



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

Projeto de chassis para Formula Student

Bruno Fernandes Lopes

Leiria, *Setembro de 2016*



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

Projeto de chassis para Formula Student

Bruno Fernandes Lopes

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Doutor Fernando da Conceição Batista, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Setembro de 2016*

Agradecimentos

Quero agradecer ao meu orientador, o Doutor Fernando da Conceição Batista pela ajuda na realização deste trabalho e tempo despendido.

Agradeço também aos meus colegas e ex-colegas da equipa FSIPLeiria e ao *Formula Advisor* Nuno Pires, que desde 2013 me acolheram na equipa e me deram motivação e meios para desenvolver as minhas capacidades de engenharia, e sem os quais este projeto nunca teria surgido.

Resumo

Neste trabalho é relatado o processo de projeto de um chassi para um veículo de *Formula Student*.

Ao longo do relatório são abordados aspectos regulamentares, requisitos e objetivos técnicos, a interligação com os diversos sistemas do veículo, os aspectos relacionados com o projeto da estrutura, métodos de modelação para análise com recurso ao método dos elementos finitos, e por fim a análise dos esforços aplicados ao chassi e a validação do mesmo.

Palavras-chave:

Formula Student, Chassis, Método dos elementos finitos, Soldadura, Estrutura tubular

Abstract

This project report refers to the design process of a chassis for a Formula Student Racecar.

Throughout the report the following topics are covered: restrictions imposed by rules and regulations, technical requisites and targets set by the team, integration with other systems in the vehicle, structure design, modeling methods for finite element analysis, determination of load cases applied to the chassis and validation of the structure.

Keywords:

Formula Student, Chassis, Finite Elements Method, Weld, Tubular spaceframe

Lista de figuras

Figura 2.1 - Membros estruturais definidos pelo regulamento FSAE	4
Figura 2.2 - Template representativo do piloto segundo o regulamento FSAE [1]	6
Figura 2.3 - Dimensões estipuladas pelo regulamento para proteção do piloto [1]	6
Figura 2.4 - Template da entrada para o habitáculo (à esquerda) e template da secção interna do habitáculo (à direita) [1]	7
Figura 3.1 - Posicionamento do main hoop relativo ao motor e suspensão	10
Figura 3.2 - Posicionamento do front hoop, front bulkhead e estrutura de impacto lateral	10
Figura 3.3 - Definição das larguras necessárias ao longo do chassis	11
Figura 3.4 - Posicionamento dos restantes frame members obrigatórios por regulamento	12
Figura 3.5 – Estrutura tubular do chassis	13
Figura 3.6 - Definição da espessura dos frame members	14
Figura 3.7 - Apoio de suspensão	15
Figura 3.8 - Ferramentas auxiliares para montagem de apoios de suspensão	15
Figura 3.9 - Apoio de amortecedor dianteiro	16
Figura 3.10 - Apoio de rocker dianteiro	16
Figura 3.11 - Apoio de rocker traseiro	17
Figura 3.12 - Apoio de amortecedor traseiro	17
Figura 3.13 - Insertos para apoios de rocker e amortecedor	18
Figura 3.14 - Posicionamento de apoios de rocker e amortecedor traseiro	18
Figura 3.15 - Posicionamento dos apoios de rocker e amortecedor dianteiro	19
Figura 3.16 - Reforços em chapa montados no chassis	19
Figura 3.17 – Dimensões dos reforços em chapa	20
Figura 3.18 - Posicionamento dos apoios de motor e diferencial	20
Figura 3.19 - Posicionamento dos apoios dos cintos	21
Figura 3.20 - Posicionamento das calhas e apoios para caixa de direção e pedaleira	21
Figura 3.21 - Posicionamento dos apoios para os painéis que cobrem o fundo do chassis	22
Figura 3.22 - Posicionamento dos apoios das carenagens	22
Figura 4.1 – Geometria do provete utilizado	23

Figura 4.2 - Diagrama de corpo livre do problema.....	24
Figura 4.3 - Zona de refinamento da malha utilizada	25
Figura 4.4 - Diagrama de corpo livre para o caso com simetria.....	25
Figura 4.5 - Tensão máxima em função do tamanho de elemento para o provete base e o provete com simetria	26
Figura 4.6 - Distribuição das tensões para o provete base e o provete com simetria para o tamanho de elemento 0,0015 m.....	26
Figura 4.7 - Número de elementos em função do tamanho de elemento para o provete base e o provete com simetria	27
Figura 4.8 - Tensão máxima em função do número de elementos para o método dos membros estruturais em contacto	28
Figura 4.9 - Distribuição de tensões para o método dos elementos estruturais em contacto	28
Figura 4.10 - Refinamento de malha utilizado para o provete com chanfro	30
Figura 4.11 - Tensão máxima em função do número de elementos para o provete com chanfro.....	30
Figura 4.12 - Distribuição de tensões no provete com chanfro	31
Figura 4.13 - Geometria da soldadura para os diferentes raios testados.....	31
Figura 4.14 - Tensão máxima em função do número de elementos para os diferentes raios de concordância testados	32
Figura 4.15 - Geometria importada para o Design Modeler.....	33
Figura 4.16 - Ferramenta Mid Surface.....	34
Figura 4.17 - Ferramenta Weld Tool	34
Figura 4.18 - Geometria produzida no editor de geometria do Ansys Workbench (à esquerda) e malha gerada (à direita)	35
Figura 4.19 - Tensão máxima em função do número de elementos e tamanho de elemento correspondente.....	35
Figura 4.20 - Distribuição de tensões no provete criado com o Ansys Weld Tool ...	36
Figura 4.21 - Comparação dos resultados obtidos para os diferentes métodos (tensão máxima em função do tamanho do elemento)	37
Figura 4.22 - Relação entre número de elementos e o tamanho de elemento para os vários métodos testados.....	38
Figura 5.1 - Eliminação de componentes para as análises.....	40
Figura 5.2 - Processo de criação da soldadura numa ligação com vários tubos	41

Figura 5.3 - Chassis completo após preparação da geometria	42
Figura 5.4 - Situação de carga para aferir a rigidez torsional para a carga aplicada na frente do chassis	43
Figura 5.5 - Situação de carga para aferir a rigidez torsional para a carga aplicada na traseira do chassis	43
Figura 5.6 - Deslocamento vertical para a carga aplicada na frente do chassis	44
Figura 5.7 - Deslocamento vertical para a carga aplicada na traseira do chassis.....	44
Figura 5.8 - Parâmetros geométricos para os cálculos.....	46
Figura 5.9 - Modelo simplificado do sistema de suspensão do veículo.....	48
Figura 5.10 - Situação de carga para obtenção das forças nos apoios da suspensão .	48
Figura 5.11 - Apoios considerados e pontos de aplicação das forças do lado esquerdo do chassis.....	50
Figura 5.12 - Distribuição das tensões resultantes dos esforços aplicados pela suspensão	50
Figura 5.13 - Imagens de pormenor de algumas intersecções ao longo da estrutura.	51
Figura 5.14 - Zona de tensão máxima.....	51

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Dimensões mínimas dos membros estruturais regulamentados [1].....	4
Tabela 2.2 - Espessura mínima dos tubos de aço sem necessidade de efetuar testes físicos [1].....	5
Tabela 2.3 - Espessura mínima dos tubos de aço com necessidade de efetuar testes físicos [1].....	5
Tabela 5.1 – Forças resultantes em cada roda.....	47
Tabela 5.2 - Força obtida nos apoios de suspensão	49

Lista de siglas

FSAE – Formula SAE (Society of Automotive Engineers)

IPL – Instituto politécnico de Leiria

AISI – American Iron and Steel Institute

Lista de símbolos

F – Força [N]

K_{θ} – Rigidez torsional [N.m/grau]

T – Binário [N.m]

θ – Deslocamento angular [grau]

b_f - Braço para o cálculo do binário torsional na frente do chassis [m]

b_t - Braço para o cálculo do binário torsional na traseira do chassis [m]

y_f - Deslocamento vertical na frente do chassis [m]

y_t - Deslocamento vertical na traseira do veículo [m]

$K_{\theta f}$ - Rigidez torsional na frente do chassis [N.m/grau]

$K_{\theta t}$ – Rigidez torsional na traseira do chassis [N.m/grau]

F_{ef} – Força em situação estática no eixo frontal [N]

F_{et} – Força em situação estática no eixo traseiro [N]

F_t – Força longitudinal provocada pela travagem (transferência de peso) [N]

F_l – Força lateral (transferência de peso) [N]

F_x – Força lateral na roda [N]

F_y – Força vertical na roda [N]

F_z – Força longitudinal na roda [N]

F_{xfe} – Força lateral na roda frontal esquerda [N]

F_{xte} – Força lateral na roda traseira esquerda [N]

F_{xfd} – Força lateral na roda frontal direita [N]

F_{xtd} – Força lateral na roda traseira direita [N]

F_{yfe} – Força vertical na roda frontal esquerda [N]

F_{yte} – Força vertical na roda traseira esquerda [N]

F_{yfd} – Força vertical na roda frontal direita [N]

F_{ytd} – Força vertical na roda traseira direita [N]

F_{zfe} – Força longitudinal na roda frontal esquerda [N]

F_{zte} – Força longitudinal na roda traseira esquerda [N]

F_{zfd} – Força longitudinal na roda frontal direita [N]

F_{ztd} – Força longitudinal na roda traseira direita [N]

M – Massa estimada do veículo com piloto [kg]

g – Aceleração gravítica [m/s^2]

c_{at} – Fator de aceleração em travagem

c_{ac} – Fator de aceleração em curva

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
ÍNDICE	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
2. RESTRIÇÕES DE PROJETO	3
2.1. Restrições regulamentares	3
2.2. Condicionantes da Equipa	7
3. PROJETO DA ESTRUTURA	9
3.1. Estrutura tubular do chassis	9
3.2. Apoios para componentes montados no chassis	14
4. ESCOLHA DO MÉTODO DE MODELAÇÃO PARA A ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	23
4.1. Provetes simples	27
4.2. Provetes com chanfro	29
4.3. Provetes com chanfro boleado	31
4.4. Ansys Weld Tool	32
4.5. Comparação dos métodos testados	36
5. DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DOS ESFORÇOS NA ESTRUTURA	39
5.1. Preparação da geometria	39
5.2. Determinação da rigidez torsional	42
5.3. Esforços transmitidos pela suspensão do veículo	45
6. CONCLUSÃO	53
BIBLIOGRAFIA	55
ANEXO I – EXCERTO DO REGULAMENTO FSAE 2016 TRADUZIDO	57

1. Introdução

Este trabalho tem como objetivo o projeto de um chassis para o veículo em desenvolvimento pela equipa FSIPLeia, a equipa de *Formula Student* do Instituto Politécnico de Leiria (IPL), para as competições de 2016 em diante. Para tal é necessário que o chassis esteja adaptado à realidade da competição e da equipa em questão.

A competição *Formula Student* destina-se a estudantes universitários de todo o mundo e está presente em vários países sob diferentes nomes, a primeira a surgir foi a *Formula SAE* nos Estados Unidos da América crescendo depois para o Reino Unido (*Formula Student*), Austrália (*FSAE Australasia*), Japão (*Student Formula Japan*), Brasil (*FSAE Brasil*), Alemanha (*Formula Student Germany*), entre outros. Nesta competição as equipas de cada universidade, constituídas exclusivamente por estudantes, são desafiadas a projetar um veículo monolugar que será avaliado não só pelo desempenho em provas dinâmicas mas também pela inovação, qualidade de construção, custo de fabrico, qualidade de projeto, plano de negócios para a comercialização do protótipo, etc.

A equipa FSIPLeia, da qual faço parte desde 2013, foi fundada em finais de 2012 por um grupo de estudantes do curso de Engenharia Automóvel, acolhendo posteriormente estudantes de vários cursos e escolas do IPL. A equipa teve a primeira participação em 2014 no circuito de *Silverstone* em classe 2 (classe de projeto), tendo também competido em 2015 em classe 1 na *Formula Student UK* em *Silverstone* e na classe de veículos com motor de combustão interna na *Formula Student Germany* em *Hockenheim*. Em 2016 a equipa voltou a participar em classe 2 na *Formula Student UK*, já com o projeto do chassis apresentado neste trabalho.

No capítulo 2 é feito um levantamento das restrições regulamentares que condicionam o projeto do chassis, bem como algumas condições impostas pela equipa.

No capítulo 3 explica-se o processo de projeto da estrutura, de uma forma abreviada, procurando explicar as razões que influenciaram o projeto final da estrutura.

No capítulo 4 abordam-se alguns métodos de modelação para analisar a estrutura no *software* de elementos finitos selecionado, as simulações efetuadas neste capítulo têm por base provetes computacionais.

No capítulo 5 são apresentadas algumas simulações efetuadas no chassis, incluindo alguns cálculos para determinar condições de carga a aplicar à estrutura com base nos esforços a que esta está sujeita em condições de funcionamento.

Por fim, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões tiradas a partir dos resultados obtidos nos capítulos 3 a 5 e é feito um balanço do projeto.

Deste trabalho resultou um chassis constituído por uma estrutura tubular em aço, e um conjunto de apoios para o sistema de suspensão do veículo, motor, diferencial, cintos de segurança, e outros componentes já desenvolvidos pela equipa, proporcionando assim uma base para o projeto do novo veículo que deverá ajudar a equipa a agilizar o projeto e construção do mesmo.

2. Restrições de projeto

Neste capítulo são abordados alguns aspetos regulamentares a considerar no projeto do chassis, bem como as restrições e objetivos impostos pela equipa ou definidos em conjunto com a mesma.

2.1. Restrições regulamentares

O projeto de veículos de *Formula Student* rege-se primariamente pelo regulamento da *FSAE* [1] em vigor, juntamente com os regulamentos específicos de cada evento.

Neste trabalho vamos considerar os regulamentos da *Formula Student UK 2016* e da *Formula Student Germany Combustion 2016*, além do regulamento *FSAE 2016*.

Nesta secção vão ser referidos alguns aspetos importantes destes regulamentos, encontrando-se no Anexo I uma tradução das principais regras a considerar.

Quanto à geometria do chassis existe um conjunto de membros estruturais obrigatórios, entre eles:

-*Main hoop* – arco de segurança localizado junto ao tronco do piloto para proteção em caso de capotamento.

-*Front hoop* – arco de segurança localizado junto às pernas do piloto e ao volante para proteção em caso de capotamento.

-*Roll hoop bracing* – tubo ou conjunto de tubos que apoia o *front hoop* ou *main hoop*.

-*Roll hoop bracing supports* – tubo ou conjunto de tubos que liga a zona inferior do *roll hoop bracing* ao *roll hoop*.

-*Front bulkhead* – estrutura localizada na parte mais frontal do chassis, para lá dos pés do piloto ou qualquer outro componente não deformável.

-Zona de impacto lateral – zona compreendida entre o solo e 350 mm acima deste, entre o *front hoop* e o *main hoop*, para proteção do piloto contra impactos laterais.

- *Jacking point* – ponto de apoio para utilização de um “macaco rápido”.

- *Shoulder harness mounting bar* e *driver harness mounting points* – tubos onde são presos os cintos de segurança.

Na figura 2.1 é apresentado um chassi com os membros estruturais referidos anteriormente assinalados.

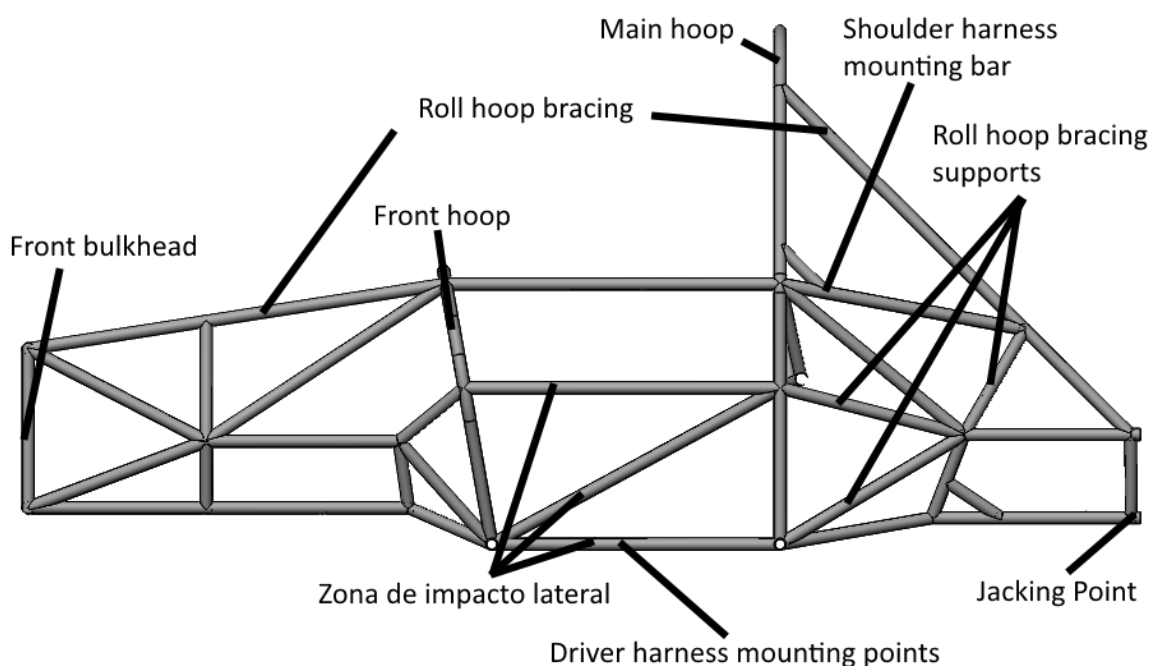


Figura 2.1 - Membros estruturais definidos pelo regulamento FSAE

Estes elementos estruturais obedecem a certas regras quanto ao seu posicionamento, material a partir do qual são construídos e geometria. Na tabela 2.1 é apresentado o diâmetro externo mínimo e a espessura mínima obrigatória para estes elementos quando construídos em aço.

Tabela 2.1 - Dimensões mínimas dos membros estruturais regulamentados [1]

Frame Member	Dimensão exterior x Espessura da parede
Main & Front Hoops, Shoulder Harness Mounting Bar	1.0 inch (25.4 mm) x 0.095 inch (2.4 mm) redondo ou 25.0 mm x 2.50 mm redondo
Side Impact Structure, Front Bulkhead, Roll Hoop Bracing, Driver's Restraint Harness Attachment	1.0 inch (25.4 mm) x 0.065 inch (1.65 mm) redondo ou 25.0 mm x 1.75 mm redondo ou 25.4 mm x 1.60 mm redondo ou 1.00 inch x 1.00 inch x 0.047 inch quadrado
Front Bulkhead Support, Main Hoop Bracing Supports	1.0 inch (25.4 mm) x 0.047 inch (1.20 mm) redondo ou 25.0 mm x 1.5 mm redondo ou 26.0 mm x 1.2 mm redondo

Em alternativa, as equipas que submetam documentação adicional podem optar por utilizar as espessuras indicadas nas tabelas 2.2 e 2.3, utilizando tubos de maior diâmetro,

demonstrando por cálculos ou testes físicos a equivalência em termos de resistência mecânica ao caso anterior.

Tabela 2.2 - Espessura mínima dos tubos de aço sem necessidade de efetuar testes físicos [1]

Frame Member	Espessura da parede
Tubo de aço para : Roll Hoops, Shoulder Harness Mounting Bar	2.0 mm (0.079 inch)
Tubo de aço para : Roll Hoop Bracing, Roll Hoop Bracing Supports, Side Impact Structure, Front Bulkhead, Front Bulkhead Support, Driver's Harness Attachment	1.2 mm (0.047 inch)

Tabela 2.3 - Espessura mínima dos tubos de aço com necessidade de efetuar testes físicos [1]

Frame Member	Espessura da parede
Tubo de aço para : Roll Hoops, Shoulder Harness Mounting Bar	1.6 mm (0.065 inch)
Tubo de aço para : Roll Hoop Bracing, Roll Hoop Bracing Supports, Side Impact Structure, Front Bulkhead, Front Bulkhead Support, Driver's Harness Attachment	0.9 mm (0.035 inch)

A utilização de materiais além do aço é permitida, no entanto é necessária documentação adicional incluindo cálculos que demonstrem equivalência ao nível da resistência mecânica dos elementos estruturais utilizados e da estrutura completa, propriedades mecânicas dos materiais utilizados (incluindo materiais de adição utilizados na soldadura) e alterações devido aos processos utilizados e eventuais tratamentos (térmicos, químicos, etc.).

Além dos aspectos relacionados com a resistência da estrutura, os regulamentos incidem bastante na segurança e conforto do piloto. A maioria dos requisitos quanto ao posicionamento dos elementos estruturais obrigatórios visa proteger o piloto em caso de acidente. Na figura 2.2 é apresentado o *template* definido pelo regulamento para representar o piloto.

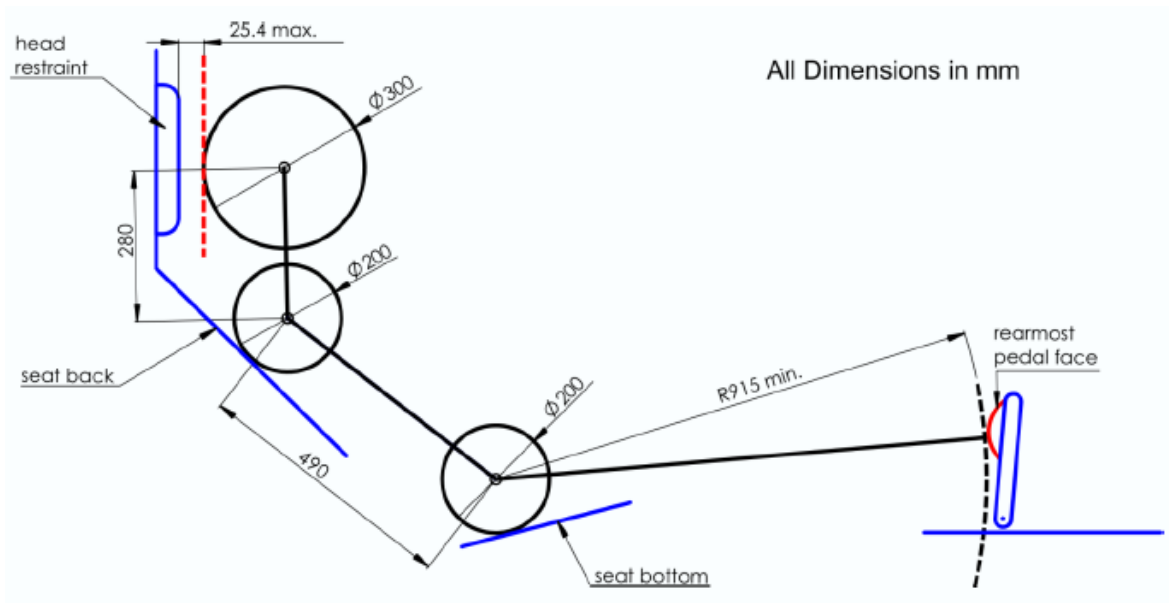


Figura 2.2 - *Template* representativo do piloto segundo o regulamento FSAE [1]

Embora o *template* seja a referência, as dimensões e distâncias estipuladas pelo regulamento em relação ao *template* devem ser respeitadas para qualquer piloto durante a competição, e é reforçado que o chassi deve ser desenhado para acomodar pilotos desde o 95º percentil de estatura masculino ao 5º percentil de estatura feminino.

Na figura 2.3 são apresentadas algumas das dimensões estipuladas pelo regulamento relacionadas com a proteção do piloto.

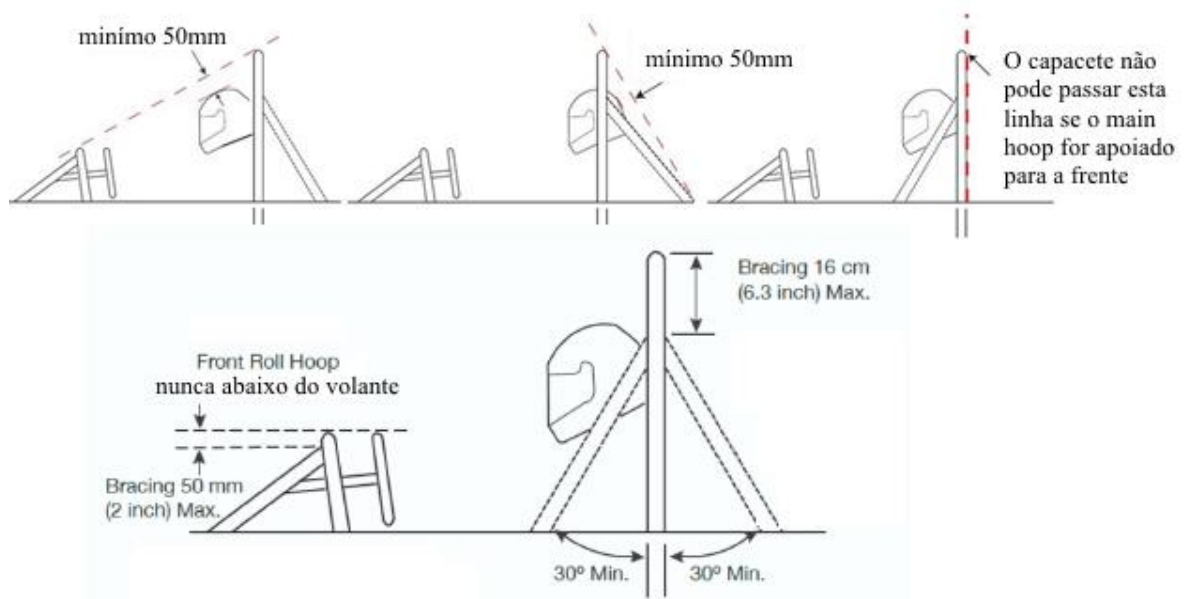


Figura 2.3 - Dimensões estipuladas pelo regulamento para proteção do piloto [1]

Além das dimensões estabelecidas em relação ao *template* do piloto, são também estabelecidos dois *templates* adicionais, um para a secção interna do habitáculo e outro para a entrada do habitáculo. Estes *templates* são apresentados na figura 2.4.

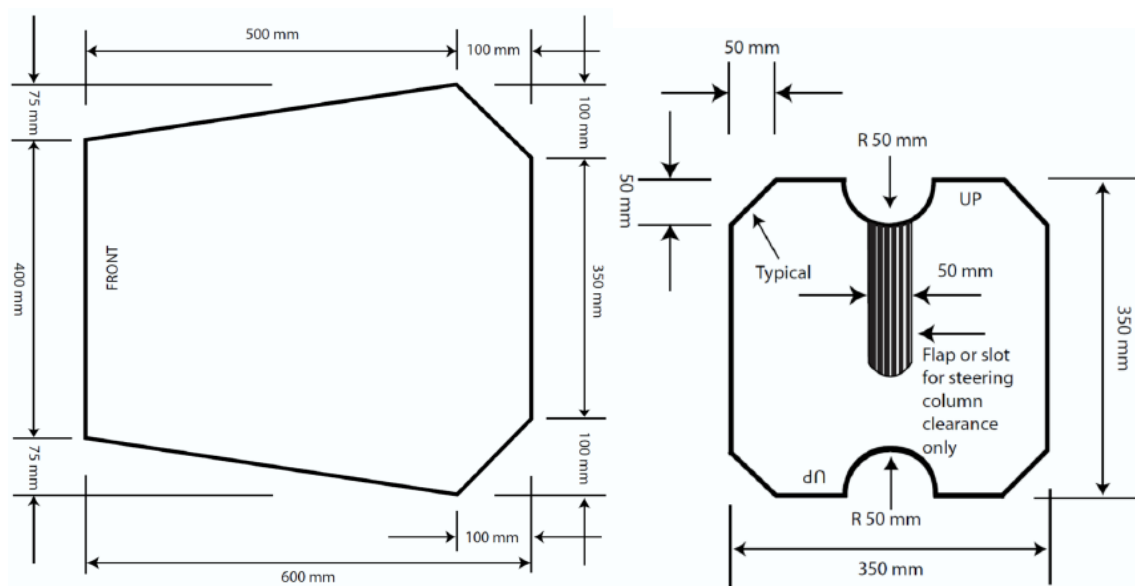


Figura 2.4 - *Template* da entrada para o habitáculo (à esquerda) e *template* da secção interna do habitáculo (à direita) [1]

2.2. Condicionantes da Equipa

Aos requisitos impostos pelos regulamentos, acrescem os requisitos impostos por parte da equipa. Estes requisitos prendem-se com o conceito geral do veículo, a capacidade de produção disponível por parte da equipa e das empresas que apoiam o projeto e a integração com os componentes e sistemas já desenvolvidos para o veículo.

