



PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE QUADRO PARA VEÍCULO DE DESPORTO MOTORIZADO

MIGUEL COSTA PEREIRA

outubro de 2023

PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE QUADRO PARA VEÍCULO DE DESPORTO MOTORIZADO

Miguel Costa Pereira

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE QUADRO PARA VEÍCULO DE DESPORTO MOTORIZADO

Miguel Costa Pereira

1170692

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Fernando José Ferreira e coorientação do Doutor Jorge Fonseca Justo

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

JÚRI

Presidente

Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Orientador

Doutor Fernando José Ferreira

Coorientador

Doutor Jorge Manuel Costa da Fonseca Justo

Arguente

Doutor José Luís Soares Esteves

página propositadamente em branco

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Doutor Fernando José Ferreira por toda a disponibilidade, ajuda, orientação e aconselhamento fornecido.

Ao meu coorientador Doutor Jorge Fonseca Justo pelo tempo disponibilizado e informação fornecida durante todo o processo de avaliação.

Aos meus pais que durante toda a vida académica sempre me proporcionaram as melhores oportunidades e conselhos e nunca me negaram qualquer apoio necessário.

Desejo também agradecer à restante família e amigos, que de alguma forma contribuíram não só para todo o processo da dissertação, mas também em toda a vida académica.

página propositadamente em branco

RESUMO

Esta dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de um quadro desportivo bi-lugar, fechado ou aberto, e posterior avaliação através de programas de engenharia assistida por computador.

Para o desenvolvimento deste quadro foi tido em conta o regulamento fornecido pela federação internacional do automobilismo - FIA, sendo proposto um desenho de estrutura com as dimensões mínimas requeridas, capaz de superar os ensaios previstos e poder no final ser validada por esta entidade. Para isto, foram realizadas simulações recorrendo a programas de análise de método dos elementos finitos, considerando um ensaio no regime linear material e geométrico, de forma a obter resultados dentro dos limites impostos pelo regulamento da instituição.

De forma a se poderem realizar as simulações teve-se de efetuar a escolha das seções de tubo a utilizar conforme o especificado no regulamento, e tendo em conta a rigidez e os esforços a que este tipo de estruturas estão sujeitos, sendo depois aplicado no devido programa como elementos de viga. Já para o caso das placas aplicadas no quadro, estas foram tratadas como elementos de casca.

De forma a se cumprir o regulamento foram realizadas as simulações dos ensaios. Realizaram-se cinco simulações, três delas com respeito à avaliação da célula de sobrevivência, e os outros dois referentes ao estudo da estrutura de anti-capotamento. Para todas as simulações foram analisados os resultados referentes ao deslocamento em carga e às tensões equivalentes de Von-Misses, sempre obtido segundo um regime linear elástico.

Como resultados foram obtidos valores satisfatórios e sempre dentro dos limites referidos nos regulamentos FIA. No caso da avaliação da célula de sobrevivência tinha-se como limite 1 mm de deslocamento permanente ou não ultrapassar o valor da tensão de limite elástica do material. Para o primeiro e segundo caso de carga foram obtidos valores de deslocamento inferiores ao máximo imposto e também na análise de tensões o valor da tensão de limite elástica do material não foi ultrapassada, obtendo-se assim uma validação destas duas simulações. Quanto ao terceiro caso de carga este obteve um valor de deslocamento superior a 1 mm, mas quando avaliado, os valores de tensão instalada não ultrapassavam o valor de limite elástico do material, não apresentando deste modo uma deformação permanente, podendo também ser validada esta simulação.

Para o estudo da estrutura de anti-capotamento foram estabelecidos limites de deslocamento máximo em regime elástico de 50 mm quando não ultrapassada a tensão de limite elástica do material, ou um deslocamento permanente de 100 mm no caso de ultrapassar a tensão de limite elástica do material. Para ambos os casos de carga, no arco principal e no traseiro, obtiveram-se valores de deslocamento muito inferiores ao limite imposto pelo regulamento, e quanto aos valores de tensões aplicadas retiraram-se valores também inferiores ao limite elástico do material, podendo-se assim considerar válida a simulação.

PALAVRAS-CHAVE

Quadro Tubular; Categoria CN FIA; Veículo Desportivo; Método dos Elementos Finitos; Simulações Numéricas.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

The aim of this dissertation was to develop a closed or open two-seater sports frame and then evaluate it using computer-aided engineering programs.

The regulations provided by the International Automobile Federation were taken into account in the development of this frame, and in the end a structure validated by the federation was obtained. Simulations were then carried out using finite element method analysis programs, considering a test in the linear material and geometric regime, in order to obtain results within the limits imposed by the institution's regulations.

In order to carry out the simulations, the pipe sections to be used had to be chosen as specified in the regulations, taking into account the rigidity and stresses to which this type of structure is subject, and then applied in the appropriate programs as beam elements. As for the plates applied to the frame, they were treated as shell elements.

In order to comply with the regulations, simulations were carried out. Five simulations were carried out, three of which concerned the assessment of the survival cell and the other two the study of the anti-tip structure. For all the simulations, the results relating to the displacement under load and the equivalent Von-Mises stresses were analyzed, always obtained according to a linear elastic regime.

The results were satisfactory. In the case of the survival cell evaluation, the limit was 1 mm of permanent displacement or not exceeding the value of the elastic limit stress of the material. For the first and second load cases, displacement values were lower than the maximum imposed and also in the stress analysis, the value of the elastic limit stress of the material was not exceeded, thus obtaining a validation of these two simulations. As for the third load case, it obtained a displacement value of more than 1 mm, but when the installed stress values were evaluated, it was found that it did not exceed the elastic limit value of the material, thus not presenting permanent deformation, and this simulation can also be validated.

For the study of the anti-tip structure, maximum elastic displacement limit of 50mm were set when the elastic limit stress of the material was not exceeded, or a permanent displacement of 100 mm if the elastic limit stress of the material was exceeded. For both load cases, in the main and rear arches, displacement values were much lower than the limit imposed by the regulations, and the applied stress values were also lower than the elastic limit of the material, so the simulation can be considered valid.

KEYWORDS

Tubular Frame; Finite Element Method; Numerical Simulations; Group CN FIA; Racing Car.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | IX |
| ÍNDICE DE TABELAS | XV |
| LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS..... | XVII |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Contextualização | 1 |
| 1.2. Objetivos | 1 |
| 1.3. Metodologia | 2 |
| 1.4. Estrutura da Dissertação | 2 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 2.1. Regulamento e Referências Técnicas para Veículos de desporto Motorizado | 3 |
| 2.1.1. Regulamento Técnico FIA – <i>Appendix J</i> | 4 |
| 2.1.2. Outras Referências Técnicas | 5 |
| 2.2. Tipos de Quadros..... | 6 |
| 2.2.1. Quadro Tubular | 9 |
| 2.2.2. Quadro Tubular Para Veículos do Tipo Barqueta..... | 10 |
| Juno Racing Cars | 10 |
| Norma..... | 11 |
| Osella Engineering..... | 12 |
| Wolf Racing Cars..... | 13 |
| 2.2.3. Caixa de Velocidade com Função Estrutural para Veículos da Categoria CN | 14 |
| Sadev 14 | |
| Hewland..... | 16 |
| Xtrac 17 | |
| 2.3. Tipos de Suspensão | 18 |
| 2.3.1. Geometria de Rodas e Parâmetros de Suspensão | 18 |
| 2.3.2. Tipos de Suspensão Comuns em Veículos de Desporto | 21 |
| 2.3.3. Triângulos Sobrepostos..... | 23 |
| 2.3.4. Diferentes Designs | 25 |
| 2.3.5. Geometria de suspensão a aplicar no quadro a desenvolver | 27 |
| 2.4. Material Utilizado para a Construção da Estrutura..... | 29 |
| 2.4.1. Aço ao Carbono Sem Costura Estirado a Frio | 30 |
| 2.4.2. Ligas de Aço do Tipo 25CD4 | 31 |
| 2.4.3. Liga de Alumínio da Série 7000 – AW7075 | 32 |
| 2.5. Análise por Método de Elementos Finitos para Estudo Estrutural do Quadro | 33 |
| 3. Desenho e Desenvolvimento do quadro proposto..... | 35 |
| 3.1. Ergonomia em veículos construídos para o desporto automóvel | 35 |
| 3.2. Fases de Desenvolvimento da Estrutura Tubular..... | 38 |

| | |
|---|----|
| 3.3. Desenvolvimento e Aplicação das Placa Frontal, Traseira e de Encosto | 48 |
| 3.4. Análise e Simulação da Estrutura Tubular..... | 51 |
| 3.4.1. Regulamentos a seguir para a Realização da Simulação..... | 51 |
| 3.4.2. Preparação do Modelo para Realização das Simulações..... | 53 |
| 3.4.3. Condições Fronteira nas Simulações à Célula de Sobrevivência..... | 59 |
| No Plano entre o eixo frontal e o tablier..... | 59 |
| No Plano que passa pelas fixações dos cintos..... | 62 |
| No Plano que passa pelo do depósito de combustível | 65 |
| 3.4.4. Condições Fronteira nas Simulações à Estrutura Anti-Capotamento..... | 68 |
| Arco de Segurança Frontal | 68 |
| Arco de Segurança Traseiro..... | 71 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 75 |
| 4.1. Apresentação de resultados..... | 75 |
| 4.1.1. Resultados das Simulações à Célula de Sobrevivência | 76 |
| No Plano entre o eixo frontal e o tablier..... | 76 |
| No Plano que passa pelas fixações dos cintos..... | 79 |
| No Plano que passa pelo do depósito de combustível | 82 |
| 4.1.2. Resultados das Simulações à Estrutura Anti-Capotamento..... | 85 |
| Arco de Segurança Frontal | 85 |
| Arco de Segurança Traseiro..... | 88 |
| 4.2. Discussão e Análise de resultados..... | 91 |
| 5. CONCLUSÃO | 93 |
| 5.1. Conclusões finais | 93 |
| 5.2. Limitações e trabalhos futuros..... | 94 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 95 |
| ANEXO A..... | 99 |

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Exemplo de quadro longarina e carroçaria Corvette C3 [12]..... | 6 |
| Figura 2 - Quadro Longarina Corvette C3 [13] | 6 |
| Figura 3 - Carroçaria tipo monobloco [14] | 7 |
| Figura 4 – Quadro estrutura <i>Monocoque</i> McLaren F1 [16] | 7 |
| Figura 5 - Ariel Atom com quadro em estrutura tubular [17]..... | 8 |
| Figura 6 - Juno CN09 [24] | 10 |
| Figura 7 - Juno CN07, quadro e placa frontal..... | 11 |
| Figura 8 – Nova ProtoNP01 (em cima) e Nova Proto NP03 (em baixo) [25] | 11 |
| Figura 9 - Suspensão Traseira e Parte Posterior do Quadro do Nova Proto NP03 [25] | 12 |
| Figura 10 - Osella PA 21S Evo CN [27] | 12 |
| Figura 11 - Wolf GB08 Tornado [28] | 13 |
| Figura 12 - SLR82-14 Transaxle [29] | 14 |
| Figura 13 - SL82LW Transaxle [30] | 15 |
| Figura 14 - SL75LW Transaxle [31] | 15 |
| Figura 15 - LWS-200 [32] | 16 |
| Figura 16 - LLS-200 [32]..... | 16 |
| Figura 17 - P1152 Longitudinal [33] | 17 |
| Figura 18 - Ângulo de <i>Camber</i> [36] | 18 |
| Figura 19 - Configurações de ângulos de <i>Camber</i> [37] | 19 |
| Figura 20 - Ângulo de <i>Cáster</i> [38]..... | 19 |
| Figura 21 - Configurações de ângulos de <i>Cáster</i> [37]..... | 19 |
| Figura 22 - Ângulo <i>King Pin</i> [42] | 20 |
| Figura 23 - Ângulo <i>TOE</i> (Convergência e Divergência) [43] | 20 |
| Figura 24 - Exemplo ilustrativo do eixo rígido com barra <i>panhard</i> e barras longitudinais..... | 21 |
| Figura 25 - Exemplo Ilustrativo de uma suspensão <i>MacPherson</i> | 22 |
| Figura 26 - Exemplo de uma suspensão de triângulos sobreposto de um carro de passeio (Esquerda)e carro categoria LMP (Direita)[46] | 22 |
| Figura 27 - Componentes de Suspensão Veículo do Tipo CN | 23 |
| Figura 28 - Relação da altura das Rodas com a altura do Chassi | 24 |
| Figura 29 - Suspensão Traseira do Mercedes-AMG F1 W10 EQ Power+ [34]..... | 25 |
| Figura 30 - Diferença entre Pull Rod e Push Rod [51] | 26 |
| Figura 31 - Exemplo de Suspensão Frontal [52]..... | 27 |
| Figura 32 - Exemplo de Suspensão Traseira [52] | 28 |
| Figura 33 - Exemplos de ligação dos elementos de suspensão ao Quadro | 28 |
| Figura 34 - Fundo Plano em Alumínio de um Formula Ford (Esquerda) [53] e Painéis Laterais em Laminados de Carbono no Osella PA200 (Direita) [54]..... | 29 |
| Figura 35 - Ilustração do método de estiramento a frio. " <i>Seamless Pipe</i> " [55] | 30 |
| Figura 36 - Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio AW7075 [61] | 32 |
| Figura 37 - Representação dos nós, elemento finito e malha. | 33 |
| Figura 38 - Exemplo do aumento de refinamento de malha [64]..... | 34 |
| Figura 39 - Exemplo de chassi simulado segundo o método de elemento finitos [65] | 34 |
| Figura 40 - Valores de Referência para Dimensões SAE [66] | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 41 - Configuração da Posição Sentada no Veículo [66] | 36 |
| Figura 42 - Vistas Superior e Lateral para Monolugar [67] | 36 |
| Figura 43 - Vista Segundo o Plano Longitudinal para Veículo Bi-Lugar [67] | 37 |
| Figura 44 - Base da Estrutura Tubular | 38 |
| Figura 45 - Arco de Segurança Traseiro | 39 |
| Figura 46 - Arco de Segurança Traseiro aplicado na Base..... | 39 |
| Figura 47 - Arco de Segurança Frontal | 40 |
| Figura 48 - Arco de Segurança Frontal aplicado na Base | 40 |
| Figura 49 - Tubos para Aplicação de Placa de Alumino para Encosto dos Bancos | 41 |
| Figura 50 - Tubos do Encosto Aplicados na Estrutura Global | 41 |
| Figura 51 - Laterais da Célula de Sobrevivência | 42 |
| Figura 52 - Laterais ligadas em Conjunto com os Arcos de Segurança Frontal e Traseiro formando a Célula de Sobrevivência | 42 |
| Figura 53 - Lateral Frontal | 43 |
| Figura 54 - Laterais Frontais aplicadas no Quadro | 43 |
| Figura 55 - Reforço das Laterais Frontais | 44 |
| Figura 56 - Reforço das Laterais Frontais aplicadas no Quadro | 44 |
| Figura 57 - Laterais Traseiras..... | 45 |
| Figura 58 - Laterais Traseiras Aplicadas no Quadro | 45 |
| Figura 59 - Reforços Superiores do Quadro | 46 |
| Figura 60 - Reforço do Chão/Base no local da Pedaleira | 46 |
| Figura 61 - Quadro Completo Final | 47 |
| Figura 62 - Conjunto Placa Frontal e Patelas a Soldar no Quadro | 48 |
| Figura 63 - Conjunto Placa Traseira e Patelas a Soldar no Quadro | 48 |
| Figura 64 - Placa para Encosto dos Bancos | 49 |
| Figura 65 - Quadro com as 3 (três) Placas Aplicadas) | 49 |
| Figura 66 - Quadro com um Exemplo de Conjunto Propulsor Aplicado | 50 |
| Figura 67 - Quadro Final em Formato <i>IGES</i> (apenas com linhas)..... | 53 |
| Figura 68 - Placa da Frente em Formato <i>Parasolid</i> (como <i>planar surface</i>)..... | 54 |
| Figura 69 - Placa de Trás em Formato <i>Parasolid</i> (como <i>planar surface</i>) | 54 |
| Figura 70 - Placa da Frente e de Trás Montadas em Conjunto no formato <i>Parasolid</i> | 55 |
| Figura 71 - Detalhes de visualização (Line Bodies - Yes) | 55 |
| Figura 72 - Quadro e Placas Importadas para o Ansys..... | 56 |
| Figura 73 - Linhas do Quadro Realçadas | 56 |
| Figura 74 - Arvore do Ansys (Representa a secções usadas e as partes tipo solido e casca) | 57 |
| Figura 75 - Quadro com as Secções Atribuídas | 57 |
| Figura 76 - Pontos e Tipo de Ligação entre as Placas e o Quadro..... | 58 |
| Figura 77 - Arvore do Projeto (Ligações por Contacto)..... | 58 |
| Figura 78 - Pontos de Fixação do Quadro | 59 |
| Figura 79 - Pontos de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ..... | 60 |
| Figura 80 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY | 60 |
| Figura 81 - Local de Aplicação da Força | 61 |
| Figura 82 - Ponto de Fixação na Placa da Frente | 62 |
| Figura 83 - Ponto de Fixação no Quadro..... | 62 |
| Figura 84 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ, na Placa da Frente..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 85 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ, no Quadro | 63 |
| Figura 86 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY | 64 |
| Figura 87 - Local de Aplicação da Força | 64 |
| Figura 88 - Ponto de Fixação na Placa da Frente | 65 |
| Figura 89 - Ponto de Fixação no Quadro | 65 |
| Figura 90 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ, na Placa da Frente | 66 |
| Figura 91 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ, no Quadro | 66 |
| Figura 92 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY | 67 |
| Figura 93 - Local de Aplicação da Força | 67 |
| Figura 94 - Ponto de Fixação na Placa Traseira | 68 |
| Figura 95 - Ponto de Fixação no Quadro (correspondente ao local de apoio frontal do motor) | 69 |
| Figura 96 - Pontos de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY, no Quadro | 69 |
| Figura 97 - Aresta de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY, na Placa da Frente..... | 70 |
| Figura 98 - Local de Aplicação da Força no Arco Frontal | 70 |
| Figura 99 - Ponto de Fixação na Placa Traseira | 71 |
| Figura 100 - Ponto de Fixação no Quadro (correspondente ao local de apoio frontal do motor) .. | 71 |
| Figura 101 - Pontos de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY, no Quadro | 72 |
| Figura 102 - Aresta de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY, na Placa da Frente | 72 |
| Figura 103 - Esquema de Calculo do Ângulo de aplicação da Força no Arco Traseiro..... | 73 |
| Figura 104 - Local de Aplicação da Força no Arco Traseiro..... | 73 |
| Figura 105 - Beam Section Results | 75 |
| Figura 106 - Resultados e Escala da Deformação, Plano entre Eixo Frontal e Tablier | 76 |
| Figura 107 - Deformação Total do Quadro, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier | 76 |
| Figura 108 - Pontos onde Ocorre Deformação Máxima, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier..... | 77 |
| Figura 109 - Resultados e Escala da Tensão, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier | 77 |
| Figura 110 – Tensão Equivalente de Von-Mises, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier..... | 78 |
| Figura 111 - Pontos onde Ocorre Valores Máximos de Tensão de Von-Mises, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier..... | 78 |
| Figura 112 - Resultados e Escala da Deformação, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos | 79 |
| Figura 113 - Deformação Total do Quadro, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos..... | 79 |
| Figura 114 - Pontos onde Ocorre Deformação Máxima, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos | 80 |
| Figura 115 - Resultados e Escala da Tensão, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos | 80 |
| Figura 116 - Tensão Equivalente de Von-Mises, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos | 81 |
| Figura 117 - Ponto de Tensão Máximo, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos..... | 81 |
| Figura 118 - Resultados e Escala da Deformação, Plano no Centro da Área do Depósito..... | 82 |
| Figura 119 - Deformação Total do Quadro, Plano no Centro da Área do Depósito | 82 |
| Figura 120 - Local onde Ocorre Deformação Máxima, Plano no Centro da Área do Depósito | 83 |
| Figura 121 - Resultados e Escala da Tensão, Plano no Centro da Área do Depósito | 83 |
| Figura 122 - Tensão Equivalente de Von-Mises, Plano no Centro da Área do Depósito | 84 |
| Figura 123 - Ponto de Tensão Máximo, Plano no Centro da Área do Depósito..... | 84 |
| Figura 124 - Resultados e Escala da Deformação, Arco de Segurança Frontal | 85 |
| Figura 125 - Deformação Total do Quadro, Arco de Segurança Frontal | 85 |
| Figura 126 - Local de Deformação Máxima, Arco de Segurança Frontal | 86 |

| | |
|--|----|
| Figura 127 - Resultados e Escala da Tensão, Arco de Segurança Frontal | 86 |
| Figura 128 - Tensão Equivalente de Von-Mises, Arco de Segurança Frontal..... | 87 |
| Figura 129 - Ponto de Tensão Máxima, Arco de Segurança Frontal | 87 |
| Figura 130 - Resultados e Escala da Deformação, Arco de Segurança Traseiro | 88 |
| Figura 131 - Deformação Total no Quadro, Arco de Segurança Traseiro | 88 |
| Figura 132 - Local de Deformação Máxima, Arco de Segurança Traseiro..... | 89 |
| Figura 133 - Resultados e Escala da Tensão, Arco de Segurança Traseiro..... | 89 |
| Figura 134 - Tensão Equivalente de Von-Mises, Arco de Segurança Traseiro | 90 |
| Figura 135 - Ponto de Deformação Máxima, Arco de Segurança Traseiro | 90 |

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Categorias do Aço ao carbono, dividas pelo teor de carbono [56], [57]..... | 30 |
| Tabela 2 - Diferentes nomenclaturas do Aço 25CD4, segundo várias normas Mundiais [58]..... | 31 |
| Tabela 3 – Composição da liga de aço 25CD4 [59]..... | 31 |
| Tabela 4 - Propriedades da liga de aço 25CD4 relativas a ensaios de tração, tensão de rotura, tensão de cedência e alongamento | 31 |
| Tabela 5 - Composição Química Liga de Alumínio AW7075 [61] | 32 |
| Tabela 6 - Resultados das Simulações..... | 91 |

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Acrônimos

| | |
|------|--|
| ISEP | Instituto Superior de Engenharia do Porto |
| FIA | Federação Internacional de Automobilismo |
| FPAK | Federação Portuguesa de Automobilismo e Kart |
| CAE | <i>Computer-Assisted Engineering</i> |
| MEF | Método de Elementos Finitos |
| ASN | <i>National Sporting Authority</i> |
| TT | Todo o Terreno |

Lista de Símbolos

| | | |
|--------------------|----------------------|----------------------|
| m | Massa | kg |
| T | Temperatura | $^{\circ}C$ |
| d | Distância | mm |
| V | Volume | cm^3 |
| Ang.($^{\circ}$) | Ângulos | Graus ($^{\circ}$) |
| W | Peso do Quadro Final | kg |

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será introduzida a dissertação, sendo a mesma dividida em quatro subcapítulos. Nestes subcapítulos poderá ser entendido o contexto da dissertação, os objetivos que se pretendem na elaboração da mesma, bem como a metodologia usada para o desenvolvimento desta e a estrutura em que se irá apresentar o presente relatório.

1.1. Contextualização

Nesta dissertação irá ser abordado o desenvolvimento, concepção e respetiva análise de um quadro desportivo bi-lugar. Para esta análise será realizada uma pesquisa sobre os diferentes tipos de quadros que poderiam ser desenvolvidos, sendo também abordado os tipos de suspensão que poderiam ser usados, regulamentos consultados, materiais a utilizar e alguns métodos de avaliação computacional.

É importante abordar e analisar o regulamento necessário para o desenvolvimento de um quadro desportivo de forma a ser possível cumprir todas as regras no desenvolvimento e construção de um quadro de acordo com as normativas FIA, com a finalidade de adquirir uma validação.

Serão também expostos os materiais para a construção deste, seguindo o indicado no regulamento, de forma a serem obtidas as melhores propriedades mecânicas em função do peso final do quadro.

Realizar-se-á uma exposição relativa ao método utilizado para a simulação do quadro a desenvolver e quais os respetivos programas que serão usados.

Por fim irão ser realizadas simulações através dos programas de CAE, utilizando o método de elementos finitos, de forma a ser possível verificar se a estrutura desenvolvida não ultrapassa os limites impostos no regulamento. Deste modo conseguiremos saber previamente se o quadro em estudo será ou não valido perante os regulamentos.

1.2. Objetivos

Nesta dissertação foram apresentados como objetivos o projeto e análise estrutural de um quadro para um veículo de desporto, do género bi-lugar, aberto ou fechado, em quadro tubular.

No contexto do presente relatório temos como objetivo a realização de uma revisão bibliográfica do estado de arte de forma a ser possível entender o desenvolvimento e as escolhas realizadas nesta dissertação, justificando e percebendo as decisões tomadas quando realizado o desenvolvimento do quadro pretendido.

Deste modo e de forma a serem cumpridos os objetivos da dissertação, será também retratado todo o procedimento para o desenvolvimento do quadro pretendido, bem como também se documentará a preparação necessária para a realização das simulações e a apresentação dos respetivos resultados de forma a se verificar a validação do quadro pelos regulamentos.

1.3. Metodologia

Para a realização desta dissertação, foram utilizados como metodologia, os seguintes parâmetros. Primeiro, foi realizada uma revisão bibliográfica do estado de arte de forma a ser possível reunir o conhecimento necessário para justificar as escolhas realizadas e uma angariação dos regulamentos necessários para o desenvolvimento e concessão do quadro usando uma ferramenta de desenho CAE, e, posteriormente, este será preparado de forma a ser possível de realizar as simulações pretendidas. Por fim, serão realizadas as simulações em programas CAE usando os métodos dos elementos finitos e proceder-se-á a uma avaliação dos resultados obtidos.

1.4. Estrutura da Dissertação

A dissertação irá apresentar a seguinte estrutura: no primeiro capítulo irá corresponder à introdução da dissertação, onde será apresentada uma contextualização deste seguido pelos seus objetivos, metodologia utilizada e por fim a sua estrutura.

No segundo capítulo teremos o desenvolvimento da dissertação onde irão ser abordados os tópicos relativos aos regulamentos seguidos no desenvolvimento do chassi, de seguida ir-se-á abordar os tipos de quadro precedidos pelos tipos de suspensão, posteriormente abordar-se-á quais os materiais que podem ser usados e por último o tipo de análise a utilizar.

O terceiro capítulo corresponde ao desenho, desenvolvimento e concessão do quadro. Neste ir-se-á começar por referir o estudo ergonómico realizado e que será precedido pela exposição das fases de desenvolvimento do quadro e das placas frontais e traseiras, utilizando o programa CAE. Ainda neste capítulo serão também abordados os pontos do regulamento referentes aos ensaios e como se irá ser aplicado nas simulações. De seguida será explicada a preparação do modelo e quais as condições fronteira utilizadas para a realização das simulações.

No quarto capítulo, serão inicialmente expostos os resultados obtidos e onde se registaram os valores máximos e mínimos. Consecutivamente realizou-se uma análise e discussão destes resultados, referindo se estes estavam dentro dos limites impostos pelo regulamento.

No último capítulo, irá ser realizada uma conclusão final e posteriormente indicada algumas limitações e trabalhos futuros a serem realizados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo irão ser abordados os diferentes conceitos necessários para um bom entendimento da dissertação, de forma a ser possível um melhor e mais correto desenvolvimento desta, conseguindo obter um maior conhecimento.

De modo que a informação seja exposta organizadamente, a mesma foi dividida em subcapítulos e os mesmos, quando aplicável, subcapítulos.

Nesta dissertação irão ser apresentados os regulamentos e referências técnicas que serão seguidas durante o desenvolvimento da estrutura. De seguida abordar-se-ão os tipos de chassis que poderiam ser utilizados, especificando e expondo em maior detalhe o que interage com o quadro no desenvolvimento da sua estrutura, nomeadamente os pontos de ancoragem da suspensão. Posteriormente realizar-se-á a mesma abordagem para os tipos de suspensão, sendo que irá ser especificado também da melhor forma o tipo de suspensão utilizado neste tipo de veículo. De seguida, será realizada uma exposição sobre os materiais possíveis de serem usados.

Será feita também uma referência ao método analítico utilizado para a avaliação da estrutura, bem como os programas utilizados para o seu desenvolvimento, desenho e as respetivas simulações.

2.1. Regulamento e Referências Técnicas para Veículos de desporto Motorizado

Nesta dissertação será desenvolvido um quadro para um veículo de desporto na categoria CN – FIA. Para a sua homologação, a FIA exige vários ensaios à resistência do quadro. Serão também realizadas simulações relativas à resistência estrutural do quadro por forma à sua otimização e aumentar as probabilidades de sucesso nos ensaios

Deste modo, será seguido o regulamento publicado pela Federação Internacional de Automobilismo, FIA, mais particularmente o *Appendix J* [1], sendo este o principal regulamento a seguir, sendo possível no final da construção e desenvolvimento da estrutura tubular, a sua validação pela instituição.

Para se obter uma estrutura com as melhores características, será necessário recorrer a alguns livros conceituados com especificações técnicas, de forma a ser obtido um correto dimensionamento do habitáculo, distância entre eixos, bem como distâncias ao solo e dimensões exteriores do veículo (como largura, comprimento e altura). Apesar de alguns destes parâmetros terem valores mínimos e máximos definidos no regulamento da FIA [1], irá ser utilizado, como referido, outras fontes de informação para se encontrar as melhores dimensões que favoreçam o nosso quadro.

2.1.1. Regulamento Técnico FIA – *Appendix J*

Como já referido anteriormente, irá ser seguido o regulamento da FIA para conseguir uma estrutura que seja possível de validar pela principal federação de desporto automóvel.

Será utilizado o Anexo J, que possui vários artigos, uma vez que o objetivo é a realização de uma estrutura para um carro desportivo de produção, do grupo CN, de dois lugares fechado ou aberto para corridas de velocidade.[1].

Os regulamentos FIA são usados internacionalmente. Contudo, o da FPAK, Federação Portuguesa de Automobilismo e Kart, apresenta também um regulamento técnico, Anexo J, que corresponde a uma tradução do regulamento da FIA, em português [2], apresentando as mesmas regras.

O regulamento técnico referido, *Appendix J*, está dividido em vários artigos. É possível consultar os regulamentos técnicos para carros desportivos de produção do grupo CN, no artigo 259 [1]. Após uma leitura e análise deste, é possível destacar alguns parâmetros presentes como [1]:

- Chassi deve ser monocoque ou tubular, em material compósito e metálico, correspondentemente;
- Dimensões máximas veículo: comprimento de 4800 mm, largura de 2000 mm e altura de 1030 mm;
- Peso mínimo consoante a cilindrada do motor e a utilização ou não de turbocompressores, sendo que o peso mínimo varia entre os 475 kg e os 625 kg;
- Unidade de potência usada deve ser originária de um carro homologado ou previamente homologado pela FIA, de combustão interna e no máximo de seis cilindros;
- Utilização de suspensão ativa proibida;
- Aplicação de disco de travão de carbono proibidos;
- Dimensões do habitáculo:
 - Simetria longitudinal do cockpit, com até 300mm relativamente ao piso, estando o condutor de um dos lados do eixo;
 - Distância entre cotovelos de 1100 mm;
 - Duas zonas dos pés com no mínimo 750 cm²;
 - Apoios de cabeça com um mínimo de 400 cm²;
- Estruturas de segurança:
 - Estruturas de capotamento para carros fechados deve ter dois “rollbars”, um à frente e outro atrás da zona do peito do condutor e do passageiro, devendo ter também pelo menos um reforço na diagonal;
 - Estrutura deve ser realizada exclusivamente com tubo de aço, de aço ao carbono ou do tipo 25CD4, com mínimo de 2,5 mm de espessura;
 - Parte frontal ou traseira da estrutura deve ser ligada à célula de sobrevivência;

Sendo estes apenas alguns dos parâmetros presentes no regulamento, durante o desenvolvimento da dissertação será seguido todo o Artigo 259, [1], de forma a garantir uma validação da estrutura.

2.1.2. Outras Referências Técnicas

No caso do dimensionamento do habitáculo e correspondente área de segurança, também se recorreu ao livro *Racing and Sports Car Chassis Design*, de Michael Costin e David Phipps [3]. Este possui informação relevante sobre o compromisso entre segurança, conforto e manobrabilidade do veículo. Recorreu-se também ao livro *Racing Car Design and Development*, de Len Terry e Alan Baker [4], onde constam informações relevantes sobre dimensões exteriores e distâncias entre eixos, para melhor otimização do dimensionamento, de forma a obter uma relação de compromisso entre o cumprimento do *Appendix J* da FIA [1] com as características que se espera obter por parte da estrutura em questão.

Os livros *Chassis Handbook*, de Bernd Heibing [5], e *Competition Car Suspension*, de Allan Staniforth [6], possuem informação relevante para um correto dimensionamento e aplicação do tipo de suspensão, bem como entender quais os tipos de calibração e ajustes possíveis e, ainda, de como os tornar possíveis e de fácil realização, sendo assim possível de obter uma melhor afinação da geometria e ângulos de suspensão.

Existem ainda outras fontes de informação que irão ser consultadas, de forma a ser possível tomar as melhores decisões como:

- *Race Car Vehicle Dynamics*, de Milliken & Milliken [7];
- *Design Of Racing Sports Cars*, de Colin Campbell [8];
- *The Sports Car*, de Colin Campbell [9];
- *Construire Une Voiture de Course – Suspension Chasis*, de Bernard Gironnet [10];
- *Chassis Engineering*, de Herb Adams [11].

2.2. Tipos de Quadros

Para o desenvolvimento e construção de veículos automóveis existem várias possibilidades quanto ao tipo de quadro que se pode utilizar, dependendo da aplicação a que estes vão estar sujeitos, bem como se necessitam de apresentar ou não uma capacidade de carga considerável.

Nos primeiros veículos utilizavam-se quadro tipo longarina, sendo posteriormente aplicado sobre este uma carroçaria, como se pode verificar na Figura 1 e Figura 2. Deste modo, o quadro longarina era versátil para vários modelos, sendo possível apenas mudar a carroçaria a aplicar sobre este, conseguido assim que, uma ou um grupo de marcas, utilizassem o mesmo chassi para diferentes modelos.



Figura 1 - Exemplo de quadro longarina e carroçaria Corvette C3 [12]

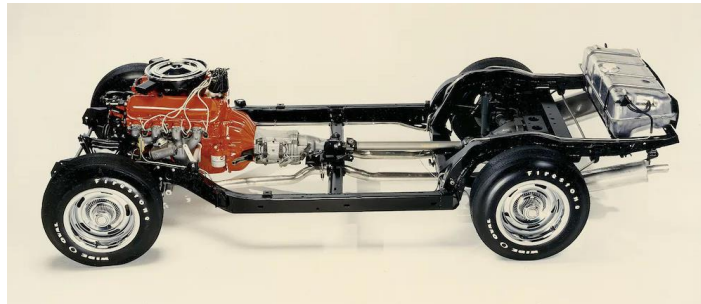


Figura 2 - Quadro Longarina Corvette C3 [13]

Posteriormente, de forma a ser possível obter maior rigidez em torção e segurança para os ocupantes foi desenvolvido o tipo de quadro mais utilizado atualmente em veículos de produção que é o chassi monobloco, Figura 3, sendo este um dos mais completos e por isso o mais utilizado atualmente. Com este quadro é possível obter melhores propriedades mecânicas e é economicamente mais viável para grandes séries. Este tipo é usado pela maioria dos fabricantes de modelos utilitários.



Figura 3 - Carroçaria tipo monobloco [14]

Com a evolução presente nesta indústria, foram também desenvolvidos outros tipos de quadros mais focados em carros de elevada performance e de luxo, bem como para carros focados na vertente desportiva, mas pouco adequados a grandes produções. Para isso, foram desenvolvidos os quadros do tipo *monocoque*, Figura 4, e também do tipo tubular, Figura 5.

Figura 5, de forma a ser possível obter um menor peso e um melhor desempenho [15]. Um dos primeiros chassis *monocoque* a ser utilizado em carros de estrada, foi realizado pela McLaren, como se pode visualizar na Figura 4, para o modelo McLaren F1.



Figura 4 – Quadro estrutura *Monocoque* McLaren F1 [16]

Analisando diferentes tipos de automóveis, é possível afirmar que atualmente ainda são usados os vários desenhos de quadros. Pelas suas diferentes características, em função da aplicação, número de unidades a produzir, custo pretendido e aplicação de destino, os diferentes construtores optam por um dos tipos referidos, mesmo que não sejam o mais recente ou '*state of the art*'. Deste modo, podemos afirmar que atualmente os quadros longarinas são aplicados em veículos usados em transportes de carga e fora de estrada. Já o quadro monobloco é utilizado maioritariamente em

veículos usados para transporte de passageiros ou carros familiares, sendo que estes podem ou não ter aptidões de andar fora de estrada, mas não sendo focados para o efeito.

Nesta dissertação será projetado e desenvolvido um quadro tubular. Este é o mais adequado para o desenvolvimento de carros desportivos bi-lugar de muito pequena produção, em geral 2 a 8. Este tipo de construção não requer moldes para a produção, sendo apenas necessário a utilização de um gabarito / jig, pelo que é muito bem-adaptado a muito pequenas séries ou modelos únicos, Figura 5.



Figura 5 - Ariel Atom com quadro em estrutura tubular [17]

Com este tipo de construção é possível aplicar constantes alterações ao quadro, com custos reduzidos, para atender as diferentes necessidades. Com estas alterações podem-se atender diferentes tamanhos de pilotos, questões ergonómicas, reposicionar as amarrações das suspensões, utilização de diferentes grupos propulsores, ou atender as constantes modificações e atualizações dos regulamentos FIA.

O quadro tubular é, também o único permitido em algumas categorias FIA [18]. Para veículos do grupo CN, o regulamento 259[1], determina o cumprimento de diferentes requisitos para obtenção de uma estrutura válida para competição nesta categoria, permitindo quadros tubulares ou *monocoque*.

Por este motivo, será exposto de melhor forma e mais pormenorizado o quadro tubular, para que seja possível conhecer algumas das suas características específicas e o que o torna tão interessante para aplicação num contexto de competição/desportivo.

2.2.1. Quadro Tubular

Este tipo de quadro distingue-se dos demais devido ao facto de usar tubos de aço, que podem ser de secção quadrada e/ou secção redonda. É também possível obter o formato desejado, para acomodar os pilotos, de um percentil, com as características e dimensões pretendidas. Este tipo de construção representa um menor investimento do que outros tipos de quadro e qualquer que seja a solução construtiva não deve comprometer a segurança do piloto[19].

Com a utilização deste tipo de quadro é, também, esperado, caso este seja bem desenvolvido e dimensionado, obter uma boa estabilidade e comportamento em curva, bem como o seu comportamento em momento de aceleração e desaceleração. Tal está dependente das suspensões, do centro de gravidade, da relação peso-potência, entre outros fatores. O quadro apenas pode contribuir com maior rigidez quando comparado com os resultados obtidos para outros tipos de quadro. Adicionalmente, é expectável obter-se um melhor aspeto estético, como o Ariel Atom e no caso dos veículos usados exclusivamente para desporto, o melhor formato das carenagens para obter bom desempenho aerodinâmico.

Além do aspeto estético, torna-se também pertinente a possibilidade de este ser um chassi aberto ou fechado. Com esta possibilidade e dependendo da escolha efetuada, obtém-se um quadro com maior ou menor rigidez ou segurança. Com o uso de um quadro fechado consegue-se obter um melhor resultado visto que, quando este for submetido a esforços, por exemplo, os esforços presentes num capotamento, terá uma capacidade de resistência superior, do que perante um quadro do tipo aberto.[7].

Denotar que, em termos de desenvolvimento de um quadro aberto, este será mais complexo que o desenvolvimento de um fechado, visto que a sua resistência e rigidez é sempre inferior.

Sobre o quadro tubular fechado, deve também ser referido que com a utilização deste tipo de quadro obtém-se um produto mais leve, sendo que com este fator se atingirá uma estrutura mais ágil e dinâmica, o que favorece o comportamento e desempenho do veículo, com uma finalidade desportiva, em competição.

Sendo possível desenhar e configurar o quadro tubular consoante as preferências de cada um, consegue-se otimizar este de forma a ser possível não só oferecer uma maior proteção do habitáculo e segurança dentro deste, mas também não permitir que ocorram deformações significativas, que possam entrar na área de segurança, e provocar lesões aos ocupantes.[20] – [22].

Com a construção tubular é possível obter valores de resistência e rigidez torsional muito bons, as vezes superiores aos obtidos com outros tipos de quadro, bem como também em alguns casos se conseguiria obter um maior valor de rigidez do quadro, essencial para ser possível obter o comportamento e desempenho pretendido para o veículo, como referido anteriormente.[20], [22], [23].

2.2.2. Quadro Tubular Para Veículos do Tipo Barqueta

No desenvolvimento da dissertação será projetado um quadro do tipo tubular para um veículo do género de uma barqueta. Quadros para veículos da mesma categoria são fabricados por diversos construtores, que seguem as normas da FIA, sendo que alguns dos mais conhecidos são a Juno, Norma, Osella e Wolf, sendo estes de seguida apresentados.

Juno Racing Cars

Juno Racing Cars era um construtor britânico de carros desportivos do grupo CN, fundado pelo Engenheiro Ewan Baldry em 1999, tendo em 2014 sido adquirida por Ginetta Cars, e em junho de 2016 mudou novamente de donos, tendo sido comprada por um comprador privado e mudou a sua sede para Portugal. Tendo encerrado a sua atividade por volta de 2020.

Alguns dos quadros desenvolvidos pela Juno é o Juno cn07 com um quadro tubular, e o cn09 com um quadro híbrido, tubular, mas com muitos painéis sandwich (com peles em alumínio- e núcleo em favo de abelha de alumínio). Ambos são equipados com um motor Honda K20 fd2, uma caixa de velocidade estrutural sequencial Hewland de seis velocidades, sendo possível observar um dos exemplares na Figura 6.



