

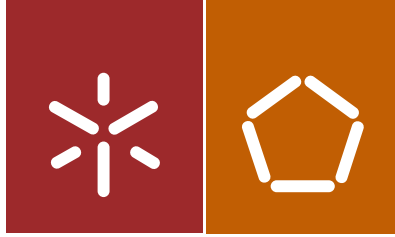


Pedro Azevedo Marques

Otimização das características de um
chassi tubular de automóvel de competição
com tração integral

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Azevedo Marques

Otimização das características de um
chassi tubular de automóvel de competição
com tração integral

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles

Outubro de 2014

Nome: Pedro Azevedo Marques

Correio eletrónico: a52775@alunos.uminho.pt Tlm: 917456633

Número do Bilhete de Identidade: 13539384

Título da Dissertação:

Otimização das características de um chassi tubular de automóvel de competição com tração integral

Ano de conclusão: 2014

Orientador: Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles

Designação do Mestrado: Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia

Área de Especialização: Conceção de Estruturas

Escola: Escola de Engenharia

Departamento: Departamento de Engenharia Mecânica

1. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.
2. De acordo com a legislação em vigor, não é permitida a reprodução de qualquer parte desta dissertação

Guimarães, 31/10/2014

Assinatura: _____

*"Sabemos muito mais do que julgamos,
podemos muito mais do que imaginamos."*

José Saramago

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor José Meireles, pela experiência e conhecimentos que me foi transmitindo enquanto orientava os trabalhos realizados, prolongo o agradecimento ao Sr. Fernando Santos da empresa *DEpieres Desportos Motorizados Lda*, pela oportunidade de trabalhar neste projeto e por todos os conhecimentos partilhados.

Do mesmo modo, agradeço ao meu colega Ricardo Botelho, que sempre demonstrou sempre um espírito de entreajuda e companheirismo no decorrer deste trabalho.

Ao Sr. Araújo, técnico do Laboratório de Ensaio de Materiais, um agradecimento pela sua constante disponibilidade e pelos conhecimentos que partilhou no decorrer dos ensaios realizados.

Aos meus pais, Henrique e Amélia e aos meus irmãos Miguel e Filipe, tenho que agradecer a oportunidade e paciência demonstrada durante todo o meu processo de aprendizagem, tanto a nível académico como a nível pessoal, por todos os valores que me foram transmitindo e inculcando, pois serão muito importantes para o restante caminho que tenho a percorrer.

Um último obrigado a todos os meus amigos, que direta ou indiretamente me ajudaram a ultrapassar todas as dificuldades desta caminhada, demonstrando sempre o seu apoio, disponibilidade para ajudar e por todos os bons momentos que partilhamos.

Resumo

Qualquer tipo de desporto pauta-se pela competitividade entre os seus intervenientes, tendo como objetivo a vitória. E o desporto automóvel não é diferente. Sendo que os componentes estruturais, e em particular o chassi, têm um papel preponderante para alcançar a vitória. Ao longo do tempo as evoluções permitiram melhorias nas características do veículo, alcançando-se desta forma elevados níveis de performance e competitividade no que diz respeito ao peso, aerodinâmica, estética e ergonomia sem aumentar significativamente os custos de produção e de manutenção.

Este trabalho foi elaborado com o fim de obter melhorias no chassi produzido para servir de base aos veículos de 4 rodas motrizes inseridos na categoria T1 do Campeonato Nacional de Todo-Terreno sob a égide da Federação Portuguesa de Automobilismo e Karting.

Neste trabalho apresenta-se o estudo para caracterizar o material utilizado na conceção do chassi, das suas propriedades químicas e das suas propriedades mecânicas.

Posteriormente os dados provenientes dos ensaios mecânicos foram utilizados na realização de todas as simulações numéricas. Estas serviram para determinar o comportamento do chassi inicial e dessa forma identificar os locais onde se poderia proceder a melhorias. De seguida procedeu-se à otimização da estrutura de forma empírica. Realizou-se uma análise de sensibilidade às variáveis que seriam consideradas no updating.

Com a aplicação dos métodos de otimização, conseguiu-se aumentar a rigidez torsional do chassi em 11%, diminuiu-se a flexão em 21% sendo que o peso aumentou 7%.

Palavras-chave: Chassi, Elementos finitos, Ansys, Simulações Numéricas, Otimização

Abstract

Any kind of sport is ruled through competition among its participants, aiming to win. And motorsport is not different. The structural components, particularly the chassis, have a key role to achieve victory. Over time, technical developments have allowed improvements in the characteristics of the vehicle reaching higher levels of performance and competition with regard to weight, aerodynamics, esthetics and ergonomics without significantly increasing costs of production and maintenance.

The work here presented introduces improvements in the chassis of a 4-wheel drive vehicles to compete in the category T1 Cross Country National Championship under the aegis of the Portuguese Federation of Automobile and Karting.

A study is performance to characterize the material used in the design of the chassis, its chemical properties and its mechanical properties.

Data obtained in mechanical tests was used to perform numerical simulations. Which determined the behavior of the original chassis and thus identify the locations where improvements could be made. And then proceeded to the optimization of the structure empirically. We performed a sensitivity analysis of the variables that would be considered in updating.

Using optimization methods in the chassis was achieved increase the torsional stiffness by 11%, the bending decreased by 21%, and the weight increased by 7%.

Keywords: frame, finite element, Ansys, Numerical Simulations, optimization

Símbolos

Símbolos	Definição	Unidade
σ	Tensão	[Pa]
F	Força	[N]
A_0	Área Inicial	[mm ²]
ε	Deformação	-
σ_{ced}	Tensão de cedência	[Pa]
σ_{rot}	Tensão de rotura	[Pa]
l_0	Comprimento inicial	[mm]
l	Comprimento	[mm]
Δl	Variação do comprimento	[mm]
S	Área da secção do provete	[mm ²]
E	Módulo de Young	[Pa]
ν	Coefficiente de Poisson	-
ε_{yy}	Deformação axial no eixo y	-
ε_{xx}	Deformação axial no eixo x	-
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima	[Pa]
$\sigma_{mín}$	Tensão mínima	[Pa]
σ_{med}	Tensão média	[Pa]
HV	Índice de dureza	-
P	Carga	[N]
F	Frequência	[Hz]
m	Massa	[kg]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]

Lista de abreviaturas e siglas

FIA – Federação Internacional do Automóvel

FPAK – Federação Portuguesa de Automobilismo e Karting

CPTT – Campeonato Português de Todo-Terreno

CAD – Computer Aided Design/Desenho Assistido por computador

CAE – Computer Aided Engineering/Engenharia Assistida por computador

FE – Finite Element/ Elementos Finitos

FEA – Finite Element Analysis/Análise de Elementos Finitos

FEM – Finite Element Method/Método dos Elementos Finitos

SolidWorks – Software CAD

Ansys – Software CAE

Matlab – Software de cálculo numérico

Notação

m – metro

mm – milímetros

mm² – milímetro quadrado

cv – cavalo-vapor

N – Newton

kN – Quilo Newton

Kg – Quilograma

N/m – Newton metro

Pa – Pascal

MPa – Mega Pascal

Rad – radianos

Hz – Hertz

Terminologia

Etapa: Cada uma das partes da Prova, separadas por uma paragem mínima de 3 horas e de que resulte uma nova ordem de partida;

Sector de Ligação: Parte do itinerário compreendido entre a Partida de uma Etapa ou Secção e um Controle Horário ou entre a chegada de Sector Seletivo e um Controle Horário ou entre 2 Controlos Horários sucessivos, com tempo pré-determinado e onde a média de velocidade estabelecida, não poderá ser superior a 30 Km/h se o percurso incluir passagens dentro de povoações;

Secção: Conjunto de Sectores de Ligação:

- Entre a Partida e o primeiro Reagrupamento
- Entre dois Reagrupamentos sucessivos
- Entre o último reagrupamento e a Chegada de uma Etapa ou da Prova

Prólogo: Prova de Velocidade em estrada fechada à circulação normal;

Sector Seletivo: Prova de Velocidade disputada em tempo real;

Rodas Motrizes: São as rodas, às quais o sistema de transmissão transmite o movimento gerado pelo motor;

Roll Bar: Sistema de segurança, criado para proteger os ocupantes dos veículos de competição;

Chassi: Estrutura de suporte para todos os elementos mecânicos;

Carroçaria: é a estrutura que envolve o chassi, definindo a forma do veículo;

Rigidez torsional: É a resistência que o chassis oferece a cargas torsionais, existe uma relação entre o peso e a rigidez torsional.

Triangulação: Utiliza-se para aumentar a rigidez torsional de uma estrutura. Uma estrutura triangulada sendo solicitada em qualquer extremidade não se distorce, pois as cargas aplicadas são cargas de extremidades que são decompostas em cargas de tração ou compressão, não havendo cargas de flexão.

Índice

Agradecimentos.....	V
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Símbolos.....	xi
Lista de abreviaturas e siglas.....	xiii
Notação.....	xiii
Terminologia.....	xv
Índice.....	xvii
Índice de Figuras.....	xxi
Índice de Tabelas.....	xxvii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	2
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização.....	3
2. Estado da Arte.....	5
2.1. Chassi.....	5
2.1.1. Introdução Histórica.....	5
2.1.2. Tipo de Chassis.....	7
2.1.3. Chassi na competição automóvel.....	11
2.1.4. Principais características.....	13
2.2. Regulamentação.....	14
2.2.1. Enquadramento.....	14
2.2.2. Regulamento.....	16
2.3. Veículos Existentes.....	33

2.3.1.	Mitsubishi Racing Lancer (MRX09).....	33
2.3.2.	VW Race Touareg	34
2.3.3.	X-RAID MINI ALL 4TERRAIN	36
2.3.4.	Toyota Hillux	37
3.	Fundamentos Teóricos	41
3.1	Ensaio de tração	41
3.1.1.	Curva tensão deformação engenharia	42
3.1.2.	Curva tensão deformação verdadeira	42
3.1.3.	Módulo de Young.....	43
3.1.4.	Tensão de Cedência	43
3.1.5.	Tensão de Rotura	44
3.1.6.	Coeficiente de Poisson.....	45
3.2.	Ensaio Dinâmico.....	45
3.2.1.	Ciclos de tensão	46
3.2.2.	Curva tensão – número de ciclos para a rotura	46
3.3.	Ensaio de Dureza.....	46
3.3.1.	Ensaio Vickers	47
3.4.	Análise Modal	48
3.4.1.	Teoria das vibrações.....	49
3.5.	Otimização	50
3.6.	Método dos elementos finitos	52
3.6.1.	Ansys	55
3.6.2.	Matlab.....	58
3.6.3.	Updating	59
4.	Aplicação a um caso prático.....	63
4.1.	Ensaio Experimentais	63

4.1.1.	Descrição dos equipamentos	63
4.1.2.	Análise química	65
4.1.3.	Ensaio de Tração.....	65
4.1.4.	Ensaio dinâmico (Fadiga).....	68
4.2.	Conceção	69
4.2.1.	Modelação	69
4.2.2.	Simulação	71
4.3.	Otimização	79
4.3.1.	Aproximação empírica	79
4.3.2.	Análise de sensibilidade.....	96
4.3.3.	Updating	115
5.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	127
5.1.	Conclusões	127
5.2.	Sugestão para trabalhos futuros.....	128
6.	Bibliografia.....	131
	Anexos	135
A.	Anexo A – Ensaio Experimentais	137
B.	Anexo B – Algoritmo de execução em apdl para simulação do chassi D06	151
C.	Anexo C – Criação do modelo numérico para execução no updating	173
D.	Anexo D – Simulações.....	199

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2-1 - Hupmobile 1911[2]	5
Figura 2-2 - Chassi Auburn [5]	6
Figura 2-3 - Chassi Superleggera [8]	7
Figura 2-4 - Chassi e carroçaria do Chevrolet Corvette [12]	7
Figura 2-5 - Chassi utilizado num Land Rover Serie 2 de 1959 [14].....	8
Figura 2-6 - Chassi em X utilizado no Lotus Elan [16]	8
Figura 2-7 - Chassi monocoque em aço [19]	9
Figura 2-8 - Chassi monocoque D-Drive Sports F103 [20]	9
Figura 2-9 - Chassi tubular utilizado no Lamborghini Countach LP 400 [22]	10
Figura 2-10 - Mercedes 300 SL [23]	10
Figura 2-11 - Chassi Lotus Elan [25]	12
Figura 2-12 - Esquema de montagem dos cintos de segurança	19
Figura 2-13 - Colocação das cintas de ombro.....	20
Figura 2-14 - Desenho 253-1, 253-2, 253-3	20
Figura 2-15 - Desenho 253-4, 253-5, 253-6, 253-7	21
Figura 2-16 - Desenho 253-8, 253-9	22
Figura 2-17 - Desenho 253-29	23
Figura 2-18 - Desenho 253-12, 253-13, 253-14.....	23
Figura 2-19 - Desenho 253-15	24
Figura 2-20 - Desenho 253-34	24
Figura 2-21 - Elementos opcionais	26
Figura 2-22 - Configurações mínimas de roll bar	27
Figura 2-23 - Juntas desmontáveis.....	28
Figura 2-24 - Desenhos 253-50; 253-51; 253-52; 253-53; 253-54; 253-55.....	30
Figura 2-25 - Desenho 253-65	32

Figura 2-26 - Mitsubishi Racing Lancer [28]	33
Figura 2-27 - Volkswagen Race Touareg 3 [31].....	34
Figura 2-28 - Mini All4 Dakar X-Raid [34].....	36
Figura 2-29 - Toyota Hilux [37].....	38
Figura 3-1 - Ponto superior e inferior da tensão de cedência	44
Figura 3-2 - Criação do pescoço durante um ensaio de tração	44
Figura 3-3 - Indentação gerada pela matriz.....	48
Figura 3-4 - Sistema vibratório	50
Figura 4-1 - Máquina de ensaios universais do LEM	64
Figura 4-2 - Desenho do provete	65
Figura 4-3 - Colocação dos extensómetros	66
Figura 4-4 - Provete após o ensaio de tração	66
Figura 4-5 - Provete para realizar o ensaio de fadiga.....	68
Figura 4-6 - Colocação do provete	68
Figura 4-7 - Chassi D06 desenhado em linhas	70
Figura 4-8 - Chassi D06 modelado	71
Figura 4-9 - Chassi D06 - momento no eixo x.....	74
Figura 4-10 - Chassi D06 - rotação em x.....	75
Figura 4-11 - Chassi D06 - deslocamento em x.....	75
Figura 4-12 - Chassi D06 - deslocamento em y.....	76
Figura 4-13 - Chassi D06 - tensão de Von Mises	76
Figura 4-14 - Chassi D06 - modo 1	78
Figura 4-15 - Chassi D06 - modo 2.....	78
Figura 4-16 - Alternativa 1 - alterações efetuadas	79
Figura 4-17 - Alternativa 1 - momento em x.....	80
Figura 4-18 - Alternativa 1 - rotação em x.....	81
Figura 4-19 - Alternativa 1 - deslocamento em x.....	81
Figura 4-20 - Alternativa 1 - deslocamento em y.....	82
Figura 4-21 - Alternativa 1 - tensão de Von Mises	82

Figura 4-22 - Alternativa 1 - modo 1.....	83
Figura 4-23 - Alternativa 1 - modo 2.....	84
Figura 4-24 - Alternativa 2 - alterações efetuadas	85
Figura 4-25 - Alternativa 2 - momento em x.....	86
Figura 4-26 - Alternativa 2 - rotação em x.....	86
Figura 4-27 - Alternativa 2 - deslocamento em x.....	87
Figura 4-28 - Alternativa 2 - deslocamento em y.....	87
Figura 4-29 - Alternativa 2 - tensão de Von Mises	88
Figura 4-30 - Alternativa 2 - modo 1.....	89
Figura 4-31 - Alternativa 2 - modo 2.....	89
Figura 4-32 - Alternativa 3 - alterações efetuadas	90
Figura 4-33 - Alternativa 3 - momento em x.....	91
Figura 4-34 - Alternativa 3 - rotação em x.....	92
Figura 4-35 - Alternativa 3 - deslocamento em x.....	92
Figura 4-36 - Alternativa 3 - deslocamento em y.....	93
Figura 4-37 - Alternativa 3 - tensão de Von Mises	93
Figura 4-38 - Alternativa 3 - modo 1.....	94
Figura 4-39 - Alternativa 3 - modo 2.....	95
Figura 4-40 - Alternativa 4 - alterações efetuadas	97
Figura 4-41 - Alternativa 4 - momento em x.....	98
Figura 4-42 - Alternativa 4 - rotação em x.....	98
Figura 4-43 - Alternativa 4 - deslocamento em x.....	99
Figura 4-44 - Alternativa 4 - deslocamento em y.....	99
Figura 4-45 - Alternativa 4 - tensão de Von Mises	100
Figura 4-46 - Alternativa 4 - modo 1.....	101
Figura 4-47 - Alternativa 4 - modo 2.....	101
Figura 4-48 - Alternativa 5 - alterações efetuadas	102
Figura 4-49 - Alternativa 5 - momento em x.....	103
Figura 4-50 - Alternativa 5 - rotação em x.....	104

Figura 4-51 - Alternativa 5 - deslocamento em x.....	104
Figura 4-52 - Alternativa 5 - deslocamento em y.....	105
Figura 4-53 - Alternativa 5 - tensão de Von Mises.....	105
Figura 4-54 - Alternativa 5 - modo 1.....	106
Figura 4-55 - Alternativa 5 - modo 2.....	107
Figura 4-56 - Alternativa 6 - alterações efetuadas.....	108
Figura 4-57 - Alternativa 6 - momento em x.....	109
Figura 4-58 - Alternativa 6 - rotação em x.....	110
Figura 4-59 - Alternativa 6 - deslocamento em x.....	110
Figura 4-60 - Alternativa 6 - deslocamento em y.....	111
Figura 4-61 - Alternativa 6 - tensão de Von Mises.....	111
Figura 4-62 - Alternativa 6 - modo 1.....	112
Figura 4-63 - Alternativa 6 - modo 2.....	113
Figura 4-64 - Updating - alterações efetuadas.....	115
Figura 4-65 - Updating - momento em x.....	120
Figura 4-66 - Updating - rotação em x.....	120
Figura 4-67 - Updating - deslocamento em x.....	121
Figura 4-68 - Updating - deslocamento em y.....	121
Figura 4-69 - Updating - tensão de von Mises.....	122
Figura 4-70 - Updating - modo 1.....	123
Figura 4-71 - Updating - modo 2.....	123
Figura A-1 - Soldadura afagada.....	140
Figura A-2 - Provete com o corte longitudinal.....	141
Figura A-3 - Polimento da amostra.....	144
Figura A-4 - Marcação da matriz de escala no provete.....	145
Figura A-5 - Colocação da peça no microscópio ótico.....	145
Figura A-6 - Provete soldado com TIG.....	148
Figura D-1 - Chassi D06 - Modo 3.....	201
Figura D-2 - Chassi D06 - Modo 4.....	201

Figura D-3 - Chassi D06 - Modo 5.....	201
Figura D-4 - Alternativa 1 - modo 3	202
Figura D-5 - Alternativa 1 - modo 4	202
Figura D-6 - Alternativa 1 - modo 5	202
Figura D-7 - Alternativa 2 - modo 3	203
Figura D-8 - Alternativa 2 - modo 4	203
Figura D-9 - Alternativa 2 - modo 5	203
Figura D-10 - Alternativa 3 - modo 3	204
Figura D-11 - Alternativa 3 - modo 4	204
Figura D-12 - Alternativa 3 - modo 5	204
Figura D-13 - Alternativa 4 - modo 3	205
Figura D-14 - Alternativa 4 - modo 4	205
Figura D-15 - Alternativa 4 - modo 5	205
Figura D-16 - Alternativa 5 - modo 3	206
Figura D-17 - Alternativa 5 - modo 4	206
Figura D-18 - Alternativa 5 - modo 5	206
Figura D-19 - Alternativa 6 - modo 3	207
Figura D-20 - Alternativa 6 - modo 4	207
Figura D-21 - Alternativa 6 - modo 5	207
Figura D-22 - Updating - modo 3.....	208
Figura D-23 - Updating - modo 4.....	208
Figura D-24 - Updating - modo 5.....	208