Pretende-se que o chassis tenha um peso total que ronde os 40kg, acomode o conjunto motor, caixa de velocidades e diferencial já desenvolvido, bem como o sistema de suspensão, proporcionando a devida acessibilidade a estes sistemas para realizar afinações ou reparações nos mesmos de forma rápida e fácil.

No chassis devem estar incluídos todos os suportes para o motor, diferencial, sistema de suspensão, caixa de direção, pedaleira, carenagens, difusor, fundo plano, atenuador de impacto e *firewall*.

Os processos de fabrico e materiais utilizados devem-se enquadrar com a capacidade de produção da equipa, em conjunto com os patrocinadores, para que o chassis possa futuramente ser construído e utilizado pela equipa na competição.

Também de forma a facilitar a utilização futura do chassis, quando o regulamento permitir a escolha de um conjunto de regras em detrimento de outro, esta escolha deve ser debatida com a equipa de forma a seleccionar em conjunto aquela que mais favorece a mesma.

3. Projeto da estrutura

Neste capítulo pretende-se demonstrar o procedimento tomado para desenhar a estrutura, referindo os pontos de partida e a ordem pela qual se adicionaram os membros estruturais.

É importante referir que o projeto da estrutura foi um processo iterativo que necessitou de muito mais procedimentos e alterações que os referidos ao longo do capítulo, mas devido à complexidade envolvida e ao número de iterações realizadas não faz sentido descrever todo o processo.

Optou-se por isso por resumir o processo de forma a mencionar os aspetos mais importantes a ter em conta e seguir uma linha de pensamento lógica.

Em conjunto com a equipa decidiu-se que o chassis a conceber se deveria enquadrar na regra T3.4.1. (em alternativa às regras T3.5, T3.6 ou T3.7, ver Anexo I) pois esta alternativa requer menos documentação e um processo de aprovação do projeto mais célere. Outra decisão tomada em conjunto com a equipa foi a utilização de tubo de aço AISI 4130 para a construção do chassis, devido às parecerias entre a equipa e os patrocinadores.

3.1. Estrutura tubular do chassis

Para iniciar o projeto do chassis começou-se por posicionar o sistema de suspensão e o conjunto motor/diferencial, tendo o cuidado de alinhar o centro do diferencial com o centro das rodas traseiras. A parte mais baixa do cárter do motor foi posicionada a 50mm do chão, sendo essa medida a altura ao solo definida para o veículo em repouso.

De seguida escolheu-se a posição longitudinal do *main hoop*, de forma a ficar localizado junto aos apoios anteriores do motor. Na figura 3.1 é apresentada a localização destes componentes, bem como o sistema de eixos e algumas dimensões importantes.

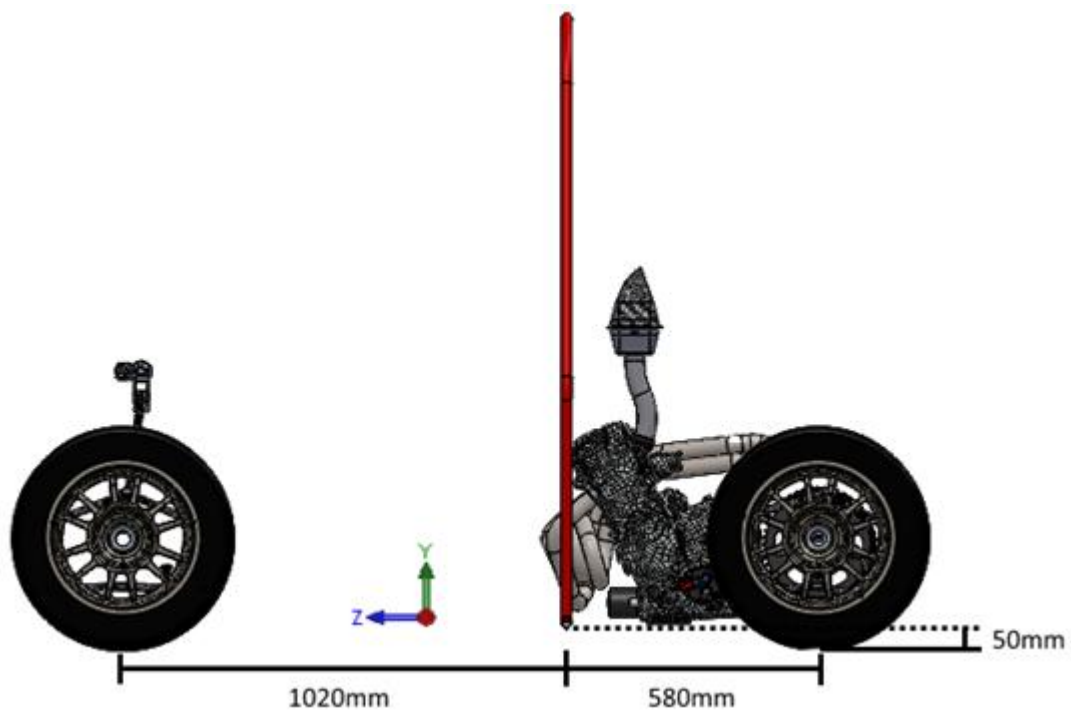


Figura 3.1 - Posicionamento do *main hoop* relativo ao motor e suspensão

De forma a posicionar longitudinalmente o *front hoop* e a *front bulkhead* adicionou-se à montagem um modelo anatómico do piloto. Escolhida a posição do *front hoop* adicionou-se também a zona de impacto lateral. A figura 3.2 ilustra o posicionamento do piloto, bem como a posição definida para o *front hoop*, *front bulkhead* e para a estrutura lateral de impacto.

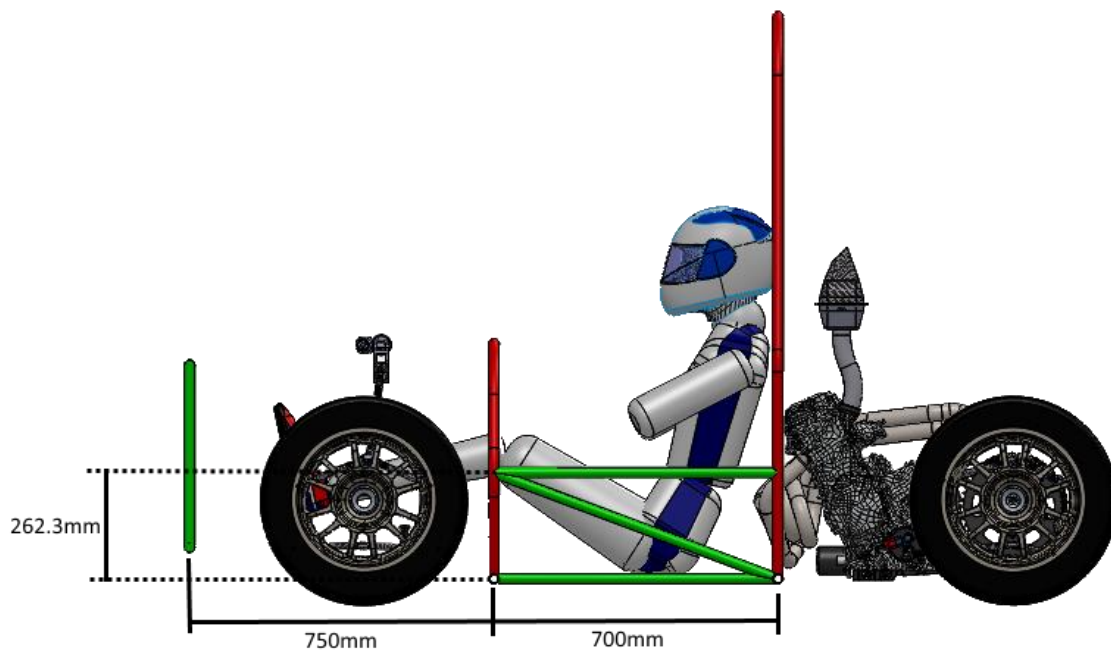


Figura 3.2 - Posicionamento do *front hoop*, *front bulkhead* e estrutura de impacto lateral

Seguidamente foram modelados dois volumes, impostos por regulamento FSAE [1] que definem as zonas que devem estar desimpedidas no interior do habitáculo e na entrada do mesmo, e foi posicionada a pedaleira. Com a adição destes componentes fizeram-se pequenos ajustes à posição longitudinal do *front hoop* e *front bulkhead* e começaram a definir-se larguras ao longo da estrutura. A largura do habitáculo foi aumentada para além dos mínimos regulamentares na zona posterior para permitir ao piloto mover os braços sem bater com os cotovelos na zona de impacto lateral e para proporcionar mais espaço atrás do banco para o posicionamento dos depósitos de combustível e óleo e para os módulos eletrónicos. Os componentes adicionados são ilustrados na figura 3.3, juntamente com algumas dimensões relevantes.

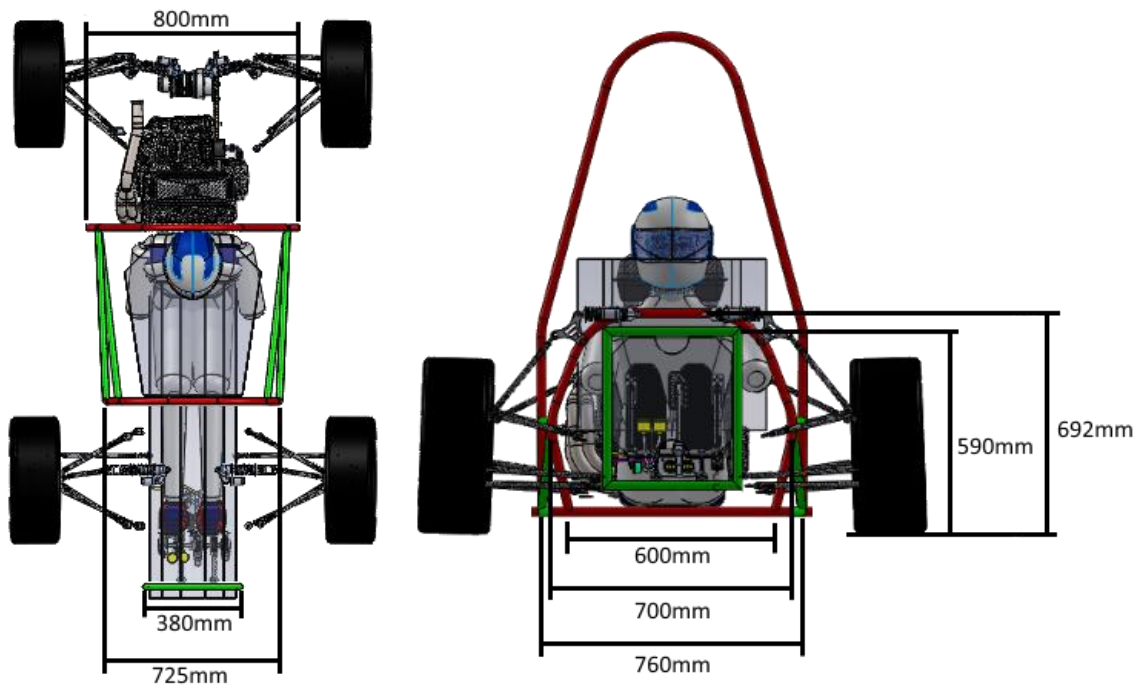


Figura 3.3 - Definição das larguras necessárias ao longo do chassis

De seguida adicionaram-se os restantes *frame members* obrigatórios por regulamento tentando utilizá-los para apoiar o sistema de suspensão. Na figura 3.4 encontram-se representados todos os *frame members* obrigatórios legendados de acordo com os regulamentos apresentados no capítulo 2.

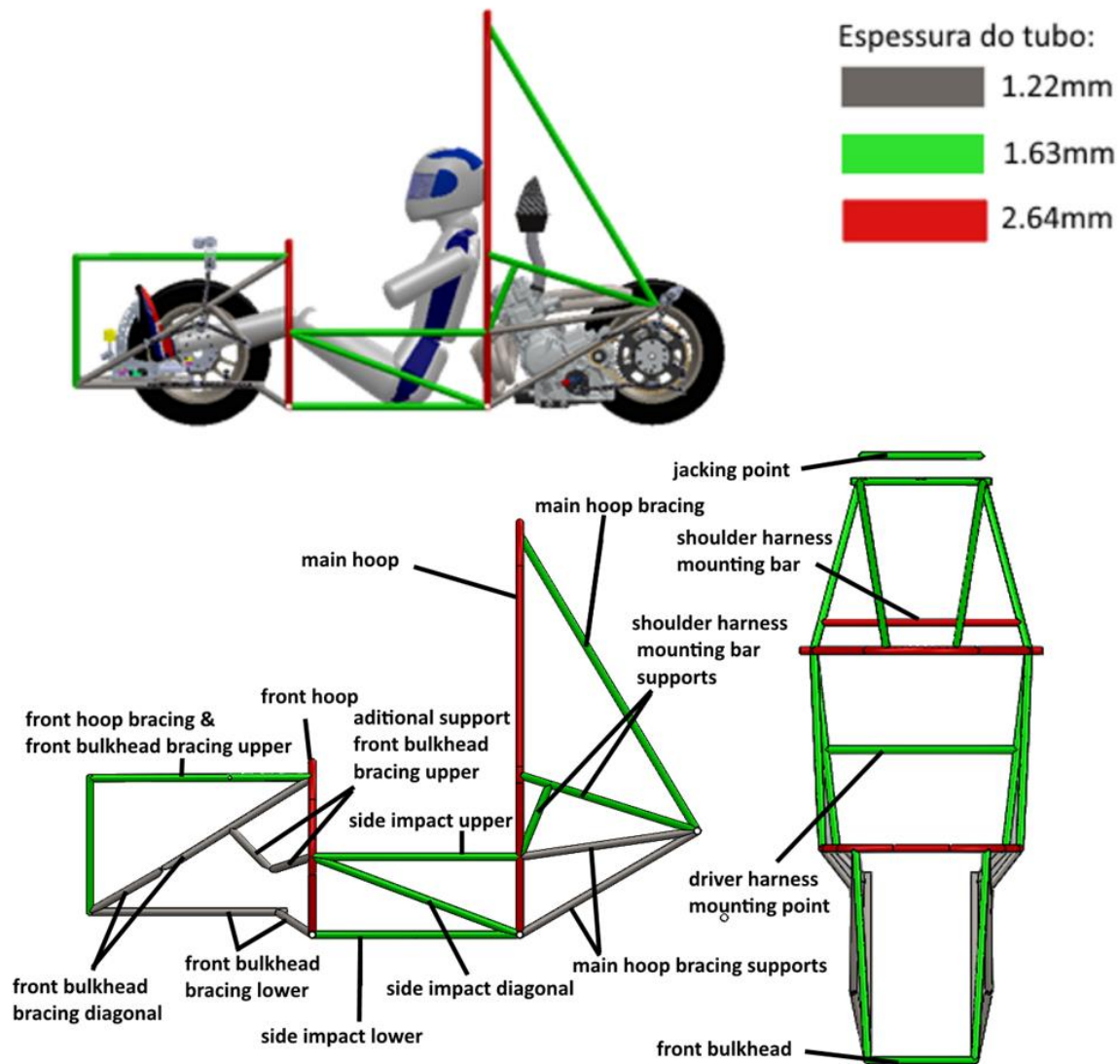


Figura 3.4 - Posicionamento dos restantes *frame members* obrigatórios por regulamento

O próximo passo tomado serviu para posicionar os restantes tubos que suportam o motor e diferencial e o sistema de suspensão, bem como os tubos necessários para triangular e reforçar devidamente a estrutura, tentando usar o mínimo de tubos possível. O projeto base do chassis resultante é apresentado na figura 3.5.

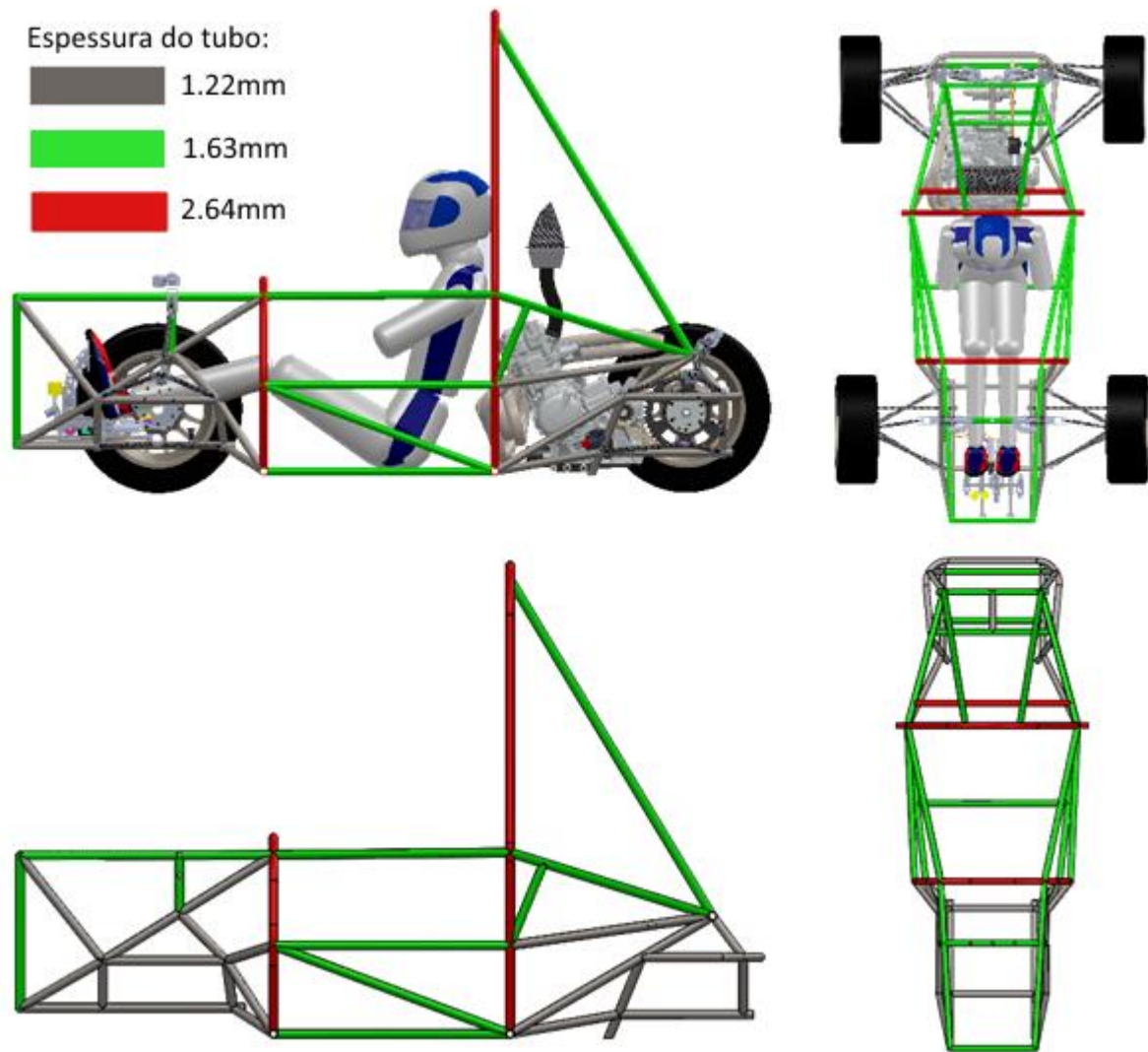


Figura 3.5 – Estrutura tubular do chassis

Depois de definida a posição de todos os *frame members* foi necessário selecionar a espessura a utilizar para cada um. Inicialmente utilizou-se a espessura mínima permitida para cada um, no entanto no decorrer do projeto identificou-se a necessidade de aumentar a espessura de alguns tubos onde seriam soldados insertos ou apoios em chapa com uma espessura considerável, para possibilitar uma soldadura conveniente. Na figura 3.6 assinalaram-se os casos em que a espessura foi aumentada em relao ao mínimo obrigatório.

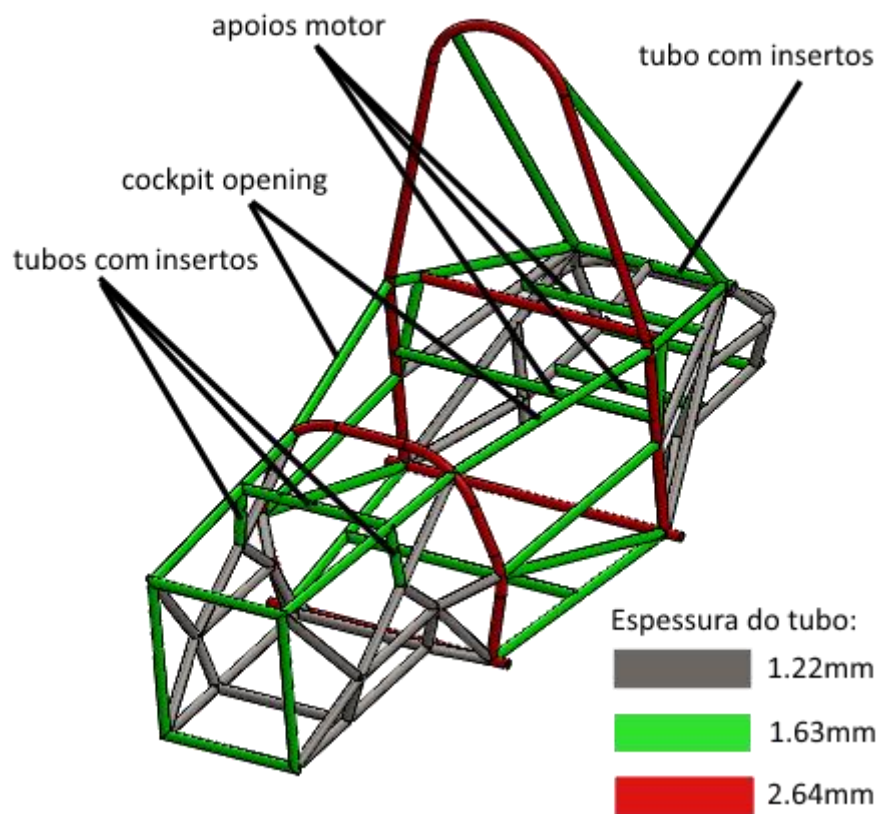


Figura 3.6 - Definição da espessura dos *frame members*

Finalizado este passo, deu-se por concluído o projeto da estrutura tubular.

3.2. Apoios para componentes montados no chassis

Finalizada a estrutura tubular começou-se a adicionar apoios para os vários componentes, começando pelos apoios de suspensão.

Para apoiar os triângulos de suspensão ao chassis optou-se por utilizar apoios em chapa de aço soldados aos tubos. Para facilitar o posicionamento dos mesmos durante o processo de construção do chassis desenharam-se também duas ferramentas auxiliares. Como exemplo, nas figuras 3.7 e 3.8 são representados um dos apoios, acoplado ao chassis e cotado com algumas dimensões relevantes, e as ferramentas auxiliares.

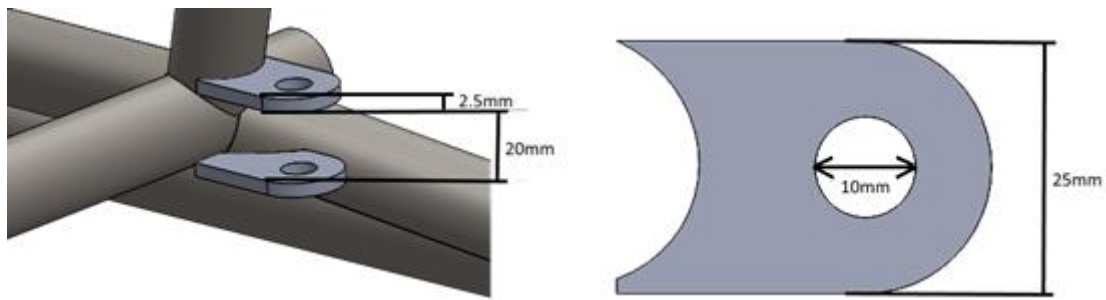


Figura 3.7 - Apoio de suspensão

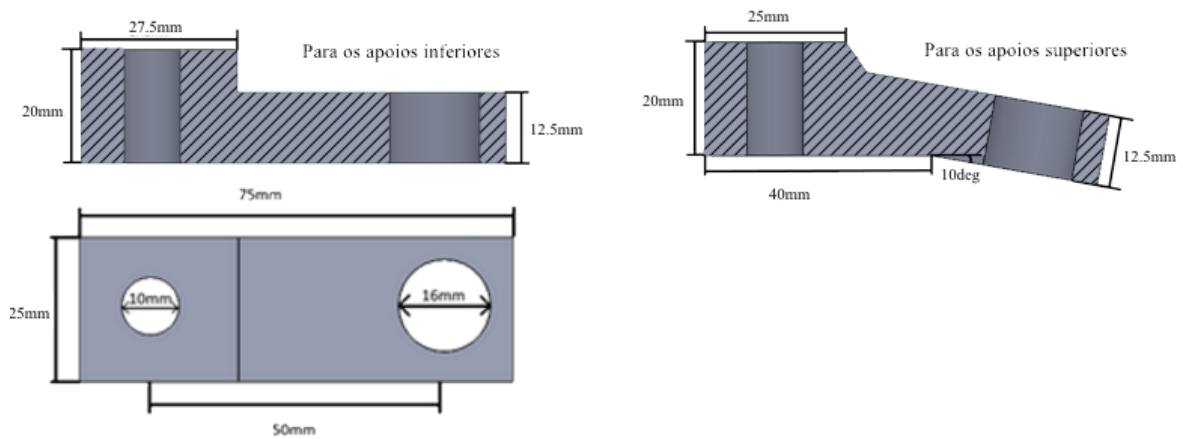


Figura 3.8 - Ferramentas auxiliares para montagem de apoios de suspensão

Para apoiar os *rockers* e amortecedores optou-se por utilizar uma peça maquinada em alumínio, aparafusada a dois insertos em aço soldados ao chassis. Esta solução embora aparente ser mais complexa facilita o posicionamento destes apoios durante a construção do chassis. Outra das razões para se optar por esta solução prende-se com a geometria destes componentes e a forma como estão posicionados, que dificulta a utilização de apoios em chapa. Os diferentes apoios e insertos criados são apresentados nas figuras 3.9 a 3.15, juntamente com algumas imagens que ilustram a forma como são montados.

