensões 430 x 200 x 600 mm (X,Y,Z). A abertura angular permite que as maiores dimensões do motor estejam devidamente incluídas dentro do *Component Envelope*, sem partes excedendo a estrutura do chassi. Dessa forma se completa a estrutura da caixa do motor, a ser vista na Figura 25.

Figura 25 - Caixa do motor

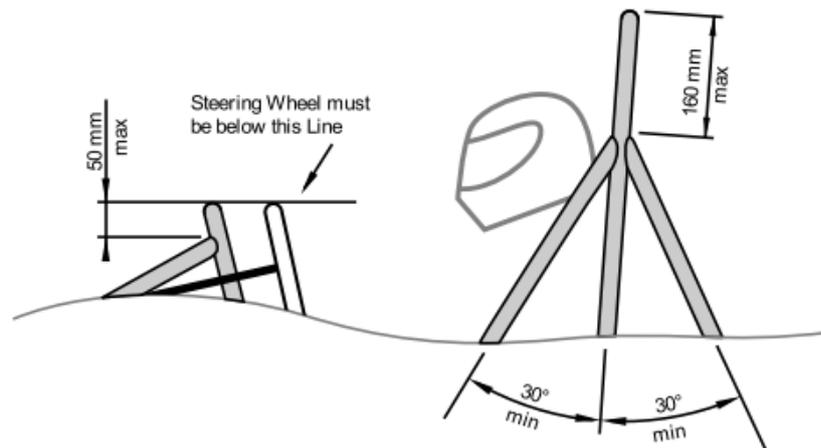


Fonte: Autor

3.1.8.2 Main Hoop braces & supports

Assim como os suportes do FH, os suportes do MH devem ser triangulados ao menos por um dos lados aos nós mais próximos da estrutura, contribuindo na adição de resistência aos esforços que sofrerá em caso de acidente e torções durante o funcionamento do veículo. Próximos ao topo, os suportes superiores deverão estar a no máximo 160 mm de distância do centro da curva superior do MH, em vista lateral, e inclinação mínima de 30 graus (regras F.5.9.4 e F.5.9.5, Figura 26).

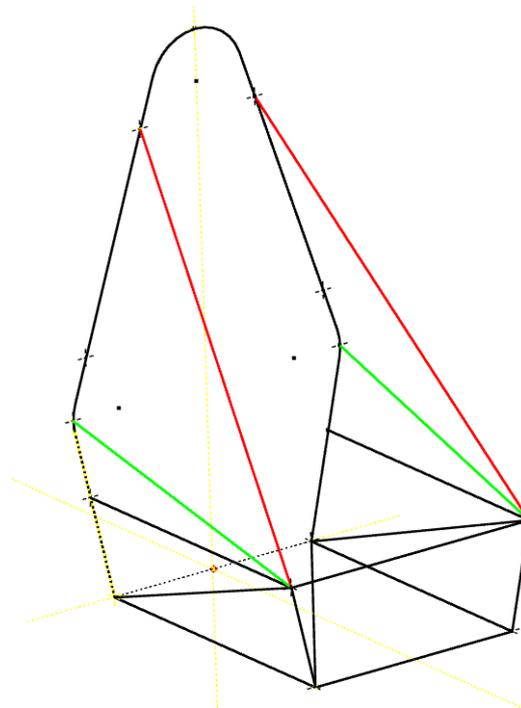
Figura 26 - Restrições da geometria dos suportes do MH por regulamento



Fonte: Formula SAE Rules 2025, regras F.5.9.4 e F.5.9.5

Finalizando a triangulação do MH, duas linhas foram feitas ligando as tangentes mais externas das curvas inferiores às arestas da caixa do motor, sendo estes os nós mais próximos da estrutura, visível na Figura 27.

Figura 27 - Suportes superiores do MH destacados em vermelho e inferiores em verde



Fonte: Autor

Com o desenho pronto o próximo passo é fazer as preparações para simulação do chassi, incluindo escolha do material dos tubos, tamanho dos tubos, exportar o modelo para o ambiente de simulações, configurar a malha e definir as condições dos testes de capotamento.

3.2 PREPARAÇÕES DAS SIMULAÇÕES

3.2.1 Escolha do material dos tubos

A simulação do chassi exige a determinação das características dos tubos, sendo elas material e dimensões. Ambos são guiados pelos limites estabelecidos no regulamento de 2025.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas mínimas permitidas para aços

Propriedade	Valor
Módulo de Young (E)	200 GPa
Limite de Escoamento (Sy)	305 MPa
Resistência Última (Su)	365 MPa

Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra F.3.4.2a adaptada

A regra F.3.4.2, adaptada na Tabela 4, limita a escolha de materiais a aços com propriedades mínimas de resistência. Observando os valores de resistência definidos pela regra citada, é possível constatar que alguns aços de baixo Carbono podem ser apropriados, dependendo da forma de produção dos tubos. Foram usadas tabelas de propriedades de aços obtidas experimentalmente por outros autores para listagem de candidatos e comparações.

Tabela 5 - Resistências de alguns aços de baixo a médio Carbono, destacando o aço AISI 1020, em azul. As siglas representam tratamentos térmicos, laminado a quente (HR) e repuxado a frio (CD)

Aço AISI	Processamento	Resistência última Su (MPa)	Limite de Escoamento Sy (MPa)
1006	HR	300	170
1006	CD	330	280
1010	HR	320	180
1010	CD	370	300
1015	HR	340	190
1015	CD	390	320
1018	HR	400	220
1018	CD	440	370
1020	HR	380	210
1020	CD	470	390
1030	HR	470	260
1030	CD	520	440
1035	HR	500	270
1035	CD	550	460
1040	HR	520	290
1040	CD	590	490
1045	HR	570	310
1045	CD	630	530
1050	HR	620	340
1050	CD	690	580
1060	HR	680	370
1080	HR	770	420
1095	HR	830	460

Fonte: (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2008, p. 930), adaptado

A partir da Tabela 5, duas das propriedades necessárias são obtidas. Do aço AISI 1015 em diante, os aços mostrados estão elegíveis ao uso no veículo, dependendo do tipo de fabricação, restando a avaliação do Módulo de Elasticidade para confirmação. A Tabela 6 contém a informação faltante, confirmando que os aços de 0,15% de Carbono em diante podem ser considerados.

Tabela 6 - Módulo de Elasticidade de alguns aços de baixo a médio Carbono

Aço AISI	Orientação	Processamento	Módulo de elasticidade E (GPa)
1005-1009	LT	HR lâmina	205
1005-1009	LT	CD lâmina	205
1005-1009	L	CD lâmina	200
1005-1009	L	HR lâmina	200
1015	L	Normalizado	205
1020	L	HR chapa	205
1040	L	Tal como forjado	200
1045	L	Q&T	205
1045	L	Q&T	205
1045	L	Q&T	205
1045	L	Q&T	205
1045	L	Q&T	205
1045	L	CDSR	205
1045	L	DAT	205
1541F	L	Q&T forjamento	205
1541F	L	Q&T forjamento	205
4130	L	Q&T	220
4130	L	Q&T	200

Fonte: (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2008, p. 934), adaptado

Além das propriedades, também devem ser consideradas a fabricação e a mão de obra disponível, de forma que não é possível simplesmente escolher o aço com os maiores valores de propriedades mecânicas. Os tubos de aço devem ser soldados em nós, com união de dois ou mais tubos, e as técnicas de soldagem a serem aplicadas variam de acordo com o aço a ser soldado. As soldas MIG/MAG são classificadas por (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009, p. 235), como técnicas de baixa exigência de habilidade do soldador e pouca necessidade de limpeza de escória, podendo ser aplicada em aços de baixo Carbono.

No mesmo trabalho os autores classificam a soldagem TIG como de alto nível de habilidade, sendo adequada para aços de alto Carbono, com este tipo de aço

sempre apresentando resistências mais altas do que os de baixo Carbono. Portanto, também adicionando o parâmetro de disponibilidade, o aço AISI 1020 é escolhido, com os aços posteriores em relação ao percentual da mistura Fe-C considerados como reservas, se necessário. O resultado corresponderá ao material com as resistências mínimas adequadas aos requisitos de segurança.

3.2.2 Escolha das dimensões dos tubos

Pela regra F.3.4.1 são definidos os requisitos mínimos para escolha das dimensões dos tubos, mostrados na Tabela 7

Tabela 7 - Requisitos mínimos para escolha das dimensões dos tubos

Tubo	Momento de Inércia Mínimo (mm⁴)	Área da Seção Mínima (mm²)	Ø Externo Mínimo (mm)	Espessura da Parede Mínima (mm)	Exemplos de tamanhos permitidos
Tamanho A	11.320	173	25	2	25 x 2,5 mm
Tamanho B	8.509	114	25,4	1,2	25,4 x 1,6 mm
Tamanho C	6.695	91	25,4	1,2	25,4 x 1,2 mm
Tamanho D	18.015	126	35	1,2	35 x 1,2 mm

Fonte: Formula SAE Rules 2025, regra F.3.4.1 adaptada

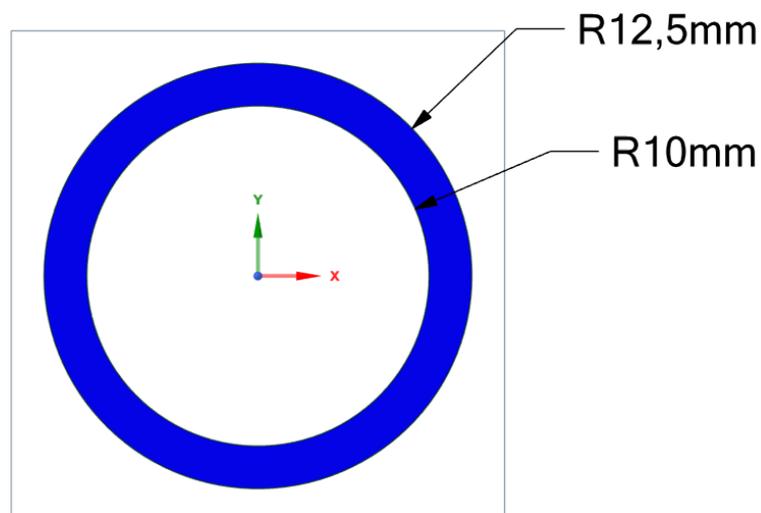
Dentro de softwares é possível testar diversas combinações de pares diâmetro externo x espessura de parede, porém nem todas corresponderão aos tubos vendidos por fornecedores que tenham o material necessário. Portanto, foi escolhida a dimensão mínima como ponto de partida de 25 x 2,5 mm, compatível com o Tamanho A. Este padrão de tamanho de tubo é o que cobre quase todas as estruturas do chassi pela regra F.3.2.1, com exceção das estruturas que exigem Tamanho D, não presentes neste projeto (membro uniforme substituído por múltiplos tubos dobrados). Se necessário, as dimensões podem ser reavaliadas com o aumento da espessura de parede e/ou diâmetro externo. O resultado corresponderá ao dimensionamento mínimo para os requisitos de segurança.

3.2.3 Transformação do Modelo CAD

Ao concluir o desenho do chassi com todas as estruturas citadas pelas regras no Autodesk Inventor, o arquivo do modelo foi exportado em forma STEP a outro software capaz de processar adequadamente as relações físicas necessárias para uma simulação. O segundo software é o Ansys, possuindo diversas ferramentas para aplicações de engenharia selecionáveis a partir do *Workbench*, usando o módulo *Static Structural* e suas ferramentas de cálculo.

O módulo *SpaceClaim* usa as linhas de desenho como base para incluir os tubos, de forma que as linhas de base como corpos lineares recebem algumas das características geométricas necessárias para cálculo das tensões. Permitindo a livre modificação das dimensões de perfis, foram escolhidos perfis tubulares circulares, com dimensões modificadas de diâmetro externo 25 mm e interno de 20 mm, levando a uma espessura de parede de 2,5 mm como planejado inicialmente. A seção transversal do tubo criado é vista na Figura 28.

Figura 28 - Perfil circular tubular mínimo escolhido



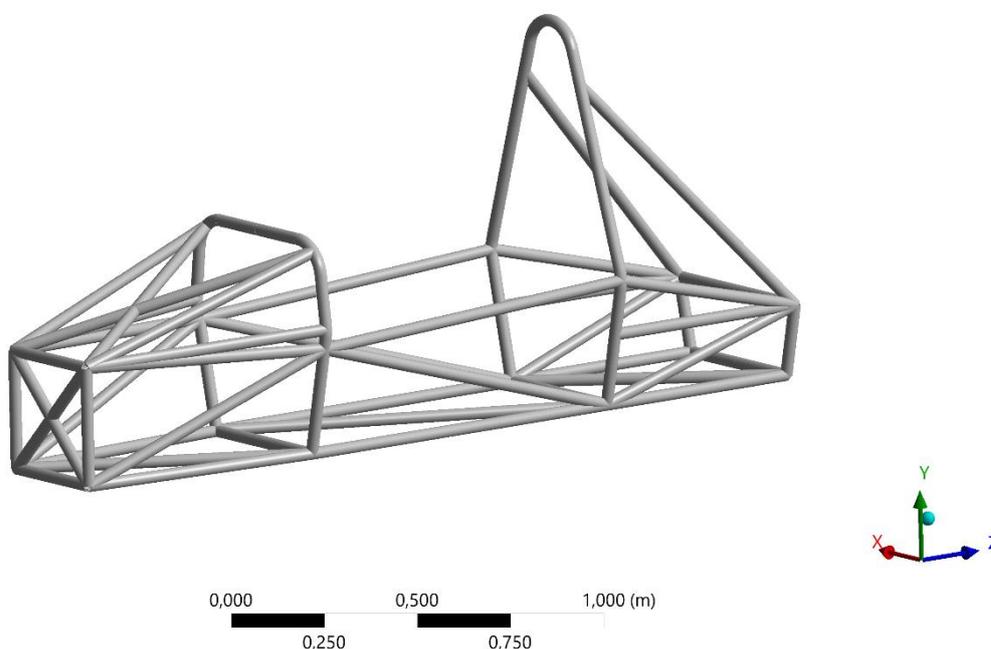
Fonte: Autor

3.2.4 Ambiente usado na simulação

O novo modelo tubular obtido com o *SpaceClaim* foi transferido ao *Ansys Mechanical*, ambiente de simulação de fenômenos físicos em partes mecânicas, possuindo compatibilidade direta com o *SpaceClaim*. As análises estáticas foram feitas com o uso do *Beam Tool*, aproveitando as vigas criadas no *SpaceClaim* com corpos lineares. Configurando a visualização da estrutura com tubos, o programa mostra o chassi como na Figura 29.

Figura 29 - Modelo do chassi tubular no *Ansys Mechanical* com tubos aplicados

Model



Fonte: Autor

3.2.5 Análise de Tensões com o *Beam Tool*

De acordo com o Manual de Usuário do Ansys Mechanical (ANSYS, 2025) o *Beam Tool* é uma ferramenta que analisa vigas representadas por corpos lineares, ou seja, com dimensões inferiores a corpos que tenham superfície e volume. Usando um exemplo prático que pode ser visto na Figura 30, com uma barra circular engastada em uma das extremidades e sob ação de forças no sentido longitudinal e transversal

além de torção na extremidade oposta, é visto que o programa representa os maiores valores de tensões de tração e de compressão pelos resultados Tensão Combinada Máxima de 3829,3 Pa (positivo, Figura 31) e Tensão Combinada Mínima de 6377,7 Pa (negativo, Figura 32), respectivamente. A escala de cores vai do azul para valores mínimos ao vermelho para valores máximos.

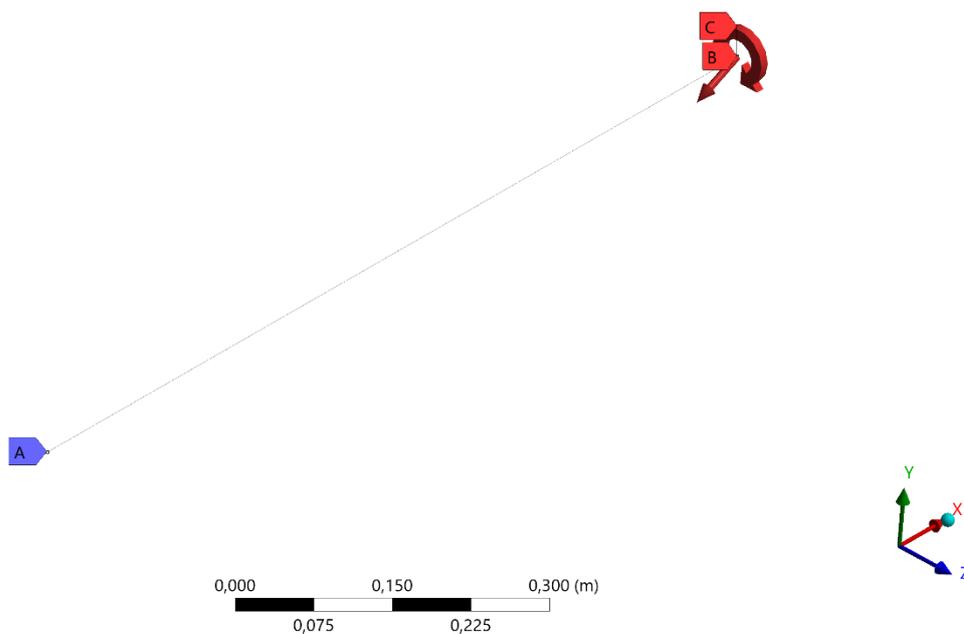
Figura 30 – Barra circular de raio 0,5 m e 1 m de comprimento sob ação de força longitudinal de 1000 N, transversal de 500 N e torção de 500 N*m simulada no Ansys com *Beam Tool*

A: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

- A** Fixed Support
- B** Force: 1118, N
- C** Moment: 500, N·m



Fonte: Autor

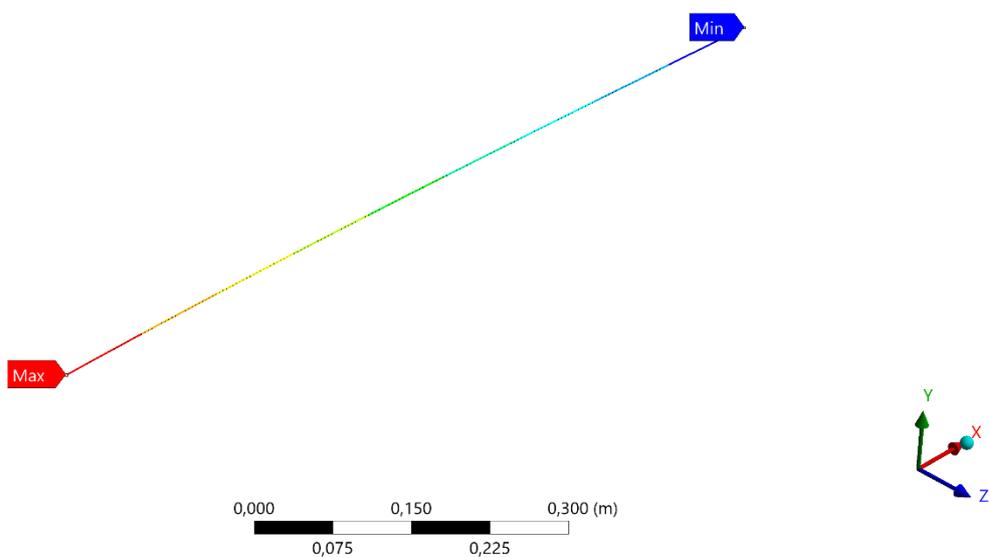
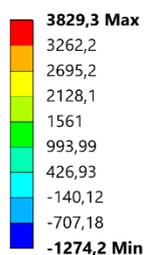
Figura 31 – Resultado de Tensão Combinada Máxima do exemplo simulado com *Beam Tool***A: Static Structural**