Índice de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2-1 - Classificação do tipo de veículo.....	16
Tabela 2-2 - Especificações do tubo	31
Tabela 2-3 - Características Técnicas Mitsubishi Racing Lancer [29].....	34
Tabela 2-4 - Especificação das características técnicas do VW Race Touareg [32]	35
Tabela 2-5 - Análise do Chassi	35
Tabela 2-6 - Especificação das características técnicas do Mini All 4 Terrain [35].....	36
Tabela 2-7 - Análise do chassi.....	37
Tabela 2-8 - Especificação das características técnicas da Toyota Hillux [38]	38
Tabela 2-9 - Análise do chassi.....	38
Tabela 3-1 - Resumo das funções de otimização	59
Tabela 4-1 - Características do Extensómetro Mecânico [74]	64
Tabela 4-2 - Composição química do material	65
Tabela 4-3 - Características do material	68
Tabela 4-4 - Valores obtidos experimentalmente	69
Tabela 4-5 - Propriedades das secções utilizadas	70
Tabela 4-6 - Dimensões do chassi D06	71
Tabela 4-7 - Chassi D06 - Resumo das propriedades.....	76
Tabela 4-8 - Chassi D06 - resultados da análise modal.....	77
Tabela 4-9 - Chassi D06 - localização do centro de gravidade	79
Tabela 4-10 - Alternativa 1 - resumo das propriedades	82
Tabela 4-11 - Alternativa 1 - resultados da análise modal	83
Tabela 4-12 - Alternativa 1 - localização do centro de gravidade.....	84
Tabela 4-13 - Alternativa 2 - resumo das propriedades	88
Tabela 4-14 - Alternativa 2 - resultados da análise modal	88
Tabela 4-15 - Alternativa 2 - localização do centro de gravidade.....	90

Tabela 4-16 - Alternativa 3 - resumo das propriedades	93
Tabela 4-17 - Alternativa 3 - resultados da análise modal	94
Tabela 4-18 - Alternativa 3 - valores do centro de gravidade	95
Tabela 4-19 - Comparação dos resultados da análise estática	96
Tabela 4-20 - Comparação dos resultados da análise modal.....	96
Tabela 4-21 - Comparação dos resultados para a disposição do centro de gravidade	96
Tabela 4-22 - Alternativa 4 - resumo das propriedades	100
Tabela 4-23 - Alternativa 4 - resultados da análise modal	100
Tabela 4-24 - Alternativa 4 - localização do centro de gravidade.....	102
Tabela 4-25 - Alternativa 5 - resumo das propriedades	105
Tabela 4-26 - Alternativa 5 - resultados da análise modal	106
Tabela 4-27 - Alternativa 5 - localização do centro de gravidade.....	107
Tabela 4-28 - Alternativa 6 - resumo das propriedades	111
Tabela 4-29 - Alternativa 6 - resultados da análise modal	112
Tabela 4-30 - Alternativa 6 - localização do centro de gravidade.....	113
Tabela 4-31 - Comparação dos resultados da análise estática	114
Tabela 4-32 - Comparação dos resultados da análise modal.....	114
Tabela 4-33 - Comparação da disposição do centro de gravidade	114
Tabela 4-34 - Updating - resumo das propriedades.....	122
Tabela 4-35 - Updating - resultados da análise modal.....	123
Tabela 4-36 - Updating - localização do centro de gravidade	124
Tabela 4-37 - Comparação dos resultados da análise estática	124
Tabela 4-38 - Comparação dos resultados da análise modal.....	125
Tabela 4-39 - Comparação da disposição do centro de gravidade	125
Tabela A-1 - Condições de ensaio.....	139
Tabela A-2 - 1º lote de provetes após o ensaio.....	139
Tabela A-3 - 2º lote de provetes após o ensaio.....	140
Tabela A-4 - Provetes após o ensaio	140
Tabela A-5 - 5º Lote de provetes após o ensaio.....	141

Tabela A-6 - Provetes após a rotura	142
Tabela A-7 - Condições para efetuar o ensaio	143
Tabela A-8 - Condições iniciais para o ensaio	143
Tabela A-9 - Provetes após o ensaio	143
Tabela A-10 - Valores de dureza do material base	145
Tabela A-11 - Dados do ensaio de dureza para a intensidade de soldadura 6.....	146
Tabela A-12 - Dados do ensaio de dureza para a intensidade de soldadura 5.....	146
Tabela A-13 - Dados do ensaio de dureza para a intensidade de soldadura 4.....	147
Tabela A-14 - Dureza da amostra 1	149
Tabela A-15 - Dureza da amostra 2	149
Tabela A-16 - Condições de Soldadura	149
Tabela A-17 - Resultados da dureza do provete 1	150
Tabela A-18 - Resultados da dureza do provete 2	150

1. Introdução

Quando se inicia um projeto de elaboração e projeção de um veículo de competição existem sempre especificações técnicas e limitações ao nível de infraestruturas, mas os engenheiros têm que coexistir com esses desafios de modo a desenvolver o projeto até ao limite imposto. Os regulamentos das provas em que este projeto vai ser inserido são a fronteira que nunca pode ser transposta. Devido aos diferentes tipos de componentes mecânicos que se utilizam, estes tornam-se por si só limitações. O engenheiro é bem-sucedido se conseguir uma interpretação realista das várias limitações e conseguir aplicá-las na prática. Para se obter sucesso na competição automóvel é necessário trabalhar nos limites máximos das regras impostas.

Atualmente os componentes estruturais dos automóveis, especificamente os dirigidos à competição automóvel têm verificado várias evoluções, pois a concorrência é extremamente elevada. O desenvolvimento do chassi é primordial, permitindo assim melhorar as características do veículo. Com a evolução de um projeto e a sua conceção é possível elevar os níveis competitivos sem aumentar os custos de produção e de manutenção.

Desta forma os métodos numéricos, em particular o método dos elementos finitos, surgem com elevada importância para a conceção e análise de estruturas. Assim é necessário dar primazia à modelação da estrutura pois se esta for negligenciada pode provocar perdas, tanto a nível dinâmico como do investimento realizado. Como a estrutura é submetida a carregamentos dinâmicos, executa-se a análise dinâmica pois desta forma é possível prever o seu comportamento quando é submetida a estas solicitações.

O trabalho desta dissertação inicia-se com as medições do chassi existente, procedendo-se à sua modelação.

Após esta fase realizaram-se ensaios mecânicos para caracterizar mais fidedignamente as propriedades mecânicas dos materiais utilizados. Estes ensaios incidiram no material constituinte dos tubos utilizados na produção do chassi, bem como na soldadura envolvida, estudando-se ainda alternativas para o processo de soldadura. Os resultados obtidos permitiram realizar as várias simulações numéricas do chassi.

Com as simulações estáticas caracterizou-se a rigidez torsional, as deformações existentes, bem como as tensões geradas na estrutura. A realização das simulações modais permitiu verificar a existência ou não de ressonância entre o chassi e os diversos componentes mecânicos.

Derivado à extrema competitividade existente procurou-se obter melhores soluções, recorrendo por isso as ferramentas de otimização que são utensílios imprescindíveis no desenvolvimento de projetos. Para proceder à otimização aplicaram-se os algoritmos através do software Matlab e realizaram-se as simulações numéricas com recurso ao software Ansys.

1.1. Motivação

Sendo a *DEpieres Desportos Motorizados Lda* uma empresa intimamente ligada à competição automóvel, com 25 anos de experiência, possuindo vários projetos no Campeonato Nacional de Todo Terreno, deu início ao programa de exportação no ano de 2013, tendo presente sempre o crescimento e desenvolvimento de produtos melhores e mais eficazes.

A base empírica de desenvolvimento dos chassis é um método viável, mas poderá levar a um aproveitamento irracional dos recursos, sendo desta forma necessário encontrar formas de otimizar os recursos para aumentar a competitividade.

Com esta parceria foi possível estabelecer a ponte entre o conhecimento empírico, as vantagens, as necessidades e as limitações, por parte da empresa *DEpieres Desportos Motorizados Lda* e o conhecimento mais teórico por parte da Universidade do Minho.

1.2. Objetivos

No decorrer da elaboração deste trabalho procurou-se obter melhorias no chassi existente, quer ao nível estático, dinâmico ou na disposição do centro de gravidade. Ao nível estático pretende-se aumentar a rigidez torsional, diminuir a flexão da estrutura e minimizar o incremento de peso. Relativamente ao peso existe uma margem para o aumentar, pois este encontra-se 20 kg abaixo do limite legal.

Realizaram-se simulações numéricas numa situação limite para estes veículos, considerando o veículo a descrever uma curva.

Com as simulações modais vai-se principalmente tentar garantir que o chassi tem a sua primeira frequência natural acima dos 50 Hz para assegurar que este não entra em ressonância com as frequências naturais dos diversos componentes mecânicos

Pretende-se ainda melhorar a disposição do centro de gravidade, tentando nos eixos longitudinais e transversais aproximá-lo do centro do veículo e relativamente à disposição no eixo vertical pretende-se obter a colocação o mais em baixo possível.

1.3. Organização

Ao longo do capítulo inicial, procura-se contextualizar o tema deste trabalho. Referem-se as motivações e objetivos deste trabalho.

No capítulo 2 resumem-se as alterações/evoluções que foram efetuadas nos chassis ao longo do tempo. Apresentam-se os regulamentos que regem a modalidade, desde a componente desportiva passando pelos órgãos de segurança específicos. Descrevem-se as características dos veículos e as soluções adotadas pelos construtores na conceção do chassi dos seus veículos.

No capítulo 3 apresentam-se os fundamentos teóricos em que se baseia o desenvolvimento deste trabalho. Abordam-se os conceitos teóricos e a forma de interpretar os resultados obtidos com os ensaios experimentais. Posteriormente analisam-se os conceitos que regem a análise modal, o método dos elementos finitos, a otimização, bem como os conhecimentos necessários para proceder à utilização dos softwares utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente através dos ensaios efetuados: análise química, ensaio de tração, ensaio de fadiga. Desta forma consegue-se caracterizar o material utilizado na conceção do chassi. Apresenta-se modelação, explicando-se o procedimento seguido para se obter o modelo 3D no software CAD. Indicam-se os passos que foram efetuados para se realizar as simulações estáticas e modais do chassi inicial, apresentando-se os resultados obtidos nas simulações. Faz-se a descrição da otimização do chassi, estando este dividido em 3 fases: a otimização empírica, a análise de sensibilidade e a utilização do updating. Descreve-se a preparação dos modelos numéricos para a execução das simulações, apresentando-se os resultados obtidos numericamente.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões que se retiraram deste trabalho e sobre os objetivos propostos inicialmente. Tecem-se algumas sugestões para possíveis trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

2.1. Chassi

Far-se-á uma breve nota histórica onde se indicará a evolução e a forma que os chassis foram assumindo até aos nossos dias, bem como as diferentes formas que estes foram assumindo e descrever-se-á a utilização de cada tipo de chassi no desporto automóvel.

2.1.1. Introdução Histórica

Nos primórdios do século XX, o surgimento de aplicações de chapas e laminados nos automóveis ao invés da utilização da madeira, permitiu que a estética dos automóveis começasse a ser diferenciadora entre os vários modelos. Com o passar dos anos foram aplicadas várias técnicas metalúrgicas, a forja com martelos entre 1900 e 1910, a extrusão hidráulica por volta de 1920, passando a extrusão e estampagem a ser utilizada em 1935.

Na primeira década do século XX a estrutura típica do chassi era composta por madeira, sendo que os painéis fixados eram de aço.

Em 1919, as carroçarias Budd utilizadas nos veículos Dogde, apresentaram uma grande evolução à época, pois integraram o chassi e a carroçaria num só elemento. Todas as cargas eram suportadas pelas secções metálicas laminadas em forma de caixa. Durante aproximadamente 10 anos utilizou-se a combinação chassi em madeira e painéis em metal, após esse período apareceram os chassis de madeira com reforços em aço, que conferiam maior rigidez à carroçaria do automóvel. Este tipo de carroçaria surgiu pela primeira vez no modelo Hupmobile em 1911 Figura 2-1, por esta altura as carroçarias mais utilizadas eram os sedans sem capota, baseada na carroçaria Hupp, criada por Edward Budd[1].



Figura 2-1 – Hupmobile 1911[2]

Após a década de 1910 surgiram os sedans fechados, mas o seu custo era em 50% superior relativamente ao custo dos sedans sem capota. Após a I Guerra Mundial os sedan com capota tornaram-se mais económicos e mais atrativos, pois Edward Budd gerou formas de reduzir os custos de produção [1].

Durante o ano de 1915 a companhia Ruler Auto Co. apresenta um veículo, Ruler Frameless, com a carroçaria de uma única peça, onde os elementos da carroçaria tinham uma forma tubular para conferir a rigidez necessária. O motor e as suspensões estavam colocados sobre a estrutura [3].

Em 1919 a Dodge apresenta o seu automóvel totalmente fechado com o chassi e os painéis da carroçaria feitos em aço.

Em 1922 é apresentado o Lancia Lambda, sendo este inspirado na estrutura monocoque do casco das embarcações. Vincenzo Lancia conseguiu neste projeto eliminar os problemas estruturais do chassi e da carroçaria. Este modelo possuía a estrutura integralmente em aço e painéis que incorporavam o túnel da transmissão e a carroçaria autoportante [4].

Em 1929 os automóveis Auburn e Cord surgem com o chassi em aço mas apresentam reforços em “X” sendo possível visualizar na Figura 2-2, com este tipo de construção aumenta-se significativamente a rigidez torsional e flexional e reduzia a vibração, melhorando a dirigibilidade do carro [1].



Figura 2-2 – Chassi Auburn [5]

Em 1934 surge a solução do chassi autoportante num veículo de produção em massa, nos modelos Citroen Traction Avant [6].

Nos anos 1935 e 1936 surge o sistema Superleggera apresentado na Figura 2-3, desenvolvido pela Carrozzeria Turin, que consiste num arranjo de tubos de aço molibdénio de pequeno diâmetro soldados em forma reticulada. Neste treliçado era agregada a carroçaria num

laminado de alumínio, não tendo função estrutural. Este tipo de estrutura era mais indicado para veículos de competição, mas foi utilizado em muitos veículos de série[7].

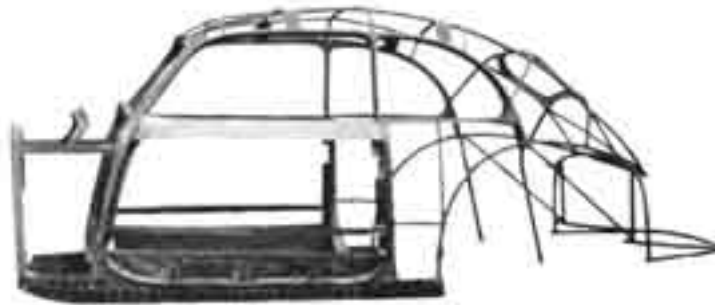


Figura 2-3 – Chassi Superleggera [8]

Com a II Guerra Mundial a indústria automóvel estagnou e toda a capacidade de desenvolvimento e de produção foi para a área bélica. Após o término do conflito, nos Estados Unidos da América a indústria procurou reduzir o peso dos chassis mas essencialmente melhorar o desempenho dos motores, na Europa e devido à escassez de aço, a indústria procurou desenvolver veículos mais leves e utilizar alumínio em certos componentes e na carroçaria [9].

Em 1948 a Land Rover lançou um modelo com a carroçaria feita em painéis de alumínio[10].

Em 1953 a Chevrolet através do modelo Corvette apresentou a primeira aplicação de fibra de vidro num veículo sendo o chassi tubular em aço [Figura 2-4][11].



Figura 2-4 – Chassi e carroçaria do Chevrolet Corvette [12]

2.1.2. Tipo de Chassis

Os chassis podem assumir várias configurações, sendo que estas foram evoluindo com o desenvolvimento de novas tecnologias e métodos de fabrico.

2.1.2.1. Chassi de Longarinas ou Ladder Frame

Este tipo de chassi surgiu por volta do ano 1900, e são os mais utilizados em camiões, autocarros, veículos todo-terreno.

Os chassis de longarinas são constituídos por duas longarinas paralelas, ligadas entre si por travessas simples ou em forma de cruz (conferindo maior rigidez) e com um centro de gravidade mais baixo. Consoante a aplicação do automóvel as longarinas têm diferentes formas.

São aplicados elementos específicos, nas longarinas e nas travessas, para suportar os componentes mecânicos que constituem um automóvel. Pode-se visualizar na Figura 2-5, um chassi com os elementos mecânicos [13].

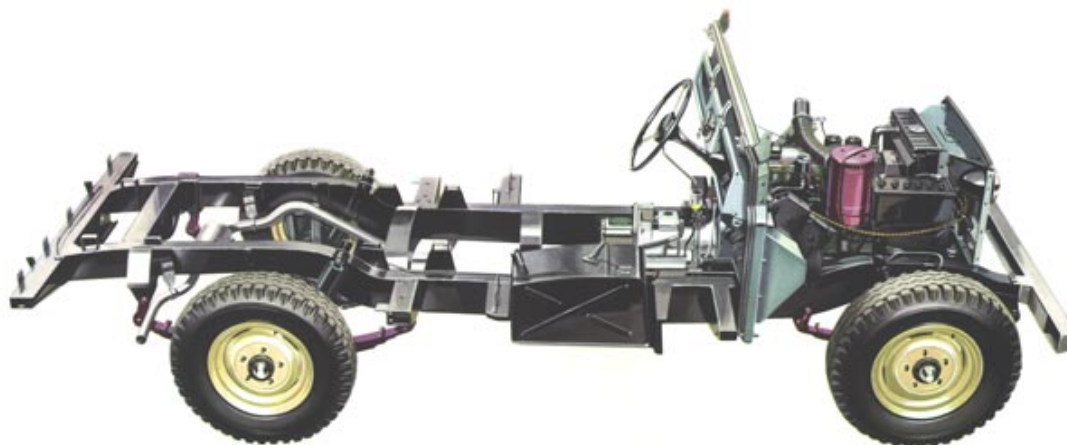


Figura 2-5 – Chassi utilizado num Land Rover Serie 2 de 1959 [14]

Estes chassis têm como principais vantagens a possibilidade de conceção manual, capacidade de transportar maiores cargas, grande variedade de tipos de carroçarias. Em contrapartida possui menor rigidez torsional [15].

2.1.2.2. *Chassi em X ou Backbone*

Este tipo de chassi tem um elemento central em aço que suporta o motor e as suspensões e no seu interior contem a transmissão [Figura 2-6]. A carroçaria é feita em fibra de vidro e é suportada pelo elemento central [13].



Figura 2-6 – Chassi em X utilizado no Lotus Elan [16]

As vantagens deste tipo de chassi passam pela facilidade de construção manual, barato de produzir em baixo volume, ideal para pequenos carros desportivos. Como desvantagem aponta-

se o custo para produzir em massa, a falta de proteção em impactos laterais e não é suficientemente rígido para veículos super desportivos. Numa utilização do veículo durante décadas era necessário proceder à substituição do chassis pois o seu desgaste é elevado [17].

2.1.2.3. *Chassi Monocoque*

O chassi monocoque é uma estrutura única que define a forma final do automóvel, o processo baseia-se em chapas de metal prensadas que são soldadas ou rebitadas entre si para conferir a forma ao chassi. O processo de fixação das peças pode ser soldado por robotização.

Atualmente a maioria dos veículos automóveis são produzidos com este tipo de chassi, devido à sua forma de produção permitir uma elevada cadência. Este chassi não obstante ser pesado, o que seria uma desvantagem, tem uma elevada resistência ao impacto, o que em termos de segurança é uma mais-valia [18].

Este chassi pode ser produzido recorrendo a aço [Figura 2-7], alumínio, fibra de carbono [Figura 2-8].



Figura 2-7 – Chassi monocoque em aço [19]



Figura 2-8 – Chassi monocoque D-Drive Sports F103 [20]

Os chassis monocoque podem ser construídos com recurso a vários tipos de materiais, passando pelo aço, alumínio ou fibra de carbono, dependendo principalmente da utilização que irá ter. Para veículos super desportivos ou de competição utiliza-se os chassis em fibra de carbono pois ficam mais leves do que os chassis em aço ou alumínio. Os veículos produzidos em massa recorrem aos aços e alumínios para desta forma reduzir os custos de produção.