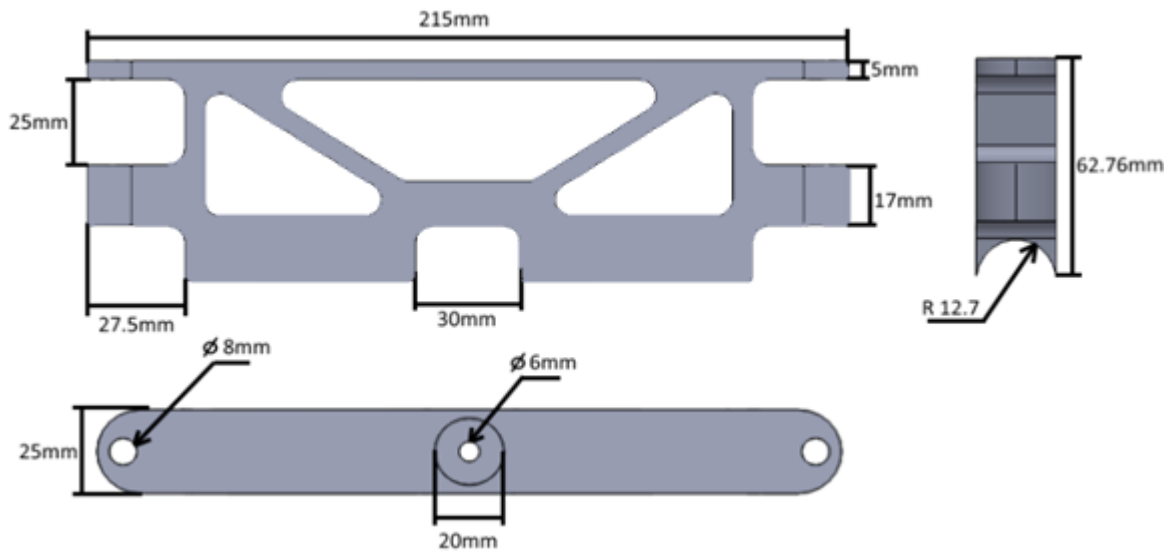


Figura 3.9 - Apoio de amortecedor dianteiro

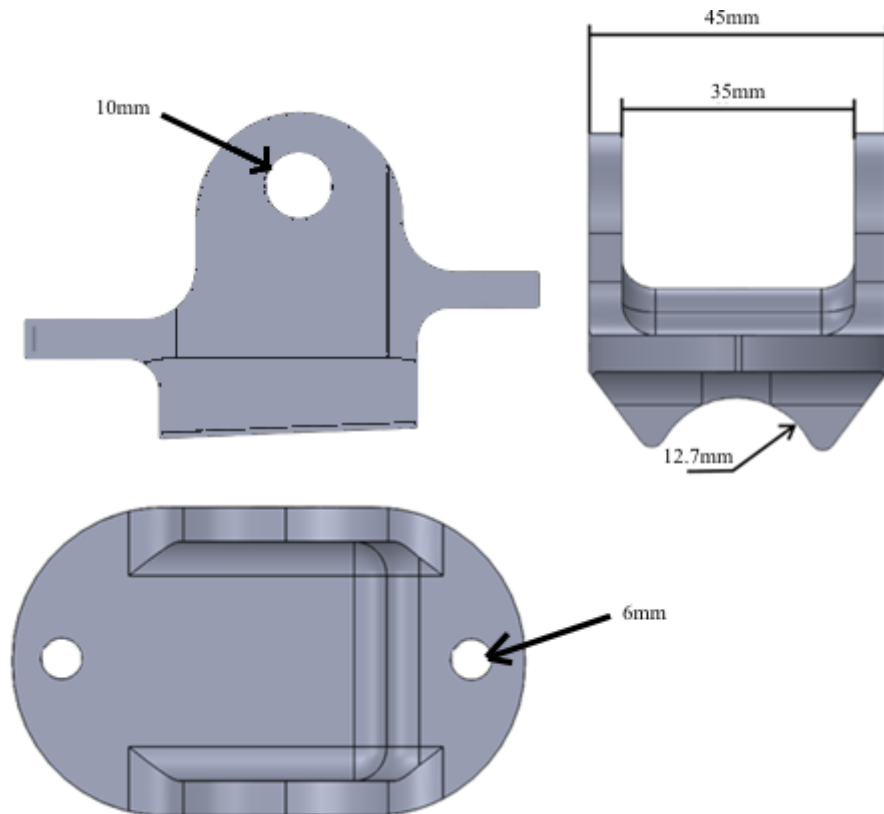


Figura 3.10 - Apoio de *rocker* dianteiro

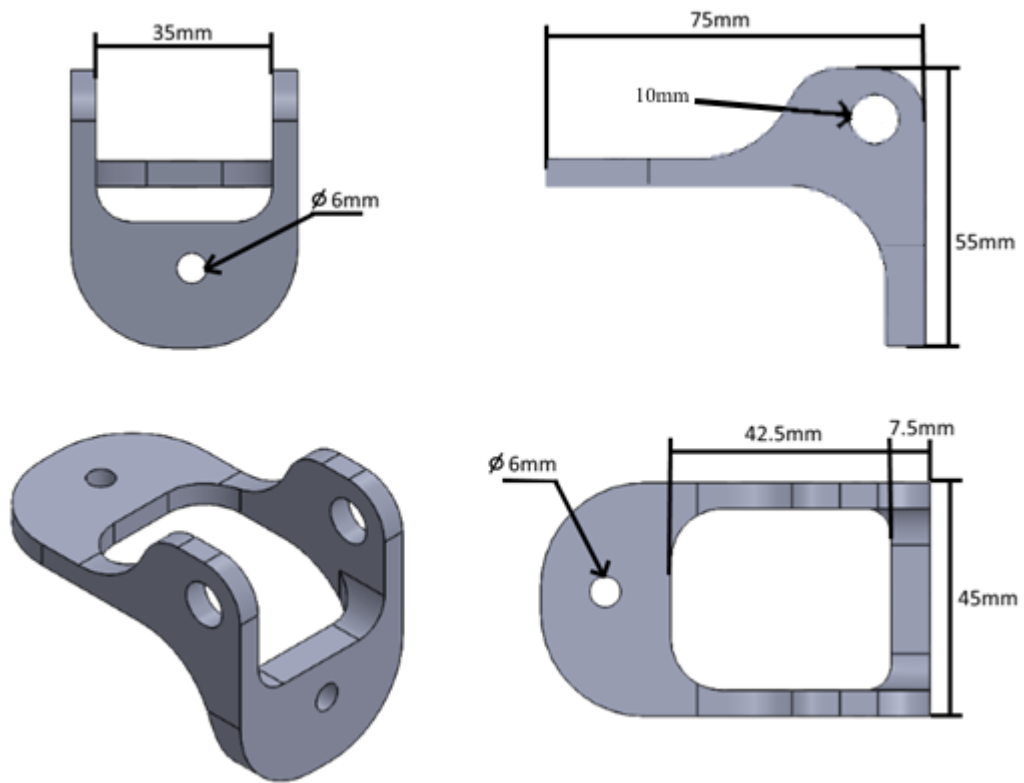


Figura 3.11 - Apoio de *rocker* traseiro

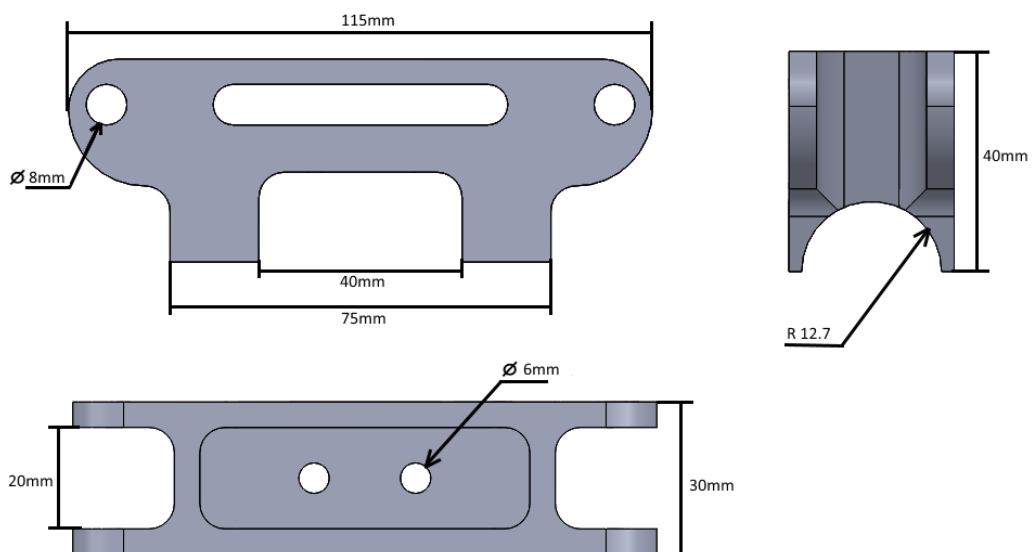


Figura 3.12 - Apoio de amortecedor traseiro

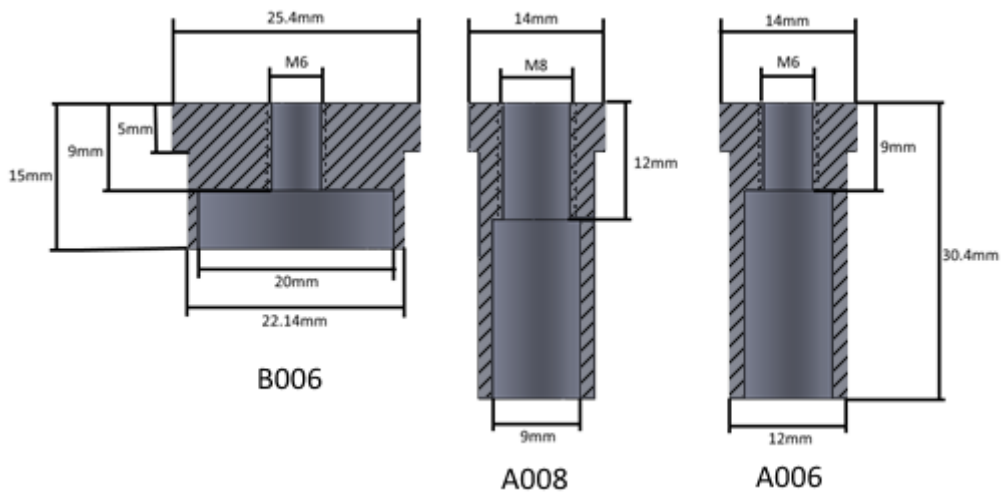


Figura 3.13 - Insetos para apoios de *rocker* e amortecedor

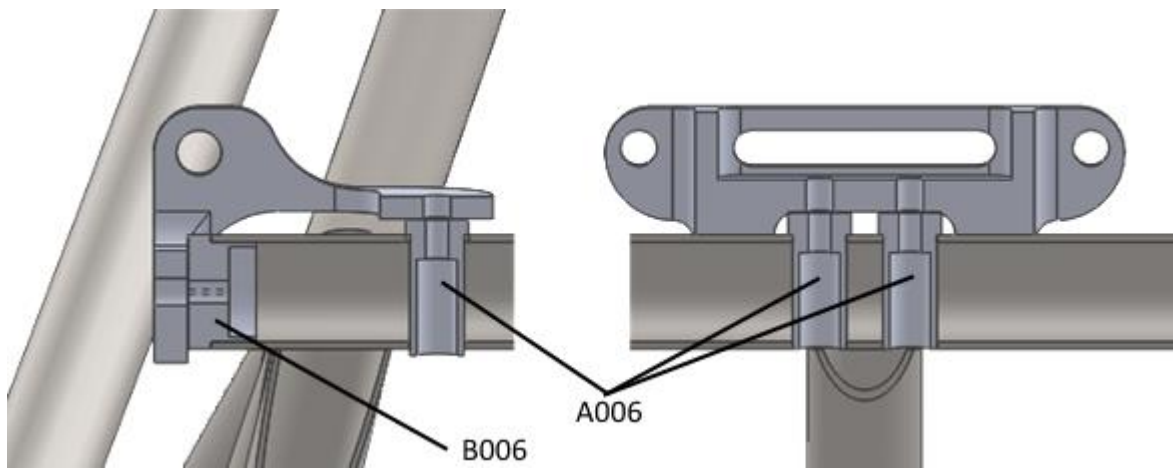


Figura 3.14 - Posicionamento de apoios de *rocker* e amortecedor traseiro

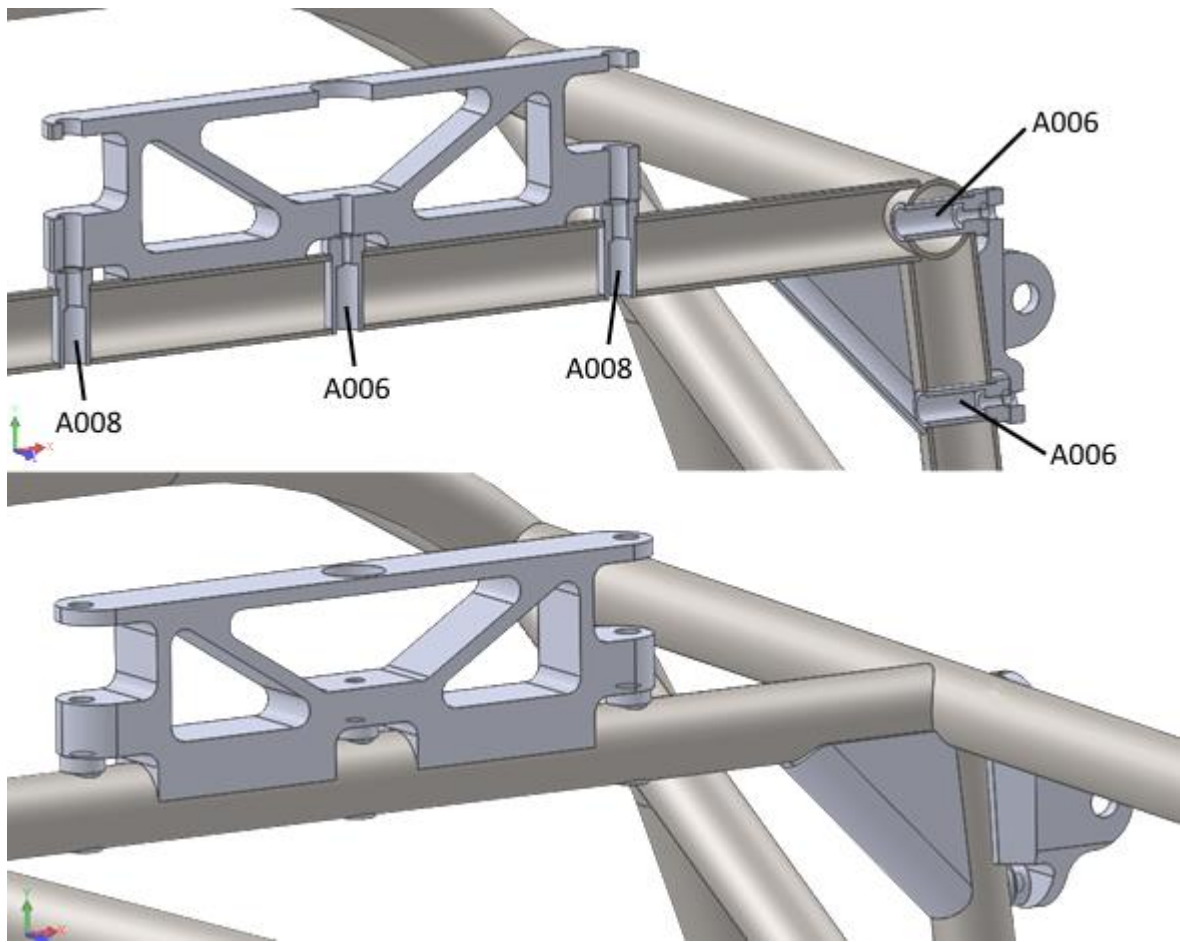


Figura 3.15 - Posicionamento dos apoios de *rocker* e amortecedor dianteiro

Finalizados os apoios de suspensão adicionaram-se alguns reforços em chapa à estrutura tubular junto aos apoios dos *rockers* da frente e *trackrod* traseira. Nas figuras 3.16 e 3.17 estão representados estes reforços em pormenor.

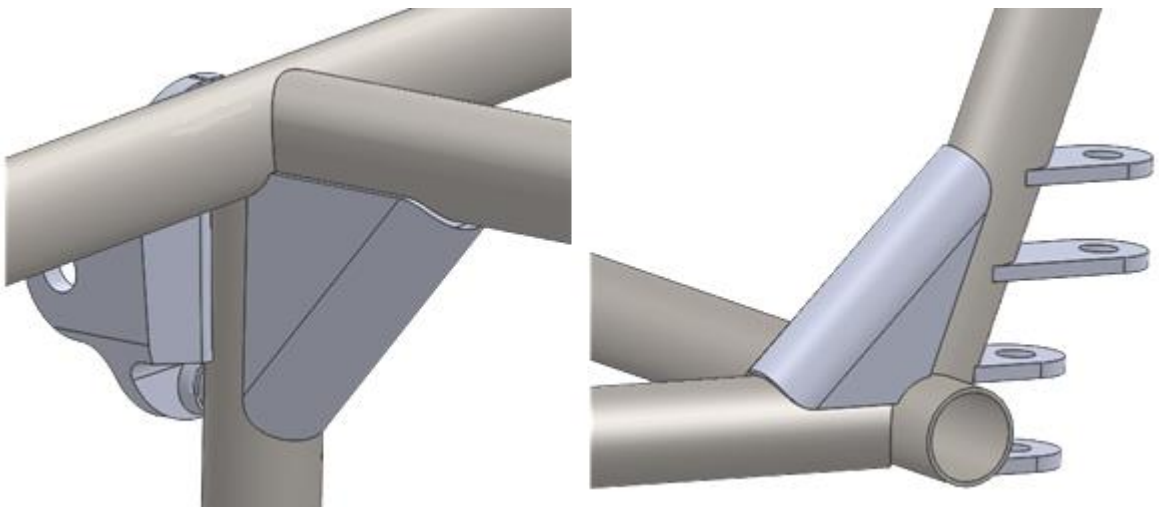


Figura 3.16 - Reforços em chapa montados no chassis

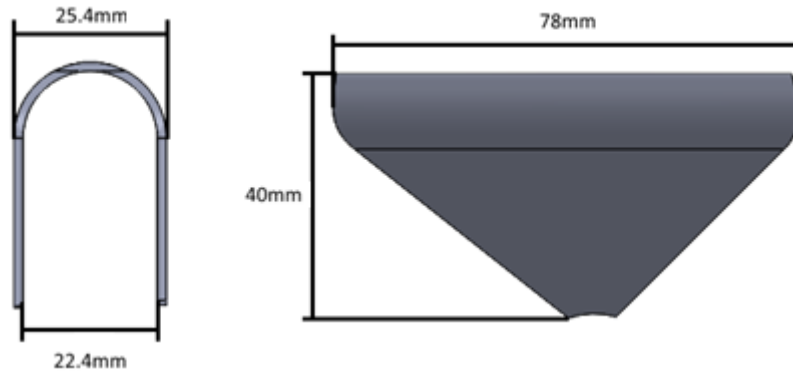


Figura 3.17 – Dimensões dos reforços em chapa

De seguida adicionaram-se os apoios do motor e diferencial. Tal como para os triângulos de suspensão utilizou-se chapa de aço soldada aos tubos mais próximos. Os apoios de motor e diferencial encontram-se representados na figura 3.18.

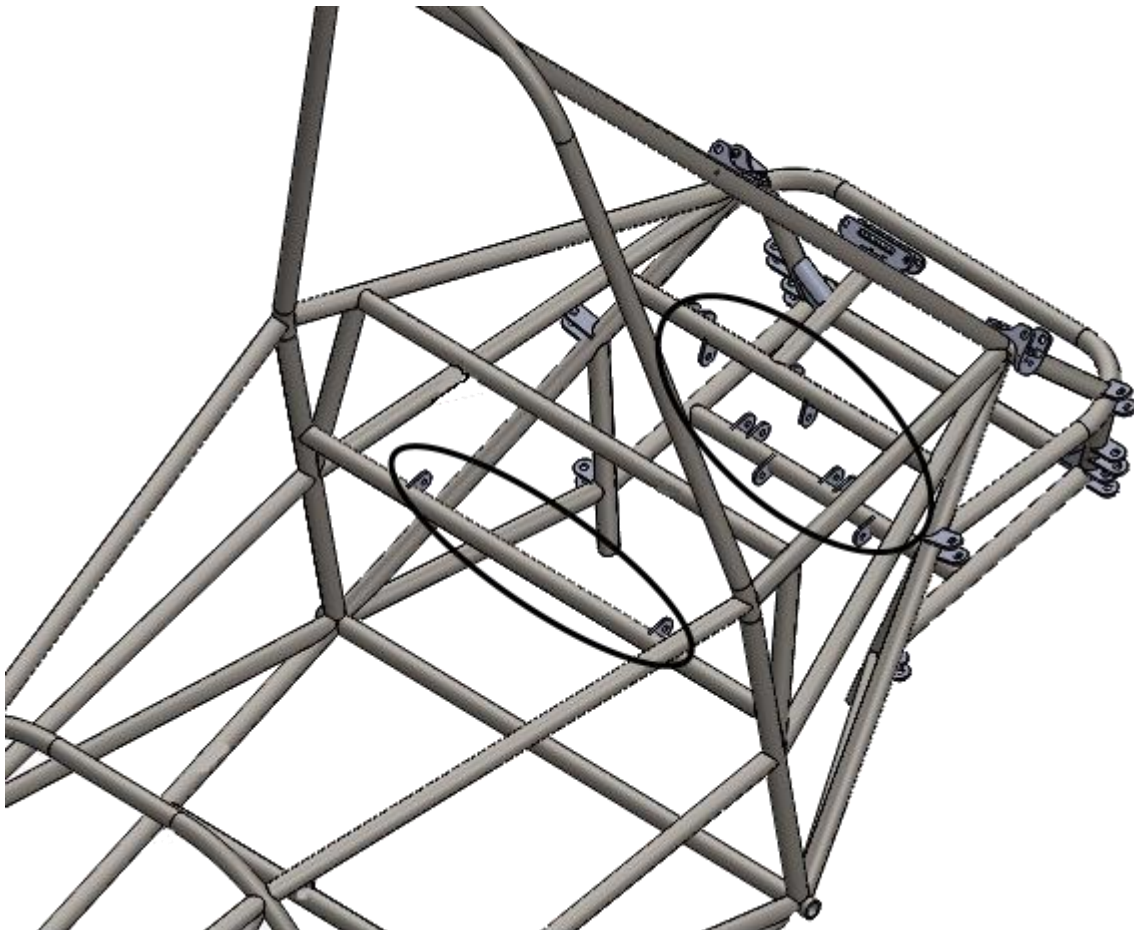


Figura 3.18 - Posicionamento dos apoios de motor e diferencial

Seguidamente foram adicionados os apoios dos cintos. Estes foram posicionados de forma a cumprir os requisitos do regulamento FSAE no que toca ao posicionamento dos

cintos de segurança. Estes apoios são também construídos em chapa de aço e soldados ao chassis. A figura 3.19 ilustra o posicionamento destes apoios.

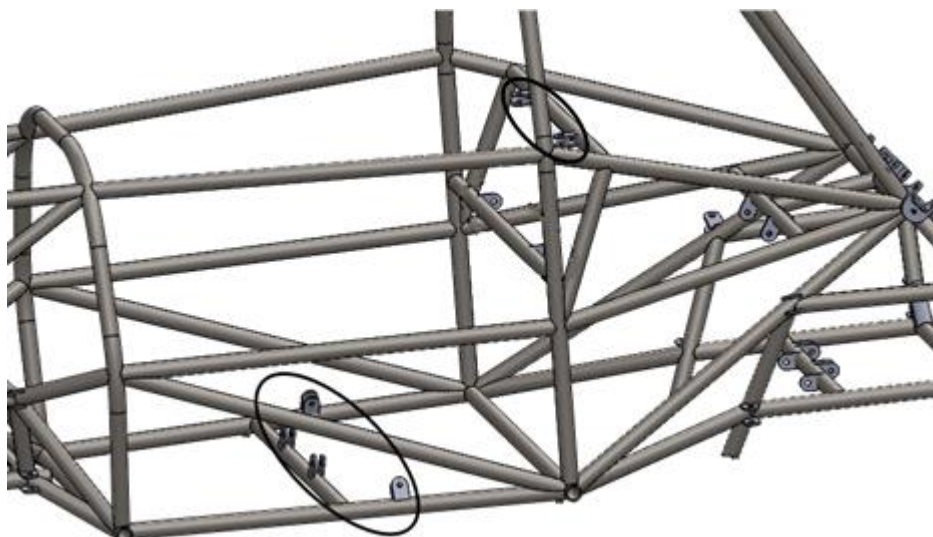


Figura 3.19 - Posicionamento dos apoios dos cintos

Seguiram-se as calhas e apoios para a pedaleira e caixa de direção. Foram adicionados vários furos às calhas que retiram peso às mesmas e proporcionam, no caso dos apoios da caixa de direção, a possibilidade de montar a mesma em várias posições.

A figura 3.20 mostra as calhas e apoios da pedaleira e caixa de direção.

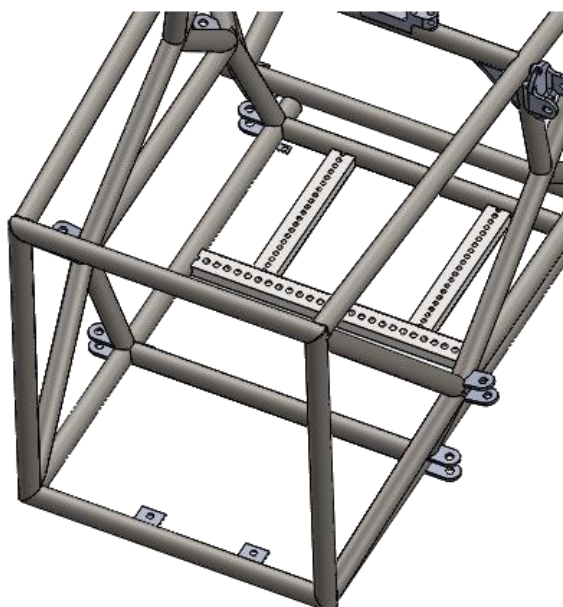


Figura 3.20 - Posicionamento das calhas e apoios para caixa de direção e pedaleira

De seguida foram adicionados os apoios para os painéis que cobrem o fundo do chassis. Na figura 3.21 é apresentado o posicionamento destes apoios.



Figura 3.21 - Posicionamento dos apoios para os painéis que cobrem o fundo do chassi

Os apoios das carenagens serão adicionados posteriormente para acertar o posicionamento juntamente com as carenagens. O posicionamento previsto para os apoios é apresentado na figura 3.22 com diferentes cores para os diferentes painéis que constituem as carenagens.