Figura 6 - Juno CN09 [24]

As soluções mais atuais propostas pelos construtores deste tipo de veículo é caracterizada por usar duas placas de alumínio espessas, mas aligeiradas, uma na parte frontal servindo de proteção anti-intrusão e cumprindo funções estruturais, suportando vários componentes, outra na parte traseira, também estrutural e serve de apoio ao motor e caixa de velocidades, Figura 7. Os produtores deste tipo de veículo usam caixas de velocidades estruturais, que possuem pontos de ancoragem para a suspensão traseira, deste modo o quadro tubular apenas se estende até ao motor. Um exemplo, esta apresentado na Figura 7, já referida em cima, e visualiza-se um exemplar sem carnagens do Juno CN07.

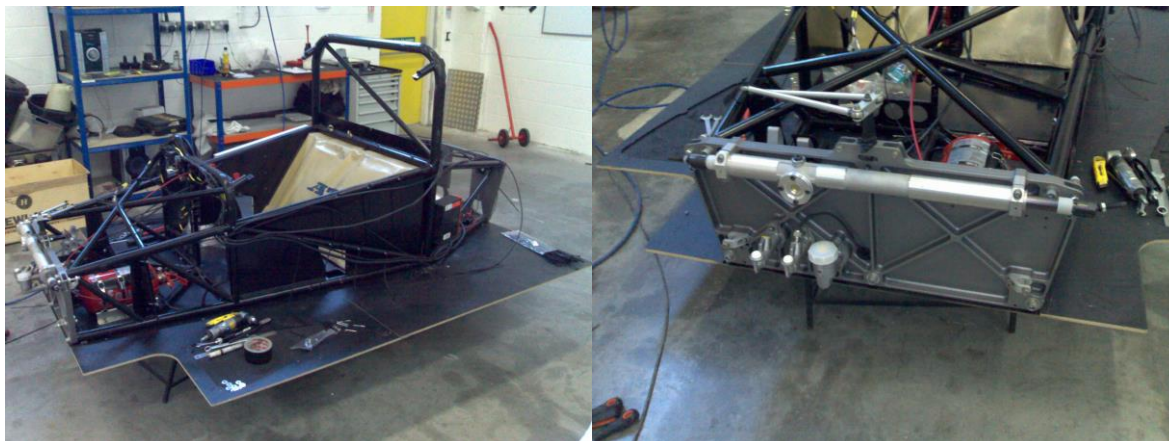


Figura 7 - Juno CN07, quadro e placa frontal

Norma

Atualmente conhecida como Norma Automotive é uma construtora baseada em França e que têm como foco o desenvolvimento de quadros tubulares e monocoques para veículos do tipo CN e CM.

Para veículos do tipo CN a norma desenvolveu o modelo Proto NP01, Figura 8, que apresenta um motor Peugeot 1.6L ou Honda 2.0L estando este acoplado e uma caixa de velocidades Sadev.

Outro modelo é o Nova Proto NP03, Figura 8, para a categoria CM, que apresenta um chassi em carbono, e equipado com um motor de moto de uma GSXR 1000, Figura 9.

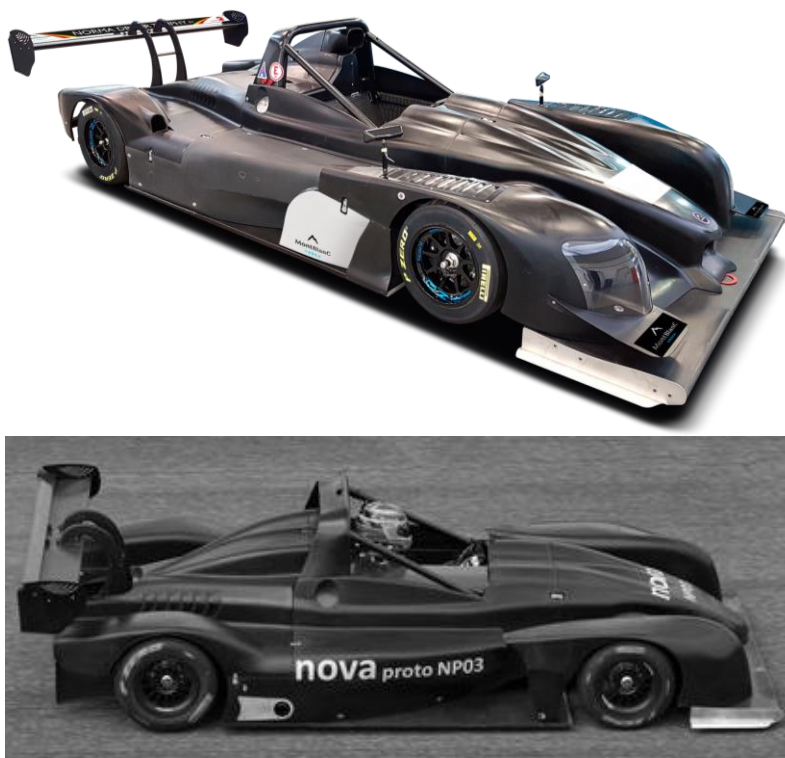


Figura 8 – Nova ProtoNP01 (em cima) e Nova Proto NP03 (em baixo) [25]

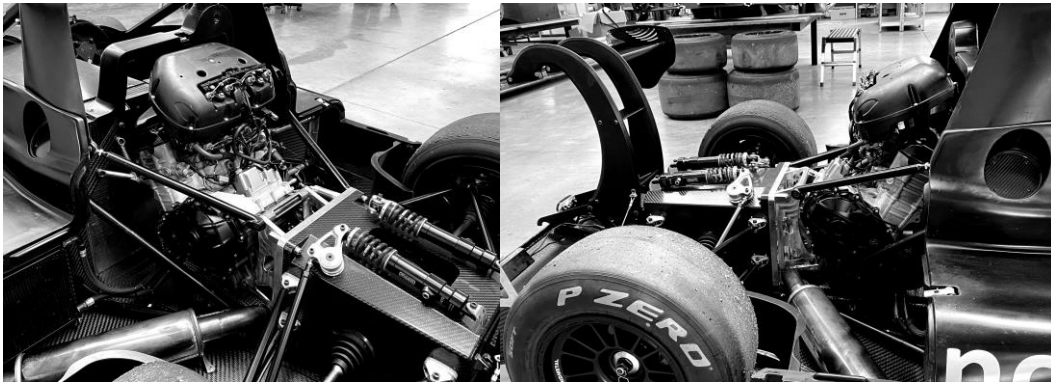


Figura 9 - Suspensão Traseira e Parte Posterior do Quadro do Nova Proto NP03 [25]

Osella Engineering

Osella Engineering está sediada em Verolengo, Itália, na província de Turim. Esta é uma construtora que além da construção dos carros e seus quadros também asseguram a realização de atualizações de segurança e de desempenho. [26]

Um dos veículos desenvolvidos pela Osella é o PA 21S Evo CN, equipado com um motor Honda de 2000cc, uma caixa de velocidades sequencial da SADEV, este apresenta um quadro de tubo quadrangular de aço revestido com painéis de carbono [27]. Este modelo pode ser visualizado na Figura 10.



Figura 10 - Osella PA 21S Evo CN [27]

Wolf Racing Cars

Wolf Racing Cars é um construtor de carros desportivos sediado em Bréscia, Itália, na região de Lombardia. Esta inicialmente era conhecida como Walter Wolf Racing, quando fundada em 1976 pelo Canadiano Walter Wolf. Tendo entre 1976 e 1979 competido no campeonato mundial de Fórmula 1 apresentando como pilotos Keke Rosberg e James Hunt. Tendo sido mais tarde em 2009 que desenvolveram um protótipo de um veículo para a categoria CN2 e CN conseguindo ganhar o campeonato italiano de protótipos em 2010 com o Wolf GB08.[28].

Atualmente a marca apresenta como o seu carro da categoria CN o Wolf GB08 Tornado, Figura 11, este foi desenvolvido a partir dos conhecimentos adquiridos posteriormente com os outros modelos, com a ambição de ser o sucessor do Wolf GB08 Honda. Este apresenta 3 modelos, dois dos quais apresentam um motor de 1.6L Turbo, um com 280 hp, categoria CN, sendo a versão da FIA e o outro com 400 hp sendo a versão S e por fim conta ainda com a versão Extreme que usa um motor V8 a debitar 650 hp. [28].



Figura 11 - Wolf GB08 Tornado [28]

2.2.3. Caixa de Velocidade com Função Estrutural para Veículos da Categoria CN

Para veículos da categoria CN são muitas vezes utilizadas diferentes soluções relativas às caixas de velocidade a aplicar no veículo. Com o aumento do conhecimento e desenvolvimento das indústrias foram desenvolvidas algumas caixas de velocidades que além de alojarem as respetivas engrenagens integram também o diferencial e suportam os componentes da suspensão apresentando deste modo propriedades estruturais. Em alguns casos estas caixas apresentam ainda o reservatório de óleo.

Estas caixas apresentam estas capacidades que facilitam a sua aplicação num carro desportivo, tornando possível uma diminuição do peso da estrutura e também em caso de manutenção estas em alguns casos facilitam as tarefas.

Quando os construtores optaram por este tipo de caixa, com funções estruturais, o quadro termina onde começa a caixa. A transição, em geral, é realizada através de uma placa em alumínio.

Algumas das marcas que desenvolveram este tipo de caixas são a Sadev, Hewland, Xtrac e Quaife, que de seguida serão apresentadas alguns dos modelos das marcas referidas anteriormente para o tipo de veículo que se está a estudar.

Sadev

A Sadev dispõe de alguns modelos diferentes de caixas para veículos da categoria CN, sendo que para uma aplicação do tipo *Hill Climb* ou *Single Seater* com um Torque entre 400 a 500N.m esta apresenta as seguintes soluções.

Na Figura 12 podemos observar uma caixa Sadev com dois apoios superiores e os inferiores para os braços de suspensão, sendo que o modelo SLR82-14 apresenta um diferencial traseiro.



Figura 12 - SLR82-14 Transaxle [29]

Este tipo de caixa, é estruturalmente mais resistente e possui apoios para ancorar os braços de suspensão. Possuem também apoios para os amortecedores, e balanceiro. E em alguns casos apresentam o reservatório de óleo.

Nas Figura 13 e Figura 14 pode-se observar dois apoios para o braço de suspensão superior e apenas um para o braço inferior, sendo que o segundo apoio para o braço inferior poderá ser localizado na cloche. Apresenta também uma localização central do diferencial e espaço para o reservatório de óleo.



Figura 13 - SL82LW Transaxle [30]



Figura 14 - SL75LW Transaxle [31]

Hewland

Para o tipo de aplicação e veículo que se está a desenvolver, a totalidade das propostas existentes no mercado apresentam motor central, com caixas que podem estar à frente ou atrás do eixo traseiro e por isso da marca Hewland temos dois modelos diferentes de caixas possíveis de visualizar nas próximas figuras.

Na Figura 15 e Figura 16 mais uma vez é possível observar 3 suportes para os braços de suspensão sendo o quarto localizado mais à frente na cloche ou no quadro, sendo ainda possível de verificar que a localização do diferencial é mais central.



Figura 15 - LWS-200 [32]



Figura 16 - LLS-200 [32]

Xtrac

O produtor Xtrac apresenta também vários modelos e formatos de caixas com diferentes desenhos ou disposições, mas para o conceito que se está a desenvolver a mais indicada é a apresentada na Figura 17.

Na Figura 17, pode-se observar o diferencial na parte frontal da caixa de velocidades, sendo também visível a localização traseira do apoio dos braços superior e inferior, sendo que os apoios frontais serão localizados na cloche ou no quadro.

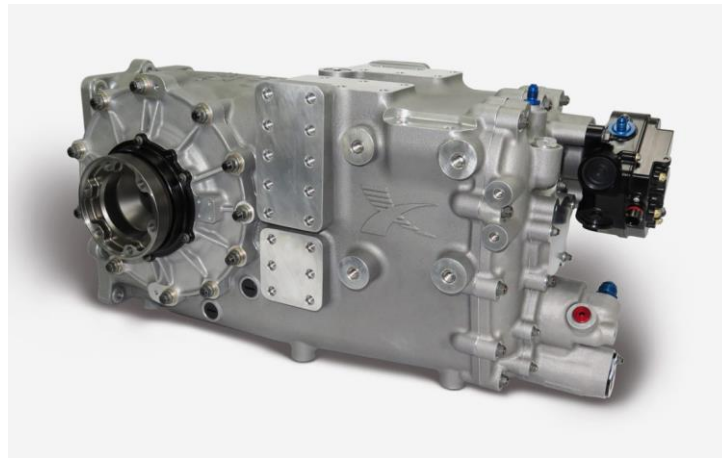


Figura 17 - P1152 Longitudinal [33]

2.3. Tipos de Suspensão

De forma a se obter o comportamento esperado do veículo têm-se como parâmetro essencial a correta escolha do tipo de suspensão. Após a sua correta seleção, é possível obter na condução do veículo um melhor comportamento dinâmico.

A finalidade de uma suspensão é permitir a ligação do chassis às rodas, tanto para um carro citadino como para um carro desportivo ou de competição. Deste modo verifica-se para ambos as mesmas principais funções de uma suspensão, que são conforto e comportamento em condução, sendo que quanto ao conforto pretende-se avaliar a forma como a suspensão reage às irregularidades da superfície e como se comporta também com ondulações, solavancos, esquinas, buracos e mudanças de camber. Quanto ao comportamento em condução têm-se como objetivo perceber o papel da suspensão na resposta dinâmica do veículo e como este reage às contribuições do motorista, por exemplo durante a travagem ou mudanças de direção [34].

Contudo, no desporto motorizado, apesar das principais funções serem as mesmas, o conforto não é um aspeto importante sendo dada maior prioridade ao comportamento da suspensão em condução.

2.3.1. Geometria de Rodas e Parâmetros de Suspensão

Um dos fatores principais para uma suspensão obter o desempenho desejado é esta apresentar a melhor afinação possível, sendo por isso necessário realizar uma análise dos parâmetros principais que são camber, ângulo de avanço (*cáster*), ângulo de saída (*king pin inclination*) e angulo de convergência.

Para a situação em estudo, que representa um veículo de competição, a possibilidade de afinação de todos estes parâmetros é bastante importante, sendo muitas vezes não necessária, mas que os elementos das equipas pretendem ter à sua disposição, visto que deste modo torna possível realizar pequenos ajustes e correções ao comportamento dinâmico do veículo

O ângulo de camber consiste na inclinação lateral de roda relativamente ao plano vertical, Figura 18. Este é considerado negativo quando apresenta uma inclinação para interior do chassis, sendo visto como positivo quando este se afasta do chassis [35], [36], Figura 19.

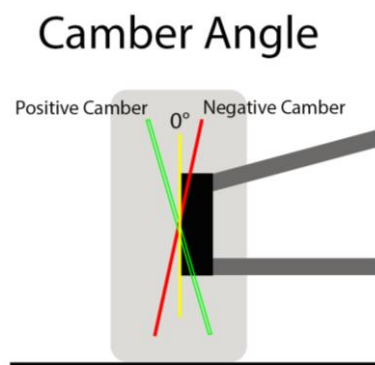


Figura 18 - Ângulo de *Camber* [36]

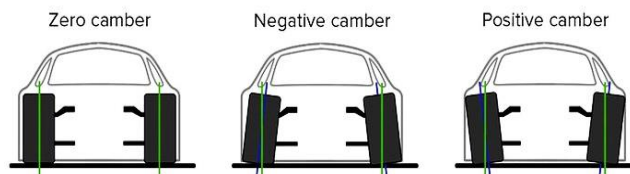


Figura 19 - Configurações de ângulos de *Camber* [37]

Este parâmetro é medido em graus a partir da frente do carro. Tendo como importância controlar a área de contacto entre o pneu e a estrada, conseguindo em elevada carga dinâmica obter o maior contacto possível.

O ângulo de avanço (*Cáster*) consiste na inclinação de uma linha virtual que interseja o ponto de aplicação do braço superior e inferior na manga de eixo, quando comparado com uma linha vertical, Figura 20. Para este angulo, considera-se como positivo quando temos o ponto superior mais atrás do inferior e como neutro quando os dois pontos estão alinhados, Figura 21. Quando se refere este ângulo como negativo, verificando o ponto superior à frente do inferior, torna o veículo não possível de conduzir [38].

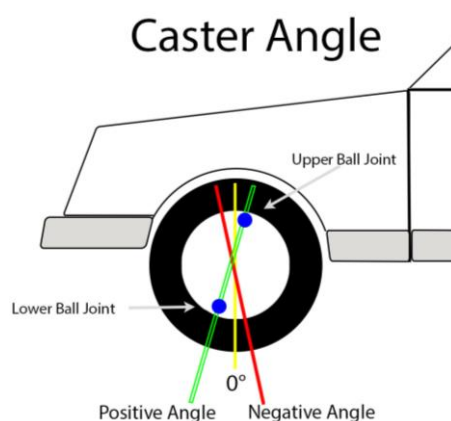


Figura 20 - Ângulo de *Cáster* [38]

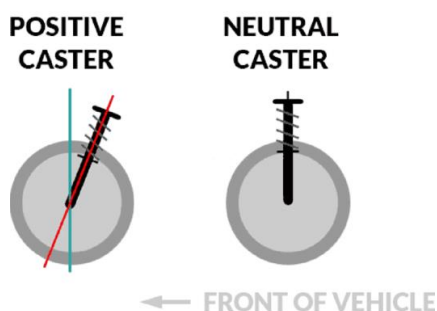


Figura 21 - Configurações de ângulos de *Cáster* [37]

É medido em graus e pode ser visualizado através da lateral do veículo. Com este consegue-se uma maior sensibilidade na direção do veículo, aumentando deste modo o desempenho dinâmico deste [38] – [40].

Ângulo de saída (*KPI – King Pin Inclination*) é a inclinação lateral para o interior do chassi, sendo esta verificada através de uma linha virtual entre o ponto superior e inferior de ligação dos braços à manga de eixo com a linha vertical, [41], como se pode observar na Figura 22.

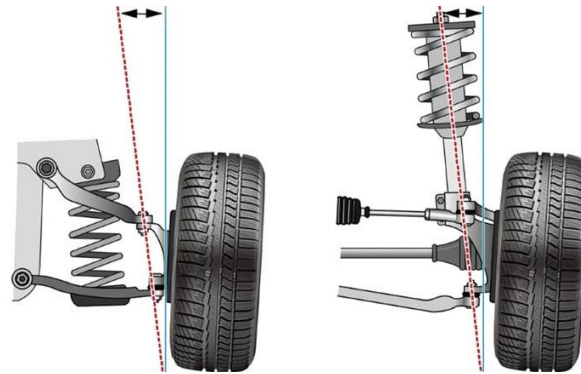


Figura 22 - Ângulo *King Pin* [42]

Atualmente nenhum veículo inclui um ângulo físico de *king pin*, ficando este sempre definido por eixo virtual como determinado anteriormente. Sobre este ângulo pode-se afirmar que se o eixo virtual for perpendicular ao solo verificar-se-á um deslocamento do ponto do contante, para o centro do pneu [41].

Ângulo de convergência (*TOE angle*) é a direção em que as rodas estão orientadas em relação à linha central do veículo, como pode ser observado na Figura 23. Neste caso se as rodas estão direcionadas para o interior considera-se que é um ângulo positivo ou que estão convergentes, ao contrário, ou seja, estas estarem direcionadas para o exterior do chassi estamos perante um ângulo negativo e por isso verifica-se uma divergência [42], [43].

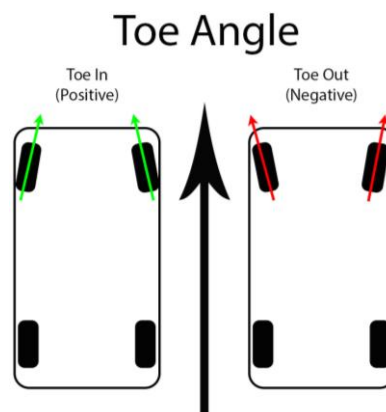


Figura 23 - Ângulo *TOE* (Convergência e Divergência) [43]

Este parâmetro também é considerado um ângulo e é medido em graus. Com este é possível obter uma afinação de forma a ser possível compensar o esforço provocado pela tração do veículo em aceleração, sendo possível diminuir a resistência ao movimento. Esta difere de um veículo de tração dianteira para um de tração traseira. É possível também conseguir uma afinação da sobreviragem e da subviragem através da convergência e da divergência, respetivamente [42], [43].

2.3.2. Tipos de Suspensão Comuns em Veículos de Desporto

Consoante a aplicação a que o veículo será submetido, torna-se necessário escolher qual o melhor tipo de suspensão a aplicar. Ao longo dos anos foram desenvolvidos alguns novos tipos de suspensão, continuando-se a aplicar os já existentes. Assim, alguns dos tipos de suspensão mais utilizados em veículos de desporto são os seguintes:

- *MacPherson*
- Eixo Rígido
- Triângulos Sobrepostos;

Estes são alguns dos tipos de suspensões mais utilizados e que aos quais ao longo do tempo foram realizadas algumas melhorias ou evoluções, de forma a se conseguir obter um melhor comportamento e resposta da suspensão do veículo, e também conseguindo com que estes acompanhassem a evolução da indústria. Sendo estas divididas em duas categorias, dependentes e independentes.

Nas suspensões independentes verifica-se independência de movimentos de suspensão de cada roda entre o lado esquerdo e o lado direito de um eixo, permitindo um movimento independente de forma a superar irregularidades do piso por parte de cada roda.

A partir da solução de eixo rígido com molas em feixe de laminas, foram realizadas algumas alterações e melhorias.

A ligação do eixo ao quadro por 4 barras longitudinais biarticuladas, em geral designadas de Pro4 com aplicação da barra Panhard, é uma excelente solução para todo-o-terreno, tendo-se tornado nalguns desportos motorizados um dos tipos de suspensões mais utilizados para o eixo traseiro. Tal facto deve-se, para além de outros fatores, à obtenção de um elevado valor de cruzamento de eixos, importante no TT.

Conseguindo-se uma melhor regulação e afinação dos ângulos de trabalhos da suspensão. Este exemplo pode ser visualizado na imagem a seguir apresentada, Figura 24.

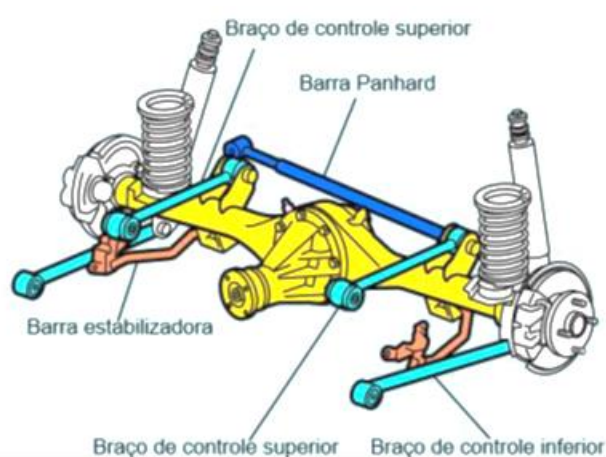


Figura 24 - Exemplo ilustrativo do eixo rígido com barra *panhard* e barras longitudinais

Atualmente, a suspensão *MacPherson* é a mais utilizada nos carros de passeio, preferencialmente no eixo dianteiro, de forma a atingir uma boa performance e conforto. Esta suspensão é também utilizada em veículos de turismo devido à sua facilidade de aplicação e também por ser de aplicação muito compacta.

Com a sua aplicação, consegue-se com o conjunto de mola-amortecedor fazer com que este confira também uma função como elemento estrutural do veículo[44], [45]. Comumente, este tipo de suspensão é mais aplicado no eixo dianteiro, sendo que, atendendo à sua forma de aplicação, necessita de uma torre de suspensão, e este tipo de estrutura não é usualmente concebida no eixo traseiro do carro, devido a ser possível maximizar o espaço para a bagageira e também para o depósito de combustível. Na imagem seguinte, Figura 25, observa-se um exemplo ilustrativo deste tipo de suspensão. É o tipo de suspensão, mais aplicado em veículos de Rally, WRC, à frente e a trás.

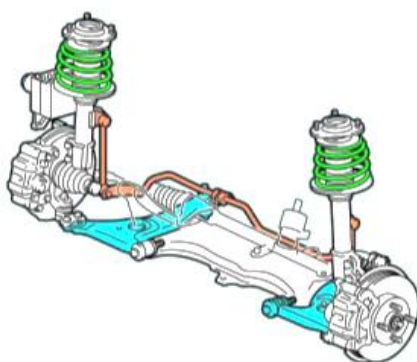


Figura 25 - Exemplo Ilustrativo de uma suspensão *MacPherson*

Por fim, é importante abordar a suspensão do tipo triângulos sobrepostos, Figura 26, à qual será dado mais ênfase, pois será a selecionada no desenvolvimento da dissertação. Este tipo de suspensão é sobretudo utilizado em veículos desportivos de produção ou, também, em veículos de corrida, apenas com foco de utilização em pista. Muitas vezes verifica-se a utilização deste tipo de suspensão por parte de algumas marcas noutras vertentes de carros, devido às suas elevadas capacidades, facilidade de aplicação em chassis e, principalmente, devido aos resultados de performance já comprovados.

Para a dissertação foi selecionado este tipo de suspensão para o veículo visto ser um dos mais versáteis tipos de suspensão relativamente às suas geometrias e também devido ao conhecimento e estudos já existentes no mercado.

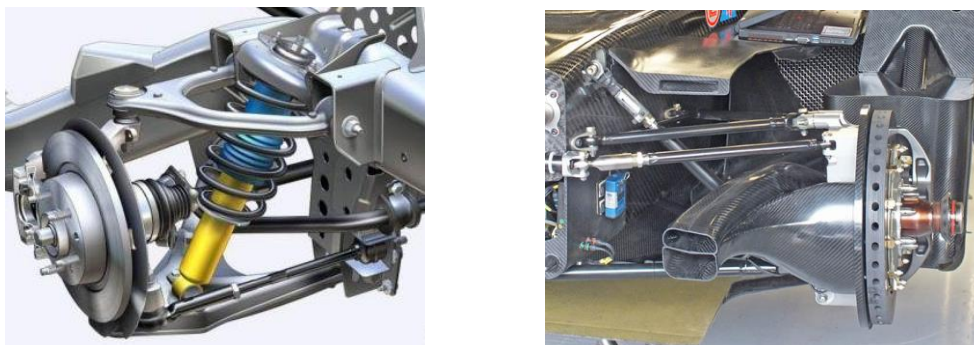


Figura 26 - Exemplo de uma suspensão de triângulos sobreposto de um carro de passeio (Esquerda)e carro categoria LMP (Direita)[46]

2.3.3. Triângulos Sobrepostos

Este tipo de suspensão é, também, conhecido como *double wishbone*, sendo este um dos tipos de suspensão independente.

Este tipo de suspensão apresenta alguns componentes, como se pode observar na Figura 27, tais como os braços em forma de A, uma mola, um amortecedor e um cubo de roda. Em casos de veículos de passeio o conjunto mola amortecedor atuam entre o chassi e o braço inferior, mas no caso de veículo de competição este conjunto é substituído por um conjunto de tirante mais um balanceiro que ao trabalharem em conjunto transmitem o movimento a um conjunto mola amortecedor aplicado no quadro.



Figura 27 - Componentes de Suspensão Veículo do Tipo CN

Deste modo, consegue-se como já referido, um melhor controlo do movimento da suspensão e consequentemente uma maior estabilidade do veículo, devido a menor massa não suspensa, facilitando uma melhor superação das irregularidades do piso por parte das rodas do veículo[47].

Este tipo de suspensão é utilizado, também, devido a ser bastante configurável e as suas excelentes características de movimentos. Determinadas configurações são atingidas devido ao diferente comprimento entre os dois braços utilizados, superior e inferior, passando a ser possível obter melhores comportamentos e estabilidade dos veículos. Com esta configuração de suspensão é possível ajustar principalmente o ângulo de *Camber*, sendo também possível realizar a configuração do ângulo de *Caster* [48].

Contudo com a suspensão de triângulos sobrepostos consegue-se também um ajuste do ângulo de Saída, bem como a altura do centro de rolamento [47].

Apesar das suas vantagens de configuração a suspensão de triângulos sobrepostos, apresenta algumas desvantagens sendo mais complexa do que a *MacPherson*.

Enquanto que a *MacPherson* é mais adequada a veículos de elevado desempenho de turismo [47], que apresentam um maior perfil e em alguns casos também aplicados em veículos que necessitem de um maior curso de suspensão, como por exemplo carros de rally.

Apesar disso, a suspensão de triângulos sobreposto consegue, devido ao seu desenho, e de como cumpre a condição de ligação da roda a um quadro com características muito próprias, isto é, obtém-se um chassi de altura total muito baixa, esguia e aerodinâmica. E como se pode observar na Figura 28 o quadro é mais baixo que as rodas, tornando inviável a aplicação de uma *MacPherson*.



Figura 28 - Relação da altura das Rodas com a altura do Chassi

Como já referido na introdução deste subcapítulo, este design permite obter configurações de suspensão de nível superior permitindo posicionar o CIR_f (Centro Instantâneo de Rotação na vista frontal), CIR_l (Centro Instantâneo de Rotação na vista lateral) de forma adequada e com isto controlar o valor de ganho de *camber*, *antidive*, *antilift* e *antisquat*. Permitindo ainda a afinação destas numa gama alargada, sendo deste modo a suspensão de eleição para veículos de competição [49].

Esta suspensão, também é possível ser aplicada no eixo traseiro, sendo que terá de ser realizada uma modificação, visto que se trata de um eixo não direcional, e por isso será aplicada uma barra de convergência, de modo a ser possível substituir o tirante da direção [50]

2.3.4. Diferentes Designs

Numa suspensão de triângulos sobrepostos num carro de Fórmula 1, os seus componentes estão agrupados em três secções que são, suspensão *inboard*, suspensão *outboard*, e os elementos que estão expostos ao fluxo de ar, que se pode verificar na Figura 29 [34].

Os elementos de suspensão que estão *inboard* são os que se encontram debaixo da carroçaria do carro, sendo estes elementos como a mola, o amortecedor, os balanceiros e as barras anti rolamento. Os elementos *inboard* ligam-se aos elementos sujeitos ao fluxo de ar que são os triângulos superior e inferior, os tirantes (*pull* ou *push rod*) e os tirantes de ajustamento da convergência. Estes elementos devido ao facto de estarem expostos ao fluxo de ar é necessário apresentarem uma geometria relativamente esbelta e de baixa espessura de forma a diminuir o seu arrasto aerodinâmico. De seguida estes elementos ligam-se aos elementos de suspensão *outboard*, que estão atrás das rodas e que correspondem à manga de eixo, semieixos e rolamentos [34].

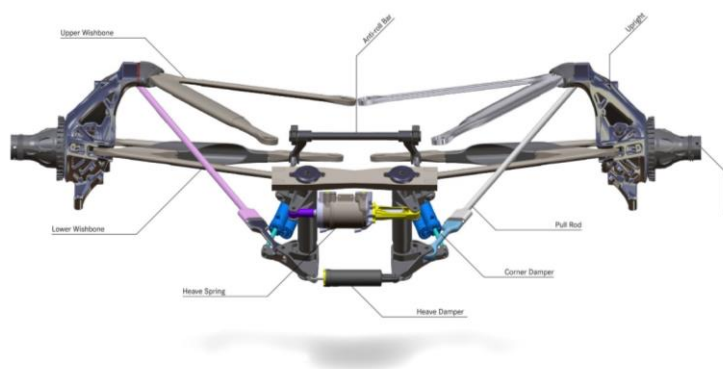


Figura 29 - Suspensão Traseira do Mercedes-AMG F1 W10 EQ Power+ [34]

Na Figura 29 podemos verificar que estes utilizam 3 ou 4 amortecedores e uma mola por eixo, devido à variabilidade das cargas dinâmicas. Pode-se reparar que neste caso é utilizado um sistema de mola pneumática e um amortecedor em separado de forma a ser possível conseguir um maior controlo sobre o funcionamento e resposta da suspensão [34].

Quanto à composição dos componentes desta suspensão este são fabricados na sua maioria em compósitos, e os que se encontram atrás das rodas são fabricados em metal. Neste design a calibração e afinação da suspensão é realizada usando anilhas metálicas ou elementos de suspensão de diferentes tamanhos bem como a alteração da pressão do gás do amortecedor e a substituição da mola por outras de diferentes constantes de rigidez [34].

Para os veículos do Tipo barqueta, categoria CN – FIA, é utilizado um tipo de suspensão muito semelhante ao apresentado para os veículos de Fórmula 1. Para este caso difere na utilização de um conjunto mola amortecedor que é aplicado no quadro, com maior uso de *pushrod*.

É também verificada outra diferença na aplicação do tirante ao balanceiro sendo que nestes veículos normalmente são aplicadas ao triângulo inferior quando aplicados no eixo dianteiro, ou no caso de serem aplicadas ao eixo traseiro esta é normalmente ligada à manga de eixo ou também ao braço inferior, de modo a ser possível sempre obter uma barra que trabalhe à compressão, *Push Rod*. No caso de esta barra ser aplicada ao triângulo superior estaríamos a aplicar sobre esta esforços de tração, e por isso seria uma, *Pull Rod*, sendo possível de visualizar a diferença na Figura 30.

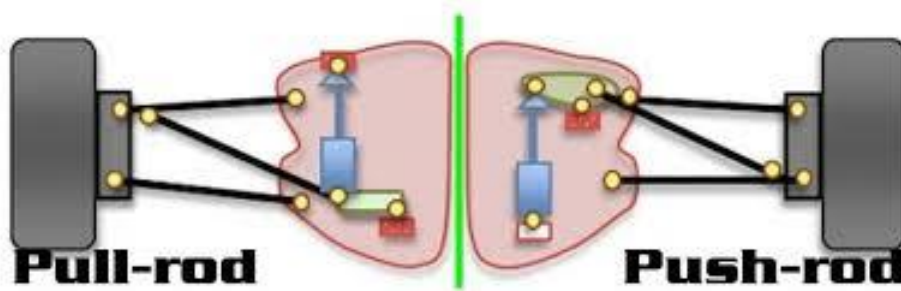


Figura 30 - Diferença entre Pull Rod e Push Rod [51]

Estes dois tipos de design da suspensão de triângulos sobrepostos são bastante usados nos casos de competição referidos, devido a ser possível diminuir a massa aplicada sobre as rodas bem como o número de componentes que estão sujeitos ao fluxo de ar e consequentemente causam arrasto aerodinâmico.

2.3.5. Geometria de suspensão a aplicar no quadro a desenvolver

O desenho deste tipo de veículos resulta em quadros muito baixos e compactos, como já referido, deste modo a suspensão mais convenientes para quadros destas categorias são as suspensões de triângulos sobrepostos. O desenvolvimento de um quadro passa por várias fases ou níveis, o avançamento geral e suas medidas interiores, as dimensões mínimas e máximas para cumprimento do regulamento [1], e a forma como se liga todos os componentes do chassis. Desta forma um quadro só pode ser integralmente desenhado depois de selecionado todos os componentes e acessórios.

Uma parte fundamental do chassis são as suspensões, estas ligam-se ao quadro de uma forma única fazendo um conjunto que não pode, ou não deve ser alterado. O quadro deve possuir apoios para a ancoragem dos elementos da suspensão, estes apoios devem ser desenhados para um determinado tipo de ligação, que pode ser por rótula esférica, casquilhos cilíndricos ou outro.

No decorrer deste projeto o quadro desenhado conta com apoios para as suspensões dianteiras. As suspensões traseiras vão ancorar na caixa de velocidades que será do tipo estrutural.

Neste projeto a solução adotada foi a aplicação de braços com três rótulas, sendo que no quadro iram atuar terminais de rótula com espiga roscada com possibilidade de afinação e à manga de eixo atuará uma rótula montada em caixa, como podemos visualizar na Figura 31.

Ainda relacionado com a aplicação dos braços será possível obter algumas afinações com a utilização de anilhas cônicas ou planas de diferentes espessuras, usadas nos pontos de ancoragem. Quanto ao tipo de mola e amortecedor a ser aplicado, irá ser usado um conjunto mola amortecedor aplicado no quadro e que trabalhará em conjunto com um balanceiro e o respetivo tirante (*Push-Rod*).



Figura 31 - Exemplo de Suspensão Frontal [52]

No caso do eixo traseiro, devido a este não ser direcional poder-se-á usar um braço inferior em forma de trapézio ou na forma de triângulo, semelhante ao superior, e um tirante de convergência. Na solução representada na Figura 32 será aplicada no quadro um conjunto propulsor em que a caixa é estrutural.

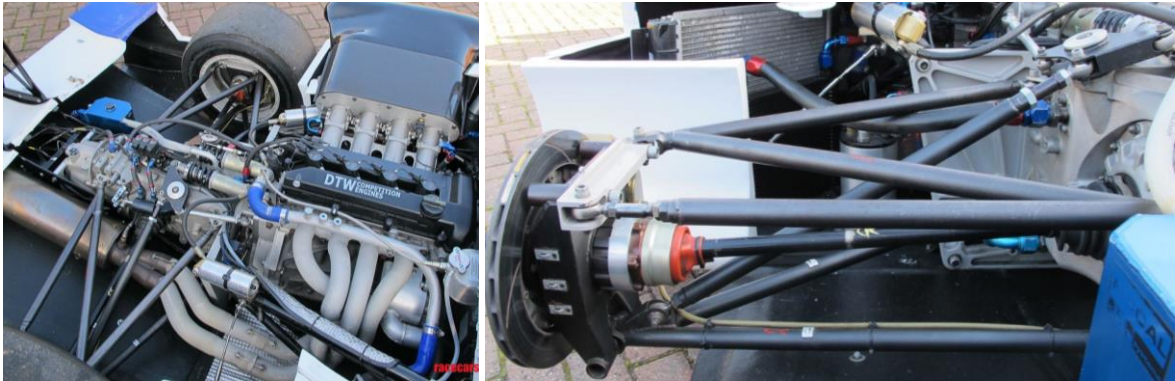


Figura 32 - Exemplo de Suspensão Traseira [52]

Um quadro de tipologia tubular deve ser desenhado de tal forma que os seus elementos (tubos) passem no local onde se pretende fixar algum componente. No caso das suspensões, é necessário posicionar os tubos do quadro de forma a proporcionar a ancoragem dos elementos de suspensão no ponto adequado e de forma robusta, pois os esforços resultantes são elevados. Na Figura 33 podemos visualizar dois exemplos de ligação ao quadro.



Figura 33 - Exemplos de ligação dos elementos de suspensão ao Quadro

2.4. Material Utilizado para a Construção da Estrutura

O material a utilizar na construção de quadros tubulares deverá ser selecionado em função de vários parâmetros e características e ainda pela sua disponibilidade e custo. Este terá de apresentar boas propriedades mecânicas de forma a suportar todos os esforços a que os elementos da estrutura estarão sujeitos, e ainda garantir a segurança dos ocupantes dentro do habitáculo.

Segundo o regulamento já referido anteriormente, para o desenvolvimento do habitáculo apenas são passíveis para utilização dois materiais aprovados, o aço ao carbono estirado frio e ligas de aço do tipo 25CD4. Além do tipo de aço a utilizar, existe ainda a restrição relativamente à espessura mínima do tubo aplicado, consoante o material escolhido [1], [2].

Para os restantes elementos estruturais, além do habitáculo e arcos de segurança não existe nenhuma restrição no regulamento [1] quanto ao tipo de material que pode ser utilizado. Podendo inclusive, possuir elementos não estruturais (mas que reforçam a estrutura), como placas de fundo ou placas laterais e outros materiais como o alumínio ou laminados de carbono.

No entanto, de forma a se assegurar uma maior resistência da estrutura e segurança dos ocupantes, é sugerido que se utilize o mesmo tipo de aço usado para o habitáculo e arcos de segurança para toda a restante estrutura. Esta abordagem é importante para que em situações de impacto ou capotamento não ocorram deformações excessivas da estrutura em geral, mas, principalmente, da célula de sobrevivência.



Figura 34 - Fundo Plano em Alumínio de um Formula Ford (Esquerda) [53] e Painéis Laterais em Laminados de Carbono no Osella PA200 (Direita) [54]

Para os arcos de segurança, *safety structure*, é necessário cumprir dimensões mínimas de diâmetro e espessura dos tubos usados, diâmetro de 45 mm e espessura de 2,5 mm, referidas no regulamento FIA-CN [1]. Para a célula de sobrevivência é necessário cumprir a espessura mínima, mas para a restante estrutura os regulamentos FIA-CN [1] não apresentam nenhuma restrição, podendo ser aplicadas secções tubulares de menor dimensão e espessura. Assim, podem aplicar-se secções tubulares de menor espessura no resto da estrutura, de forma a ser possível diminuir o peso e custos finais.

De forma a caracterizar melhor as propriedades e comportamento dos materiais referidos, segue-se uma pequena exposição sobre cada um destes.

2.4.1. Aço ao Carbono Sem Costura Estirado a Frio

Os tubos de aço ao carbono podem ser produzidos usando diferentes técnicas, a mais comum é enrolar uma tira de chapa e posteriormente soldá-la, designado como tubo com costura. Tubos produzidos por este método de fabrico não são permitidos para os arcos de segurança, no entanto podem ser utilizados para a célula de sobrevivência.

Neste caso, o método recomendado pelo regulamento [1] quando se usa tubos de aço ao carbono é a estiração a frio, "*Seamless pipe*", Figura 35. Este método consiste na perfuração de um tubo de aço maciço, quase fundido, através de um mandril, de forma a ser possível se produzir um tubo sem emendas ou juntas [55], [56].