Maximum Combined Stress

Type: Maximum Combined Stress

Unit: Pa

Time: 1 s



Fonte: Autor

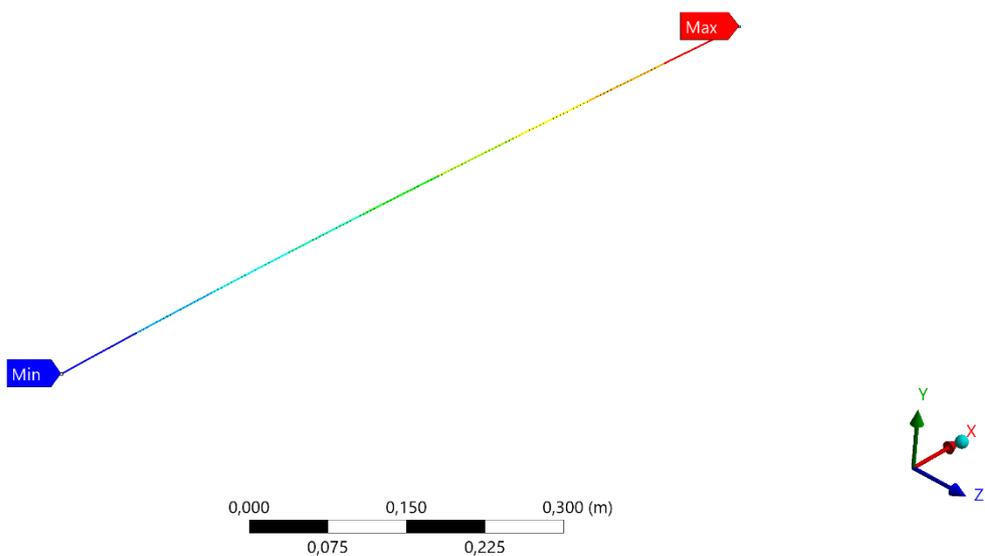
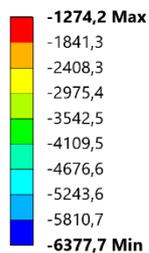
Figura 32 - Resultado de Tensão Combinada Mínima do exemplo simulado com *Beam Tool***A: Static Structural**

Minimum Combined Stress

Type: Minimum Combined Stress

Unit: Pa

Time: 1 s



Fonte: Autor

Por representar elementos lineares unidimensionais o programa não mostra em que superfície estão localizadas as maiores tensões. Pela teoria básica de tensões em uma viga é possível concluir que neste exemplo a Tensão Combinada Máxima equivale ao valor máximo de tensão na superfície superior, região em tração, enquanto a região na superfície inferior em compressão comporta a Tensão Mínima Combinada. Mesmo que possam estar na mesma seção transversal, os dois comportamentos de maior valor não podem ocorrer exatamente no mesmo ponto como mostrado pelo *Beam Tool*, exigindo a interpretação correta do resultado.

A noção de quais tensões devem ser levadas em conta e suas localizações fica sob a responsabilidade do usuário. Visto isso, para a análise feita com o *Beam Tool* neste projeto (uma estrutura tubular complexa sob ação de forças nas três direções dos eixos cartesianos), foram consideradas tensões principais σ_1 e σ_3 as Tensões Combinadas Máxima e Mínima, respectivamente, dos pontos mostrados pelo programa como críticos, tendo como valor intermediário $\sigma_2 = 0$, sendo substituídos na Equação (8) para encontrar σ_{Eq} de Von Mises. Considerar estes valores máximos e mínimos como tensões principais tem como consequência avaliar uma tensão equivalente simulada maior do que a real

Outra consequência de usar corpos lineares é não representar concentrações de tensões resultantes de descontinuidades geométricas. Junto à simplificação deste projeto de não considerar possíveis descontinuidades e diferentes materiais pela junção dos tubos, devido à solda ou defeitos, é vista a necessidade de tornar a análise mais conservadora. Esta necessidade foi suprida pela forma como as tensões equivalentes foram calculadas e a adoção de um coeficiente de segurança, discutido posteriormente.

3.3 Procedimentos dos Testes de Capotamento

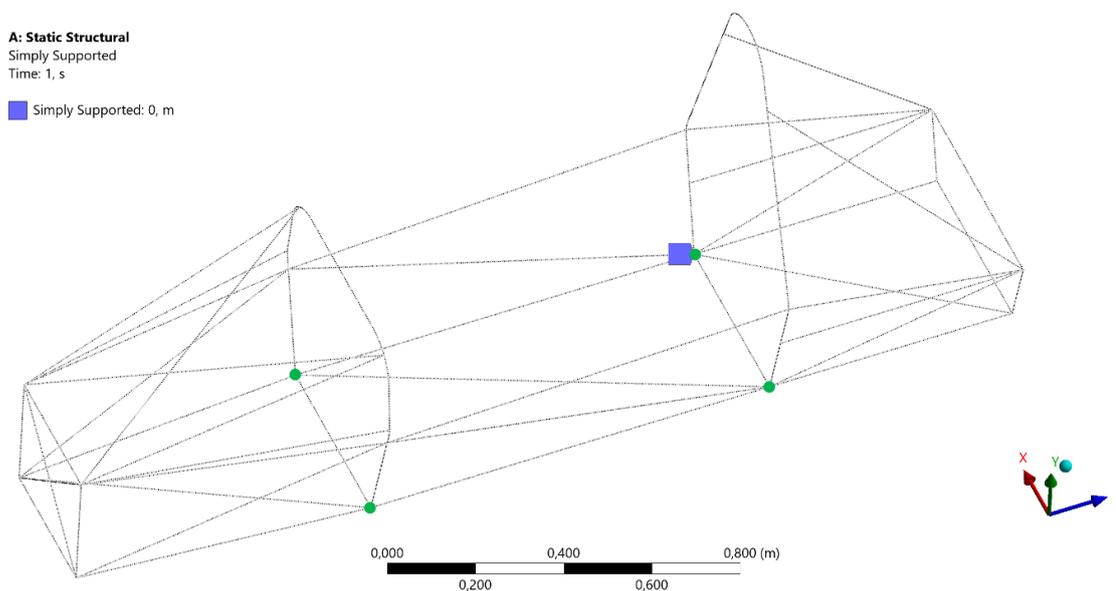
No regulamento de 2025 não existem direcionamentos a respeito da necessidade de simulações estruturais ou restrições sobre a execução. Porém, o documento 2017-2018 Formula SAE Rules (SAE INTERNATIONAL, 2016) foi o último publicado contendo as informações específicas necessárias a um projetista universitário para usar como base, sendo este o escopo do presente trabalho.

Duas simulações foram executadas representando o capotamento do veículo, testando a capacidade dos arcos MH e FH de proteger o piloto. As condições de contorno, componentes das forças, ponto de aplicação e exigência de resultados são explicadas diretamente pelo regulamento de 2017-2018. Estes procedimentos foram seguidos em todas as simulações.

3.3.1 Aplicações das Condições de Contorno

As condições de contorno para ambas as simulações foram o bloqueio de translação e rotação nos 3 eixos (X,Y,Z), aplicados aos nós das bases dos arcos MH e FH para cada uma das simulações. No *Ansys Mechanical*, esta condição é configurada a partir do suporte do tipo *Simply Supported*, destacado na Figura 33.

Figura 33- Pontos de aplicação das condições de contorno, realçados em verde



Fonte: Autor

Estas condições de contorno, conforme o regulamento de 2017-18, servem aos testes descritos simplificados de capotamento. Ou seja, simplificam a análise em relação a outros componentes que poderiam afetar diretamente o comportamento da estrutura no momento do impacto do capotamento. O motor, parede corta fogo, barra de fixação do cinto de segurança e possivelmente outros componentes poderiam ter

função estrutural, de forma intencional ou não. Além disso, um veículo completo poderia ter pontos de apoio diferentes na simulação, como apoios da suspensão, pontos de fixação do banco do piloto, entre outras possibilidades.

3.3.2 Configuração de Malha

O programa Ansys Mechanical permite a configuração de alguns requisitos da malha a ser gerada no objeto alvo das simulações. Um conjunto de propriedades pré-estabelecido é oferecido na primeira execução do projeto, visto na Figura 34. Considerando que neste projeto corpos lineares são a base dos elementos de malha, foi testado o tamanho destes elementos, deixando de lado outras configurações que pudessem aumentar o tempo computacional necessário para resolução do problema.

Figura 34- Configurações de malha fornecidas pelo Ansys para corpos lineares, com tamanho de malhas destacado a ser testado

Details of "Mesh"	
+ Display	
- Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input checked="" type="checkbox"/> Element Size	5,e-003 m
- Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	2,5775 m
Average Surface Area	0, m ²
Minimum Edge Length	1,2801e-002 m
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Element Quality	Default (5,e-002)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None

Fonte: Autor

A versão do programa usada neste projeto, Ansys Student 2025 R1, possui um limite de 128 mil nós e elementos somados para análise estática segundo a empresa desenvolvedora (ANSYS, 2025). Variando manualmente o tamanho dos elementos, foi encontrado que o limite é atingido com tamanho de aproximadamente 0,7 mm gerando cerca de 140 mil nós e elementos.

Ao aplicar as condições de teste de capotamento no Arco Principal exigidas pelo regulamento podem ser verificados o tempo de execução dos cálculos e a memória utilizada. O tamanho dos elementos é variado manualmente começando com 500 mm e indo até o tamanho de 0,8 mm, pouco menor do que o limite do programa.

Para cada tamanho de elemento foram anotadas as tensões máximas e mínimas calculadas pelo programa, servindo como base para tensão equivalente de Von Mises. Foi calculado o erro de cada resultado de tensão equivalente em comparação com o resultado do menor tamanho de malha executado com sucesso, de 0,8 mm. Deve ser priorizado o resultado com melhor relação entre erro e tempo de resolução do problema, sendo desejável os mais baixos combinados. A Tabela 8 com os resultados é encontrada abaixo.

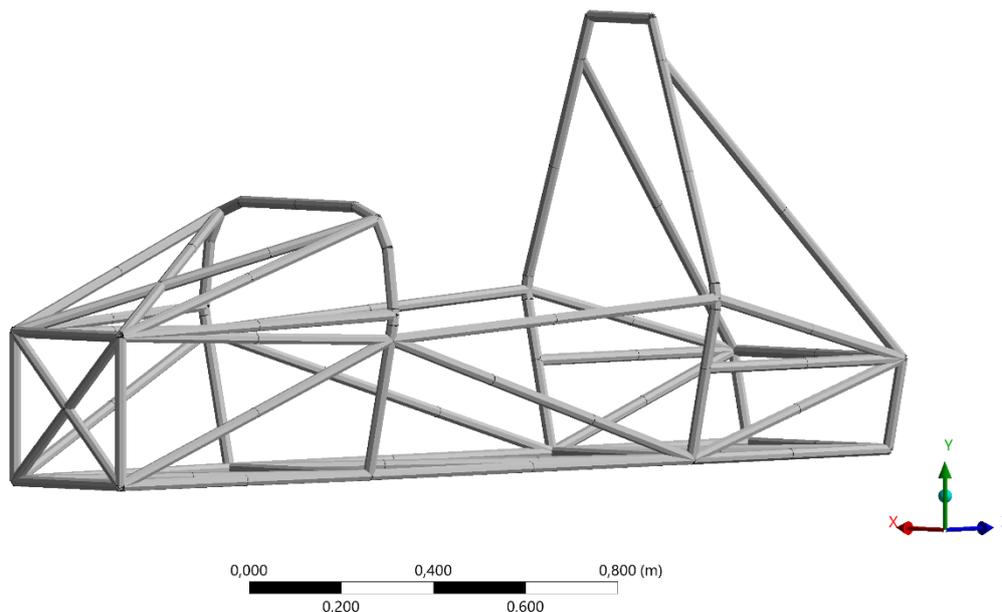
Tabela 8 - Resultado dos testes feitos com diferentes tamanhos de malha

Tamanho Elemento (mm)	Num. nós e elementos	Tempo (s)	Memória (MB)	σ_{Eq} (MPa)	Erro
500	307	3	188	1021,0	-17,60%
50	2041	3	190	916,2	-26,06%
5	19678	3	240	1210,6	-2,30%
1	98173	5	651	1238,2	-0,07%
0,8	122743	6	876	1239,1	-

Fonte: Autor

O menor tamanho de elemento de malha usado de 500 mm não representa adequadamente a geometria da estrutura, transformando seções curvas em totalmente retas, mostrado na Figura 35. Portanto, o primeiro tamanho de elemento válido a ser considerado é o de 50 mm, respeitando a geometria.

Figura 35 – Malha inadequada formada com elemento de tamanho 500 mm



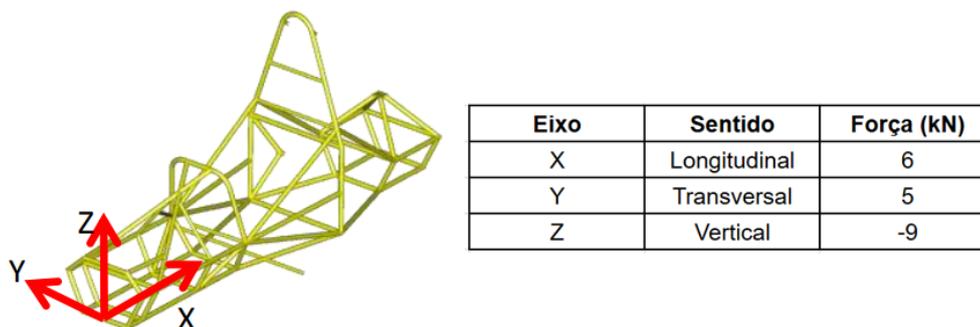
Fonte: Autor

Foi decidido usar o tamanho de 5 mm para os elementos, gerando 13107 nós e 6571 elementos. A entrega do resultado com o erro baixo de cerca de 2% mesmo com 6 vezes menos divisões comparado ao menor elemento e metade do tempo necessário para resolver o problema solidificam a decisão.

3.3.3 Aplicação das Forças e Resultados Admissíveis

O regulamento de 2017-2018 informa o sistema de coordenadas adotado oficialmente, servindo de referência para as componentes das forças a serem aplicadas. Com o uso de um sistema de coordenadas diferentes, as devidas adaptações foram feitas para que as forças longitudinais (ao longo do eixo do chassi, correspondendo ao eixo X oficial), transversais (perpendicular ao eixo do chassi, no plano do assoalho, correspondendo ao eixo Y oficial) e verticais (perpendicular ao plano do assoalho, correspondente ao eixo Z oficial) sejam equivalentes às forças do sistema fornecido pelas regras, mostrado na Figura 36.

Figura 36 - Sistema de coordenadas oficial e componentes da força de simulação

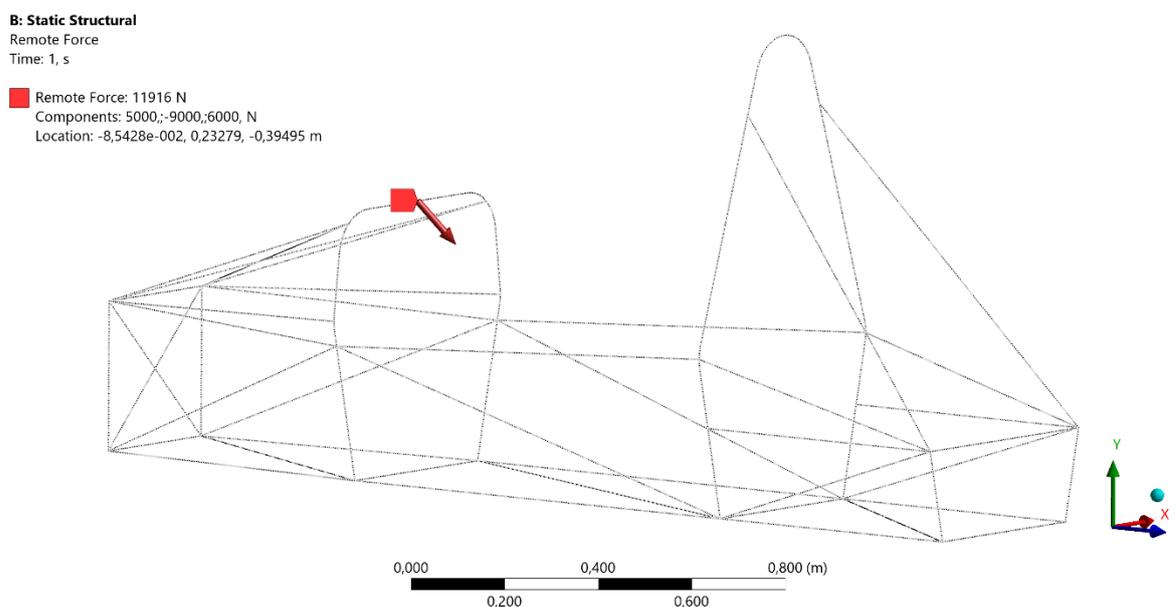


Fonte: 2017-2018 Formula SAE Rules, pág. 75, adaptado

As forças devem ser aplicadas no ponto mais alto do Arco Principal (MH) e do Arco Frontal (FH) separadamente em cada simulação, com componentes em kN em (X, Y, Z) de (6, 5, -9), com resultante de aproximadamente 12 kN. Em cada simulação a estrutura não deve ter deslocamentos maiores do que 25 mm e não deve ocorrer deformação plástica, ou seja, atingir o escoamento dos tubos.

3.3.4 Simulação FH

Figura 37- Força aplicada no topo do FH, em seta vermelha



Fonte: Autor

Aplicadas as condições de contorno e componentes correspondentes ao capotamento no topo do FH como na Figura 37, são usadas as análises de deformação total e tensões do *Beam Tool*. Os resultados são mostrados em uma escala de cores, com o vermelho representando os maiores valores, e azul os menores. Os valores e ponto crítico podem ser vistos na Figura 39 e Figura 40, localizado no centro da porção reta superior do FH, com deformações vistas na Figura 38. Os resultados serão posteriormente discutidos na seção apropriada.