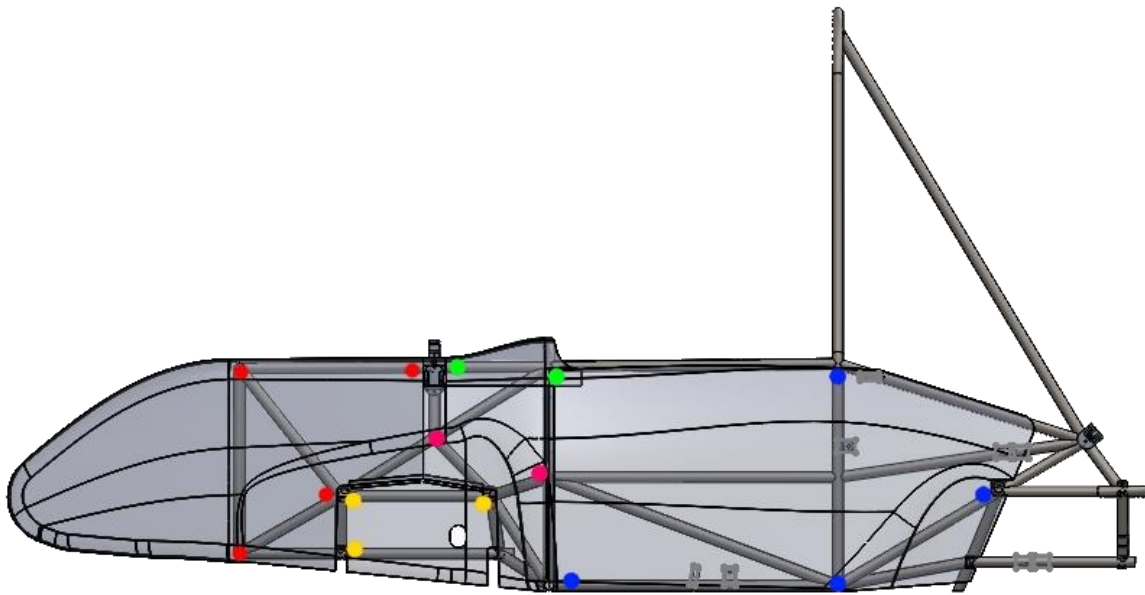


Figura 3.22 - Posicionamento dos apoios das carenagens

4. Escolha do método de modelação para a análise de Elementos Finitos

De forma a simular o comportamento mecânico da estrutura foi necessário criar uma representação fiel da estrutura real no *software* de elementos finitos. Para determinar o método a utilizar foram testadas e comparadas várias metodologias de modelação das soldaduras da estrutura e várias malhas de elementos finitos. O objetivo foi determinar aquela que produz resultados mais próximos da realidade, com o menor esforço computacional e de forma consistente, para as diversas geometrias utilizadas no chassis.

O ponto crítico da modelação foi a problemática de modelar as ligações soldadas entre tubos. Houve assim a necessidade de criar um provete computacional e comparar resultados das várias formas de modelação.

Esta análise foi feita com base numa estrutura mais pequena e simples, de forma a facilitar a mesma. A estrutura consiste numa intersecção em T entre dois tubos semelhantes aos utilizados no chassis. Este T, que chamaremos de provete, representa uma das intersecções mais comuns na estrutura, além disso as intersecções em T são comumente utilizadas para analisar soldaduras [2] [3] [4], estas razões levaram a optar por esta geometria. Na figura 4.1 é possível visualizar as dimensões e geometria do provete.

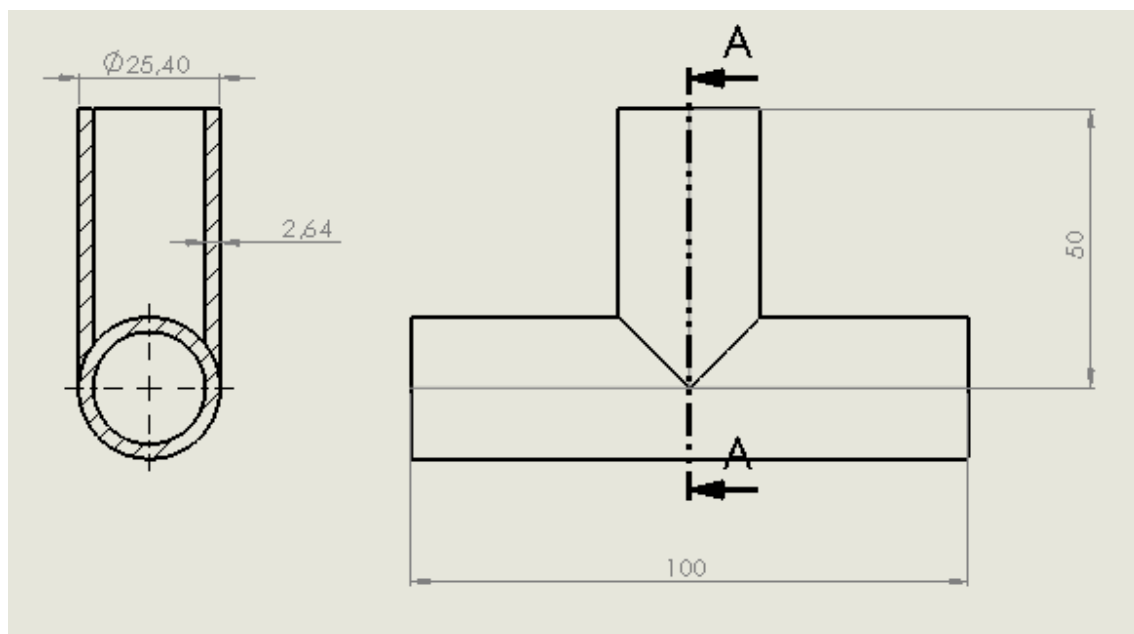


Figura 4.1 – Geometria do provete utilizado

Para a realização das simulações o tubo horizontal foi apoiado nas extremidades, tendo sido aplicada uma carga de tração de 500N na extremidade do tubo vertical. O diagrama de corpo livre para a condição de carga utilizada nos testes é apresentado na figura 4.2.

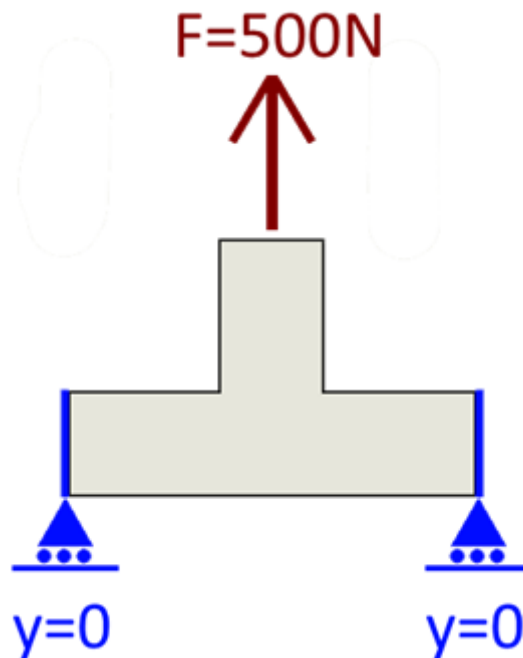


Figura 4.2 - Diagrama de corpo livre do problema

No decorrer das simulações verificou-se que a capacidade de processamento disponível era insuficiente para levar a cabo uma análise de convergência de resultados em função da malha, por isso adotou-se uma estratégia para melhorar a utilização dos recursos disponíveis que passou em primeiro lugar por identificar a região onde se verifica a tensão máxima e criar uma zona de refinamento da malha que a abranja, e ainda a criação de um plano de simetria para simplificar ainda mais o problema em estudo.

Com base em simulações preliminares, detetou-se que a zona de concentração de tensões estava localizada, como expectável, na junção do T, assim sendo a zona de refinamento da malha foi criada nessa zona, como ilustrado na figura 4.3.

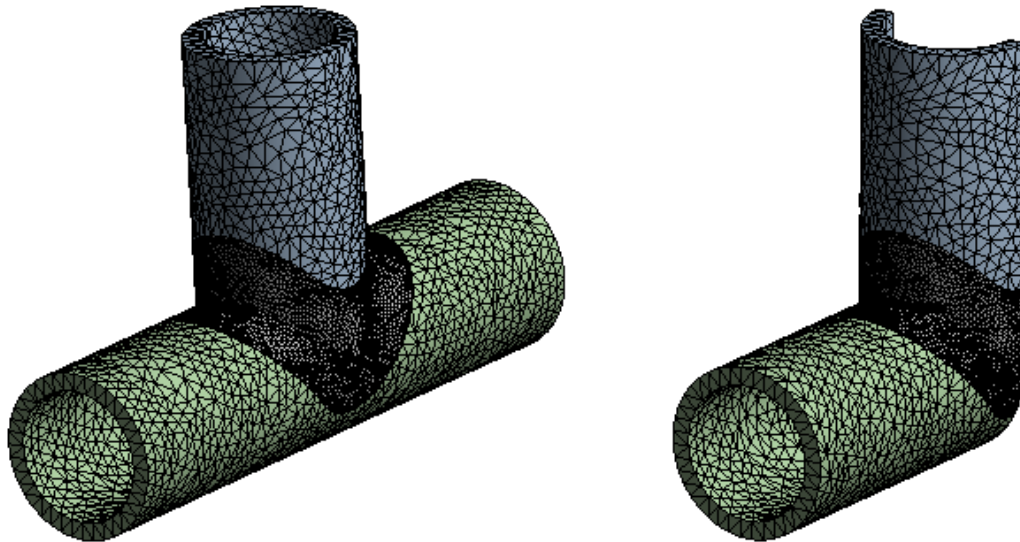


Figura 4.3 - Zona de refinamento da malha utilizada

A criação do plano de simetria requer a redefinição das condições de fronteira do problema, assim sendo o diagrama de corpo livre ilustrativo desta situação está representado na figura 4.4.

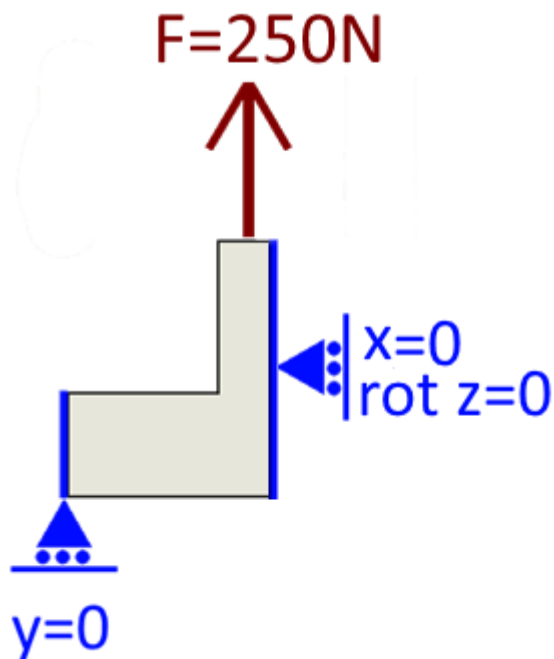


Figura 4.4 - Diagrama de corpo livre para o caso com simetria

De forma a comprovar que a criação do plano de simetria e novas condições de fronteira são equivalentes ao problema inicial realizaram-se um conjunto de simulações, na

figura 4.5 são apresentados os resultados obtidos para o valor da tensão máxima face ao tamanho do elemento utilizado.

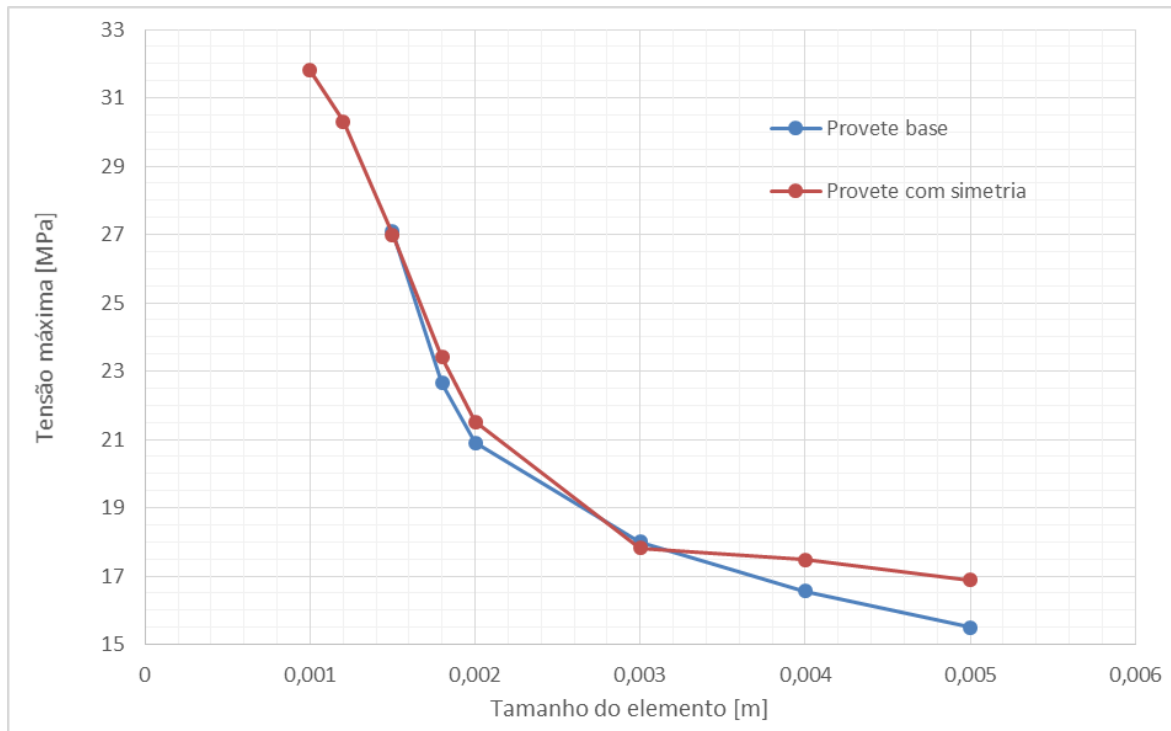


Figura 4.5 - Tensão máxima em função do tamanho de elemento para o provete base e o provete com simetria

A zona de concentração de tensões também se mantém semelhante nos dois casos, como ilustrado na figura 4.6.

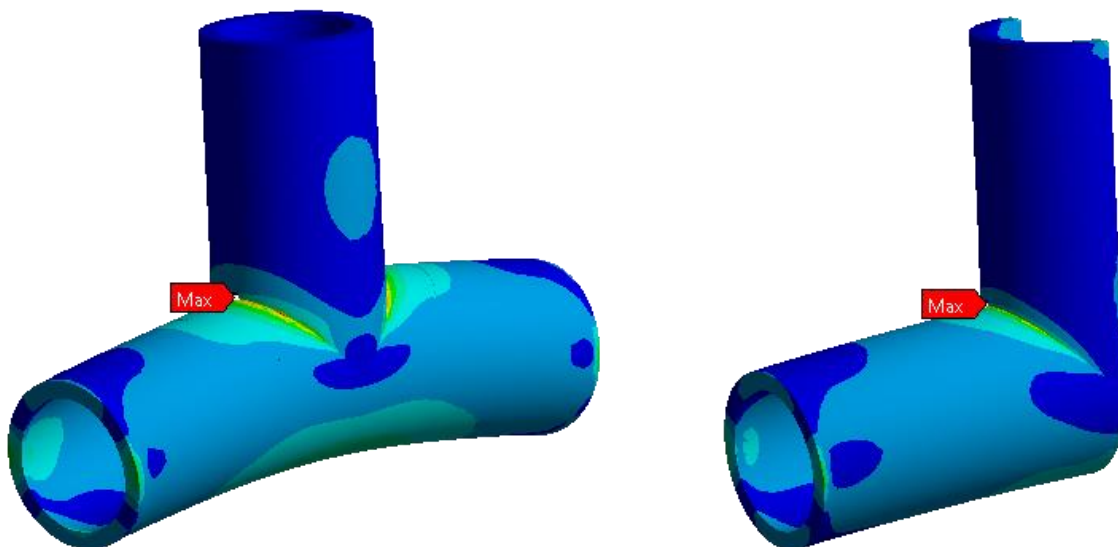


Figura 4.6 - Distribuição das tensões para o provete base e o provete com simetria para o tamanho de elemento 0,0015 m

Os ganhos a nível da dimensão do modelo e consequentemente o esforço de processamento requerido para correr a simulação são visíveis na figura 4.7, que compara o número de elementos criados para cada modelo face ao tamanho de elemento utilizado.

Assim, utilizando metade dos elementos iniciais utilizaremos o modelo do provete com simetria.

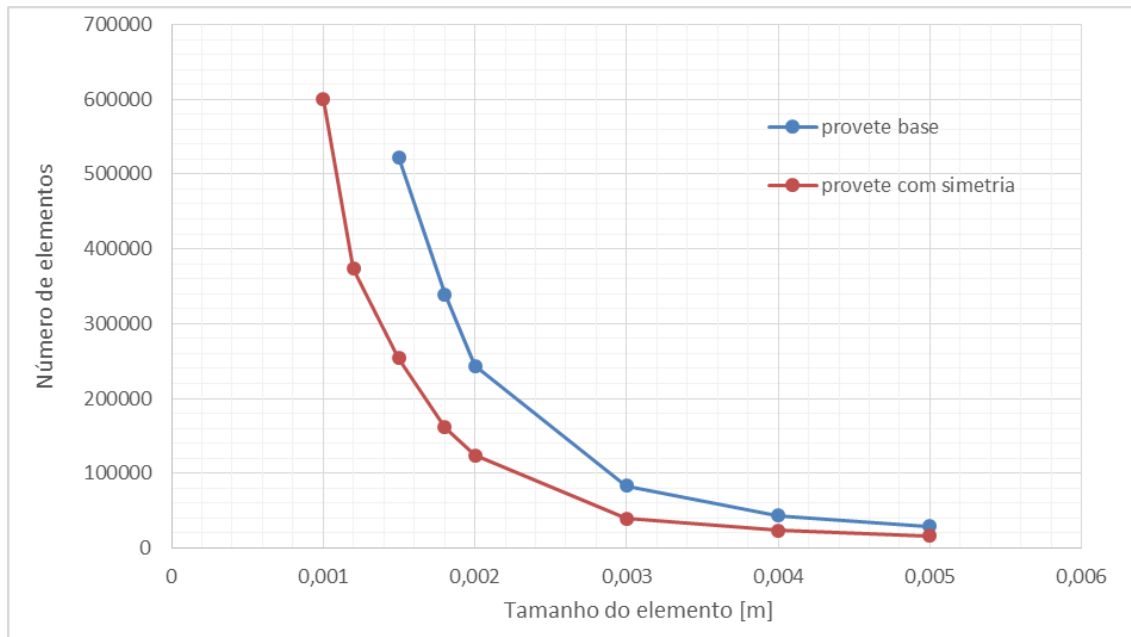


Figura 4.7 - Número de elementos em função do tamanho de elemento para o provete base e o provete com simetria

4.1. Provete simples

A primeira abordagem ao problema consistiu em modelar o provete de teste com recurso à ferramenta de geração de membros estruturais do *software Solidworks* [5]. De seguida a geometria foi importada para o *software Ansys Workbench* [6], onde foram aplicadas as condições de fronteira e gerada a malha.

Nas figuras 4.8 e 4.9 são apresentados os valores de tensão máxima registados face ao número de elementos, e a zona de concentração de tensões.

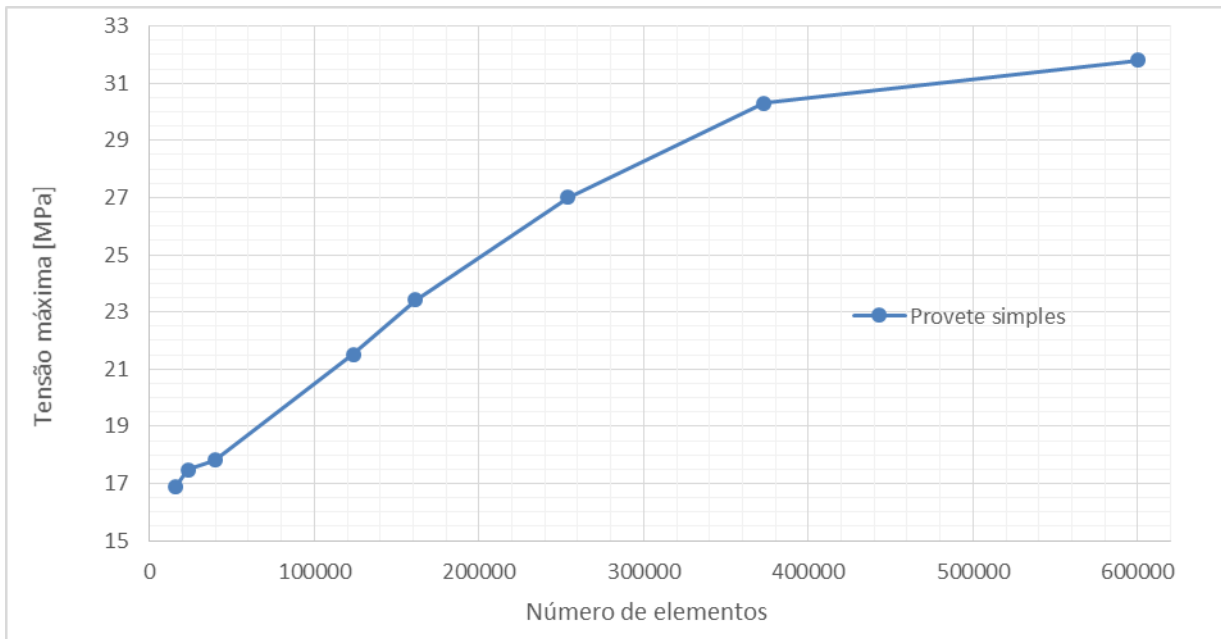


Figura 4.8 - Tensão máxima em função do número de elementos para o método dos membros estruturais em contacto

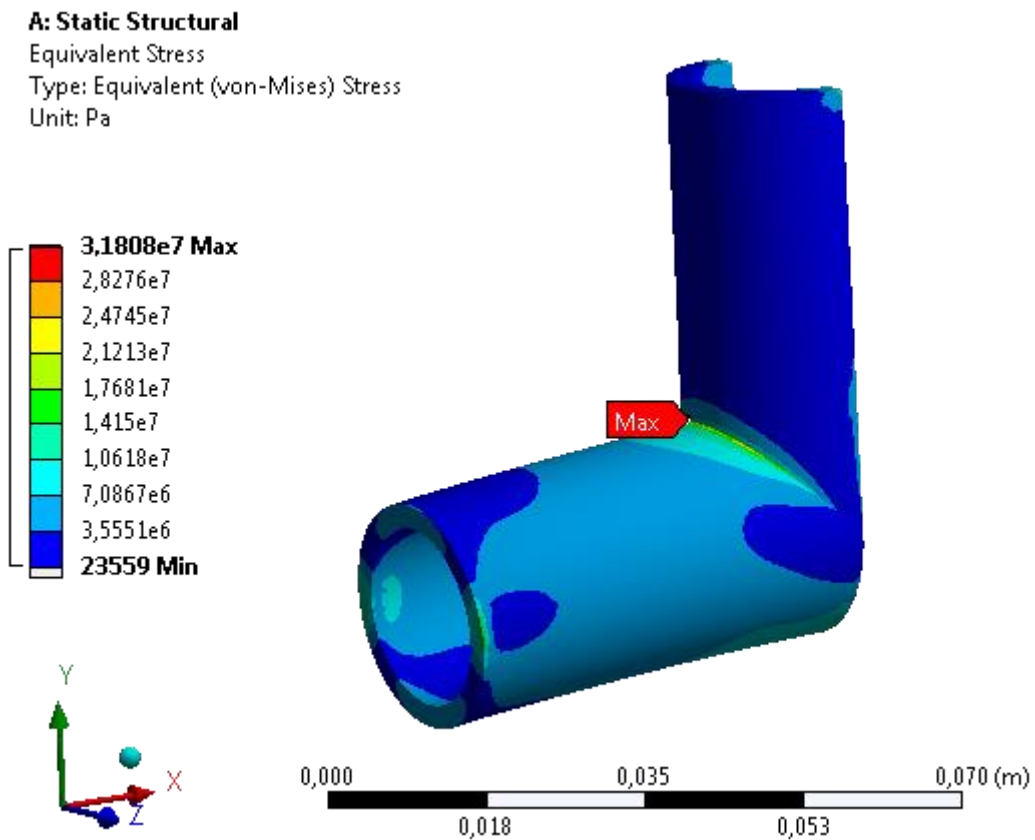


Figura 4.9 - Distribuição de tensões para o método dos elementos estruturais em contacto

A partir dos resultados, concluiu-se que a tensão máxima registada depende da malha, tendo-se verificado que quanto menor o tamanho dos elementos na zona da interseção dos tubos, maior a tensão máxima.

Os valores de tensão máxima registaram-se na aresta formada pela interseção dos dois tubos, pois a geometria favorece a concentração de tensões.

Uma vez que este método de modelação apresenta uma forte dependência da malha, foi necessário achar outro que não o seja. Para além disso a geometria desta junta não representa corretamente a geometria da soldadura.

4.2. Proverte com chanfro

Uma vez que o método de modelação anterior não permitiu obter resultados plausíveis em parte devido à elevada concentração de tensões na junção dos tubos, tentou-se aproximar mais a geometria modelada ao provete real modelando a zona da soldadura.

A primeira abordagem passou por adicionar um chanfro a 45° à aresta formada pela intersecção dos tubos. A espessura da garganta do chanfro é igual à espessura do tubo (2.65mm).

A geometria utilizada é apresentada na figura 4.10 com a zona de refinamento da malha representada.

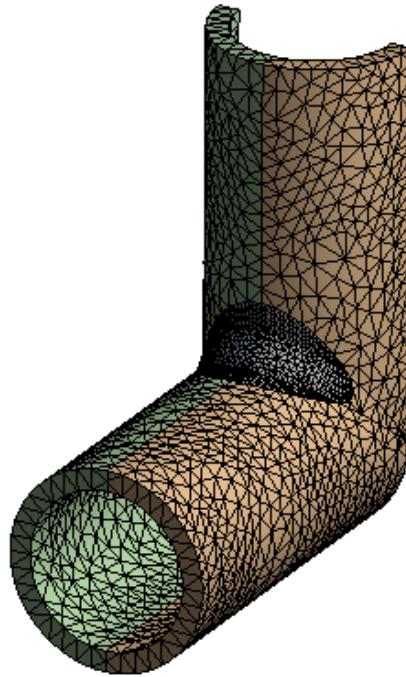


Figura 4.10 - Refinamento de malha utilizado para o provete com chanfro

Na figura 4.11 são apresentados os resultados de tensão máxima obtidos face ao número de elementos.