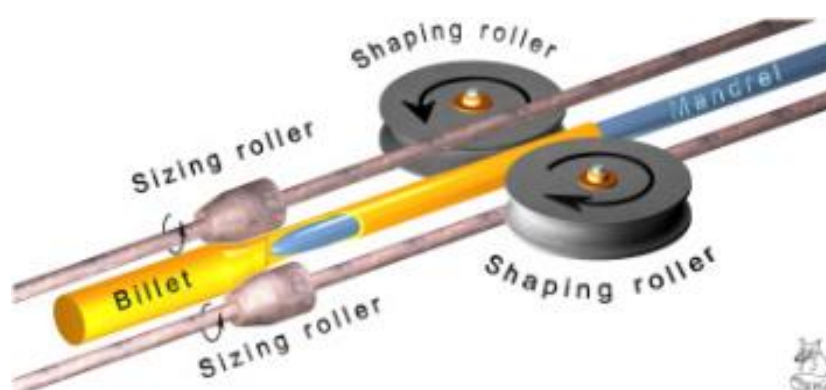


Figura 35 - Ilustração do método de estiramento a frio. "*Seamless Pipe*" [55]

Relativamente ao aço ao carbono é o material mais comumente usado devido às suas excelentes propriedades: rigidez, durabilidade, ductilidade, maquinabilidade, elevada disponibilidade e variadas possibilidades de ligação [55], [56].

Este tipo de aço contém um máximo de cerca de 2.1% de carbono, sendo que não existe um valor mínimo especificado para outros elementos, como manganês, silício e cobre. Estes normalmente apresentam 1.65%, 0.6% e 0.6%, respetivamente, sendo que para valores muito elevados de elementos de liga, o aço passa a ser considerado como aço ligado.

O aço ao carbono é também dividido em três categorias de acordo com o seu teor de carbono: baixo, médio e alto. Na Tabela 1 está exposta uma comparação das três categorias entre a percentagem de carbono na microestrutura e suas propriedades [56], [57].

Tabela 1 - Categorias do Aço ao carbono, divididas pelo teor de carbono [56], [57]

| | Teor de Carbono | Microestrutura | Propriedades |
|--------------|-----------------|------------------|---|
| Baixo | < 0.2 % | Ferrite, Perlite | Baixo endurecimento e preço. Elevada ductilidade, dureza, maquinabilidade e soldabilidade |
| Médio | 0.25 – 0.60 % | Martensite | Baixo endurecimento e resistência ductilidade e dureza mediana |
| Alto | 0.60 – 1.25 % | Perlite | Elevado endurecimento e resistência e baixa ductilidade |

2.4.2. Ligas de Aço do Tipo 25CD4

Outro dos tipos de aços recomendado pelo regulamento da FIA [1] ou da FPAK [2] é o aço liga do tipo de 25CD4, sendo um aço do tipo níquel-crómio-molibdênio usado maioritariamente em contexto estrutural.

Para este tipo de aço existem diferentes tipos de nomenclaturas, consoante a norma a que se aplica, podendo seguir-se normas europeias, americanas ou outras normas internacionais, sendo possível observar na Tabela 2 as principais diferenças [58].

Tabela 2 - Diferentes nomenclaturas do Aço 25CD4, segundo várias normas Mundiais [58]

| EN | USA | DIN/UNI/ISO | JIS | AFNOR | BS | GB | SS |
|-----------------------------|---------|-------------|------------------|-------|---------------------------|--------|------|
| 25CrMo4 (1.7218) | SAE4130 | 25CrMo4 | SCM420 SCM430 | 25CD4 | 708A25 708M25 CFS10 | 30CrMo | 2225 |

A liga de aço do tipo 25CD4 é um aço ligado que pode receber tratamento térmico com uma resistência entre os 700 a 950 N/mm² e uma boa soldabilidade. Normalmente é aplicado em indústrias como a automóvel e a aeroespacial [59]. Alguns dos componentes presentes nestas ligas são os que se apresentam na Tabela 3, com as respetivas percentagens da composição.

Tabela 3 – Composição da liga de aço 25CD4 [59]

| Constituintes | C | P | Si | Mn | S | Cr | Mo |
|-----------------------------|----------------|---------------|-------------|-----------|---------------|-----------|----------------|
| Percentagens (%) | 0.22 – 0.29 | 0.025 máx. | 0.04 máx | 0.6 – 0.9 | 0.035 máx. | 0.9 – 1.2 | 0.15 – 0.30 |

De forma a ser possível entender melhor o comportamento deste aço à tração, apresenta-se na Tabela 4 uma comparação entre os valores de tensão de rotura, tensão de cedência e alongamento, para as situações de alívio de tensões, normalizado e tratados a quente [60].

Tabela 4 - Propriedades da liga de aço 25CD4 relativas a ensaios de tração, tensão de rotura, tensão de cedência e alongamento

| Propriedades | Valor mínimo em alívio de tensões | Valor mínimo normalizado | Valor mínimo em tratamento a quente |
|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Tensão de Rotura (MPa) | 740 | ----- | 1100 |
| Tensão de Cedência (MPa) | 590 | 500 | ----- |
| Alongamento (%) | 15 | 25 | ----- |

O aço 25CD4, como a maioria dos aços ligados, pode ser obtido sob várias formas, sendo que as principais são tubo, barra, folha e placa. Sabendo as suas formas possíveis, apresentam-se em seguida alguns exemplos da sua utilização [60]:

- Estruturas aeroespaciais;
- Chassis de veículos como karts e automóveis desportivos, bicicletas e motociclos;
- Tubos para transporte de gases pressurizados;
- Alguns componentes da indústria automóvel, por exemplo volante do motor;
- Células de segurança para veículos usados em corridas ou em estrada

2.4.3. Liga de Alumínio da Série 7000 – AW7075

Como referido no início deste subcapítulo também se pode aplicar sobre os quadros em estudo seções produzidas em alumínio. Como os fundos planos ou placas frontais e traseiras.

Para isso recorre-se à utilização de ligas de alumínio da série 7000 devido à sua elevada relação de resistência/densidade, e também visto que a resistência desta muitas vezes ser comparada com a de alguns aços [61].

Esta liga é frequentemente usada em aplicações mais extremas, sendo aplicada nas indústrias aeronáuticas, aeroespacial, nuclear e automóvel [61]. Para se perceber da melhor forma como esta liga se comporta apresenta-se na Tabela 5 a composição química desta.

Tabela 5 - Composição Química Liga de Alumínio AW7075 [61]

| Elemento | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|--------------|-----|-----|---------|-----|--------------|----------------|--------------|-----|----------|
| Percentagens | 0,4 | 0,5 | 1,2 - 2 | 0,3 | 2,1 – 2,9 | 0,18 – 0,28 | 5,1 – 6,1 | 0,2 | Restante |

Através da análise da tabela anterior podemos verificar que esta liga irá apresentar uma muito boa maquinação, uma boa soldabilidade e uma boa estabilidade dimensional [61].

De forma a ser possível entender melhor o comportamento desta liga quando sujeito a esforços de tração, apresenta-se na Figura 36, uma tabela com os valores obtidos referentes à tensão de rotura, tensão de cedência, alongamento e dureza. Sendo este resultado obtidos consoante a espessura das placas usadas.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

PLACAS (EN 485 - 2)

| ESPESSURAS (mm) | ESTADO | Rm* (MPa) | Rp0.2* (MPa) | A50* (%) | A* (%) | HB - BRINELL DUREZA |
|-----------------|--------|-----------|--------------|----------|--------|---------------------|
| 1.5 - 3 | T651 | 540 | 470 | 7 | - | 161 |
| 3 - 6 | | 545 | 475 | 8 | - | 163 |
| 6 - 12.5 | | 540 | 460 | 8 | - | 160 |
| 12.5 - 25 | | 540 | 470 | - | 6 | 161 |
| 25 - 50 | | 530 | 460 | - | 5 | 158 |
| 50 - 60 | | 535 | 440 | - | 4 | 155 |
| 60 - 80 | | 495 | 420 | - | 4 | 147 |
| 80 - 90 | | 490 | 390 | - | 4 | 144 |

| ESPESSURAS (mm) | ESTADO | Rm* (MPa) | Rp0.2* (MPa) | A50* (%) | A* (%) | HB - BRINELL DUREZA |
|-----------------|--------|-----------|--------------|----------|--------|---------------------|
| 90 - 100 | T651 | 460 | 360 | - | 3 | 135 |
| 100 - 120 | | 410 | 300 | - | 2 | 119 |
| 120 - 150 | | 360 | 260 | - | 2 | 104 |
| 150 - 200 | | 360 | 240 | - | 2 | 104 |
| 200 - 300 | T6 | 360 | 220 | - | 1 | 104 |
| 120 - 150 | | 360 | 260 | - | 2 | 104 |
| 150 - 200 | | 360 | 240 | - | 2 | 104 |
| 200 - 300 | | 360 | 220 | - | 1 | 104 |

*Valores mínimos. **Valores mínimos.

Figura 36 - Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio AW7075 [61]

Esta liga pode ser obtida em várias formas, sendo as mais comuns em placa, folha ou barra. Sabendo isto podemos referir alguns tipos de áreas de aplicação e aplicações mais comuns para a liga, que são [61]:

- Engenharia Mecânica;
- Automação;
- Jigs e acessórios;
- Ferramentas

2.5. Análise por Método de Elementos Finitos para Estudo Estrutural do Quadro

Com base em capítulos anteriores, de forma a ser possível realizar as análises do quadro, durante o seu desenvolvimento, usar-se-á programas de análise computacional segundo a análise de método de elementos finitos.

Com a utilização do MEF, método de elementos finitos, é possível obter resultados numéricos de problemas, como a análise de tensões, temperatura, escoamento de fluidos, aerodinâmica, eletromagnética e eletrônica [62]. Contudo, nesta dissertação o foco incidirá, principalmente, numa análise de tensões.

Através deste método, obtém-se uma solução para os problemas através da resolução de sistemas de equações lineares, que representam numericamente a estrutura em estudo, sendo que o número de incógnitas corresponde ao número de nós multiplicado pelo número de variáveis nodais e, tendo em conta a complexidade da estrutura em análise, quanto maior o número de incógnitas maior será a complexidade sendo necessário recorrer a métodos computacionais [63].

Para se obter uma solução mais próxima possível da solução exata, recorre-se a uma resolução computacional, realizando um refinamento de malha superior, de forma a aumentar a exatidão da solução final [62]. A malha consiste em ligações entre os nós de cada elemento, Figura 37, sendo que quanto mais refinado for, maior é a sua aproximação do elemento ou estrutura original [62], [63].

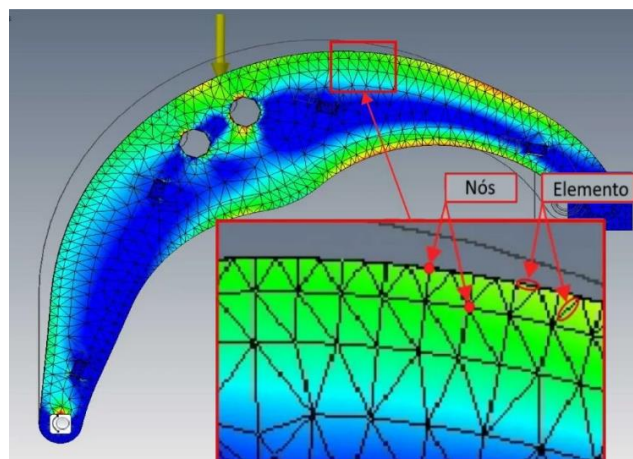


Figura 37 - Representação dos nós, elemento finito e malha.

Quanto ao refinamento da malha é pertinente referir que esta é crucial devido à existência de zonas mais complexas na estrutura, onde podem acontecer concentrações de tensões, sendo assim necessário muitas vezes uma maior precisão nos resultados e, por isso, um maior refinamento, tornando os resultados mais precisos, mas aumentando a complexidade das equações a resolver. Deste modo, no método MEF o refinamento da malha consiste no aumento ou diminuição do número de elementos e a distância entre estes [62], [63].

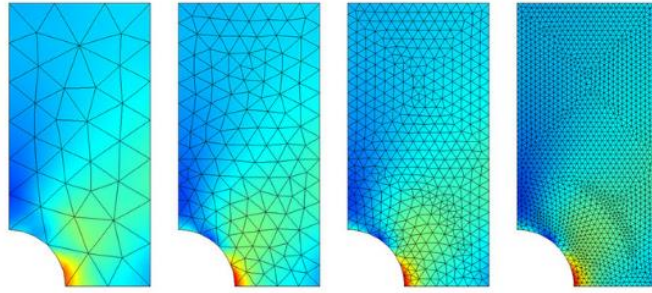


Figura 38 - Exemplo do aumento de refinamento de malha [64]

Com o MEF podem proceder-se a dois tipos de análise, linear ou não-linear. Com uma análise linear, conseguimos na indústria automóvel alguns tipos de análise como [62]:

- Análise de Vibrações;
- Otimização da rigidez de chassis;
- Otimização da aerodinâmica das carroçarias;
- Avaliação de motores, verificando limites de tensões e temperaturas;
- Avaliação da resistência;
- Avaliação/Otimização da resistência ao impacto, deformação plástica e *crashtest*

Quanto à análise não-linear, esta pode ser aplicada na indústria automóvel, na realização de testes de colisão e projeto de estruturas deformáveis [62], e permite visualizar um exemplo de um chassi ser simulado segundo métodos de elementos finitos, de forma a ser possível avaliar o seu comportamento à torção, Figura 39 [65].

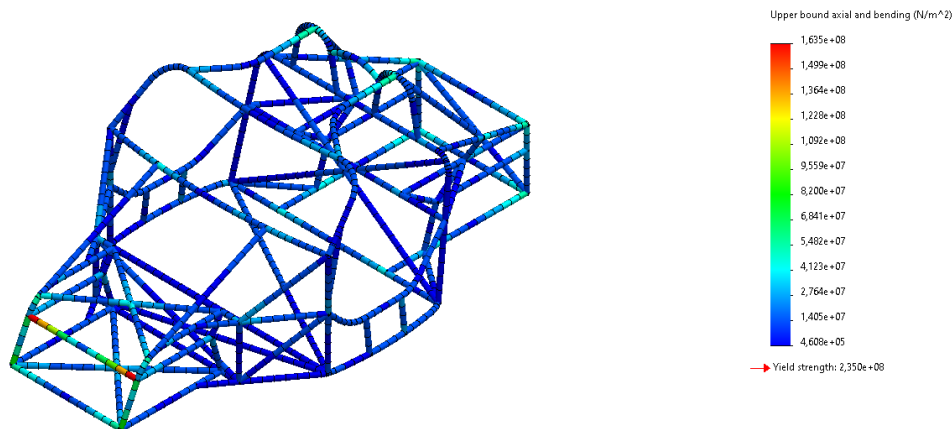


Figura 39 - Exemplo de chassi simulado segundo o método de elemento finitos [65]

Como dito anteriormente, é necessário recorrer à simulação computacional de forma a serem obtidas as soluções com a maior precisão possível. Desta forma utilizam-se vários programas, como o *Ansys*, *Abaqus*, *Fusion 360*, *Inventor* e *Solidworks*, ou outros programas que se considerem mais adequados.[62]

Contudo, o desenho e desenvolvimento do quadro será realizado através da utilização dos programas *Solidworks*. O programa *Ansys* será utilizado para realizar algumas simulações pelo MEF e, posteriormente, a sua avaliação.

3. DESENHO E DESENVOLVIMENTO DO QUADRO PROPOSTO

Neste capítulo realizar-se-á uma exposição sobre o desenvolvimento da dissertação, onde irá ser exposta uma explicação das dimensões usadas no desenvolvimento do quadro, e posteriormente uma exposição do produto final.

De seguida será exposto quais os regulamentos a seguir para a realização das simulações, as respetivas forças aplicadas sobre este, e depois serão explicados os pontos de condições fronteira sobre o quadro de forma a ser possível obter os melhores e mais fidedignos resultados.

3.1. Ergonomia em veículos construídos para o desporto automóvel

Para o estudo da Ergonomia e respetivo dimensionamento do habitáculo existem várias normas e diretrizes possíveis de seguir. Todas estas normas foram possíveis desenvolver como resultado de um estudo intensivo e de pesquisa na área da ergonomia.

As principais normas em que o autor se baseou numa fase mais inicial deste projeto, para obter um melhor conhecimento dos pontos mais importantes no dimensionamento de um habitáculo, foram as normas referidas no Livro “Introduction to Modern Vehicle Design” de Julian Happian Smith [66], onde podemos ver neste livro as referências as normas da Society of Automotive Engineers (SAE) dos EUA, sendo este um dos mais ativos na criação destas normas, e também os parâmetros referentes a este tópicos abordados no livro “Construire une voiture de course” de Bernard Gironnet, onde neste exemplar pode-se observar de melhor forma as medidas mais utilizadas para indivíduos de porte médio/alto para veículos de corrida.

Como podemos verificar nas figuras seguintes, temos vários parâmetros contabilizados segundo o ponto H, que é o ponto central da articulação da linha de centro do tronco com a linha de centro das pernas na posição sentada, sendo todos estes parâmetros considerados para vários percentis.

| Driving rig values | L11 | L40 | L53 | H30 | H17 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Mean | 438 | 16 | 738 | 301 | 628 |
| Maximum | 602 | 25 | 889 | 335 | 689 |
| Minimum | 322 | 5 | 577 | 283 | 580 |
| Std deviation | 48 | 4 | 67 | 11 | 24 |

Figura 40 - Valores de Referência para Dimensões SAE [66]

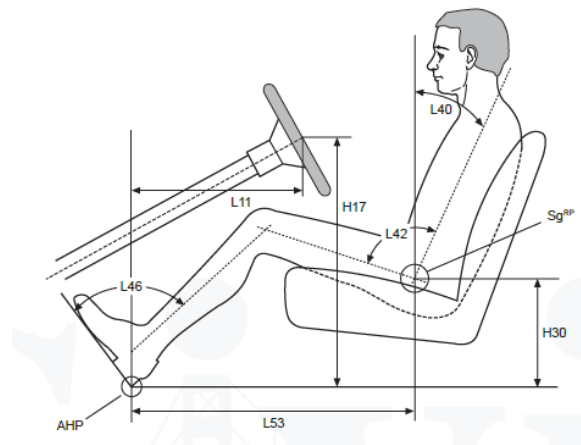


Figura 41 - Configuração da Posição Sentada no Veículo [66]

Como se pode visualizar na Figura 40 e Figura 41 estes valores são os mais focados para carros de turismo e carros desportivos, não sendo tão focados para veículos de competição em pista onde a posição de condução é muito mais baixa e de certa forma quase deitada, de forma a ser possível baixar o centro de gravidade e também realizar uma melhor distribuição do peso. Deste modo procedeu-se à análise do livro Construire Une Voiture de Course Suspension-Châssis de Bernard Gironnet [67], onde podemos encontrar as seguintes ilustrações, Figura 42 e Figura 43.

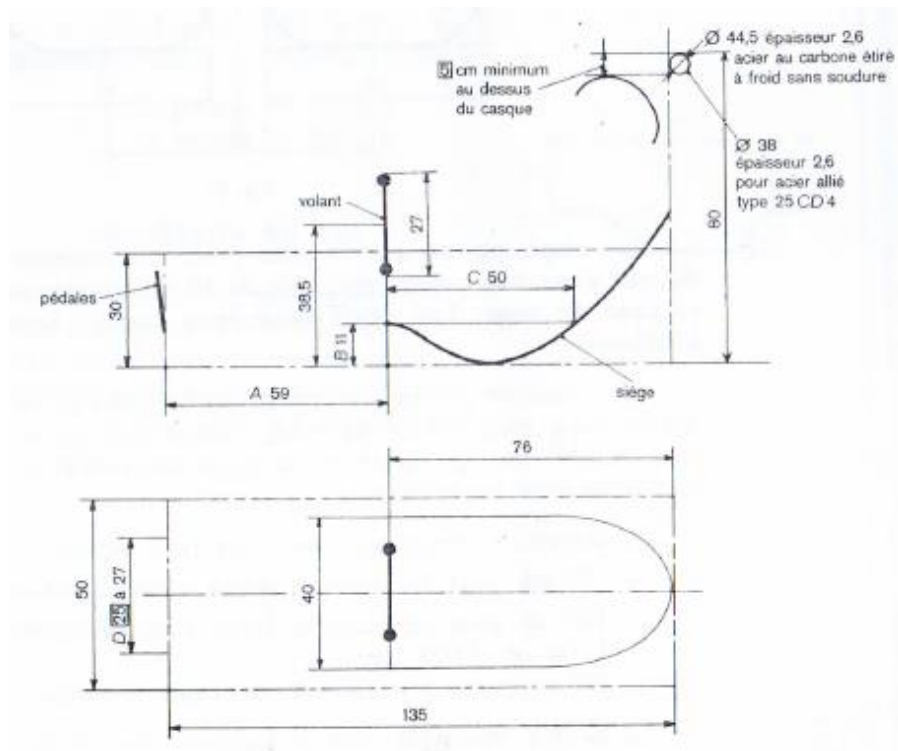


Figura 42 - Vistas Superior e Lateral para Monolugar [67]

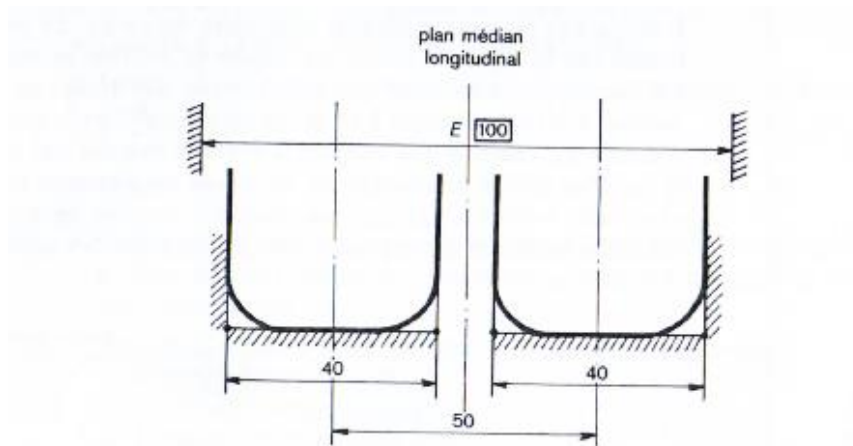


Figura 43 - Vista Segundo o Plano Longitudinal para Veículo Bi-Lugar [67]

As medidas expostas no livro por Bernard Gironnet são para indivíduos de porte médio entre 1.70 e 1,72 m, por isso de modo a se realizar um quadro onde será possível realizar a sua configuração para indivíduos de porte alto e médio-alto, realizou-se algumas alterações nas medidas principais do quadro, aumentando-as. Sendo possível caso necessário, realizar a adaptação deste para indivíduos de diferentes estaturas.

Para a lateral do veículo, Figura 42, é aconselhável usar 590 mm + 760 mm dando um total de 1400 mm, sendo que para este quadro foi utilizado os valores 650 mm + 950 mm apresentando uma folga substancial para acomodar pessoas de maior estatura, obtendo um valor final de 1600 mm. Relativamente à altura é referido o valor de 800 mm e foi utilizado o valor de 1000 mm.

Quanto à largura do veículo, Figura 43, temos como medida mínima 1100 mm, mas devido às medidas fornecidas, como já referido serem representativas para indivíduos de porte médio, foi tomada a decisão de aumentar a largura para os 1200 mm de forma a ser possível considerar um valor de 50 mm de folga entre o lugar e as laterais do chassi e ainda 150 mm entre cada lugar. Foi ainda tido em conta um lugar mais largo com 475 mm em vez de 400 mm. Quanto à dimensão da frente, local onde ficam alojados os pés dos passageiros, foi considerada uma largura de 700 mm permitindo uma folga de 100 mm entre cada passageiro, e ainda 50 mm entre as laterais e o passageiro, tendo sido adotado para a altura o valor de 350 mm.

3.2. Fases de Desenvolvimento da Estrutura Tubular

Para documentar o desenvolvimento da estrutura tubular procedeu-se à demonstração desta como se estivesse a realizar a sua construção, onde será indicado em alguns casos a importância da utilização de alguns tubos bem como justificar a sua localização.

No desenvolvimento desta estrutura foram utilizadas quatro dimensões de tubo distintas, que são as seguintes:

- Tubo Retangular 50 x 25 x 2,5 [mm] (Tubo Retangular);
- Tubo Quadrangular 25 x 25 x 2 [mm] (Tubo Quadrangular);
- Tubo Redondo 45 x 2,5 [mm] (Tubo de 45);
- Tubo Redondo 40 x 2 [mm] (Tubo de 40);

Deste modo começou-se pela base da estrutura onde irão ser posteriormente ligadas as restantes partes desta.

Na Figura 44 podemos observar a vermelho um tubo retangular e um quadrangular usado para suporte de bancos, mas também para rigidez lateral da base, onde o tubo retangular irá posteriormente sustentar tubos de suporte do encosto dos bancos e por isso o uso para este caso de dois tubos diferentes. Verifica-se também a verde quatro tubos quadrangulares onde serão apertadas as guias dos bancos. E por último a azul são identificados dois tubos retangulares na parte traseira, e os restantes quadrangulares de modo quando aplicado um conjunto propulsor ser possível com estes elementos obter uma melhor dissipação dos esforços provocados pelo conjunto.

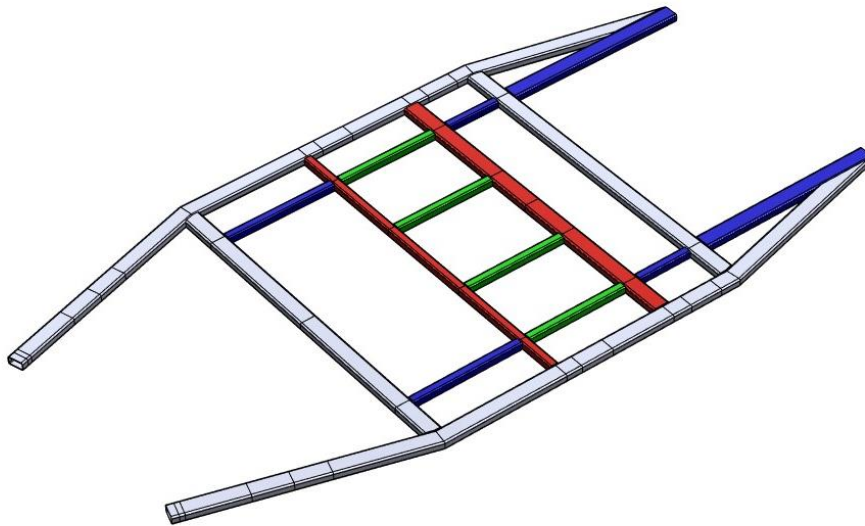


Figura 44 - Base da Estrutura Tubular

Na etapa seguinte desenvolveu-se o arco de segurança traseiro, do qual faz parte também a estrutura anti-capotamento. De forma a ser cumprido o regulamento [1], referido no capítulo anterior, utilizou-se tubo redondo com 45 mm de diâmetro exterior e uma espessura de 2,5 mm em todo o arco, obtendo-se assim uma melhor capacidade estrutural do arco traseiro, apesar de esta dimensão só ser referida pela norma para parte superior do arco de segurança.

Contudo na Figura 45 podemos observar a vermelho a parte superior do que corresponde ao Arco propriamente dito, e que é o componente considerado como a estrutura de anti-capotamento, e ainda podemos verificar em azul um tubo horizontal que ajuda a conferir resistência quando sujeito a esforço laterais.

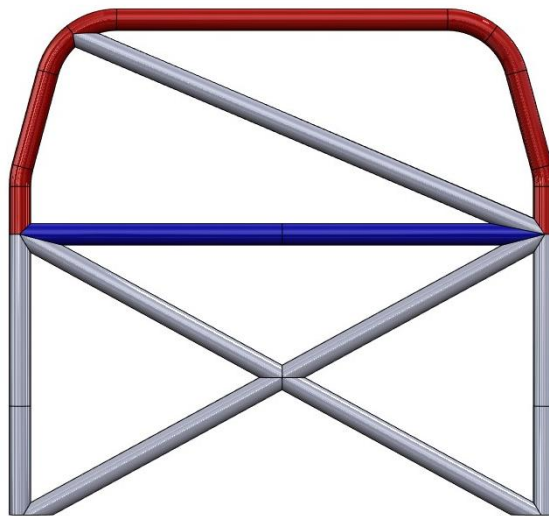


Figura 45 - Arco de Segurança Traseiro

Na Figura 46 podemos observar onde será ligado, através de uma ligação soldada, o arco traseiro à base do quadro.

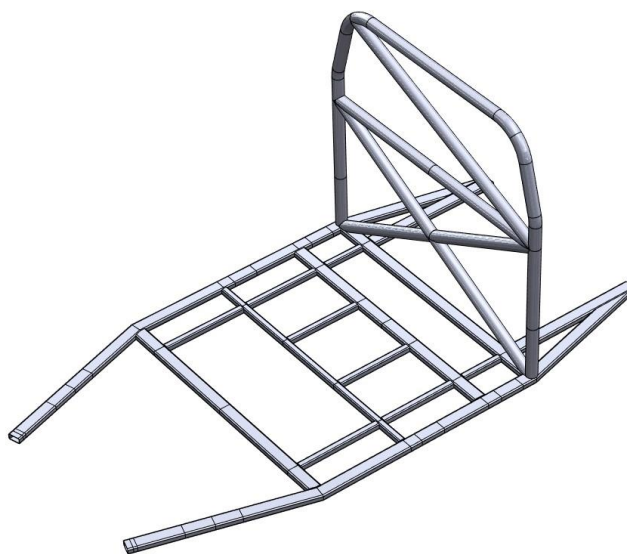


Figura 46 - Arco de Segurança Traseiro aplicado na Base

Por seguinte, procedeu-se ao desenvolvimento do arco frontal de segurança, de forma a ser possível obter o último elemento da estrutura anti capotamento e assim conseguir definir as dimensões da célula de sobrevivência. Para este, tal como, para o traseiro utilizou-se tubo redondo 45x2.5 mm, definidos pelo regulamento [1].

Nesta parte da estrutura que podemos observar na Figura 47 está realçado a vermelho a parte da estrutura que faz parte da estrutura anti-capotamento, e em azul temos uma barra vertical, de reforço, de forma a conferir resistência a esta parte da estrutura quando está sujeita a esforço verticais.

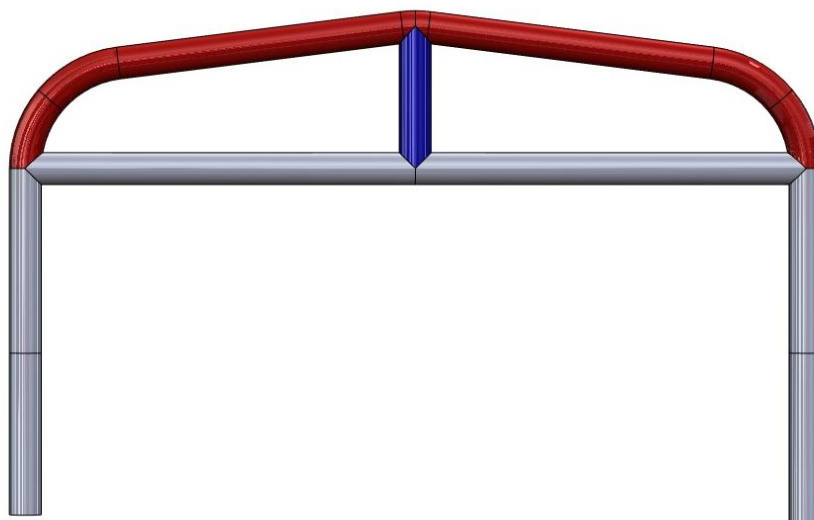


Figura 47 - Arco de Segurança Frontal

De forma a facilitar a idealização desta parte da estrutura em conjunto com as partes apresentadas anteriormente, pode-se observar na Figura 48 a localização do arco frontal quando ligado de forma soldada à base do quadro.

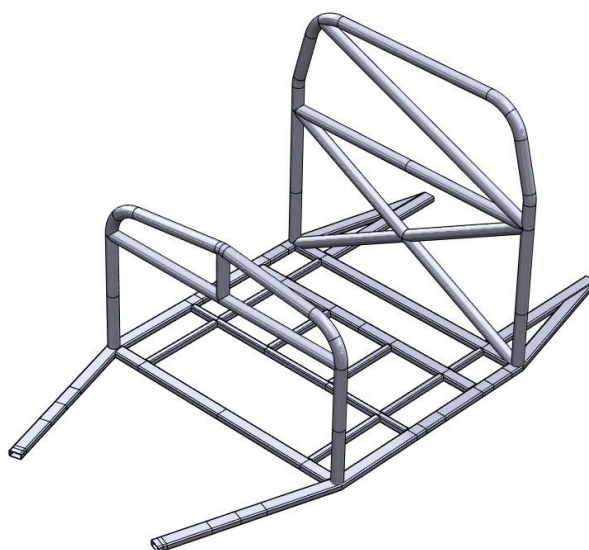


Figura 48 - Arco de Segurança Frontal aplicado na Base

O passo seguinte para a concessão do quadro, corresponde à aplicação de tubo quadrado, com a dimensão 25x25x2 mm entre a barra horizontal do arco de segurança traseira e o tubo retangular também na horizontal na base do quadro, como se pode verificar a azul na Figura 49. Estes tubos têm como principal objetivo serem usados como suporte para uma placa de encosto para os bancos, sendo que também permitem a divisão da célula de sobrevivência do depósito de combustível.

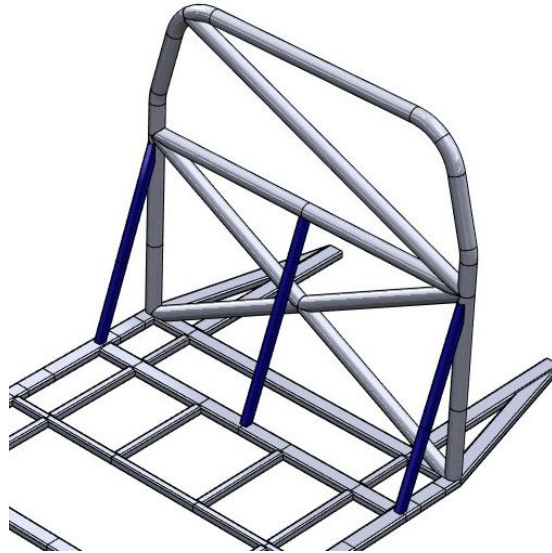


Figura 49 - Tubos para Aplicação de Placa de Alumino para Encosto dos Bancos

Na Figura 50 é possível verificar os tubos já aplicados através de uma ligação soldada no quadro entre a base e o arco traseiro.

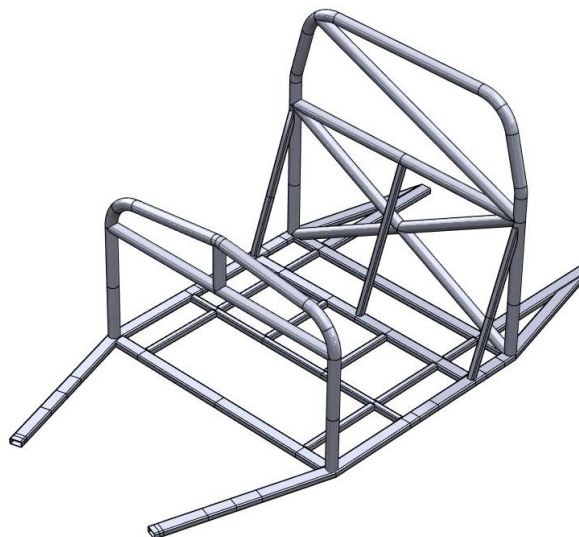


Figura 50 - Tubos do Encosto Aplicados na Estrutura Global

De forma a ser possível fechar a célula de sobrevivência procedeu-se ao desenvolvimento das suas laterais como se pode visualizar na Figura 51. Nesta figura também é possível observar a azul um tubo de reforço horizontal de forma a proteger os ocupantes quando o quadro for sujeito a esforços horizontais laterais, cumprindo deste modo o regulamento [1] visto que sem a presença deste tubo, na realização dos ensaios iria ocorrer uma invasão da célula de sobrevivência por parte do equipamento de ensaio.

Toda a Lateral é desenvolvida com tubo redondo de 40x2 mm.

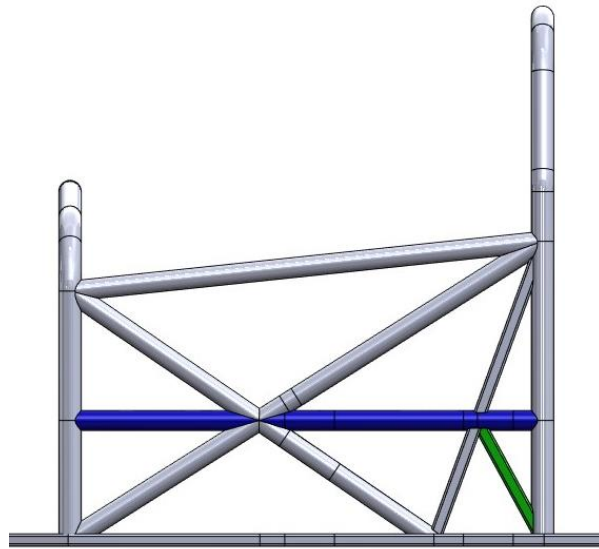


Figura 51 - Laterais da Célula de Sobrevivência

Na Figura 52 é observa-se as laterais ligadas de forma soldada aos dois arcos, sendo iguais do lado direito e do lado esquerdo, visto o quadro a desenvolver ser simétrico.

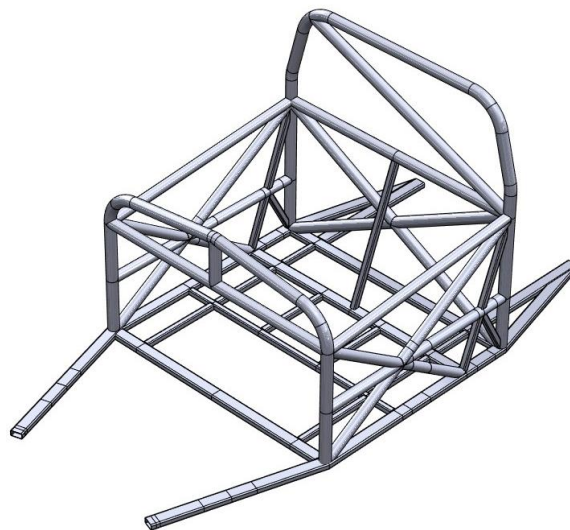


Figura 52 - Laterais ligadas em Conjunto com os Arcos de Segurança Frontal e Traseiro formando a Célula de Sobrevivência

Na fase seguinte procedeu-se ao desenvolvimento das laterais da frente como se pode observar na Figura 53, sendo que esta apresenta dois tubos suscetíveis de explicação quanto à sua aplicação. Relativamente ao tubo realçado a azul foi aplicado de forma a ser possível neste aplicar os suportes para os braços de suspensão e também para na parte superior ser possível mais tarde desenvolver um reforço da frente. Quanto ao tubo identificado a vermelho deve-se à proteção dos pés dos ocupantes em casos de colisões laterais, de forma a não permitir a invasão daquela zona.

Esta parte do quadro desenvolveu-se em tubo redondo 40x2 mm

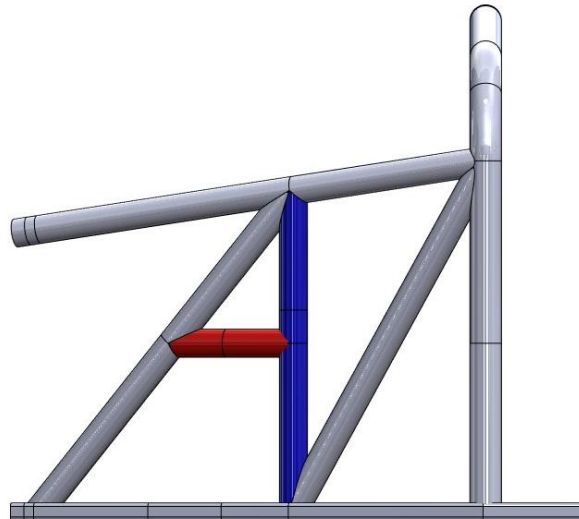


Figura 53 - Lateral Frontal

Na figura seguinte, Figura 54, consegue-se observar as laterais aplicadas através de uma ligação soldada no quadro.

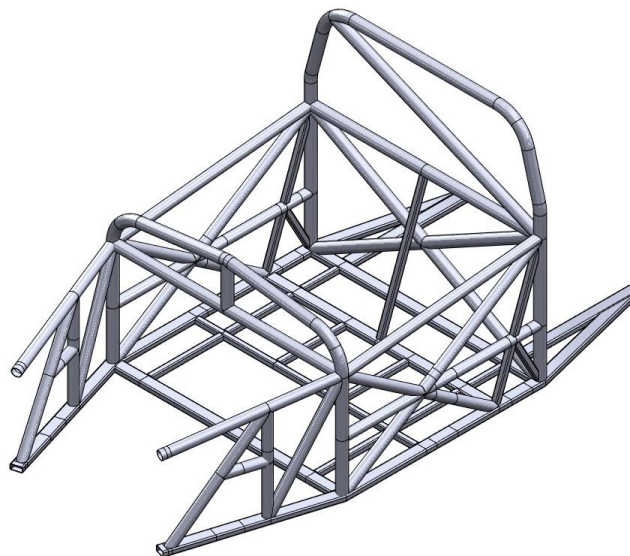


Figura 54 - Laterais Frontais aplicadas no Quadro

Como referido anterior, iria ser posteriormente concebido sobre o tubo vertical a azul, na Figura 53, um reforço frontal, funcionando quase como um terceiro arco de segurança, mas tendo apenas como finalidade neste caso aumentar a resistência global do quadro, sendo todo este reforço realizado com tubo redondo 40x2 mm.

Pode-se por isso na Figura 55 verificar um tubo a azul-claro que realizará a ligação entre arco frontal, reforço intermédio da frente e uma placa que será posteriormente aplicada na frente do quadro. Em azul-escuro corresponde os tubos que conferem a estrutura de reforço, sendo que os superiores deste podem mais tarde funcionar como suportes de amortecedores.