2.1.2.4. Chassi Tubular

Como os chassis de longarinas não apresentavam a rigidez que os engenheiros achavam necessário, os engenheiros de automóveis de competição desenvolveram um chassi tridimensional – Chassi tubular, o primeiro exemplo foi o Maserati Tipo 61 "Birdcage" um carro de competição do pós-guerra. O chassi tubular emprega dezenas de tubos de seção circular ou seção quadrada (facilita a conexão com os painéis da carroçaria, embora a seção circular fornece maior rigidez), permitindo posicioná-las em direções diferentes para proporcionar resistência mecânica contra as forças de qualquer direção. Um tubo de seção circular terá maior resistência aos esforços de flexão, menor peso, e maior rigidez estrutural do que um tubo de seção quadrada. Esses tubos são soldados e formam uma estrutura bastante complexa, como se pode ver na Figura 2-9 [21].

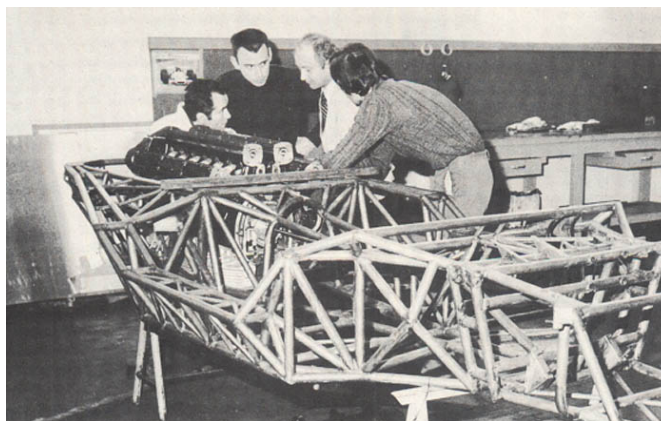


Figura 2-9 – Chassi tubular utilizado no Lamborghini Countach LP 400 [22]

A Mercedes-Benz, no início dos anos 50, apresentou o 300SLR, um carro de competição que utilizava chassi tubular. Este veículo serviu de base ao primeiro carro de estrada com chassi tubular o 300 SL Gullwing. Como a estrutura da base das portas era mais elevada do que o normal, a Mercedes colocou as portas a abrir para o tejadilho, como umas asas de gaviota, como se verifica na Figura 2-10, tornando-o um veículo icónico da indústria automóvel [15].



Figura 2-10 – Mercedes 300 SL [23]

Desde meados dos anos 60 muitos carros desportivos de alta performance também adotaram o chassi tubular para melhorar a relação rigidez/peso. No entanto, a grande maioria

utiliza chassis tubulares nas secções frontais e traseiras e a zona do habitáculo é constituída por uma monocoque e assim desta forma se reduzem os custos [18].

A vantagem deste tipo de chassi passa por conseguir reduzir o peso e as tensões em todas as direções. O facto de ser uma estrutura muito complexa leva a que o seu desenvolvimento seja dispendioso e demorado, sendo que a principal desvantagem deste tipo de chassi é a complexidade de criar uma produção robotizada [24].

2.1.3. Chassi na competição automóvel

Antes da II Guerra Mundial quase todos os chassis dos carros de corrida tinham os eixos independentes, tanto dianteiro como traseiro. Em 1934 a Auto Union (atualmente AUDI) implementou uma mudança do tipo de chassi com tubos duplos com um de secção circular. No mesmo ano, a Mercedes-Benz também alterou os seus chassis para um esquema semelhante, mas, em 1937, passaram a utilizar tubos - neste caso, de secção oval. A necessidade de aumentar a rigidez do chassi foi reconhecida através da adição de um chassi tubular para o esquema básico de duplo tubo, contribuindo mais para a facilidade de montagem do que a capacidade de torção do corpo. As primeiras tentativas de chassis do tipo tubular apareceram na década de 1950, mas faltava a triangulação necessária para formar as estruturas completas.

Dois chassis projetados com base nos princípios dos chassis tubulares apareceram em 1952 - o Lotus Mark VI e o Mercedes 300SL. O primeiro foi originário de uma pequena empresa com recursos muito limitados e que funcionava em grande parte a tempo parcial, o segundo de um grande fabricante, com grande conhecimento na construção de carros tanto de passageiros como de competição. O sucesso deste tipo de chassis levou a que fosse muito utilizado em carros desportivos e em carros de corrida. A construção unitária começou a ser utilizada em veículos monolugares desde a sua introdução, em 1962, no Lotus 25. O termo monobloco é amplamente utilizado para descrever este tipo de estrutura, e significa, simplesmente, que o chassi e carroçaria são o mesmo elemento. O carro de competição com motor traseiro é o mais adequado para este tipo de construção. Os requisitos gerais da área à frente do habitáculo também são tidas em conta por este tipo de estrutura, mas os principais problemas são a falta de rigidez torsional, a interferência com o esquema do escape e acessibilidade. Quanto à rigidez torsional, pode ser aumentada tornando o motor um membro estrutural. No entanto esta prática não é recomendada a não ser que o bloco do motor seja projetado para este propósito – além da sua função principal de fornecer localização positiva para a cambota e para a cabeça do motor. Para o motor ser um elemento estrutural é necessário um sistema de fixação mais complexo, com vários suportes na

frente e na traseira do motor para lidar com a torção e com a flexão. Enquanto quando o motor não é considerado um elemento estrutural só são necessários dois suportes à frente e um posterior ao motor.

A utilização do motor como elemento estrutural foi pela primeira vez implementada pela Ferrari no seu primeiro automóvel monobloco. O motor era aparafusado na periferia da suspensão traseira, sendo este o único elemento estrutural na parte atrás dos bancos. Com as dimensões do motor, a única alternativa para usar suportes rígidos passa pela utilização de uma estrutura tubular para o compartimento do motor. Deve-se ter cuidado no design para evitar que sejam exercidas cargas pontuais na secção central, desta forma consegue-se adequar a rigidez torsional sem afetar o desenho do sistema de escape nem reduzir a acessibilidade. No entanto pode ser necessário colocar alguns elementos destacáveis de forma a facilitar a instalação e a remoção do motor, sendo possível manter a capacidade de torção.

Uma alternativa ao chassi tipo monobloco é o chassi backbone, que foi utilizado no Lotus Elan (motor dianteiro), como se pode visualizar na imagem Figura 2-11, e no Lotus 30 (motor traseiro).



Figura 2-11 - Chassi Lotus Elan [25]

Embora este tipo de chassi necessite que a carroçaria seja separada, tem muito em comum, do ponto de vista estrutural com a carroçaria do Lotus 25 que tem um chassi monobloco pois a parte central é compactada num único tubo para permitir a instalação dos assentos, portas e todos os apêndices de um carro desportivo.

O chassi tubular é uma alternativa direta para a construção unitária uma vez que os seus tubos de diâmetros pequenos transmitem as cargas da mesma forma que o chassi e os painéis da carroçaria. Pode parecer estranho, mas o chassi de um carro de competição tem avançado mais devido ao trabalho de pequenas empresas especializadas do que através de grandes fabricantes. Para um bom desempenho do chassi, o foco deve estar na rigidez torsional e isto só pode ser obtido por um desenho cuidadoso do chassi [15].

2.1.4. Principais características

Quando se inicia o desenvolvimento de um chassi os objetivos passam por conseguir obter uma relação entre os seguintes itens: performance, *handling*, estrutura, ergonomia, segurança e ajuste de elementos móveis. De seguida explica-se resumidamente cada item acima enumerado [26]:

Performance – Termo associado às características de desempenho do veículo. Durante o seu desenvolvimento estas podem ser melhoradas. Podem ser incluídos a capacidade de aceleração, velocidade máxima, consumo de combustível, desgaste de pneus e a capacidade de arrefecimento. Obtêm-se essas capacidades geralmente por cálculos, regras de ouro ou mantêm-se de um projeto anterior.

Handling – Deve considerar-se no design a capacidade de manuseamento que permita que o desempenho do condutor seja melhor, isto é, que o veículo seja mais fácil de conduzir. Isso envolve a especificação de detalhes do sistema de direção, sistema de suspensão e da rigidez do chassi e aerodinâmica (arrasto e pressão aerodinâmica descendente).

Estrutura – Parte essa do veículo que suporta a torsão global, a rigidez à flexão e a força local. A estrutura tem de lidar com as cargas máximas da força lateral, força de travagem, forças de colisão, cargas aerodinâmicas e a reação do binário do motor. Tudo isto pode ser estimado como parte da especificação deste componente fundamental do veículo.

Ergonomia – Disciplina que se preocupa com a interferência homem-máquina. Neste campo deve-se conseguir boa visão, um bom compromisso no tamanho do cockpit, assentos confortáveis e sistemas de retenção, uma boa posição de condução de forma a manusear-se todos os comando de forma confortável. A temperatura do cockpit deve-se manter moderada. Tudo isto contribui para um melhor desempenho do condutor e conforto dos ocupantes.

Segurança – o responsável pela conceção deve ser exigente na resposta do veículo as agressões sobre os ocupantes do veículo e sobre o meio envolvente e introduzir em equipamentos de segurança, proteção contra incêndio, capotamento, as células de combustível e outros equipamentos de segurança obrigatória.

Recursos ajustáveis – são os elementos que permitem a configuração necessária para diferentes situações de corrida que não podem ser previstos e devem ser fornecidos no projeto com alguma capacidade de adaptação. Regulações típicas incluem ações na:

- Distribuição de peso - lastro móvel, capacidade de combustível e o seu consumo (faz variar o centro de gravidade);

- Aerodinâmica - asas diferentes e várias configurações, ajuste da suspensão em rigidez e altura;
- Suspensão - altura, a atitude, cargas de roda (molas, barras estabilizadoras), amortecimento, configurações estáticas (alinhamento, camber), geometria (comprimento do braço variável e da altura)

2.2. Regulamentação

A regulamentação existente para a competição automóvel é muito variada. Neste trabalho vai focar-se apenas na aplicada ao Todo-Terreno.

2.2.1. Enquadramento

2.2.1.1. *Enquadramento do tipo de provas*

O Todo-Terreno é uma variante do automobilismo, que é disputada sob a forma de rali, onde o itinerário abrange o território de um ou mais países. O Todo-Terreno tem 3 variantes distintas: Rali Todo-Terreno, Rali Maratona Todo-Terreno, Baja Todo-Terreno.

O Rali Todo Terreno é um rali com uma distância máxima entre 1200km e 3000km.

No Rali Maratona Todo-Terreno o itinerário deverá abranger vários países, não devendo, no entanto, exceder os 21 dias de evento (incluindo as verificações e a Super Especial). A distância deve ser maior que 5000 km e com um mínimo de 3000km de sectores seletivos.

As Bajas Todo Terreno são ralis com sectores seletivos durante um ou dois dias, podendo existir uma Super Especial durante um dia suplementar. Se a prova se desenrolar durante 1 dia a distância máxima percorrida deverá ser de 600km, se decorrer durante 2 dias a distância máxima será de 1000km. O período de descanso deve estar compreendido entre as 8 horas e as 20 horas durante as duas etapas. A quilometragem mínima dos sectores seletivos é de 300km para provas de 1 dia e de 450km para provas de dois dias. Cada sector seletivo não poderá ter menos de 80 km e não é recomendado que ultrapasse os 200 km.

2.2.1.2. *Enquadramento dos Veículos*

Os Ralis Todo-Terreno são abertos a todos os veículos que não excedam os 3500 kg de peso em carga, para os Grupos T0, T1, T2, T3 e T8 devidamente matriculados. Os veículos têm que respeitar as normas de segurança impostas pela Convenção Internacional para a Circulação em Estrada e as normas de segurança impostas pelo Anexo J do Código Desportivo Internacional.

Os veículos com 4 rodas motrizes são designados por 4X4 e os veículos com 2 rodas motrizes são designados por 4X2.

Em Portugal a construção/preparação de carros de competição é baseada nas normas da Federação Internacional do Automóvel. Os veículos são divididos em 3 grupos, consoante o seu tipo de preparação.

Grupo T1: Veículos de Todo-Terreno modificados

São veículos de propulsão mecânica com 4 a 8 rodas, sendo que se o veículo tiver mais de 4 rodas exige aprovação por parte da FIA, tem que se mover com meios próprios, devendo o dispositivo de propulsão e direção ser controlados por um condutor a bordo do veículo.

A construção destes veículos pode ser unidade a unidade, mas têm que estar registados num país e respeitar a Convenção Internacional sobre Transito Rodoviário no que diz respeito à iluminação.

Todas as informações sobre o tipo de carroçaria, peso mínimo, motor, sistema de transmissão, suspensões, jantes e pneus e sistema de travagem podem ser consultadas no artigo 285-2014 Specific regulations for Modified Cross-Country Cars.

Grupo T2: Veículos de Todo-Terreno de série

Os veículos Todo-Terreno de produção em serie, devem ser produzidos pelo menos 1000 unidades em 12 meses consecutivos e têm que ser homologados pela FIA para Veículos Todo-Terreno de série.

No artigo 284-214 Specific regulations for Series Cross-country podem-se encontrar informações sobre o peso mínimo, motor, suspensões, sistema de travagem, carroçaria, zona dos passageiros e reforços estruturais.

Grupo T3: Veículos de Todo-Terreno melhorados

Estes veículos podem ser construídos à unidade mas devem poder ser matriculados em qualquer país e encontrarem-se em conformidade com a Convenção Internacional sobre a Circulação Rodoviária no respeitante à iluminação.

No artigo 286-2014 Specific regulations for improved Cross-Country Cars encontram-se as informações sobre o peso mínimo, motor, suspensões, sistemas de travagem, carroçaria, zona dos passageiros, reforços estruturais

Tabela 2-1 – Classificação do tipo de veículo

Grupo e classe	Tipo de Veículo
T1.1	T1 4X4 Gasolina
T1.2	T1 4X4 Gasóleo
T1.3	T1 4X2 Gasolina
T1.4	T1 4X2 Gasóleo
T2.1	T2 Gasolina
T2.2	T2 Gasóleo
T3.1	T3
T3.2	T3 Leve

Na Tabela 2-1 apresenta-se a forma como os veículos são divididos relativamente aos grupos e classes tendo como base o número de rodas motrizes e o tipo de combustível utilizado.

2.2.2. Regulamento

Os regulamentos existentes e emitidos pela FIA, os quais todos os países sobre a sua alçada têm que cumprir, podem ser encontrados no página da internet da mesma. Esta regulamentação está estruturada da seguinte forma, para que a consulta seja facilitada: Lista de Veículos Homologados, Prescrições Especificas para as provas de Todo-Terreno, Classificação e Descrição dos Veículos de Todo-Terreno (Artigo 281-2014), Prescrições Especificas para veículos Todo-Terreno (Artigo 282-2014), Equipamentos de Segurança para veículos Todo-Terreno (Artigo 283-2014), Regulamento Especifico para viaturas do grupo T2 (Artigo 284-2014), Regulamentos Especifico para viaturas de grupo T1 (Artigo 285-2014), Regulamento Especifico para viaturas de grupo T3 (Artigo 286-2014).

Na Lista de Veículos Homologados encontramos todos os carros com homologação vigente para participarem em provas sob a égide da FIA.

Nas prescrições específicas para as provas de Todo-Terreno estão estabelecidos todos os parâmetros sobre a distribuição dos pontos para a atribuição do estatuto de campeão nas diferentes categorias.

O artigo 281-2014 especifica o tipo de veículo para as provas de Todo-Terreno bem como a fórmula de classificação quanto ao grupo, quanto à classe. Indica o procedimento para efetuar a homologação FIA.

No artigo 282-2014 Prescrições Especificas para veículos Todo-Terreno são apresentadas todas as características e limitações do veículo.

No artigo 283-2014 Equipamentos de segurança existentes num veículo Todo-Terreno, encontramos as normas e os elementos de segurança que têm que estar presentes num destes veículos, passando pelos elementos elétricos, colocação dos cintos e dos bancos de competição,

extintores, as características do rol bar desde formas de fixação até as características do material e depósitos de combustível.

No artigo 284-2014 Regulamento específico de viaturas de Todo-Terreno Grupo 2, temos presentes as modificações permitidas, as formas de cálculo do peso mínimo, as características técnicas permitidas para o veículo.

No artigo 285-2014 Regulamento específico de viaturas de Todo-Terreno Grupo 1, são apresentadas as obrigações a cumprir pelo veículo, as características principais do chassi, roll bar e carroçaria, o peso mínimo consoante a cilindrada do veículo, os tipos e características do motor, características da transmissão, diferenciais, suspensões.

O artigo 286-2014 Regulamento específico de viaturas de Todo-Terreno Grupo 3, apresenta as obrigações a que os veículos que querem correr nesta categoria se devem sujeitar, apresentando as características do chassi, roll bar e carroçaria, os motores, suspensões e sistema de travagem permitidos nesta categoria.

No caso que se vai estudar o veículo pertence ao grupo 1, como tal vai proceder-se à análise dos regulamentos referentes a esta categoria de carros.

2.2.2.1. Artigo 285-2014

Este artigo regulamentar apresenta-se dividido em sub-artigos que correspondem a diferentes restrições.

O artigo 1 corresponde as obrigações que o veículo tem que obedecer ao nível do equipamento de segurança, dos depósitos de combustível e reservatório de óleos.

O artigo 2 está reservado ao chassi e ao roll bar, indicando que só são permitidos chassis tubulares e em materiais ferrosos, a espessura mínima permitida é de 1.5 mm. Indica a secção mínima dos tubos do roll bar, sendo esta de 50x2 mm ou 45x2.5mm.

No artigo 3 temos a descrição da carroçaria, as dimensões máximas para comprimento, altura, a distância entre eixos. Apresenta ainda as características que o interior do veículo deve ter, as restrições para elementos mecânicos no interior do cockpit, caracteriza as entradas de ar e descreve as características das portas e das janelas. Apresenta as medidas mínimas que o roll bar deve ter, para que os ocupantes consigam sair no tempo máximo estabelecido, 7 segundos pela porta do próprio lado e 9 segundos pela porta do lado oposto.

No artigo 4 encontramos a tabela onde se estabelece o peso mínimo correspondente a cada veículo consoante a sua cilindrada e o número de rodas motrizes.

O artigo 5 corresponde ao motor, onde se descreve a constituição permitida para o motor seja ele aspirado ou tenha um turbo compressor. Todos os constituintes estão normalizados e têm que estar de acordo com o regulamento. Está ainda indicada a posição do sistema de escape e as dimensões exigidas para o restrictor. O sistema de lubrificação também está descrito no regulamento, especialmente o sistema de recuperação de óleo.

O artigo 6 é relativo à transmissão. Este sistema é constituído pela caixa de velocidades e a caixa de transferências. As caixas de velocidade podem ser sequenciais ou em H. A caixa sequencial está limitada a 6 velocidades e o sistema de acionamento tem que ser puramente mecânico. A caixa em H tem que ter o mesmo numero de relações que a caixa original. A escolha da embraiagem é livre. Os diferenciais também são de escolha livre, sendo que os autoblocantes devem ser puramente mecânicos e o acoplamento viscoso. Os veios de transmissão devem ser em aço.

No artigo 7 temos a descrição do sistema de suspensão. A escolha da suspensão é livre sendo proibido o uso de sistema de suspensões ativos, isto é sistemas que permitam o controlo da flexibilidade e altura da suspensão quando o carro está em movimento. O sistema mola amortecedor tem a restrição de não ser possível ajustá-lo do interior do veículo, mas sendo possível ser ajustado quando o carro não está em movimento e só com o uso de ferramentas. O sistema de ajustamento deve estar no amortecedor ou no reservatório de gás. São proibidas quaisquer ligações entre os amortecedores, sendo as únicas ligações possíveis as que ligam o amortecedor ao chassi, não podendo estas ter qualquer outra função. As barras estabilizadoras devem ser exclusivamente mecânicas, não é permitido que sejam ativadas ou desativadas, bem como o ajuste é proibido do interior do veículo. Só é permitida uma barra por eixo e não podem ser ligadas entre elas. A amplitude da suspensão de um veículo 4x4 é limitada a 300mm para um eixo rígido do tipo “banjo” ou 250 mm para os outros tipos de transmissão.