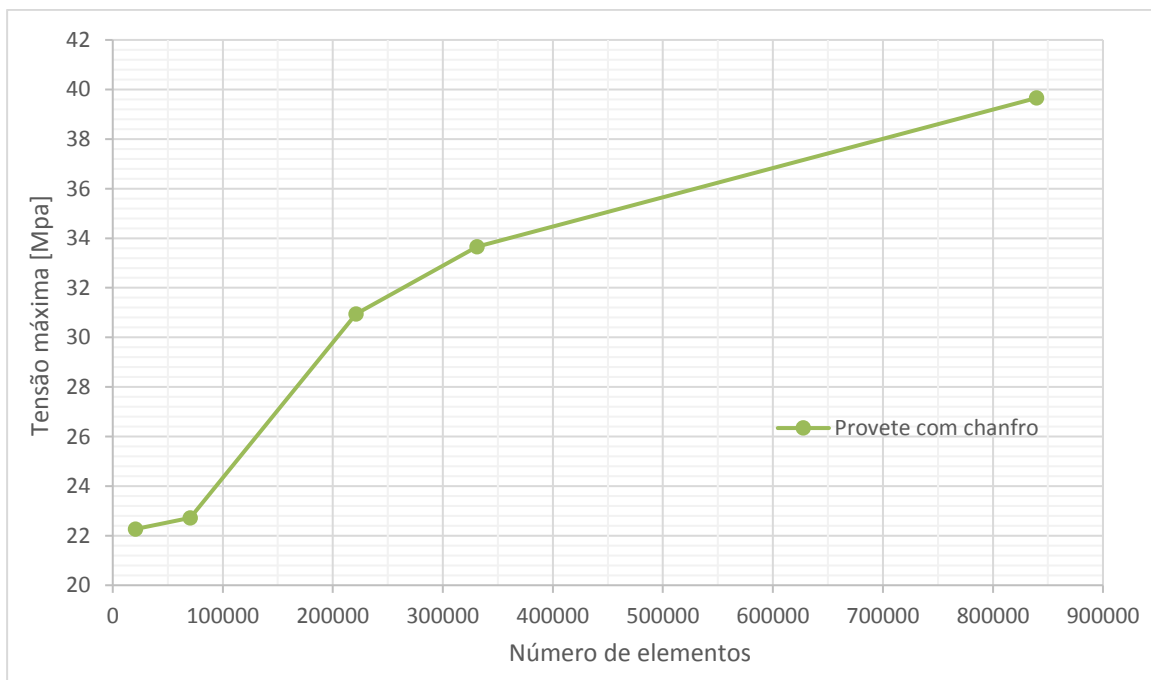


Figura 4.11 - Tensão máxima em função do número de elementos para o provete com chanfro

A distribuição das tensões obtida na simulação onde se registou o valor máximo de tensão é apresentada na figura 4.12.

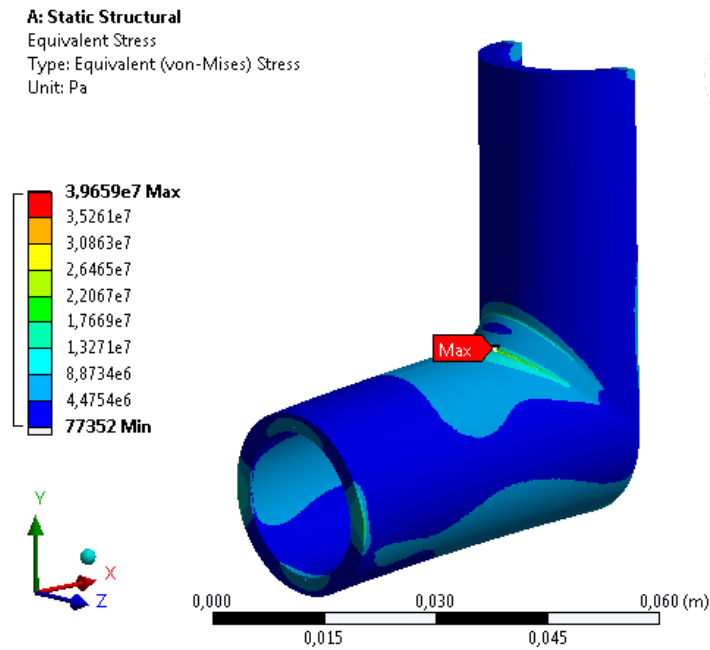


Figura 4.12 - Distribuição de tensões no provete com chanfro

Mais uma vez não houve convergência de resultados, como se constata através da figura 4.11, havendo um pico de tensão numa das arestas do chanfro (figura 4.12) cujo valor máximo aumenta com o número de elementos.

4.3. Provete com chanfro boleado

Para tentar atenuar o fenômeno verificado no caso anterior decidiu-se arredondar as arestas do chanfro, aproximando a geometria modelada à geometria real da soldadura. Foram testados vários raios de concordância, representados na figura 4.13.

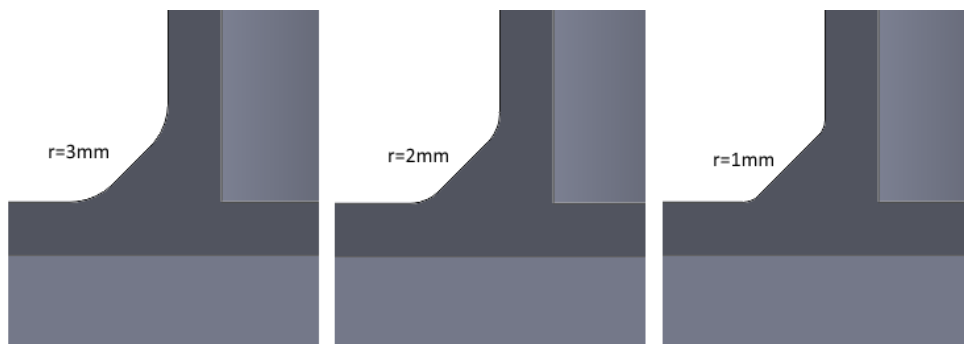


Figura 4.13 - Geometria da soldadura para os diferentes raios testados

Os resultados obtidos para os diferentes raios testados são apresentados na figura 4.14.

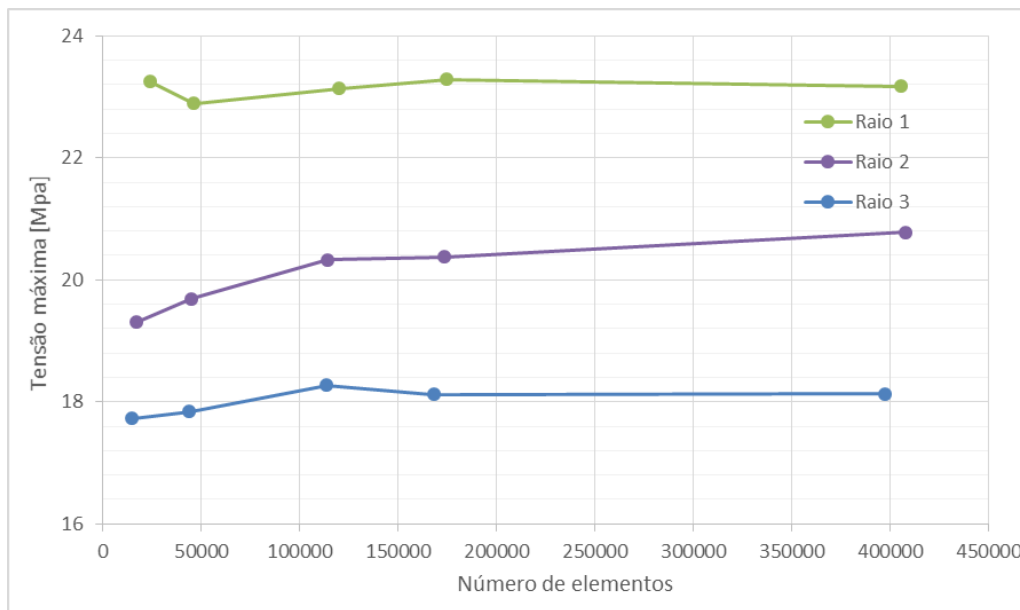


Figura 4.14 - Tensão máxima em função do número de elementos para os diferentes raios de concordância testados

Desta vez os resultados obtidos revelaram-se independentes da malha, no entanto é possível observar uma dependência do raio de concordância utilizado.

Para que este método de modelação possa ser utilizado é necessário determinar qual o raio de concordância a utilizar, uma vez que os resultados dependem do valor considerado.

O raio de 2 mm é o que visualmente se assemelha mais a uma soldadura real, no entanto não se pode afirmar com certeza que seja este o valor mais correto a considerar.

Na bibliografia encontrada o valor utilizado para provetes com placas em T é normalmente entre 1 a 2 mm [3] [4].

4.4. Ansys Weld Tool

O método de modelação testado na secção 4.3 revelou uma dependência entre o raio de concordância modelado e a tensão máxima obtida, resolveu-se testar a ferramenta de geração de soldadura do *software Ansys Workbench* tendo como comparação o modelo com o raio de 2 mm.

Esta ferramenta de geração da soldadura é uma ferramenta recente do software e que ficou disponível a partir da versão 16.0, atualmente este software está na versão 17.0. Este presente estudo utilizou a versão 16.0 do software.

Para iniciar o processo a geometria criada na secção 4.1 foi importada para o editor de geometrias do *software Ansys Workbench, Design Modeler*, como um sólido (ver figura 4.15).

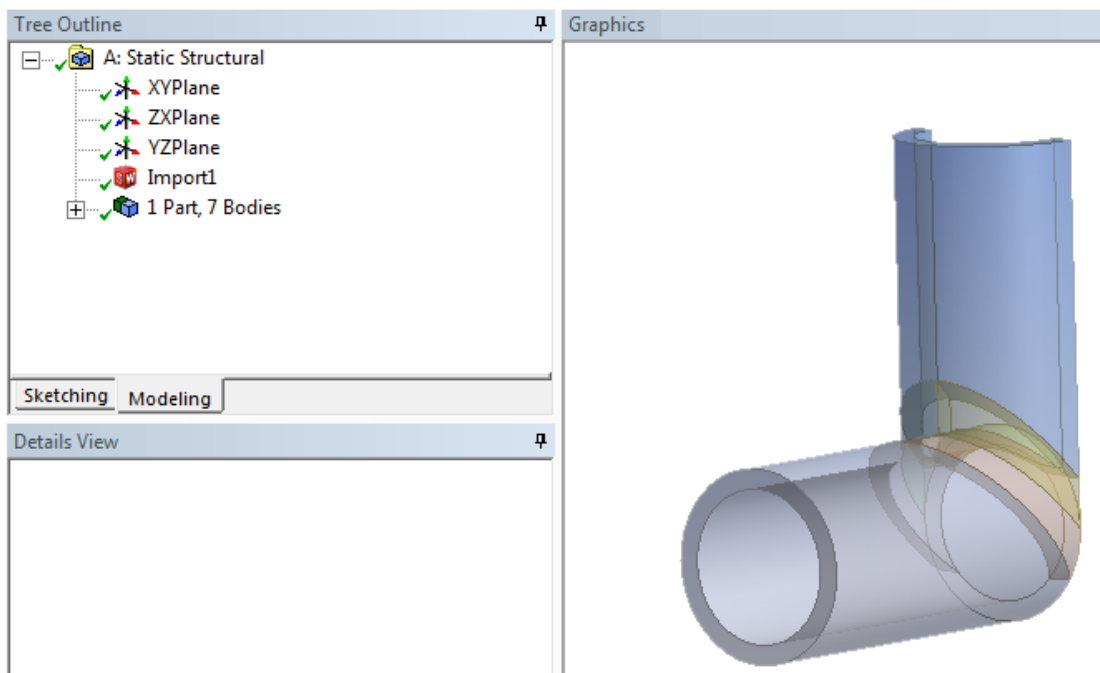


Figura 4.15 - Geometria importada para o *Design Modeler*

De seguida foi necessário converter o provete sólido para superfícies, para isso utilizou-se a ferramenta *mid surface*. As superfícies resultantes localizam-se entre a superfície exterior e interior dos tubos, havendo uma distância correspondente a metade da espessura do tubo na zona da junção dos mesmos. A geometria resultante e os parâmetros da ferramenta são apresentados na figura 4.16.

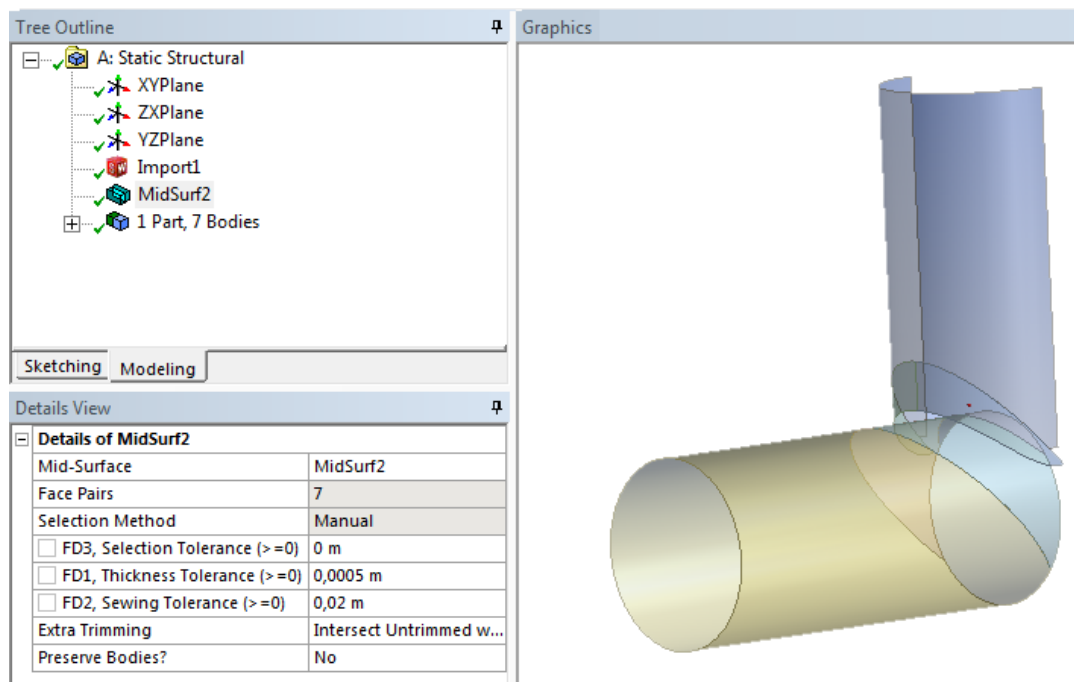


Figura 4.16 - Ferramenta *Mid Surface*

A soldadura é criada utilizando a ferramenta *Weld Tool* entre a aresta do tubo vertical e a superfície do tubo horizontal. É necessário verificar a geometria criada de forma automática para assegurar que a ferramenta realizou a ligação corretamente. Na figura 4.17 é apresentada a geometria criada e os parâmetros da ferramenta.

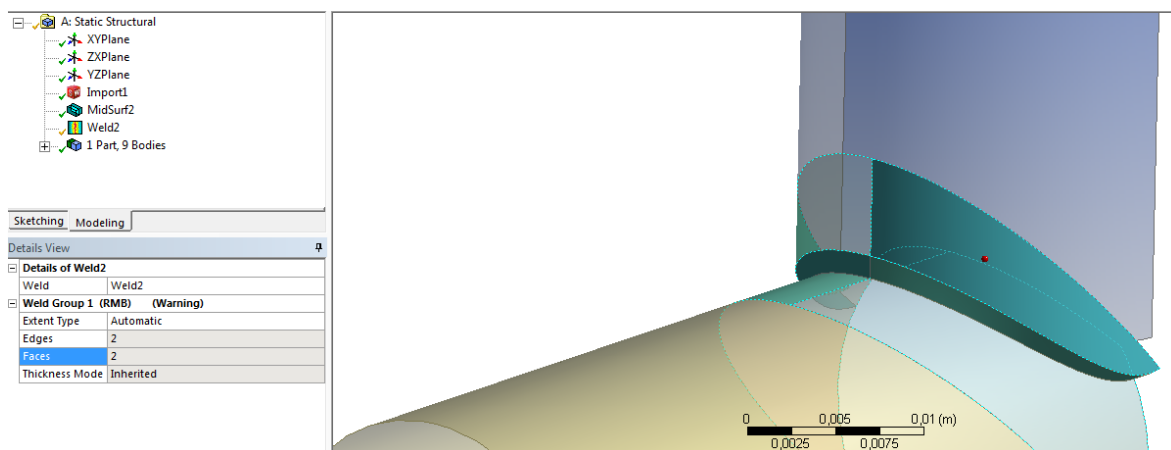


Figura 4.17 - Ferramenta *Weld Tool*

O modelo final é apresentado na figura 4.18, bem como a malha utilizada.

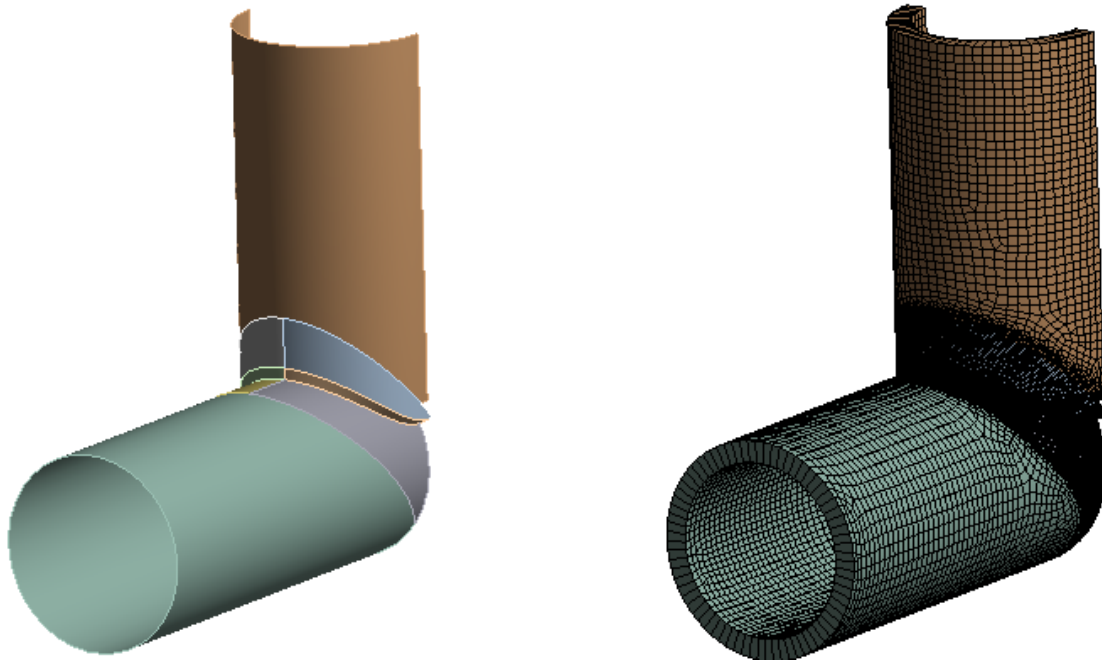


Figura 4.18 - Geometria produzida no editor de geometria do *Ansys Workbench* (à esquerda) e malha gerada (à direita)

Os resultados de tensão máxima obtidos neste conjunto de simulações são apresentados na figura 4.19.

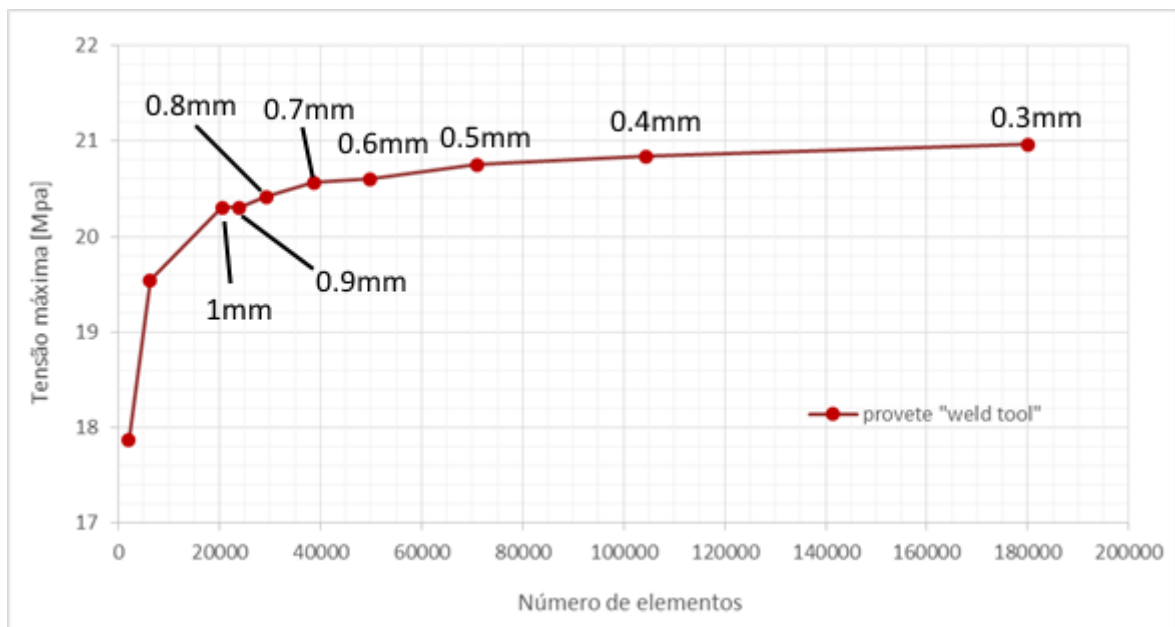


Figura 4.19 - Tensão máxima em função do número de elementos e tamanho de elemento correspondente

A distribuição das tensões é apresentada na figura 4.20.

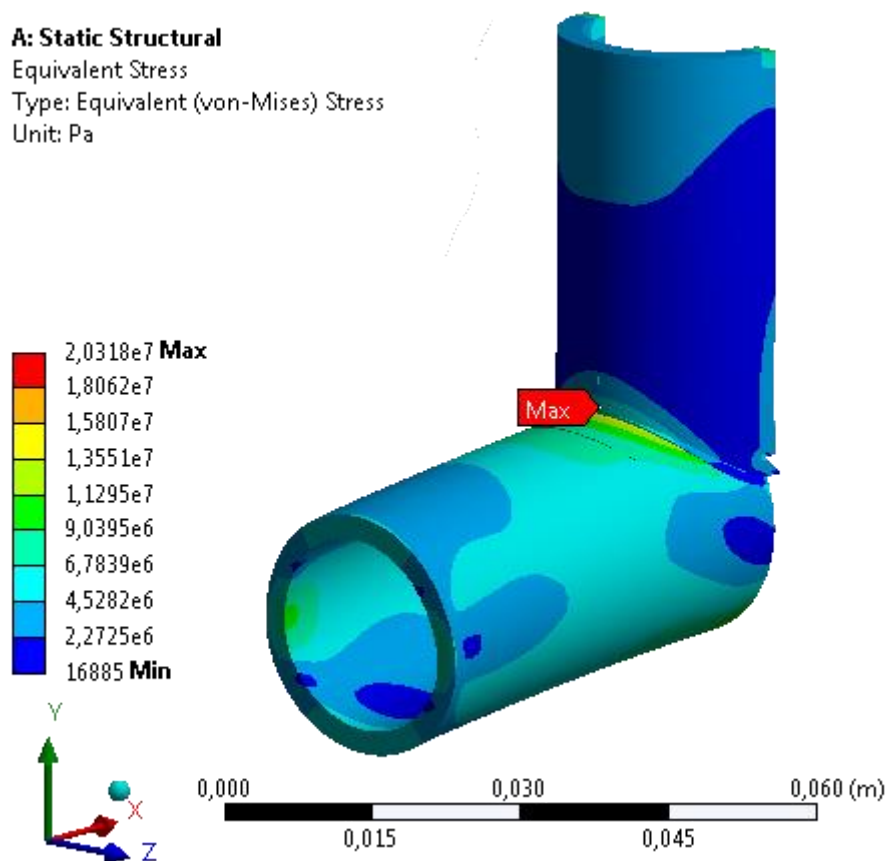


Figura 4.20 - Distribuição de tensões no provete criado com o *Ansys Weld Tool*

Tal como no método anterior verificou-se que os resultados obtidos são independentes da malha a partir do tamanho do elemento de 0,8mm. Além disso os valores de tensão máxima obtidos são muito próximos dos valores obtidos na secção 4.3 para o raio de concordância de 2 mm.

Verificou-se com algumas simulações que a ferramenta por vezes gera a geometria de forma incorreta, o que leva a resultados fora do normal, é por isso necessário verificar cuidadosamente a geometria gerada antes de prosseguir com as simulações.

4.5. Comparação dos métodos testados

Depois de testados os vários métodos, é necessário analisar os resultados obtidos e compará-los para seleccionar o método a utilizar.

Na figura 4.21 são comparados os resultados obtidos através dos diversos métodos testados.

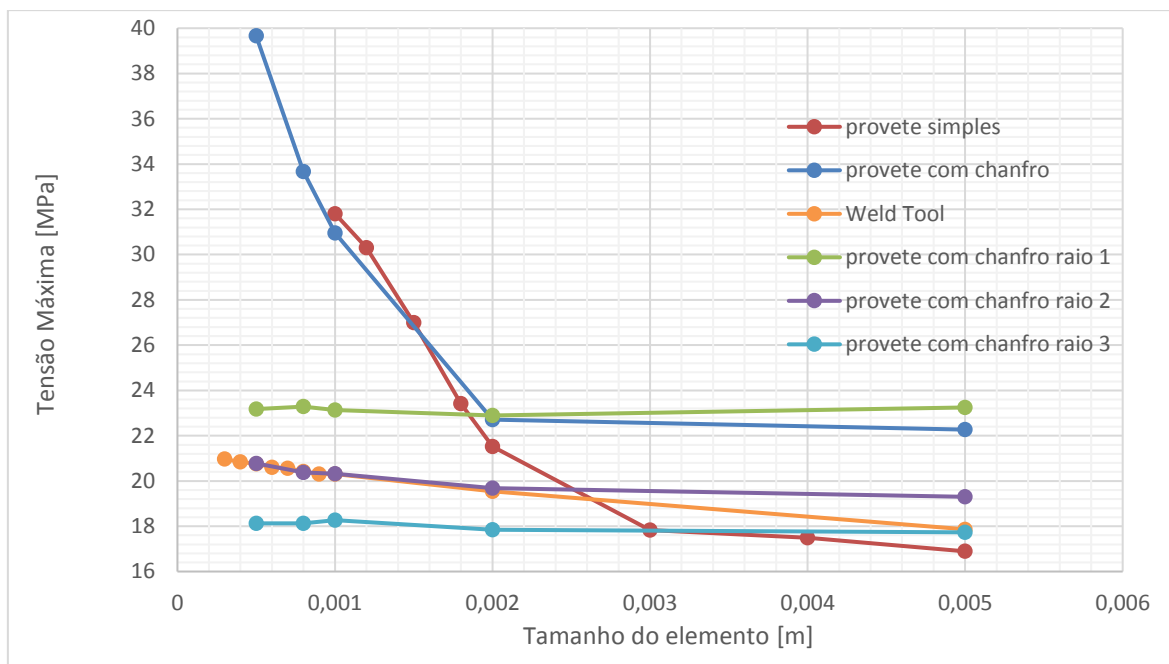


Figura 4.21 - Comparação dos resultados obtidos para os diferentes métodos (tensão máxima em função do tamanho do elemento)

Na figura 4.21 é perceptível que no caso do provete simples e do provete com chanfro o valor máximo de tensão registado aumenta à medida que se diminui o tamanho do elemento enquanto os restantes métodos testados tendem a convergir para um valor.

Outra tendência observada olhando para a figura 4.21 é a convergência de resultados entre o chanfro com as arestas arredondadas para um raio de 2 mm e a ferramenta *Weld Tool*. Tendo-se verificado que para um tamanho de elemento abaixo de 2 mm as curvas se sobrepõem de forma praticamente perfeita.

Na figura 4.22 é apresentado o número de elementos da malha para cada tamanho de elemento testado.