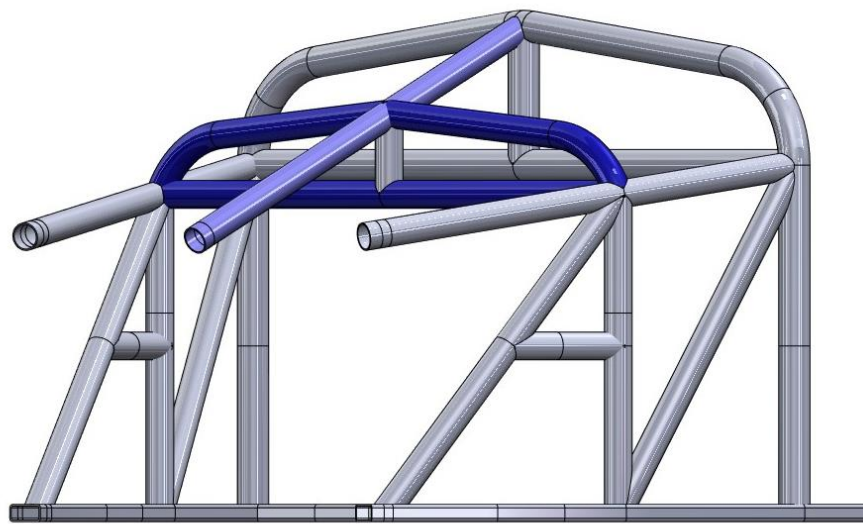


Figura 55 - Reforço das Laterais Frontais

Na Figura 56 pode-se observar o reforço aplicado no quadro.

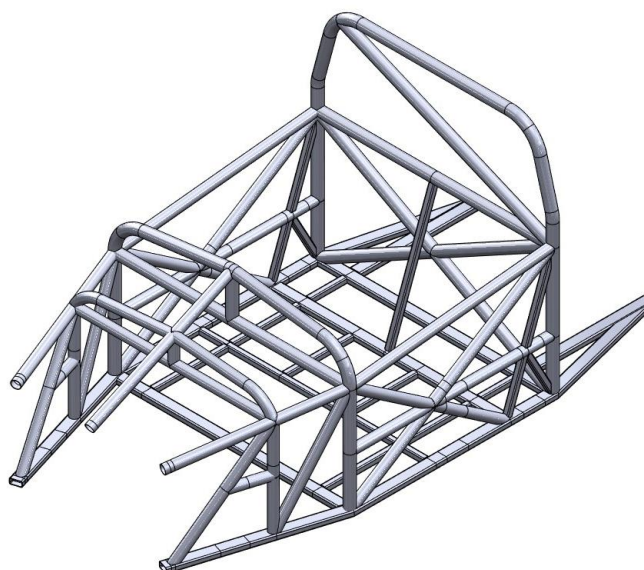


Figura 56 - Reforço das Laterais Frontais aplicadas no Quadro

De forma a finalizar a parte traseira do quadro, procedeu-se de seguida à realização das laterais traseiras, como se pode verificar na Figura 57. As laterais foram desenvolvidas com tubo redondo de secção circular com as dimensões 40x2 mm.

Sendo que nestes tubos irão ser posteriormente aplicada uma placa de forma a conferir maior rigidez e também funcionando como suporte do conjunto propulsor.

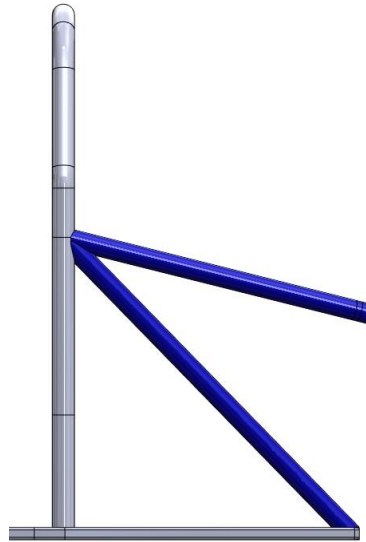


Figura 57 - Laterais Traseiras

Na Figura 58 pode-se observar as laterais traseiras aplicadas no lado direito e esquerdo do quadro, sendo estas iguais devido à simetria do quadro.

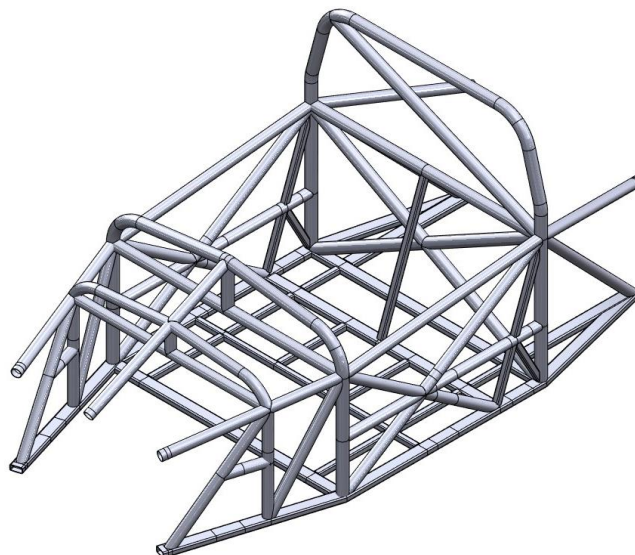


Figura 58 - Laterais Traseiras Aplicadas no Quadro

Um dos últimos passos do desenvolvimento do quadro é a aplicação neste de reforços superiores, estes permitem a ligação das diferentes partes do quadro desde a frente até à traseira, de forma a aumentar a resistência deste.

Estes reforços podem ser visualizados na Figura 59, realçados a azul, e foram idealizados com tubo de secção redonda com a dimensão de 40 mm de diâmetro exterior e com 2 mm de espessura.

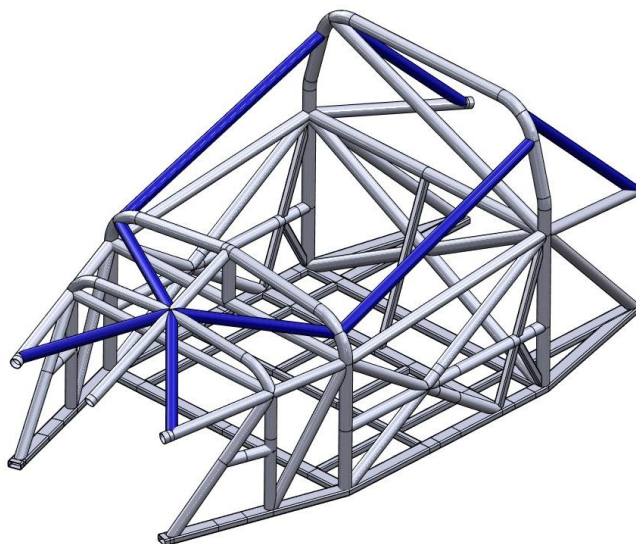


Figura 59 - Reforços Superiores do Quadro

Por fim no desenvolvimento do quadro procedeu-se à aplicação de um reforço do chão à frente tornando possível a posterior aplicação da pedaleira e conferir um local onde seja possível os ocupantes pousarem os pés.

Este reforço pode-se observar, realçado a azul, na Figura 60, tendo sido realizado com tubo quadrado 25x25x2 mm.

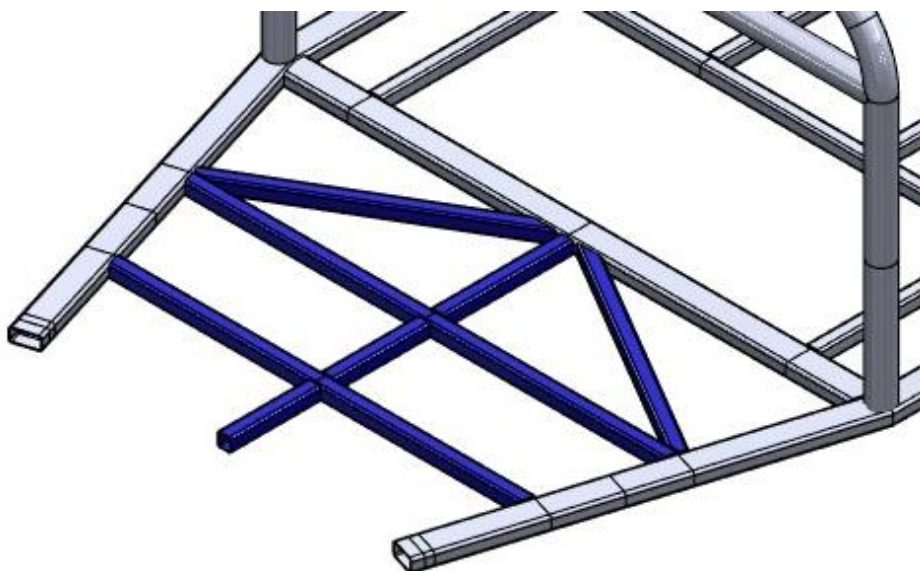


Figura 60 - Reforço do Chão/Base no local da Pedaleira

Na Figura 61 pode-se observar a iteração final do quadro final, onde se verificar a aplicação do reforço do chão à frente no quadro final.

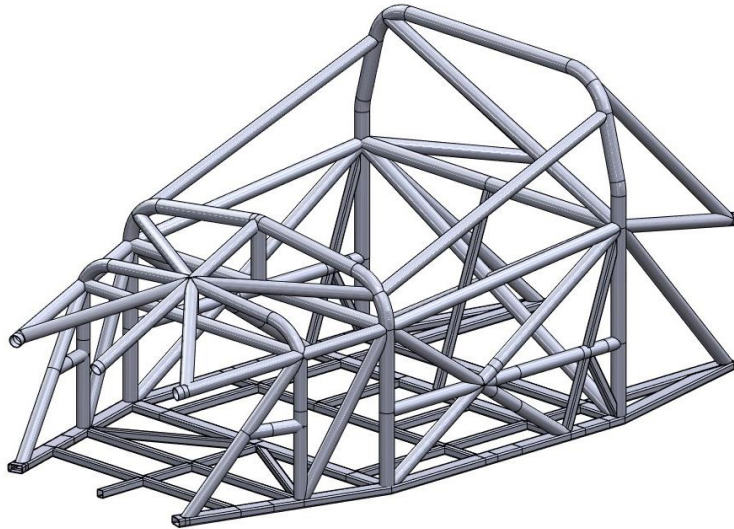


Figura 61 - Quadro Completo Final

3.3. Desenvolvimento e Aplicação das Placa Frontal, Traseira e de Encosto

Na etapa seguinte procedeu-se ao desenvolvimento de uma placa frontal e traseira, em alumínio, de forma a conferir resistência e rigidez ao chassi, visto que com estas placas consegue-se realizar algo muito idêntico a uma estrutura totalmente treliçada.

Relativamente à placa frontal, esta será aplicada através de uma ligação aparafusada ao quadro. Para isso desenvolveu-se umas patelas, representadas na Figura 62 a azul, e que serão soldadas no quadro tendo um furo roscado no centro e onde posteriormente será aparafusada a placa às patelas. Na Figura 62 observa-se o conjunto da placa frontal com as patelas.

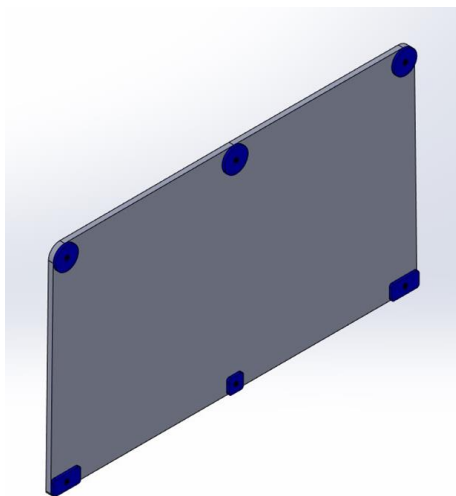


Figura 62 - Conjunto Placa Frontal e Patelas a Soldar no Quadro

A placa traseira desenvolveu-se da mesma forma que a placa frontal, sendo as patelas soldadas ao quadro e a placa posteriormente aparafusada a estas. Podemos visualizar na Figura 63 o conjunto da placa traseira com as patelas, estando as patelas salientadas a azul na figura.

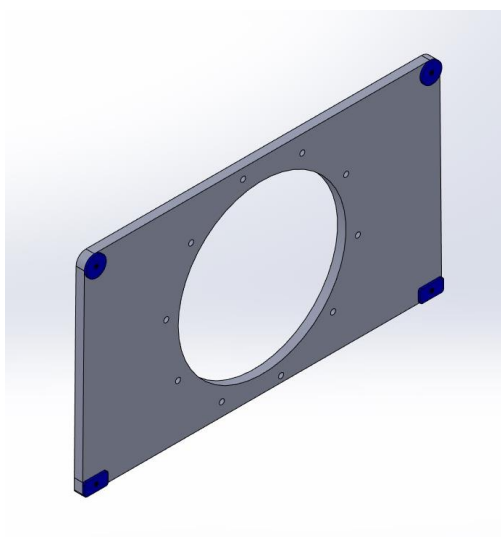


Figura 63 - Conjunto Placa Traseira e Patelas a Soldar no Quadro

Por último procedeu-se ao desenvolvimento de uma última placa também de alumínio para aplicação no quadro. Esta tem como finalidade melhorar a comodidade para os ocupantes, servido como encosto para os bancos e também facilita e permite a divisão entre a célula de segurança e o depósito de combustível.

A placa pode ser visualizada na Figura 64 e ligou-se ao quadro através de uma ligação rígida por meio de rebites.



Figura 64 - Placa para Encosto dos Bancos

Na Figura 65 visualiza-se as três placas aplicadas no quadro e corresponde à versão final deste, o qual poderia ser sujeito a ensaios e/ou simulações de forma a avaliar se seria aprovado pela FIA.

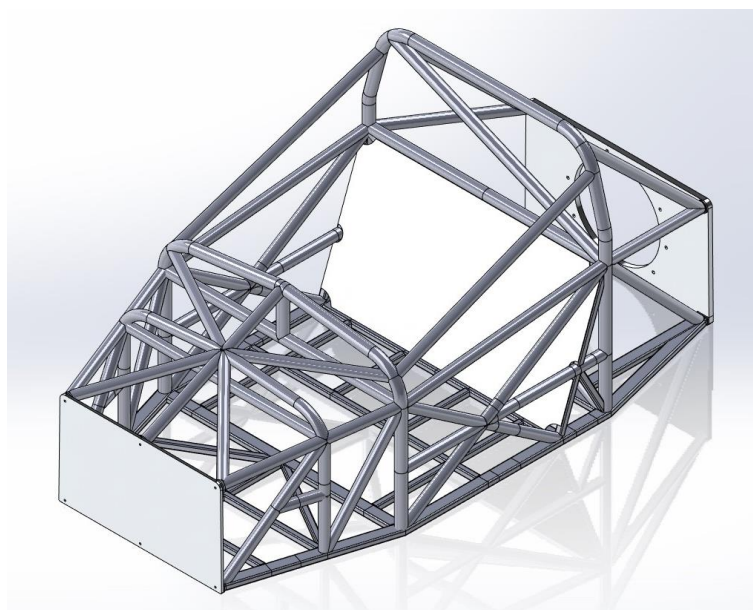


Figura 65 - Quadro com as 3 (três) Placas Aplicadas)

Depois de apresentada a versão final do quadro de forma a conferir se o espaço na traseira seria suficiente para acomodar um conjunto propulsor, utilizou-se um modelo de um motor de 4 cilindros proveniente de um Audi A4 com a correspondente caixa de velocidade, e aplicou-se no modelo, como se pode verificar na Figura 66. Verifica-se que apresenta as dimensões corretas de forma a acomodar um grupo propulsor e ainda apresentar alguma folga em ambos os lados tornando possível a aplicação dos restantes componentes.

Apesar do conjunto propulsor não apresentar uma caixa do tipo estrutural esta apresenta dimensões semelhantes, se não superiores, sendo por isso um bom termo de comparação.

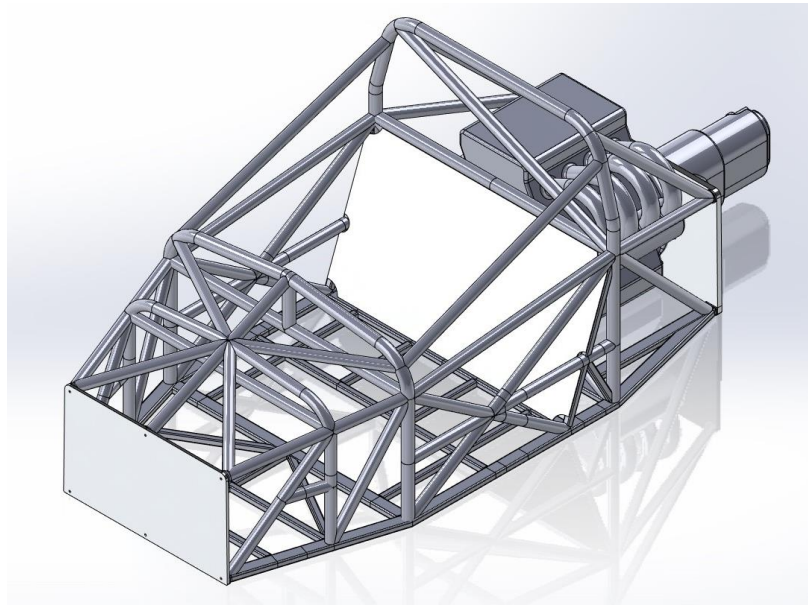


Figura 66 - Quadro com um Exemplo de Conjunto Propulsor Aplicado

3.4. Análise e Simulação da Estrutura Tubular

3.4.1. Regulamentos a seguir para a Realização da Simulação

De forma a ser possível obter uma estrutura que seja validada pelos órgãos e federações responsáveis pelo desporto motorizado, terão de ser realizados os devidos testes com certos parâmetros e estes respeitarem os valores mínimos impostos pelos regulamentos.

Contudo após várias análises do Anexo J da FIA[1] e a correspondente versão da FPAK [2] apenas se conclui que neste regulamento são referidas unicamente três forças que os arcos de segurança teriam de suportar, sendo as três forças as seguintes, uma força lateral de $1.5*W$, uma força transversal de $5.5*W$ e por fim uma força vertical de $7.5*W$, sendo que W corresponde ao peso do carro mais o peso do piloto (75 kg).

Depois de indicadas estas forças é referido no documento que a homologação tem de ser aprovada pela ASN, cumprindo os parâmetros e limites dados por estes. Deste modo procedeu-se à procura de um regulamento para uma categoria idêntica onde, na falta de informação por parte da ASN, fosse possível obter parâmetros de deslocamento/deformação máxima da estrutura ou de tensões máximas possíveis de obter quando realizada a simulação da estrutura.

Realizou-se uma pesquisa pelas categorias semelhantes e analisou-se os respetivos regulamentos obtendo-se um regulamento para veículos do tipo Fórmula do Grupo E [68], que apresentam estruturas muito semelhantes com os veículos aberto do Grupo CN. Neste regulamento pode-se obter desta forma os seguintes parâmetros de simulação:

- Força Lateral de 12 kN, longitudinal de 45 kN e 60 kN Vertical, sendo que apenas pode apresentar um deslocamento máximo elástico de 50 mm, caso não ultrapasse a tensão limite elástica do material e no caso de esta tensão ser ultrapassada temos uma deformação permanente máxima de 100 mm, para o primeiro *rollbar* [68];
- Para o segundo *rollbar* terá de ser aplicado uma força vertical de 75 kN, e apresenta os mesmos critérios de validação que o primeiro [68].

Contudo, considerou-se que o uso do regulamento para veículos do tipo formula, pertencentes ao grupo E, não ser o mais indicado, sendo que nesta categoria os veículos são monolugares. Deste modo procedeu-se mais uma vez à procura de regulamentos, para a categoria do quadro que se está a desenvolver, categoria CN.

Após alguma persistência encontrou-se o artigo 258A pertencente ao *Appendix J*, a versão de 2001 e de 2011,[69], [70]. Nestas duas versões do artigo analisou-se o ponto 15, referente às estruturas de segurança, onde refere o *Appendix 2*, que se encontrava no final destes documentos e onde era exposto o processo para validação da estrutura bem como os resultados esperados.

Com esta análise estabeleceu-se quais os ensaios necessários de realizar tanto à estrutura de anti-capotamento como à célula de sobrevivência.

Para a célula de sobrevivência referia a realização de três testes laterais com uma carga de 20kN, sendo sempre transversal e horizontal e estando a estrutura fixa de tal forma que o movimento transversal e a rigidez não sejam alteradas. Os três testes serão realizados nas seguintes localizações [69]:

- Num plano vertical que atravessa a meio do eixo frontal e o tablier;
- Na área do habitáculo, num plano vertical que passe pelo centro das fixações dos cintos em baixo;
- Na área do depósito de combustível, num plano vertical que passe pelo centro da área do depósito;

Para a célula de sobrevivência esta após ser carregada pode apresentar uma deformação máxima permanente de 1 mm, quando ultrapassa a tensão de limite elástico do material, ou seja, estando perante uma deformação plástica. No caso desta não ultrapassar a tensão de limite elástica do material, e por isso se verificar uma deformação do tipo elástica o ensaio/simulação pode ser validado.

Quanto à estrutura de anti-capotamento indica dois testes a realizar, um na estrutura frontal e outro na traseira:

- Na estrutura frontal temos uma força vertical de 5,0W, aplicada no centro da estrutura;
- Para a estrutura traseira são aplicadas três força 1,5W na direção transversal, 5,5W na direção longitudinal e 7,5W na direção vertical, sendo estas aplicadas em simultâneo e num ponto superior, mas não sendo aplicada no centro da estrutura;

Para a estrutura de anti-capotamento que corresponde ao arco traseiro e frontal de segurança temos uma deformação máxima elástica de 50 mm, mas no caso de a deformação entrar no regime plástico apenas pode apresentar um valor máximo de 100 mm para deformação permanente.

É também importante referir que para carregar a estrutura são utilizados uns *pads* com uma dimensão de 100x300 mm e que estão ligados ao mecanismo que aplica a força através de uma rótula. Tendo por isso sido necessário ter em conta este aspeto durante o desenvolvimento do quadro de forma a não ocorrer invasão da célula de sobrevivência durante o carregamento.

Para finalizar este ponto é também importante referir que o W (peso do veículo final mais o ocupante) usado para esta estrutura é igual a 720 kg + 180 kg [69], [70] correspondendo a 900 kg.

3.4.2. Preparação do Modelo para Realização das Simulações

Para a realização das simulações referidas anteriormente no programa *Ansys* é necessário importar o modelo em *Solidworks*. Desta forma para ser possível realizar este processo realizou-se a importação num formato que seja possível de ser editado no *Ansys*. Neste projeto o processo que melhor funcionou foi realizar a importação do modelo pelo formato *IGES*.

Uma vez que depois a edição em *Ansys* deste tipo de ficheiro se torna mais confusa, e evitando a edição do quadro em dois programas distintos, realizou-se primeiro a exportação do quadro no tipo *IGES*, mas através de *Sketch Enteties*, onde se procedeu à eliminação das linhas de construção, simplificando assim o chassi para a simulação. De seguida realizou-se mais uma vez a exportação do ficheiro no formato *IGES*, mas desta vez com a opção de *3D Curved Features*, obtendo o resultado da Figura 67.

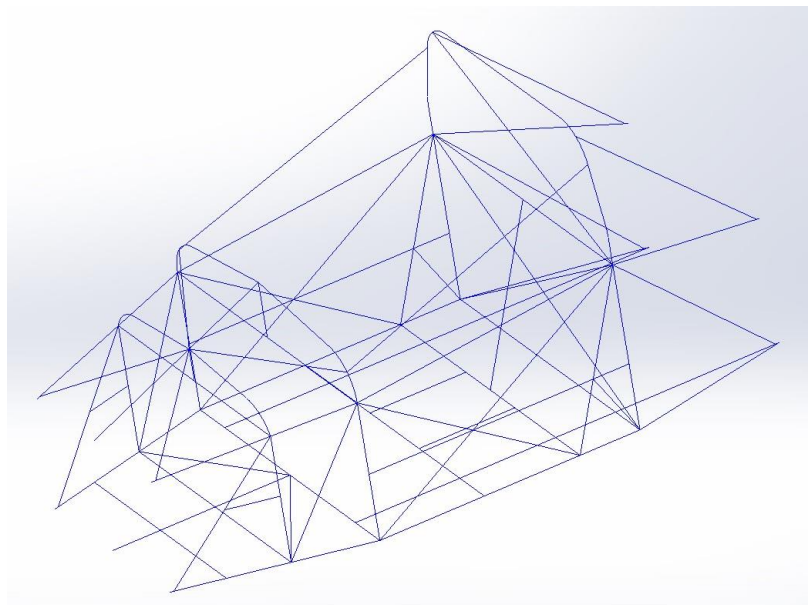


Figura 67 - Quadro Final em Formato *IGES* (apenas com linhas)

No seguinte passo, realizou-se a exportação das placas frontal e traseira como elemento de casca, para isso procedeu-se à sua edição em *SolidWorks* através da função *Planar Surface*, e posteriormente foram exportadas num ficheiro em formato *ParaSolid*. Os resultados podem ser observados nas duas imagens seguintes, Figura 68 que corresponde à placa da frente e Figura 69 correspondendo à placa traseira.

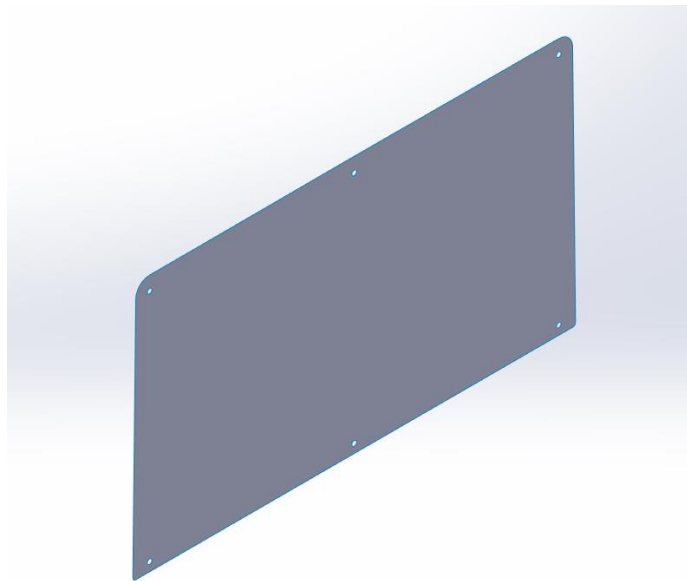


Figura 68 - Placa da Frente em Formato *Parasolid* (como *planar surface*)

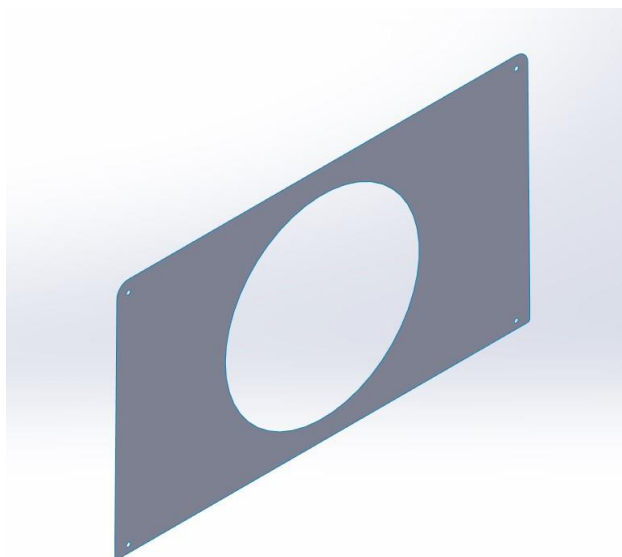


Figura 69 - Placa de Trás em Formato *Parasolid* (como *planar surface*)

Por seguinte de modo a se ligar o Quadro às Placas, realizou-se a construção do conjunto em Solidworks de modo a ser possível posicionar as placas no sítio correto quando importadas para o Ansys, Figura 70.

De seguida importou-se as placas individualmente, no conjunto realiza-se o *Supress* do quadro e de uma placa, de cada vez, guardando no formato *ParaSolid*. Conseguindo assim o correto posicionamento das placas

.

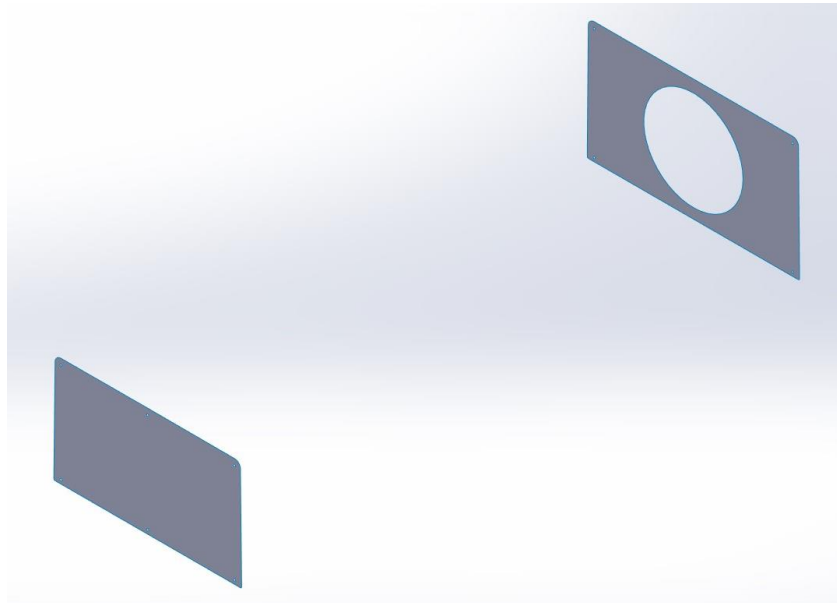


Figura 70 - Placa da Frente e de Trás Montadas em Conjunto no formato *Parasolid*

Um dos últimos passos na importação do ficheiro *IGES* no Ansys é na coluna de detalhes de visualização, encontra a opção *Line Bodies* e mudar a seleção de *No* para *Yes*, Figura 71,

| Details of Import 12 | |
|--------------------------|-----------------------------|
| Import | Import12 |
| Source | C:\Users\asus\...Chassi_V12 |
| Base Plane | XYPlane |
| Operation | Add Frozen |
| Solid Bodies | Yes |
| Surface Bodies | Yes |
| Line Bodies | Yes |
| Simplify Geometry | No |
| Simplify Topology | No |
| Heal Bodies | Yes |
| Clean Bodies | Normal |
| Stitch Surfaces | Yes |
| Tolerance | Normal |
| Replace Missing Geometry | No |
| Refresh | No |

Figura 71 - Detalhes de visualização (Line Bodies - Yes)

Desta forma quando se realizou o *Generate* do quadro iram aparecer todas as linhas que compõe o quadro, como de pode verificar na Figura 72, apresentando já também as placas.

Para as placas o processo de importação é semelhante, sendo que como se apresentam em um tipo de ficheiro diferente o processo de importação apesar de ser o mesmo não se tem de ter o cuidado de alterar a opção *Line Bodies* verificada na Figura 71, visto que estas são elementos de casca,

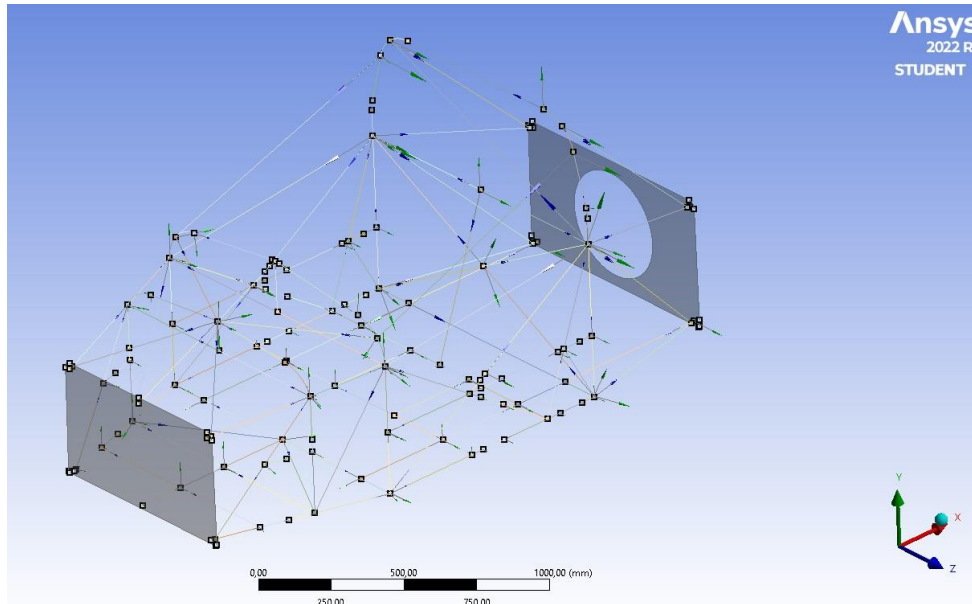


Figura 72 - Quadro e Placas Importadas para o Ansys

Na Figura 73 pode-se verificar as linhas do quadro realçadas de modo a se facilitar a sua visualização.

Com todas as linhas selecionadas procedeu-se à constituição de uma *Part* com todas estas, formando deste modo um conjunto e permitindo mais tarde a realização das simulações. Realizando esta operação dá-se a informação ao programa que todas estas linhas fazem parte do mesmo elemento, funcionando como um conjunto.

Pode-se visualizar esta operação já realizada na Figura 74, correspondendo à *Part4*.

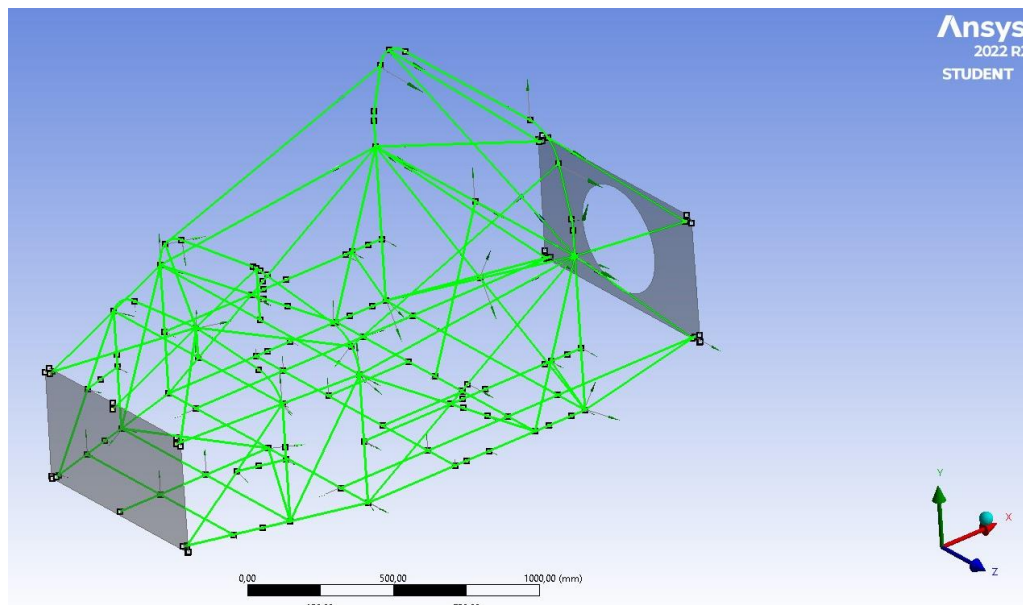


Figura 73 - Linhas do Quadro Realçadas

Por seguinte procedeu-se à criação das secções que serão atribuídas às linhas do quadro, criando deste modo as quatro secções usadas, que se podem visualizar na Figura 74 na secção 4 *Cross Section*:

- Tubo Retangular 50 x 25 x 2,5 [mm] (Rectangular_Long);
- Tubo Quadrangular 25 x 25 x 2 [mm] (Quadrado);
- Tubo Redondo 45 x 2,5 [mm] Circular_45);
- Tubo Redondo 40 x 2 [mm] (Circular_40);

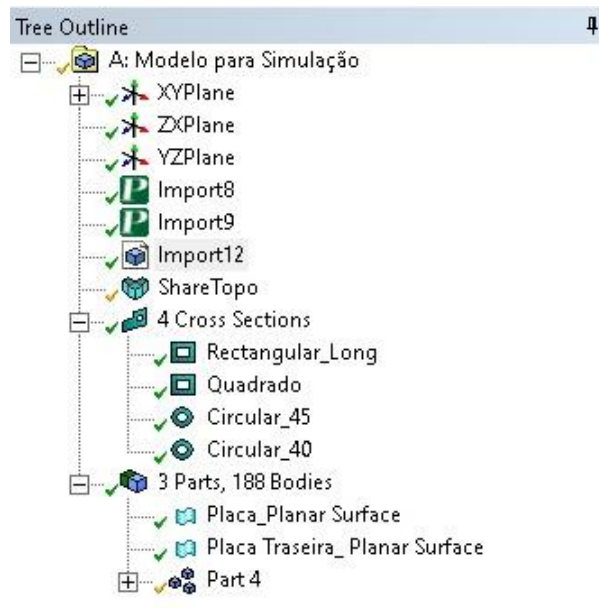


Figura 74 - Árvore do Ansys (Representa a secções usadas e as partes tipo solido e casca)

Após criadas as secções a usar procedeu-se à sua atribuição no chassi obtendo o resultado que se pode verificar na Figura 75. De referir que na imagem Figura 74 se verifica a utilização da função *ShareTopo*, sendo esta uma opção necessária para ser possível a realização dos ensaios e a ligação do quadro com as placas.

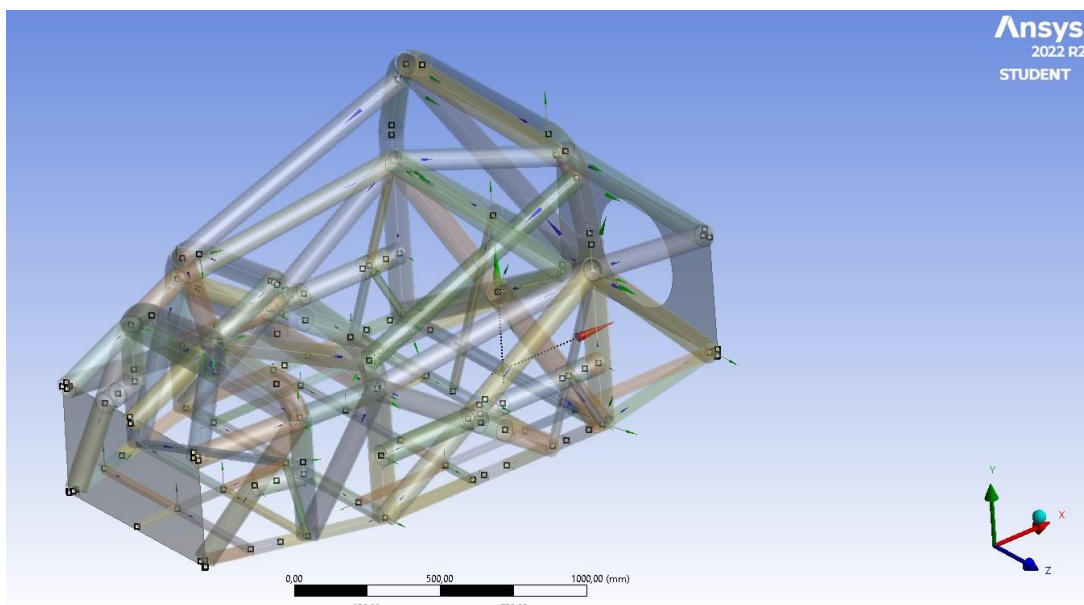


Figura 75 - Quadro com as Secções Atribuídas

Por fim, e já noutra parte do programa, passando do *DesignModeler* para o *Mechanical*, realizou-se a ligação entre as placas e o chassi, sendo igual para a frontal como para a traseira.

A ligação efetuou-se através de uma formulação *MPC*, que permite ligar um vértice com uma face ou aresta. Neste caso foi escolhido como ponto de referência o vértice da linha do quadro, a vermelho, e como ponto de referência a linha de circunferência do furo na placa, a azul, possível de visualizar na Figura 76.

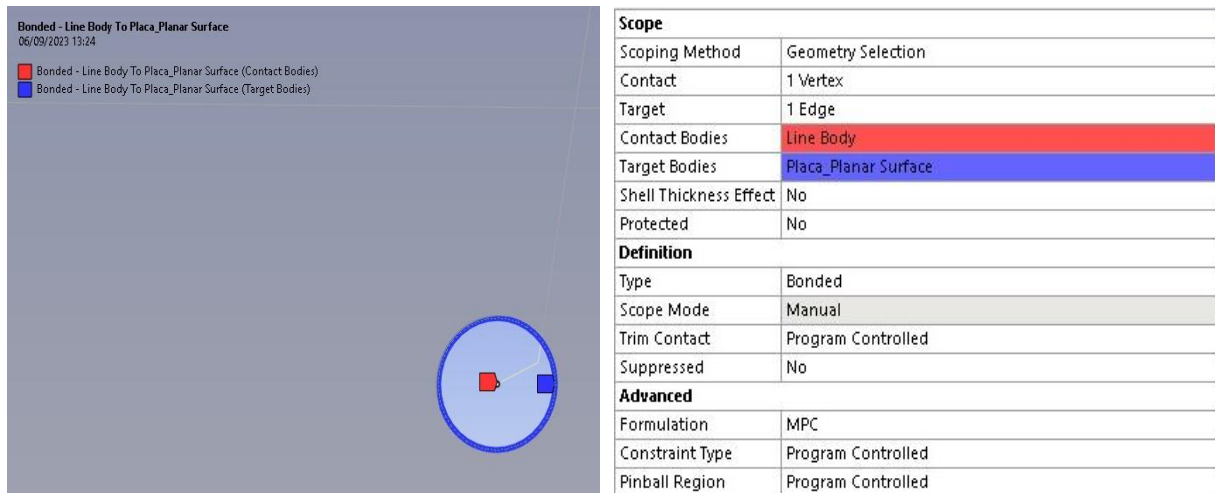


Figura 76 - Pontos e Tipo de Ligação entre as Placas e o Quadro

A ligação concretizou-se da mesma forma para as duas placas, seis furos para a frontal e quatro para a traseira. Podendo-se verificar estas ligações na árvore do projeto, Figura 77, no separador das ligações por contacto.