O artigo 8 apresenta as características das jantes e dos pneus, sendo que para veículos 4x4 só são permitidas jantes de liga de alumínio e que pesem mais de 13 kg. As rodas de veículos 4x4 completas devem medir um diâmetro máximo de 810 mm e este diâmetro é medido com o pneu novo especificado pelo construtor. São proibidos quaisquer elementos montados entre a jante e o pneu. As jantes não precisam de ter os mesmos diâmetros. São proibidos ainda os sistemas de fixação da roda por uma porca central e os sistemas de enchimento e esvaziamento dos pneus em movimento. Só pode existir uma válvula por jante, sendo que esta só pode ter 12 mm de diâmetro máximo. As rodas suplentes estão limitadas a 3 unidades.

O artigo 9 é referente ao sistema de travagem. Este é um sistema ativo que só pode ser controlado pelo condutor, podem existir dois circuitos independentes mas estes têm que ser operados pelo mesmo pedal.

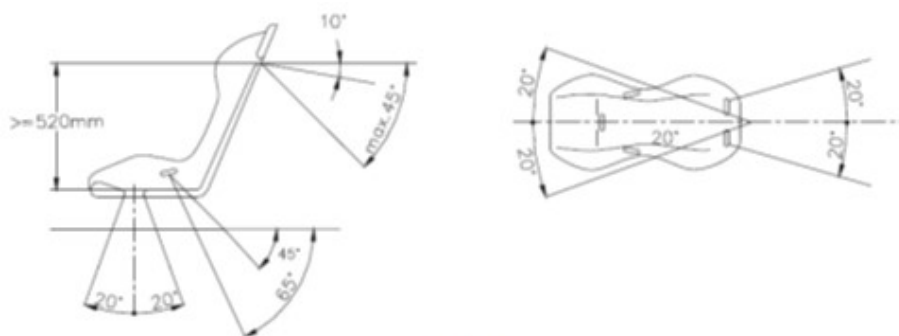
2.2.2.2. Artigo 283-2014 Equipamento de segurança para veículos de Todo-Terreno

Neste artigo temos todas as informações relativamente aos elementos de segurança que devem estar incorporados num veículo.

O artigo 3 refere-se às linhas e bombas de combustível e à cablagem. As linhas e o depósito de combustível devem estar protegidos contra riscos de deterioração, os tubos que vão ao motor e os que fazem o retorno devem estar equipados com válvulas de corte localizadas diretamente no motor, fechando completamente todas linhas de combustível se uma dessas linhas estiver fraturada ou estiver a derramar combustível. Todas as bombas de combustível só devem funcionar quando o motor está ligado ou nos procedimentos de ignição. São ainda apresentadas as características que os acessórios têm que cumprir.

No artigo 4 descreve-se o sistema de travagem.

O artigo 5 refere-se aos cintos de segurança indicando a norma a que devem obedecer, indicando ainda a forma como devem ser montados. Os cintos devem ser montados de acordo com Figura 2-12.



253-61

Figura 2-12 – Esquema de montagem dos cintos de segurança

As alças dos cintos que se colocam para baixo devem ser direcionadas para a parte traseira, e devem ser instaladas para que não criem um ângulo superior a 45° em relação à linha horizontal imaginária que se cria a partir da borda superior do encosto (10° a partir dos ombros do condutor). Os ângulos máximos relativamente à linha do centro do assento são de 20° divergente ou convergente, medido em projeção horizontal. Sempre que os pontos de fixação criem ângulos maiores relativamente à horizontal não devem ser usados. As cintas de ombro podem ser fixadas

no roll bar ou numa barra de reforço por meio de um laço. Pode-se verificar a colocação na Figura 2-13.

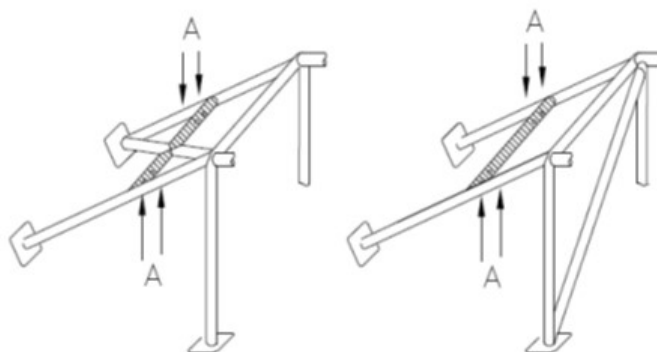


Figura 2-13 – Colocação das cintas de ombro

Ao utilizar-se a barra de reforço esta deve ser de aço ao carbono estirado sem costura e deve ter uma secção no mínimo 38 x 2.5 mm ou 40 x 2 mm, com uma resistência de fratura mínima de 350 N/mm².

No artigo 7 descrevem-se os sistemas de extinção que devem estar montados no carro. O veículo deve possuir um sistema de extinção automático, de tal forma que o condutor e o copiloto devem conseguir acionar o comando que dispara o sistema, estando sentados e com os cintos de segurança colocados. Devem ainda ser colocados dois botões de acionamento da extinção no exterior do veículo junto ao corta corrente. Deve ainda possuir um ou dois extintores manuais dependendo do material utilizado.

O artigo 8 refere-se ao roll bar especificando a estrutura base a sua construção para serem homologados pela FIA.

A estrutura base pode ter 3 configurações distintas, como as apresentadas na Figura 2-14.



Figura 2-14 – Desenho 253-1, 253-2, 253-3

O desenho 253-1 [Figura 2-14] apresenta um arco principal, um arco frontal, duas longarinas, duas barras para a parte traseira e seis pés de montagem. O desenho 253-2 [Figura 2-14] apresenta um esquema baseado em dois arcos laterais, dois membros transversais, duas barras à traseira e seis pés de montagem. O desenho 253-3 [Figura 2-14] apresenta um arco principal, dois semi-arcos laterais, um elemento transversal, duas barras à traseira, e seis pés de montagem.

A barra vertical do arco principal deve ser colocada o mais próximo possível da carroçaria e só deve ter uma dobra. O pilar da frente do arco frontal ou do arco lateral deve seguir os contornos dos pilares do para-brisas, e ter uma única curva com a parte inferior vertical. Todas as ligações existentes entre os diversos elementos para finalizar o roll bar devem ser efetuadas ao nível do tejadilho. Em todos os casos não deverá haver mais de 4 ligações no nível do tejadilho. As barras que vão para a traseira devem ser ligadas próximas do tejadilho e próximas do topo das curvas exteriores do arco principal em ambos os lados do carro e devem formar um ângulo de pelo menos 30° com a vertical e estar perto dos painéis laterais interiores da carroçaria.

Uma vez que a estrutura principal está definida, para ficar completamente concluída necessita de membros obrigatórios e reforços, aos quais podem ser adicionados membros opcionais e reforços.

Os membros obrigatórios e os reforços abrangem:

2.2.2.2.1. Membros diagonais

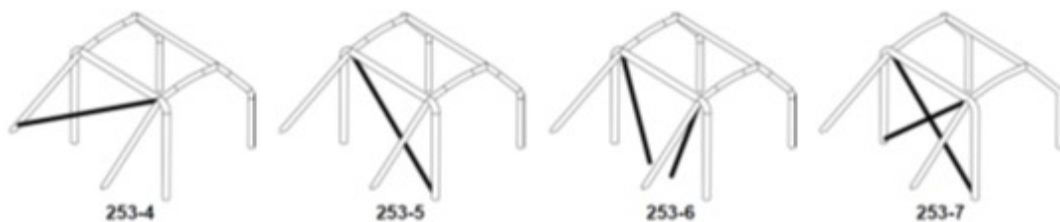


Figura 2-15 – Desenho 253-4, 253-5, 253-6, 253-7

A estrutura base deve ser complementada por membros diagonais:

⇒ Os desenhos apresentados na Figura 2-15 podem ser utilizados em carros homologados antes de 01.01.2008.

⇒ Os desenhos 253-6 [Figura 2-15] (Grupos T1 e T3 apenas) e 253-7 [Figura 2-15] são para carros homologados a partir de 01.01.2008.

A orientação das diagonais dos desenhos 253-4 e 253-5 [Figura 2-15] podem ser invertidas.

No caso do desenho 253-6 [Figura 2-15], a distância entre os dois suportes das diagonais não deve ser maior do que 400mm. Os membros devem ser retos e podem ser removíveis.

A extremidade superior da diagonal deve juntar-se ao arco principal, no máximo a 100 mm da sua junção com as barras que estão direcionadas para a traseira ou as barras que vão para a traseira devem estar no máximo a 100 mm da junção com o arco principal (ver desenho 253-52 [Figura 2-24] para a medida).

A extremidade inferior da diagonal deve-se juntar ao arco principal ou às barras para a traseira no máximo a 100 mm da base de montagem (exceto para o caso do desenho 253-6 [Figura 2-15])

2.2.2.2.2. Membros nas portas

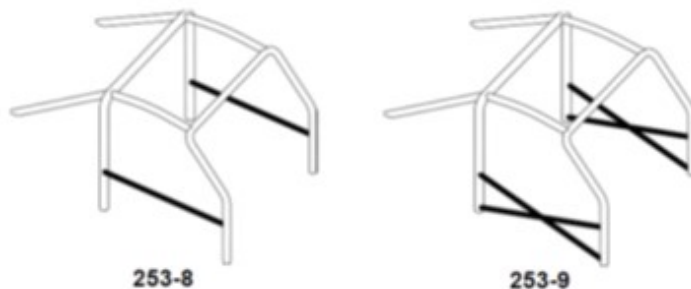


Figura 2-16 – Desenho 253-8, 253-9

Pelo menos uma barra longitudinal deve ser montada em cada lado do veículo ao nível da porta (ver desenho 253-8 [Figura 2-16]).

Os tubos que constituem este reforço devem ser incorporados no roll bar e o ângulo com o tubo horizontal não deve ultrapassar os 15°. O projeto deve ser idêntico em ambos os lados.

A proteção lateral deve ser tão alta quanto possível, se existir uma única barra esta deve ser colocada pelo menos a 10 cm de distância da parte inferior do assento, mas, em todos os casos, os pontos de fixação superiores não devem ser colocados acima da metade da altura total da porta medido a partir da sua base. Se estes pontos de fixação superiores estão localizados na frente ou por trás da abertura da porta, esta limitação de altura também é válida para a intersecção correspondente da barra e a abertura da porta.

No caso dos reforços das portas terem a forma de um "X" (Desenho 253-9 [Figura 2-16]), recomenda-se que os pontos de fixação inferiores das escoras transversais sejam fixados diretamente sobre o membro longitudinal da carroçaria/chassi e que, pelo menos, uma parte do "X" seja uma barra de peça única.

É possível obter combinações entre os desenhos. A ligação dos reforços das portas ao pilar de reforço do para-brisas (Desenho 253-15 [Figura 2-19]) é autorizado.

Para as competições sem co-piloto, os reforços podem ser instalados apenas do lado do condutor e não é obrigatório que o projeto seja idêntico em ambos os lados.

2.2.2.2.3. Membros Transversais

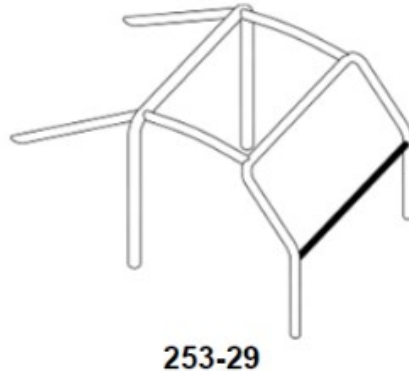


Figura 2-17 – Desenho 253-29

O membro transversal [Figura 2-17] é obrigatório, sendo fixado no arco dianteiro mas não deve invadir o espaço reservado aos ocupantes. Deve ser reto. Pode ser colocado tão alto quanto possível, mas a sua extremidade inferior não deve estar mais elevada que o ponto mais elevado do painel de instrumentos. Para carros homologados a partir de 01.01.2007, não deve ser posicionado abaixo da coluna de direção.

2.2.2.2.4. Reforços do tejadilho

Os carros homologados após 01.01.2005 devem cumprir estes requisitos:

A parte superior do roll bar deve estar em conformidade com um dos desenhos 253-12, 253-13 e 253-14 [Figura 2-18]. Os reforços podem acompanhar o desnível do tejadilho. Para as competições sem co-piloto, no caso do desenho 253-12 [Figura 2-18], é permitido apenas um membro diagonal, mas a sua ligação à frente deve estar do lado do motorista.

As extremidades dos reforços devem estar a menos de 100 mm da junção entre o arco e os membros (não aplicáveis para o início do V formado pelos reforços Desenhos 253-13 e 253-14 [Figura 2-18]).

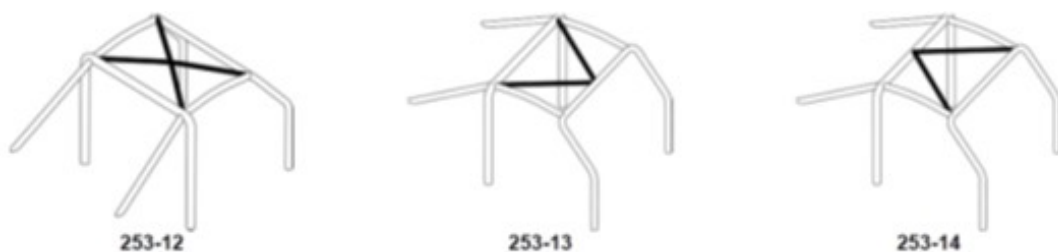
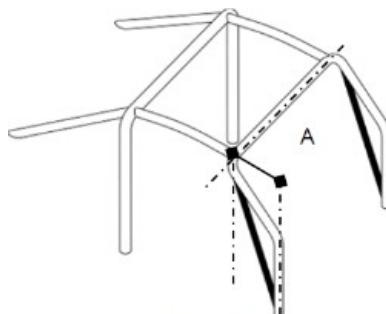


Figura 2-18 – Desenho 253-12, 253-13, 253-14

A junção dos tubos no topo do V deve ter em consideração que, se os tubos não se juntarem uns aos outros, a distância entre eles não deve exceder 100mm na sua conexão com o roll bar ou o membro transversal.

2.2.2.2.5. Reforço do pilar do para-brisas

Deve ser montado um reforço, em cada lado do arco frontal, como apresentado no desenho 253-15 [Figura 2-19].



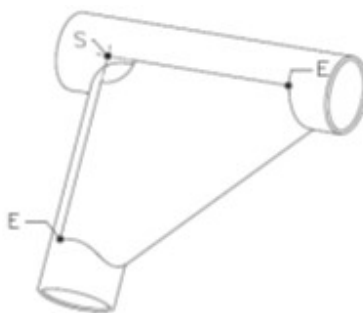
253-15

Figura 2-19 – Desenho 253-15

Pode ser dobrado com a condição de que, se visto lateralmente seja reto e que o ângulo da curva não exceda 20° . A sua extremidade superior deve estar colocada a uma distância inferior a 100 mm a partir da junção entre a parte da frente do arco lateral e o elemento longitudinal. A sua extremidade inferior deve estar a menos de 100 mm do pé de montagem do arco da frente lateral (ver desenho 253-52 [Figura 2-24] para a medida).

2.2.2.2.6. Reforços das curvas e junções

Os reforços em forma de cantoneira, como apresentado na Figura 2-20, são utilizados numa curva ou num cruzamento de tubos, podem ser obtidos a partir de uma folha metálica dobrada em forma de U e cuja espessura não deve ser inferior a 1.0 mm. As extremidades da cantoneira (ponto E), devem ficar colocadas à distância do topo do ângulo (ponto S) de 2 a 4 vezes o diâmetro exterior do maior tubo unido. É permitido realizar um entalhe na parte superior do ângulo, mas o raio não deve ser maior que 1.5 vezes o diâmetro exterior do maior dos tubos unidos. Os lados planos da cantoneira podem ter um furo cujo diâmetro não deve ser maior que o diâmetro exterior do maior dos tubos unidos.



253-34

Figura 2-20 – Desenho 253-34

As junções de tubos entre os membros diagonais do arco principal, os reforços do tejadilho (com a configuração do desenho 253-12 [Figura 2-18] e só para os carros homologados a partir de 01.01.2007), os reforços das portas (configuração do desenho 253-9 [Figura 2-16]) e o reforço do para-brisas (desenho 253-15 [Figura 2-19]), devem ser reforçadas por um mínimo de 2 reforços tipo cantoneira apresentados na Figura 2-20. Se os reforços das portas e o reforço do para-brisas não estiverem situados no mesmo plano, o reforço em forma de cantoneira pode ser fabricado numa chapa metálica desde que cumpra com as dimensões estabelecidas para os reforços tipo cantoneira.

2.2.2.2.7. Membros e Reforços opcionais

Os tubos de reforço devem ser retos. Devem ser soldados ou instalados por meio de uniões desmontáveis. Todos os esquemas apresentados a seguir podem ser usados isoladamente ou combinados uns com os outros

2.2.2.2.8. Reforço do tejadilho (desenhos 253-12 a 253-14 e 253-23 a 253-24)

Estes são opcionais para carros fabricados até 01.01.2005. Para competições sem co-pilotos, na situação do desenho 253-12 [Figura 2-18], pode ser montado somente um membro diagonal sendo a sua conexão frontal efetuada do lado do condutor. Os membros ilustrados nos desenhos 253-23 e 253-24 [Figura 2-21] podem ser feitos a partir de dois tubos.

2.2.2.2.8.1. *Diagonal para a traseira (Desenhos 253-20 e 253-21)*

A configuração utilizada no desenho 253-21 [Figura 2-21] pode ser substituída pela configuração utilizada no desenho 253-22 [Figura 2-21], se o reforço do tejadilho for o apresentado no desenho 253-14 [Figura 2-18]. Para carros cuja homologação é obtida após 01.01.2014, a configuração do desenho 253-22 [Figura 2-21] é obrigatória se o reforço do tejadilho for o apresentado no desenho 253-14 [Figura 2-18].

2.2.2.2.8.2. *Pontos de fixação da suspensão dianteira (Desenho 253-25)*

As extensões devem estar ligadas aos pontos superiores de montagem da suspensão frontal, ver Figura 2-21.

2.2.2.8.3. *Membros transversais (desenho 253-26 ao 253-28 e 253-30)*

Os membros transversais instalados no arco principal ou entre as barras que vão para a traseira podem ser usadas para a afixação dos cintos de segurança de acordo com o estabelecido acima sobre esta matéria. Para os membros apresentados nos desenhos 253-26 e 253-27 [Figura 2-21], o ângulo entre a perna central e a vertical deve ser no mínimo de 30°.

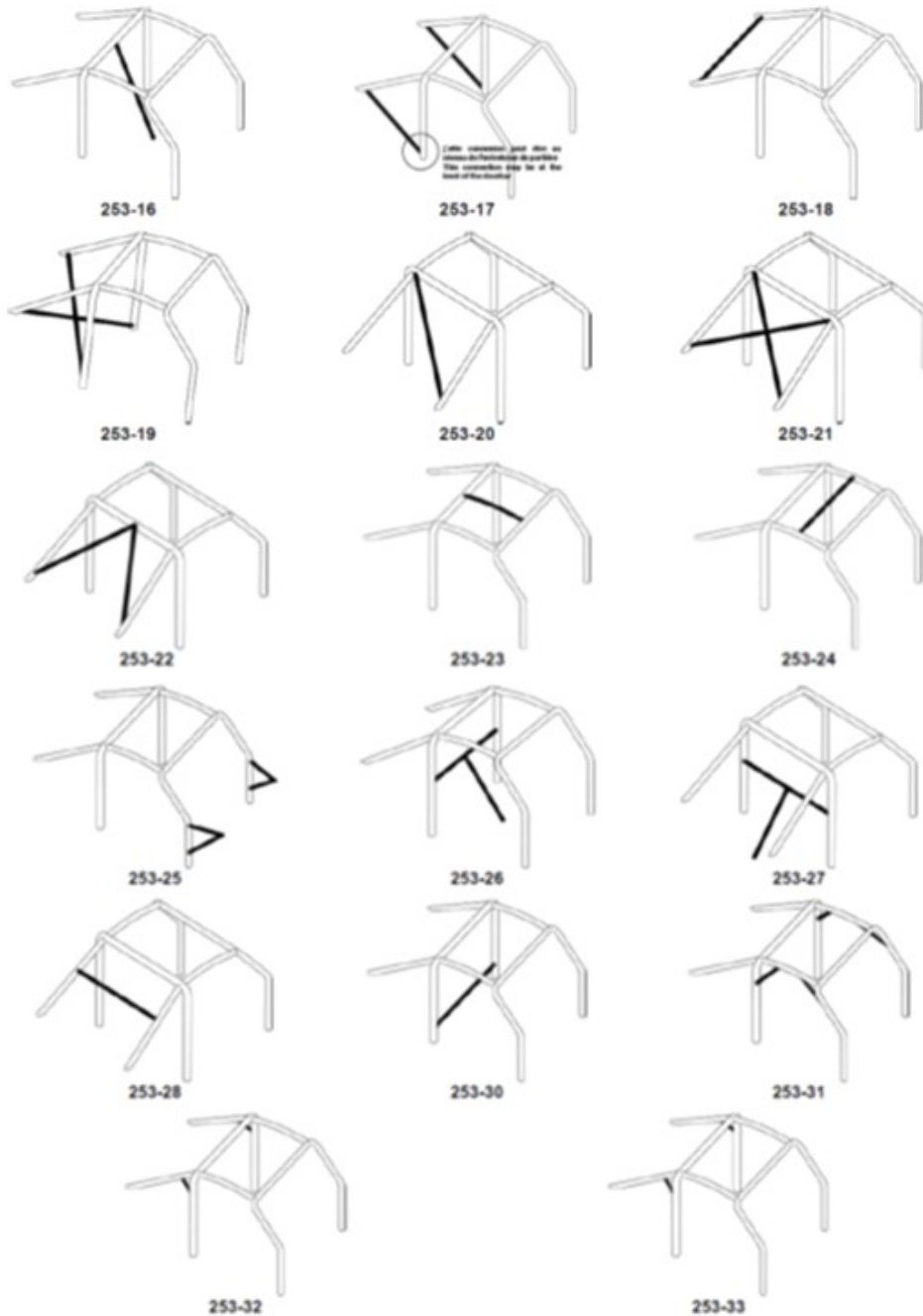


Figura 2-21 – Elementos opcionais

2.2.2.2.9. Reforço de curvas e junções

Os reforços devem ser feitos de tubos ou de chapa dobrada com a forma de U, de acordo com o estabelecido para este tipo de estruturas. A espessura dos componentes que formam o reforço não deve ser inferior a 1,0 mm.