Figura 38 - Deformações pelas forças no topo do FH do Modelo 1

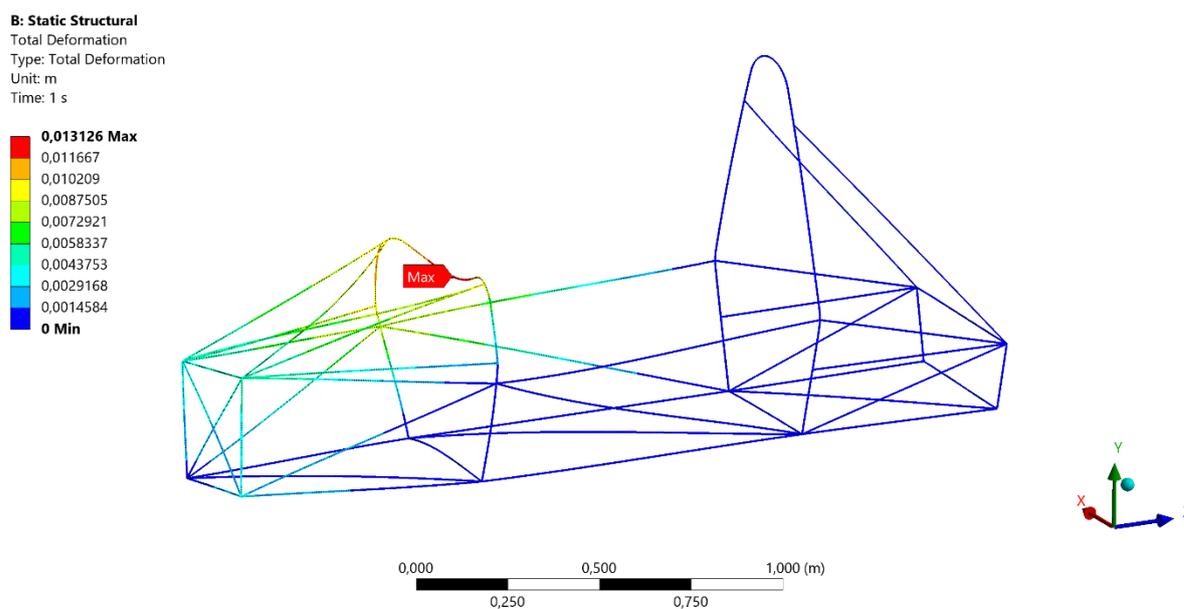
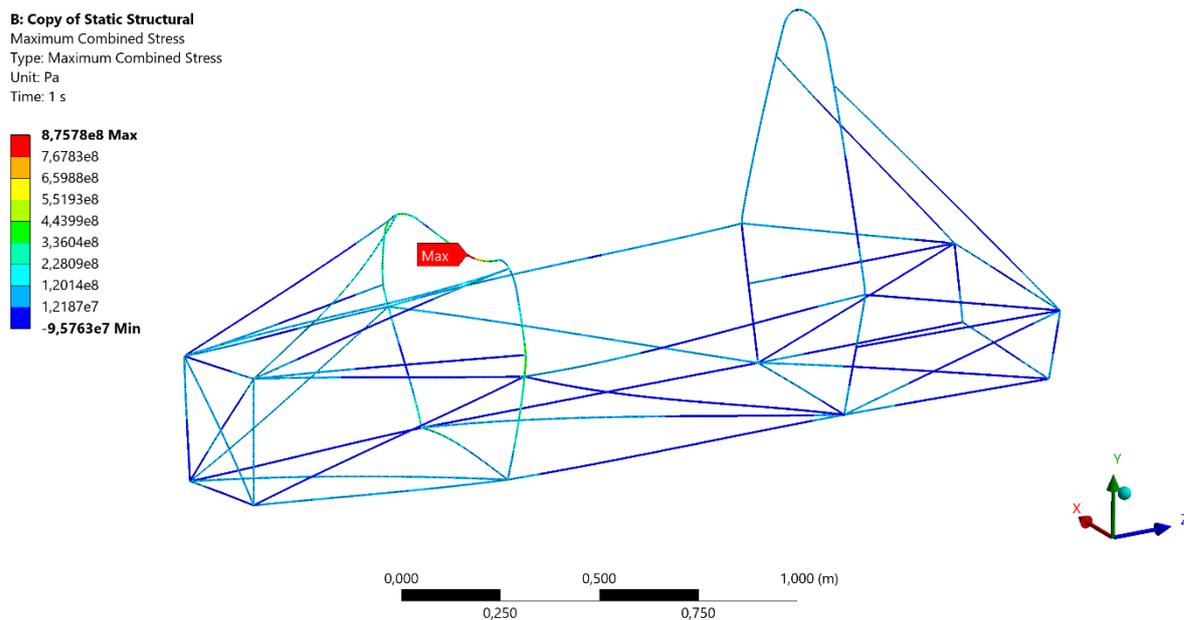
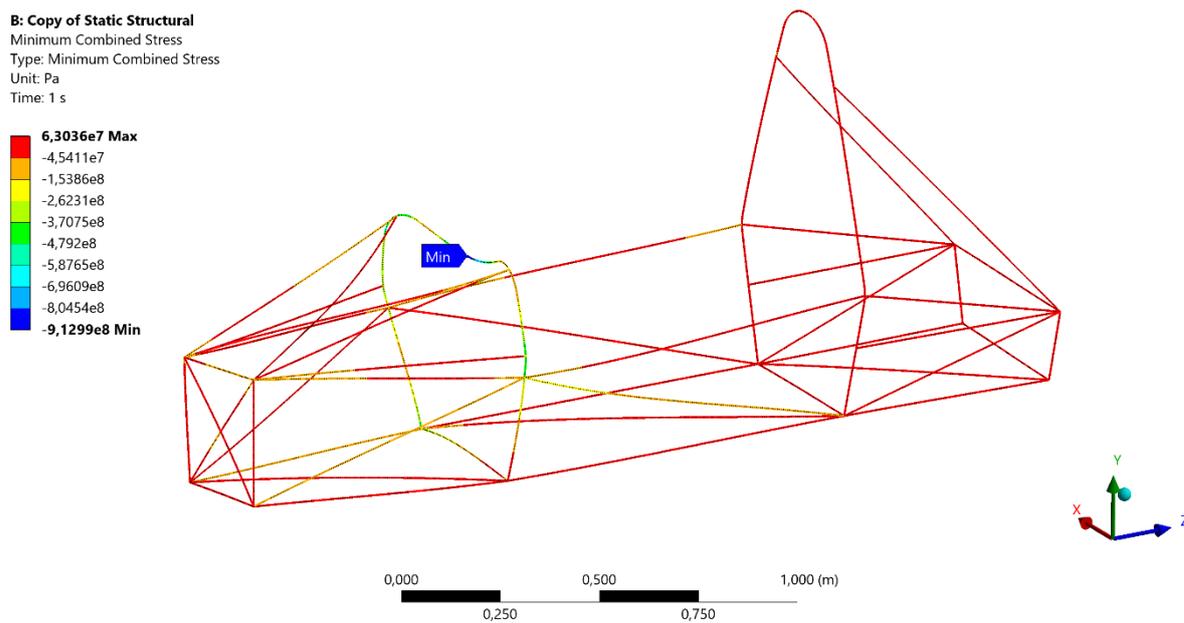


Figura 39 - Tensões combinadas máximas no teste do FH do Modelo 1



Fonte: Autor

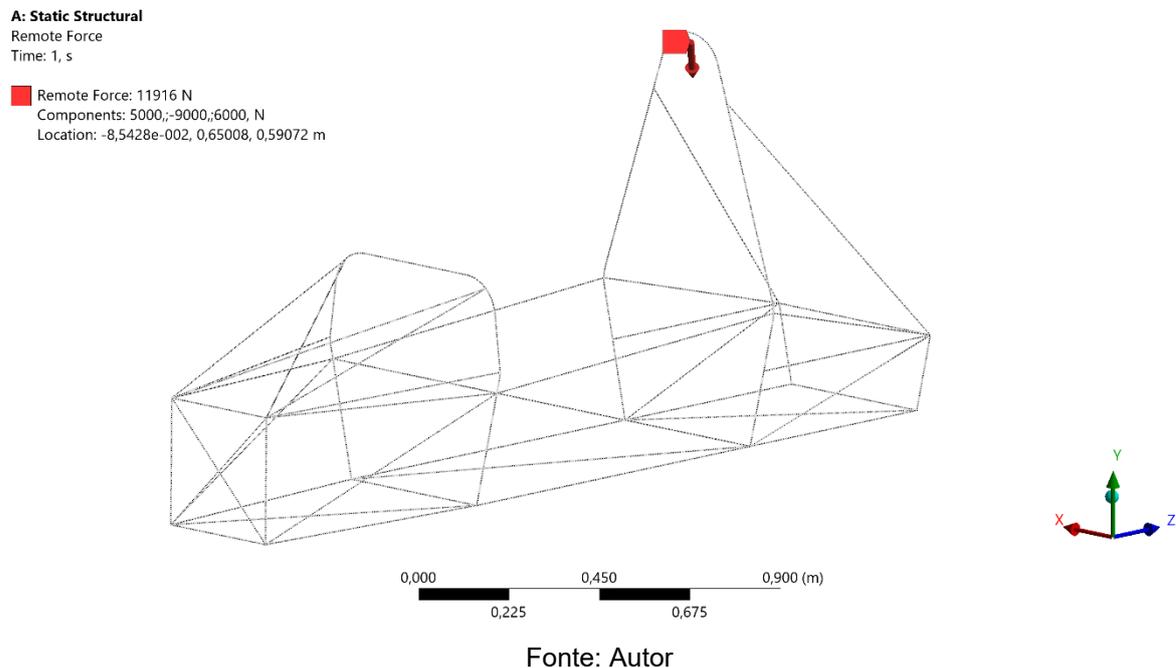
Figura 40 - Tensões combinadas mínimas no teste do FH do Modelo 1



Fonte: Autor

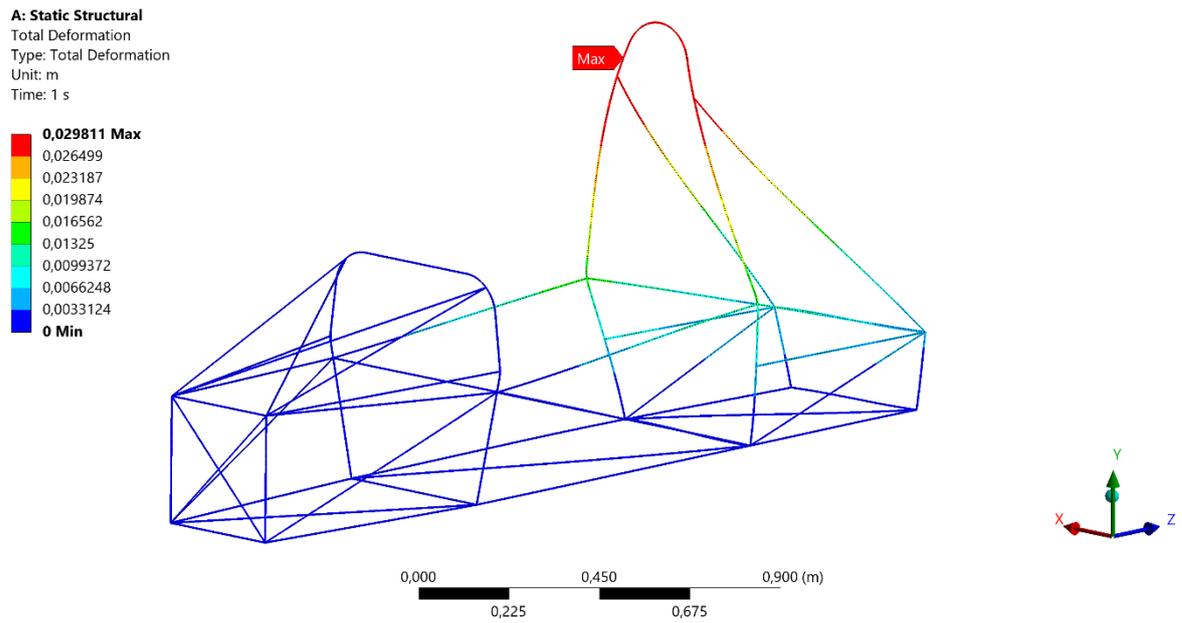
3.3.5 Simulação MH

Figura 41 - Força aplicada no topo do MH, em seta vermelha



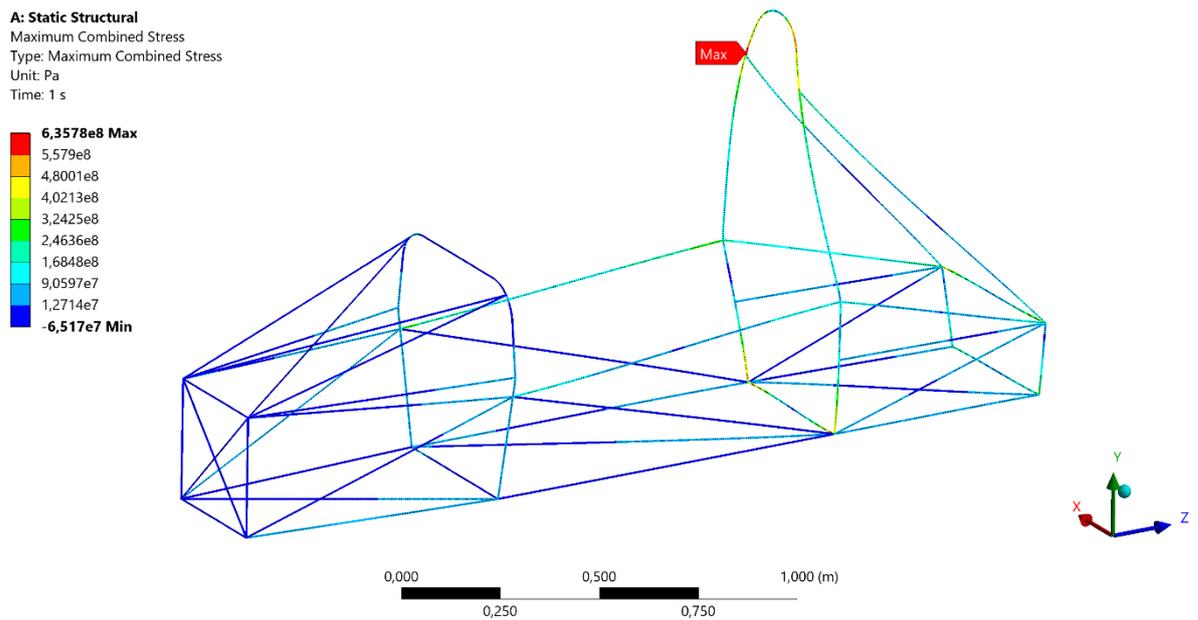
Mantendo as condições de contorno anteriores e mudando a localização da força aplicada para o ponto mais alto do MH, como na Figura 41, podem ser feitas novas análises de deformações e esforços. Os valores e pontos críticos podem ser vistos na Figura 43 e Figura 44, localizados nas junções entre o MH e seus suportes mais altos, com deformações na Figura 42. Os resultados serão posteriormente discutidos na seção apropriada.

Figura 42 - Deformações pelas forças no topo do MH



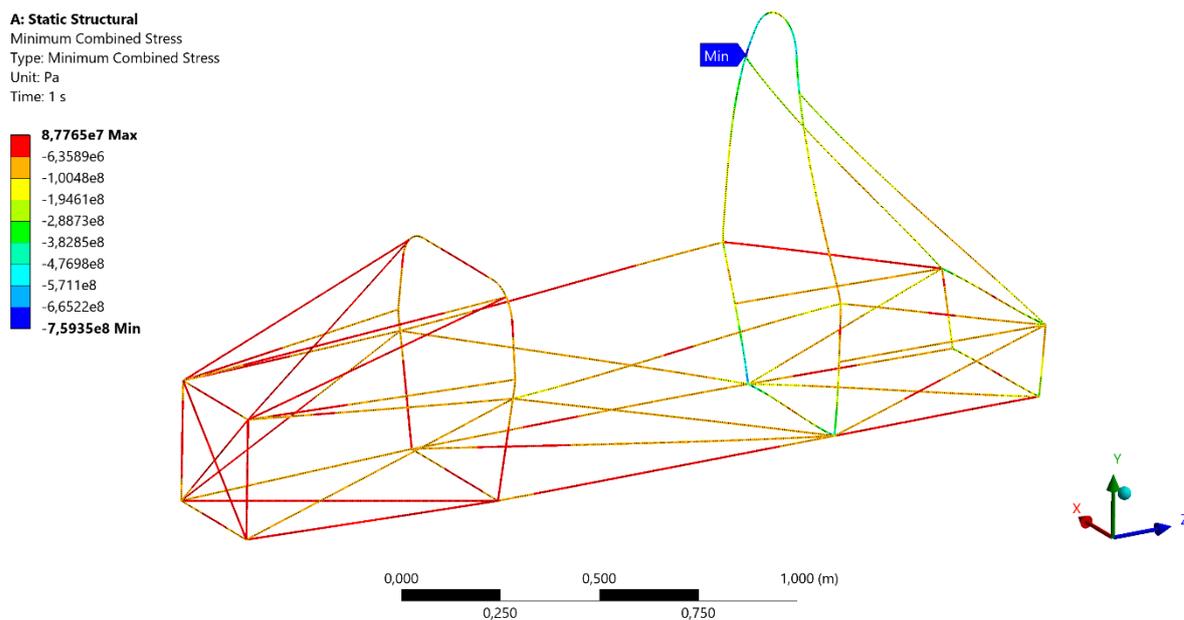
Fonte: Autor

Figura 43 - Tensões combinadas máximas no teste do MH do Modelo 1



Fonte: Autor

Figura 44 - Tensões combinadas mínimas no teste do MH do Modelo 1



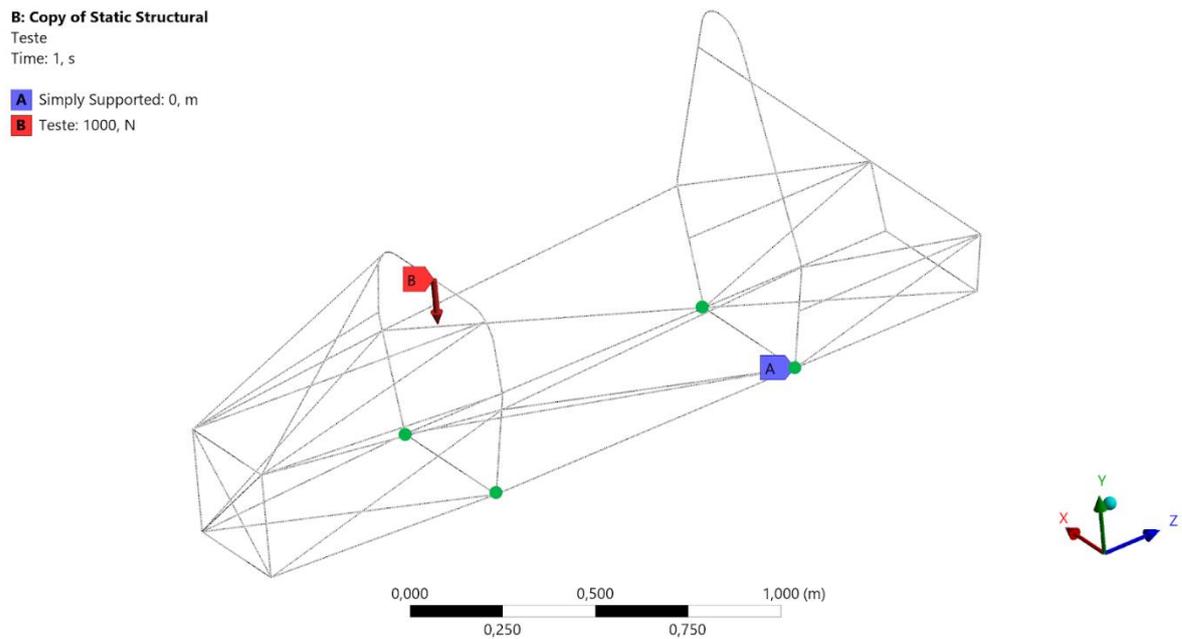
Fonte: Autor

3.3.6 Teste com forças menores

Para confirmar a escala que deve ser esperada dos resultados das simulações pedidas pelo regulamento e o comportamento geral da estrutura sob influência de forças externas foram feitos testes com forças menores nos dois arcos do chassi projetado até o momento.