De referir que na seguinte figura se verifica duas ligações com *Multiple* em vez de *LineBody* devido a dois vértices na parte traseira do quadro serem ponto de convergência para duas linhas do quadro.

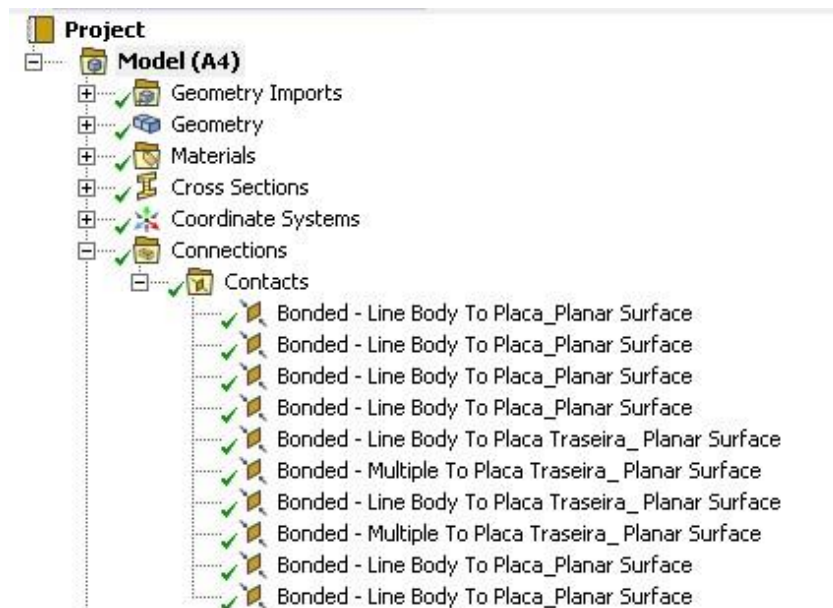


Figura 77 - Arvore do Projeto (Ligações por Contacto)

3.4.3. Condições Fronteira nas Simulações à Célula de Sobrevivência

Para realizar as simulações é necessário aplicar algumas restrições e pontos de ancoragem/fixação de forma a manter as simulações realizadas o mais próximo possível dos ensaios referidos nos regulamentos [1], [70].

Deste modo para manter essa proximidade de resultados e não alterando a rigidez do quadro, mas permitindo o movimento transversal deste, é necessário realizar dois pontos de fixação, dois pontos de restrição do movimento transversal, no eixo ZZ, impedindo o rolamento da estrutura no eixo XX, e outro ponto onde se restringe o movimento vertical, no eixo YY, de modo a impedir o movimento no sentido negativo do eixo do YY, representando da melhor forma a mesa de ensaio/solo.

Todas as simulações referentes à célula de sobrevivência tiveram em conta o mesmo procedimento e aplicação de restrições e forças. Para isso aplicou-se as fixações e as restrições de movimento o mais distante possível da zona de aplicação da força, que corresponde à zona de estudo.

No Plano entre o eixo frontal e o tablier

Explicando a primeira simulação, começou-se pela localização do plano vertical que atravessa equidistante entre o eixo frontal e o tablier. Tendo isto em consideração, os pontos de fixação correspondem à base do arco frontal e do arco traseiro de segurança, tendo sido esta fixação apoiada no vértice correspondente, como é visível na Figura 78, estando estes pontos realçados.

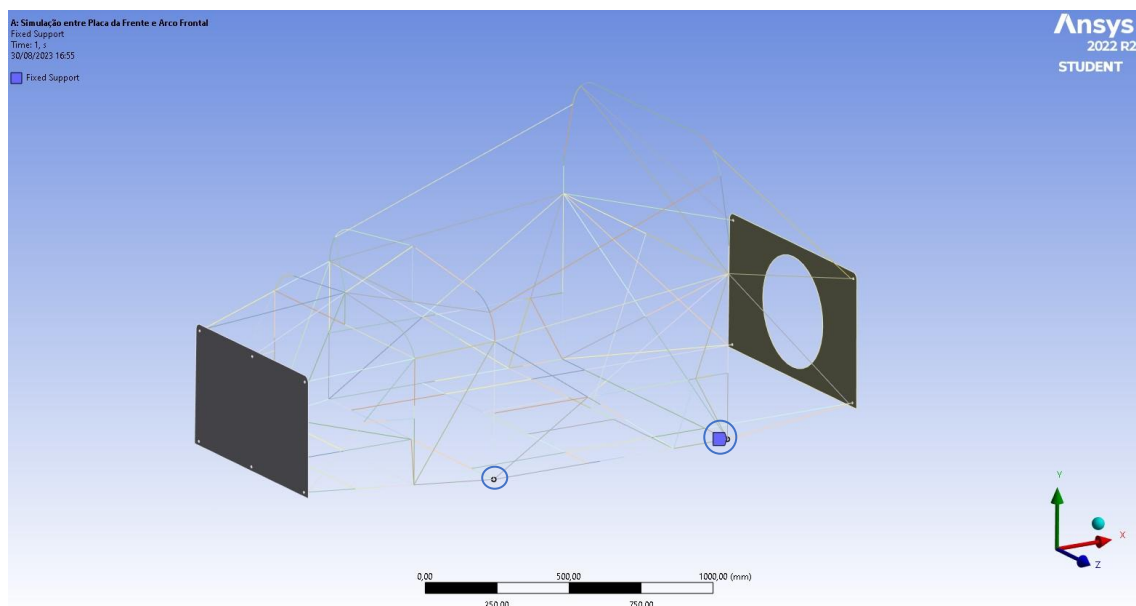


Figura 78 - Pontos de Fixação do Quadro

De seguida procedeu-se à restrição do movimento no eixo dos ZZ sendo esta aplicada nos vértices acima dos quais foram aplicadas as fixações, sendo neste caso aplicado no fim da altura lateral da célula de sobrevivência, sendo na mesma no arco frontal e traseiro, como se pode verificar nos vértices destacados na Figura 79.

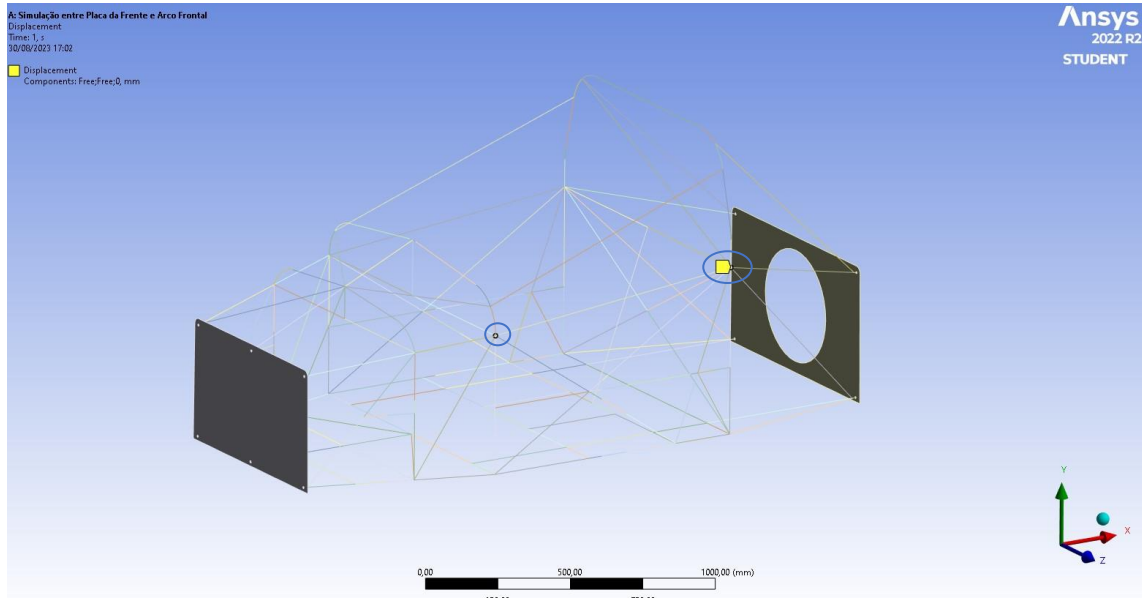


Figura 79 - Pontos de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ

A última restrição a aplicar corresponde a garantir um movimento nulo no eixo YY, sendo este aplicado no canto inferior esquerdo da placa da frente, sendo o ponto destacado na Figura 80 (ao visualizar a imagem corresponde ao canto inferior direito). Neste caso é aplicada neste ponto a restrição visto que se tem como finalidade avaliar a parte frontal da célula de sobrevivência.

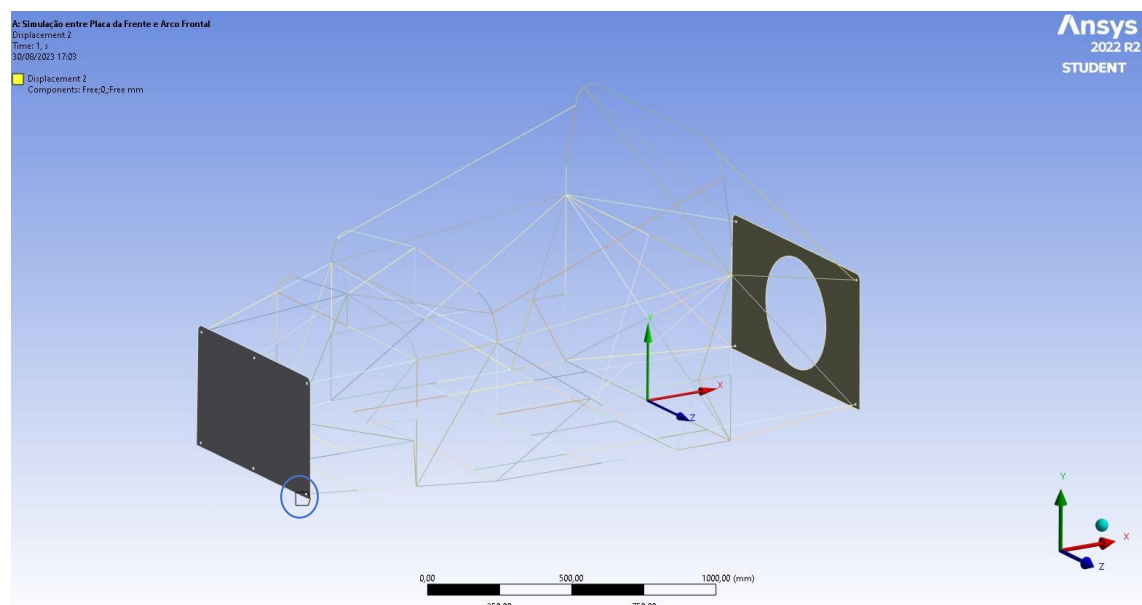


Figura 80 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY

Como último elemento de modo a ser possível realizar a simulação, temos a aplicação da força conforme o regulamento [1], [70]. A força a aplicar corresponde a 2000 daN que é igual a 20 kN e sempre transversal ao quadro, por isso para as três simulações correspondentes à célula de sobrevivência será aplicada segundo o eixo ZZ.

Um ponto importante de referir é que as cargas nos ensaios aplicam-se recorrendo a *pads* com dimensões de 100 x 300 mm e por isso quando em contacto com o quadro apenas iria ser carregado em certos locais do tubo. De forma a representar este tipo de carga apenas foram seleccionados para local de aplicação de força as arestas correspondentes as partes de tubo que seriam carregadas. Pode-se assim visualizar na Figura 81 o local de aplicação da força.

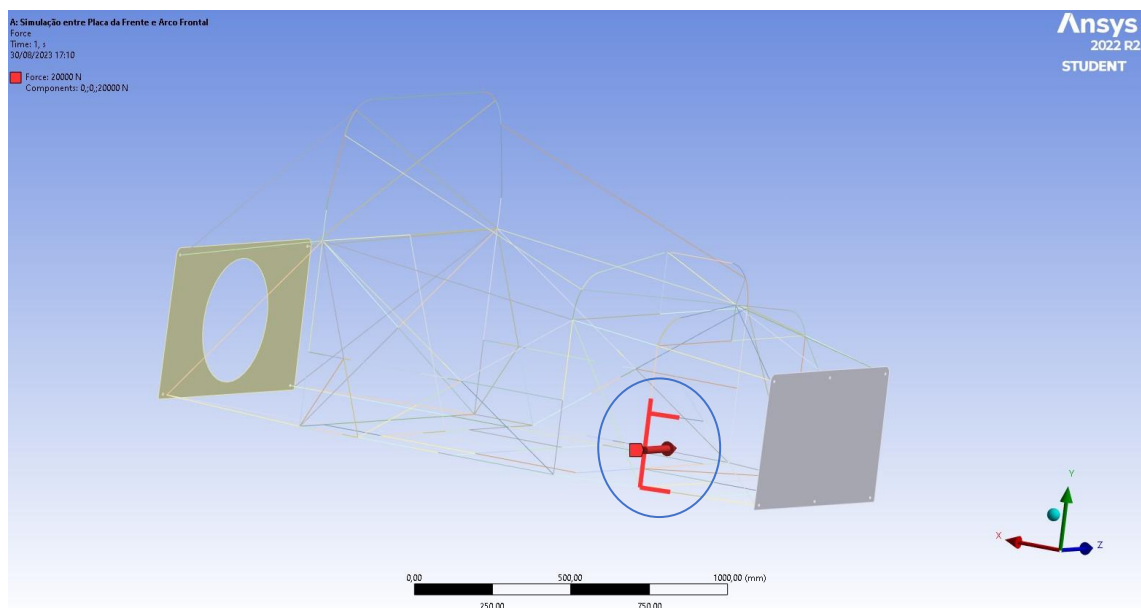


Figura 81 - Local de Aplicação da Força

No Plano que passa pelas fixações dos cintos

Relativamente à simulação que corresponde à aplicação de uma carga no plano vertical que passa no centro das fixações inferiores dos cintos temos o mesmo número de fixações e restrições.

Quanto às fixações para esta simulação, foi aplicada uma no canto inferior esquerdo da placa da frente e outro no vértice da base do arco traseiro, respetivamente Figura 82 e Figura 83, estando este assinalados nas imagens.

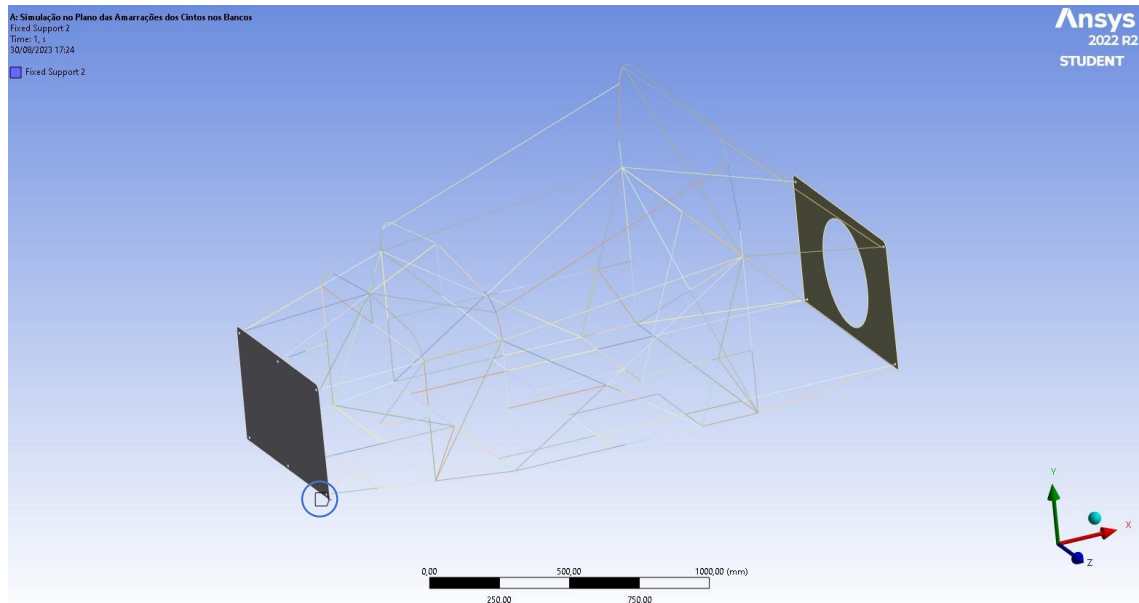


Figura 82 - Ponto de Fixação na Placa da Frente

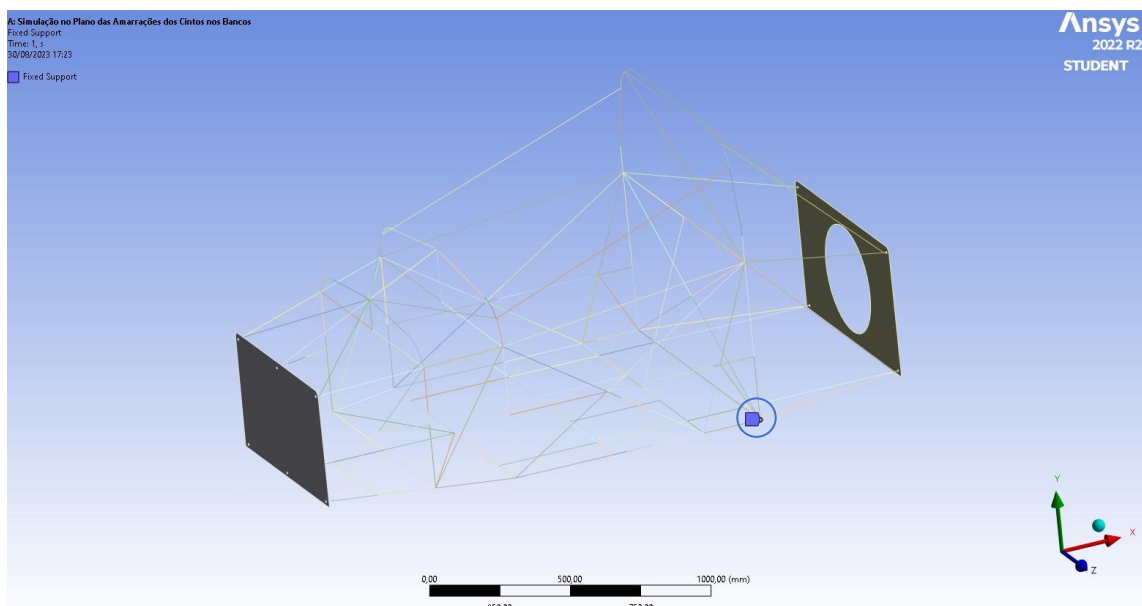


Figura 83 - Ponto de Fixação no Quadro

Quanto à restrição no eixo do ZZ, tal como na simulação anterior, foram utilizados os pontos acima dos quais foram implementadas as fixações. Temos por isso uma restrição de deslocamento nulo no eixo ZZ no canto superior esquerdo da placa da frente, Figura 84, e temos outra no ponto superior da lateral da célula de sobrevivência no arco traseiro, Figura 85. Estando estes pontos realçados nas imagens.

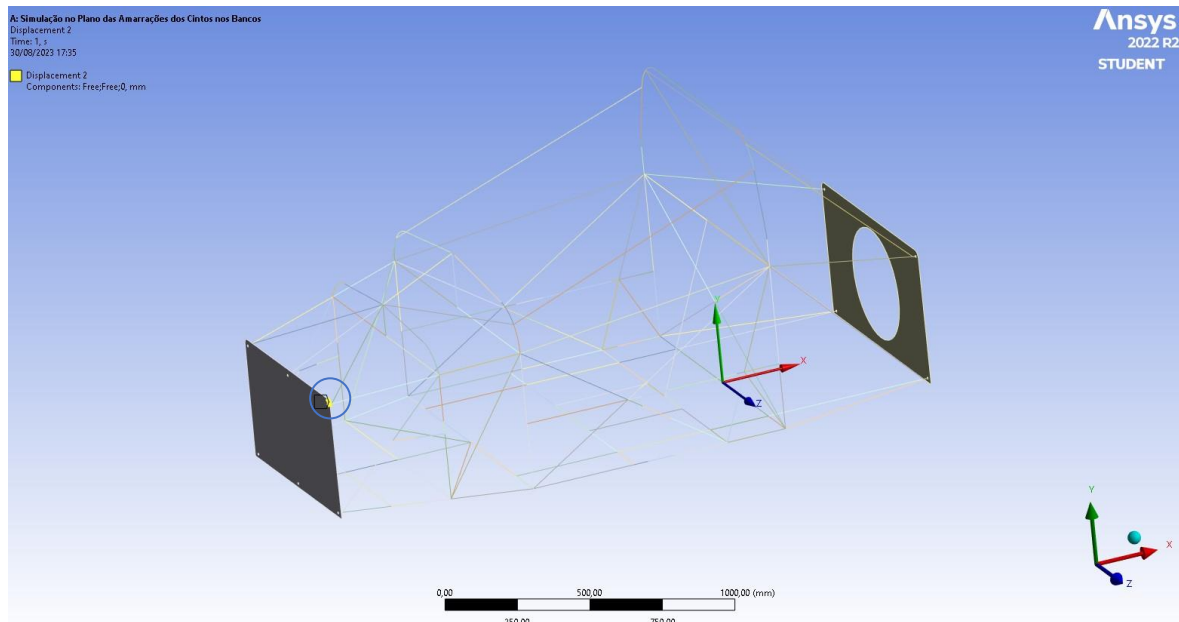


Figura 84 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ, na Placa da Frente

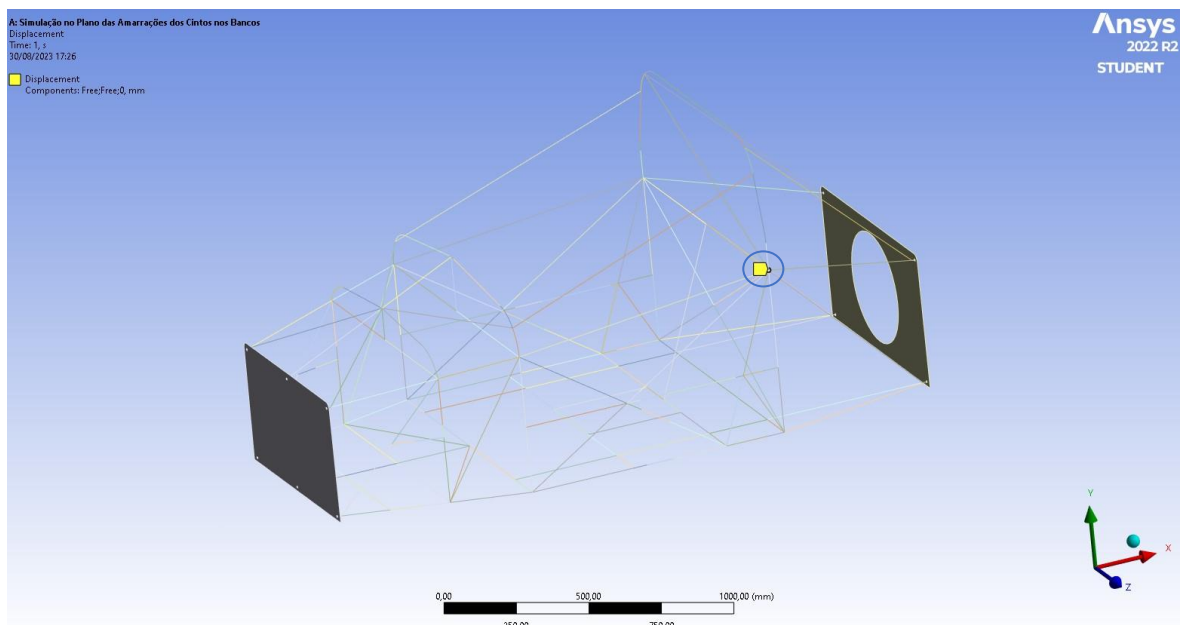


Figura 85 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ, no Quadro

De seguida foi selecionado o ponto ao qual irá ser aplicado um deslocamento nulo referente ao eixo YY. Para esta simulação, como podemos visualizar na Figura 86, o nó selecionado foi o correspondente à base do arco frontal. Escolheu-se este ponto visto o plano de aplicação da força ser mais próximo do arco frontal do que o traseiro.

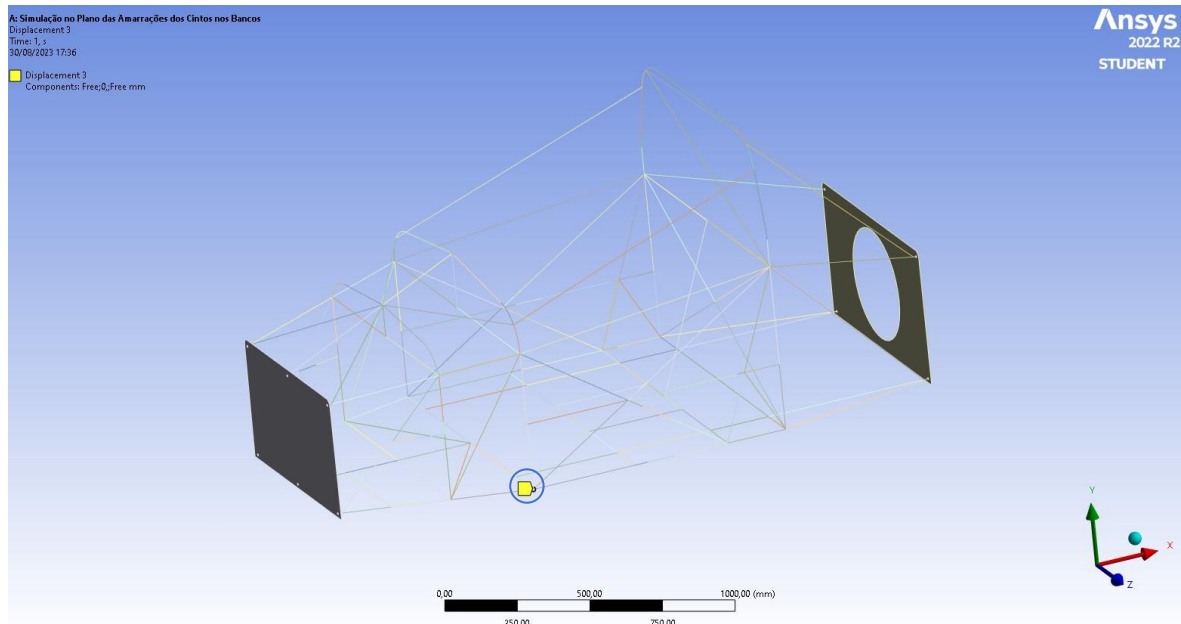


Figura 86 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY

Por fim, e como explicado na simulação anterior as forças são aplicadas, nos ensaios, segundo o regulamento [1], [70] através de *Pads*, e por isso nas simulações a carga será aplicada sobre certas partes das linhas do quadro. Pode-se então na Figura 87 verificar quais as arestas selecionadas para a aplicação da carga sobre o quadro.

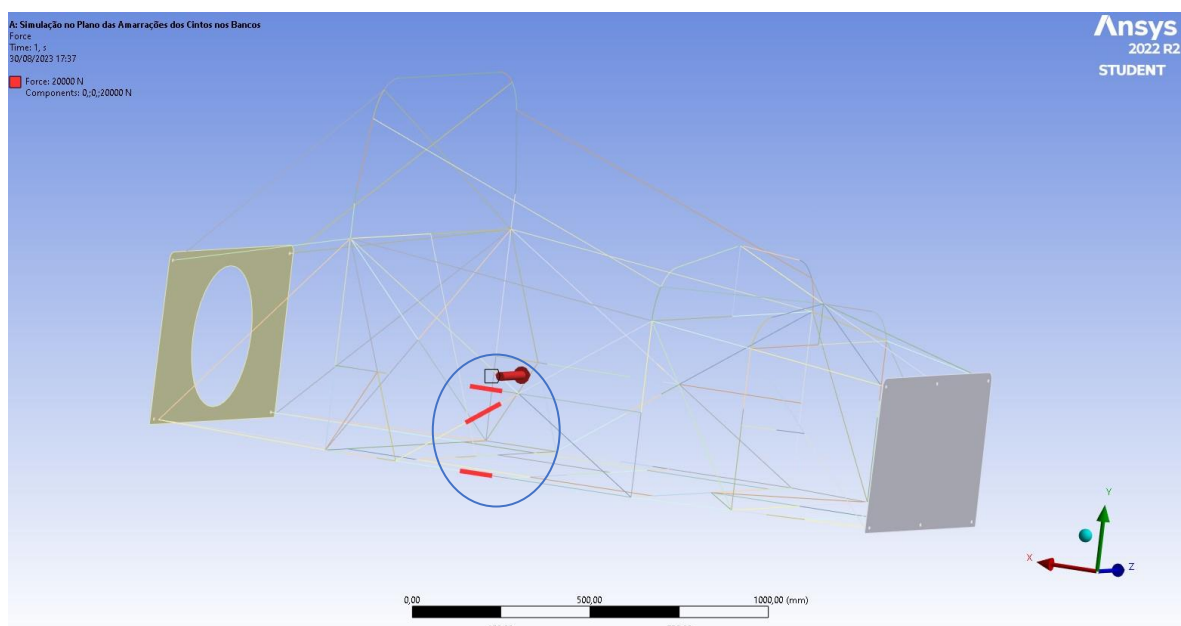


Figura 87 - Local de Aplicação da Força

No Plano que passa pelo do depósito de combustível

No caso da última simulação relativa à célula de sobrevivência, este refere-se ao plano vertical que passa pelo centro da área do depósito de combustível. Tal como nos casos anteriores este também apresenta dois pontos de fixações, dois pontos de restrição de movimento no eixo ZZ e um ponto de restrição de movimento no eixo YY

Como pontos de fixação para esta simulação usou-se o canto inferior esquerdo da placa da frente, Figura 88, e o vértice da base do arco frontal, Figura 89, visto serem estes os pontos mais afastados do plano em estudo que estão realçados nas imagens indicadas.

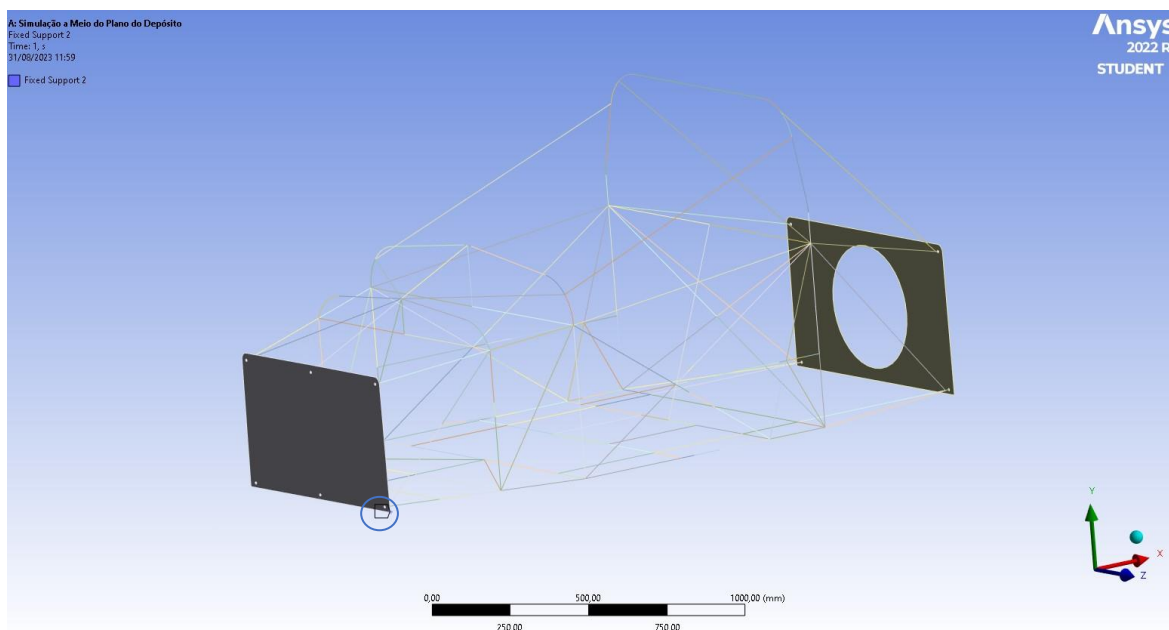


Figura 88 - Ponto de Fixação na Placa da Frente

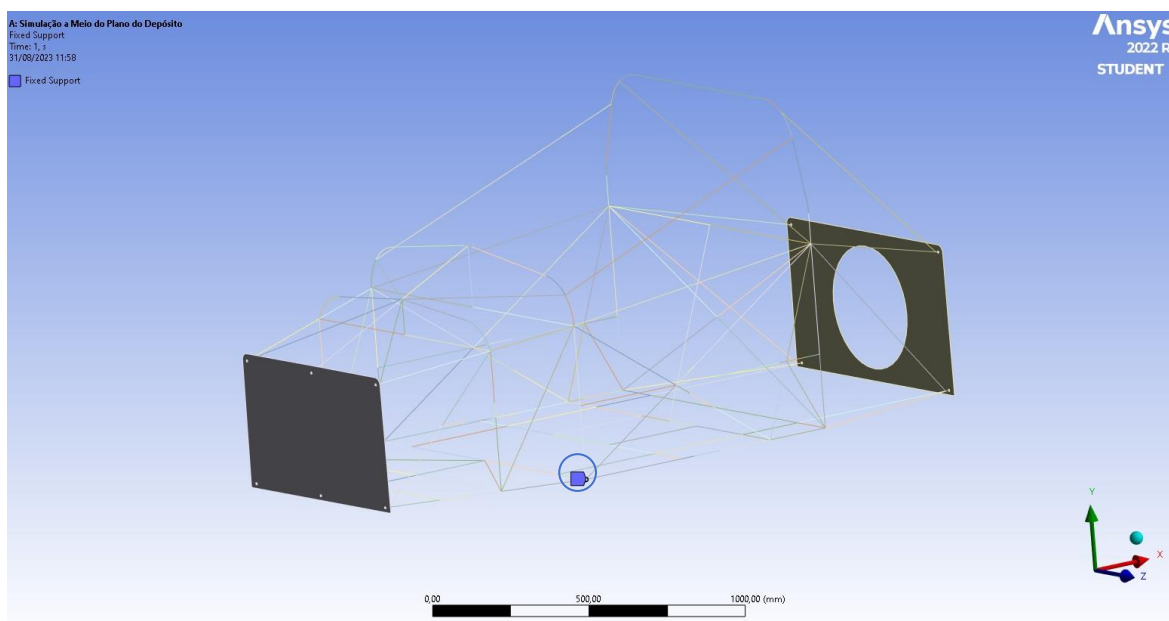


Figura 89 - Ponto de Fixação no Quadro

No caso da restrição de movimento no eixo YY, utilizou-se os pontos exatamente acima dos escolhidos para as fixações, tal como nas anteriores. Foi então utilizado o canto superior esquerdo da placa da frente, Figura 90, e o ponto superior da lateral da célula de sobrevivência no arco da frente, Figura 91, estando estes pontos realçados nas referidas imagens.

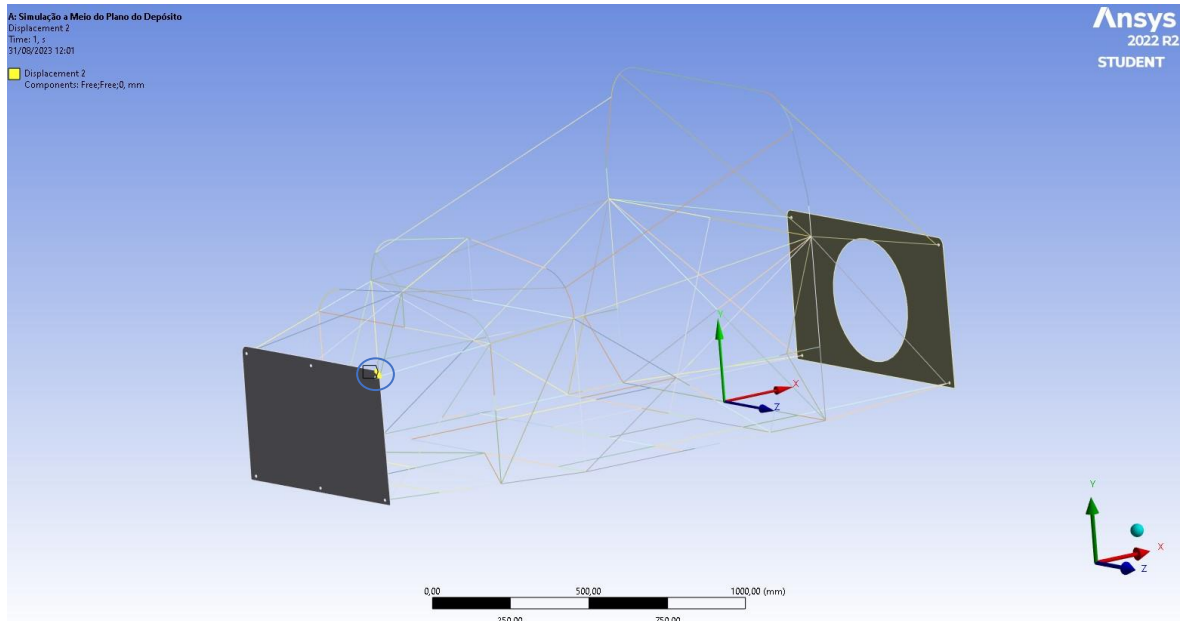


Figura 90 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ, na Placa da Frente

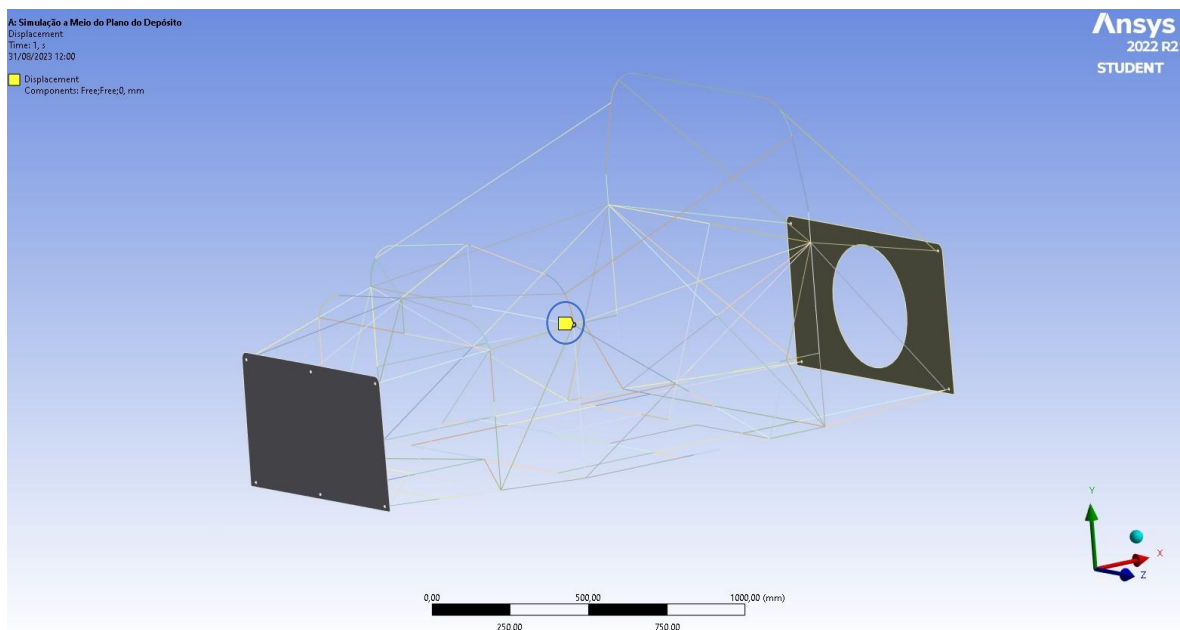


Figura 91 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo ZZ, no Quadro

Posteriormente procedeu-se à escolha do ponto onde se restringe o deslocamento no eixo YY, para isso escolheu-se o vértice da base do arco de segurança traseiro, Figura 92, sendo este o ponto mais próximo do plano em análise, e estando este realçado na imagem indicada.

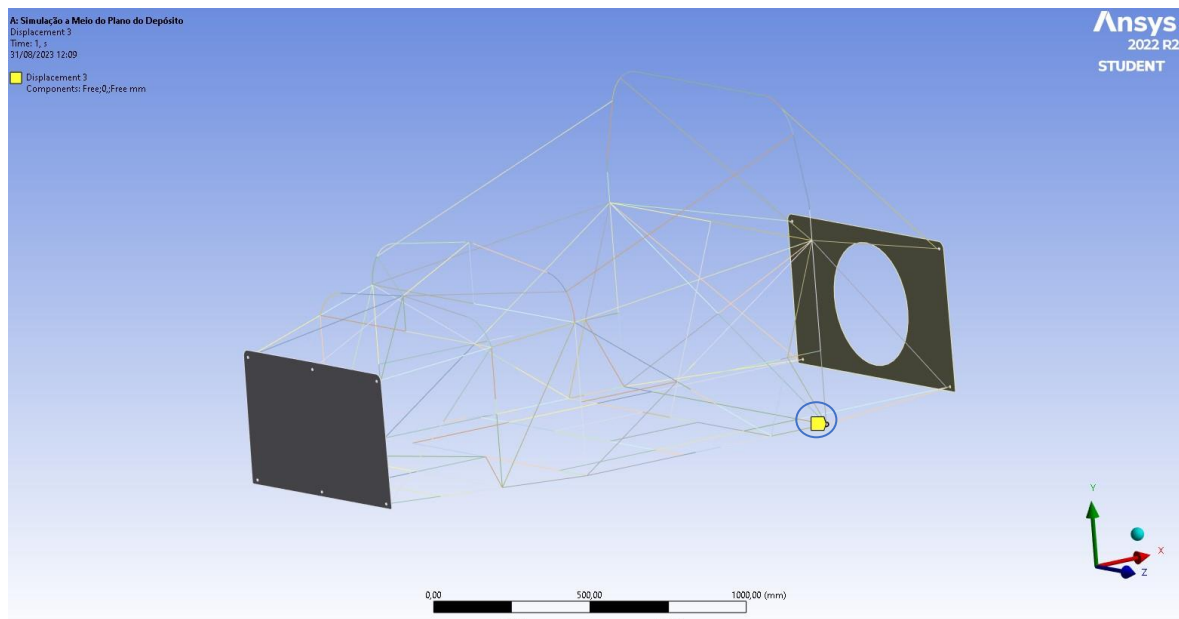


Figura 92 - Ponto de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY

Por fim realizou-se a aplicação da força sobre o quadro, para isso seleccionou-se as linhas realçadas na lateral do quadro, Figura 93, que correspondem a onde o *pad* de carregamento usado nos ensaios iria contactar com o quadro em estudo.