2.2.2.2.10. Configuração mínima do Roll Bar

A configuração mínima do roll bar é definida pela data de homologação, se é necessário co-piloto.

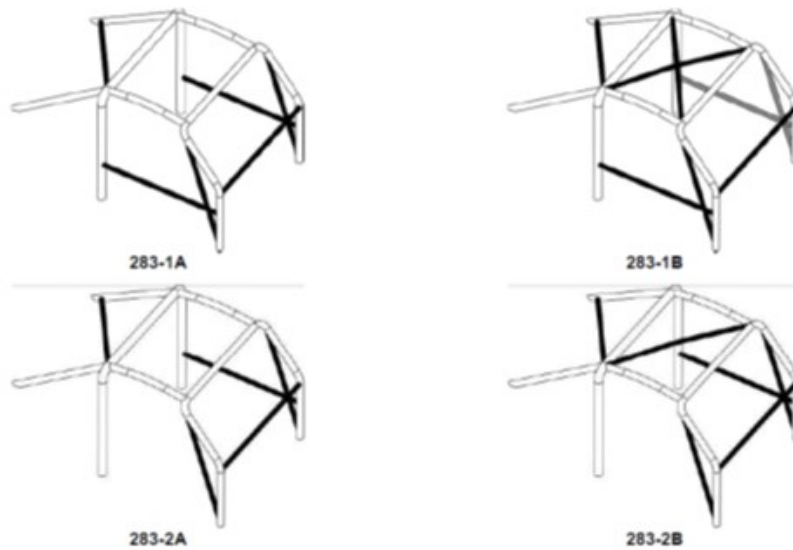


Figura 2-22 – Configurações mínimas de roll bar

Nos desenhos 283-1A e 283-2A [Figura 2-22] é apresentada a configuração mínima exigível para veículos homologados antes de 01.01.2005, para competições com co-piloto e para competições sem co-piloto, respetivamente.

Nos desenhos 283-1B e 283-2B [Figura 2-22] é apresentada a configuração que os veículos homologados após 01.01.2005 devem apresentar, sendo que o primeiro é para competições com co-piloto e o segundo para competições sem co-piloto.

2.2.2.2.11. Membros removíveis

No caso de se utilizar membros removíveis na construção do roll bar, as juntas desmontáveis devem estar de acordo com o aprovado pela FIA para o efeito (desenhos 253-37 a 253-47 [Figura 2-23]). As juntas removíveis devem estar alinhadas com a extensão do eixo dos tubos e não devem ser afastadas. Uma vez que são montados não devem ser soldados. Os parafusos e as porcas devem ter no mínimo a qualidade ISO 8.8.

As juntas desmontáveis apresentadas nos desenhos 253-37, 253-40, 253-43, 253-46 e 253-47 [Figura 2-23], só podem ser usadas para prender os membros e reforços opcionais, e sendo expressamente proibido a sua utilização na união das partes superiores do arco principal, do arco da frente, dos meios arcos laterais e dos arcos laterais.

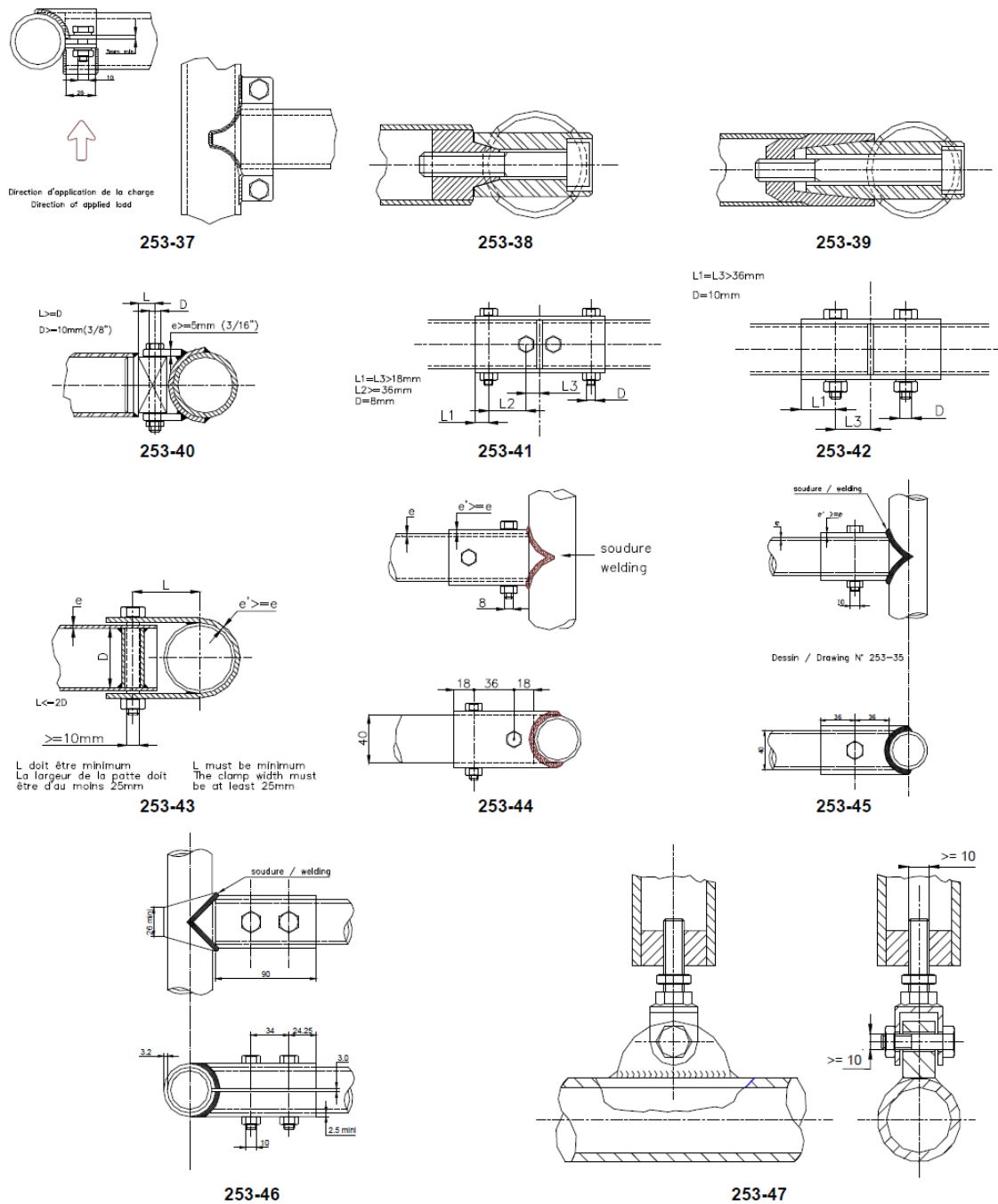


Figura 2-23 – Juntas desmontáveis

2.2.2.2.12. Restrições adicionais

O roll bar deve estar totalmente contido dentro dos limites impostos, 200 mm à frente do eixo da roda dianteira, e até ao eixo da roda traseira.

As barras traseiras podem ser maiores para se poderem anexar ao chassi. As barras traseiras num chassi monocoque podem-se estender além dos pontos de fixação da suspensão traseira, desde que sejam fixos ou soldados num corpo oco do chassi.

A face traseira do encosto de cabeça do condutor sujeito à carga de regulação define a posição do tubo do arco principal, não podendo sobressair além dele numa projeção vertical.

A distância mínima entre os capacetes dos ocupantes e os tubos do roll bar não deve ser inferior a 50 mm.

2.2.2.2.12.1. Ligação do Roll Bar ao chassi

O roll bar deve ser fixo diretamente à carroçaria de aço ou ao chassi principal, ou seja, na estrutura onde vão ser suportadas as cargas da suspensão.

Deve ser aplicado sempre no mínimo um ponto de montagem por cada pilar do arco da frente, dos arcos laterais ou os semi-arcos laterais, do arco principal e das diagonais traseiras.

Para se conseguir uma montagem mais eficiente da carroçaria, o interior original pode ser modificado, como por exemplo recortá-lo, na zona da montagem do roll bar.

Nos pontos de montagem da zona frontal, dos arcos principal, laterais ou semi-arcos laterais, em cada ponto deve ser incluída uma placa de reforço, com pelo menos 3 mm de espessura e 120 cm² de área. Cada pé de suporte deve estar ligado com pelo menos 3 parafusos sobre a placa de reforço de aço que é soldada à carroçaria.

Nos carros homologados após 01.01.2007, a área de 120 cm² deve ser a superfície de contacto entre a placa de reforço e a carroçaria, como os exemplos apresentados com os desenhos 253-50 a 253-56 [Figura 2-24]. No esquema apresentado no desenho 253-52 [Figura 2-24], a placa de reforço não precisa de ser soldada à carroçaria. No caso do desenho 253-54 [Figura 2-24], os lados do ponto de fixação podem ser fechados com uma placa soldada. Os parafusos utilizados para a fixação devem ter um diâmetro mínimo de um M8 e a qualidade mínima correspondente à ISO 8.8. Os elementos de ligação devem ser auto bloqueante ou equipados com anilhas de fecho. O ângulo que os dois parafusos fazem não deve ser inferior a 60 graus (desenho 253-50 [Figura 2-24]).

Os pontos de montagem das barras traseiras, devem ter no mínimo 2 parafusos M8 com pés de montagem com pelo menos 60 cm² de área, ou um parafuso de corte duplo, desde que a secção e a força sejam adequadas. As suas montagens devem ser reforçadas por placas.

Apesar destes serem os requisitos mínimos, podem ser usados mais elementos de fixação, as placas de suporte dos pés de montagem podem ser soldados a placas de reforço, o roll bar pode ser soldado à carroçaria ou ao chassi.

Em casos especiais, onde a carroçaria ou o chassi não sejam em aço, a solda direta entre o roll bar e a carroçaria/chassi é proibida, sendo apenas permitido a ligação da placa de reforço na carroçaria/chassi. Os roll bars que equipam veículos com chassi tubular ou semi-tubular (Grupos T1 e T3) devem ser soldados ao chassi ou ser parte integrante do mesmo. Os pontos de ancoragem dos arcos principal, frontal, lateral ou os semi-arcs laterais devem estar situados ao nível do piso do cockpit.

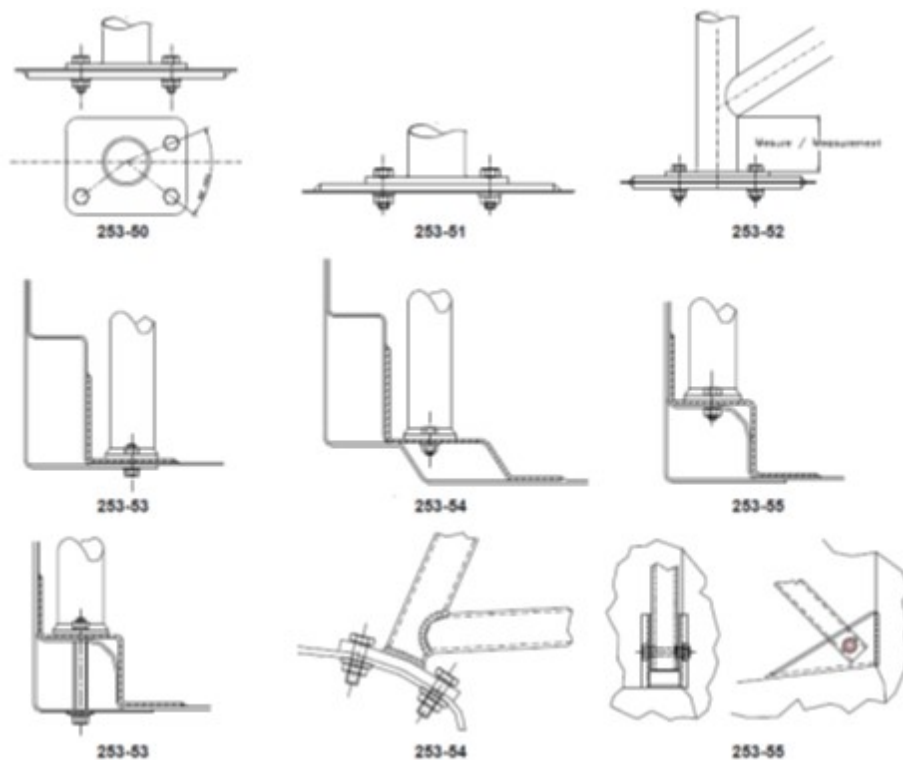


Figura 2-24 – Desenhos 253-50; 253-51; 253-52; 253-53; 253-54; 253-55

2.2.2.2.13. Especificação do tubo

Apenas tubos com secção circular são permitidos. Para veículos dos Grupos T1 e T3 prevalecem os artigos 285-2 e 286-2 respetivamente.

Tabela 2-2 – Especificações do tubo

Material	Resistência à tração	Dimensões mínimas (mm)	Utilização
Aço ao carbono sem costura estirado a frio (percentagem máxima de carbono 0.3%)	350 N/mm ²	45 x 25 ou 50 x 2.0	Barras principais (desenhos 253-1 e 253-3); Barras laterais e barras traseiras (desenho 253-2)
		38 x 2.5 ou 40 x 2.0	Semi-arcos laterais e as outras barras do roll bar (a menos que sejam especificadas de outra forma)

Os valores apresentados na Tabela 2-2, são as especificações que os tubos devem possuir. Na seleção do aço, é preciso atender as boas propriedades de alongamento e soldabilidade adequada. Os tubos devem ser dobrados através de um processo de trabalho a frio e o raio de curvatura central deve ser, no mínimo 3 vezes o diâmetro do tubo. A superfície na zona das dobras deve ser suave e uniforme, sem ondulações ou fissuras.

2.2.2.2.14. Orientação sobre a soldadura

A soldadura deve ser realizada ao longo de todo o perímetro do tubo. Todas as soldas devem ser bem executadas, com penetração total e deve ser utilizado um arco de proteção gasosa. Ao utilizar aços tratados termicamente deve-se seguir as instruções dadas pelos fabricantes ao nível do tipo de eletrodo a utilizar e ao gás de proteção de soldadura.

No artigo 9 fala-se sobre a visibilidade traseira, indicando que o carro deverá possuir dois espelhos retrovisores exteriores, um de cada lado do veículo.

O artigo 10 refere a necessidade de existirem olhais de reboque na parte frontal e traseira do veículo restringidos ao perímetro do mesmo, estes devem estar firmemente fixados ao veículo e devem ser pintados de amarelo, vermelho ou laranja.

No artigo 11 descreve-se toda a informação sobre janelas, vidros e aberturas que o veículo deve possuir. Os vidros devem ser laminados podendo ter películas transparentes, com uma espessura máxima de 40 microns. Todas as outras janelas podem ter um qualquer vidro de segurança desde que homologado.

O artigo 12 refere os elementos de fixação do para-brisas, não apontando qualquer restrição.

O artigo 13 fala do corta-corrente geral com que o veículo deve ser equipado. O corta-corrente deve cortar todos os circuitos elétricos, bateria, alternador, luzes, buzina, ignição, comandos elétricos, bem como o motor. Em todos os motores diesel com injetores não controlados eletronicamente, o corta-corrente deve estar ligado à bomba de combustível. O disjuntor deve ser

colocado no interior do veículo e deve ser acessível ao condutor e ao co-piloto quando estes estiverem sentados e com os cintos de segurança colocados. Devem ainda existir dois interruptores no exterior do veículo, um em cada lado da parte inferior dos pilares.

No artigo 14 está toda a informação relativa aos depósitos de combustíveis autorizados pela FIA, desde o tempo permitido de utilização, passando pelos procedimentos de montagem, a forma de proteção, os abastecimentos, e a forma de ventilação do depósito.

O artigo 15 aborda a proteção contra incêndios, indicando que deve ser colocada uma placa protetora entre a zona do motor e o cockpit para impedir a passagem direta das chamas.

O artigo 16 refere o equipamento de iluminação necessário. Todos os veículos devem estar equipados com os elementos de iluminação exigidos pela Convenção Internacional do Tráfego Rodoviário.

O artigo 17 fala sobre os dispositivos de aviso sonoro, indicando que cada veículo tem que possuir um dispositivo a funcionar corretamente.

O artigo 18 refere-se às rodas suplentes, indicando que cada veículo deve ter no mínimo duas rodas suplentes.

O artigo 19 aborda a utilização das palas de proteção atrás das rodas.

No artigo 20 indica-se as características de fixação da baquet ao chassi. Os suportes devem ser fixados ao chassis através de 4 pontos de fixação por assento utilizando parafusos com um diâmetro mínimo de 8 mm e anilhas, de acordo com o desenho 253-65 [Figura 2-25]. A área mínima de contato entre apoio, chassi e contraplaca é de 40 cm² para cada ponto de montagem. Se forem utilizados sistemas de libertação rápida, estes devem ser capazes de suportar forças verticais e horizontais de 18000 N, aplicadas não simultaneamente.

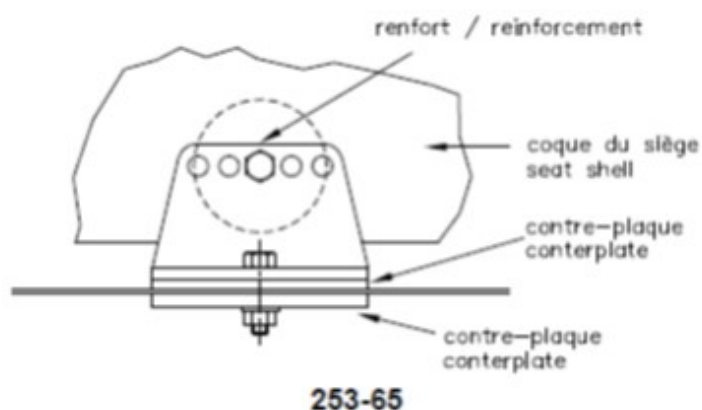


Figura 2-25 – Desenho 253-65

O assento deve ser fixado ao suporte por meio de quatro pontos de fixação, dois na parte frontal e dois na parte traseira do assento, utilizando parafusos com um diâmetro mínimo de 8

mm e reforços integrados no assento. Cada ponto de montagem deve ser capaz de suportar uma força de 15.000 N aplicada em qualquer direção.

Os suportes e as contraplacas podem ser de aço ou de materiais de liga leve, sendo que a sua espessura é respetivamente, 3 mm e 5 mm. A dimensão longitudinal mínima de cada suporte é de 6 cm.