Em ambos se mantém a condição de restrição dos seis graus de liberdade nos nós da base, quatro nós no total, sendo dois para cada arco. O ponto de aplicação das forças também é mantido, com alteração do vetor aplicado. O topo e/ou centro de cada arco recebe uma força de 1 kN apontada na direção do assoalho, puramente vertical como visto na Figura 45. Os testes são feitos com tubos de 25 x 2,5 mm.

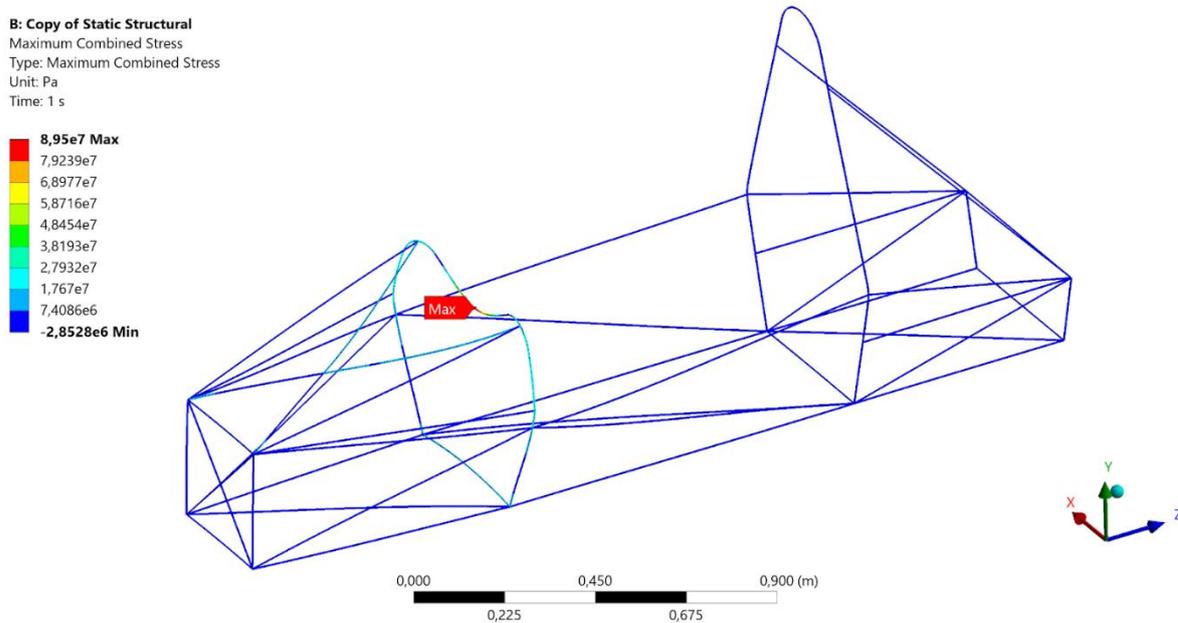
Figura 45 - Exemplo de condições de contorno e força aplicada em um dos arcos



Fonte: Autor

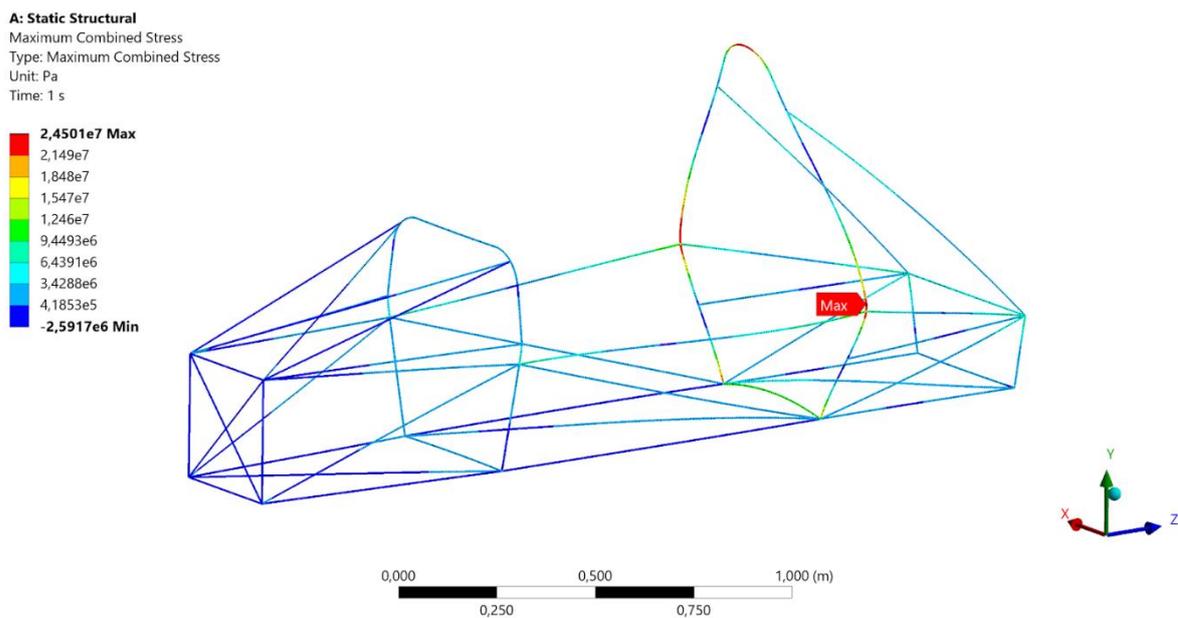
Considerando que a maior componente da força aplicada no teste de capotamento pedido pelas regras tem como maior componente a vertical, é esperado que possam ser observadas algumas semelhanças entre os dois testes. Para este teste inicial, os pontos críticos de cada arco e os resultados foram registrados na Figura 46 e Figura 47.

Figura 46 - Pontos críticos das tensões máximas no FH do teste de validação



Fonte: Autor

Figura 47 - Pontos críticos das tensões máximas no MH do teste de validação



Fonte: Autor

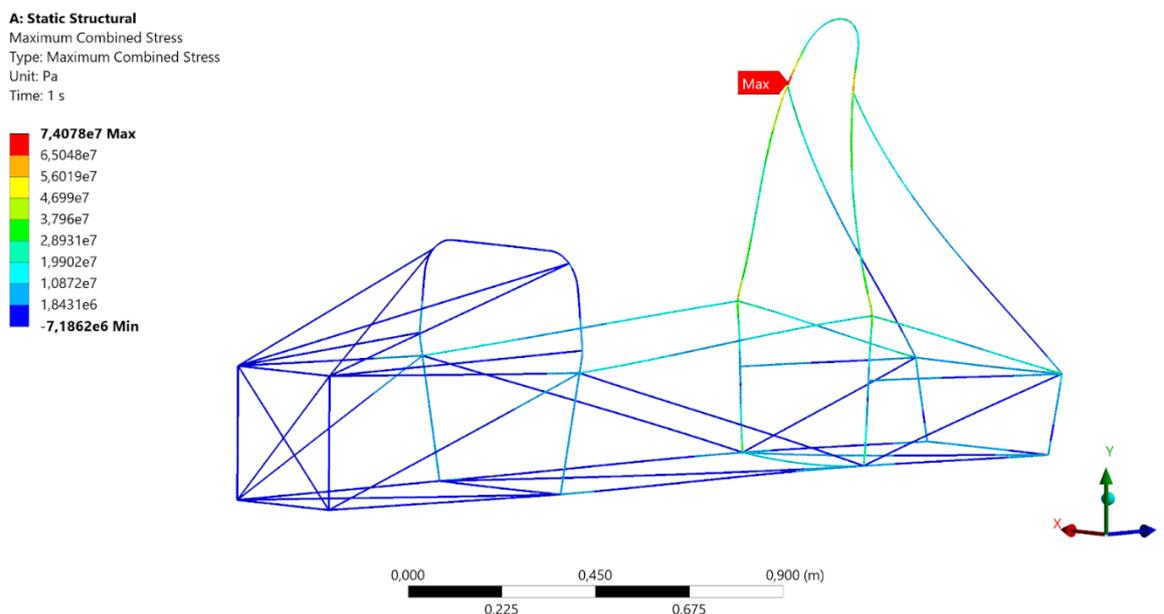
Ao comparar a Figura 46 à Figura 39 pode ser observado exatamente o mesmo comportamento na localização dos pontos críticos do arco frontal, indicando que a seção aberta no espaço acomodando as pernas do piloto pode ser a mais vulnerável, com outras direções estando comparativamente bem reforçadas. Portanto, se esta

região for a causa de falhas nos testes, reforçar diretamente a região da abertura não será possível visto que o espaço para o piloto não deve ser prejudicado.

Mas na comparação entre a Figura 47 e Figura 43 para o MH há diferenças. Pela proporção do arco principal com dimensão horizontal relativamente pequena em relação à vertical outra direção de tensão deve ser a maior causadora de tensões máximas.

Testando a mudança da força da vertical para a direção longitudinal do chassi, apontando para a traseira mantendo o valor de 1 kN, os pontos críticos assumem exatamente a configuração do teste de capotamento, mostrado na Figura 48 abaixo. O teste indica que esta é a direção do MH que naturalmente mais precisa de reforços, o que demonstra bem a necessidade de suportes exigidos pelas regras.

Figura 48- Pontos críticos das tensões máximas no MH do teste de validação com força longitudinal



Fonte: Autor

Os resultados das tensões, na Tabela 9 e Tabela 10 abaixo, ajudam a confirmar a análise do comportamento da estrutura, mostrando os valores de tensões máxima combinada ($\sigma_{\text{máx}}$) e mínima combinada ($\sigma_{\text{mín}}$) calculados pelo programa e a tensão equivalente de Von Mises (σ_{Eq}). No teste com forças verticais pode ser visto que a intensidade das tensões no ponto crítico do FH é maior do que nos pontos

críticos do MH, em ambas as direções testadas, mostrando que a vulnerabilidade do arco frontal às tensões se aplica igualmente na vertical e longitudinal.

Tabela 9 - Valores das tensões registradas no teste de validação vertical

Teste Vertical	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
FH	89,5	-93	158,1	0,7
MH	24,5	-30,1	47,4	0,6

Fonte: Autor

Tabela 10 - Valores das tensões registradas no teste de validação longitudinal

Teste Longitudinal	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
FH	82,5	-83,4	143,7	0,7
MH	74	-74,1	128,3	1,8

Fonte: Autor

Para o arco principal, comparar as intensidades das tensões nas duas direções confirma que a estrutura tem maior necessidade de reforços na direção longitudinal, tanto pelas tensões maiores quanto pelos deslocamentos maiores em relação à direção vertical.

Nas simulações de capotamento guiadas pelas regras, é esperado que as relações de predominância entre as direções e intensidades relativas sejam mantidas, com FH sendo a região mais afetada.

3.3.7 Coeficiente de Segurança

O primeiro chassi foi projetado considerando variação de diâmetro externo da tubulação entre 25 e 33 mm para os arcos (sendo a estrutura com o maior tamanho de tubo para o tipo de geometria apresentada), com aço AISI 1020 e coeficiente de segurança de 1,5.

O coeficiente de segurança com margem de 50% abaixo da tensão de escoamento do aço escolhido leva em consideração que o aço real fornecido pode ter propriedades diferentes, possivelmente menores do que o tabelado por Shigley, assim como outros fatores não previstos pelas simplificações adotadas no projeto. Com estas considerações, a tensão admissível do aço AISI 1020 é de 260 MPa.

Outro fator colaborando para o coeficiente de segurança escolhido é a regra F.3.4.2 do regulamento de 2025, padronizando em 305 MPa a tensão de escoamento de qualquer aço a ser usada em um documento adicional de verificação, o SES (*Structural Equivalency Spreadsheet*).

O chassi com a geometria e material escolhido será seguro quando atender aos requisitos do regulamento de 2016-17 pela regra AF3.1a, onde é indicado que escoamento e/ou deslocamento acima de 25 mm se configuram como falha.

Testes envolvendo variação do diâmetro externo dos tubos e espessura de parede foram feitos com valores na faixa esperada a ser encontrada em fornecedores de tubos de aço. As dimensões exatas dos tubos fornecidos foram aplicadas ao final do projeto, quando um chassi definitivo for escolhido. Portanto, as dimensões testadas não representam inicialmente os valores exatos vendidos pelos fornecedores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROCEDIMENTOS DE MELHORIA

Após a avaliação do primeiro chassi, foram analisados os comportamentos da geometria em resposta aos testes, sendo priorizados os problemas mais graves. As variáveis que afetam o desempenho do projeto são a geometria, tamanho dos tubos e material, sendo alvos das mudanças de acordo com a necessidade.

Um chassi é considerado um novo modelo quando apresentar mudanças de geometria, caso em que um novo desenho é obrigatório. Por ser a mudança mais radical em termos de tempo para ser executada (do novo desenho à preparação de simulações, e obtenção de resultados) é avaliada após tentativas de melhoria dos outros requisitos, dentro das limitações adotadas.

Por último, se houver necessidade, limitações podem ser reconsideradas, estendendo os limites sem desconsiderar os motivos pelos quais foram levantadas.

4.2 Modelo Original e primeira fase de melhorias

4.2.1 Modelo 1

O primeiro modelo projetado, com as condições de simulação e pontos críticos explicados nas seções anteriores tem seu resultado expresso na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Resultados testes Modelo 1 com tubos 25x2,5

Modelo 1 (25 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	876	-913	1549,4	13,1
Teste MH	652	-776	1238,2	29,8

Fonte: Autor

Comparando com os testes de validação com forças de 1 kN, as intensidades das tensões nas simulações de regulamento nas mesmas condições (mesmos suportes, ponto de aplicação das forças e tamanho de tubo) estão dentro do esperado.

Com resultante de 12 kN, os testes regulados são maiores do que os de validação na ordem de aproximadamente 10 vezes ao comparar as tensões equivalentes.

Não atende aos requisitos, estando com tensões e deslocamento do MH acima dos permitidos. A localização dos pontos críticos é compatível com o mostrado nas figuras 34 e 35 para o FH e figuras 38 e 39 para o MH, também sendo consistentes com os testes de validação. Foram testados novos valores com aumento do diâmetro externo dos tubos de 25 para 33 mm, com resultado na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12- Resultado dos testes do Modelo 1 com tubos 33x2,5

Modelo 1 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	532	-550	937,1	6,3
Teste MH	340	-430	668,4	12,9

Fonte: Autor

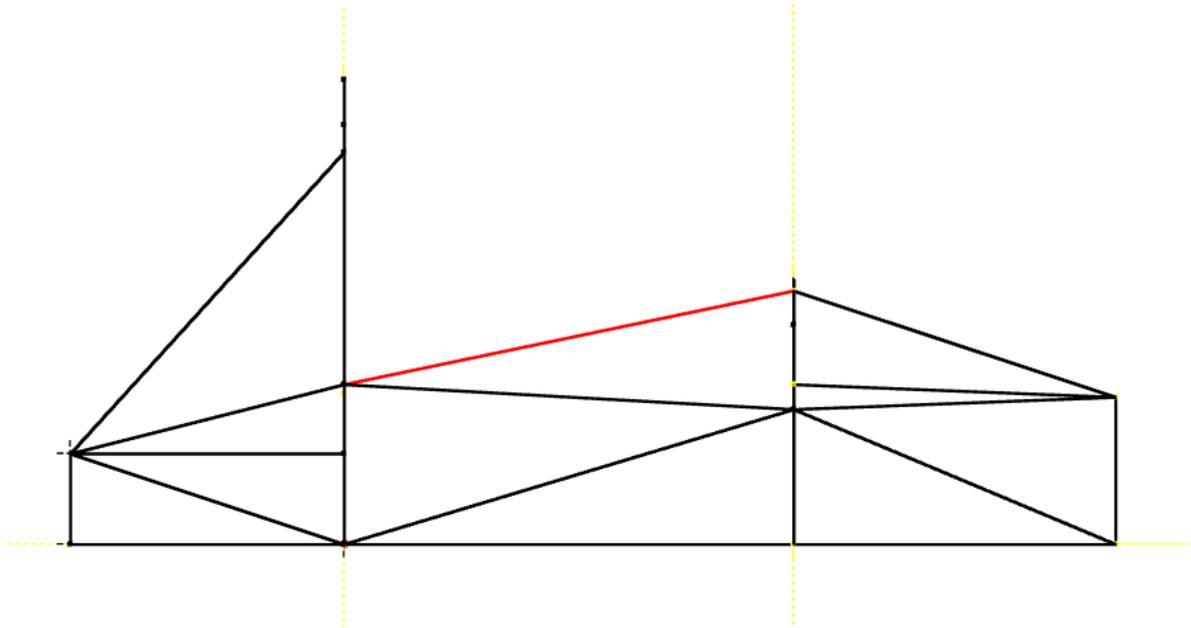
O aumento do diâmetro externo reduz consideravelmente o deslocamento da estrutura, a ponto de ficar com valores próximos à metade do exigido, mantendo a localização dos pontos críticos. Porém, tubos maiores não foram o suficiente para resolver o problema de tensões.