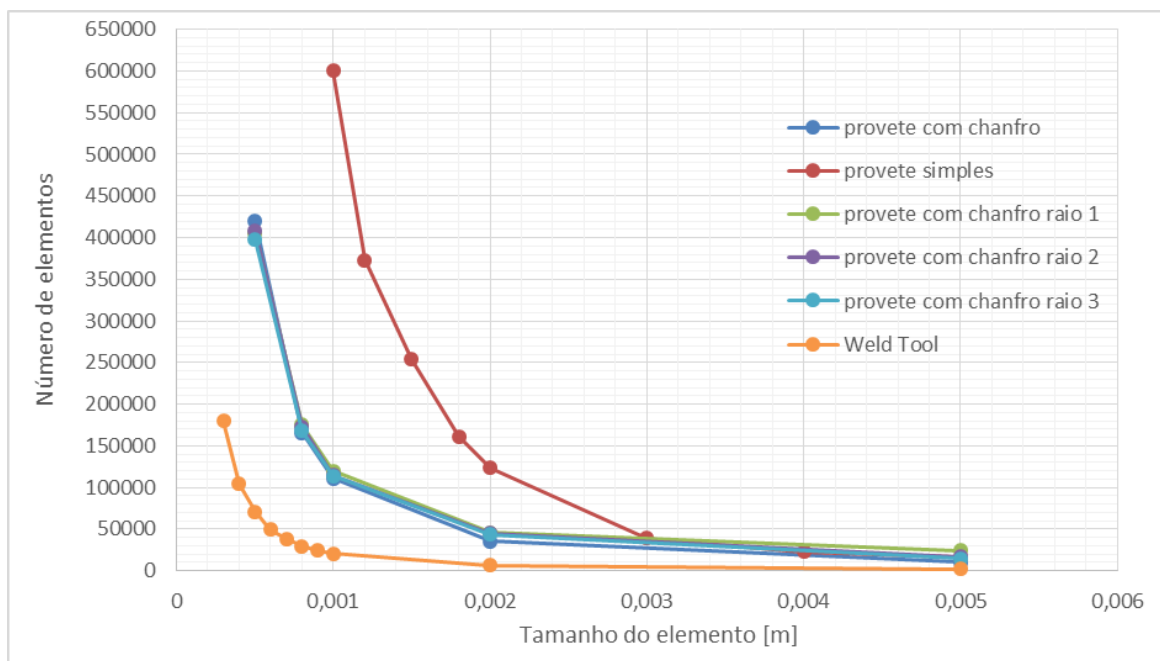


Figura 4.22 - Relação entre número de elementos e o tamanho de elemento para os vários métodos testados

Olhando para a figura 4.22, constata-se que utilizando o método de modelação descrito na secção 4.4 com recurso à ferramenta *Weld Tool* se conseguem obter malhas com menos elementos, e por isso mais fáceis de processar, para o mesmo tamanho de elemento.

Esta diferença deve-se principalmente ao facto de o modelo criado com a ferramenta *Weld Tool* utilizar elementos do tipo “casca” em vez da malha de elementos sólidos tetraédricos utilizados nas restantes situações.

Tendo em conta que os resultados produzidos pela ferramenta *Weld Tool* são semelhantes aos resultados obtidos com o provete com chanfro arredondado para um raio de 2 mm, recorrendo a muito menos elementos, torna-se evidente que a utilização desta ferramenta é vantajosa.

Após esta comparação, e pelas razões apontadas acima optou-se por prosseguir com a análise da estrutura completa recorrendo à ferramenta *Weld Tool*. O tamanho de elemento utilizado será 0.8mm, com um refinamento de grau 3 na zona da soldadura, tal como apresentado na secção 4.4.

5. Determinação numérica dos esforços na estrutura

Neste capítulo o método de modelação escolhido no capítulo 4 é aplicado à estrutura do chassis e é feito um conjunto de simulações de forma a determinar os esforços a que a estrutura está sujeita.

Serão feitas duas análises para calcular a rigidez torsional da estrutura e outra para avaliar as tensões presentes na estrutura quando sujeita a uma carga representativa de uma condição de utilização.

As propriedades do material utilizado (aço AISI 4130 [7]) são as seguintes:

Módulo de *Young* = 205 GPa

Coefficiente de *Poisson* = 0.29

Tensão de cedência = 435 MPa

Massa volúmica = 7850 kg/m³

5.1. Preparação da geometria

Antes de iniciar as análises é necessário importar a geometria para o *software Ansys Workbench* e editar a geometria no *Design Modeler*.

A geometria em análise compreende apenas a estrutura tubular do chassis. Não foi possível adicionar os apoios nem reforços em chapa utilizando a ferramenta *Weld Tool*, e a metodologia de preparação de geometrias não se aplica a componentes como os apoios de amortecedores e *rockers* apresentados no capítulo 3. Da mesma forma os insertos adicionados para fixar os apoios maquinados tiveram de ser removidos para realizar as simulações. Os componentes removidos iriam adicionar rigidez à estrutura, principalmente os insertos e os reforços em chapa, além destes componentes existem outros que não são considerados parte do chassis mas que adicionam rigidez ao mesmo, como o motor do veículo.

Na figura 5.1 é comparada a geometria obtida no final do capítulo 3 com a geometria que será importada para o *Ansys Workbench* para realização das análises.

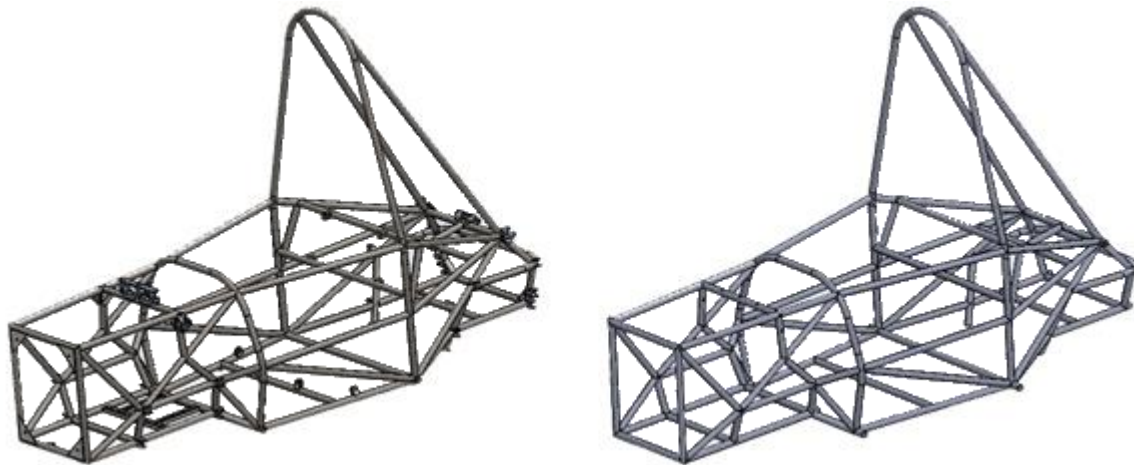


Figura 5.1 - Eliminação de componentes para as análises

Tal como na secção 4.4 a geometria foi importada e convertida para superfícies com a ferramenta *Mid Surface*. Depois de converter o sólido em superfícies é necessário efetuar todas as soldaduras.

A ferramenta *Weld Tool* permite criar a soldadura entre um conjunto de arestas e um conjunto de superfícies o que permite efetuar varias soldaduras de uma vez ou efetuar uma soldadura quando a aresta ou a superfície está dividida em várias partes. No caso do provete utilizado no capítulo 4, devido à sua geometria simples, a soldadura era realizada num só passo com um conjunto de 2 arestas e outro de 2 superfícies. No entanto na maioria das ligações presentes no chassis é necessário efetuar vários passos para conseguir efetuar a soldadura com sucesso, pois os tubos do chassis raramente se encontram perfeitamente perpendiculares.

De forma a representar corretamente as soldaduras entre mais do que dois tubos é necessário ter em conta a ordem pela qual estes serão montados e soldados e replicar esse processo, começando com dois tubos efetua-se a soldadura e só depois se adiciona outro e se procede à soldadura seguinte.

Outro procedimento que se deve tomar é verificar se a geometria criada causa problemas durante a criação da malha, pois verificou-se que por vezes ocorriam problemas na geração da malha na zona das soldaduras e era necessário voltar ao editor de geometria e refazer a soldadura problemática. Devido à necessidade de adicionar os tubos um a um e pela ordem correta é mais fácil alterar a geometria se o erro for detetado de forma precoce, ao invés de ocorrer com todo o chassis já finalizado.

Na figura 5.2 é ilustrado o processo utilizado para uma junção com vários tubos.

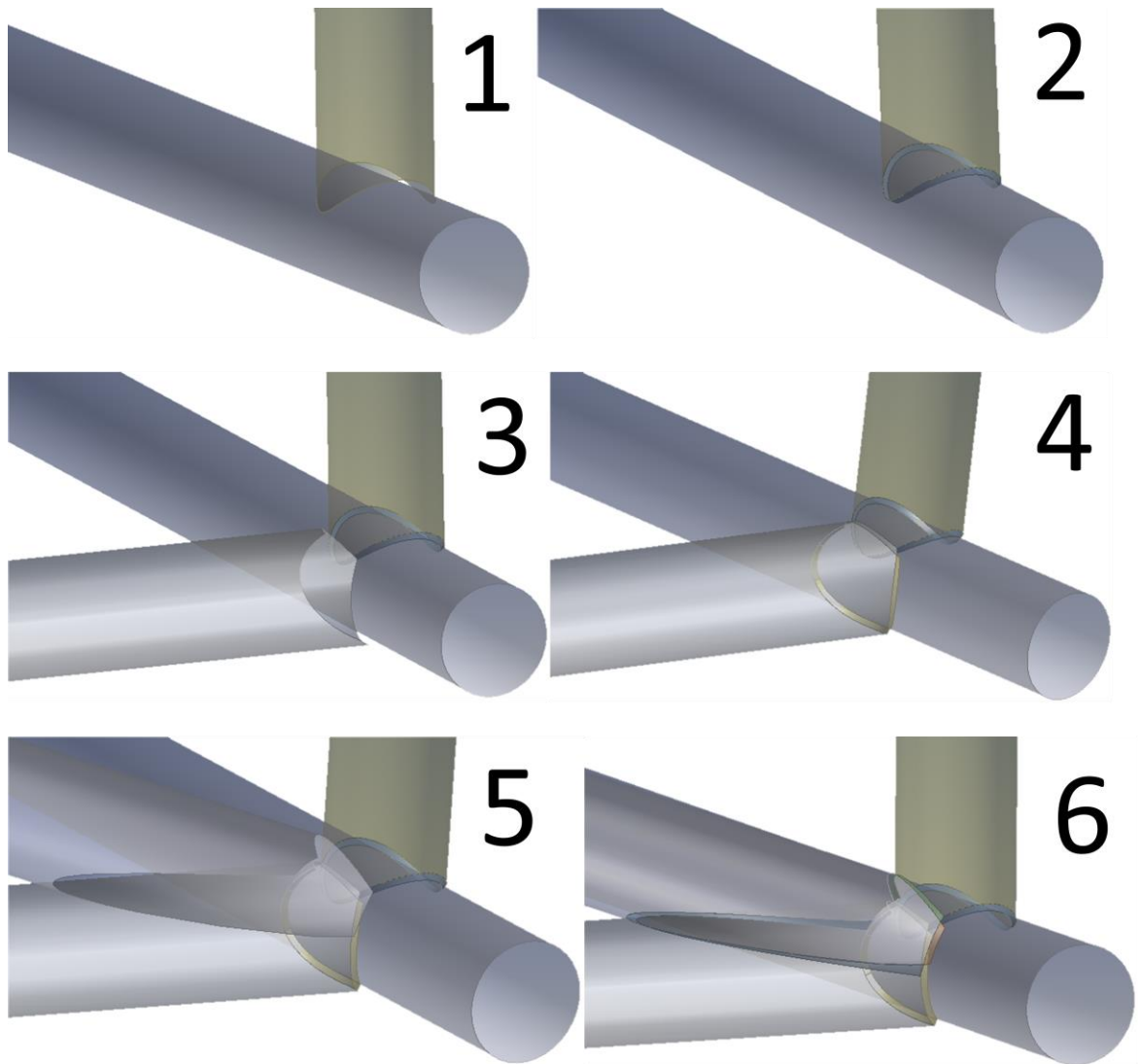


Figura 5.2 - Processo de criação da soldadura numa ligação com vários tubos

Após adicionar todos os 74 tubos e efetuar as 268 soldaduras do chassis, o resultado final é o apresentado na figura 5.3.

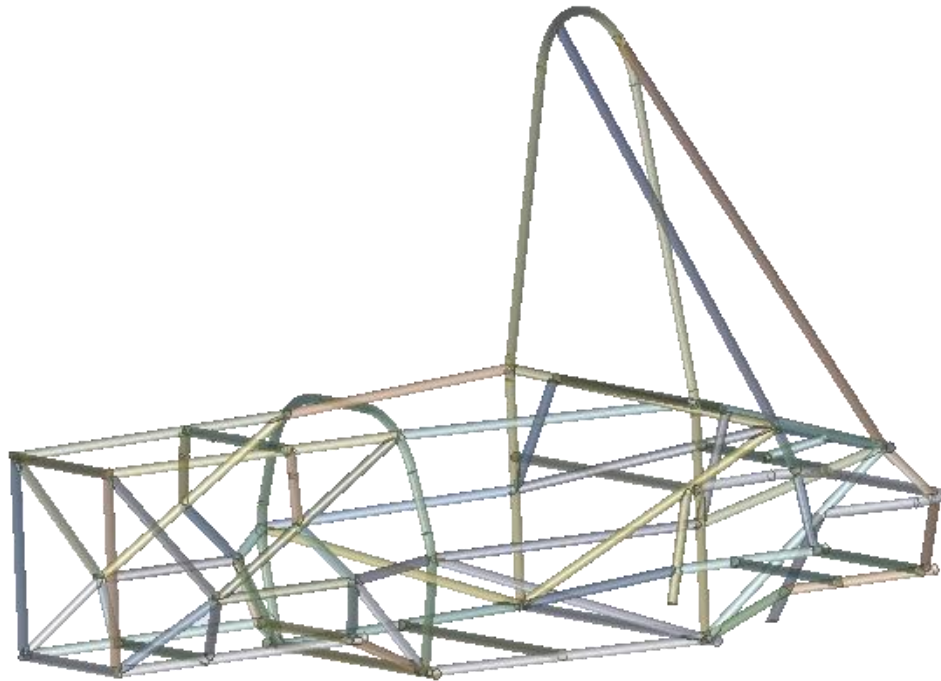


Figura 5.3 - Chassis completo após preparação da geometria

Devido às dimensões e complexidade do chassis as simulações efetuadas ao longo deste capítulo foram realizadas num computador com maior capacidade de processamento do que o utilizado para o capítulo 4, permitindo que o número máximo de elementos da malha aumentasse dos seiscentos mil elementos para os 6 milhões de elementos. Associado ao aumento do número de elementos houve um aumento no tempo necessário para calcular a solução que passou de 4 para 26 horas.

5.2. Determinação da rigidez torsional

As primeiras simulações realizadas tiveram como objetivo determinar a rigidez torsional da estrutura. Para este efeito efetuaram-se duas simulações, uma com a carga aplicada na zona frontal do veículo, outra na parte traseira. Os diagramas de corpo livre para as duas situações estão apresentados nas figuras 5.4 e 5.5.

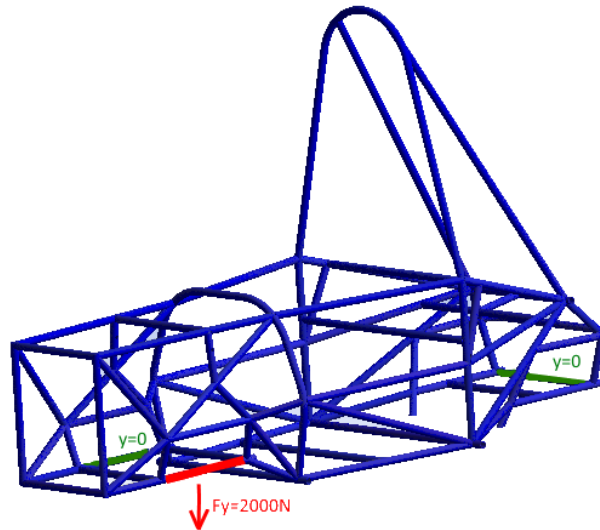


Figura 5.4 - Situação de carga para aferir a rigidez torsional para a carga aplicada na frente do chassis

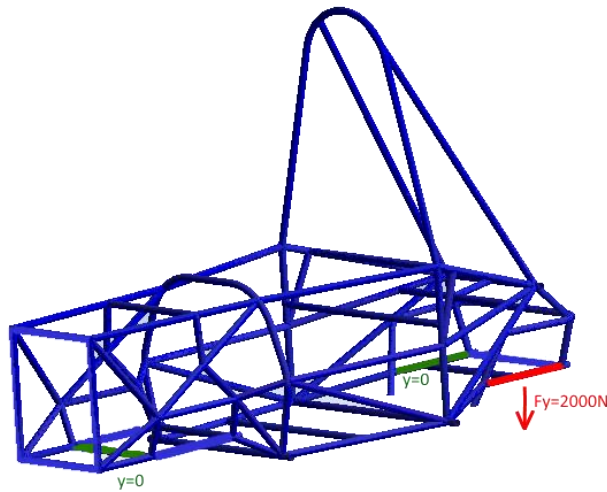


Figura 5.5 - Situação de carga para aferir a rigidez torsional para a carga aplicada na traseira do chassis

Tal como referido no capítulo 4, a malha utilizada para as simulações apresenta um tamanho máximo de elemento de 0.8 mm na zona não refinada, e um refinamento de grau 3 na zona das soldaduras, resultando num total de 5 458 632 elementos.

Na figura 5.6 é apresentado o deslocamento vertical provocado pela carga, para ambas as situações.

A: Static Structural

Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: m

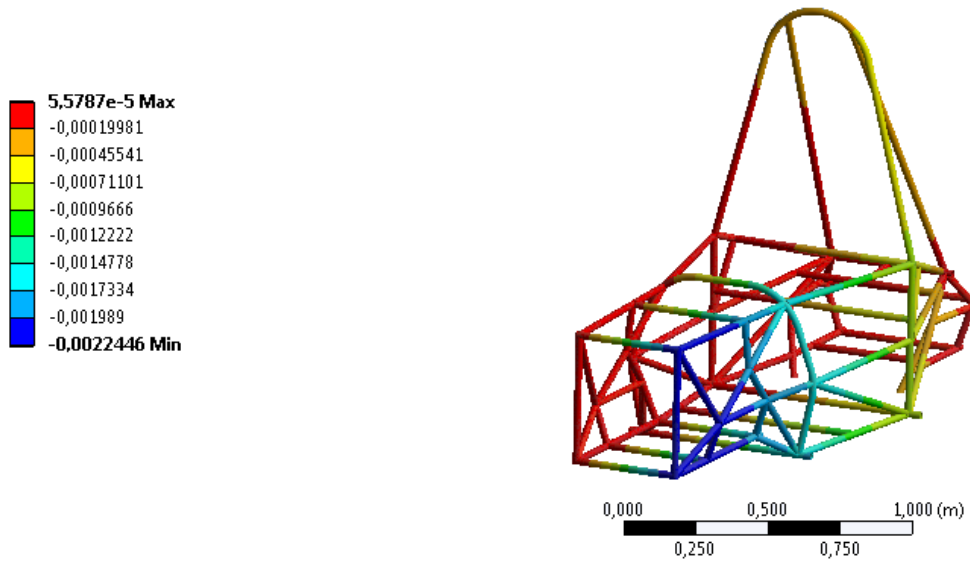


Figura 5.6 - Deslocamento vertical para a carga aplicada na frente do chassis

A: Static Structural

Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: m

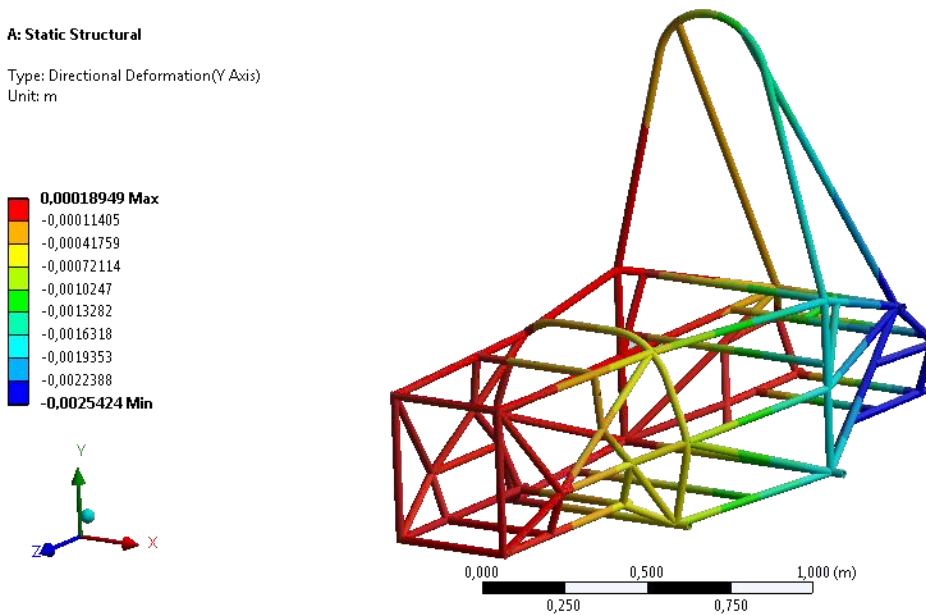


Figura 5.7 - Deslocamento vertical para a carga aplicada na traseira do chassis

Uma vez obtido o valor de deslocamento vertical máximo é possível calcular o valor da rigidez torsional da estrutura com a relação seguinte.

$$K_{\theta} = \frac{T}{\theta}$$

Onde:

$$T = F * b$$

$$\theta = \frac{360}{2\pi} \tan^{-1} \frac{y}{b}$$

Obtendo-se:

$$K_{\theta} = \frac{F * b * 2\pi}{360 * \tan^{-1} \frac{y}{b}}$$

Os dados utilizados:

$$F = 2000N, b_f = 0.43m \text{ e } b_t = 0.43m$$

A partir das simulações determinou-se:

$$y_f = 0.0022446m \text{ e } y_t = 0.0025424m$$

Os valores de rigidez obtidos foram:

$$K_{\theta f} = 2875.473 \text{ N.m/grau e } K_{\theta t} = 3432.474 \text{ N.m/grau}$$

Os valores de rigidez obtidos superam o objetivo estabelecido pela equipa de 2000 N.m/grau, logo não serão necessárias alterações suplementares para aumentar a rigidez.

5.3. Esforços transmitidos pela suspensão do veículo

A simulação seguinte representa as cargas aplicadas ao chassis pelo sistema de suspensão numa situação de curva e travagem em pista.

Para determinar os esforços no chassis é necessário primeiro determinar as forças aplicadas na área de contacto de cada pneu com o solo e determinar as forças de reação nos apoios da suspensão.

O peso estimado do veículo com piloto é de 310 kg, com o centro de massa a 260 mm do chão, 832 mm do eixo dianteiro e lateralmente no centro do veículo. A distância entre eixos é de 1600 mm e a largura de vias de 1250 mm. Para os cálculos considera-se que o veículo está sujeito a uma aceleração lateral e longitudinal de 1.4 g (usados para obter os coeficientes de aceleração c_{ac} e c_{at}), estes valores foram obtidos com base nos valores

registados no sistema de *datalog* do veículo anterior e representam uma situação limite. Com estes dados é possível determinar as forças aplicadas em cada roda [8].

Na figura 5.8 estão representadas as características geométricas importantes para a obtenção dos esforços nas rodas.

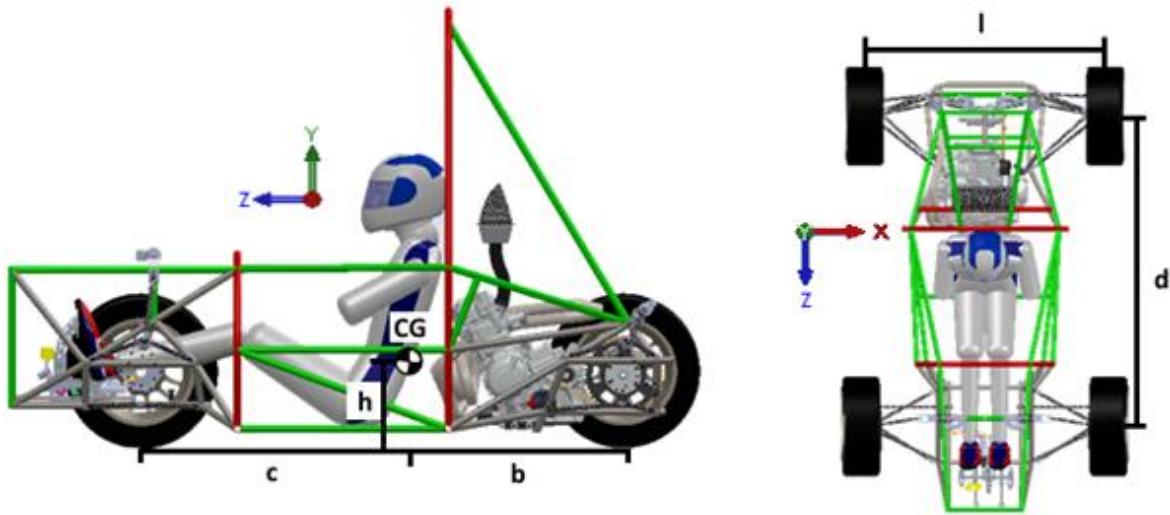


Figura 5.8 - Parâmetros geométricos para os cálculos

A força vertical em situação estática é dada por:

$$F_{ef} = \frac{M * g * b}{d} \qquad F_{et} = \frac{M * g * c}{d}$$

A força vertical devida à aceleração longitudinal é dada por:

$$F_t = \frac{M * g * c_{at} * h}{d}$$

A força vertical devida à aceleração lateral é dada por:

$$F_l = \frac{M * g * c_{ac} * h}{l}$$

Assim, a força vertical por roda será:

$$F_{yfe} = \frac{F_{ef}}{2} + \frac{F_t}{2} - \frac{F_l}{2} \qquad F_{yfd} = \frac{F_{ef}}{2} + \frac{F_t}{2} + \frac{F_l}{2}$$

$$F_{yte} = \frac{F_{ef}}{2} - \frac{F_t}{2} - \frac{F_l}{2} \qquad F_{ytd} = \frac{F_{ef}}{2} - \frac{F_t}{2} + \frac{F_l}{2}$$

As forças laterais e longitudinais são dadas por:

$$F_x = F_y * c_{ac}$$

$$F_z = -F_y * c_{at}$$

Os dados do veículo são:

$$b = 0.768 \text{ m}$$

$$c = 0.832 \text{ m}$$

$$d = 1.6 \text{ m}$$

$$h = 0.26 \text{ m}$$

$$l = 1.25 \text{ m}$$

$$M = 310 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Os fatores de aceleração são: $c_{at} = 1.4$ e $c_{ac} = 1.4$

Os valores obtidos para cada uma das forças são apresentados na tabela Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Forças resultantes em cada roda

F_{fe}	F _{yfe}	633 N	F _{xfe}	886 N	F _{zfe}	886 N
F_{fd}	F _{yfd}	1519 N	F _{xfd}	2126 N	F _{zfd}	2126 N
F_{te}	F _{yte}	2 N	F _{xte}	3 N	F _{zte}	3 N
F_{td}	F _{ytd}	888 N	F _{xtd}	1243 N	F _{ztd}	1243 N

Uma vez obtidas as forças aplicadas no centro da área de contacto de cada pneu com o solo, modelou-se uma versão simplificada do sistema de suspensão, de forma a obter através do *Ansys Workbench* as forças em cada um dos apoios de suspensão.