2.3. Veículos Existentes

2.3.1. Mitsubishi Racing Lancer (MRX09)

Este veículo tem como base os antigos Mitsubishi Pajero Evolution, estreados em 2003 pela Mitsubishi Motors, tendo este vencido todas as edições desde 2003 até 2008 da Taça do Mundo de Ralis de Todo-Terreno e o Rali Dakar.

Os Mitsubishi Racing Lancer [Figura 2-26] surgem em 2009, sendo desenvolvidos de acordo com os regulamentos para grupo 1 da FIA, tendo em consideração já as regras que viriam a ser utilizadas em 2010. Este carro foi desenvolvido a partir do conhecimento adquirido pelos engenheiros durante o período de trabalho com o Pajero Evolution.

O chassi foi desenvolvido com recurso a avançadas análises CAE com vista à otimização e ao dimensionamento dos tubos, originando um chassi tubular completamente novo [27].



Figura 2-26 – Mitsubishi Racing Lancer [28]

O nível de desenvolvimento em muitos parâmetros era de tal forma elevado, motorizações à parte, que ainda hoje os carros não precisam de muitas modificações e mantêm-se competitivos.

Na Tabela 2-3 apresenta-se as principais características do modelo.

Tabela 2-3 – Características Técnicas Mitsubishi Racing Lancer [29]

Comprimento	4475 mm
Largura	1990 mm
Altura	1750 mm
Distância entre eixos	2900 mm
Peso total	1900 kg
Tipo de motor	2997cc, 6-cilindros, Turbo-diesel 24-válvulas com sistema de cárter seco
Potência máxima	340 cv, 750Nm
Transmissão	Caixa de velocidades sequencial Sadev 6-velocidades
Suspensão	Triângulos e amortecedores duplos Barra estabilizadora
Outros	Chassis de aço aeronáutico multitubular Carroçaria de fibra de carbono

2.3.2. VW Race Touareg

A Volkswagen com este carro revolucionou os ralis de Todo-Terreno, acima de tudo por ter sido a primeira marca a ganhar este tipo de provas com recurso a carros com proporção diesel. Em 2011 apresentaram o modelo Race Touareg 3 [Figura 2-27], sendo este uma evolução lógica e consistente do Race Touareg 2, passando por evoluir os pontos fracos referenciados pelos engenheiros: Sistema de Refrigeração, caixa de velocidades, e melhorar o motor em altas altitudes, além destes pontos foi realizado um trabalho detalhado de forma a conseguir aumentar as capacidades de desempenho. No final obtiveram um carro com a aerodinâmica renovada, mantendo como base o chassi do antecessor que obtivera bons resultados. A Volkswagen revolucionou o exterior do carro e evoluiu os componentes mecânicos, mantendo sempre o objetivo da vitória no horizonte [30].



Figura 2-27 – Volkswagen Race Touareg 3 [31]

Na Tabela 2-4 apresenta-se as características deste carro, que obteve vitórias no Rally Dakar de 2009, 2010, 2011 e ganhou a Taça mundial de cross-country de 2007. Deixando a competição no final de 2011.

Tabela 2-4 – Especificação das características técnicas do VW Race Touareg [32]

Comprimento	4171 mm
Largura	1996mm
Altura	1762 mm
Distância entre eixos	2820 mm
Peso total	1788 kg
Tipo de motor	Motor 2.5 Turbo-Diesel
Potência máxima	285 cv, 600 Nm
Transmissão	Caixa de Velocidades sequencial de 6 velocidades
Suspensão	Braços duplos; Duplo conjunto mola-amortecedor
Outros	Chassi em aço Carroçaria: fibra de carbono

Na Tabela 2-5, analisam-se as decisões tomadas acerca do chassi implementado neste carro.

Tabela 2-5 – Análise do Chassi

	<p>As soluções encontradas pela VW passam por colocar um perfil tubular de secção retangular como longarina do chassi; Na zona de fixação da suspensão frontal, verifica-se a existência de uma segunda estrutura que aparenta ser para reforço; A separação entre o habitáculo e a parte traseira não encontramos o habitual "X", mas um tubo transversal sendo aplicados outros tubos a servirem de reforço.</p>
	<p>A secção frontal é bastante complexa, devido à existência de vários componentes mecânicos que são fixados nesta zona.</p>
	<p>Na parte traseira verificamos a existência de vários tubos com secção reduzida, estes apenas servem para fixação de componentes;</p>

2.3.3. X-RAID MINI ALL 4TERRAIN

Este carro foi construído e desenvolvido pela X-Raid, que já tinha construído outros carros com base no BMW X5 e outro baseado no BMW X3. Em Junho de 2010 começam o projeto do MINI ALL 4 TERRAIN [Figura 2-28], todo o projeto ao nível de conceito, desenhos técnicos e verificação de conformidade com os regulamentos da FIA foram elaborados pela empresa Magna Steyr. A estrutura e o chassi são fabricados pela empresa Heggemann Autosport GmbH. Após a estreia em 2011 o carro sofreu evoluções, reduziram o centro de gravidade e alargaram o chassi, e reduziram o peso em cerca de 30 kg[33].



Figura 2-28 – Mini All4 Dakar X-Raid [34]




Ganhou a taça do mundo de ralis cross-country em 2012, 2013, e venceu as edições de 2012, 2013, 2014 do Rally Dakar, apresenta-se na Tabela 2-6 as suas características.

Tabela 2-6 – Especificação das características técnicas do Mini All 4 Terrain [35]

Comprimento	4333 mm
Largura	1998 mm
Altura	1966 mm
Distância entre eixos	2900 mm
Peso total	1900 kg
Tipo de motor	Motor turbo diesel 3.0
Potência máxima	310 cv, 700 Nm
Transmissão	Caixa de Velocidades sequencial de 6 velocidades
Suspensão	Braços duplos; Duplo conjunto mola-amortecedor
Outros	Carroçaria em fibra de carbono e kevlar

De seguida analisar-se-á, Tabela 2-7, a estrutura do veículo e faz-se um relato das opções tomadas na sua conceção.

Tabela 2-7 – Análise do chassi

	<p>A estrutura aparenta ser bastante simples, apresentando uma série de reforços; O chassi e o roll cage são construídos de forma independente e posteriormente são soldados, para desta forma terem ligações mais fortes;</p>
	<p>Na parte traseira, encontram-se os tubos de secção obrigatória e depois existem tubos com secções mais reduzidas servindo estes para reforçar a estrutura e ajudar na fixação de vários componentes, como reservatórios, pneus suplentes, sistemas de refrigeração;</p>
	<p>Sendo a zona onde se fixa a suspensão a mais crítica da estrutura, pode-se verificar a existência de bastantes reforços principalmente na zona de ligação dos diferentes tubos</p>

2.3.4. Toyota Hillux

A Toyota Hillux [Figura 2-29], foi desenvolvido pela Imperial Toyota, sediada na África do Sul, tendo a experiência e conhecimento tecnológico, obtido no campeonato Sul-africano de Todo-Terreno. Baseia-se na carrinha de produção em série, alterando os componentes mais frágeis, devido às solicitações a que vai ser sujeita, mantendo sempre que possível os componentes base, as suas principais características são apresentadas na Tabela 2-8 [36].



Figura 2-29 – Toyota Hilux [37]

Estreou-se em 2012, conseguindo um resultado de relevo no Rali Dakar, terminando em 3º lugar, no ano seguinte conseguiu na mesma prova obter um 2º lugar. Como ainda não tinham um programa cliente nessa altura, só disputaram algumas provas pontuais da Taça do Mundo de Rali Cross-Country. Em 2014, iniciaram o programa cliente, obtendo a primeira vitória na primeira prova da Taça do Mundo.

Tabela 2-8 – Especificação das características técnicas da Toyota Hilux [38]

Comprimento	4810 mm
Largura	1995 mm
Altura	1840 mm
Distância entre eixos	2900 mm
Peso total	1975 kg
Tipo de motor	Motor V8 5.0
Potência máxima	355 cv, 560Nm
Transmissão	Caixa de velocidades sequencial de 6 velocidades
Suspensão	Duplo braço
Outros	Chassi tubular Carroçaria em fibra de carbono e kevlar

Na Tabela 2-9 faz-se uma descrição das opções tomadas na conceção do chassi.

Tabela 2-9 – Análise do chassi

	<p>A estrutura deste carro pode ser observada verificando-se que o “X” existente nas portas, não é propriamente um “X” mas um duplo “V” sendo um invertido e com um reforço na ligação; A separação entre o habitáculo e a secção traseira tem duas barras transversais e depois duas barras ao alto;</p>
--	---



A secção traseira é bem complexa. Existem bastantes barras secundárias. A colocação da barra principal longitudinalmente impõe-se para dar consistência e rigidez à secção traseira;



A solução de fixação das suspensões dianteiras neste caso passa por fixa-las separadamente, criando estruturas de suporte independentes; Verifica-se a existência de vários reforços podendo ser estruturais ou para fixação dos componentes mecânicos;

3. Fundamentos Teóricos

O comportamento mecânico dos materiais pode ser descrito pelas suas características de deformação e fratura quando é aplicada tração, compressão, ou tensões multi axiais. A determinação deste comportamento mecânico é influenciada por vários fatores que incluem variáveis metalúrgicas dos materiais, métodos de ensaio, bem como a natureza das tensões aplicadas [39].

3.1 Ensaio de tração

Este ensaio é o método mais comum para a determinação das propriedades mecânicas e o comportamento à deformação de um material [40]. Neste teste uma amostra é sujeita a uma carga uniaxial continuamente crescente enquanto é observado e quantificado o alongamento da amostra [41]. Para obter dados validos neste tipo de ensaios, o corpo sujeito a tração deve estar inicialmente em equilíbrio e ser sujeito a uma deformação homogénea na secção a ensaiar [42].

Com recurso a este ensaio foram também determinadas algumas propriedades mecânicas dos materiais, como o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, a tensão de cedência, a tensão de rotura e a extensão após rotura. Estas são as principais propriedades utilizadas numa situação de projeto mecânico [43].

São selecionadas apenas duas constantes elásticas, aceitando-se que os materiais envolvidos são lineares isotrópicos, estas constantes são suficientes para se descrever completamente o seu comportamento de deformação [44].

As máquinas de ensaios de tração são prensas que dispõem de dois travessões, sendo um deles fixo e o outro móvel, aos quais os provetes são fixados por meio de dispositivos apropriados, podendo utilizar-se maxilas ou amarras. O acionamento do travessão móvel pode ser através de um sistema mecânico, hidráulico, servo-hidráulico. A força é quantificada por células de carga [45].

As extensões são geralmente medidas através de extensómetros do tipo resistivo ou indutivo, que devem ser aplicados diretamente no provete mediante o comprimento de deformação considerado. Sempre que possível, devem medir-se as extensões diretamente no provete a ensaiar, considerando um determinado comprimento inicial de deformação que define os pontos ou linhas de encosto do extensómetro [46].

3.1.1. Curva tensão deformação engenharia

Os resultados de um único teste podem ser aplicados a todas as dimensões e secções transversais das amostras para um determinado material, se se converter a força em tensão e a distância entre as garras em deformação [47].

A tensão nominal é a tensão média no provete de tração que se obtém dividindo a carga pela área inicial da secção transversal do provete, como demonstrado pela equação 3-1. O valor da extensão utilizado numa curva tensão extensão nominal é a extensão linear média obtida pelo quociente entre a variação do comprimento e o comprimento inicial de deformação, tal como indicado na equação 3-2 [46].

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [3-1]$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [3-2]$$

σ – tensão nominal

F – força aplicada

A_0 – área da secção transversal inicial

ε – deformação

Δl – variação do comprimento

l_0 – comprimento inicial

3.1.2. Curva tensão deformação verdadeira

A diferença entre a curva de tensão-deformação verdadeira da nominal passa pela monitorização dos valores reais da tensão e da deformação instantânea que o provete sofre ao longo do ensaio [48].

A tensão verdadeira define-se pela força aplicada na área da secção do provete num instante do ensaio, como demonstrado na equação 3-3. A deformação verdadeira é o somatório da relação entre as deformações individuais que acontecem ao longo do provete e o comprimento inicial, tal como apresentado na equação 3-4 [46].

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [3-3]$$

$$\delta = \frac{\Delta l}{l} \quad [3-4]$$

σ – tensão verdadeira

F – força aplicada

A_0 – área da secção do provete

ε – deformação convencional

Δl – variação do comprimento

l_0 – comprimento inicial

3.1.3. Módulo de Young

O módulo de Young ou de Elasticidade é a razão entre a tensão e a deformação, podendo ser calculado a partir da equação da Lei de Hooke [equação 3-5] [49].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [3-5]$$

onde:

σ – tensão

E – modulo de Young

ε – deformação

Reajustando a equação da lei de Hooke, obtém-se a [equação 3-6] que dará o valor do módulo de Young.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [3-6]$$

3.1.4. Tensão de Cedência

Quando se aplica uma carga a um material, este inicialmente apresenta uma deformação elástica. Nesta região a deformação é totalmente recuperada quando se retira a tensão aplicada. À medida que se vai aumentando a tensão aplicada ao material, este começa apresentar deformação elástica e deformação plástica. O valor crítico da tensão que é necessário para iniciar a deformação plástica é definido como o limite elástico do material [50].

O limite elástico pode ser determinado com precisão, pois depende da sensibilidade dos equipamentos utilizados. O valor da tensão é obtido através da intersecção da linha paralela à parte linear da curva tensão deformação com a curva tensão deformação de engenharia, sendo o ponto de intersecção considerado a tensão de cedência. Por norma quando se desenvolve um projeto utiliza-se este valor.

Em alguns materiais a transição da deformação elástica para a deformação plástica é bastante abrupta. Esta transição é conhecida como o fenómeno ponto de cedência. Quando a deformação plástica se inicia, o valor da tensão cai desde o primeiro ponto de cedência superior,

σ_2 , sendo que o valor diminui e oscila em torno do valor médio definido como o ponto de cedência inferior, σ_1 , podendo observar-se essas variações na Figura 3-1 [51].

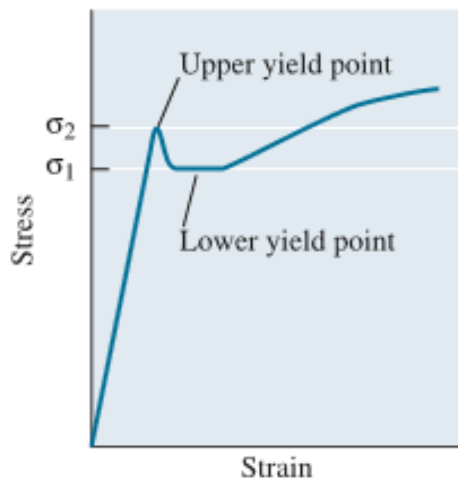


Figura 3-1 – Ponto superior e inferior da tensão de cedência

Aquando do projeto de peças para aplicações de suporte de carga, a deformação plástica deverá ser muito reduzida ou mesmo nenhuma. Em resultado disto é necessário selecionar um material onde a tensão de cálculo é consideravelmente inferior à tensão de cedência, à temperatura que o material vai ser utilizado. Por outro lado, quando queremos moldar materiais em componentes, é necessário aplicar tensões superiores à tensão de cedência [47].

3.1.5. Tensão de Rotura

A tensão que se obtém quando é aplicada a força máxima é a resistência à tração, sendo esta a tensão máxima na curva tensão deformação de engenharia. Em muitos materiais dúcteis, a deformação não permanece uniforme. Num determinado ponto, uma região deformará mais do que os outros e dar-se-á uma grande diminuição da área da secção transversal, esta região é chamada de pescoço [45].

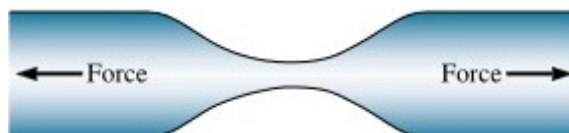


Figura 3-2 – Criação do pescoço durante um ensaio de tração

Este fenómeno é conhecido como estricção sendo visível na Figura 3-2. Uma vez que a área da secção transversal se torna mais pequena, neste ponto é necessária uma força menor para continuar a sua deformação. A resistência à tração é a tensão na qual a estricção começa, como a área reduz após a estricção isso leva a uma diminuição da tensão global. Em testes de compressão, os materiais vão dilatar, assim a estricção é vista apenas num ensaio de tração [47].

3.1.6. Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson, calculado a partir da equação 3-7, é definido como a relação negativa da deformação transversal e a deformação axial quando o corpo é sujeito a esforços de tração [44].

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \quad [3-7]$$

ν_{xy} – coeficiente de Poisson

ε_{yy} – deformação transversal

ε_{xx} – deformação axial

3.2. Ensaio Dinâmico

Componentes de máquinas, veículos e estruturas são frequentemente sujeitos a cargas cíclicas, originando tensões cíclicas que podem provocar danos microscópicos nos materiais. Mesmo com tensões abaixo da resistência máxima de um determinado material, este dano microscópico pode aumentar com os ciclos contínuos até que se torne uma fissura ou outro dano macroscópico que leve à falha do componente. Este processo de danos e falhas devido a carga cíclicas é chamado de fadiga [52].

O processo de fadiga desenvolve quatro fases [46]:

- Nucleação da fenda
- Crescimento microscópico da fenda
- Propagação macroscópica
- Rotura final

As duas primeiras fases correspondem ao período de iniciação da fenda, juntamente com a fase de propagação macroscópica, que corresponde à maior parte do período de vida do componente. A vida à fadiga corresponde ao número de ciclos de aplicação de força até à rotura e corresponde à soma do número de ciclos para a iniciação com o número de ciclos de propagação. O número de ciclos de iniciação é condicionado fortemente pelo acabamento superficial, pela concentração de tensões em zona particulares da peça. Se existir um nível de concentração de tensões elevado o período de iniciação é curto, por outro lado se o nível de concentração de tensões for reduzido ou nulo, o período de iniciação torna-se significativamente mais longo [45].

3.2.1. Ciclos de tensão

Como ciclo de fadiga entende-se a variação da tensão aplicada com o tempo ou ciclo de aplicação de força, podem classificar-se em dois grandes grupos, amplitude de tensão constante e amplitude de tensão variável.

Os ciclos de fadiga a amplitude de tensão constante podem ser alternados, repetido ou pulsante, e os ciclos a amplitude de tensão variável podem ser em blocos, irregulares ou aleatório.

Num ciclo de tensões define-se a amplitude da tensão como a diferença entre a tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$, ou mínima, $\sigma_{m\acute{i}n}$, e a tensão média σ_m . A tensão média é obtida através da equação 3-8 [53]:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad [3-8]$$

A tensão alternada do ciclo é obtida pela equação 3-9:

$$\sigma_a = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_m \quad [3-9]$$

3.2.2. Curva tensão – número de ciclos para a rotura

A curva de tensão *versus* número de ciclos para rotura, também designada por curva S-N ou curva de Wohler, é o método mais convencional de apresentar os resultados obtidos com um ensaio de fadiga.

De forma a obter uma curva S-N, é necessário registar o número de ciclos até à rotura de provetes submetidos a diferentes tensões aplicadas. Cada provete é submetido a uma amplitude de tensão que se mantém constante durante todo o ensaio, este termina quando se atingir a rotura do provete ou quando se exceder o número de ciclos suficientemente longo [54].

Os valores da tensão que entram na curva de tensão *versus* número de ciclos para rotura são tensões nominais e não se consideram o efeito das tensões residuais ou térmicas nem o efeito da concentração de tensões. A tensão máxima nominal deve ser 20% superior ao valor da metade da tensão de rotura do material [45].

3.3. Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza são os mais utilizados na indústria, devido à simplicidade do processo e ao baixo custo dos equipamentos e servem para controlo de qualidade em materiais e peças acabadas. A sua aplicabilidade incluiu a determinação aproximada das características de

ductilidade e resistência de materiais, controlo de qualidade em tratamentos térmicos e mecânicos, controlo de qualidade em processos de conformação e em etapas de fabricação [46].

“O conceito físico de dureza traduz uma propriedade que pode ser interpretada de modo diverso. Em geral, a dureza de um material significa a resistência à penetração ou à deformação permanente da sua superfície.” [45]

Para se obter os valores de dureza existem vários tipos de ensaios que podem ser executados:

- Dureza de risco – utilizado essencialmente por mineralogistas, sendo utilizada a escala Mohs
- Dureza de resalto – utilizado pela indústria metalúrgica e metalomecânica, utiliza a escala de Shore para exprimir os valores de dureza
- Dureza de penetração – é o ensaio mais utilizado nas indústrias metalúrgicas e metalomecânica, para exprimir os valores de dureza recorre a escalas como: Brinell, Vickers, Rockwell.