Entre os testes, os maiores valores de tensão se concentram no ponto crítico do FH, portanto, a próxima rodada de melhorias teve foco no reforço do arco frontal. Os próximos modelos têm como padrão o tamanho de tubo de 33x2,5 mm, para uniformidade na comparação.

4.2.2 Modelo 1.1

Foi adicionado um reforço no FH ao ligar suas curvas superiores aos nós livres mais próximos do MH, acima do SIS, representada na Figura 49 por linhas vermelhas.

Figura 49- Vista lateral do Modelo 1.1, com linha adicional em vermelho



Fonte: Autor

Como ponto positivo, esta é uma mudança que não exige retrabalho de qualquer outra estrutura no chassi. Por ser um acréscimo de tubos há adição de peso. O impacto do reforço adicionado é visto na Tabela 13 abaixo.

Tabela 13 - Resultado dos testes do Modelo 1.1 com tubos 33x2,5

Modelo 1.1 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	367	-378	645,2	6,3
Teste MH	258	-342	521,3	12,9

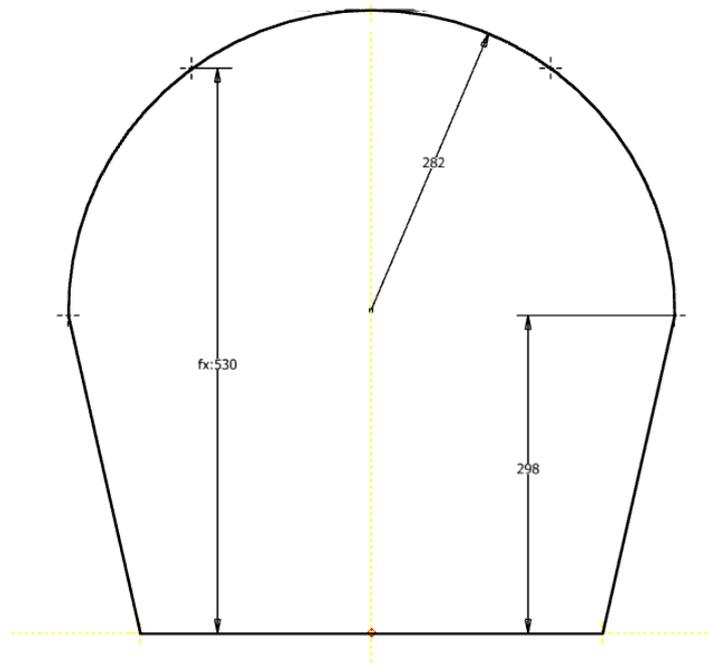
Fonte: Autor

Não atende aos requisitos, apesar do melhor resultado em relação ao Modelo 1. Mesmo não sendo um reforço agindo diretamente no ponto crítico do FH, o teste mostra que é uma opção a ser considerada para alívio da tensão. Os pontos críticos não sofreram alterações de localização.

4.2.3 Modelo 1.2

A porção superior do FH foi trocada por um arco, apresentado na Figura 50. Deve ser observado que o desenho não está de acordo com o regulamento devido à falta de continuidade com curvas logo abaixo do arco, no ponto marcado pela cota de 298 (deve ser um membro contínuo com curvas). Para que este FH esteja dentro das regras, será necessário um novo desenho da estrutura inteira, forçando também mudanças na geometria dos apoios e possivelmente do MH.

Figura 50 - Esboço de um FH em forma de arco no Modelo 1.2



Fonte: Autor

O teste tem objetivo de verificar de forma rápida se há potencial vantagem do ponto de vista das tensões em utilizar uma estrutura em forma de arco comparada à uma estrutura com porção central reta, como nos modelos anteriores. O resultado é mostrado na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14 - Resultado dos testes do Modelo 1.2 com tubos 33x2,5

Modelo 1.2 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	339	-364	608,9	4,9
Teste MH	293	-384	588,1	12,9

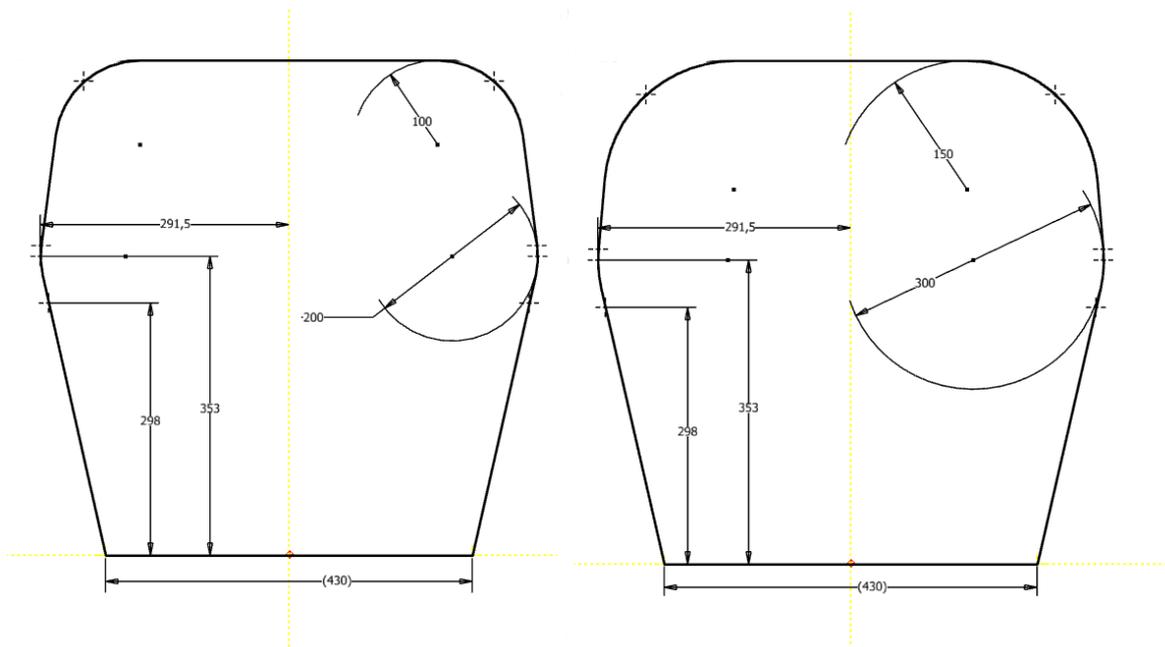
Fonte: Autor

O modelo não atende aos requisitos, apesar da melhoria em relação ao original. O teste confirma que em relação à geometria original, substituir a porção superior do FH por um arco tem o potencial de responder melhor às tensões, justificando positivamente um redesenho obrigatório do restante da estrutura para adequá-las às regras. Porém, as tensões ainda estão cerca de 2,3 vezes acima do considerado seguro para o FH.

4.2.4 Modelo 1.3

Foi feita diminuição da porção reta do FH em 100 mm a partir do aumento do raio das curvas de raio 100 para 150 mm, representada na Figura 51.

Figura 51 - Comparação do FH no Modelo 1 (esquerda) e Modelo 1.3 (direita)



Fonte: Autor

O objetivo da mudança é verificar se a diminuição da porção reta terá maior impacto na diminuição das tensões do que o possível aumento de tensões de curvas com diâmetros maiores. Ao simular com as forças, são obtidos os resultados da Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado dos testes do Modelo 1.3 com tubos 33x2,5

Modelo 1.3 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	479	-496	844,4	5,1
Teste MH	324	-412	638,9	9,7

Fonte: Autor

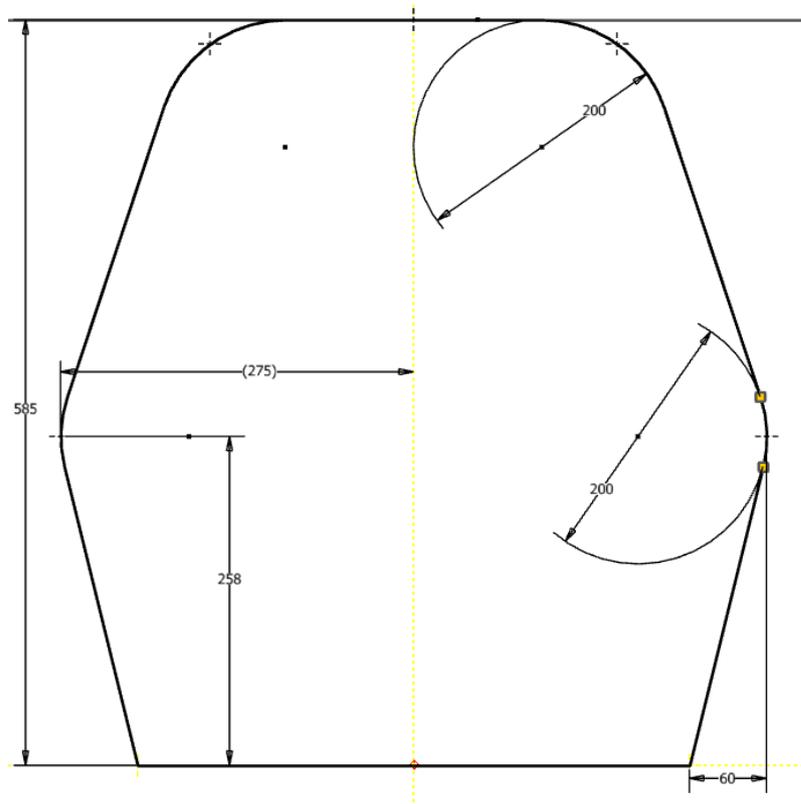
Não atende aos requisitos, com tensões mais altas em relação ao modelo original. O teste mostra que o impacto do aumento do diâmetro das curvas se sobressai em comparação com o potencial de diminuição oferecido pelo encurtamento da porção reta.

4.2.5 Modelo 1.4

Considerando que as mudanças menores a serem feitas não foram suficientes para aliviar as tensões, surge a necessidade de maiores alterações na geometria. Novamente foi feita uma tentativa de reduzir a porção reta superior do FH, desta vez mantendo o raio das curvas para evitar o resultado do Modelo 1.3.

Aproveitando o redesenho, as curvas mais baixas tiveram a altura dos seus centros reduzidos de 298 para 258 mm, de forma que este ponto agora serve de nó para o SIS e simultaneamente cumpre o requisito de reforço obrigatório em dobras dos arcos de rolamento. A porção superior ganha uma inclinação maior para compensar a seção reta mais curta no topo do FH, com 200 mm (pouco mais da metade dos modelos anteriores). A Figura 52 abaixo mostra detalhadamente as mudanças.

Figura 52 - Novo desenho do FH, presente no Modelo 1.4



Fonte: Autor

A altura total do FH foi mantida, em coerência com as decisões tomadas durante o desenho do primeiro modelo. Os suportes frontais foram mantidos sem alterações. É esperado que o encurtamento descrito diminua as tensões. Mantendo as condições de simulação, são obtidos os resultados, mostrados na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 - Resultado dos testes do Modelo 1.4 com tubos 33x2,5

Modelo 1.4 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	329	-341	580,3	5,2
Teste MH	317	-387	610,7	12,7

Fonte: Autor

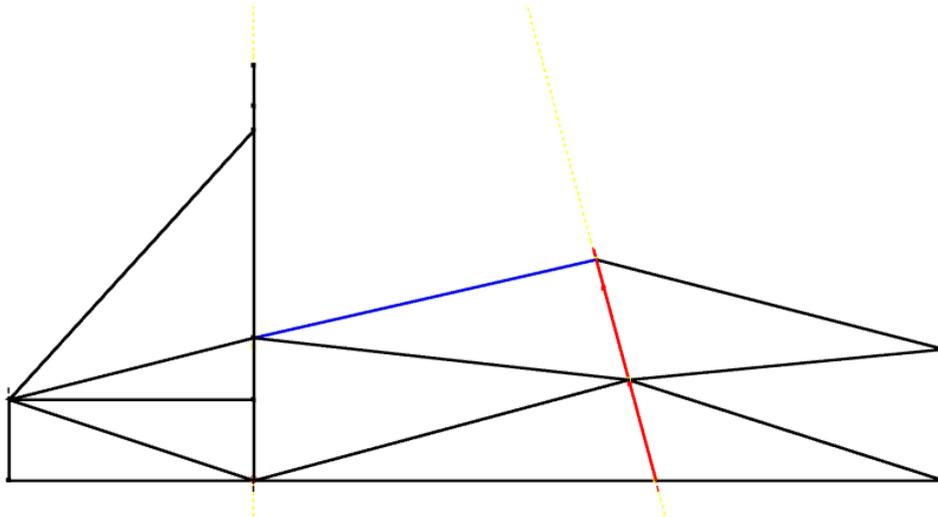
Mesmo sendo o melhor resultado até o momento, o modelo não atende aos requisitos de segurança do projeto. Pela primeira vez é visto que as tensões do MH ficam acima das tensões do FH, sem alterações dos pontos críticos.

4.2.6 Modelo 1.5

A segunda maior mudança a ser feita na geometria é inclinar o FH. O desenho original com plano perpendicular ao assoalho foi decidido pela praticidade, sendo agora alvo de comparação direta.

A estrutura foi inclinada a 15 graus, dentro do limite estabelecido pela regra F.5.7.6. Devido a inclinação na direção do MH, um novo reforço deve ser adicionado, sustentando o FH contra a direção de inclinação. O reforço é similar ao mostrado no Modelo 1.1, com diferença apenas de agora ser exigido pela regra F.6.3.5. As alterações são mostradas na Figura 53, sem mudanças nas medidas gerais do próprio FH.

Figura 53- Modelo 1.5 com FH inclinado, em vermelho, e suporte em azul



Fonte: Autor

Todos os suportes ligados ao FH foram readequados à inclinação, sendo os frontais alongados em relação ao modelo anterior e os posteriores mais curtos, mantidos os pontos de ligação. Executando a simulação, obtemos os resultados mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultado dos testes do Modelo 1.5 com tubos 33x2,5

Modelo 1.5 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	458	-470	803,7	6,5
Teste MH	310	-398	614,7	9,4

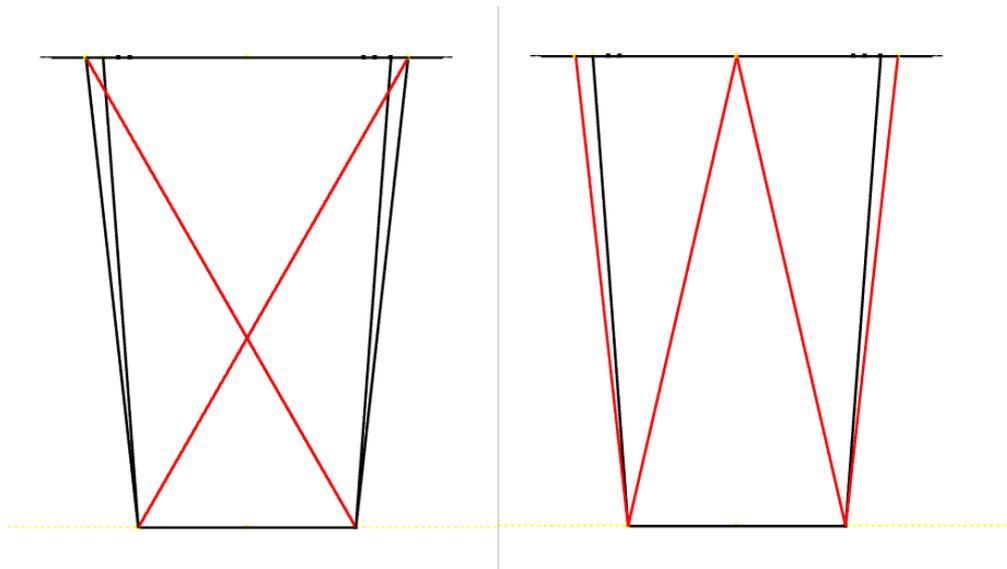
Fonte: Autor

Houve uma pequena redução das tensões, insuficiente para tornar o chassi seguro. Portanto, a inclinação do FH traz poucas mudanças relevantes do ponto de vista das tensões.

4.2.7 Modelo 1.6

Em todos os modelos mostrados os testes feitos no FH indicam as maiores tensões no centro do membro superior, como nas figuras 34 e 35 para o FH do Modelo 1. O Modelo 1.6 é uma tentativa de reforço local neste ponto. O suporte que liga o FH ao *Front Bulkhead* é alterado para atingir este propósito, tomando forma em “W”. A alteração pode ser vista na Figura 54 - Modelo 1 (esquerda) e Modelo 1.6 (direita) com suportes frontais superiores do FH destacados em vermelho, mostrando uma vista superior parcial destacando o conjunto FH, suportes e *Front Bulkhead*.

Figura 54 - Modelo 1 (esquerda) e Modelo 1.6 (direita) com suportes frontais superiores do FH destacados em vermelho



Fonte: Autor

Uma nova simulação mostra o real impacto do novo formato de reforço em reduzir as tensões no ponto crítico. Valores mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultado dos testes do Modelo 1.6 com tubos 33x2,5

Modelo 1.6 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	412	-431	730,1	6,6
Teste MH	314	-378	600,1	12,9

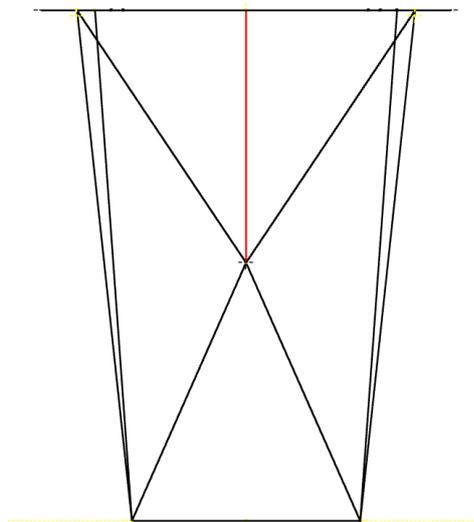
Fonte: Autor

O novo formato de reforço de fato reduz as tensões no ponto de interesse, porém não atende aos requisitos de projeto. Outra forma de reforço será testada em comparação.

4.2.8 Modelo 1.7

Com reforço mais direto no ponto crítico do FH, o Modelo 1.7 tem acréscimo de um tubo ligando diretamente o ponto crítico ao nó central do suporte em forma de “X” que o liga ao *Front Bulkhead*, mantendo o restante da estrutura a mesma em relação ao Modelo 1, como visto na Figura 55 abaixo.

Figura 55 - Novo tubo de suporte ao nó crítico adicionado no Modelo 1.7, em vermelho



Fonte: Autor

Mantendo as condições de simulação, são obtidos os resultados vistos na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultado dos testes do Modelo 1.7 com tubos 33x2,5

Modelo 1.7 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	381	-406	681,7	6,2
Teste MH	332,6	-423,6	656,5	12,9

Fonte: Autor

Este reforço apresenta maior redução de tensões no ponto crítico do FH do que o reforço em “W” do modelo anterior, porém ainda sem atender aos requisitos.