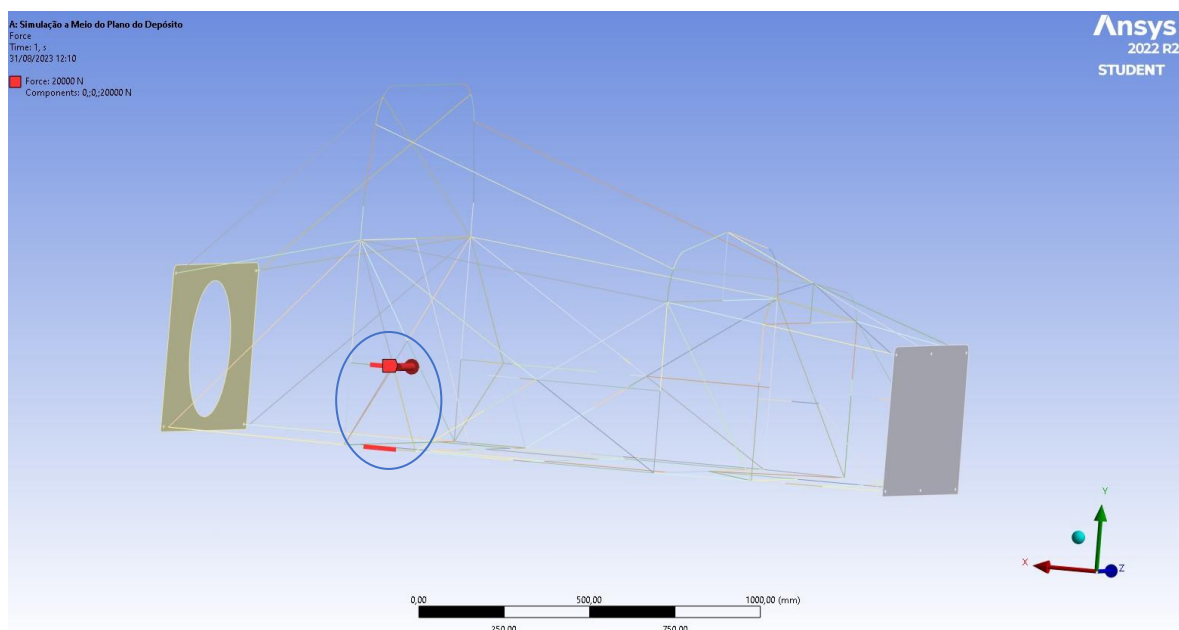


Figura 93 - Local de Aplicação da Força

3.4.4. Condições Fronteira nas Simulações à Estrutura Anti-Capotamento

Para a realização das simulações relativas à estrutura de anti-capotamento é necessário também apresentar pontos de fixação da estrutura e de restrição de movimento.

Para isso seguiu-se o indicado para a realização dos ensaios, nos regulamentos [1], [70] referidos no capítulo anterior, e realizou-se da forma mais aproximada possível nas simulações. Assim para as duas simulações aplicou-se as fixações e as restrições nos mesmos pontos visto ser assim descrito nos regulamentos [1], [70], apenas se diferenciando os ensaios pelo local de aplicação da força.

Seguindo o regulamento [1], [70] o quadro terá de ser fixado pelos pontos onde será apoiado o motor e na mesa de ensaio.

Arco de Segurança Frontal

O primeiro passo para a configuração das simulações é a atribuição dos pontos de fixação, para isso procedeu-se à seleção da linha interior da circunferência da placa traseira, Figura 94, onde aperta o motor e/ou a cloche.

Os restantes pontos de fixação correspondem a quatro ponto inferiores, Figura 95, onde seriam aplicados os suportes inferiores/frontais do motor.

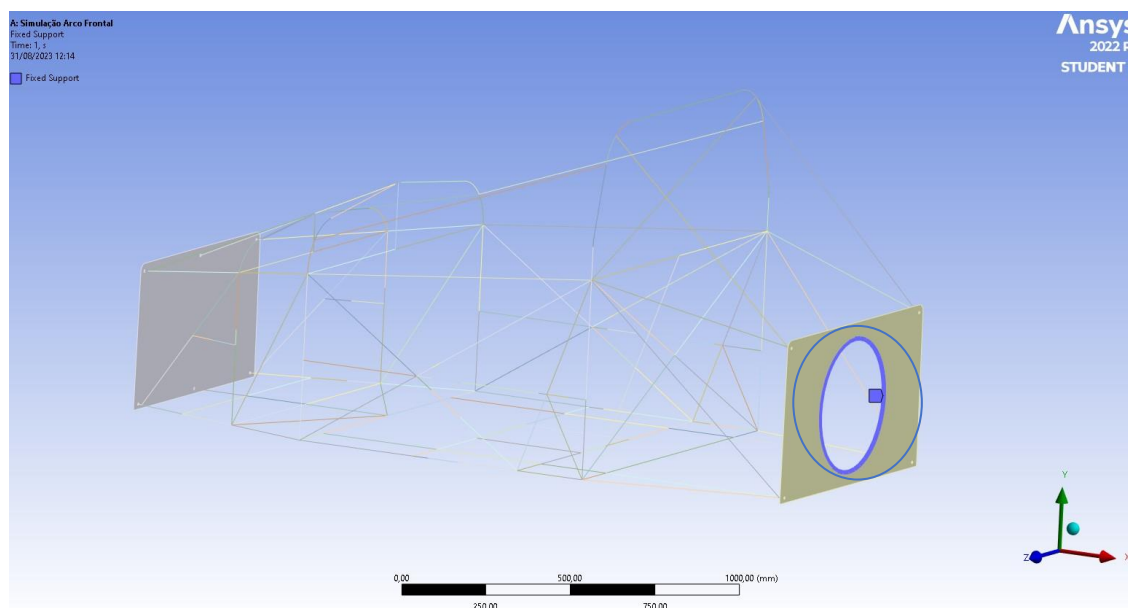


Figura 94 - Ponto de Fixação na Placa Traseira

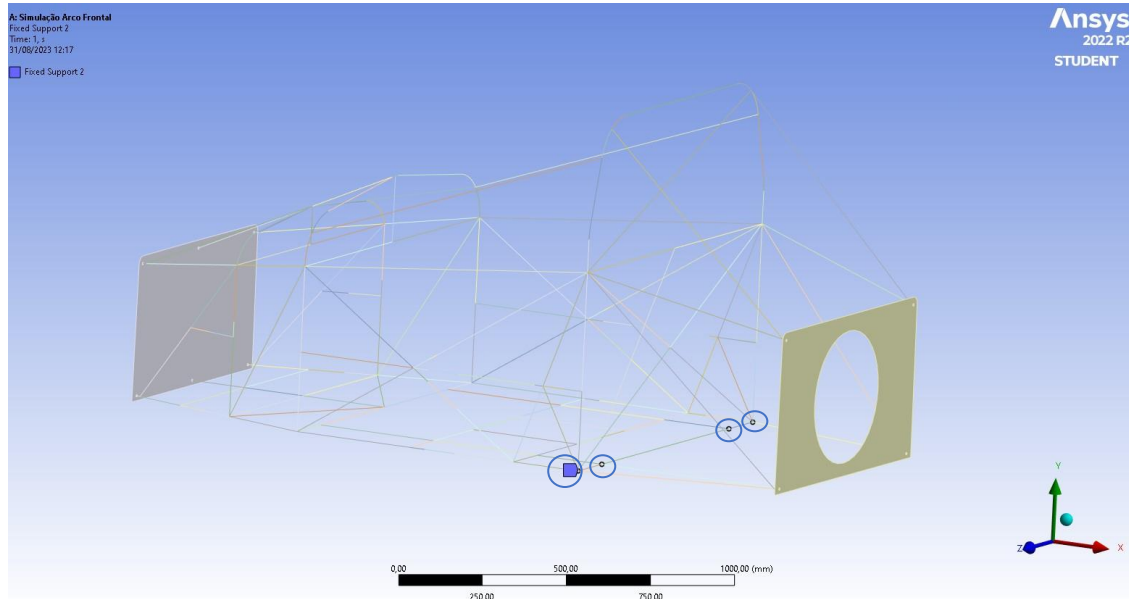


Figura 95 - Ponto de Fixação no Quadro (correspondente ao local de apoio frontal do motor)

O seguinte passo corresponde à seleção dos pontos onde irá ser conferido um deslocamento nulo no eixo YY, selecionou-se dez pontos, realçados na Figura 96, que correspondem aos pontos onde iria o quadro contactar com a mesa de ensaio.

É ainda também necessário realizar a mesma restrição na aresta inferior da placa da frente, Figura 97, sendo que esta também iria estar em contacto com a mesa de ensaio. De referir que devido à ligação da placa com o quadro, ocorria um erro de simulação quando se tentava proceder à aplicação da restrição nos vértices das arestas onde ocorre a ligação entre a placa e o quadro.

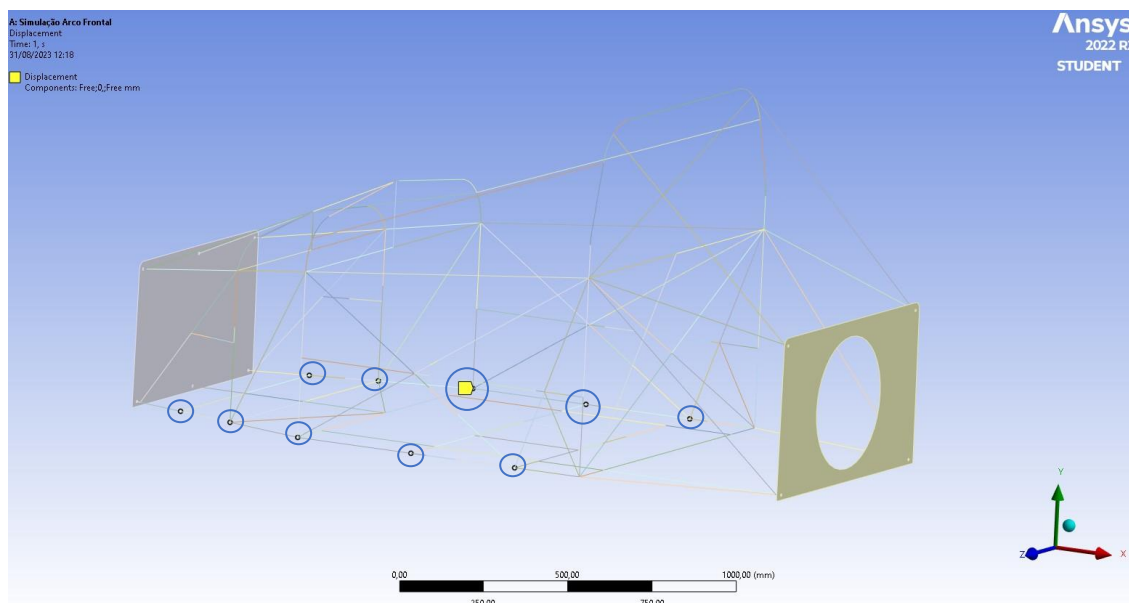


Figura 96 - Pontos de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY, no Quadro

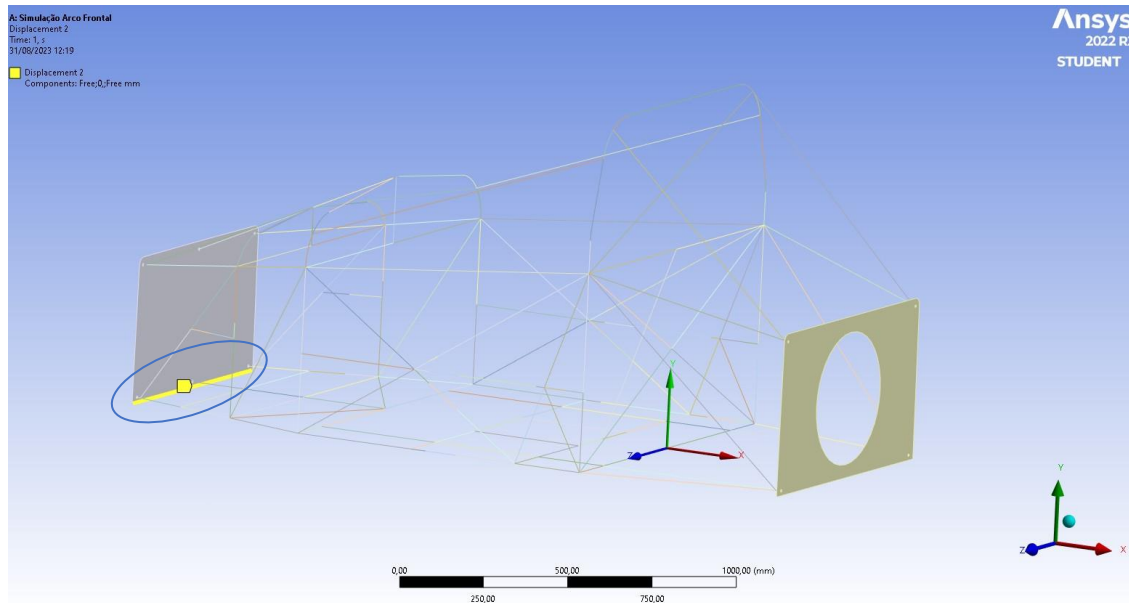


Figura 97 - Aresta de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY, na Placa da Frente

Por último procedeu-se à aplicação da força vertical no arco frontal. O ponto de aplicação da força corresponde ao ponto central do arco como descrito no regulamento [1], [70], como se pode verificar na Figura 98.

A força aplicada nesta simulação corresponde a $5.0W$, sendo o valor final o seguinte:

$$W = 720 + 180 = 900kg \cong 8829N$$

(1)

$$F_{aplicada} = 5,0 * 8829 = 44145N \rightarrow F_y = -44145N$$

(2)

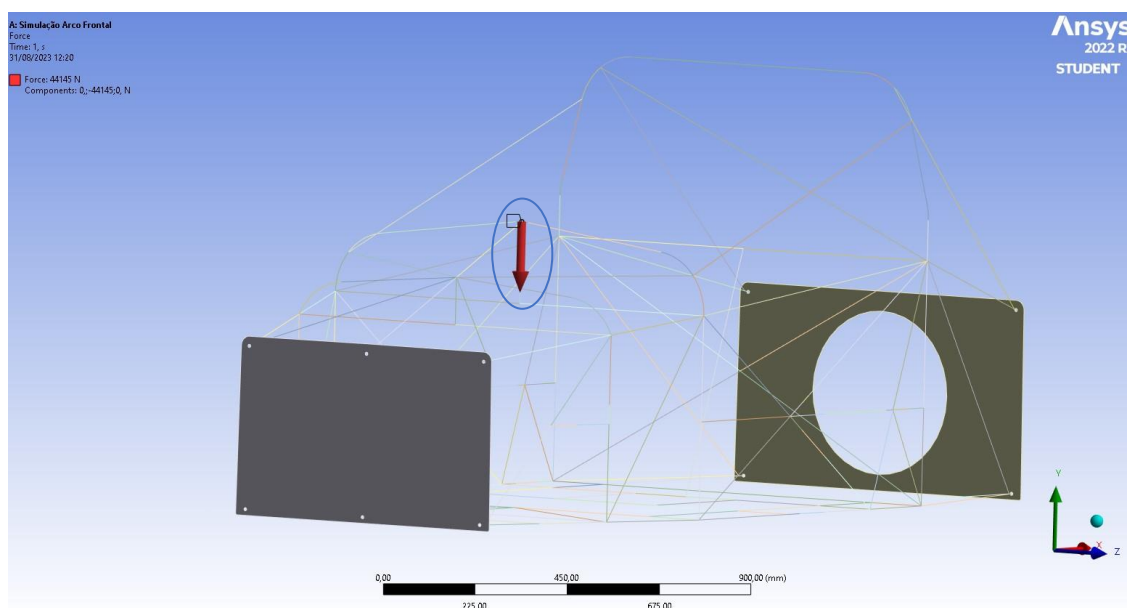


Figura 98 - Local de Aplicação da Força no Arco Frontal

Arco de Segurança Traseiro

Na realização da simulação do arco de segurança traseiro utilizou-se os mesmos pontos de fixação e de restrição de movimento considerados para o arco de segurança frontal, apresentando também a mesma explicação para a sua escolha.

Deste modo os pontos de fixação para esta simulação são a linha interior da circunferência da placa traseira, identificada na Figura 99, e os quatro pontos inferior assinalados na Figura 100.

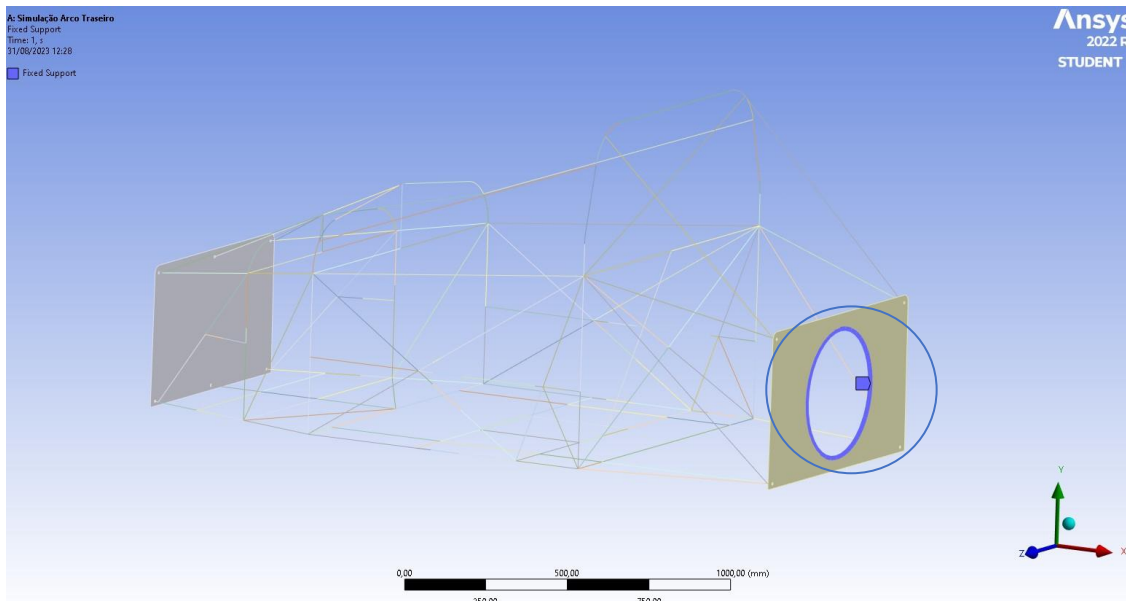


Figura 99 - Ponto de Fixação na Placa Traseira

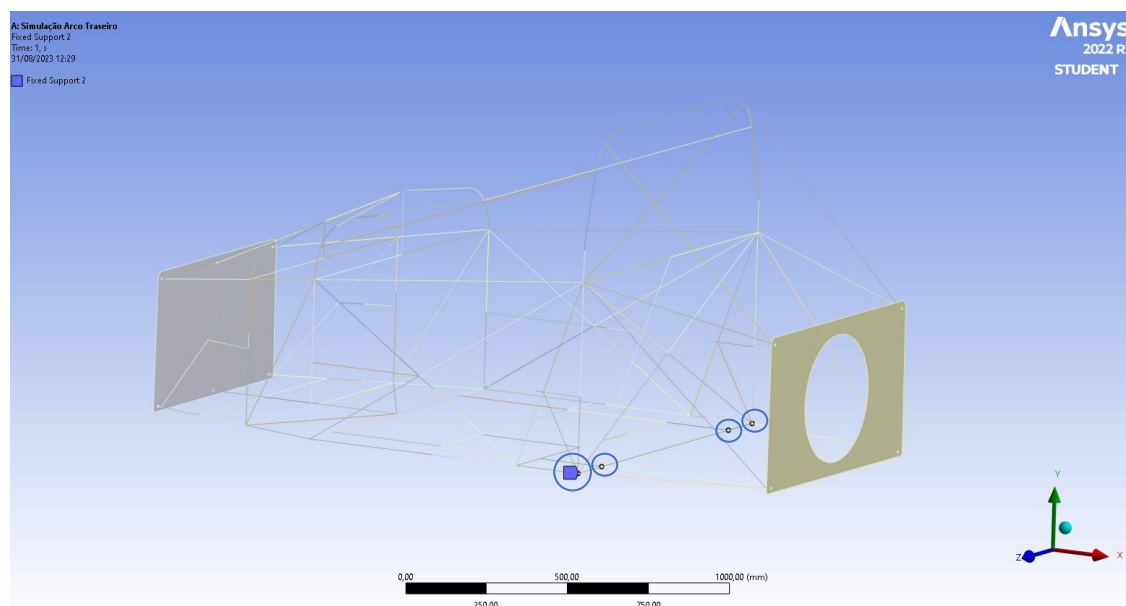


Figura 100 - Ponto de Fixação no Quadro (correspondente ao local de apoio frontal do motor)

De seguida realizou-se a escolha dos mesmos pontos e da mesma aresta para restringir o movimento no eixo YY. Sendo por isso os pontos seleccionados realçados na Figura 101, e a aresta escolhida a que se encontra demarcada na Figura 102.

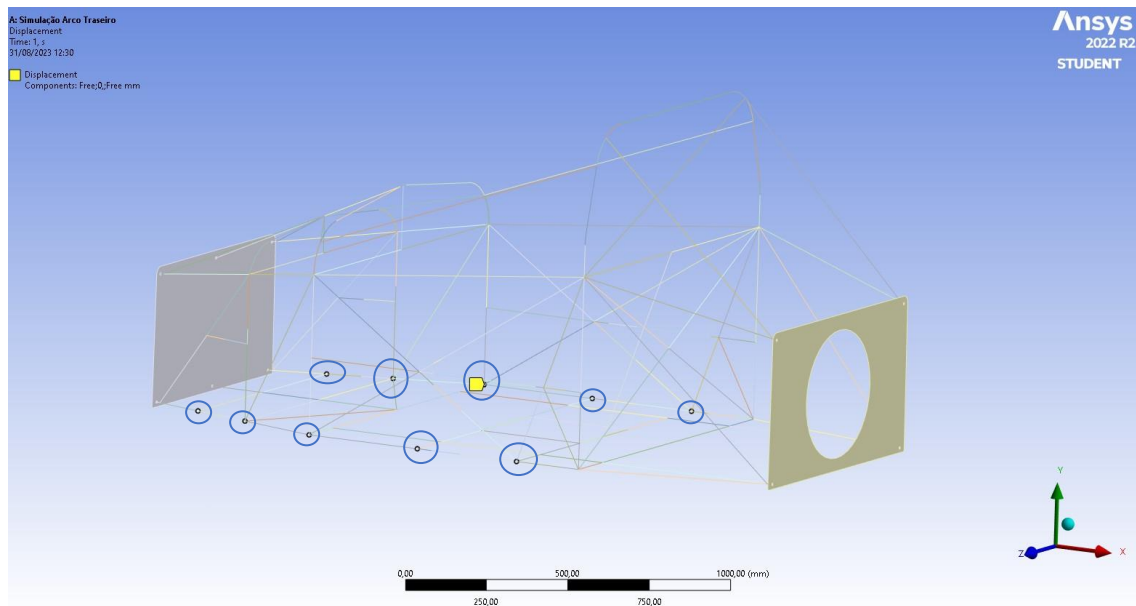


Figura 101 - Pontos de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY, no Quadro

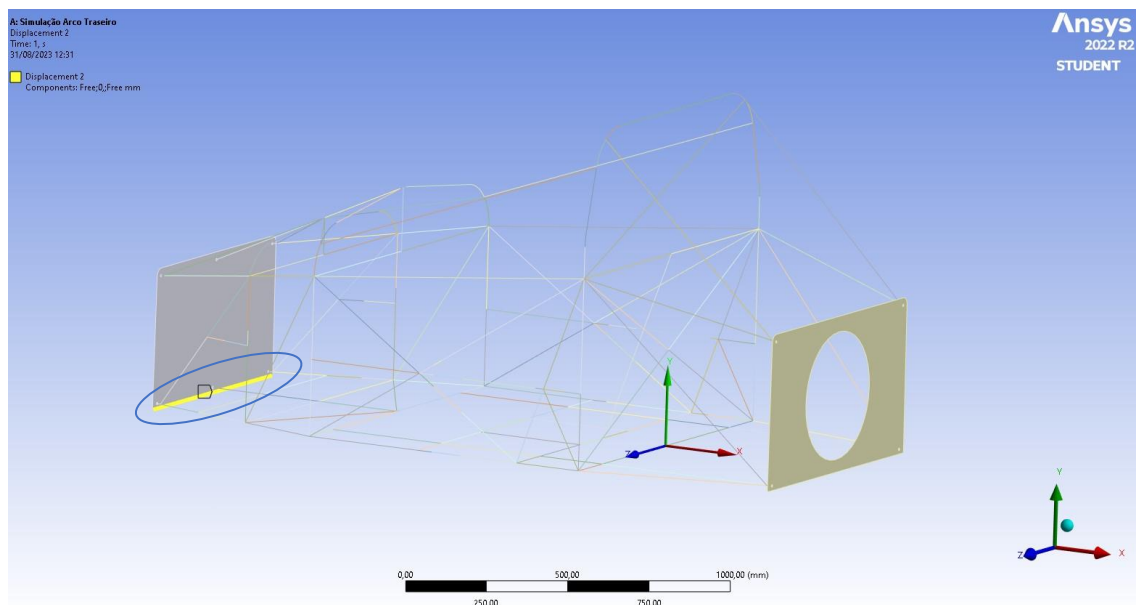


Figura 102 - Aresta de Bloqueio do Deslocamento no Eixo YY, na Placa da Frente

Por fim procedeu-se à realização da aplicação da força, sendo que esta apresenta três componentes uma transversal, uma longitudinal e uma vertical. No programa a utilizar introduziu-se a força segundo as três componentes, inserindo-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned} F_{transversal} &= F_Z = 1,5 * W = 1,5 * 8829 = (-)13243,5N \\ F_{longitudinal} &= F_X = 5,5 * W = 5,5 * 8829 = (-)48559,5N \\ F_{vertical} &= F_Y = 7,5 * W = 7,5 * 8829 = (-)66217,5N \end{aligned} \quad (3)$$

O valor do W apresentado corresponde ao valor utilizado para o ensaio do arco frontal.

Por fim calculou-se o seu ângulo de aplicação da força, identificando qual o ponto onde esta irá ser aplicada. Para isso procedeu-se a realização dos seguintes cálculos (4), tendo em conta o esquema da (4)

Figura 103:

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{(7,5W)^2 + (1,5W)^2} = 7,649W \\ \sin \alpha &= \frac{1,5W}{7,649W} \Leftrightarrow \sin \alpha = \frac{1,5}{7,649} \Leftrightarrow \alpha \cong 11,3^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

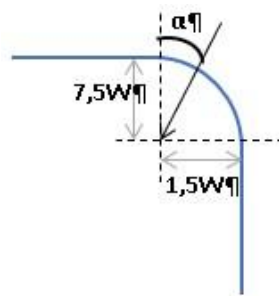


Figura 103 - Esquema de Calculo do Ângulo de aplicação da Força no Arco Traseiro

Na Figura 104 pode-se observar o local de aplicação da força no arco traseiro.

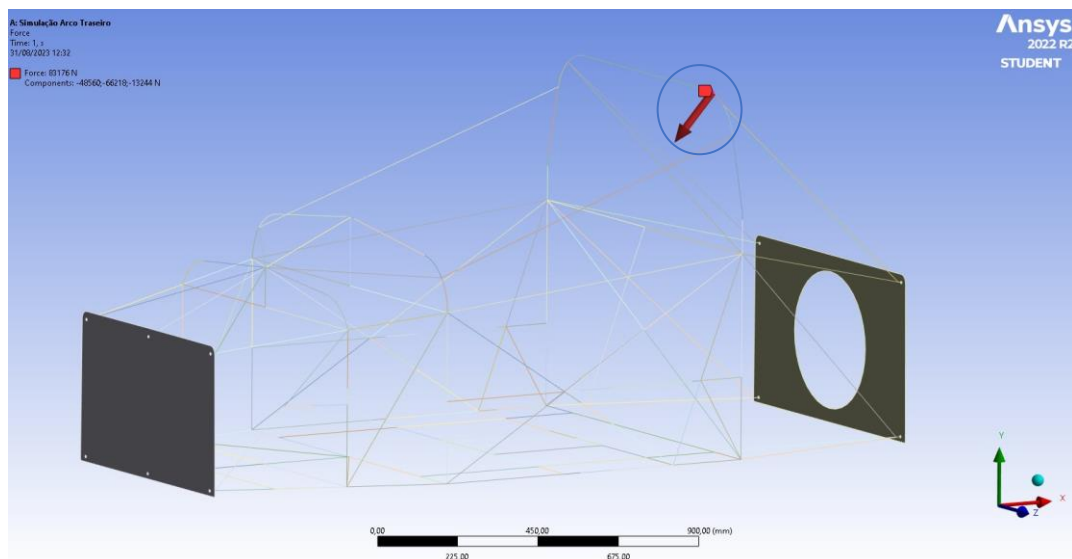


Figura 104 - Local de Aplicação da Força no Arco Traseiro

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo irá ser dividido em dois subcapítulos, primeiramente a apresentação de resultados e posteriormente uma discussão destes. Na apresentação dos resultados irá expor-se os valores retirados das simulações apresentadas no capítulo anterior e os pontos onde estes atingem o valor máximo. Sendo que de seguida realiza-se uma discussão dos resultados onde se apresenta um resumo destes e indica se cumprem os limites do regulamento [1], [70].

4.1. Apresentação de resultados

Para apresentar os resultados de forma a este serem de fácil compreensão, este subcapítulo foi dividido em dois sub-subcapítulos relativos às simulações da célula de sobrevivência e da estrutura de anti-capotamento.

De forma a ser possível apresentar os resultados pretendidos realizou-se em antes uma alteração nas definições. Para efetuar esta alteração recorreu-se à árvore no lado direito e clicou-se em *Solution*, em baixo irá aparecer a janela de *Details* e aí procurou-se o parâmetro *Post Processing* e mudou-se a opção de *Beam Section Results* para *Yes*, como se pode verificar na Figura 105.

| Post Processing | |
|-------------------------|-----|
| Beam Section Results | Yes |
| On Demand Stress/Strain | No |

Figura 105 - Beam Section Results

Esta alteração verificou-se necessária de realizar de forma a ser possível obter os resultados relativos aos valores de tensão para as secções de viga (tubos) do quadro. Foi apenas possível obter os valores de tensão, e estes serem os valores de tensão equivalente de Von-Misses, depois de realizar esta alteração. De referir que em antes de realizar esta alteração apenas se conseguia obter os resultados de tensão para as duas placas. frontal e traseira.

De seguida irão ser apresentados os resultados obtidos e também expostos e justificados os locais de valores de deslocamento e tensão máxima.

4.1.1. Resultados das Simulações à Célula de Sobrevivência

No Plano entre o eixo frontal e o tablier

Corrida a primeira simulação relativa à célula de sobrevivência, no plano vertical que atravessa equidistante entre o eixo frontal e o tablier, foram obtidos os resultados relativos ao deslocamento e à tensão.

Inicialmente começou-se por analisar os deslocamentos obtidos na estrutura. Para isso retirou-se os valores máximos e mínimos na estrutura e identificou-se o local mais crítico.

Nesta simulação obteve-se um deslocamento máximo de 0,8 mm em carga, isto é, deslocamento no regime elástico, como registado na tabela da Figura 106



Figura 106 - Resultados e Escala da Deformação, Plano entre Eixo Frontal e Tablier

Na figura a seguir apresentada, Figura 107, pode-se visualizar as deformações ocorridas na estrutura através de uma legenda por código de cores, registadas à direita na Figura 106.

Consegue-se nesta figura localizar algumas das zonas com maior deslocamento como o local de aplicação da força e as curvas do arco frontal e traseiro.

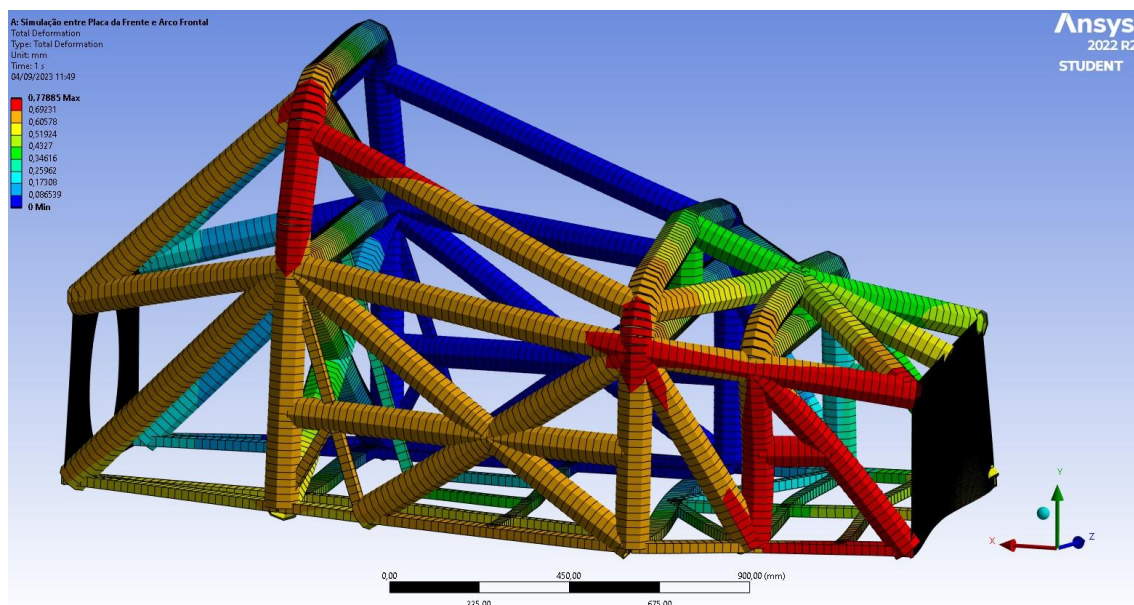


Figura 107 - Deformação Total do Quadro, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier

Como referido no parágrafo anterior, a zona de maior deslocamento corresponde ao local de aplicação da força, à direita da Figura 108, que também acaba por criar um maior esforço no ponto de ligação da lateral da frente ao arco frontal onde também se verificou um maior deslocamento.

Identificou-se também um deslocamento máximo no local da curva do arco traseiro, à esquerda da Figura 108, sendo que isto deve-se ao facto de verificar uma ligação com uma secção tubular de reforço entre o local de deformação máxima no arco frontal e o local da curva no arco traseiro, sendo por isso transmitida um maior esforço entre estes pontos resultando num maior deslocamento.

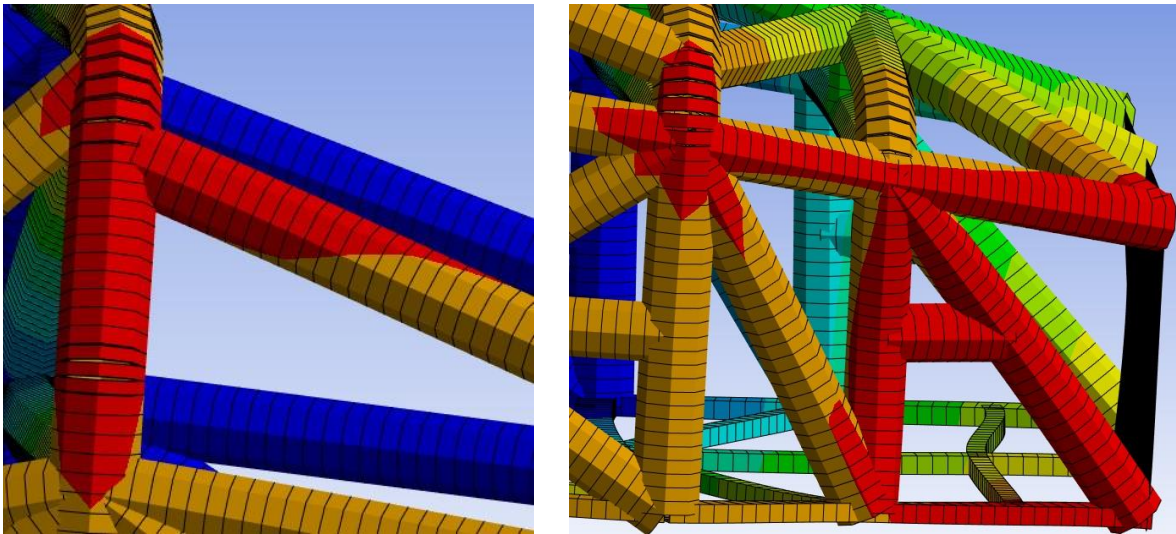


Figura 108 - Pontos onde Ocorre Deformação Máxima, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier

Após a análise dos resultados dos deslocamentos, procedeu-se à obtenção dos resultados relativos aos valores de tensão equivalente de Von-Misses. Neste caso analisou-se o quadro da Figura 109 e o esquema da Figura 110 e retirou-se que se obteve uma valor máximo de 59,68 MPa

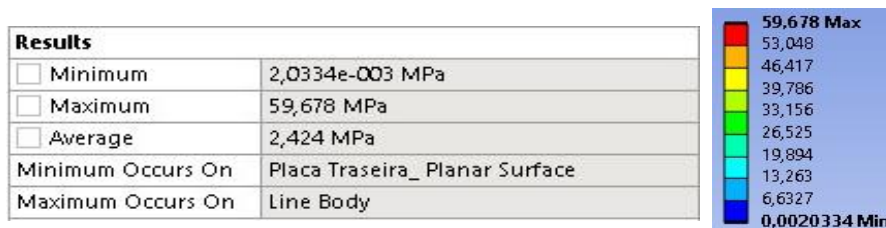


Figura 109 - Resultados e Escala da Tensão, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier

Na Figura 110 observou-se os resultados para toda a estrutura conseguindo entrepetar de melhor forma os valores de tensão em qualquer ponto. Estes podem ser intrepitados através de um código de cores, possível de verificar no lado direito da Figura 109.

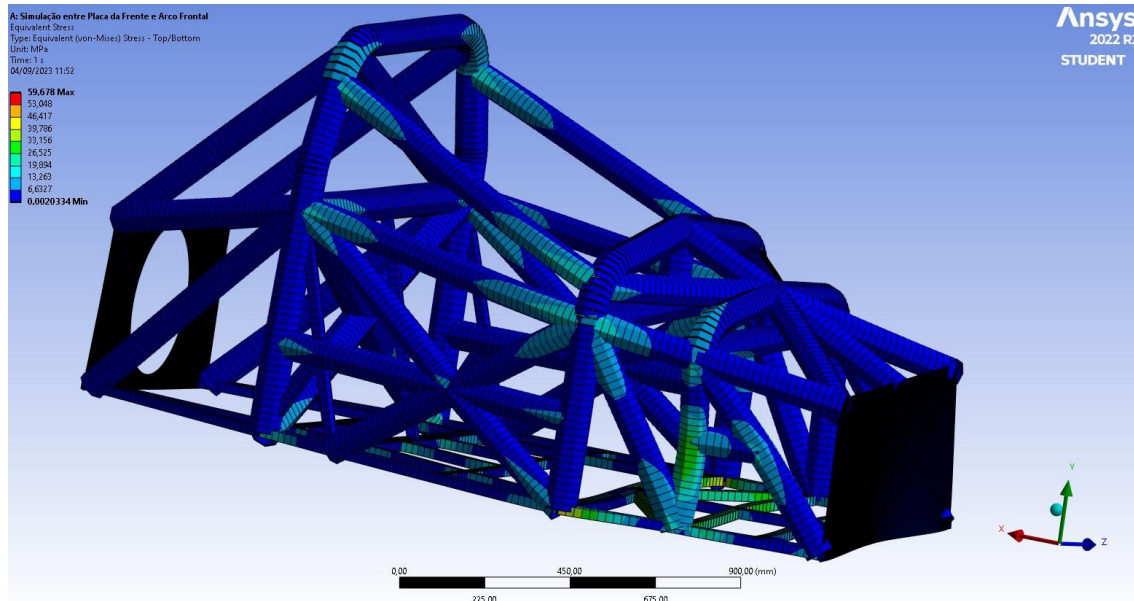


Figura 110 – Tensão Equivalente de Von-Mises, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier

Nesta simulação o valor de tensão máxima foi verificado no reforço inferior do chão, à frente, como se vê na Figura 111. Esta localização do valor máximo justifica-se devido a esforços de tração e compressão, sendo que este são provocados devido à força ser aplicada transversalmente a este obtendo-se assim valores de tensão superiores nos pontos de ligação entre as seções tubulares.