Na figura 5.9 é apresentada uma imagem da modelação da suspensão já importada para o *Ansys Workbench*.

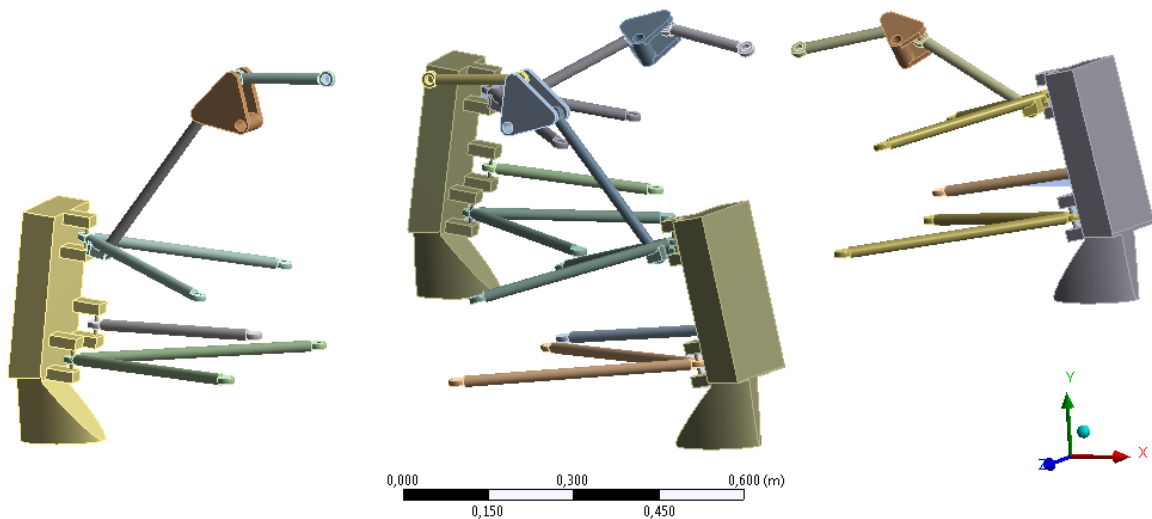


Figura 5.9 - Modelo simplificado do sistema de suspensão do veículo

No *software* foi necessário definir a ligação entre os vários componentes da suspensão, e dos mesmos ao chassis. Foi efetuada uma simulação no módulo *Rigid Dynamics* onde as rótulas que ligam os componentes entre si foram definidas como *spherical joint, body to body* e as ligações ao chassis como *spherical joints, body to ground*.

A figura 5.10 mostra o diagrama de corpo livre do problema simulado.

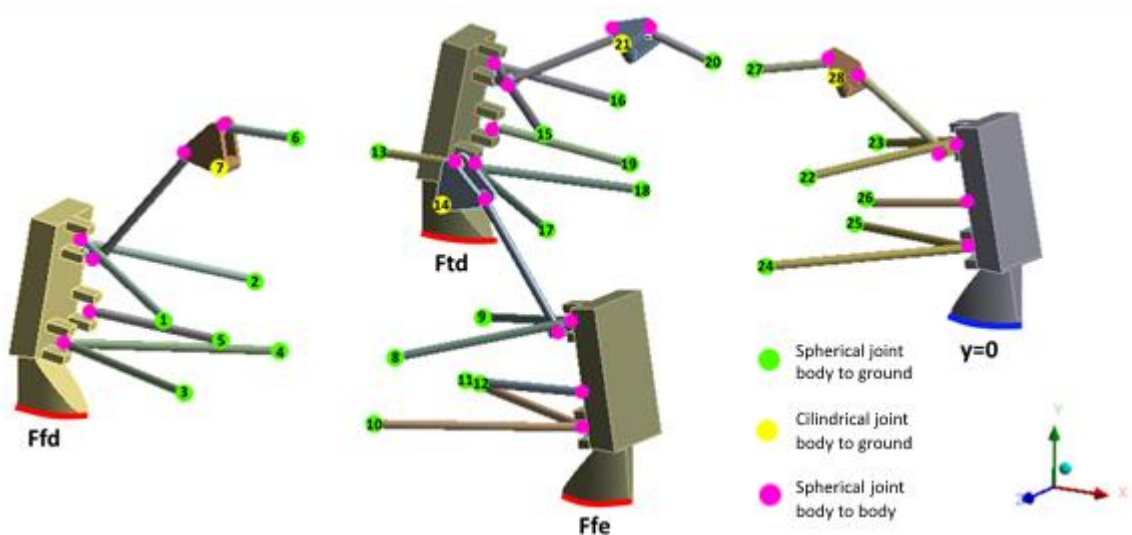


Figura 5.10 - Situação de carga para obtenção das forças nos apoios da suspensão

As forças F_{fd} , F_{td} e F_{fe} indicadas são a soma vetorial das forças calculadas anteriormente, sendo as suas componentes apresentadas na tabela 5.1, na roda traseira

esquerda foi aplicado um apoio simples pois a força resultante nesta roda era praticamente nula.

As forças resultantes em cada apoio são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Força obtida nos apoios de suspensão

Ponto de apoio	Força de reação no eixo x [N]	Força de reação no eixo y [N]	Força de reação no eixo z [N]
1	-304	181	-2
2	2396	-448	-1542
3	228	-30	0
4	-4860	73	3494
5	-327	19	0
6	-1579	3	2
7	520	-1316	172
8	632	218	0
9	-475	-33	-673
10	-2310	-34	0
11	694	10	1454
12	-70	-4	0
13	925	4	0
14	-284	-794	105
15	-137	131	0
16	2337	-406	-1120
17	1309	-100	0
18	-2777	212	1974
19	-412	60	48
20	-1132	210	-250
21	-432	-1092	-381
22 a 28	0	0	0

Obtidas as forças em cada apoio, procedeu-se à aplicação das mesmas no chassis.

A malha utilizada é a mesma que a utilizada no cálculo da rigidez torsional. Além das forças obtidas para os apoios, aplicaram-se à estrutura cinco apoios simples na zona que suporta o piloto e o motor, junto do centro de massa.

Na figura 5.11 são apresentados os apoios utilizados e os pontos de aplicação das forças do lado esquerdo do chassis

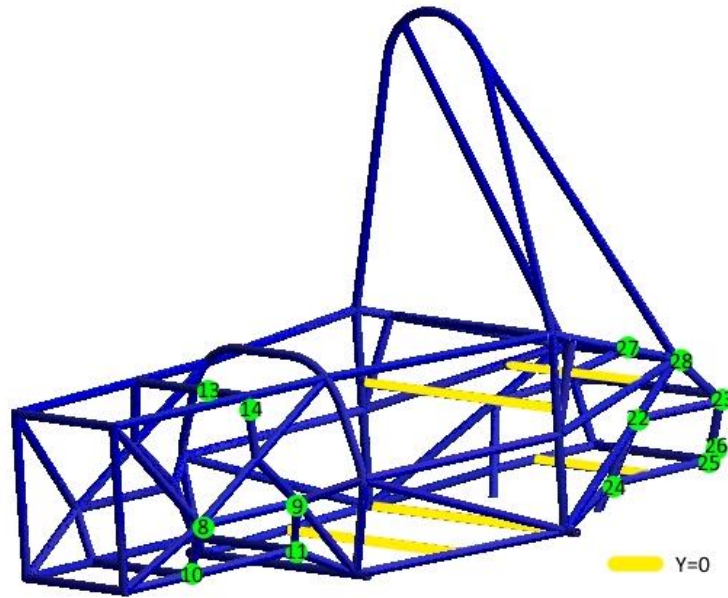


Figura 5.11 - Apoios considerados e pontos de aplicação das forças do lado esquerdo do chassis

Nas figuras 5.12 e 5.13 são apresentados os resultados obtidos.

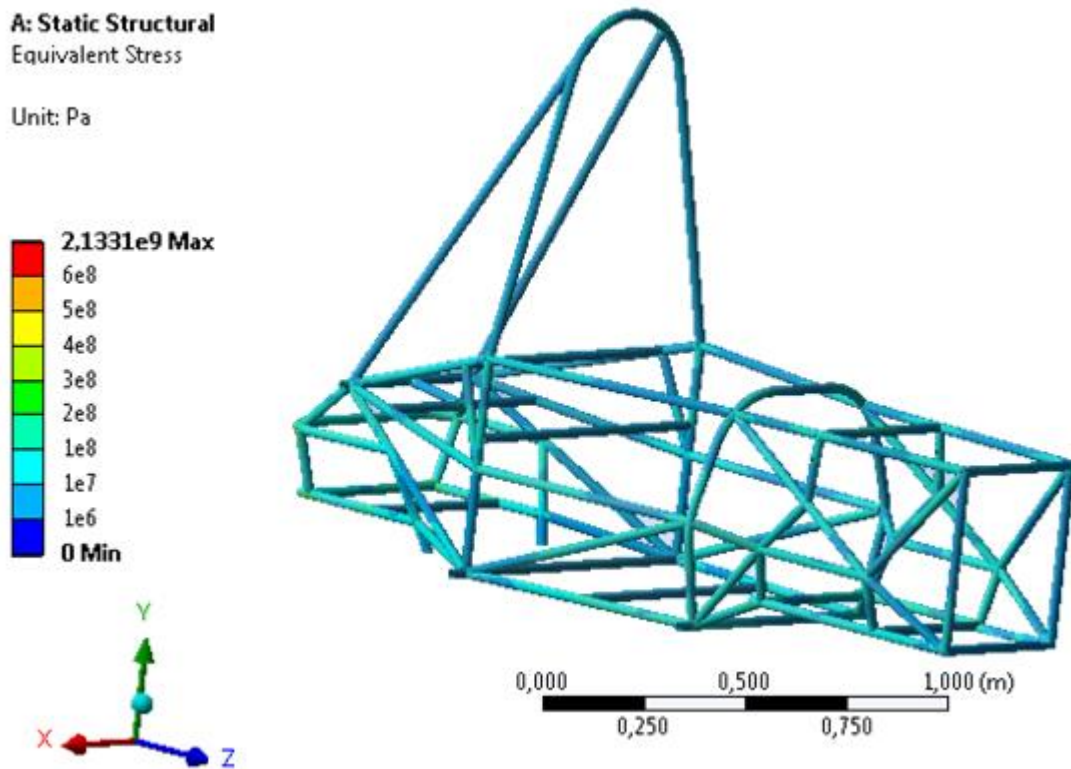


Figura 5.12 - Distribuição das tensões resultantes dos esforços aplicados pela suspensão

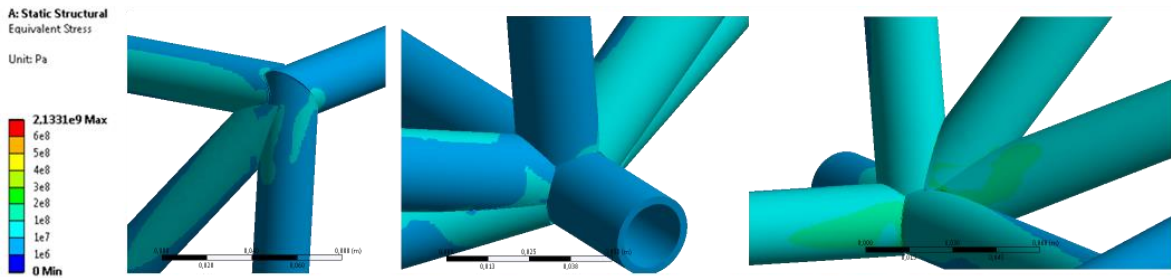


Figura 5.13 - Imagens de pormenor de algumas intersecções ao longo da estrutura

Os valores máximos de tensão registaram-se num dos pontos de apoio da suspensão, na traseira do chassis, na figura 5.14 é apresentada a zona problemática em pormenor.

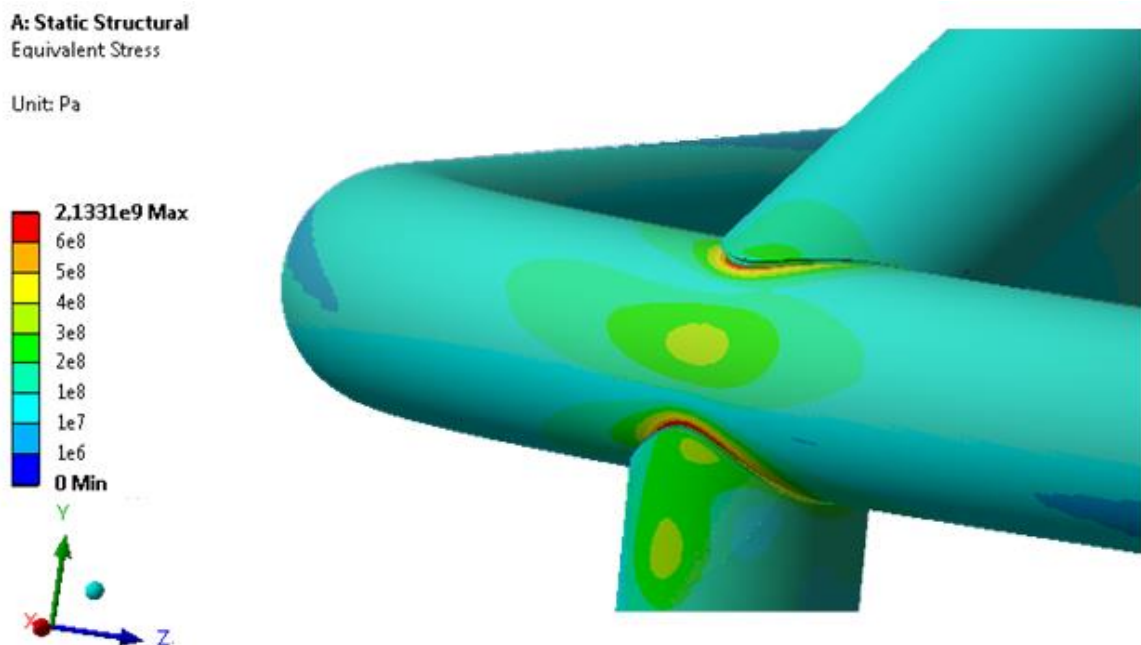


Figura 5.14 - Zona de tensão máxima

Tendo em conta a distribuição das tensões nas proximidades do pico e na restante estrutura este pico de tensão aparenta ser uma falha na ferramenta *Weld Tool*. Durante as análises com o provete computacional por vezes ocorriam erros na geração da geometria da soldadura que gravavam problemas deste género, por vezes perceptíveis visualmente durante a preparação da geometria e outras vezes imperceptíveis por se assemelharem muito a uma geometria corretamente gerada.

Também durante algumas das simulações preliminares à estrutura completa do chassis, registaram-se erros deste género em outras zonas, tendo a geometria sido preparada de raiz várias vezes na tentativa de eliminar estes erros. Devido ao longo processo de preparação de geometria e ao elevado tempo de cálculo do modelo decidiu-se considerar os

valores obtidos nesta simulação, à exceção desta zona problemática. Se excluirmos este pico de tensão, toda a estrutura apresenta valores de tensão abaixo dos 300 MPa, e, portanto, abaixo valor de tensão de cedência do material utilizado (435 MPa).

6. Conclusão

No final deste trabalho obteve-se um chassis que cumpre os requisitos para ser utilizado pela equipa FSIPLeiria nas competições futuras, assegurou-se a compatibilidade com o sistema de suspensão, motor e diferencial, pedaleira e reservou-se o devido espaço para os restantes componentes e para acomodar devidamente o piloto, tendo sido projetados ainda os apoios necessários aos componentes referidos no capítulo 3. A geometria da estrutura privilegia também a acessibilidade em torno do motor, e a possibilidade de o remover facilmente do veículo.

Os resultados obtidos ao longo do capítulo 4 evidenciam alguns problemas na aplicação do método dos elementos finitos a uma estrutura deste tipo devido à dificuldade de representar a soldadura entre os tubos, no entanto o método utilizado na secção 4.4 mostrou-se promissor para este tipo de aplicação.

Com base nos resultados obtidos no capítulo 5, pode-se afirmar que o método de modelação selecionado para as soldaduras apresenta algumas falhas quando aplicado ao chassis na sua totalidade e deveriam ser efetuados mais testes ao mesmo para tentar descobrir as causas e corrigir esses erros. Desprezando as anomalias registadas pode-se afirmar que a estrutura está preparada para os esforços a que estará sujeita no contexto da competição.

O valor de rigidez torsional obtido (2875 N.m/grau na parte frontal e 3432 N.m/grau na traseira) também se mostrou satisfatório, tendo o objetivo mínimo estabelecido pela equipa de 2000 N.m/grau sido superado.

O peso da estrutura tubular é de 35.9 kg, sendo o peso total com os apoios apresentados no capítulo 3 cerca de 38.8kg.

Como trabalhos futuros deveriam ser feitos ensaios físicos à estrutura do chassis para comprovar o método de análise. O método mais adequado, a meu ver seria efetuar o ensaio de rigidez torsional da mesma forma que realizado computacionalmente no capítulo 5, medindo o deslocamento vertical e comparando com os resultados obtidos.

Inicialmente estava previsto efetuar este teste no decorrer deste trabalho, mas não foi possível construir o chassis a tempo.

Outro trabalho sugerido é o estudo de uma solução que permita incluir na análise os apoios, reforços em chapa e insertos criados no capítulo 3, uma vez que tal não foi

conseguido neste trabalho. Os insertos e reforços em chapa adicionam rigidez à estrutura, não tendo sido possível quantificar esse benefício.

Por fim considero que também seria interessante incluir nas análises a contribuição dos componentes do veículo como o motor que adicionam também alguma rigidez à estrutura e são normalmente desprezados para este tipo de simulações.

Bibliografia

- [1] SAE International, “2016 Formula SAE® Rules,” 11 Maio 2015. [Online]. Available: http://www.fsaeonline.com/content/2016_FSAE_Rules.pdf. [Acedido em 17 Setembro 2015].
- [2] Chattopadhyay, A., Glinka, G., El-Zein, M. et al., “Stress Analysis and Fatigue of welded structures,” *Welding in the World*, pp. 2-21, Julho 2011.
- [3] Harati,E., Svensson,L., Karlsson ,L., “The measurement of weld toe radius using three non-destructive techniques,” em *6th International Swedish Production Symposium 2014*, 2014.
- [4] D. Louvros, “Investigation of the reliability deterioration of ageing marine structures,” Cranfield University, 2013.
- [5] Dassault Systemes, “Solidworks 2014,” 2014.
- [6] Ansys inc., “Ansys 16.0,” 2015.
- [7] Aerospace Specification Metals inc., “asm.matweb.com,” [Online]. Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=m4130r>. [Acedido em 24 Novembro 2015].
- [8] Reimpell, J., Stoll, H., Betzler, J., *The Automotive Chassis: Engineering Principles*, Buterworth Heinemann, 2001.

Anexo I – Excerto do Regulamento

FSAE 2016 traduzido

Abaixo são apresentadas algumas regras importantes do regulamento FSAE para este trabalho que foram traduzidas para português.

As regras são apresentadas de forma semelhante à que surgem no regulamento FSAE e a numeração apresentada corresponde à numeração original no regulamento FSAE 2016 [1].

T2.1. O veículo deve ser *open-wheel* e *open-cockpit* (estilo formula) com 4 rodas (que não estejam em linha reta), para isso as rodas devem estar desobstruídas quando em vista lateral e de planta, e nenhuma parte do veículo pode estar dentro da zona definida 75mm para a frente e 75 mm para trás da roda entre os planos definidos pelo interior e exterior da mesma.

T2.3. A distância entre eixos mínima é de 1525mm, medida entre os centros da área de contacto dos pneus.

T2.4. A largura de via do eixo mais estreito não deverá ser inferior a 75% do eixo mais largo.

T6.1.1. O veículo deve estar equipado com um sistema de suspensão completo com amortecedores, com um curso mínimo de 25.4mm em compressão e 25.4mm em extensão medidos à roda com o piloto no veículo.

T6.2. A distância ao solo deve ser suficiente para que nenhuma parte do veículo a não ser os pneus toque o solo durante os eventos dinâmicos.

T6.6.1. O veículo deve ter um apoio para um macaco rápido na traseira, que seja capaz de suportar todo o peso do veículo.

T6.6.2. O ponto de apoio para o macaco rápido deve:

- ser visível para uma pessoa que esteja 1m atrás do veículo;
- estar pintado de cor-de-laranja;
- estar na horizontal e perpendicular ao plano central do veículo;
- feito em tubo redondo de diâmetro externo entre 25mm e 29mm;

- ter um comprimento mínimo de 300mm;
- ter os 180° da zona inferior do tubo expostos ao longo de no mínimo 280mm;
- estar a no mínimo 75mm do chão;
- permitir que as rodas não toquem no chão quando o apoio se encontra a 200mm do chão;
- permitir o acesso da traseira do veículo ao longo de pelo menos 300mm de comprimento;

T6.7.2. O veículo não deve capotar quando inclinado lateralmente a 60° com o piloto mais alto em posição de condução.

T3.3. Definições:

- main hoop* – arco localizado junto ao tronco do piloto;
- front hoop* – arco localizado junto às pernas do piloto e ao volante;
- roll hoop* – tanto o *main hoop* como o *front hoop* são considerados roll hoops;
- roll hoop bracing support* – estrutura que liga a zona inferior do *roll hoop bracing* ao *roll hoop*;
- frame member* – um tubo contínuo (elemento básico do chassis);
- estrutura primária – a estrutura primária engloba:
 - main hoop*;
 - front hoop*;
 - roll hoop bracing* e *roll hoop bracing supports*;
 - estrutura de impacto lateral
 - front bulkhead*;
 - front bulkhead supports*;
 - todos os *frame members* e *supports* que transfiram carga para os membros referidos acima;
- estrutura principal do chassis – porção do chassis englobada no envelope formado pela estrutura primária, exceto a parte superior do *main hoop* e o *main hoop bracing*;

-*front bulkhead* – estrutura que define o plano frontal da estrutura principal do chassis e protege os pés do piloto;

-atenuador de impacto – um componente deformável, projetado para absorver energia, localizado à frente da *front bulkhead*;

-zona de impacto lateral – zona compreendida entre o solo e 350mm acima deste, entre o *front hoop* e o *main hoop*;

-devidamente triangulado – uma estrutura diz-se devidamente triangulada quando a projeção da mesma num plano resulta numa estrutura onde uma força co-planar aplicada em qualquer direção e em qualquer nó resulta apenas em forças de compressão e tração nos *frame members*;

T3.4.1. A estrutura principal deve ser construída por tubo de aço, macio ou ligado (no mínimo 0.1% de carbono), com as dimensões mínimas apresentadas na tabela abaixo ou uma alternativa de acordo com as regras T3.5, T3.6 ou T3.7:

ITEM or APPLICATION	OUTSIDE DIMENSION X WALL THICKNESS
Main & Front Hoops, Shoulder Harness Mounting Bar	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.095 inch (2.4 mm) or Round 25.0 mm x 2.50 mm metric
Side Impact Structure, Front Bulkhead, Roll Hoop Bracing, Driver's Restraint Harness Attachment (except as noted above)	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.065 inch (1.65 mm) or Round 25.0 mm x 1.75 mm metric or Round 25.4 mm x 1.60 mm metric or Square 1.00 inch x 1.00 inch x 0.047 inch
EV: Accumulator Protection Structure	or Square 25.0 mm x 25.0 mm x 1.20 mm metric
Front Bulkhead Support, Main Hoop Bracing Supports EV: Tractive System Components	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.047 inch (1.20 mm) or Round 25.0 mm x 1.5 mm metric or Round 26.0 mm x 1.2 mm metric

A utilização de tubo com maior espessura, ou maior diâmetro externo que o indicado na tabela é permitido.

Todos os furos em tubos regulamentados exceto os furos de inspeção requerem a submissão de um SES.

As propriedades do material a considerar nos cálculos do SES não devem ser inferiores às seguintes:

Em análises de flexão e flambagem:

Módulo de Young = 200GPa;

Tensão de cedência = 305 MPa;

Tensão de rotura = 365 MPa;

Em cálculo de juntas soldadas:

Tensão de cedência = 180 MPa;

Tensão de rotura = 300 MPa;

Nos locais onde são necessários reforços soldados, o tubo deve manter as características de base, enquanto que para o material de reforço devem ser consideradas as propriedades para juntas soldadas.

Qualquer tubo com dimensões inferiores a 1”x0.047” não será considerado estrutural e será ignorado perante as regras da parte T (regulamento de chassis base).

T3.5.1. Poderão ser utilizadas geometrias e/ou materiais alternativos exceto no *main hoop* e *main hoop bracing*, que deverão ser construídos em aço.

T3.5.2. A utilização de titânio ou magnésio nos quais tenha sido efetuada soldadura é proibida na estrutura primária. Isto inclui a ligação da mesma a outros componentes ou reforços.

T3.5.3. Caso a equipa opte por utilizar materiais ou geometrias alternativas, deve submeter um SES de acordo com a regra T3.9. A equipa deve submeter cálculos para o material que selecionou, que demonstrem equivalência aos requisitos mínimos exigidos pela regra T3.4.1 para a tensão de cedência e rotura nas situações de flexão, flambagem e tração, e ainda o módulo de flambagem e a dissipação de energia.

T3.5.4. A espessura dos tubos não deve ser inferior à definida pelas regras T3.6 e T3.7.

T3.5.5. Se um tubo curvado, ou um conjunto de tubos que formem um *frame member* que não estejam em linha reta, for usado na estrutura primária à exceção dos *roll hoops* é necessário utilizar um tubo adicional para o apoiar. O tubo adicional deve ser acoplado no ponto mais distante á linha reta formada entre as duas extremidades do tubo dobrado e ligar a um nó do chassis. O tubo de suporte deve ter a mesma espessura e diâmetro exterior que o tubo dobrado e formar um ângulo igual ou inferior a 45° com o plano do tubo dobrado. Tubos acoplados ao *upper side impact member* podem estar a mais de 45° do plano do tubo dobrado.

T3.6. A espessura mínima para tubos de aço é apresentada nas tabelas abaixo.