4.2.9 Resumo dos resultados das primeiras alterações

Colocando em ordem crescente os dados das tensões do Arco Frontal (FH) de cada modelo na Tabela 20 é possível avaliar quais foram as melhores alterações.

Tabela 20 – Tensões dos modelos resultantes das primeiras alterações, ordenados pela tensão no Arco Frontal (FH)

Resultado tensões – Primeiras Alterações; 33 x 2,5		
Modelo	FH (MPa)	MH (MPa)
Modelo 1.4	580,3	610,7
Modelo 1.2	608,9	588,1
Modelo 1.1	645,2	521,3
Modelo 1.7	681,7	656,5
Modelo 1.6	730,1	600,1
Modelo 1.5	803,7	614,7
Modelo 1.3	844,4	638,9
Modelo 1	937,1	668,4

Fonte: Autor

4.3 COMBINAÇÃO DE MODELOS

Visto que nenhum dos modelos atingiu os requisitos, são feitas combinações entre as alterações que podem formar pares. Cada combinação será testada nos mesmos moldes da primeira rodada de melhorias, ou seja, condições de contorno, forças aplicadas, tamanho dos tubos e material. Os requisitos e restrições também são mantidos.

4.3.1 Modelo 2

Combinação entre os modelos 1.1 e 1.4, este chassi apresenta o reforço do FH com barras na direção do MH e o retrabalho de encurtamento da porção superior do FH. O resultado é visto abaixo na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultado dos testes do Modelo 2 com tubos 33x2,5

Modelo 2 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	261	-271	460,8	4,7
Teste MH	297	-336	548,5	18,1

Fonte: Autor

Em comparação com o primeiro modelo, a tensão do ponto crítico no Teste FH caiu aproximadamente pela metade. Ao comparar com os modelos de origem (1.1 e 1.4), também foram obtidas tensões mais baixas, mostrando que esta combinação de melhorias teve efeito positivo. Deve ser observado o efeito negativo na rigidez. Indo de cerca de 13 mm no Teste MH para atuais 18 mm. Efeitos como este, ainda que negativos em valores absolutos, são tolerados enquanto estiverem abaixo dos valores limites estabelecidos.

Os efeitos positivos na redução de tensões ainda não foram suficientes para tornar o chassi seguro com aço AISI 1020. Os testes continuam com outros modelos.

4.3.2 Modelo 3

Este modelo é uma junção dos modelos 1.4 e 1.7, apresentando o FH retrabalhado com seção superior reta mais curta e um reforço adicional no ponto crítico do FH ligado ao nó da estrutura em “X” que o conecta ao *Front Bulkhead*. Resultados abaixo na Tabela 22.

Tabela 22- Resultado dos testes do Modelo 3 com tubos 33x2,5

Modelo 3 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	344	-374	622,0	5,1
Teste MH	317	-387	610,7	12,6

Fonte: Autor

Comparado ao modelo original, novamente são vistos os efeitos positivos das melhorias. Porém ao comparar com os modelos de origem há tensões maiores e ainda fora dos requisitos, mostrando que outras combinações devem ser buscadas.

4.3.3 Modelo 4

Combinando os modelos 1.4 e 1.5, este modelo contém o FH retrabalhado com seção superior reta encurtada e inclinada em 15 graus na direção do MH, com reforço contra a inclinação. Executando a simulação, temos os resultados registrados na Tabela 23.

Tabela 23- Resultado dos testes do Modelo 4 com tubos 33x2,5

Modelo 4 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	281	-289	493,7	4,2
Teste MH	269	-346	534,0	8,4

Fonte: Autor

Comparadas ao primeiro modelo e modelos de origem, as tensões apresentam os menores valores, sendo considerada uma combinação efetiva. Porém, não atende aos requisitos.

4.3.4 Modelo 5

Combinando o reforço direto do ponto crítico do FH ao nó estrutura em “X” do *Front Bulkhead* visto no modelo 1.7 às alterações dos modelos 1.4 e 1.5, é esperado que as tensões sejam mais baixas do que o Modelo 4. Para confirmar, os testes são realizados, com resultado na Tabela 24 abaixo.

Tabela 24 - Resultado dos testes do Modelo 5 com tubos 33x2,5

Modelo 5 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	250	-267	447,8	4,1
Teste MH	261	-351	531,9	8,4

Fonte: Autor

Para o Teste FH, de fato as tensões foram menores, porém ainda insuficientes comparadas aos requisitos definidos.

4.3.5 Modelo 6

A partir deste modelo são feitas combinações do Modelo 1.2, com FH em forma de arco, com outros modelos que possam ser diretamente comparados aos modelos 2 a 5 em pares (FH retrabalhado com membro superior reto) e demais modelos. Este combina os modelos 1.1, com reforço adicionado ao FH em direção ao nó entre MH e SIS, e Modelo 1.2. Simulando, temos os resultados abaixo na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultado dos testes do Modelo 6 com tubos 33x2,5

Modelo 6 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	286	-306	512,8	4,2
Teste MH	283	-371	568,1	8,7

Fonte: Autor

Comparado aos modelos de origem, este apresenta menores tensões no Teste FH, mas comparado ao seu par, Modelo 2, apresenta tensões maiores. Na visão geral, não atende aos requisitos.

4.3.6 Modelo 7

Combinação entre os modelos 1.2 e 1.7, com FH em arco e reforço com nó ligado ao apoio em "X". Resultados da simulação abaixo, na Tabela 26.

Tabela 26- Resultado dos testes do Modelo 7 com tubos 33x2,5

Modelo 7 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	349	-387	637,7	4,8
Teste MH	299	-376	585,8	12,9

Fonte: Autor

Valores de tensões mais altos do que os modelos de origem, mostrando que a combinação não foi positiva, e, portanto, fora dos requisitos.

4.3.7 Modelo 8

Combinando as alterações dos modelos 1.2 e 1.5, este modelo contém o FH em arco inclinado a 15 graus na direção do MH com reforço obrigatório ligado ao nó do MH e SIS, sendo suporte contrário à direção de inclinação. Executando a simulação, os resultados obtidos são vistos na Tabela 27.

Tabela 27 - Resultado dos testes do Modelo 8 com tubos 33x2,5

Modelo 8 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	252	-288	468,0	4,1
Teste MH	262	-352	533,6	8,5

Fonte: Autor

O modelo apresenta tensões abaixo das encontradas nos seus modelos de origem, sendo no geral um resultado positivo. Porém ainda não atinge os requisitos.

4.3.8 Modelo 9

Sendo originado dos modelos 1.2, 1.5 e 1.7, este modelo contém as alterações do Modelo 8, com adição do reforço no ponto crítico do FH ligado ao suporte em “X”. Assim como esperado que o Modelo 5 fosse uma melhoria em relação ao Modelo 4, também é esperado que este tenha resultados superiores ao Modelo 8. Para testar a teoria, as simulações foram feitas, com resultado apresentado na Tabela 28.

Tabela 28- Resultado dos testes do Modelo 9 com tubos 33x2,5

Modelo 9 (33 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	268	-290	483,4	3,8
Teste MH	258	-303	486,4	8,5

Fonte: Autor

Diferente do Modelo 5, este não atendeu à expectativa. Apresenta tensões no Teste FH mais altas do que o Modelo 8. Como os outros modelos, este não atende aos requisitos.

4.3.9 Conclusões das combinações de modelos

Ao fazer as combinações, nenhum modelo atendeu aos requisitos para uso com tubos de aço AISI 1020 de tamanho 33x2,5. Priorizando o material sobre as dimensões, será reconsiderada a restrição de tamanho dos tubos. Os testes dos modelos 2 ao 9 foram repetidos com tubos maiores, com diâmetro de 40 mm, mantendo a espessura de parede de 2,5 mm. Com geometria e condições de testes mantidas, os resultados são mostrados na Tabela 29, considerando apenas as tensões, visto que o aumento do tamanho dos tubos tornará cada estrutura mais rígida.

Tabela 29 - Resultado das combinações em ordem crescente pelo Teste FH

Resultado tensões - Combinações Modelos 1.X; 40 x 2,5		
Modelo	FH (MPa)	MH (MPa)
Modelo 5	302,3	354,8
Modelo 2	310,9	352,7
Modelo 8	313,8	350,2
Modelo 9	324,0	326,1
Modelo 4	329,1	352,9
Modelo 6	349,9	370,7
Modelo 3	408,9	418,4
Modelo 7	431,5	403,7

Fonte: Autor

Com a tensão admissível do aço AISI 1020, considerando coeficiente de segurança de 1.5, sendo de 260 MPa, é necessário reavaliar novamente os requisitos de dimensão dos tubos. Um novo aumento de diâmetro externo fortalece a estrutura, adicionando mais peso indesejável, porém, priorizando a segurança, é a medida a ser tomada.

As combinações mostram uma característica em comum de maiores tensões concentradas nos pontos críticos do MH, de forma que as próximas melhorias terão foco em reforçá-lo. Os dois modelos com melhor resultado, Modelo 5 e Modelo 2, passarão pelo mesmo procedimento de melhorias do Modelo 1, mas sendo simulados com tubos maiores, de diâmetro externo de 42 mm, mantendo a espessura de parede de 2,5 mm. O restante das condições permanece.

Para efeitos de comparação com os candidatos sucessores, os modelos 2 e 5 são novamente testados com o novo tamanho considerado. A Tabela 30 e a Tabela 31 contém as tensões resultantes dos testes, com menores valores, comportamento esperado pelo aumento do diâmetro externo.

Tabela 30 - Resultado dos testes do Modelo 2 com tubos 42x2,5

Modelo 2 (42 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	158	-170	284,1	2,5
Teste MH	170	-198	319,0	11,6

Fonte: Autor

Tabela 31 - Resultado dos testes do Modelo 5 com tubos 42x2,5

Modelo 5 (42 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	153	-164	274,6	2,2
Teste MH	155	-214	320,9	4,6

Fonte: Autor

4.4 REFORÇOS DO MH

Para reforçar o adequadamente o MH, poucas opções são aplicáveis sem alterar inteiramente a estrutura. Para manter o projeto dentro do cronograma, grandes mudanças no desenho não foram consideradas.

Uma das decisões tomadas durante o desenho do MH inicial foi manter seus suportes no limite máximo de distância até o topo, de 160 mm, conforme regra F.5.9.4, mostrada na Figura 25. Diminuir esta distância pode ter efeitos positivos nas tensões, considerando que a força aplicada no topo do MH terá uma distância menor para gerar esforços de flexão e torção nos pontos em que os suportes se unem ao arco do MH.

4.4.1 Modelo 2.1

Tendo o Modelo 2 como base, a mudança feita neste modelo foi a redução da distância do suporte ao topo do MH de 160 para 100 mm. Aplicando também o novo tamanho de diâmetro externo de 42 mm aos tubos, as simulações mostram o impacto da mudança, visto na Tabela 32 abaixo.

Tabela 32 - Resultado dos testes do Modelo 2.1 com tubos 42x2,5

Modelo 2.1 (42 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	174	-179	305,7	2,6
Teste MH	156	-198	307,3	5,2

Fonte: Autor

Comparado ao Modelo 2, as tensões no MH diminuíram como esperado, estando agora próximas aos valores de tensões no FH, porém a alteração pode ter contribuído para um aumento de tensões no FH. O aumento do diâmetro externo dos tubos em 2 mm teve impacto insuficiente para adequar o FH aos requisitos, indicando que as restrições devem passar por uma nova reavaliação.

4.4.2 Modelo 2.2

Com geometria similar ao Modelo 2.1, este modelo apresenta a distância do suporte do MH ao topo do próprio MH de 40 mm. Se aproximar os pontos de fato ajuda a reduzir a tensão, é esperado que as simulações mostrem resultados de tensões menores. Executando os testes, temos os resultados abaixo na Tabela 33.

Tabela 33 - Resultado dos testes do Modelo 2.2 com tubos 42x2,5

Modelo 2.2 (42 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	u_{Total} (mm)
Teste FH	217	-224	381,9	2,6
Teste MH	155	-192	301,1	5,2

Fonte: Autor

O teste do MH confirma que as tensões diminuem no ponto de aplicação ao aproximar o suporte do ponto mais alto do MH, porém pode ser visto um aumento maior de tensões no ponto crítico do teste do FH, em aproximadamente 100 MPa comparado ao Modelo 2 com MH inalterado, tornando novamente o FH ponto de maior necessidade de atenção.

4.4.3 Modelo 5.1

Usando o Modelo 5 como base, nos mesmos moldes de alteração entre os modelos 2 e 2.1, este modelo apresenta os pontos de suporte do MH a 100 mm de distância do topo do MH. Os resultados dos testes são vistos na Tabela 34 abaixo.

Tabela 34 - Resultado dos testes do Modelo 5.1 com tubos 42x2,5

Modelo 5.1 (42 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	164	-176	294,5	2,4
Teste MH	154	-206	312,9	5,1

Fonte: Autor

Repetindo o resultado do Modelo 2.1 em comparação ao Modelo 2, o Modelo 5.1 sofre tensões menores no ponto crítico do MH em relação ao seu antecessor e maiores no ponto crítico do FH. O modelo ainda não atingiu os requisitos necessários.

4.4.4 Modelo 5.2

Novamente diminuindo a distância entre os nós dos suportes do MH ao seu topo, este modelo apresenta a medida de 40 mm, assim como o Modelo 2.2. Executando a simulação nos moldes estabelecidos, temos o resultado na Tabela 35.

Tabela 35- Resultado dos testes do Modelo 5.2 com tubos 42x2,5

Modelo 5.2 (42 x 2,5)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{mín}}$ (MPa)	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)
Teste FH	164	-176	294,5	2,4
Teste MH	142	-175	275,0	5,1

Fonte: Autor

O novo modelo segue a tendência de diminuição de tensão no ponto crítico do MH, porém mantendo inalterada a tensão no ponto crítico do FH. Ainda que apresente resultados melhores do que o Modelo 5.1, não atinge os requisitos.

4.4.5 Resumo reforços do MH

Tanto nas modificações do Modelo 2 quanto nas modificações do Modelo 5 houve uma tendência de redução de tensões no ponto crítico do MH quanto mais próximo os suportes estivessem do topo do MH. Com exceção do Modelo 5.2, todos os outros apresentaram aumentos de tensão no ponto crítico do FH proporcionais à redução de distância entre os suportes e o topo do MH. Nenhum dos modelos atingiu

os requisitos, mostrando que ainda é necessário tomar uma medida sobre as restrições de material e/ou dimensões dos tubos.

4.5 CORREÇÃO DE DOBRAS

Uma mudança necessária para continuar as análises é a respeito da geometria, em geral, dos modelos 2, 5 e variações. Por serem os melhores resultados até o momento, continuarão sendo a base de novas análises.

Pela regra F.5.2.1 do regulamento de 2025, toda dobra de tubos deve ter como raio mínimo 3 vezes o valor do diâmetro externo do tubo que foi dobrado. Como os últimos testes evidenciaram a necessidade de aumento de diâmetro, para 42 mm de diâmetro externo, as dobras devem ser corrigidas com os raios obedecendo o regulamento, visto que anteriormente seguiam a expectativa de diâmetro máximo de 33 mm.

É decidido executar o aumento destes raios com o mínimo de alterações na geometria, sem novos redesenhos que se configurariam como um novo modelo. Assim as curvas passam do raio de 100 mm para 126 mm. Como consequência, é esperado que arcos maiores sofram tensões maiores (no caso do MH) ou contribuam para alongar braços de alavanca que afetem um ponto crítico (no caso do FH).

A Tabela 36 abaixo apresenta os resultados obtidos ao realizar as simulações, com os mesmos requisitos usados nos modelos anteriores, aplicadas aos modelos 2 e variantes, e modelos 5 com seus variantes, todos corrigidos para atender ao regulamento.

Tabela 36 - Tensões dos modelos corrigidos, com caractere final “C” indicando a versão corrigida

Tensões dos modelos corrigidos; 42 x 2,5		
Modelo	FH (MPa)	MH (MPa)
Modelo 2C	308,3	344,5
Modelo 2.1C	373,3	341,1
Modelo 2.2C	381,1	333,2
Modelo 5C	393,5	411,1
Modelo 5.1C	341,3	344,4
Modelo 5.2C	366,4	303,5

Fonte: Autor

Em comparação com suas versões anteriores não corrigidas, houve de fato aumento nas tensões em geral. O comportamento registrado entre um modelo de origem e seus sucessores foi mantido nas análises do MH e FH simultaneamente. Portanto, as correções não alteram os impactos esperados das mudanças de reforço do MH, ou seja, as tensões no ponto crítico do MH diminuem proporcionalmente à diminuição da distância entre os pontos de suporte do MH e o topo do mesmo, enquanto as tensões no ponto crítico do FH aumentam.

4.6 RODADA FINAL DE SIMULAÇÕES

Neste ponto, considerando os últimos modelos (2, 5 e todos suas variantes com geometria corrigida) como os melhores e ainda sem atingir os requisitos, deve ser decidido quais requisitos devem ser alterados.

O aço AISI 1020 que foi usado como referência para todas as simulações dividirá espaço com o aço AISI 1030, com tensões em grau superior sem mudanças radicais em sua composição. Segundo Shigley (2008), o aço 1030 tem uma tensão de escoamento de 440 MPa, sendo corrigido para 293,33 com o coeficiente de segurança de 1,5.

Também será mudada a espessura de parede analisada nos tubos. Espessuras de 2,5 mm a 4 mm foram a nova faixa utilizada nas simulações. As espessuras foram combinadas com diâmetro externo do tubo de 40 a 42 mm, gerando diversas

combinações para cada modelo. As combinações testadas não necessariamente se adequam a tamanhos vendidos por fornecedores, podendo estar entre medidas.

Como feito até o momento, as simulações mantêm suas características de forças aplicadas, ponto de aplicação e condições de contorno. Será adicionado ao resultado da análise o peso dos aços 1020 e 1030, de 7870 kg/m^3 e 7850 kg/m^3 . As seções seguintes 7.1 a 7.6, contendo as tabelas 36 a 41, apresentam os resultados por modelo das combinações feitas, indicando também visualmente se determinada combinação atingiu os requisitos e para qual aço (laranja para o 1020 e azul para o 1030).