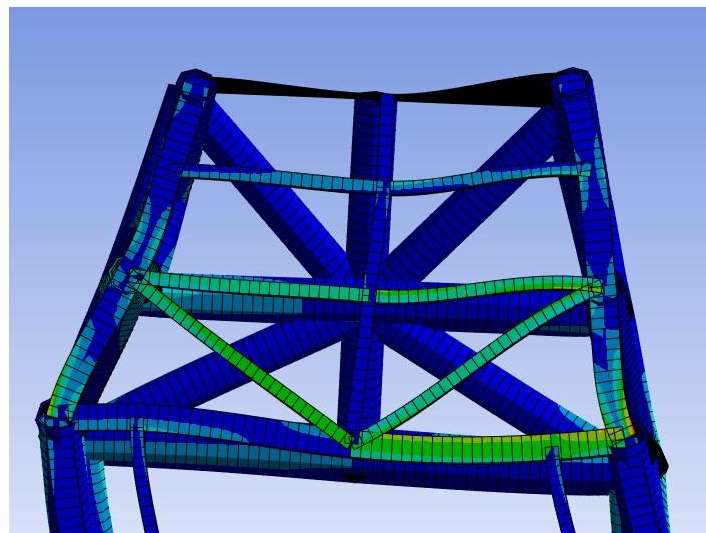


Figura 111 - Pontos onde Ocorre Valores Máximos de Tensão de Von-Mises, Plano Entre Eixo Frontal e Tablier

No Plano que passa pelas fixações dos cintos

Corrida a segunda simulação, que corresponde à aplicação de uma força num plano vertical que passe pelo centro das fixações inferiores dos cintos, retirou-se e interpretou-se os valores correspondentes ao deslocamento e às tensões equivalentes de Von-Misses.

Primeiro retirou-se os resultados relativos ao deslocamento obtido na estrutura. Obtendo-se um valor de deslocamento máximo de 0,7 mm em carga, isto é, deslocamento no regime elástico, como se pode comprovar no quadro da Figura 112



Figura 112 - Resultados e Escala da Deformação, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos

De forma a perceber o comportamento da estrutura quando sujeito aos esforços aplicados analisou-se os resultados apresentados na Figura 113, e através do código de cores apresentado à direita na Figura 112, foi possível identificar as zonas críticas onde ocorreu o deslocamento máximo.

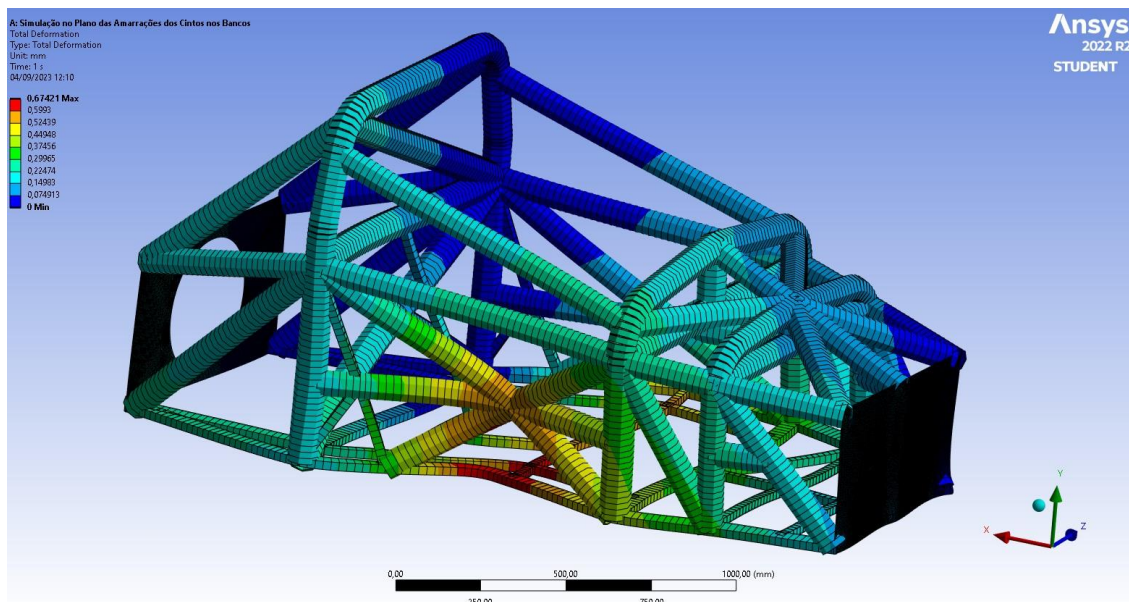


Figura 113 - Deformação Total do Quadro, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos

Na Figura 114 realizou-se uma aproximação, identificando-se mais facilmente o ponto de deslocamento máximo. É possível identificar que os pontos de deslocamento máximo coincidem com o ponto de aplicação de força e devido à transferência de esforços as secções tubulares ligadas a este esforço também registam um valor de deslocamento máximo.

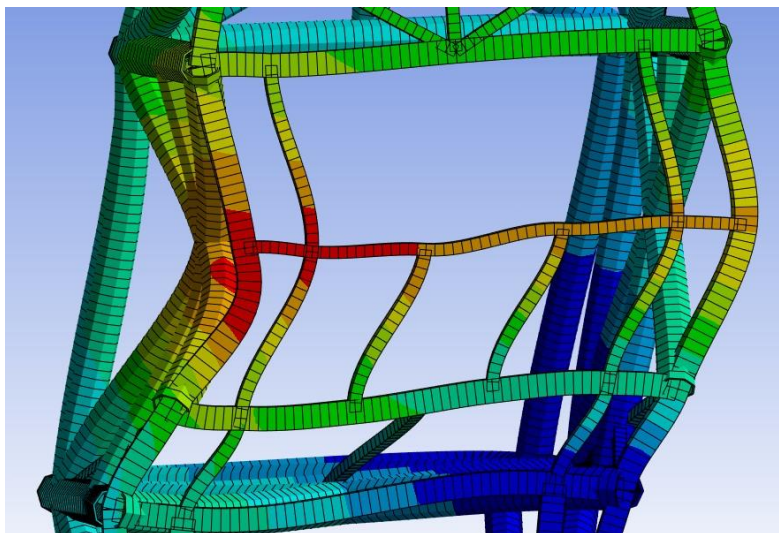


Figura 114 - Pontos onde Ocorre Deformação Máxima, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos

Após analisados os resultados dos deslocamentos, procedeu-se à obtenção dos resultados relativos à tensão de Von-Misses e a sua devida análise. Nesta simulação obteve-se como valor de tensão máximo de 197,1 MPa, representado na tabela da Figura 115.



Figura 115 - Resultados e Escala da Tensão, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos

Para verificar o comportamento da estrutura procedeu-se à análise dos resultados, representados na Figura 116, através do código de cores, que se encontra à direita na Figura 115, de forma a ser possível identificar o local onde se encontra o valor de tensão máximo.

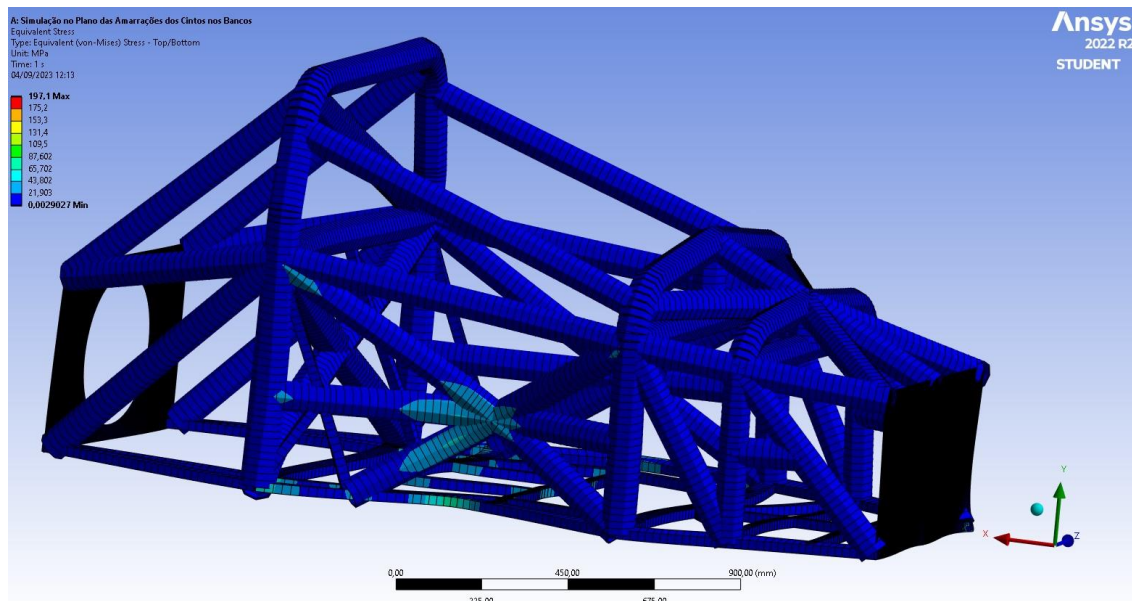


Figura 116 - Tensão Equivalente de Von-Mises, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos

O valor de tensão máxima identificou-se no canto inferior esquerdo da placa da frente, Figura 117. Este é provocado devido ao deslocamento das seções tubulares com a aplicação da força, sendo que as secções tubulares ligadas à placa criam pontos de tensão máxima quando sujeitos a esforços, sendo este um dos casos.

Pode-se também identificar que o local de maior tensão no quadro coincide com local de aplicação da carga.

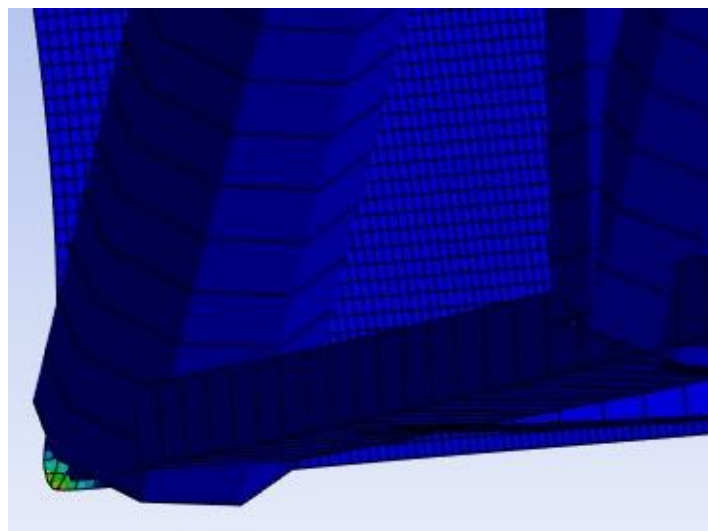


Figura 117 - Ponto de Tensão Máxima, Plano no centro da Fixações Inferiores do Cintos

No Plano que passa pelo do depósito de combustível

Na última simulação referente à célula de sobrevivência, aplicou-se uma força num plano vertical que passe pelo centro a área do depósito de combustível. Para esta também se retirou os resultados relativos ao deslocamento e à tensão equivalente de Von-Misses.

Corrida a simulação, analisou-se primeiro os deslocamentos obtidos na estrutura, tendo neste caso obtido um valor máximo de 3,8 mm em carga, isto é, deslocamento em regime elástico, como se pode verificar na Figura 118.

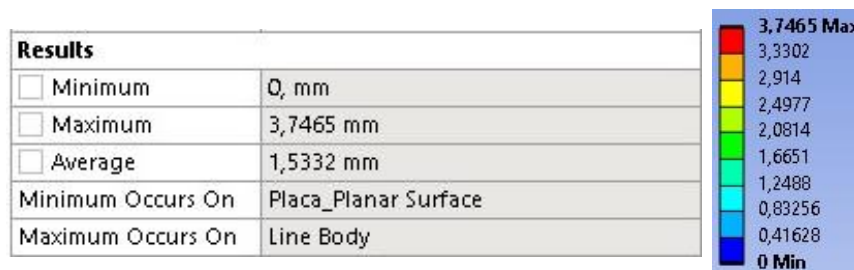


Figura 118 - Resultados e Escala da Deformação, Plano no Centro da Área do Depósito

Para compreender a respostas da estrutura aos esforços procedeu-se à análise dos resultados representados na Figura 119, através do código de cores à direita da Figura 118, sendo que através desta identificou-se o local de maior deslocamento.

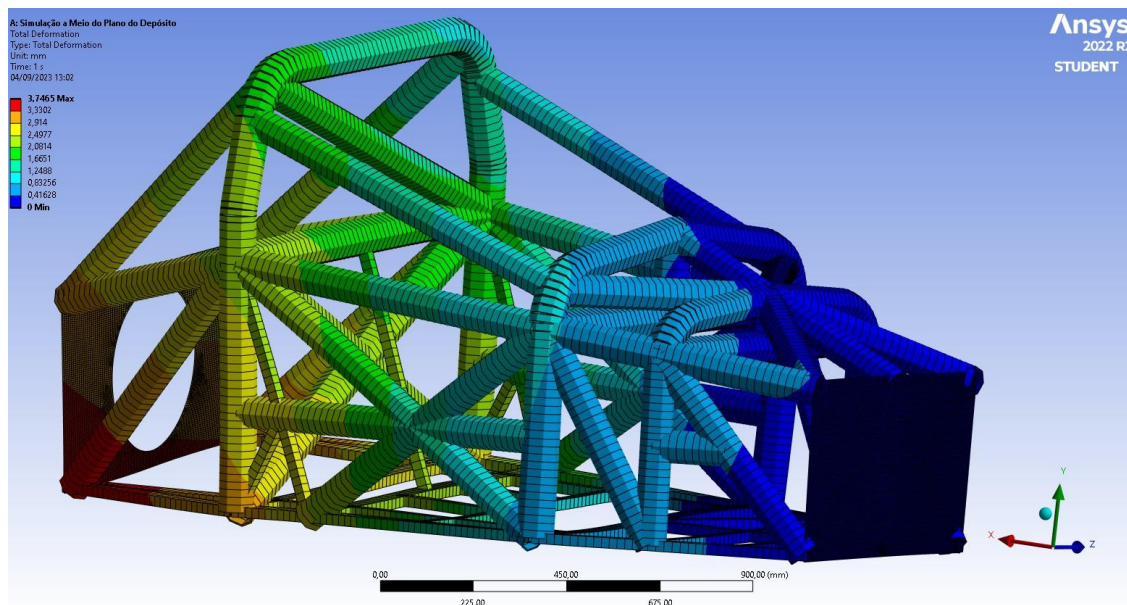


Figura 119 - Deformação Total do Quadro, Plano no Centro da Área do Depósito

Na Figura 120 podemos identificar o local de maior deslocamento. Este corresponde à zona de ligação entre as secções tubulares inferiores traseiros do lado direito com a placa traseira, secções estas que estão também ligadas ao arco traseiro e tendo sido a carga aplicada juntos de esta.

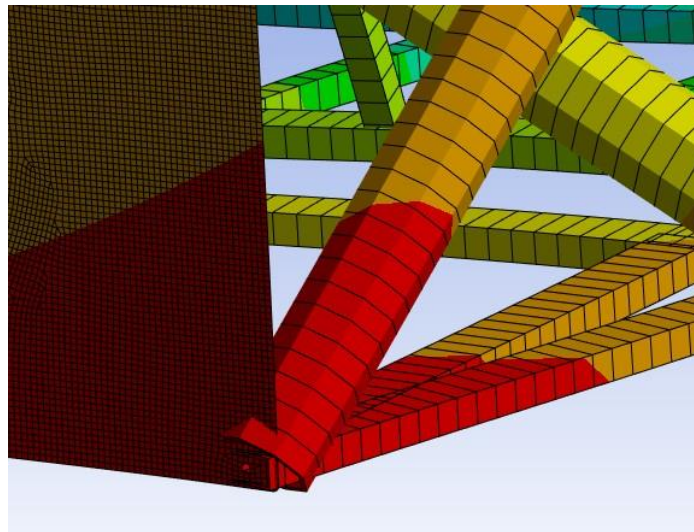


Figura 120 - Local onde Ocorre Deformação Máxima, Plano no Centro da Área do Depósito

Por último retirou-se os resultados relativos às tensões, e para esta simulação obteve-se um valor máximo de 166,7 MPa, como apresentado na Figura 121.

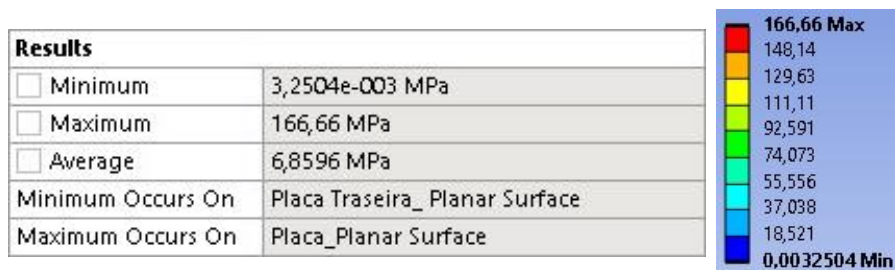
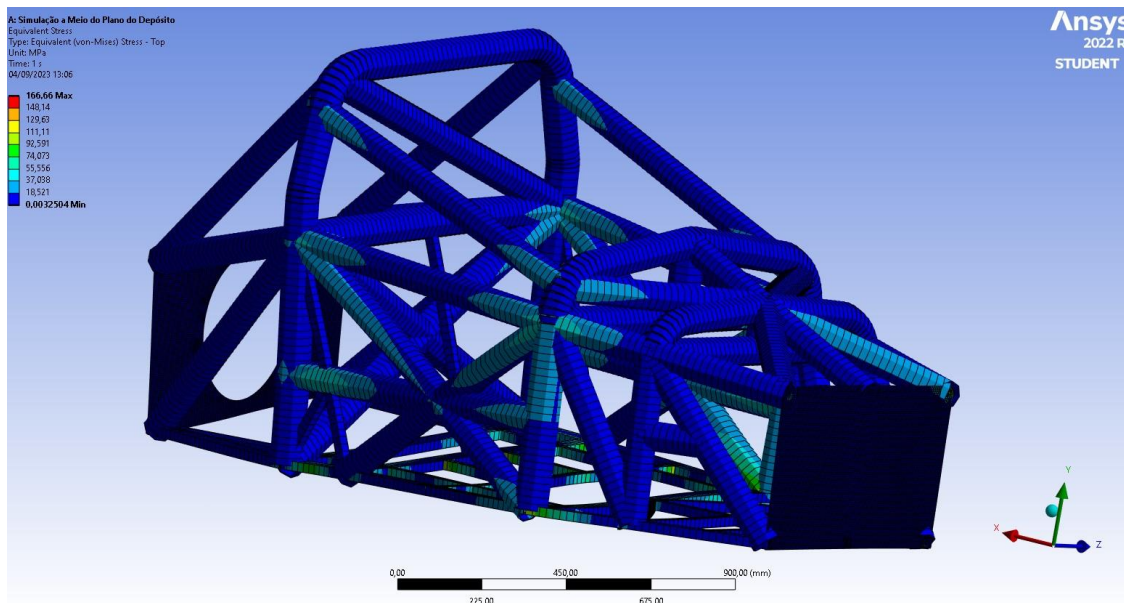


Figura 121 - Resultados e Escala da Tensão, Plano no Centro da Área do Depósito

Para uma melhor análise dos resultados recorreu-se à Figura 122, e identificou-se os locais de tensão máxima. Para esta análise recorreu-se ao código de cores, representado à direita na Figura 121.



Na Figura 123 determinou-se a zona de tensão superior perto do arco frontal. Esta corresponde à secção tubular da base do quadro que liga o arco traseiro ao frontal. Neste caso temos uma situação diferente das simulações anteriores visto que neste caso a tensão máxima ocorre do lado oposto da estrutura onde foi aplicada a carga.

Mas o ponto de tensão máxima identificou-se no canto superior esquerdo da placa da frente, sendo este como já referido anteriormente apenas um ponto de concentração de tensões devido à ligação entre a placa e as secções tubulares.

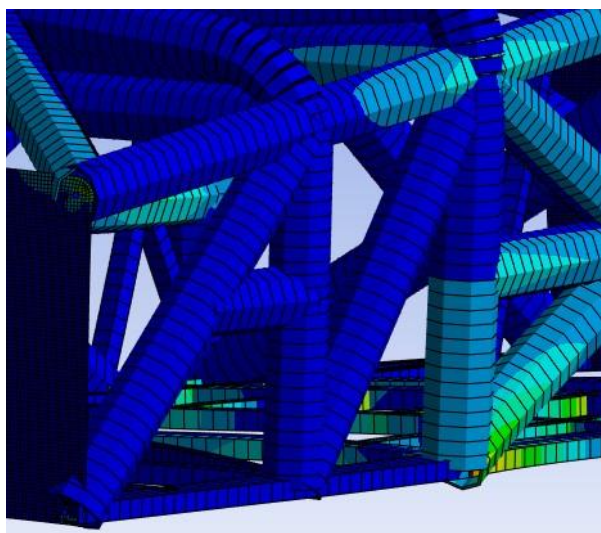


Figura 123 - Ponto de Tensão Máxima, Plano no Centro da Área do Depósito

4.1.2. Resultados das Simulações à Estrutura Anti-Capotamento

Arco de Segurança Frontal

Para as simulações realizadas à estrutura anti-capotamento começou-se primeiramente pela obtenção dos resultados para a estrutura frontal que corresponde ao arco de segurança frontal. Nesta simulação começou-se por analisar os resultados do deslocamento da estrutura e de seguida os valores de tensão instalada nesta.

Executada a primeira simulação retirou-se os valores para o deslocamento provocado na estrutura, estando estes registados na tabela da Figura 124. Como valor máximo registou-se 0,7 mm em carga, isto é, deslocamento em regime elástico.

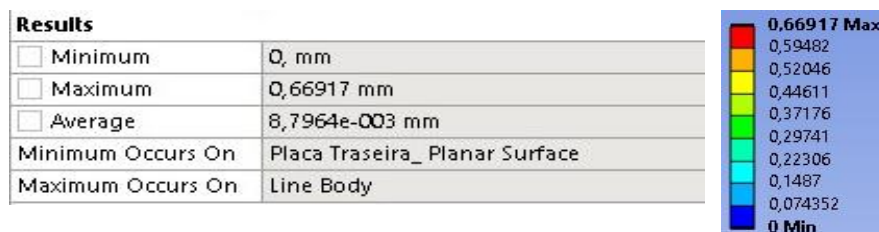


Figura 124 - Resultados e Escala da Deformação, Arco de Segurança Frontal

Para se entender de melhor forma o comportamento da estrutura relativamente aos deslocamentos, procedeu-se à análise da Figura 125 através do código de cores representado à direita da Figura 124, sendo possível deste modo identificar os locais de deslocamento máximo.

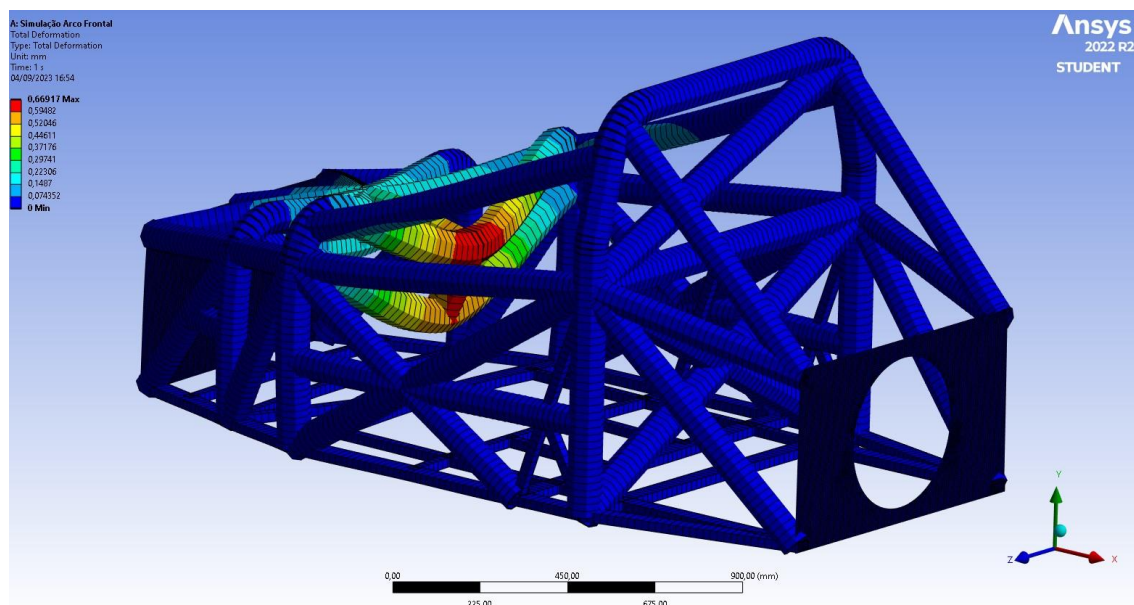


Figura 125 - Deformação Total do Quadro, Arco de Segurança Frontal

Na Figura 126 identificou-se a zona de deslocamento máximo, sendo que este corresponde ao local onde foi aplicada a carga sobre o arco frontal. Este correspondendo ao local de descarga da carga terá o maior deslocamento devido ao local de aplicação da força e a orientação desta.

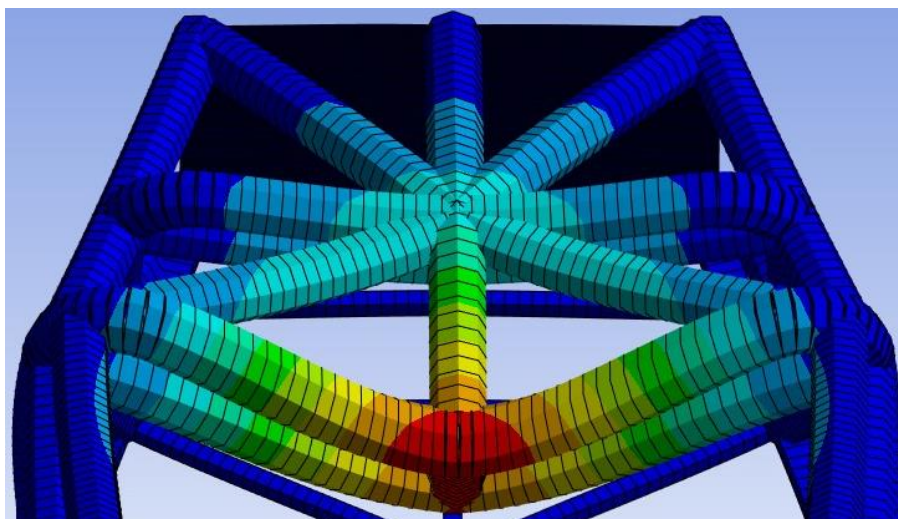


Figura 126 - Local de Deformação Máxima, Arco de Segurança Frontal

Relativamente aos valores de tensão, para esta simulação, obteve-se como valor máximo 99,62 MPa, como se pode confirmar pelo quadro na Figura 127.

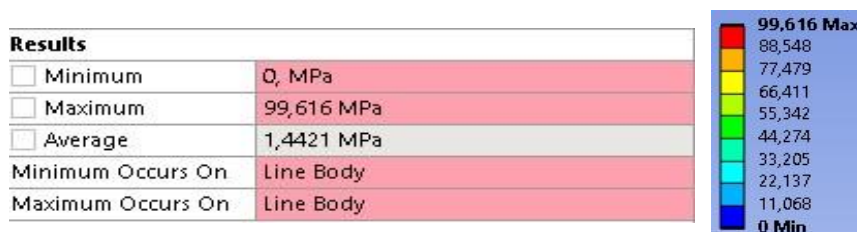


Figura 127 - Resultados e Escala da Tensão, Arco de Segurança Frontal

Tal como para os deslocamentos, recorreu-se à Figura 128, e verificou-se os pontos de tensão máxima na estrutura. Para isso utilizou-se o código de cores representado no lado direito da Figura 127.

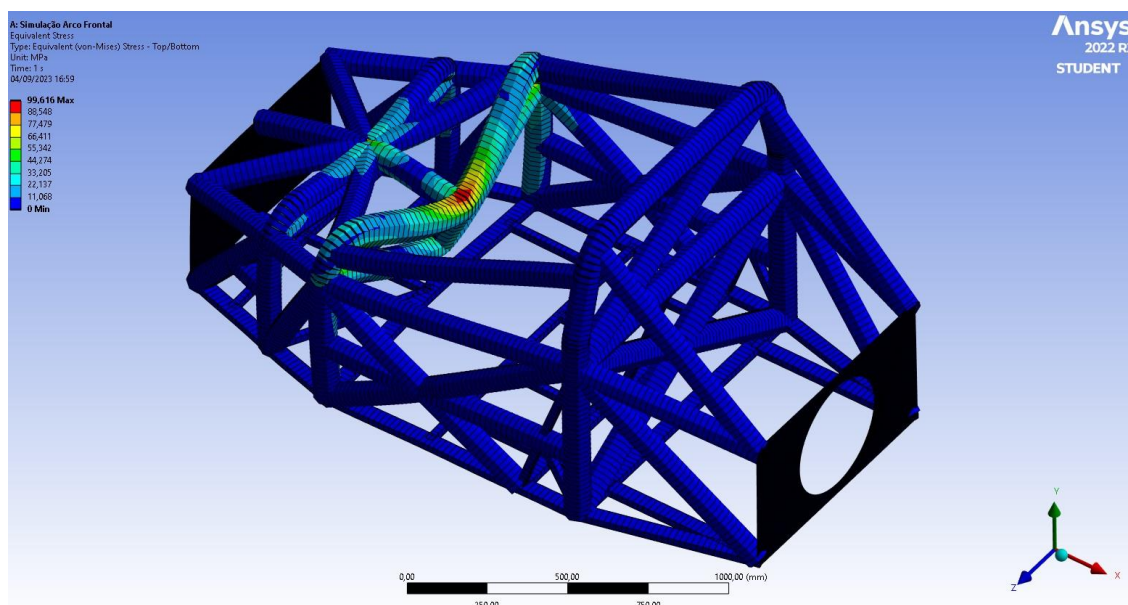


Figura 128 - Tensão Equivalente de Von-Mises, Arco de Segurança Frontal

Através da Figura 129 registou-se o ponto de maior tensão no local de aplicação da carga, tanto do lado superior como do lado inferior da secção tubular.

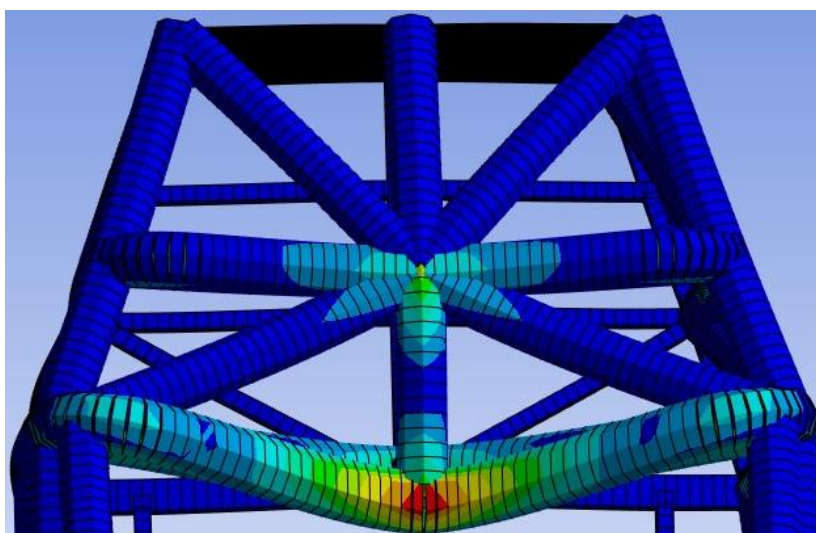


Figura 129 - Ponto de Tensão Máxima, Arco de Segurança Frontal

Arco de Segurança Traseiro

Para a última simulação, que corresponde à avaliação da estrutura traseira de anti-capotamento, arco de segurança traseiro, procedeu-se da mesma forma que para as simulações apresentadas anteriormente, analisando primeiro os resultados correspondentes ao deslocamento da estrutura e de seguida os referentes às tensões.

Realizada esta simulação obteve-se os valores máximos e mínimo apresentados no quadro da Figura 130. Registou-se como valor de deslocamento máximo 1,3 mm em carga, isto é, deslocamento em regime elástico.

| Results | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Minimum | 0, mm |
| <input type="checkbox"/> Maximum | 1,3011 mm |
| <input type="checkbox"/> Average | 9,9079e-002 mm |
| Minimum Occurs On | Placa Traseira_ Planar Surface |
| Maximum Occurs On | Line Body |



Figura 130 - Resultados e Escala da Deformação, Arco de Segurança Traseiro

De forma a ser possível identificar os locais de maior deslocamento procedeu-se à análise da Figura 131, usando o código de cores representado na Figura 130 à direita.

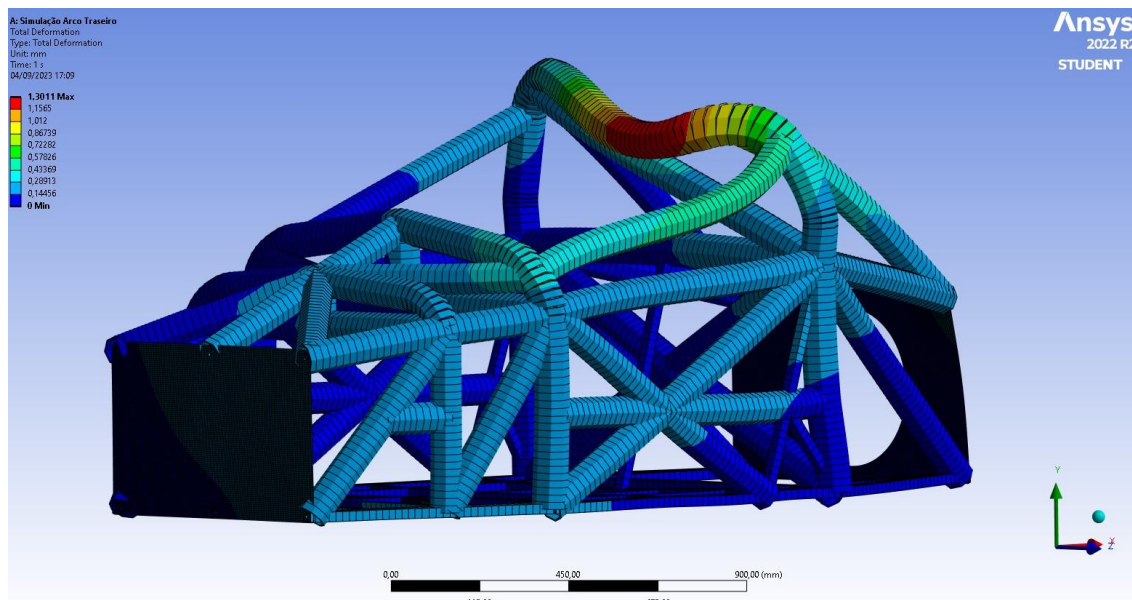


Figura 131 - Deformação Total no Quadro, Arco de Segurança Traseiro

Na Figura 132 mostra-se o local onde se verificou a maior deformação, sendo que este se localiza no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que este se desloca ligeiramente para a direita devido ao facto de a força aplicada nesta simulação apresentar três componentes, transversal, longitudinal e vertical, e ainda ser aplicada segundo um ângulo, provocando assim que o ponto mais crítico se desloque ligeiramente, devido a este comprimir os elementos da estrutura provocando sempre efeitos de deformação superior no centro da estrutura.

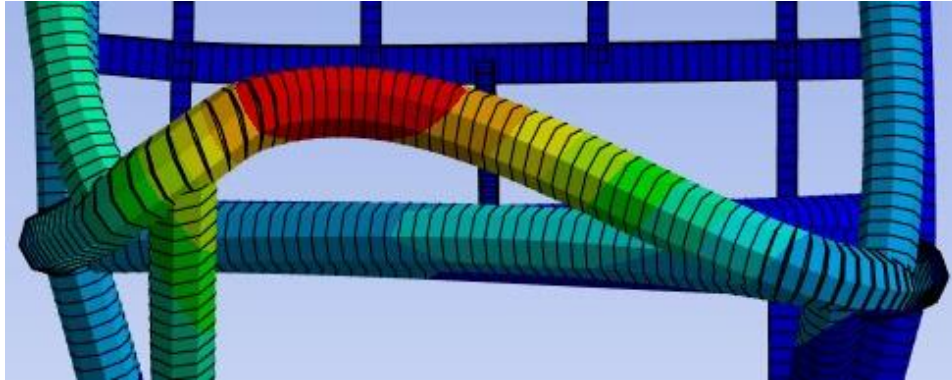


Figura 132 - Local de Deformação Máxima, Arco de Segurança Traseiro

Para finalizar a apresentação de resultados realizou-se a análise dos dados correspondentes aos valores de tensão obtidos. Os valores obtidos encontram-se registados no quadro da Figura 133, tendo como valor máximo 198,9 MPa.

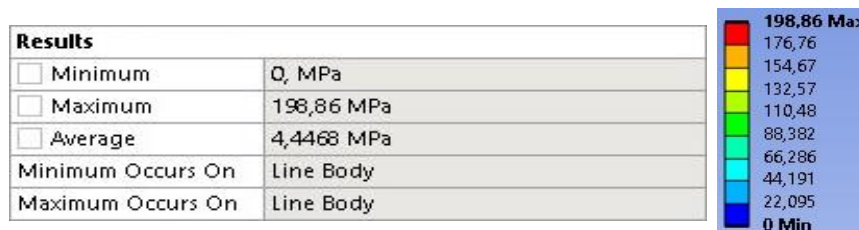


Figura 133 - Resultados e Escala da Tensão, Arco de Segurança Traseiro

Para uma melhor avaliação do comportamento da estrutura procedeu-se à identificação dos locais de onde se registou valores de tensão máxima, e para isso recorreu-se à análise da Figura 134, sendo a sua interpretação possível através do uso do código de cores registado à direita na Figura 133.

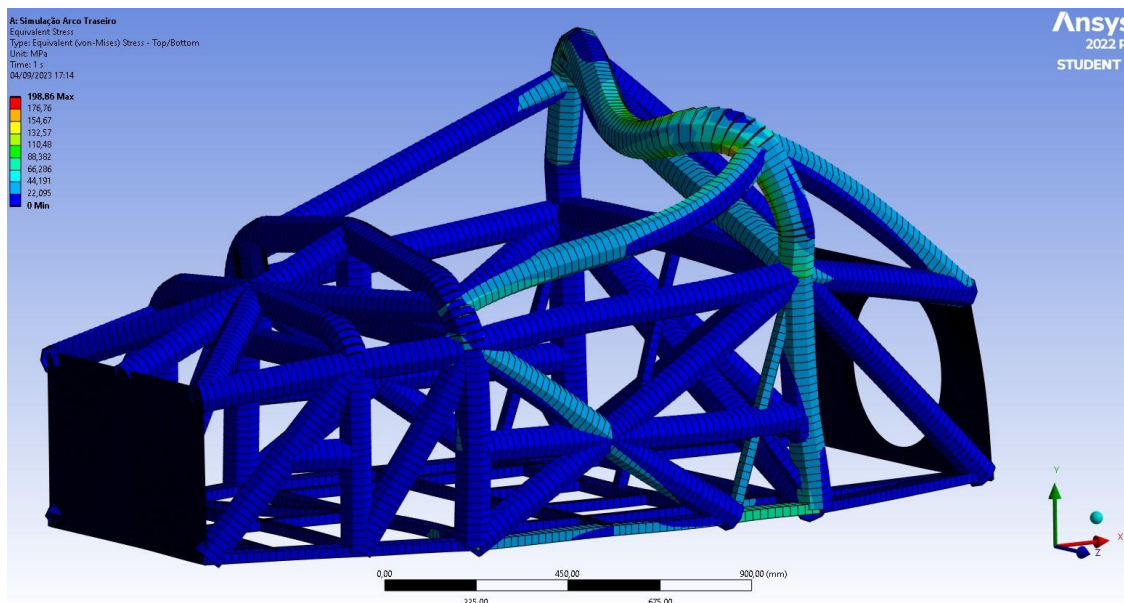


Figura 134 - Tensão Equivalente de Von-Mises, Arco de Segurança Traseiro

Na Figura 135 identificou-se de forma mais aproximada o local onde se registou o valor de tensão máxima. Este encontra-se no mesmo local onde se verificou o deslocamento máximo, que é no local de aplicação da força. Verifica-se também que este valor se regista na parte superior e na parte inferior da secção tubular.

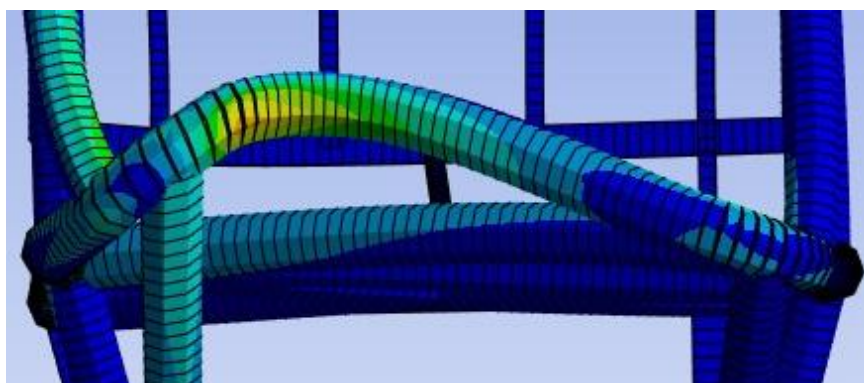


Figura 135 - Ponto de Deformação Máxima, Arco de Segurança Traseiro

4.2. Discussão e Análise de resultados

Depois de expostos os resultados no subcapítulo anterior e identificadas as zonas com valores superiores, realizou-se a compilação destes na Tabela 6, facilitando a sua análise e também verificando se estes cumprem ou não os critérios para validação da estrutura segundo os regulamentos da FIA [1], [70].

Tabela 6 - Resultados das Simulações

| Simulações | | Deslocamento [mm] | Tensão [MPa] |
|----------------------------|---|----------------------|-----------------|
| | | Máx. | Máx. |
| Célula de Sobrevivência | 1 | 0,779 | 59,678 |
| | 2 | 0,674 | 197,1 |
| | 3 | 3,747 | 166,66 |
| Estrutura Anti-Capotamento | 4 | 0,669 | 99,616 |
| | 5 | 1,301 | 198,86 |

Na tabela numerou-se as simulações de 1 a 5 por isso estes correspondem às seguintes simulações:

1 – Simulações à Célula de Sobrevivência Com carga Horizontal Num Plano Vertical que Atravessa a Equidistante entre do Eixo Frontal e o Tablier;

2 – Simulações à Célula de Sobrevivência Com carga Horizontal Num Plano Vertical que Passe pelo Centro das Fixações Inferiores dos Cintos;

3 – Simulações à Célula de Sobrevivência Com carga Horizontal Num Plano Vertical que Passe pelo Centro da Área do Depósito de Combustível;

4 – Simulações à Estrutura Anti-Capotamento Frontal, Com Carga Sobre o Arco de Segurança Frontal;

5 - Simulações à Estrutura Anti-Capotamento Traseira, Com Carga Sobre o Arco de Segurança Traseiro;

Depois de analisado os resultados expostos na tabela anterior realizou-se a avaliação destes segundo os regulamentos da FIA [1], [70].