3.3.1. Ensaio Vickers

Este ensaio usa uma pirâmide quadrangular de diamante como instrumento de impressão. O ângulo entre as faces opostas da pirâmide é 136° , valor que foi escolhido de modo a obter uma boa relação entre o valor das durezas Vickers e Brinell [55].

O valor da dureza Vickers é proporcional ao quociente da força de ensaio (F) em [kgf] pela área lateral da impressão em mm^2 , a qual se presume ser uma pirâmide reta de base quadrada com um ângulo no vértice igual ao do penetrador [45].

A equação 3-10 indica o método de cálculo da dureza Vickers.

$$HV = \frac{1.854}{d^2} P \quad [3-10]$$

Onde:

HV – índice de dureza

P – carga aplicada [kgf]

d – comprimento médio [mm]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [3-11]$$

Sendo

d – comprimento médio

d_1 – comprimento 1

d_2 – comprimento 2

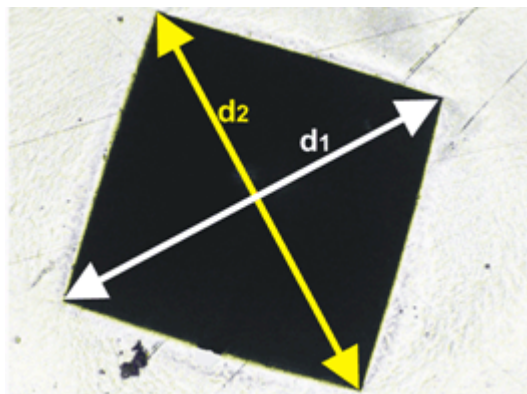


Figura 3-3 – Indentação gerada pela matriz

Para realizar este ensaio é necessário que a amostra esteja polida, com bom acabamento superficial, deve estar apoiada convenientemente para que não haja deslocamentos para que o eixo do penetrador fique perpendicular ao eixo da amostra. A distância existente entre o limite da amostra e o centro da matriz deve ser superior em duas vezes o comprimento. Estes ensaios devem ser realizados à temperatura ambiente. Para o aço, o tempo de aplicação de carga deve ser entre 10 e 30 segundos [45].

3.4. Análise Modal

Nas últimas décadas, a análise modal assumiu-se como um dos principais métodos utilizados para a determinação, melhoria e otimização das características dinâmicas de estruturas [56].

A análise modal baseia-se na resposta vibratória de um sistema dinâmico invariante no tempo, podendo ser expresso através da combinação linear de um conjunto de movimentos harmônicos simples, designados por modos de vibração naturais.

O objetivo deste tipo de análise é caracterizar a resposta dinâmica da estrutura descrevendo o seu comportamento dinâmico, sendo necessário descrever a estrutura em relação aos seus modos de vibração, sendo estas as características próprias da estrutura e ficando definidos pelos parâmetros modais. Os parâmetros modais ou características naturais são as frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração [56].

A frequência natural é a frequência a que a estrutura vibra, e corresponde à oscilação provocada pela força aplicada, quando esta frequência é igual ou se encontra perto da frequência da estrutura significa que a estrutura se encontra em ressonância. Os fatores de amortecimento

indicam a capacidade de absorção de energia da estrutura até voltar ao ponto de equilíbrio dinâmico. Através dos modos de vibração (estes dependem das propriedades dos materiais e das condições de fronteira), consegue-se visualizar a forma como a estrutura se move, correspondendo a cada modo de vibração uma frequência natural [57].

De notar que a primeira frequência natural é a mais importante, pois é nela que se verifica a maior quantidade de energia [56].

Os processos de análise modal são divididos em três etapas

- Descrição da estrutura e criação do modelo espacial;
- Modos de vibração e modelo modal;
- Níveis de resposta e modelo de resposta;

O modelo espacial descreve a estrutura a partir das suas propriedades físicas. Com base nas equações de movimento, obtém-se a matriz de massa $[M]$, matriz de amortecimento viscoso $[C]$ e a matriz de rigidez $[K]$, sendo estas apresentadas como equações diferenciais parciais [58].

Obtém-se o modelo modal a partir da descrição da estrutura através das frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração. Com este tipo de modelo consegue-se descrever as várias formas de como a estrutura vibra naturalmente, sem que seja influenciada por qualquer excitação ou força externa, devendo-se a isto à designação de modos de vibração naturais. A resposta do sistema depende das propriedades da estrutura e das condições externas, como por exemplo o tipo de excitação aplicado.

A área da análise modal requer que o utilizador tenha conhecimentos nas seguintes áreas [55].

- Conceitos base das vibrações
- Medição experimental de vibrações.
- Análise de dados experimentais.

3.4.1. Teoria das vibrações

Utiliza-se o termo vibração para descrever a oscilação de um sistema mecânico, sendo caracterizada pela frequência e pela amplitude [59].

Um qualquer sistema vibratório é composto pelos seguintes elementos: massa, mola e amortecedor. Um exemplo destes sistemas é apresentado na Figura 3.4, onde M corresponde à massa do sistema, K à rigidez da mola e c ao amortecimento [57].

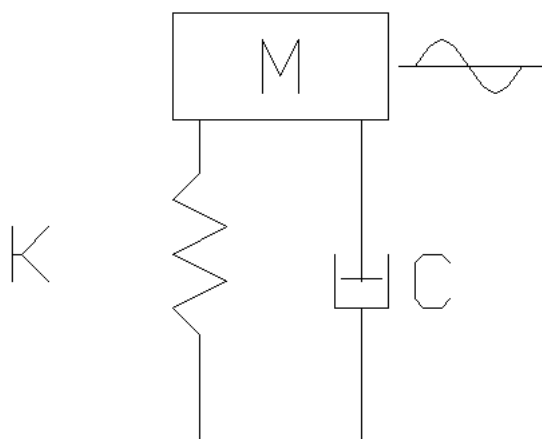


Figura 3-4 – Sistema vibratório

Os sistemas vibratórios são classificados pela análise do número de graus de liberdade, podendo conter um ou vários graus de liberdade. A quantidade de graus de liberdade é definida pelo menor número de coordenadas independentes que determinem completamente a posição de todo o sistema em qualquer espaço temporal. Caso o sistema possua um número de graus de liberdade infinitos, é designado por sistema contínuo [60].

Relativamente às vibrações, estas podem ser identificados com excitação externa, existência de amortecimento, linearidade e previsibilidade. A excitação externa pode ser livre ou forçada. Considera-se vibração livre se se efetuar excitação inicial e depois esta se mantiver a vibrar livremente. A vibração forçada acontece se se excitar continuamente por meio de forças externas dependentes do tempo. O amortecimento é caracterizado pelo facto de o sistema preservar ou dissipar energia. A vibração com amortecimento acontece quando existe dissipação de energia no sistema. Se o sistema preservar a energia ao longo do tempo tem-se vibração sem amortecimento. A vibração é linear se os componentes do sistema vibratório possuírem comportamento linear [61].

As vibrações podem ser expressas pelo movimento do sistema em torno de um ponto, através do deslocamento ou pela velocidade e aceleração. O movimento do sistema pode ser harmónico, periódico ou aleatório, impulsivo e transiente [60].

3.5. Otimização

Combinar os métodos de otimização e os métodos de simulação é a forma mais célere de atingir a solução ótima do problema.

Com a otimização de um projeto é possível reduzir o custo de produção, aumentar a eficiência de produção. O algoritmo de otimização é executado de forma iterativa, comparando as diferentes soluções até encontrar o valor ótimo ou uma solução satisfatória [58].

Para alcançar uma solução ideal deve-se compreender a formulação matemática dos métodos de otimização, uma vez que é necessário estabelecer as condições matemáticas mais aproximadas ao modelo físico. As técnicas de otimização são utilizadas para determinar um conjunto de parâmetros $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ que podem ser definidos como ótimos em determinadas condições, esses parâmetros são as variáveis de otimização. Uma função objetivo $q(x)$ é sujeita a um processo de minimização ou maximização, podendo ser linear ou não linear, e restringida ou não-restringida. As restrições são as funções que restringem as variáveis de otimização, e podem ser de três tipos: restrições de igualdade, restrições de desigualdade e restrições limite superior/inferior como demonstrado a seguir [58]:

$$g(x) = 0 \quad (i=1, \dots, m_e); \text{ com } m_e \text{ a ser a restrição de igualdade}$$

$$h(x) = 0 \quad (j=1, \dots, m_i); \text{ com } m_i \text{ a ser a restrição de desigualdade}$$

$$x_k^l, x_k^u \quad (k=1, \dots, m_s), \text{ com } m_s \text{ a ser as restrições para os limites inferior e superior}$$

Geralmente descreve-se um problema de otimização pela minimização/maximização da função objetivo:

$$\min q(x)$$

sujeito às condições de estrangimentos

$$g(x) = 0$$

$$h(x) \leq 0$$

$$x_k^l \leq x_k \leq x_k^u$$

sendo x o vetor dos parâmetros de otimização:

$$q(x), g(x) \text{ and } h(x) \text{ são as funções}$$

Para conseguir uma solução eficaz, é necessário considerar o número de restrições, as variáveis de otimização, as características do objetivo e funções de estrangimento. Na programação linear e quadrática, existem procedimentos numéricos para obter a solução. Para otimização não linear, existe a necessidade de se executar um procedimento iterativo, conseguida pela solução de uma programação linear, quadrática, ou mesmo um problema de otimização não-restringido. A função objetivo $q(x)$ tem como objetivo estabelecer a relação entre o objetivo do projeto e as suas variáveis. Essas variáveis podem ser propriedades do material ou parâmetros geométricos [58].

3.6. Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos, MEF, tornou-se uma ferramenta poderosa para a solução numérica de uma vasta gama de problemas de engenharia. Com os avanços na tecnologia dos computadores e nos sistemas de CAD, problemas complexos podem ser modelados com relativa facilidade. Desta forma várias configurações alternativas podem ser testadas num computador antes de se construir o primeiro protótipo [62].

Pode-se aplicar o MEF, em várias situações do quotidiano de um projetista, reduzindo o tempo final do projeto pois permite excluir situações que estariam em análise mas que não seriam benéficas para o projeto. Com recurso a um software de análise numérica é possível realizar os seguintes tipos de simulações/análises [63]:

- Simulação de montagens: estudo das interações entre os componentes ainda na fase de protótipo virtual, proporcionando a redução do número de protótipos físicos, através de análises de resposta da tensão, deformação de deslocamento;
- Simulação de mecanismos: simulação do movimento em mecanismos de motores, atuadores, redutores, entre outros;
- Simulação de estruturas soldadas: validação de estruturas soldadas sob cargas de pressão, forças e carregamentos de suportes, visualização de resultados nas seções;
- Previsão de falhas: permite analisar se o produto terá problemas mecânicos referentes a tensões acima do limite, problemas de fadiga e encurvadura;
- Otimização paramétrica: avaliação dos melhores parâmetros de projeto para a minimização de peso e tensão dos componentes;
- Frequências naturais: cálculo das frequências naturais de vibração dos componentes, de modo a evitar o surgimento de problemas de ressonâncias;
- Transferência de calor: os processos que envolvem troca térmica, como condução, convecção e radiação podem ser simulados para que a temperatura possa ser analisada em cada ponto do conjunto;
- Impacto: simulação virtual do comportamento de impacto de objetos em queda livre; permite a redução do número de protótipos físicos;
- Fadiga: cálculo da vida útil de um produto através da aplicação de esforços cíclicos; os resultados mostram regiões críticas a serem alteradas no projeto;

o Vasos de pressão: combinação de cargas estruturais e térmicas, linearização de tensão em seções;

As vantagens do MEF, sobre a maioria dos métodos de análise numérica, são apresentadas de seguida:

- É aplicável a qualquer área da engenharia: transferência de calor, análise de tensões, campos magnéticos;
- Não tem restrições geométricas, a região analisada pode ter qualquer forma;
- As condições de fronteira e os carregamentos não são restritos. Por exemplo, na análise de tensão, qualquer parte de um corpo podem ser suportado, sendo que as forças distribuídas ou concentradas podem ser aplicados a qualquer outra parte;
- As propriedades dos materiais podem variar consoante o elemento, podendo até variar dentro do mesmo elemento;
- Os componentes que têm comportamentos diferentes, e várias descrições matemáticas, podendo ser combinados, desta forma um único modelo de elementos finitos pode conter barras, placas ou elementos de fricção;
- Uma estrutura em elementos finitos assemelha-se ao corpo ou região real a ser analisada;

Outros métodos numéricos têm surgido desde que apareceu o MEF, mas, atualmente, este é o método mais confiável [64].

No método de elementos finitos de determinado domínio, este é dividido em subdomínios, chamados de elementos finitos, e a solução aproximada para o problema é desenvolvido ao longo de cada elemento.

Para formular uma solução de um problema através do método dos elementos finitos é necessário [65]:

- discretização do meio contínuo;
- definição da matriz de rigidez e do vetor de solicitação de cada um dos elementos;
- Formação das matrizes de rigidez e do vetor solicitação global;
- resolução do sistema de equações com vista a determinar os deslocamentos nodais da estrutura;
- Determinação das tensões a partir dos deslocamentos;

Embora os passos acima ilustrem a ideia básica do método de elementos finitos existem vários outros recursos que se apresentam de seguida [66].

- Podemos discretizar a geometria do modelo, dependendo da sua forma, utilizando uma malha com mais que um tipo de elemento. Por exemplo, na aproximação de um domínio irregular, que pode utilizar malha retangular e triangular. No entanto, as interfaces de elemento devem ser compatíveis, para que a solução seja contínua;
- Se for utilizado mais que um tipo de elemento na representação do modelo, um exemplo de cada tipo deve ser isolado e as suas equações desenvolvidas individualmente;
- As equações que regem a maioria dos problemas considerados são equações diferenciais. Na maioria dos casos as equações não podem ser resolvidas por um elemento, por duas razões: primeiro, eles não permitem a solução exata sendo aqui que os métodos variacionais entram em jogo. Em segundo lugar, as equações discretas obtidas nos métodos variacionais não podem ser resolvidas independente dos restantes elementos, porque na montagem dos elementos tem que existir uma certa continuidade, limite e/ou as condições iniciais;
- Existem duas diferenças principais na forma da solução aproximada apresentada pelo método dos elementos finitos e os métodos clássicos variacionais (isto é, métodos variacionais aplicados a toda a zona). Em primeiro lugar, em vez de representar a solução de u como uma combinação linear $u_h = \sum_j c_j \phi_j$ relativamente aos parâmetros arbitrários, c_j , como nos métodos variacionais, no método dos elementos finitos, a solução é muitas vezes representada como uma combinação linear $u_h = \sum_j c_j \phi_j$ em relação aos termos de u_j e u_h (e possivelmente os seus derivados) nos pontos nodais. Em segundo lugar, as funções aproximadas no método dos elementos finitos são frequentemente polinômios que são derivados usando a teoria de interpolação. No entanto, o método do elemento finito não se restringe à utilização das aproximações que são combinações lineares dos valores nodais u_j e interpolação ψ_j que são polinômios algébricos. Pode-se usar variáveis nodais e funções não polinomiais para aproximar uma função.
- O número e a localização dos nós dependem da geometria do elemento, do grau de aproximação polinomial, e da parte integrante ponderada da equação. Ao representar a solução necessária, em relação aos valores dos nós, obtemos diretamente a solução aproximada nos nós.
- O conjunto de elementos, em um caso geral, baseia-se na ideia de que a solução (e, possivelmente, seus derivados para equações de ordem superior) é contínua nos limites entre elementos.

- Em geral, o conjunto de elementos finitos é sujeito a condições de fronteira e/ou condições iniciais. As equações discretas associadas com a malha de elementos finitos são apenas resolvidas após as condições de fronteira e/ou as condições iniciais terem sido impostas.

- Existem três possibilidades de erro numa solução de elementos finitos: a) aqueles devidos à aproximação do domínio; b) aqueles devidos à aproximação da solução; e c) os decorrentes de computação numérica (por exemplo, integração numérica e erro de arredondamento num computador). A deteção desses erros, no geral, não é simples. No entanto, sob certas condições, podem ser detetadas num elemento ou problema.

- A precisão e a convergência da solução dos elementos finitos dependem da equação diferencial, a sua forma integral, e do elemento usado. Rigor refere-se à diferença entre a solução exata e a solução dos elementos finitos, enquanto a convergência se refere à precisão quando o número de elementos da malha é aumentado.

- Para problemas dependentes do tempo, numa formulação em duas fases segue-se geralmente esta sequência: na primeira fase as equações diferenciais são aproximadas por elementos finitos para se obter um conjunto de equações diferenciais ordinárias em relação ao tempo. Na segunda as equações diferenciais relativas ao tempo são resolvidas exatamente ou mais aproximadas por métodos variacionais ou pelo método das diferenças finitas para obter equações algébricas, que são resolvidos para os valores nodais.

- Os computadores desktop de hoje são mais poderosos do que os supercomputadores que existiam quando o método dos elementos finitos foi implementado pela primeira vez. Consequentemente, o tempo de análise foi reduzido consideravelmente, desde que a malha usada para modelar o modelo seja adequada.

- Métodos livres de elemento que não necessitam de montagem (porque não há elementos) estão a ser desenvolvidos. Tal método tem aplicações em mecânica da fratura e nos problemas de propagação de ondas, onde uma nova malha é necessária.

De forma a facilitar a resolução destes problemas foram surgindo vários softwares, como por exemplo o Ansys, COSMOS/M, Abaqus, MSC/NASTRAN. Neste trabalho vai-se utilizar o Ansys.

3.6.1. Ansys

É um programa computacional cujo procedimento de análise e cálculo se baseia no Método dos Elementos Finitos. Este software específico permite:

- a construção de modelos computacionais ou a transferência de modelos CAD das estruturas, dos produtos, dos componentes ou dos sistemas a serem analisados;

- a aplicação das cargas e dados de maneira amigável;
- o estudo das respostas físicas, tais como níveis de esforço, distribuições da temperatura ou campos eletromagnéticos;
- o aperfeiçoamento prematuro dos projetos de maneira a reduzir custos de fabrico de protótipos;
- o teste de protótipo em ambientes onde de outra maneira seria indesejável ou impossível (por exemplo, aplicações biomédicas).

As simulações dividem-se em 3 fases distintas: o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento [67].

Pré-Processamento

Nesta fase aborda-se a escolha dos materiais, dos elementos, a definição da geometria em estudo, os modos de ligação e a escolha da malha.

A escolha dos materiais é feita no módulo “*Engineering Data*” onde se atribuí todas as características e propriedades dos materiais. A definição da geometria pode ser efetuada por dois métodos distintos, por importação de uma geometria de outro software ou cria-se a geometria no módulo “*Design Modeler*”.

Este estudo vai ser realizado com recurso a elementos de viga, com estes consegue-se criar uma idealização matemática unidimensional de uma estrutura 3D, oferecendo soluções computacionais eficientes quando comparados com elementos sólidos e de casca. Para este caso considera-se o elemento Beam 188, pois é adequado para a análise de estruturas de viga com espessura fina a moderadamente grossa. O elemento é baseado na teoria de viga de Timoshenko, que inclui efeitos das tensões de corte na deformação. O BEAM188 tem seis ou sete graus de liberdade em cada nó, estes incluem os deslocamentos nas direções x, y e z e a movimento de rotação nas mesmas direções, o sétimo grau de liberdade (magnitude da deformação) é opcional. Este elemento é adequado para estudos lineares, grandes rotações, e/ou aplicações não-lineares de grande deformação [68].

Processamento

Nesta fase define-se as condições iniciais da simulação, como os pontos de fixação, as forças aplicadas, bem como as definições dos ensaios, onde se estabelece os parâmetros que se pretende analisar. Numa análise modal define-se os modos de vibração enquanto numa análise estática se define a deformação, o momento torsor e a flexão.

Pós-Processamento

Esta fase é onde se extrai e visualiza a resposta do sistema à rotina inserida anteriormente.