4.6.1 Combinações Modelo 2C

Tabela 37 - Resultado testes do Modelo 2C organizados pelo tamanho dos tubos

Modelo - Tubo	Teste FH	Teste MH	Peso (kg)	Verificação
2C - 40 x 2,5	342,1	374,7	76,6	FALHA
2C - 40 x 3,5	262,7	287,1	104,2	1030
2C - 40 x 4	239,0	260,2	117,4	1030
2C - 42 x 2,5	308,3	344,5	80,7	FALHA
2C - 42 x 3,25	250,3	275,0	102,7	1030
2C - 42 x 3,75	224,3	246,3	117,3	1020

Fonte: Autor

4.6.2 Combinações Modelo 2.1C

Tabela 38 - Resultado testes do Modelo 2.1C organizados pelo tamanho dos tubos

Modelo - Tubo	Teste FH	Teste MH	Peso (kg)	Verificação
2.1C - 40 x 2,5	413,1	376,6	76,9	FALHA
2.1C - 40 x 3,5	317,9	289,0	118,1	FALHA
2.1C - 40 x 4	289,3	262,1	117,8	1030
2.1C - 42 x 2,5	373,3	341,1	81,0	FALHA
2.1C - 42 x 3,25	302,3	276,0	103,3	FALHA
2.1C - 42 x 3,75	271,9	248,2	117,3	1030

Fonte: Autor

4.6.3 Combinações Modelo 2.2C

Tabela 39 - Resultado testes do Modelo 2.2C organizados pelo tamanho dos tubos

Modelo - Tubo	Teste FH	Teste MH	Peso (kg)	Verificação
2.2C - 40 x 2,5	381,1	333,2	77,1	FALHA
2.2C - 40 x 3,5	292,8	255,9	104,8	1030
2.2C - 40 x 4	266,8	231,6	118,1	1030
2.2C - 42 x 2,5	343,8	302,0	103,6	FALHA
2.2C - 42 x 3,25	278,9	243,8	103,3	1030
2.2C - 42 x 3,75	250,3	218,6	118,0	1020

Fonte: Autor

4.6.4 Combinações Modelo 5C

Tabela 40- Resultado testes do Modelo 5C organizados pelo tamanho dos tubos

Modelo - Tubo	Teste FH	Teste MH	Peso (kg)	Verificação
5C - 40 x 2,5	393,5	411,1	78,5	FALHA
5C - 40 x 3,5	289,3	317,1	106,9	FALHA
5C - 40 x 4	262,2	289,3	120,2	1030
5C - 42 x 2,5	341,3	371,1	82,7	FALHA
5C - 42 x 3,25	276,3	300,7	105,4	FALHA
5C - 42 x 3,75	247,7	270,3	119,8	1030

Fonte: Autor

4.6.5 Combinações Modelo 5.1C

Tabela 41- Resultado testes do Modelo 5.1C organizados pelo tamanho dos tubos

Modelo - Tubo	Teste FH	Teste MH	Peso (kg)	Verificação
5.1C - 40 x 2,5	376,8	379,9	78,7	FALHA
5.1C - 40 x 3,5	289,3	291,4	107,0	1030
5.1C - 40 x 4	262,4	264,5	120,6	1030
5.1C - 42 x 2,5	341,3	344,4	82,9	FALHA
5.1C - 42 x 3,25	276,3	278,4	105,5	1030
5.1C - 42 x 3,75	247,7	248,9	120,4	1020

Fonte: Autor

4.6.6 Combinações Modelo 5.2C

Tabela 42- Resultado testes do Modelo 5.2C organizados pelo tamanho dos tubos

Modelo - Tubo	Teste FH	Teste MH	Peso (kg)	Verificação
5.2C - 40 x 2,5	406,2	335,6	78,9	FALHA
5.2C - 40 x 3,5	312,7	257,5	107,6	FALHA
5.2C - 40 x 4	285,0	234,1	120,9	1030
5.2C - 42 x 2,5	366,4	303,5	83,2	FALHA
5.2C - 42 x 3,25	297,1	246,3	106,0	FALHA
5.2C - 42 x 3,75	267,7	220,2	120,5	1030

Fonte: Autor

4.6.7 Resumo dos testes dos modelos corrigidos

O comportamento geral dos modelos em cada teste permaneceu, mantendo para MH e FH os pontos críticos observados anteriormente (nós da ligação do suporte ao MH no primeiro caso e centro do membro reto superior no segundo caso).

Adicionando o peso à análise pode ser visto que há maior impacto na adição de maiores espessuras de parede do tubo, adicionando peso ao fator de dezenas, do que aumento de diâmetro externo, com acréscimo de menos de 10 kg em geral.

Também é observado o impacto nas tensões, com reduções mais significativas ao aumentar a espessura de parede comparado ao aumento individual de diâmetro externo.

Das 36 combinações testadas, sendo 6 por modelo, um total de 18 atinge os requisitos. Dos 18, 15 atendem apenas à tensão admissível adotada do aço 1030, enquanto os 3 restantes passam apenas com aço 1020.

4.7 REDUÇÃO DE PESO

Os 6 modelos mais leves que atendem aos requisitos, mostrados na Tabela 43 abaixo, passam por novas simulações testando redução de peso. O peso será reduzido ao aplicar em vários pontos da estrutura tubos com tamanhos menores, seja por redução de diâmetro ou espessura de parede. As reduções foram feitas em rodadas, com a maior redução sendo aplicada na primeira rodada e testes subsequentes reduzindo uma quantidade cada vez menor de tubos. Foram levados adiante as versões mais leves dos modelos, indicados por negrito.

Tabela 43 - Resultados dos chassis mais leves entre as combinações de tubos, ordenadas pelo peso

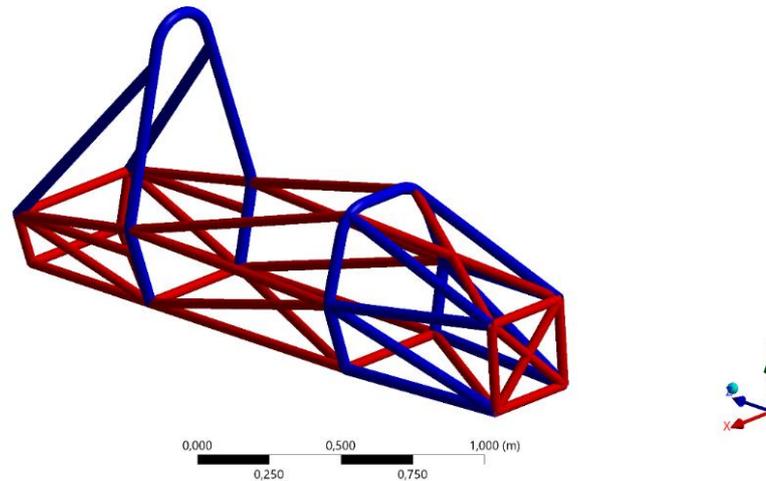
Modelo - Tubo	Teste FH	Teste MH	Peso (kg)	Verificação
2C - 42 x 3,25	250,3	275,0	102,7	1030
2.2C - 42 x 3,25	278,9	243,8	103,3	1030
2C - 40 x 3,5	262,7	287,1	104,2	1030
2.2C - 40 x 3,5	292,8	255,9	104,8	1030
5.1C - 42 x 3,25	276,3	278,4	105,5	1030
5.1C - 40 x 3,5	289,3	291,4	107,0	1030

Fonte: Autor

Os conjuntos de tubos a sofrer reduções foram escolhidos pelo seu grau de importância na estrutura. Em geral, a primeira rodada manterá inalterados os tubos dos arcos de rolamento (MH e FH) e a maioria dos seus suportes, deixando de fora os suportes compartilhados com o SIS. Assim, os tubos que sofrem redução na primeira rodada podem ser vistos na Figura 56.

Figura 56 - Tubos afetados pela primeira rodada de redução de peso destacados em vermelho

Geometry

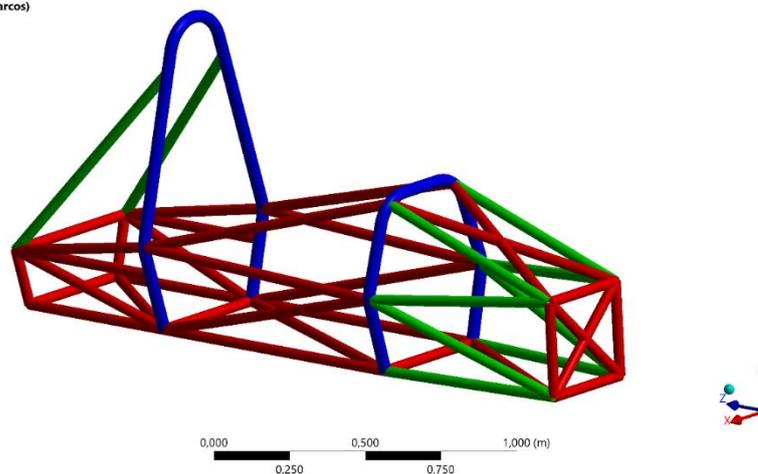


Fonte: Autor

A segunda rodada de reduções, quando houver, reduz os tubos dos suportes dos arcos, deixando inalterados apenas os próprios MH e FH, destacados na Figura 57.

Figura 57- Tubos afetados pela segunda rodada de redução de peso destacados em verde

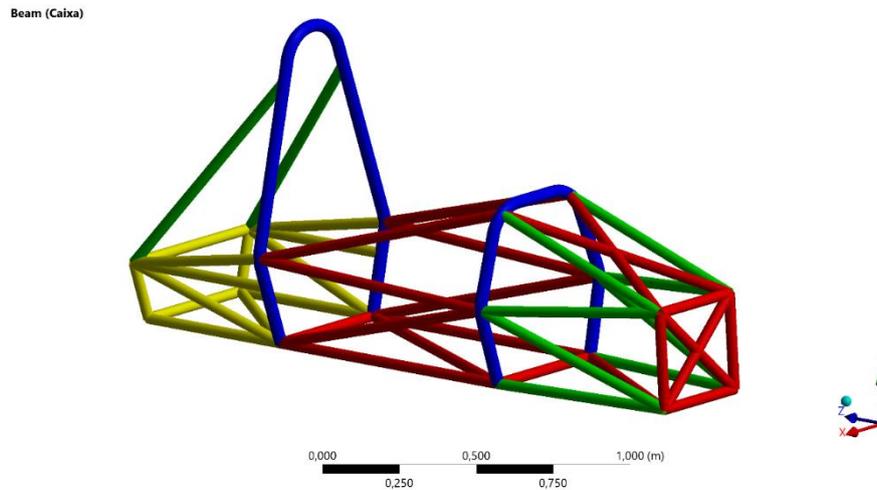
Beam (Suportes arcos)



Fonte: Autor

A terceira rodada de reduções, quando houver, reduz novamente o tamanho dos tubos que abrigam o motor, a estrutura em forma de caixa na traseira do chassi, destacados na Figura 58.

Figura 58- Estrutura da caixa do motor em amarelo, alterada na última rodada de redução de peso



Fonte: Autor

O processo de decisão para diminuição dos tamanhos foi determinado pelos testes, de forma que um tamanho de tubo passando pelos requisitos pode sofrer uma nova redução se não estiver no limite dos valores de tensões. Caso chegue ao limite, se usa o tamanho com o limite. Caso as tensões ultrapassem o valor admissível (293,33 MPa do aço 1030), o tamanho anterior permanece.

Os resultados nas tabelas 33 a 45 nas seções a seguir dos modelos em ordem (2C, 2.2C e 5.1C) mostram as rodadas de redução de peso ordenadas por cores entre si (verde para a primeira rodada, amarelo para a segunda e vermelho para a terceira) e internamente por ordem do tamanho dos tubos. O negrito indica um tamanho válido escolhido para determinada rodada de redução que permanece aplicado nas rodadas seguintes. O tamanho de tubo inicial segue o mostrado na Tabela 43 para cada modelo.

4.7.1 Modelo 2C

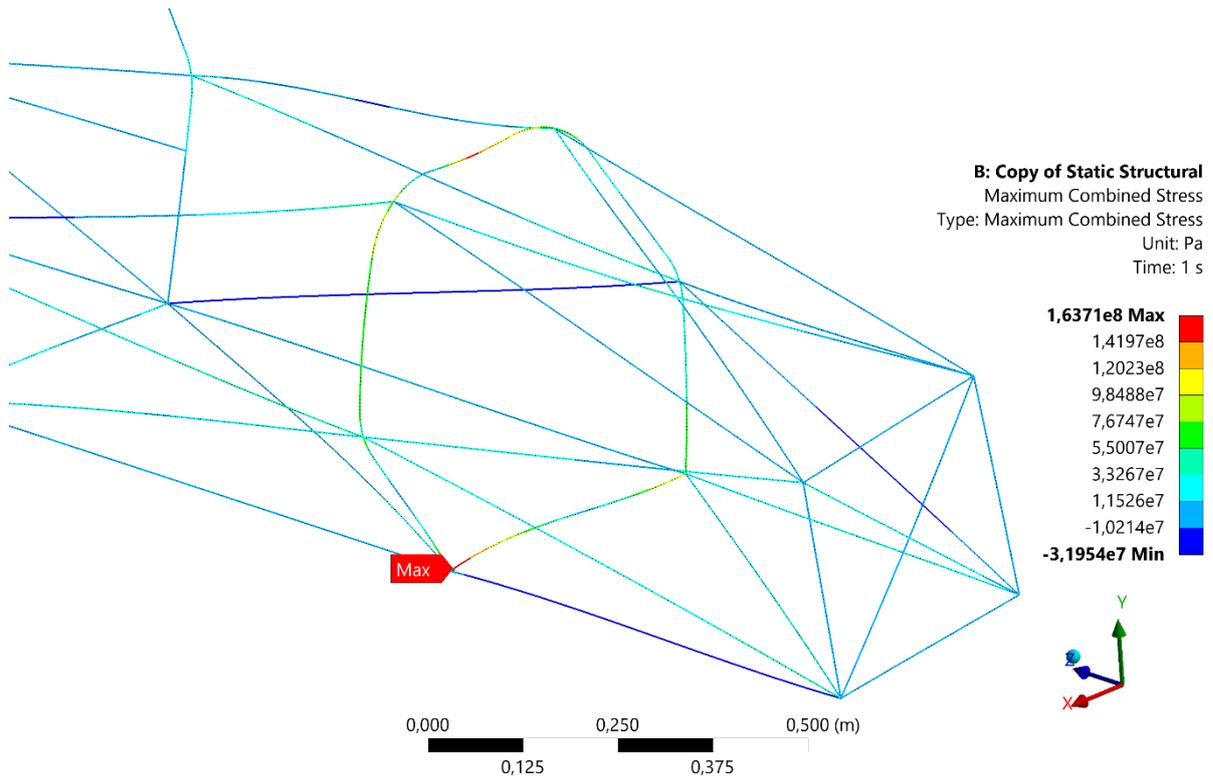
Tabela 44 - Resultados reduções de peso do Modelo 2C com tubo inicial 42x3,25

Modelo 2C	FH	MH	Peso
33x3	266,7	292,3	83,5
33x3,5	264,1	288,9	90,6
35x2,5	268,5	292,3	78,9
35x3,25	261,6	286,2	90,6
36x2,25	276,3	292,3	76,0
36x2,25	306,6	291,4	66,6
36x2,5	282,3	288,8	72,2
33x2,5	284,1	293,2	69,7

Fonte: Autor

Este modelo passou por 3 reduções bem sucedidas de peso, indicado pelos negritos. Antes das reduções, o peso era de 102,7 kg (Tabela 43), passando para 69,7 kg (Tabela 44). O modelo reduzido apresenta novos potenciais pontos críticos de tensões além dos conhecidos anteriormente, principalmente na base do MH e do FH em seus respectivos testes. No caso do FH, um dos nós da base assume o maior valor de tensão, como visto na Figura 59.

Figura 59 - Pontos críticos revelados pelo Teste FH, em vermelho



Fonte: Autor

4.7.2 Modelo 2.2C

Tabela 45- Resultados reduções de peso do Modelo 2C com tubo inicial 42x3,25

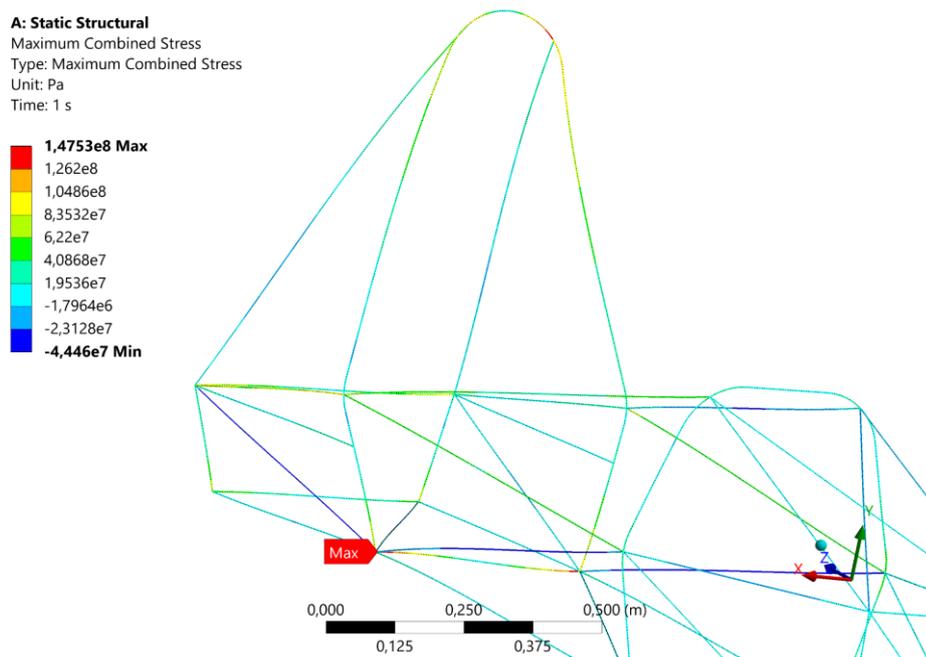
Modelo 2.2C	FH	MH	Peso
34x3,5	292,4	254,1	93,3
36x2,25	297,1	278,9	76,8
36x3	291,9	253,3	89,2
38x2,5	291,9	253,2	83,7
38x2,75	290,1	251,5	88,1
40x2	293,0	266,4	76,9
39x2,5	294,5	265,0	77,4

Fonte: Autor

Este modelo passou por apenas uma redução de peso bem sucedida, com reduções posteriores apresentando tensões acima dos requisitos. O peso deste

modelo foi reduzido de 103,3 kg (Tabela 43) para 76,9 kg (Tabela 45). O teste de tensões no MH destaca pontos críticos adicionais na base do MH, com um deles assumindo o maior valor, mostrado na Figura 60. O arco frontal também apresenta novos pontos críticos na base, mas mantém o máximo no centro do membro reto superior.