Sem necessidade de ensaios físicos:

MATERIAL & APPLICATION	MINIMUM WALL THICKNESS
Steel Tubing for Front and Main Roll Hoops, and Shoulder Harness Mounting Bar	2.0 mm (0.079 inch)
Steel Tubing for Roll Hoop Bracing, Roll Hoop Bracing Supports, Side Impact Structure, Front Bulkhead, Front Bulkhead Support, Driver's Harness Attachment (except as noted above), Protection of HV accumulators, and protection of HV tractive systems	1.2 mm (0.047 inch)

Para equipas que submetam ensaios físicos:

MATERIAL & APPLICATION	MINIMUM WALL THICKNESS
Steel Tubing for Front and Main Roll Hoops, and Shoulder Harness Mounting Bar	1.6 mm (0.065 inch)
Steel Tubing for Roll Hoop Bracing, Roll Hoop Bracing Supports, Side Impact Structure, Front Bulkhead, Front Bulkhead Support, Driver's Harness Attachment (except as noted above), Protection of HV accumulators, and protection of HV tractive systems	0.9 mm (0.035 inch)

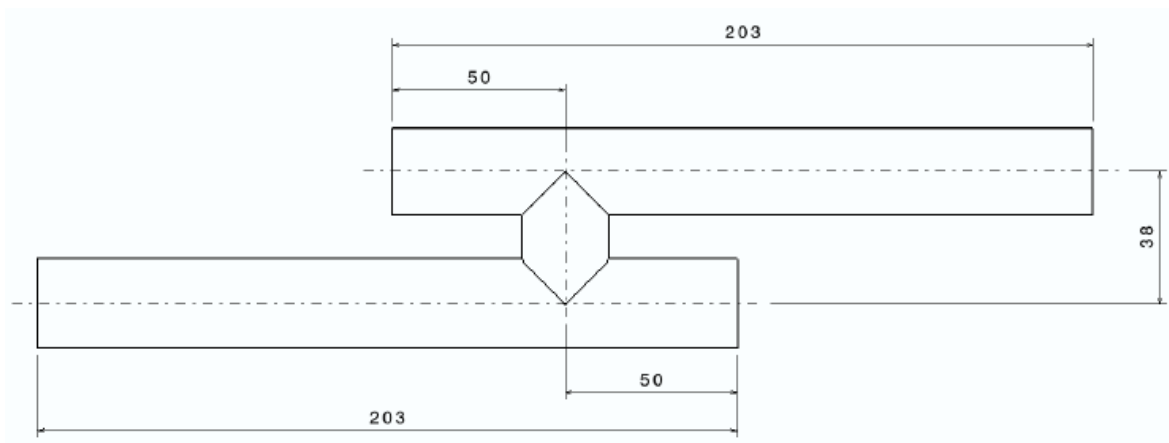
Perante este regulamento todo o aço é tratado como igual independentemente dos elementos de liga ou tratamentos térmicos.

Equipas que utilizem espessuras inferiores às da regra T3.4.1 devem utilizar um maior diâmetro exterior.

Para manter a equivalência da tensão de cedência e tensão de rotura, deve ser mantida a mesma área de secção do tubo.

T3.6.1. Devem ser construídos provetes de acordo com o método de junção dos tubos utilizados no chassis e tracionados para determinar a resistência e qualidade dos mesmos.

T3.6.2. Os provetes devem ser construídos de acordo com a geometria e dimensões apresentadas na figura abaixo:



T3.6.3. Os provetes devem obedecer às seguintes imposições:

- os provetes devem ser construídos do mesmo aço que o utilizado no chassis;
- para cada configuração alternativa usada é necessário testar e comparar essa configuração e a correspondente configuração base;
- devem ser fabricados e testados dois exemplares de cada provete, isto significa que para cada configuração alternativa são necessários no mínimo 4 testes, 2 do provete alternativo e 2 da correspondente configuração base. A relação entre as configurações base e alternativas são apresentadas na tabela abaixo:

Baseline joint			Alternate tube thickness joint	
inches	metric		inches	metric
1"x0.095" to 1"x0.047"	25.4mm x 2.4 mm to 25.4mm x 1.2 mm	-->	1"x0.095" to 1.375"x0.035"	25.4mm x 2.4 mm to 34.9mm x 0.9 mm
1"x0.063" to 1"x0.047"	25.4mm x 1.6 mm to 25.4mm x 1.2 mm	-->	1"x0.063" to 1.375"x0.035"	25.4mm x 1.6 mm to 34.9mm x 0.9 mm
1"x0.047" to 1"x0.047"	25.4mm x 1.2 mm to 25.4mm x 1.2 mm	-->	1"x0.047" to 1.375"x0.035"	25.4mm x 1.2 mm to 34.9mm x 0.9 mm
1"x0.047" to 1"x0.047"	25.4mm x 1.2 mm to 25.4mm x 1.2 mm	-->	1.375"x0.035" to 1.375x0.035"	34.9mm x 0.9 mm to 34.9mm x 0.9 mm

- o tubo com menor espessura deve ser o tubo mais curto no centro do provete em H;
- é permitido modificar ou adicionar material nas pontas dos provetes para introduzir no equipamento de ensaio. As modificações devem ser consistentes ao longo de todos os testes.
- Qualquer tratamento térmico efetuado após a soldadura deve ser consistente ao longo de todos os provetes, e consistente com o tratamento do chassis. É proibido alterar a geometria da soldadura (rebarbar ou lixar);

T3.6.4. Os provetes devem ser tracionados até a rotura. Devem ser submetidas no SES as curvas força vs. deslocamento para todos os provetes. Os testes físicos são considerados válidos se a carga mínima de rotura de ambos os provetes alternativos for no mínimo 95% da carga de rotura mais baixa dos provetes base correspondentes. Os resultados dos testes devem ser documentados no SES ou SRCF e os provetes devem estar disponíveis no local da competição para inspeção durante a prova.

T3.7.1. A espessura mínima para tubo de alumínio é de 3mm.

T3.7.2. A tensão de cedência a considerar deve ser para alumínio soldado, a menos que a equipa apresente provas em como o chassis foi devidamente tratado termicamente e envelhecido artificialmente.

T3.7.3. Caso o chassis seja tratado termicamente e envelhecido artificialmente, a equipa deve apresentar documentação que comprove o processo utilizado, incluindo as instalações usadas, o processo aplicado e o método de fixação das peças.

T3.8.1. Caso seja utilizado um material compósito, a equipa deve submeter documentação com informação sobre o material, como recibo dos materiais, propriedades físicas, etc. Além disso devem também submeter informação acerca das técnicas de fabrico dos componentes, resinas e outros materiais utilizados, número de camadas e orientação, etc.

T3.8.2. É proibida a utilização de compósitos no *main hoop* e *front hoop*.

T3.9. Todas os cálculos de equivalência devem provar a equivalência ao aço AISI1010.

T3.9.1. Todas as equipas devem submeter um SES ou um SRCF, consoante optem pelo regulamento T ou AF respetivamente.

T3.10.1. As mãos e cabeça do piloto devem estar protegidas de tocar o solo em caso de capotamento.

T3.10.2. o chassis deve incluir um *main hoop* e um *front hoop*.

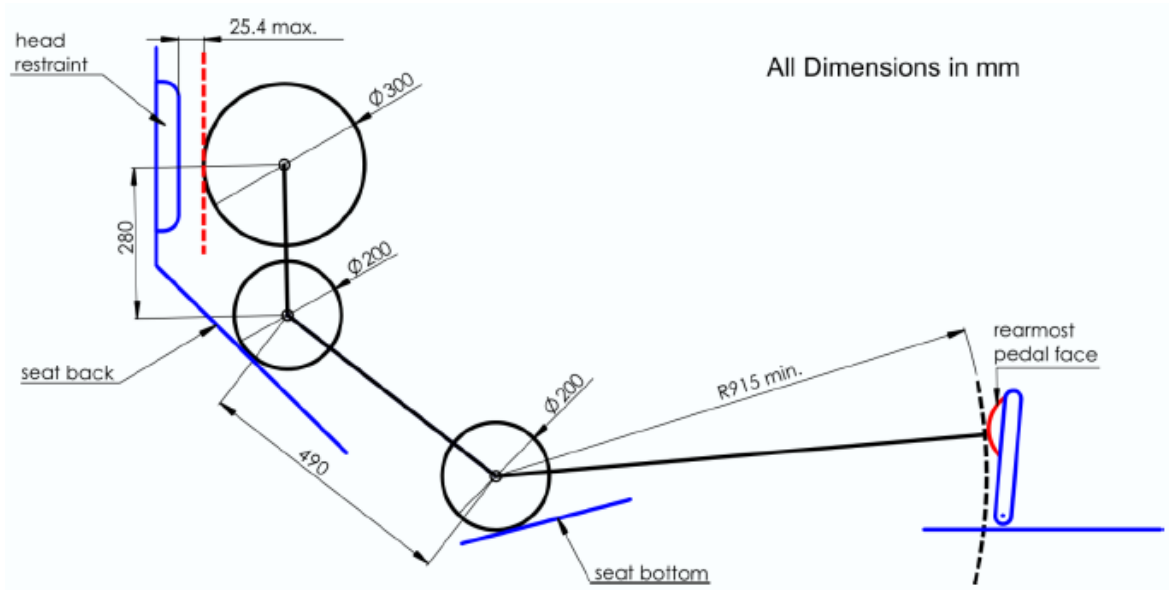
T3.10.3. Quando sentado em posição de condução, com os cintos postos o capacete de qualquer piloto da equipa e do *template* que cumpre o percentil 95 dos homens deve:

-ficar a no mínimo 50.8mm da linha reta entre o topo do *main hoop* e o topo do *front hoop*;

-ficar no mínimo a 50.8mm da linha reta entre o topo do *main hoop* e o fundo do *main hoop bracing* se este estiver para trás do *main hoop*.

-ficar para a frente da superfície traseira do *main hoop* se o *main hoop bracing* estiver para a frente do *main hoop*.

T3.10.4. O *template* será colocado no veículo da seguinte forma, e apresentas as seguintes dimensões:



T3.10.7. O raio mínimo de qualquer curva no tubo, medido ao centro do mesmo, deve ser no mínimo 3 vezes o diâmetro exterior. As curvas devem ser contínuas, sem indícios de rotura da superfície do tubo nem vincos.

T3.10.8. Os *roll hoops* devem robustamente estar integrados na estrutura primária e devidamente triangulados.

T3.11.1. O *main hoop* deve ser construído a partir de um único tubo de aço contínuo.

T3.11.3. O *main hoop* deve prolongar-se desde o *frame member* mais baixo de um lado do veículo ao *frame member* mais baixo do outro lado do veículo.

T3.11.4. Em vista lateral, nenhuma parte do *main hoop* que esteja acima do ponto de apoio do mesmo à estrutura principal do chassis deve estar a mais de 10° da vertical.

T3.11.5. Em vista lateral, qualquer curva no *main hoop*, acima do ponto de apoio com a estrutura principal do chassis deve ser triangulada a um nó do *main hoop bracing support* com tubo que respeite os requisitos para *roll hoop bracing* da regra T3.4.1.

T3.11.6. Em vista lateral, nenhuma parte do *main hoop* localizada abaixo do ponto de apoio com a estrutura principal do chassis pode estar inclinado a mais de 10° da vertical para trás. Não existe restrição quando a inclinação é para a frente.

T3.11.7. Em vista frontal, as porções verticais do *main hoop* devem estar distanciadas no mínimo de 380mm no ponto em que o *main hoop* apoia nos *frame members* mais baixos da estrutura principal do chassis.

T3.12.2. O *front hoop* deve prolongar-se desde o *frame member* mais baixo de um dos lados do chassis até ao *frame member* mais baixo do outro lado.

T3.12.3. Com triangulação adequada, é possível fabricar o *front hoop* a partir de vários tubos.

T3.12.4. O topo do *front hoop* não deve estar abaixo do topo do volante, qualquer que seja a posição deste último.

T3.12.5. O *front hoop* não deve estar a mais de 250mm do volante. Esta medida é feita longitudinalmente entre a face posterior do *front hoop* e a face anterior da zona exterior do volante, com as rodas a apontar em frente.

T3.12.6. Em vista lateral, nenhuma porção do *front hoop* pode estar inclinada mais de 20° em relação à vertical.

T3.13.2. O *main hoop* deve ser suportado por dois *frame members* que se devem prolongar para a frente ou para trás do mesmo, de ambos os lados do veículo.

T3.13.3. Se o *main hoop* estiver inclinado para a frente, o *main hoop bracing* deve estar para a frente do *main hoop*. Caso o *main hoop* incline para trás o *bracing* deve estar atrás do mesmo.

T3.13.4. O *main hoop bracing* deve ligar ao *main hoop* o mais próximo do topo possível, e nunca a mais de 160mm da superfície superior do mesmo. O ângulo entre o *main hoop* e o *main hoop bracing* deve ser no mínimo de 30°.

T3.13.5. Os tubos do *main hoop bracing* não podem ser curvados.

T3.13.6. O *main hoop bracing* deve estar robustamente integrado no chassis e ser capaz de transmitir as cargas aplicadas ao *main hoop* para a estrutura principal do chassis.

T3.13.7. A parte inferior do *main hoop bracing* deve ser apoiada de volta ao *main hoop* por no mínimo dois *frame members* de cada lado do veículo. O *frame member* superior deve

ligar ao nó onde o tubo superior da estrutura de impacto lateral liga ao *main hoop*. O *frame member* inferior deve ligar ao nó onde o tubo inferior da estrutura de impacto lateral liga ao *main hoop*. Todos estes *frame members* devem estar devidamente triangulados.

T3.13.9. Se algum componente fora do envelope da estrutura primária do chassis for acoplado ao *main hoop bracing*, é necessário adicionar reforços de forma a evitar esforços de flexão no *main hoop bracing* para qualquer situação de capotamento.

T3.14.2. O *front hoop* deve ser suportado por dois *frame members* que se prolonguem para a frente de ambos os lados do veículo.

T3.14.3. O *front hoop bracing* deve ser construído de forma a proteger as pernas do piloto e deve prolongar-se até à estrutura à frente dos pés do piloto.

T3.14.4. O *front hoop bracing* deve ser acoplado o mais próximo possível do topo do *front hoop*, e nunca a mais de 50.8mm da face superior do mesmo.

T3.14.5. Se o *front hoop* estiver inclinado para trás mais de 10° em relação á vertical, deve ser apoiado por mais dois *front hoop braces* atrás do mesmo.

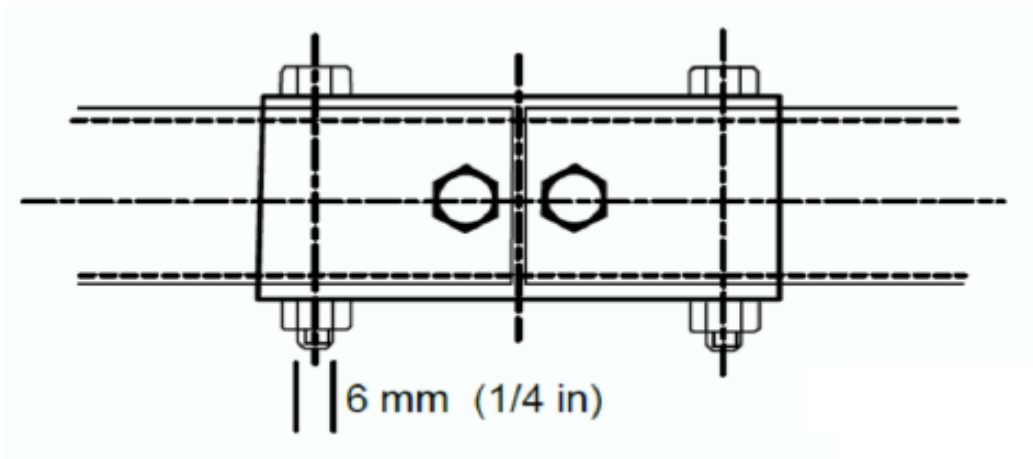
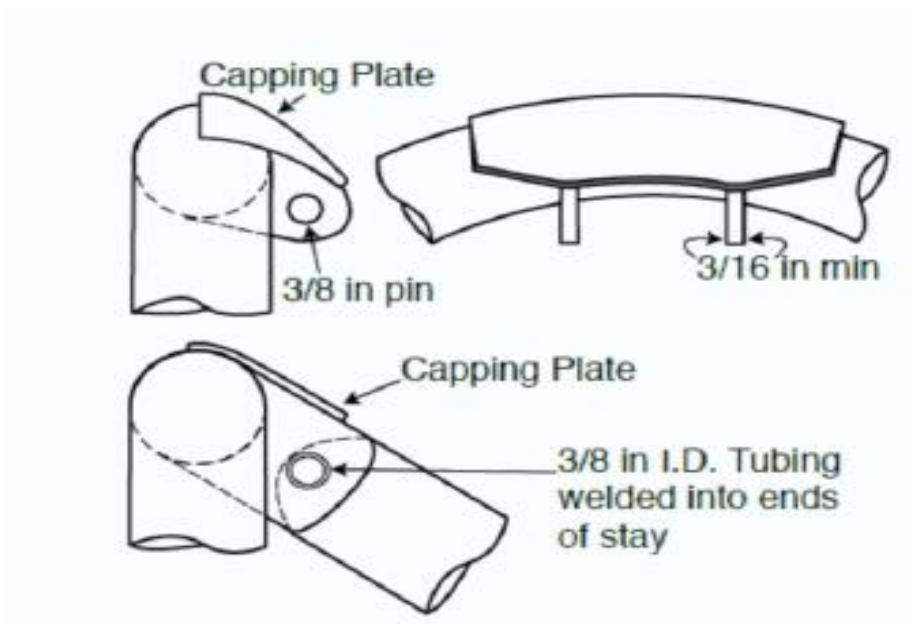
T3.14.6. Os pés e pernas do piloto devem estar completamente contidos dentro da estrutura principal do chassis.

T3.15. Nas situações em que as estruturas de *bracing* não sejam soldadas aos *frame members* que suportam, estas devem ser acopladas de forma robusta com recurso a parafusos de 8mm ou mais e classe de qualidade 8.8 ou superior. As placas de montagem devem ter espessura mínima de 2mm.

T3.16. Se houver algum *frame member* lado a lado com o piloto à altura do pescoço, é necessário adicionar um tubo ou reforço em chapa que impeça os ombros do piloto de passar por baixo do *frame member* e o pescoço de tocar o mesmo.

T3.17.1. O *roll hoop bracing* pode ser acoplado mecanicamente.

T3.17.2. Qualquer ligação não permanente no *roll hoop bracing* deve ser semelhante ao apresentado nas figuras abaixo. Os parafusos devem trabalhar ao corte de ambos os lados.



T3.17.3. Os parafusos usados nas ligações não permanentes do chassis são considerados como críticos.

T3.17.4. Não é permitido o uso de rótulas nas uniões não permanentes do chassis.

T3.17.5. Nas ligações do tipo *double-lug* cada *lug* deve ter uma espessura mínima de 4.5mm em aço, 25mm de largura perpendicular ao eixo do *bracing* e ser o mais curta possível.

T3.17.6. As ligações do tipo *double-lug* devem incluir *capping* de acordo com a figura anterior.

T3.17.7. Nas ligações do tipo *double-lug* o pino ou parafuso devem ter no mínimo 10mm de diâmetro e classe de qualidade 9.8.

T3.17.8. Para ligações topo a topo, a manga deve ter no mínimo 76mm de comprimento, 38mm para cada lado, e ser justa a ambos os tubos. A espessura mínima deve ser igual à dos tubos. Os parafusos devem ter um diâmetro mínimo de 6mm e classe de qualidade 9.8.

T3.18.2. A *bulkhead* frontal deve estar localizada à frente de todos os componentes não deformáveis (ex:bateria, bombas de travão, reservatórios,etc.).

T3.18.3. A *bulkhead* frontal deve estar localizada à frente dos pés do piloto. As solas dos pés do piloto, quando pousadas nos pedais mas sem os atuar devem ficar atrás do plano da *bulkhead* frontal, para qualquer posição da pedaleira.

T3.19.1. A *bulkhead* frontal deve estar robustamente integrada no chassis.

T3.19.2. A *bulkhead* frontal deve ser triangulada ao *front hoop* por no mínimo 3 *frame members* de cada lado do veículo.

O membro superior deve estar a 50mm ou menos da superfície superior do *front hoop* e numa zona 100mm acima ou 50mm abaixo do ponto onde o *frame member* superior da estrutura de impacto lateral é acoplado ao *front hoop*. Se o *bracing* superior da *bulkhead* frontal estiver a mais de 100mm acima do *frame member* superior da estrutura de impacto lateral, é necessário triangulação adequada para transferir as cargas para o ponto de apoio do mesmo no *front hoop*.

O membro inferior deve ligar a base da *bulkhead* frontal à base do *front hoop*.

O membro diagonal deve triangular o membro inferior ao superior.

T3.20.2. O atenuador de impacto deve:

- estar localizado à frente da *bulkhead* frontal;
- ter um comprimento mínimo de 200mm;
- ter no mínimo 100mm de altura e 200mm de largura durante um comprimento mínimo de 200mm;
- ser construído de forma a que não atravesse a *bulkhead* frontal em caso de impacto.
- estar robustamente acoplado à *bulkhead* frontal e não fazer parte de nenhum componente não estrutural.

T3.20.3. Deve existir uma placa anti-intrusão integrada no atenuador de impacto, com espessura mínima de 1.5mm de aço ou 4mm de alumínio. Caso a mesma esteja aparafusada

à *bulkhead* frontal, a placa deve ter as mesmas dimensões exteriores da *bulkhead*. Caso seja soldada deve prolongar-se no mínimo até à linha central dos tubos que formam a *bulkhead*.

T3.20.4. São permitidos designs alternativos para a placa anti intrusão, sendo necessário demonstrar equivalência à regra T3.20.3 de acordo com a regra T.38.

T3.20.5. Se o atenuador de impacto não for solidário com o chassis (ex. soldado), é necessário utilizar no mínimo 4 parafusos de 8mm de diâmetro e classe de qualidade 8.8 para fixar o mesmo á *bulkhead* frontal.

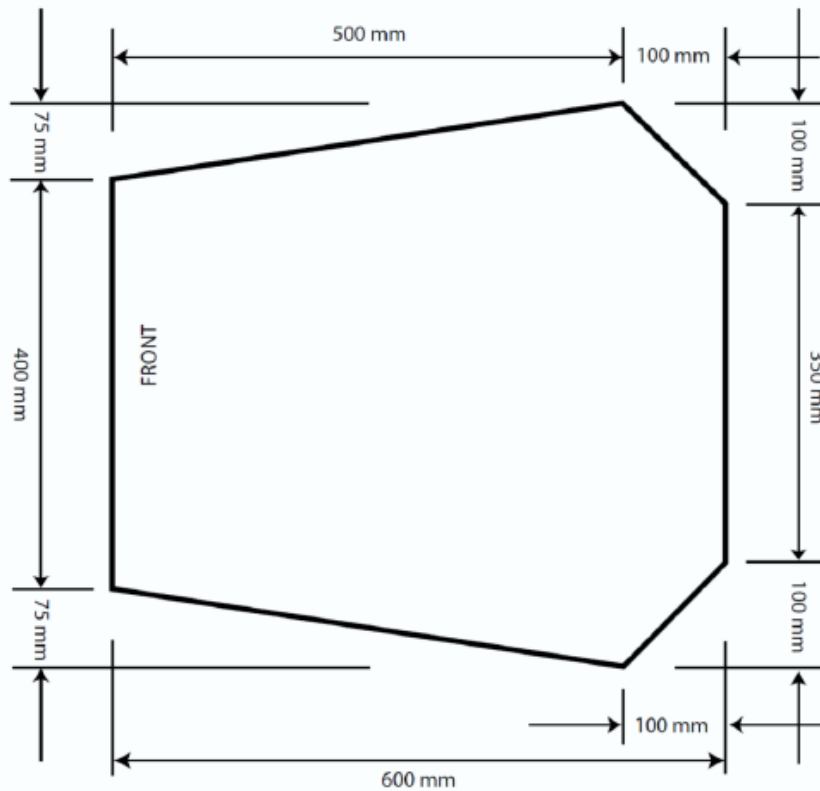
T3.20.6. O atenuador de impacto e a sua fixação devem estar preparados para suportar cargas descentradas, verticais e transversais.

T3.24.3. Os 3 tubos da estrutura lateral de impacto obrigatórios de cada lado do veículo devem obedecer às seguintes condições:

- o membro superior deve ligar o *front hoop* ao *main hoop*. Todo o membro superior deve estar contido numa zona entre 300mm e 350mm acima do solo com um piloto de 77kg sentado em posição de condução;
- o membro inferior deve ligar o fundo do *front hoop* e o fundo do *main hoop*;
- o membro diagonal deve ligar os dois mencionados anteriormente.

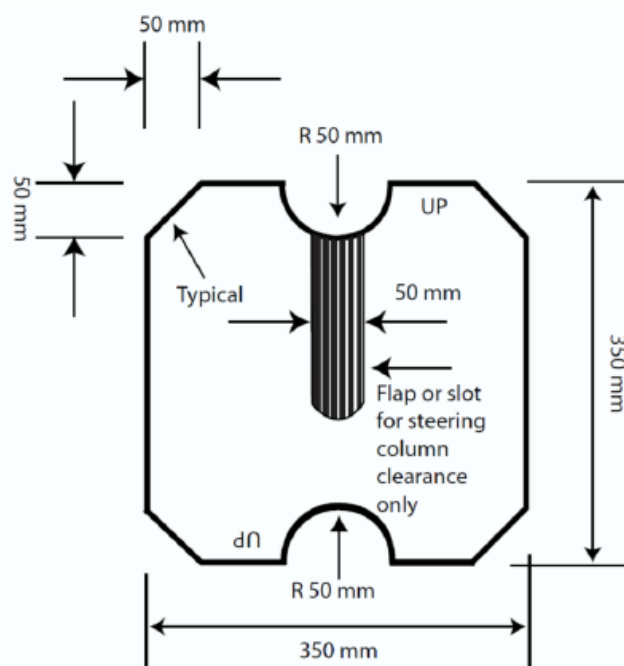
T3.24.4. Com a devida triangulação é permissível fabricar qualquer um destes membros a partir de vários tubos.

T4.1.1. Para garantir uma abertura adequada, o *template* apresentado na figura abaixo é introduzido na abertura do habitáculo até à altura do tubo superior da estrutura lateral de impacto. Durante o teste o *template* é mantido na horizontal podendo mover-se longitudinalmente e transversalmente.



T4.1.2. Durante o teste anteriormente referido é permitido remover o volante, coluna de direção, *baquet* e *padding*. É permitido remover o mecanismo de atuação da caixa de velocidades, apenas se este estiver acoplado ao volante e for removido junto com o mesmo.

T4.2.1. O habitáculo deve ter uma secção interna desimpedida, que se estende até uma posição 100mm atrás dos pedais por onde será passado o *template* da figura abaixo.



T4.2.2. O *template* com espessura inferior a 7mm é mantido na vertical e inserido atrás do *front hoop*, o mais próximo possível do mesmo.

T4.2.3. Para o teste apenas pode ser removido o volante e a espuma que cobre a coluna de direção.

T4.3.1. O ponto mais baixo da *baquet* não deve estar abaixo dos *frame members* mais baixos do chassis. Se tal ocorrer, deve ser adicionado um tubo longitudinal que cumpra os requisitos para a estrutura de impacto lateral por baixo do ponto mais baixo *baquet*.

T4.3.2. Quando sentado em posição de condução, o piloto deve estar protegido de componentes que possam atingir temperaturas superficiais superiores a 60°C. Para assegurar proteção contra as 3 formas de transmissão de calor, esta proteção deve obedecer às seguintes condições:

- não contactar diretamente com a fonte de calor ou possuir um material isolador por condução com uma espessura mínima de 8mm (condução);

- haver uma distância mínima de 25mm de ar à fonte de calor (convecção);

- possuir um escudo sólido metálico com espessura mínima de 0.4mm ou um revestimento com fita ou folha refletora se combinado com o material isolador à condução.

T4.5.1. Deve existir um corta-fogo entre o piloto e os componentes dos sistemas de refrigeração, lubrificação e alimentação de combustível. Esta proteção deve prolongar-se de forma a proteger o pescoço do piloto mais alto, de tal forma que a 100mm acima do fundo do capacete não seja possível ver diretamente nenhum dos componentes dos sistemas referidos.

T4.5.2. O corta-fogo deve ser impermeável, feito de um material rígido e resistente ao fogo.

T4.5.3. O corta-fogo deve impedir a passagem de fluidos, principalmente nas zonas laterais e inferiores do habitáculo.

Além das regras definidas pelo regulamento FSAE existe uma regra importante do regulamento específico *Formula Student Germany Combustion*, que obriga à colocação de tubos longitudinais ou de uma placa protetora abaixo da zona inferior do motor, para proteger o cárter.