Quanto às simulações correspondentes à célula de sobrevivência temos, segundo os regulamentos, [1], [70], que têm de apresentar uma deformação menor de que 1 mm depois de retirada a carga por um minuto, sendo isto no caso de uma deformação permanente. Por isso no caso das tensões não ultrapassarem o limite elástico do material, não se irá registar uma deformação permanente e por isso o resultado será validado.

Deste modo para a Simulação 1 e 2 temos uma deformação máxima menor que 1 mm, 0,8 mm e 0,7 mm correspondentemente, e temos um valor de tensão inferior ao limite elástico da liga 25CD4 (Aço) que é de aproximadamente 500 MPa, sendo os valores obtido de 59,68 MPa e 197,1 MPa correspondentemente. Pode-se por isso afirmar que estas duas simulações estão dentro dos parâmetros impostos pelo regulamento [1], [70].

No caso da simulação 3 esta apresenta um deslocamento de 3,7 mm, superior ao limite imposto pelo regulamento, [1], [70], mas quando se procede à análise do valor máximo de tensão obtido, que é 166,7 MPa, podemos verificar que este é bastante inferior ao limite elástico, tanto do alumínio, que é 460 MPa, aproximadamente, como da liga 25CD4 (Aço), que é 500 MPa. Deste modo não ultrapassando o valor do limite elástico, a estrutura não irá apresentar uma deformação permanente e assim o ensaio pode ser validado segundo os regulamentos [1], [70].

Por fim para as simulações relativas à estrutura de anti-capotamento, sabe-se através dos regulamentos [1], [70] que estas têm de apresentar uma deformação elástica inferior a 50 mm ou no caso de o limite elástico ser ultrapassado e se verificar uma deformação permanente, a estrutura pode apresentar uma deformação máxima de 100 mm

Deste modo analisando os resultados apresentados na tabela anterior para as simulações 4 e 5 podemos verificar que apresentam um deslocamento máximo de 0,7 mm e 1,3 mm, correspondentemente, não ultrapassando o valor imposto pelo regulamento [1], [70]. Se formos ainda analisar os valores de tensão obtidos, verificamos que estes são 99,62 MPa e 198,9 MPa, correspondentemente, sendo por isso também não ultrapassado o valor do limite elástico de qualquer dos materiais referidos. Pode-se então afirmar que estas duas simulações também cumprem os limites impostos pelos regulamentos [1], [70].

Depois de analisados todos os resultados pode-se afirmar que a estrutura seria validada pela FIA, visto que todos as simulações realizadas apresentam resultados dentro dos limites imposto pelos regulamentos da referida organização [1], [70].

5. CONCLUSÃO

Neste capítulo irão ser apresentadas as conclusões retiradas durante o desenvolvimento da dissertação. Sendo posteriormente expostas algumas dificuldades que foram encontradas ao longo do desenvolvimento do projeto e que impuseram algumas limitações neste, bem como também irá ser referido alguns trabalhos futuros que podiam ser realizados.

5.1. Conclusões finais

Para o projeto e desenvolvimento de um quadro em construção soldada usando elementos de secções tubulares para a categoria FIA em estudo, as secções tubulares com dimensões de 45x2,5 mm, 40x2 mm, secções retangulares de 50x25x2,5 mm e a secção quadrangular de 25x25x2 mm, revelaram-se uma boa base para na sua construção, conduzindo a valores de tensão instalada e deformação dentro dos limites do material e impostos pelos regulamentos. O material considerado para a estrutura foi o 25CD4 com uma tensão limite elástica de 500 MPa, considerado no seu estado normalizado. Estas em conjunto com a decisão de usar uma placa estrutural frontal e outra traseira em alumínio com espessura de 10 mm e 15 mm, na liga 7075 com tensão limite elástica de 460 MPa, respetivamente levou a que se obtivesse um quadro com uma resistência a esforços superiores ao esperado.

Após o desenho e desenvolvimento do quadro em análise, procedeu-se à preparação da modelação para simulação dos ensaios referidos nos regulamentos da FIA, necessários à aprovação e homologação de uma estrutura deste tipo. Para o efeito foi utilizado o programa ANSYS, versão estudante. Para os elementos tubulares foram usados elementos de viga e para as placas foram usados elementos de casca espessa. Foram simulados os diferentes ensaios necessários: 3 casos de força horizontal sobre a célula de sobrevivência e 2 casos sobre o arco principal. Todas as simulações foram realizadas em regime linear material e geométrico.

De seguida realizaram-se as simulações e procedeu-se à obtenção dos resultados. Para todos os casos de carga os deslocamentos do ponto de aplicação de carga foram inferiores aos limites impostos nos regulamentos, também as tensões instaladas estiveram abaixo da tensão limite de escoamento do material. As condições fronteiras para cada caso de carga foram diferentes, fixando-se os nós do fundo da estrutura, mas apenas os distantes do ponto de aplicação de carga, aproximando a simulação o mais possível do ensaio, e sempre considerando o caso mais gravoso.

Para as simulações referentes à célula de sobrevivência podemos afirmar que a simulação que aplica carga horizontal no plano equidistante entre o eixo frontal e o tablier, bem como a simulação que aplica carga horizontal no plano das fixações inferiores dos cintos obtiveram resultados de deslocamento no ponto de aplicação de carga abaixo de 1 mm e com tensões instaladas com valores a baixo da tensão de limite elástico do material.

A terceira simulação sobre a célula de sobrevivência foi a aplicação de uma força horizontal na zona do depósito. O resultado de deslocamento máximo foi de 3,7 mm, mas com o valor de tensão instalada inferior a tensão de limite elástico. Para este ensaio os regulamentos referem como condição de aceitação uma deformação permanente inferior a 1 mm, mas como em toda a estrutura as tensões instaladas foram inferiores ao limite elástico do material logo não ocorrendo

uma deformação permanente pode-se afirmar que este também cumpria os limites imposto pelo regulamento.

Por último procedeu-se à realização das simulações referentes à estrutura de anti-capotamento, tanto para a frontal, que corresponde ao arco de segurança frontal, como para a traseira, que corresponde ao arco de segurança traseiro. Para estas duas simulações a condição de aprovação é a obtenção de um deslocamento elástico inferior a 50 mm, em carga. Deste modo como foram obtidos valores de deslocamento entre 0,6 e 1,3 mm podemos afirmar que se cumpria os limites impostos, mas de forma a poder aprovar este resultado também se retirou o valor máximo de tensão obtido, sendo este de 200 MPa e o valor do limite elástico do material ser 500 MPa, estando por isso muito distante do limite, podendo validar estas simulações.

Em todas as simulações os valores de tensões instalada obtidos para os diferentes casos de carga andaram à volta de 200 MPa, pelo que se mostra uma opção acertada a utilização de um aço de alto limite elástico como o 25CD4, mantendo-se assim uma boa reserva de segurança.

Em conclusão final pode-se afirmar que este quadro poderia ser fabricado e quando fosse sujeito aos ensaios impostos pelo regulamento iria-se obter uma estrutura capaz de suportar os esforços impostos sobre esta, visto que todos os resultados da simulação estão dentro dos limites impostos e por isso seria validada e aprovada pela instituição FIA.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Para o projeto em questão podem ser indicados alguns trabalhos futuros a realizar, sendo alguns destes como a otimização do quadro conseguindo uma melhor configuração das secções tubulares a usar de forma a diminuir a massa deste, mas mantendo ou melhorando a sua resistência, recorrendo à realização das simulações segundo o método não-linear material e geométrico.

Simular casos de carga com aplicação de forças na estrutura onde se encontram os suportes para suspensão, motor, volante e a realização de um fundo plano.

Realizar os suportes para os componentes de suspensão e uma análise dinâmica do quadro de forma a se conseguir perceber da melhor forma o comportamento deste em variadas situações.

Por fim realizar um modelo/maquete em escala 1:1 de forma a ser possível avaliar as dimensões e a ergonomia do quadro desenvolvido. Esta tarefa requer muito tempo e despesas elevadas pelo que não foram realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

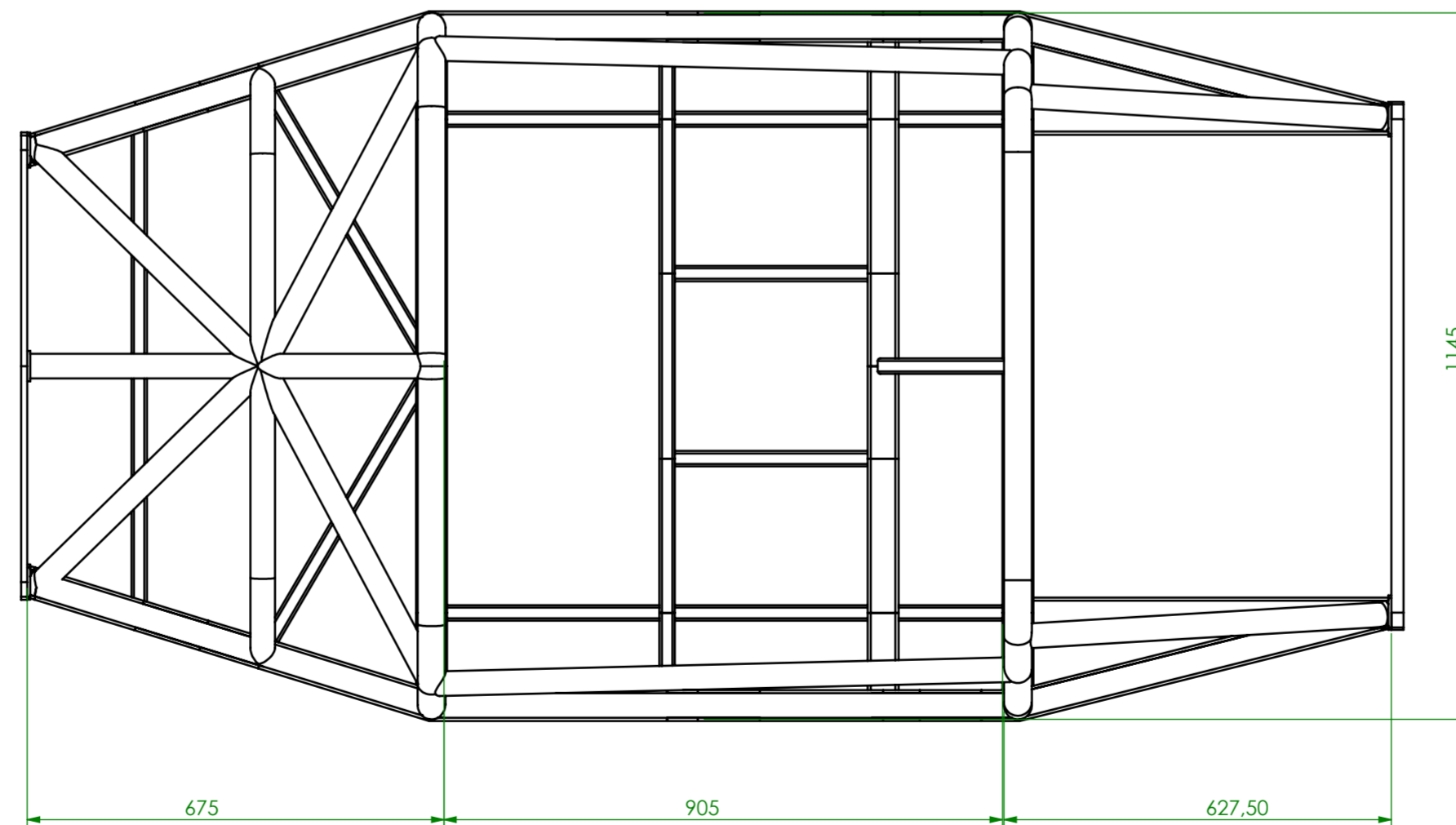
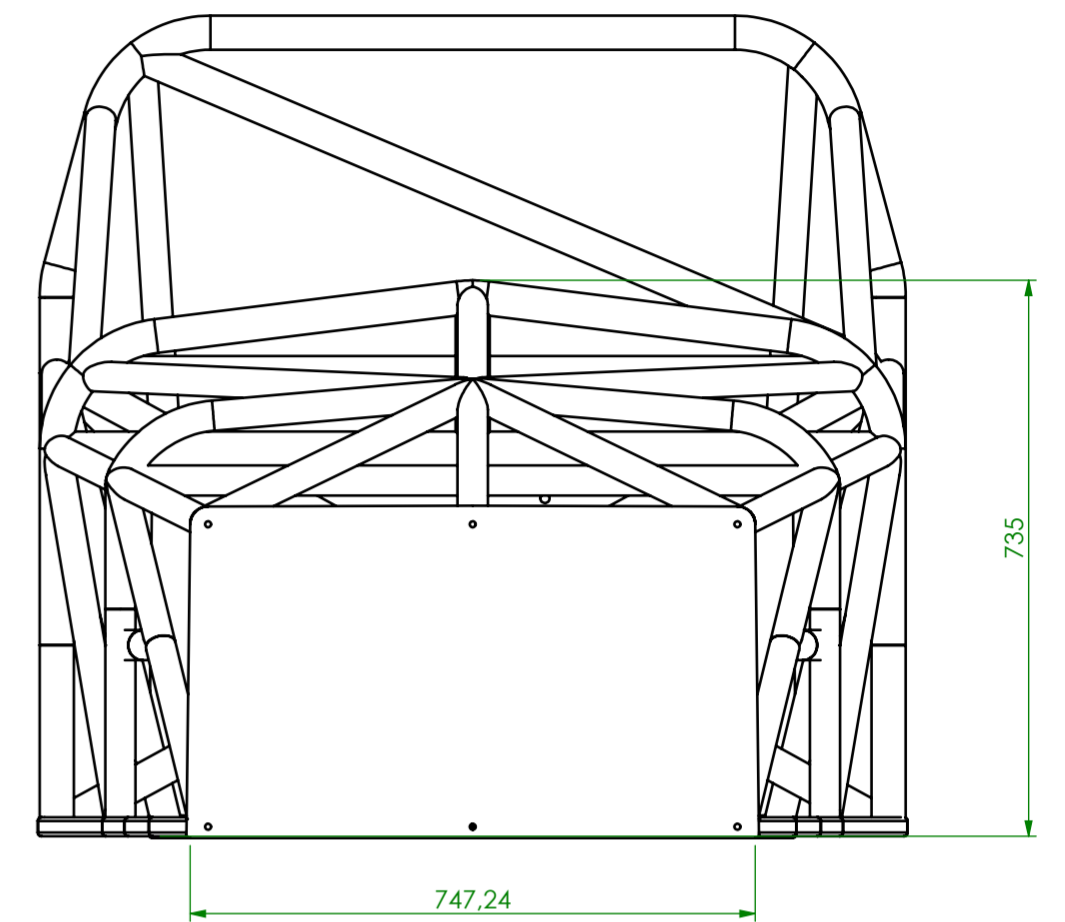
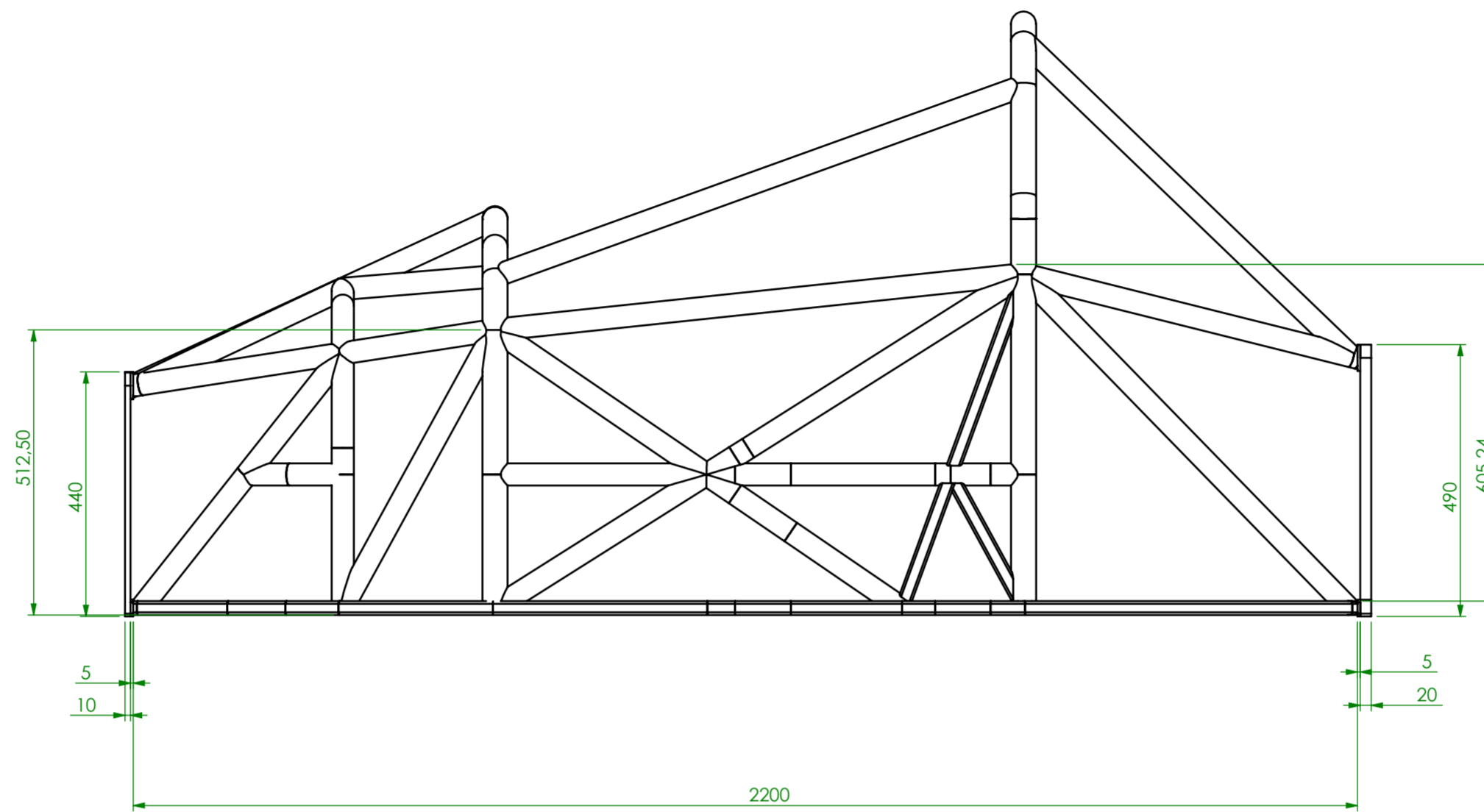
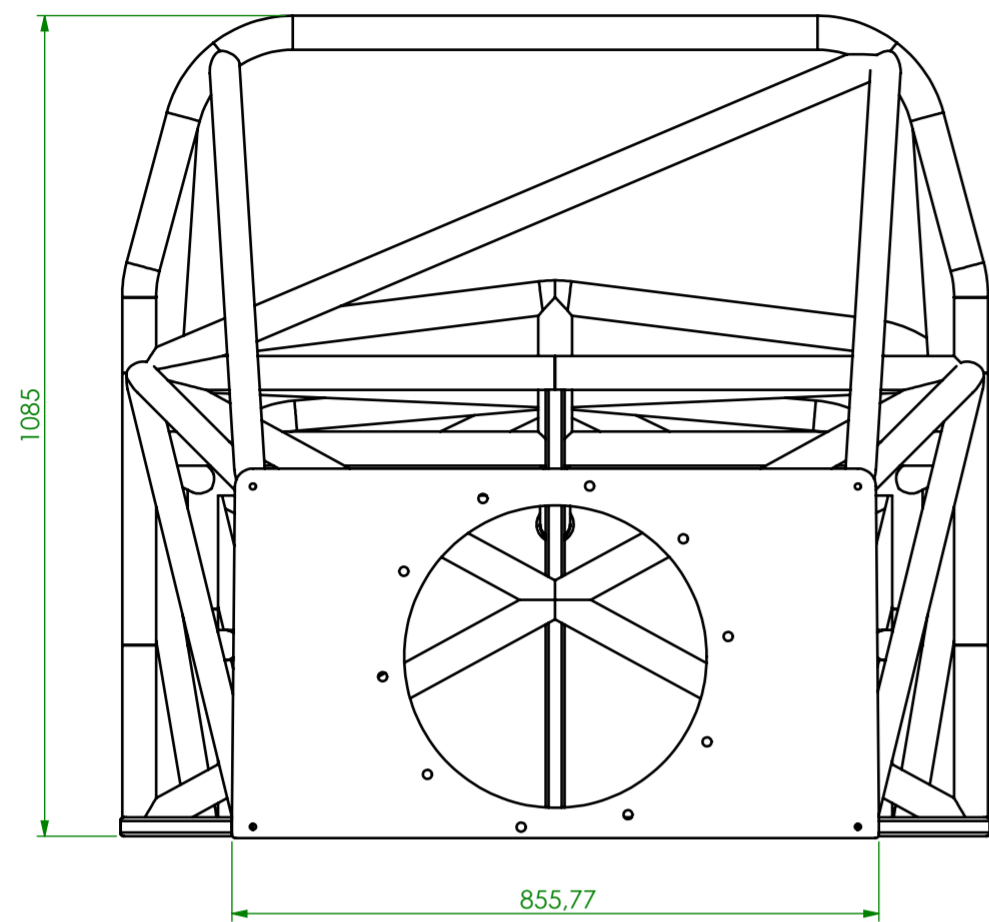
- [1] FIA SPORT - Technical Department, "Appendix J 2022 - Article 259 - Technical Regulations for Production Sports Cars (Group CN) - WMSC 15.12.2021," Dec. 2021.
- [2] FPAK, "ANEXO J DO CÓDIGO DESPORTIVO INTERNACIONAL," Jan. 2020.
- [3] M. Costin and D. Phipps, *Racing and Sports Car Chassis Design*, Second. B. T. Batsford LTD, 1965.
- [4] L. Terry and A. Baker, *Racing Car Design and Development*. Motor Racing Publications Ltd, 1980.
- [5] B. Heibing, *Chassis Handbook*, 1st ed. KLEMENTZ, 2011.
- [6] A. Staniforth, *COMPETITION CAR SUSPENSION*, Third. Haynes Publishing, 1999.
- [7] M. William F. and M. Douglas L., *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International, 1994.
- [8] C. Campbell, *Design of Racing Sports Cars*. Robert Bentley, 1973.
- [9] C. Campbell, *The Sports Car*, Fourth. Springer US, 1978. doi: 10.1007/978-1-4613-3384-5.
- [10] B. Gironnet, *Construire une voiture de course: suspension, châssis*, Segunda. 1979.
- [11] Herb. Adams, *Chassis engineering*. HP Books, 1993.
- [12] A. Luiz Dias, "Detalhes mecânicos de Chassi e Carroceria não unidos." Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://carrosinfoco.com.br/2018/07/detalhes-mecanicos-de-chassi-e-carroceria-nao-unidos/>
- [13] A. L. Colvin and Lilly Jeff, "C3 Corvette Chassis - Anatomy Of A C3 Corvette." Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.motortrend.com/how-to/corp-1006-c3-corvette-chassis>
- [14] Iveco Brasil, "VOCÊ SABE A DIFERENÇA ENTRE CHASSI E MONOBLOCO?" Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.blogiveco.com.br/voce-sabe-diferenca-entre-chassi-e-monobloco/>
- [15] C. S. Martinez, D. G. P. Ramos, E. O. Santamaria, and V. D. Lopez, "CFRP MONOCOQUE STRUCTURE FOR FORMULA STUDENT CAR," *Dyna (Medellin)*, vol. 95, no. 1, 2020, doi: 10.6036/8949.
- [16] C. Tupy, "McLaren mostra monocoque do novo Sports Series Leia mais em: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/mclaren-mostra-monocoque-do-novo-sports-series/>." Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/mclaren-mostra-monocoque-do-novo-sports-series/>
- [17] M. Policarpo, "Novo Ariel Atom 4 com motor do Civic Type R atinge os 320cv." Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.turbo.pt/novo-ariel-atom-4-motor-do-civic-type-r-atinge-os-320cv/>
- [18] Federation International de L'Automobile, *FIA Appendix J - Article 251_Classification and Definitions_2023*.
- [19] P. Kumar, V. Muralidharan, and G. Madhusudhana, "DESIGN AND ANALYSIS OF A TUBULAR SPACE FRAME CHASSIS OF A HIGH PERFORMANCE RACE CAR," *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 2321–7308, 2014, [Online]. Available: <http://www.ijret.org>
- [20] A. Eakambaram, P. Baskara Sethupathi, M. A. Saibalaji, and A. Baskar, "Experimental analysis and Validation of torsional stiffness of a Tubular space frame chassis," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 7719–7727, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.238.
- [21] A. F. A. Rodrigues, L. C. Gertz, A. Cervieri, A. L. R. Poncio, A. B. Oliveira, and M. S. Pereira, "Static and Dynamic Analysis of a Chassis of a Prototype Car," in *24th SAE Brasil International Congress and Display*, SAE International, Sep. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-36-0353>.

- [22] L. L. Thompson, S. Raju, and E. H. Law, "Design of a Winston Cup Chassis for Torsional Stiffness," *SAE Transactions*, vol. 107, pp. 2571–2584, 1998, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/44741220>
- [23] K. Kumar Dubey, B. Pathak, B. Kumar Singh, P. Rathore, and S. Raghav Singh Yadav, "Mechanical strength study of Off-Road vehicle chassis body materials," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 6682–6687, May 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.147.
- [24] NMartinez, "JUNO CN09 FACTORY CAR (UPGRADED WITH 2010 BODY AERODYNAMICS)." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://mercadoracing.com/juno-cn09-factory-car-upgraded-with-2010-body-aerodynamics-ad-533861>
- [25] Norma Benelux, "Nova Proto NP03." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://normabenelux.be/sales-%25252526-technical/nova-proto-np03.html>
- [26] Osella Engineering, "Osella-Models." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.osella.it/wrp/en/osella-modelli/>
- [27] Osella Engineering, "2000 Honda PA 21S Evo CN Osella." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.osella.it/wrp/en/portfolio-items/osella-pa-21s-evo-cn-2000-honda/>
- [28] Wolf Racing Cars, "Wolf GB08 Tornado." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://wolfracingcars.com/modelli/tornado/?lang=en>
- [29] Sadev Racing Transmission, "SLR82-14 TRANSAXLE." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.sadev-tm.com/en/products/2-wd-products/2-wheel-drive-transaxle/33-slr82-14-transaxle.html>
- [30] Sadev Racing Transmissions, "SL82LW TRANSAXLE." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.sadev-tm.com/en/products/2-wd-products/2-wheel-drive-transaxle/32-sl82lw-transaxle.html>
- [31] Sadev Racing Transmission, "SL75LW TRANSAXLE." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.sadev-tm.com/en/products/2-wd-products/2-wheel-drive-transaxle/31-sl75lw-transaxle.html>
- [32] Hewland, "Single Seater Transmissions." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.hewland.com/what-we-do/racing-gearboxes/single-seater/>
- [33] XTrac Transmission Technology, "P1152 LONGITUDINAL SINGLE SEATER TRANSAXLE." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.xtrac.com/product/p1152-longitudinal-single-seater-transaxle/>
- [34] Mercedes AMG Petronas Formula 1 Team, "The Suspension of a Formula One Car." Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.mercedesamgf1.com/news/the-suspension-of-a-formula-one-car>
- [35] H. Heisler, "10 - Suspension," in *Advanced Vehicle Technology (Second Edition)*, Second Edition., H. Heisler, Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002, pp. 368–449. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-075065131-8/50011-7>.
- [36] Summit Racing Equipment, "What is camber?" Accessed: Mar. 14, 2023. [Online]. Available: https://help.summitracing.com/app/answers/detail/a_id/5256/related/1/session/L2F2LzEvdGltZS8xNjc3NzU4MjE1L2dlbi8xNjc3NzU4MjE1L3NpZC9mVVRUNm90c1p6c2JyZlozZGpIN2hLVlU3Smc1Sk1FT28wQ3U1bktMS3hTYINQS3lFYWZlell1aVBERXZpV1VvSFZwJTdFU2NWVWJoUnZDMzF4d1BJY2tqZXZSdUZsc0w3NEI3cjVXVEE1ZVVxQTRSaXIsT2JMX05TQSUYMSUYMQ==
- [37] A. Chong, "A Beginner's Guide: Setting Up Your Car's Alignment - Toe, Camber, & Caster." Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.motorist.sg/article/698/a-beginner-s-guide-setting-up-your-car-s-alignment-toe-camber-caster>
- [38] Summit Racing Equipment, "What is caster?" Accessed: Mar. 14, 2023. [Online]. Available: https://help.summitracing.com/app/answers/detail/a_id/5255/related/1/session/L2F2LzEvdGltZS8xNjc3NzU4MjE1L2dlbi8xNjc3NzU4MjE1L3NpZC9mVVRUNm90c1p6c2JyZlozZGpIN2hLVlU3Smc1Sk1FT28wQ3U1bktMS3hTYINQS3lFYWZlell1aVBERXZpV1VvSFZwJTdFU2NW

- WVJoUnZDMzF4d1BJY2tqZXZsdUZsc0w3NEI3cjVXVEE1ZVVxQTRSaXIsT2JMX05TQSUyMSUyMQ==
- [39] G. Xu, W. He, F. Chen, H. Shen, and X. Li, "One-dimension orientation method of caster and kingpin inclination of vehicle wheel alignment," *Measurement (Lond)*, vol. 198, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.111371.
- [40] R. N. Jazar, A. Subic, and N. Zhang, "Kinematics of a smart variable caster mechanism for a vehicle steerable wheel," *Vehicle System Dynamics*, vol. 50, no. 12, pp. 1861–1875, Dec. 2012, doi: 10.1080/00423114.2012.699075.
- [41] H. Heisler, "10 - Suspension," in *Advanced Vehicle Technology (Second Edition)*, Second Edition., H. Heisler, Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002, pp. 368–449. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-075065131-8/50011-7>.
- [42] Vivek Shingada, "King Pin Inclination Explained: What Is It & Why Does It Matter?" Accessed: Mar. 14, 2023. [Online]. Available: <https://low-offset.com/workshop/king-pin-inclination/>
- [43] Summit Racing Equipment, "What is toe?" Accessed: Mar. 14, 2023. [Online]. Available: https://help.summitracing.com/app/answers/detail/a_id/5257/~/what-is-toe%3F
- [44] S. Zheng, J. Cao, and J. Feng, "Simulation analysis of traditional and L type Macpherson suspension based on ADAMS/Car," in *ADVANCED MECHANICAL DESIGN, PTS 1-3*, W. Z. Chen, P. Dai, Y. L. Chen, Q. T. Wang, and Z. Jiang, Eds., in *Advanced Materials Research*, vol. 479–481. 2012, pp. 1515–1521. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.479-481.1515.
- [45] W. Yuefang and W. Zhenhua, "Performance Kinematics Simulation of Macpherson Suspension Based on ADAMS," in *ISTM/2009: 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TEST AND MEASUREMENT, VOLS 1-6*, T. D. Wen, Ed., 2009, pp. 1176–1178.
- [46] J. Manuel Costa, "Accademia di Guida Alfa Romeo: os segredos da 'nova' Alfa Romeo (Parte 2)." Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://automais.autosport.pt/noticias/accademia-di-guida-alfa-romeo-os-segredos-da-nova-alfa-romeo-parte-2/>
- [47] E. Tanik and V. Parlaktaş, "On the analysis of double wishbone suspension," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, vol. 9, no. 3, Jun. 2015, doi: 10.1299/jamdsm.2015jamdsm0037.
- [48] J. W. Wirawan, Ubaidillah, R. Aditra, R. Alnursyah, R. A. Rahman, and S. I. Cahyono, "Design analysis of formula student race car suspension system," *AIP Conf Proc*, vol. 1931, Feb. 2018, doi: 10.1063/1.5024110.
- [49] F. O. Mahroogi and S. Narayan, "Design and analysis of Double Wishbone suspension systems for automotive applications," Nov. 2019, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/333483744>
- [50] D. Seward, *Race Car Design Derek Seward*, 1st ed. 2014.
- [51] P. Miguel *et al.*, "Estudo comparativo de dois tipos de sistemas de suspensão de um carro Fórmula Student," INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, Lisboa, 2019.
- [52] RaceCarsDirect.com, "Juno TR300 Sports Prototype 2.0 SBD." Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://racecarsdirect.com/Advert/Details/110566/juno-tr300-sports-prototype-20-sbd-300-bhp>
- [53] Phil Wellner, "The Formula Ford File." Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: <https://openwheelracing.wordpress.com>
- [54] CMS Racing Cars, "Osella Pa2000 Honda Mugen E2SC." Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: https://www.mikadoracing.com/index.php?action=DETAILLER&id_annonce=1851135
- [55] W. Renpu, "Carbon Steel Pipe Oil and Gas Well Corrosion and Corrosion Prevention Bimetallic Combination Tubing," 2007.
- [56] D. G. Rethwisch and W. D. Callister Jr, *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. Wiley John & Sons, 2007.

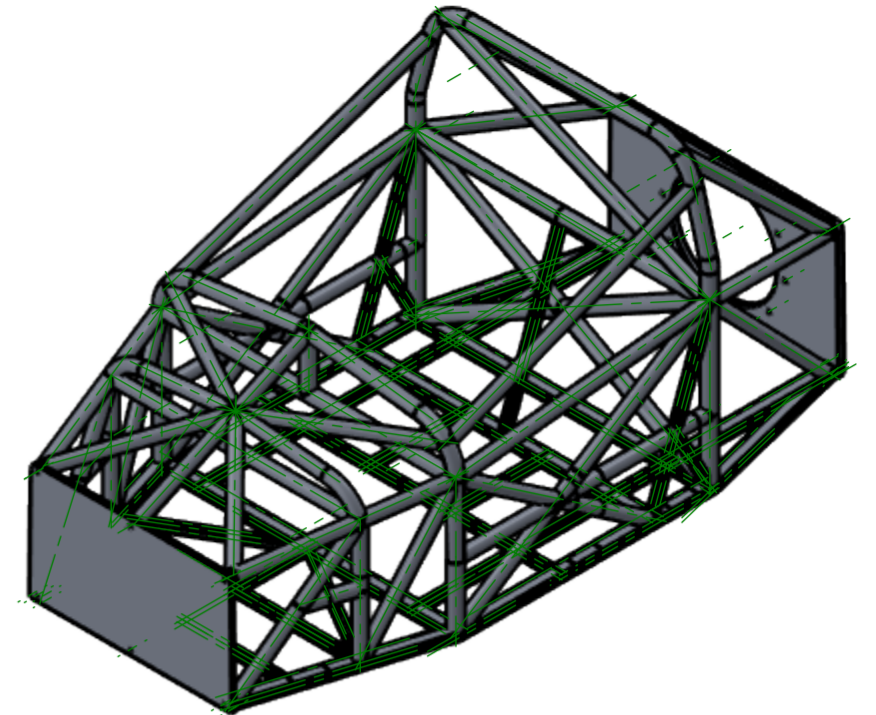
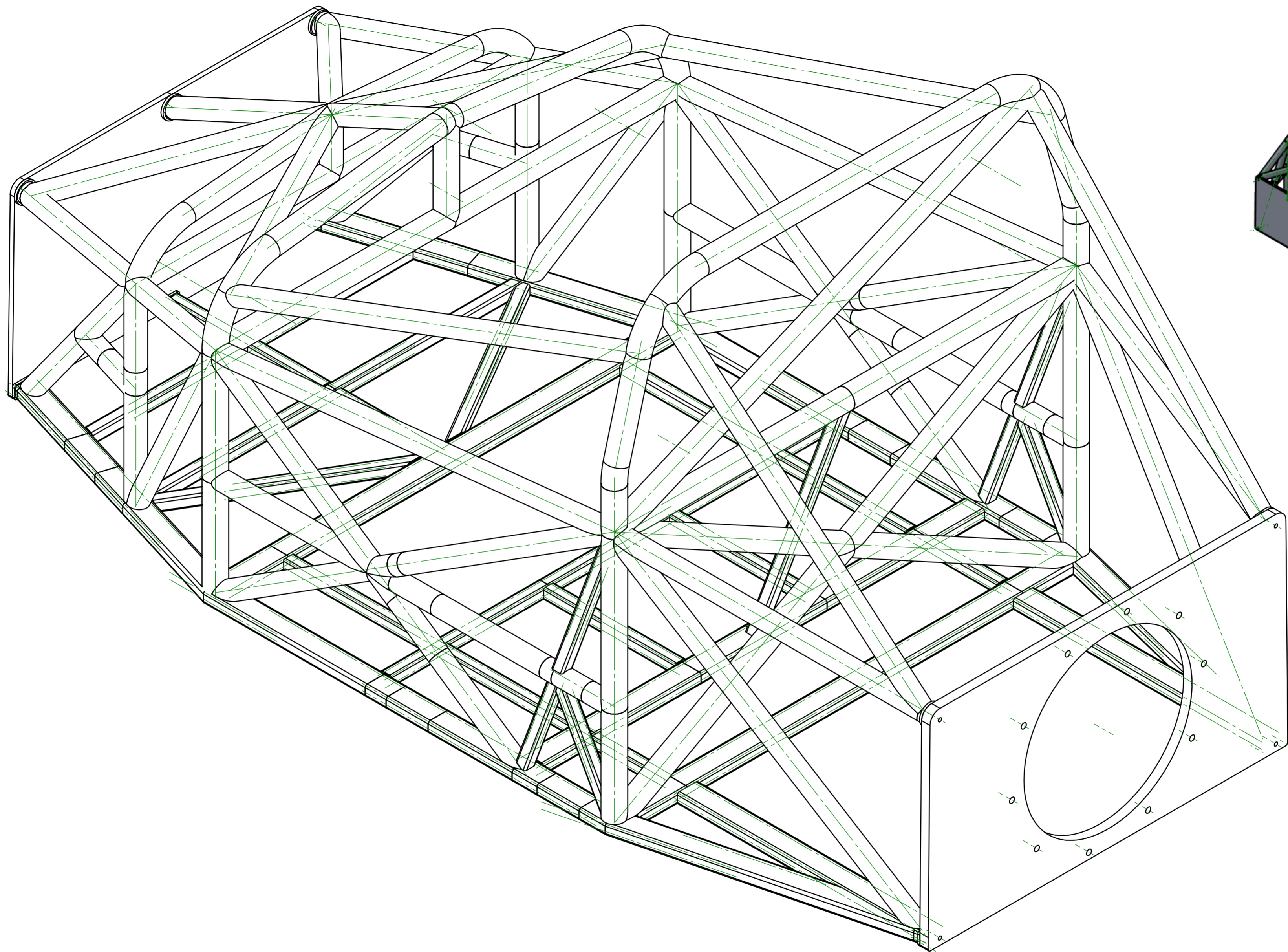
- [57] Matmatch GmbH, "Carbon Steel: Properties, Production, Examples and Applications." Accessed: Dec. 23, 2022. [Online]. Available: <https://matmatch.com/learn/material/carbon-steel>
- [58] Dr. D. Breslavsky, "Worldwide equivalents of grade 25CD4." Accessed: Dec. 23, 2022. [Online]. Available: http://www.steelnumber.com/en/equivalent_steel_iron_eu.php?zname_id=2494
- [59] AircraftMaterialsUK.com Ltd, "Alloy 25CrMo4 Tube." Accessed: Dec. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.aircraftmaterials.com/data/alstst/25crm04.html>
- [60] Pro Formance Metals, "25CRMO4." Accessed: Dec. 23, 2022. [Online]. Available: <https://proformancemetals.co.uk/25crmo4/>
- [61] POLY LANENA, "Serie 7000 AW7075 - Ficha Técnica".
- [62] Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, *Método de Elementos Finitos: Ferramentas para Análise Estrutural*. 2012.
- [63] Á. F. M. Azevedo, *MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS*, 1st ed. Porto: FEUP, 2003. [Online]. Available: <http://www.fe.up.pt/~alvaro>
- [64] U. College of Engineering, "Finite Element Method."
- [65] M. C. Pereira, "PROJETO DO QUADRO/CHASSI PARA UM VEÍCULO AUTOMÓVEL," Porto, Jun. 2020.
- [66] J. Happian-Smith, *An Introduction to Modern Vehicle Design*, First. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2002. [Online]. Available: www.Civildatas.com
- [67] Bernard Gironnet, *Construire une voiture de course suspension-châssis*, Deuxième Édition. Paris, 1979.
- [68] FIA Sport - Technical Department, "Free Formula Technical Regulations (Group E)," 2022.
- [69] FIA Sport - Technical Department, "Article 258A (2001) - Technical Regulations for Sports Racing Cars," Oct. 2001.
- [70] FIA Sport - Technical Department, "Article 258A (2011) - Technical Regulations for Sports Cars," Jun. 2011.

ANEXO A



ESCALA
1:10

| | | | |
|--|---|---|------------------------------|
| Pessoa responsável Miguel Costa Pereira | Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt | Tipo de documento Desenho de Fabrico | Estado do documento |
| Proprietário legal | | Título Dimensões do Quadro | Número 1170692 |
| DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto | | Revisão | Data de edição 13/09/2023 |
| | | Língua PT | Folha 1/1 |



ESCALA
1:5

| | | | |
|--|--|--|---|
| Pessoa responsável Miguel Costa Pereira Proprietário legal | Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt | Tipo de documento Desenho de conjunto | Estado do documento Número 1170692 |
| DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto | | Título Vista Isométrica do Quadro | Revisão Data de edição 13/09/2023 Língua PT Folha 1/1 |