Figura 60 - Pontos críticos revelados pelo Teste MH, em vermelho



Fonte: Autor

4.7.3 Modelo 5.1C

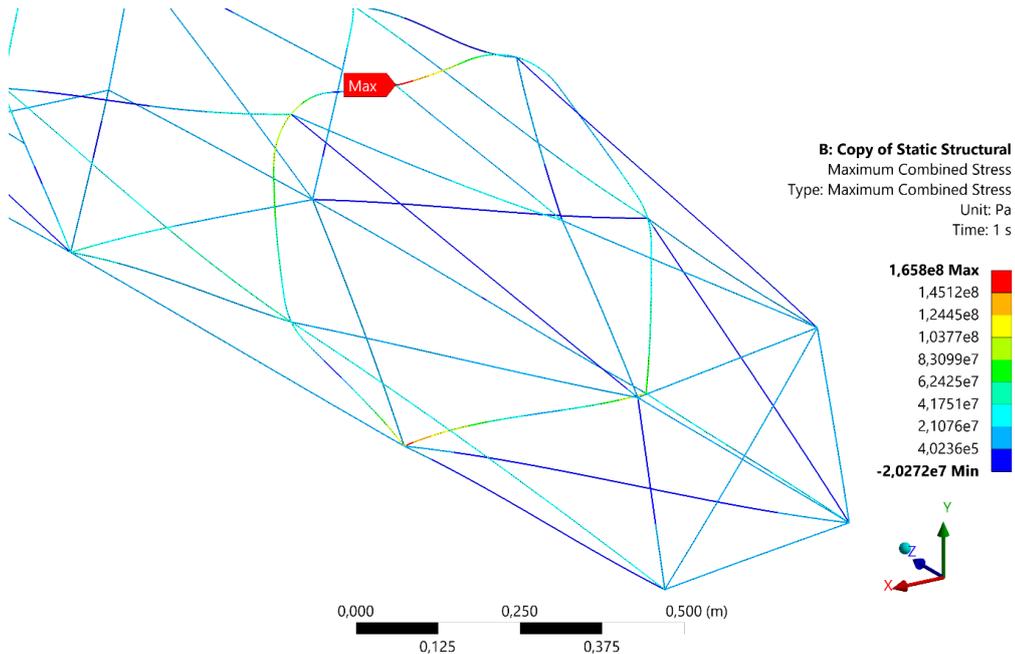
Tabela 46 - Resultados reduções de peso do Modelo 2C com tubo inicial 42x3,25

Modelo 5.1C	FH	MH	Peso
40x2	293,4	292,2	78,8
40x2,25	290,1	289,6	83,6
41x2	291,9	290,5	79,9
38x2,5	296,2	288,7	72,3
38x3,5	293,31	288,8	78,8
40x2	293,34	289,4	78,5

Fonte: Autor

Este modelo passou por duas reduções de peso bem sucedidas, indo de 105,5 kg (Tabela 43) para 78,8 kg (Tabela 46). Nos testes de tensões, o MH não apresentou novos pontos críticos significativos, mantendo o nó de conexão entre o MH e seu suporte. Para o FH novos pontos podem ser vistos na base, pela Figura 61, mas ainda mantendo o ponto central do membro reto superior como o local com maior tensão.

Figura 61 - Pontos críticos revelados pelo Teste MH, em vermelho



Fonte: Autor

4.8 ESCOLHA DO MODELO

Ao fim do processo de redução de peso, temos 3 modelos com pesos reduzidos em relação aos seus estados iniciais, todos cumprindo os requisitos determinados de tensões. Pelos dados da Tabela 47 com as informações destes modelos, incluindo o percentual de peso reduzido, será escolhido o mais leve.

Tabela 47 - Resultados dos 3 modelos testados para redução de peso

Modelo	Teste FH (MPa)	Teste MH (MPa)	Peso (kg)	Redução
2C Reduzido	284,1	293,2	69,7	32,13%
2.2C Reduzido	293,0	266,4	76,7	25,75%
5.1C Reduzido	293,31	288,8	78,6	27,18%

Fonte: Autor

Dessa forma, o modelo escolhido é o 2C Reduzido, devendo passar por mais uma modificação para adequá-lo às medidas reais de tubos fornecidos por vendedores, tendo referência lojas como Tubo & Aço (TUBO & AÇO) e SP Aços (SP AÇOS).

Comparando a lista de medidas disponíveis nas lojas e as usadas nas simulações, para garantir a integridade das propriedades de resistência do chassi são escolhidas medidas de tubos em cada parte da estrutura uma medida imediatamente acima da usada nas simulações, com valores evidenciados pela Tabela 48. Os índices numéricos indicam a ordem da etapa de redução de peso.

Tabela 48 - Adaptação das medidas dos tubos

Estrutura	Simulação	Fornecedor
Arcos	42x3,25	42,4x3,35
Geral (1)	36x2,25	38,1x2,25
Suportes (2)	36x2,5	38,1x2,65
Caixa (3)	33x2,5	33,7x2,65

Fonte: Autor

A segurança da estrutura é confirmada com uma última simulação, com resultado registrado na Tabela 49.

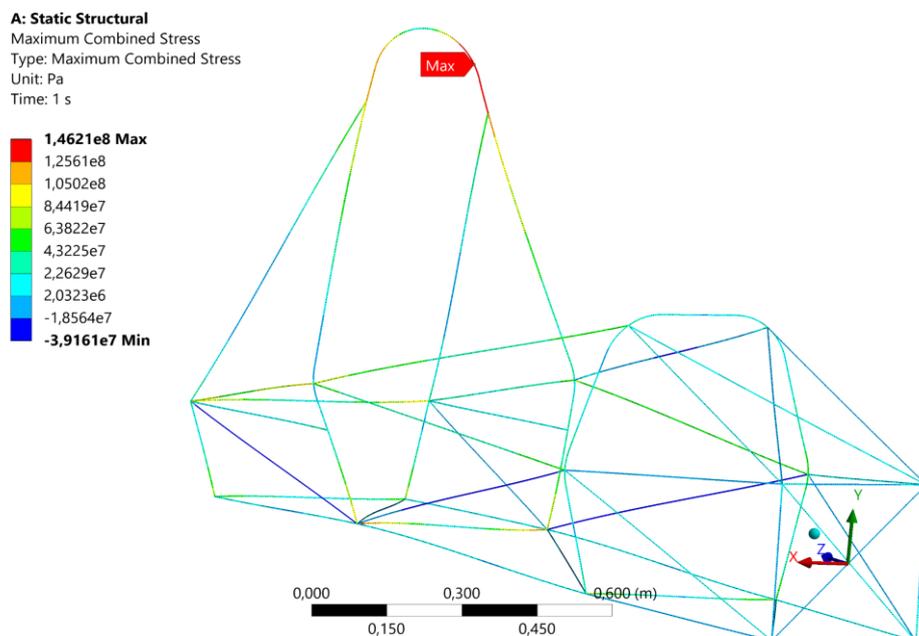
Tabela 49 - Resultados do modelo final

Modelo Final	σ_{Eq} (MPa)	uTotal (mm)	Peso (kg)
Teste FH	280,6	2,6	70,7
Teste MH	278,5	5,8	

Fonte: Autor

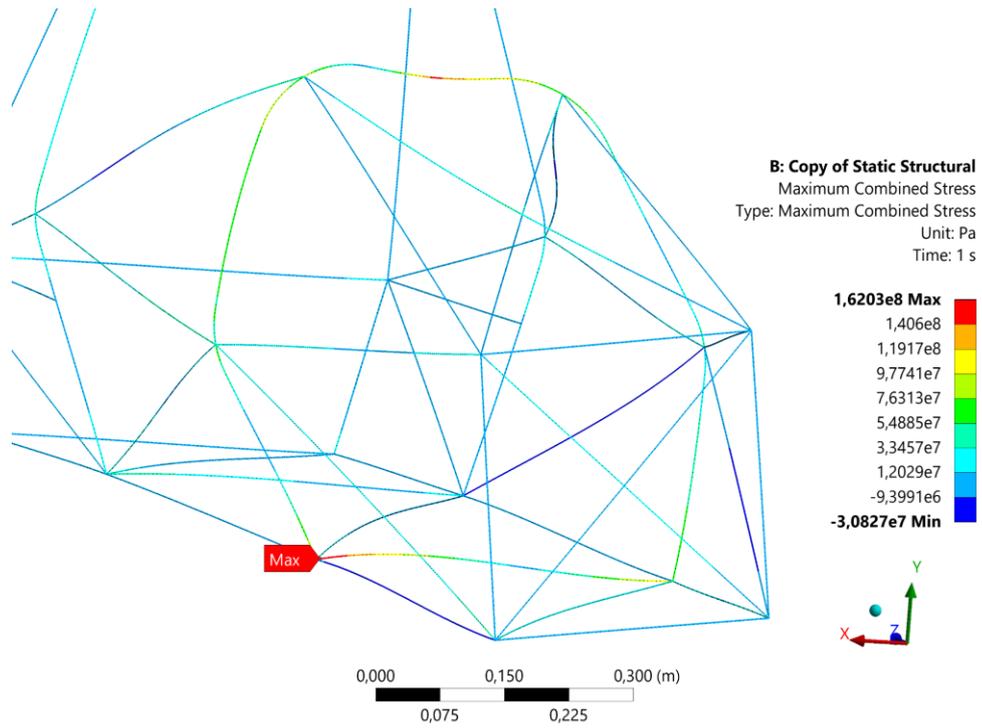
Os pontos críticos nos testes de cada arco permaneceram dentro do esperado. Em ambos os testes, indicados pelas regiões vermelhas na Figura 62 e Figura 63, as maiores tensões se localizam em uma das bases (consequência da mudança de dimensões dos tubos da base), em um nó de suporte ou no ponto de aplicação da força (pontos típicos mostrados nos primeiros testes). Os resultados são consistentes com as simulações feitas anteriormente.

Figura 62- Pontos críticos do Modelo Final, em vermelho, no Teste MH



Fonte: Autor

Figura 63 - Pontos críticos do Modelo Final, em vermelho, no Teste FH



5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um chassi tubular para veículo mini fórmula, atendendo aos requisitos estruturais e normativos da competição Formula SAE. Foram realizadas diversas etapas de projeto, desde o primeiro desenho iniciado com o *Driver Template* até a análise estrutural por simulação computacional com o Método dos Elementos Finitos.

O modelo inicial desenhado no Autodesk Inventor obedeceu ao regulamento de 2025, servindo como base para alterações e melhorias posteriores. Em simulação com o *Beam Tool* do Ansys Mechanical foi definido o tamanho dos elementos de 5 mm, baseado no tempo de execução dos cálculos, precisão da resposta fornecida pelo programa e memória consumida. As simulações seguiram as regras especificamente definidas para capotamento pelo regulamento de 2017-18.

Cruzando as informações de propriedades de aços de outros autores com as exigências mínimas de resistências definidas pela competição foram escolhidos os aços AISI 1020 e AISI 1030, com tamanhos de tubos variando de 25x2,5 mm a 42x3,75 mm para as simulações.

A partir dos resultados de simulação do primeiro modelo, alterações foram feitas para reforçar os pontos críticos e adequar o chassi aos requisitos de projeto. Todas as alterações no desenho foram feitas ainda de acordo com o regulamento de 2025, explorando opções diferentes de geometria para algumas partes da estrutura.

Em todos os modelos testados foram levados em consideração os critérios de falha da competição de escoamento e deslocamento máximo, em adição de um coeficiente de segurança de 1,5 para as tensões admissíveis.

Usando o aprendizado adquirido através da análise dos resultados das simulações e reforços em pontos estratégicos foram projetados modelos atendendo aos requisitos de projeto, passando por reduções de peso nas áreas menos solicitadas e escolhido ao final o modelo mais leve.

O modelo final passou por uma nova mudança adequando os tamanhos de tubos usados para tamanhos comerciais de fornecedores de aços tubulares.

Foram encontrados obstáculos com a utilização de dois softwares diferentes. Exportar diversos arquivos de desenho entre o Autodesk Inventor e o Ansys exigiu a

compreensão por tentativa e erro de quais funções de desenho e simulação não são compatíveis entre os programas, como funções automáticas de desenho de arcos ou a utilização de parametrização para tamanho de tubos e dimensões das retas de base para os tubos, criando a necessidade de alterar manualmente cada desenho no Inventor e tamanho de tubos manualmente no Ansys.

As análises indicaram que é possível garantir os níveis mínimos de segurança exigidos pelo regulamento sem a necessidade de superdimensionamento dos tubos, permitindo significativa redução de peso. O modelo final, resultado da iteração entre requisitos normativos, critérios de segurança e viabilidade prática de fabricação, demonstrou-se viável em termos estruturais e construtivos para equipes iniciantes.

Além de cumprir os objetivos propostos, o trabalho contribui para o entendimento do comportamento estrutural de chassis tubulares e oferece um caminho metodológico replicável para outras equipes em estágios iniciais de desenvolvimento.

6 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Durante a execução deste projeto, algumas simplificações foram adotadas para viabilizar o desenvolvimento dentro dos prazos e recursos disponíveis. Em vista disso, são sugeridas as seguintes propostas para trabalhos futuros, com o objetivo de aprimorar a qualidade das análises e ampliar a aplicabilidade dos resultados obtidos:

Aplicação de elementos de maior ordem (2D ou 3D): A utilização do *Beam Tool* com elementos lineares foi adequada para uma primeira aproximação dos esforços e tensões atuantes no chassi. No entanto, este tipo de modelagem possui limitações em relação à representação precisa de efeitos localizados, como acúmulo de tensões em regiões com múltiplos nós ou em zonas de contato. Trabalhos futuros podem aplicar elementos de casca (*shell*) ou elementos sólidos (*solid*) para capturar com maior fidelidade o comportamento estrutural, permitindo também uma comparação entre os resultados obtidos com diferentes ordens de elementos.

Consideração das soldas na análise estrutural: As regiões de solda não foram explicitamente modeladas neste projeto, assumindo-se rigidez total nas conexões entre tubos. Análises mais avançadas podem incluir a modelagem de soldas como elementos de ligação com propriedades mecânicas específicas, ou ainda por zonas de transição com elementos dedicados, o que pode influenciar significativamente na distribuição de tensões e nos fatores de segurança das conexões.

Execução completa do projeto em ambiente unificado: O fluxo de trabalho atual envolveu o uso de dois diferentes softwares (CAD e CAE), demandando conversões de arquivos e adaptações manuais que podem introduzir erros ou limitações na integração dos dados. Propõe-se a execução do projeto completo — desde o desenho geométrico até a simulação estrutural — em um único ambiente integrado, como o próprio Ansys ou similares, com o objetivo de otimizar a compatibilidade de dados, reduzir etapas intermediárias e explorar recursos adicionais disponíveis na mesma plataforma.

Análise de rigidez torcional do chassi: A análise da resistência ao capotamento visa a segurança do veículo, mas deixa de avaliar fatores importantes ao desempenho dinâmico, como a rigidez torcional do chassi. Trabalhos futuros podem incluir a aplicação de torques nos pontos de fixação da suspensão e

quantificação da deformação angular, permitindo a comparação entre diferentes configurações de chassi e sua influência na dirigibilidade e estabilidade do veículo.

Otimização estrutural: ter acesso a uma função, método ou algoritmo capazes de parametrizar tamanhos de entidades como retas, curvas, raio e espessura de parede de tubos, tamanho de elementos de malha, entre outros, pode facilitar o processo iterativo de correções e geração de dados para descobrimento e compreensão de problemas, além de garantir maior confiança de que os resultados alcançados são de fato os melhores possíveis para o projeto.

Essas propostas visam fornecer bases para estudos mais aprofundados e auxiliar no desenvolvimento de projetos mais realistas e otimizados, aproximando as simulações computacionais das condições reais de operação do veículo.

REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 7. ed.
- ANDERSON, Leigh. Formula Student Germany 2019 – the Most Advanced Student Competition in the World! **SIEMENS**, 2019. ISSN 3. Disponível em: <<https://blogs.sw.siemens.com/academic/formula-student-germany-the-most-advanced-student-competition-in-the-world/#author-bio>>. Acesso em: 11 Abril 2025.
- ANSYS. Ansys. **Ansys Student - Free Software Download**, 2025. Disponível em: <<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>>. Acesso em: Março 2025.
- ANSYS. Mechanical User's Guide. **Beam Tool**, 2025. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/wb_sim/ds_Beam_Tool.html%23ds_Beam_Tool>. Acesso em: Maio 2025.
- BEER, Ferdinand P. et al. **Mecânica dos Materiais**. 7. ed.
- CANUT, Felipe A. ANÁLISE ESTRUTURAL DO CHASSI DE UM VEÍCULO FÓRMULA SAE PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, Brasília, 2014.
- HIBBELER, Russell C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed.
- KHAN, Rizwan. FSAE car. **GrabCAD**, 2014. Disponível em: <<https://grabcad.com/library/fsae-car-2>>. Acesso em: Dezembro 2024.
- LUZ, Gelson. Ensaio de Tração. **Gelson Luz Blog Materiais**, 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/ensaio-de-tracao.html#google_vignette>. Acesso em: Abril 2025.
- MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed.
- MATUSKO. 2007 Honda CBR600RR. **GrabCAD**, 2013. Disponível em: <<https://grabcad.com/library/2007-honda-cbr600rr-1>>. Acesso em: Março 2025.
- MIURA, Jonathan S. Análise da Rigidez Estrutural de um Fórmula SAE, São Paulo, 2017.
- SAE INTERNATIONAL. FSAE Online. **2017-18 Formula SAE Rules**, 2016. Disponível em: <<https://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20fsae%20rules%209.2.16a.pdf>>. Acesso em: Novembro 2024.
- SAE INTERNATIONAL. FSAE Online. **Formula SAE Rules 2025**, EUA, 2024. Disponível em: <<https://www.fsaeonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=379e4a8a-80a2-4a74-87c2-6f2de4212270>>. Acesso em: 11 Novembro 2024.
- SHIGLEY, Joseph E. ; MISCHKE, Charles R. ; BUDYNAS, Richard G.. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed.
- SP AÇOS. Tubo de aço redondo. **SP Aços**. Disponível em: <<https://www.sp-acos.com/produtos/tubo-redondo/>>. Acesso em: Janeiro 2025.
- TILLEY, Alvin R.; HENRY DREYFUSS ASSOCIATES. **The Measure of Man and Woman - Human Factors in Design**.
- TUBO & AÇO. Tubo redondo de aço. **Tubo & Aço**. Disponível em: <https://tuboeco.com.br/tubo-redondo-de-aco/?gad_source=1&gad_campaignid=22035741018&gbraid=0AAAAA98i_D2toIhOErviGqaHRxvRpzvFV&gclid=EAlaIqobChMI-K2H_ea3jQMVAUFIAB3iihhCEAAYASAAEgJJ8_D_BwE>. Acesso em: Janeiro 2025.

W&W SERVIÇOS TÉCNICOS E ENSAIOS INDUSTRIAIS. Ensaio de tração corpo de prova. **W&W Serviços Técnicos e Ensaios Industriais**. Disponível em: <<https://www.wwensaios.com.br/ensaio-tracao-corpo-prova>>. Acesso em: Abril 2025.

YAEGER, Skitter. Guide To 2025 FSAE Frame Rule Changes. **Design Judges**, 2024. Disponível em: <<https://www.designjudges.com/articles/guide-to-2025-fsae-frame-rule-changes>>. Acesso em: Janeiro 2025.