3.6.1.1. Análise Estática

A análise estática tem como finalidade quantificar a magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos que se manifestam em qualquer estrutura, quando esta é submetida a um carregamento arbitrário. Podem incluir cargas de inercia constantes (como por exemplo a gravidade ou a velocidade de rotação) Com o recurso a software de MEF é possível obter uma vasta gama de resultados, compatíveis com o carregamento aplicado [68].

Com este tipo de análise determina-se os deslocamentos, as tensões, as deformações e as forças numa estrutura ou as componentes causadas pela aplicação de cargas. As condições de carga e de resposta estacionaria são assumidas, isto é as cargas e a resposta da estrutura variam relativamente ao tempo. Pode-se aplicar vários tipos de cargas, como por exemplo forças aplicadas externamente e pressões, forças inerciais no estado de equilíbrio, imposição de deslocamentos, temperaturas (devido a tensão térmica) e fluência.

3.6.1.2. Análise Modal

Análise Modal na família de produtos da ANSYS, Inc. é uma análise linear. Quaisquer não-linearidades, como plasticidade e contato de elementos, são ignorados, mesmo que sejam definidos [69].

A análise modal é utilizada para determinar as características de vibração (frequências naturais e modos de vibração) de uma estrutura ou de um componente de uma máquina enquanto ela está em fase de projeto. Pode também servir como ponto de partida para outro tipo de análise dinâmica mais pormenorizada, como a análise dinâmica transiente, a análise harmónica, ou a análise de espectro.

Para se obter os resultados de uma análise modal é necessário definir o modo de extração dos resultados, Block Lanczos, PCG Lanczos, Supernode, Unsymmetric Method, Subspace Method, Unsymmetric Method, Damped Method, QR Damped Method, Storage of Complex Results.

O método de solução do valor próprio do modo de Block Lanczos, utiliza o algoritmo Lanczos que se baseia num bloco de vetores. Estes método é poderoso na procura de frequências naturais numa parte do espectro dos valores próprios de um sistema. A taxa de convergência das frequências próprias serão aproximadamente as mesmas quando se extraem modos na gama média e superior do espectro assim como quando se extraem os modos mais baixos [68, 69].

Este método é bastante robusto numa ampla gama de aplicações, sendo que alguns elementos podem causar dificuldades na obtenção dos valores próprios, devido à utilização do método do multiplicador de Lagrange [69].

A dinâmica das estruturas estuda as modificações ocorridas na quantidade de movimento dos sistemas, como por exemplo a ação dos motores nos seus apoios, impacto de cargas em sistemas estruturais e as cargas produzidas pelo movimento de pessoas das estruturas. Normalmente leva-se em consideração as vibrações livres, que são provocadas pela energia potencial e cinética da estrutura, determinando as frequências naturais dos modos de vibração [69].

3.6.2. Matlab

É um software que apresenta um ambiente computacional, permitindo a execução de computação numérica de alto desempenho bem como a visualização do trabalho desenvolvido. Com o MATLAB é possível executar análises numéricas, cálculo matricial, processamento de sinais e gráficos num ambiente de fácil utilização.

O MATLAB apresenta um conjunto de soluções para aplicações específicas, chamadas “*Toolboxes*”, sendo estas uma coletânea de funções, gravadas em ficheiros do próprio software (m files), que foram previamente programadas de forma a ampliar as capacidades do programa. Com as “*Toolboxes*” pode-se resolver vários problemas em diversas áreas, incluindo a otimização, processamento de sinais, sistemas de simulações dinâmicas, entre outros [70].

Existem diversos tipos de otimização, podendo ser linear, não linear, estrangida, não estrangida. É necessário estabelecer as funções objetivo para as rotinas de otimização. Consoante o tipo de otimização utiliza-se uma função objetivo para a minimização ou maximização [71].

Na Tabela 3-1 apresenta-se as funções disponíveis no modulo de otimização para diferentes problemas.

Neste caso vai utilizar-se a “*toolbox*” referente à otimização para se utilizar nomeadamente a função de otimização necessária, *fmincon*. A função *fmincon* é utilizada para otimizar a função objetivo: com esta função executa-se o tipo de otimização através da "minimização restrita" [72].

Tabela 3-1 – Resumo das funções de otimização

Tipo	Função	Descrição
Scalar Minimization	fminbnd	Encontra o valor mínimo da função para uma variável num intervalo fixo;
Unconstrained Minimization	fminunc, fminsearch	Encontra o valor mínimo da função sem restrições com múltiplas variáveis;
Linear Programming	linprog	Resolve problemas de programação linear
Quadratic Programming	quadprog	Resolve problemas de programação quadrática
Constrained Minimization	fmincon	Encontra o valor mínimo da função constrangida com múltiplas variáveis não-lineares
Goal Attainment	fgoalattain	Resolve problemas com vários objetivos até os atingir
Minimax	fminimax	Minimiza o valor do pior caso de um conjunto de funções com múltiplas variáveis, a partir de uma estimativa inicial
Semi-Infinite Minimization	fseminf	Encontra o valor mínimo da função semi-infinitamente constrangida não-linear com múltiplas variáveis

3.6.3. Updating

Este software tem como objetivo obter uma solução ótima para um determinado problema, utilizando um método de otimização, utilizando o Matlab sendo que as análises são efetuados com recurso ao software “Ansys”. O software gera a análise dos resultados e a alteração do valor das variáveis automaticamente através dos algoritmos inseridos.

Para que o “Matlab” consiga processar o ficheiro do programa “Ansys”, este tem que possuir uma estrutura específica, que permita o controlo dos valores obtidos bem como a saída dos resultados [58].

O programa principal, em Matlab encontra-se num ficheiro denominado “*exper34.m*”. Existem diversos programas independentes, *corri9.m*, *escr9.m*, *calcon21a.m*, *nlcOUT6.m*, *escri9.m*, *MACfun6.m*, *fest.m* e *extrairest.m*, que possuem as funções para cada fase do processo de otimização. Durante a execução do *exper34* outros programas podem ser realizados em simultâneo. De notar que existem programas dentro de outros.

O programa principal executa o Ansys para obter os resultados iniciais da análise estática, utilizando o ficheiro de entrada *MODnum.txt*. Na fase seguinte é invocado o ficheiro *escr9.m*, que copia o ficheiro de entrada e cria um ficheiro novo, chamando-lhe *modif.txt*, sendo destinado a ser alterado durante a otimização. De seguida é chamado o ficheiro *calcon21a.m*, este identifica as linhas que contêm os parâmetros variáveis do modelo, arquivando-os e relacionando-os com os fatores de variação estabelecidos para cada variável. Os fatores de variação podem ser diferentes

para o limite superior ou inferior. Após isto o programa principal estabelece o vetor de valores inicial realizando os cálculos utilizando os fatores de variação estabelecidos. Na fase seguinte, através do ficheiro *MACfun6.m*, é lido o vetor inicial e compara-o com a função objetivo. Após a realização de todas as iterações, envia para o programa principal o valor ótimo das variáveis. Através do ficheiro *nlcOUT.m*, executa-se o *escrim.m* que corre o ficheiro *modif.txt*.

De seguida apresenta-se a estrutura de processamento do software de forma resumida [73]:
exper34;

- corri9;
 - Executa o ficheiro do modelo numérico inicial no Ansys e sai após obter os resultados;
- escri9;
 - Conta as linhas do ficheiro MODnum.txt;
 - Cria o ficheiro modif.txt file, similar ao MODnum.txt inicial;
 - O ficheiro modif.txt é modificado durante as iterações da otimização;
 - Abre o ficheiro modif.txt para escrever as alterações e guarda;

Cria um conjunto de variáveis globais (expert34);

Estabelece-se o peso de cada variável (expert34);

Identifica as linhas com parâmetros e guarda-as numa matriz. Calcula restrições para uso no vetor x_0 e escreve os resultado numa matriz;

- calcon21a;
 - Identifica as linhas com parâmetros e guarda-as numa matriz;
 - Calcula as restrições;
 - Realiza-se um ciclo para remover as letras da string;
 - Associa caracter a caracter;
- nlcOUT6;
 - escreve no modif.txt;
 - Executa o ficheiro modif.txt no Ansys e sai após obter o resultados;
 - *escrim*;
 - ❖ Altera-se o ficheiro modif.txt de forma a poder-se atualizar os parâmetros;

Inicializa os valores iniciais, incluindo o vetor inicial, x_0 , e os valores iniciais da matriz PRNx (exper34);

Constrói a matriz PRNx, contendo os valores iniciais das restrições, com o objetivo de modificar o ficheiro modif.txt de acordo com os novos valores obtidos pelo programa MATLAB (exper34);

Cria uma matriz com as restrições (exper34);

Constrói a matriz de restrição do limite inferior “LB” e do limite superior “UB” (exper34);

Invoca a rotina de otimização, utilizando a função fmincon e o código de função objetivo Macfun6 (exper34);

Escreve no ecrã os resultados da otimização (exper34);

- nlcOUT6;
 - Grava o ficheiro modif.txt com as variáveis de projeto ótimas e executa-o;
 - escrim;
 - Altera o ficheiro modif.txt de modo a escrever os parâmetros atualizados;

Limpa o conteúdo das variáveis utilizadas (exper34);

4. Aplicação a um caso prático

Ao longo deste capítulo irá apresentar-se o trabalho prático desenvolvido, sendo dividido em três subcapítulos: ensaios experimentais, conceção e otimização. Nos ensaios experimentais aborda-se a análise química e as características mecânicas do material. A conceção do modelo numérico passa pela modelação do chassi, pelas condições iniciais para executar as simulações numéricas. A otimização apresentando-se ainda os procedimentos efetuados para proceder à otimização do chassi.

4.1. Ensaios Experimentais

Neste subcapítulo apresenta-se a composição química e as características mecânicas do material. Para os ensaios realizados indica-se a forma como estes decorreram e apresentam-se os resultados obtidos.

4.1.1. Descrição dos equipamentos

Neste subcapítulo fez-se uma descrição sumária das características das máquinas utilizadas nos ensaios efetuados.

4.1.1.1. *Máquina de ensaios universais de materiais*

Os ensaios experimentais foram realizados com recurso à máquina de ensaios universais [Figura 4-1], existente no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica, DARTEC M1000 L2-1 tendo uma capacidade de carga de 600 KN.




Figura 4-1 – Máquina de ensaios universais do LEM

4.1.1.2. Extensometria

No decorrer dos ensaios utilizou-se um extensómetro mecânico da marca Sander, modelo EXA100-10 as principais características podem ser consultadas na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Características do Extensómetro Mecânico [74]

	Comprimento	100 mm
	Gama de Medição	+/- 10 mm
	Erro máximo de leitura	+/- 0,2%
	Força de Ativação	2,5 N
	Precisão	0.001 mm

Como também existe a necessidade de obter o coeficiente de Poisson, é necessário medir a deformação transversal do provete, para tal foi utilizado um extensómetro elétrico.

4.1.2. Análise química

Para realizar esta análise é necessário uma amostra do material, cortou-se uma secção com 15 mm x 12 mm. Esta análise foi efetuada no Laboratório de Metalurgia da Universidade do Minho apresentando-se os resultados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 – Composição química do material

Nome do composto	Constituição (%)	Erro Absoluto (%)
Carbono [C]	0.25	
Crómio [Cr]	1.01	0.014
Cobre [Cu]	0.0237	0.001
Ferro [Fe]	97.6	0.2
Manganês [Mn]	0.634	0.01
Molibdénio [Mo]	0.215	0.003
Níquel [Ni]	0.0237	0.002
Fósforo [P]	0.0205	0.003
Enxofre [S]	0.0215	0.002
Silício [Si]	0.164	0.02

4.1.3. Ensaio de Tração

No decorrer deste subcapítulo indica-se o modo de preparação do provete, as condições de realização do ensaio e faz-se a análise dos resultados.

4.1.3.1. Preparação

Para a realização do ensaio de tração é necessário obter um provete normalizado, o provete tem o comprimento de 450 mm e nas suas extremidades devem ser introduzidos uns reforços para que as amarras da máquina não deformem o tubo, esses reforços devem ser maciços e ter um comprimento de 156 mm e diâmetro de 36 mm, na Figura 4-2, pode-se visualizar o desenho do provete. A distância entre garras é de 250 mm.

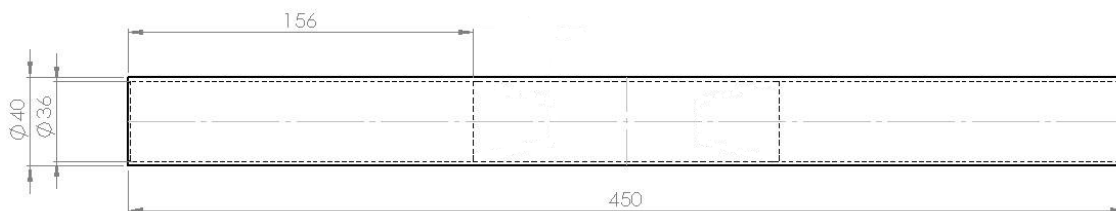


Figura 4-2 – Desenho do provete

Após o provete estar preparado é necessário proceder à colocação dos extensómetros, como se pode observar na Figura 4-3, neste ensaio utilizou-se um extensómetro mecânico e um extensómetro elétrico. A utilização dos dois extensómetros deveu-se à necessidade de obter o valor da deformação no sentido axial e no sentido transversal para se obter o coeficiente de Poisson.



Figura 4-3 – Colocação dos extensómetros

4.1.3.2. Resultados

No final do ensaio o tubo sofreu rotura, como pode ser visualizado na Figura 4-4, sofrendo uma extensão de 18 mm.



Figura 4-4 – Provete após o ensaio de tração

Analisando os dados obtidos pelo extensómetro elétrico consegue-se calcular o coeficiente de Poisson, bastando para isso fazer o tratamento de dados através de uma folha de cálculo, onde se cria o Gráfico 4-1 com os valores da deformações transversal e longitudinal, de seguida cria-se a equação da reta obtida e o valor do declive corresponde ao valor do coeficiente de Poisson.

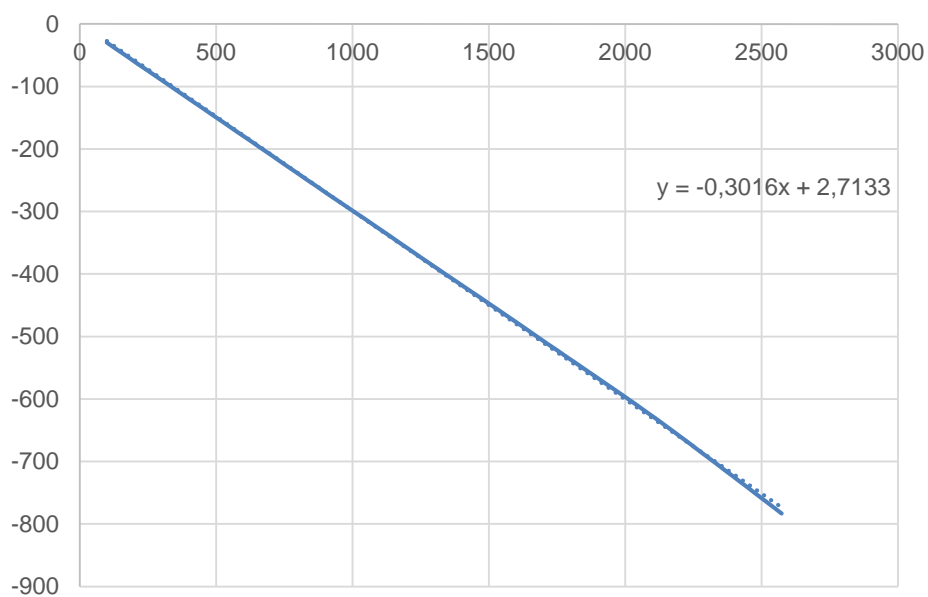


Gráfico 4-1 – Gráfico obtido para o cálculo do coeficiente de Poisson

Os valores registados com o extensómetro mecânico permitem obter o módulo de elasticidade, a tensão de cedência e a tensão de rotura.

Os valores registados na máquina necessitam de ser tratados, como tal a tensão exercida é obtida dividindo a força máxima aplicada pela área do provete.

Para a obtenção da tensão de cedência e da tensão de rotura faz-se uma análise dos valores obtidos, apresentados no Gráfico 4-2 e verifica-se os valores da deformação, a tensão de cedência corresponde ao último valor antes da deformação subir de forma abrupta. A tensão de rotura corresponde ao valor obtido mais elevado da tensão.

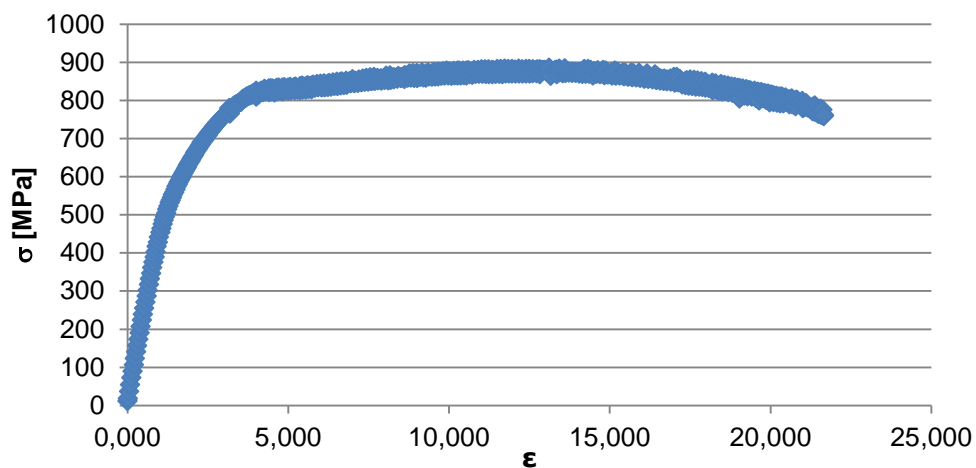


Gráfico 4-2 – Valores obtidos no ensaio de tração

O módulo de elasticidade obtém-se a partir do declive da reta da parte elástica apresentado no Gráfico 4-3, onde no eixo vertical se apresenta os valores da tensão exercida ao provete e no eixo horizontal está presente a deformada.

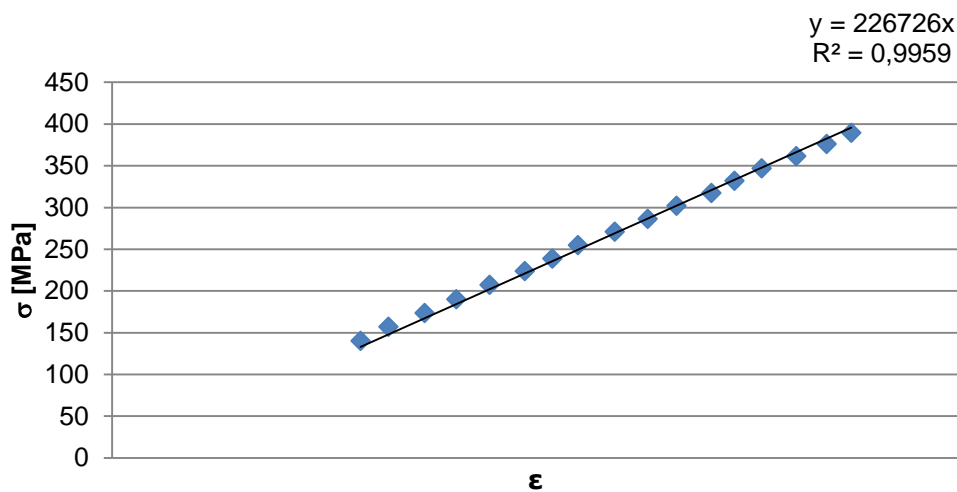


Gráfico 4-3 – Gráfico da parte elástica

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-3 de forma resumida.

Tabela 4-3 – Características do material

Densidade	7.898 Kg/m ³
Coefficiente de Poisson	0.302
Tensão de Cedência	811.81 MPa
Tensão de Ruptura	885.83 MPa
Módulo de Elasticidade	226726 MPa

4.1.4. Ensaio dinâmico (Fadiga)

Neste subcapítulo descreve-se o modo de preparação do provete, os procedimentos utilizados para a realização do ensaio e faz-se a análise de resultados.

4.1.4.1. Preparação

Para se efetuar este tipo de ensaio prepararam-se os provetes, como demonstrado na Figura 4-5, sendo depois efetuados os ensaios correspondentes.

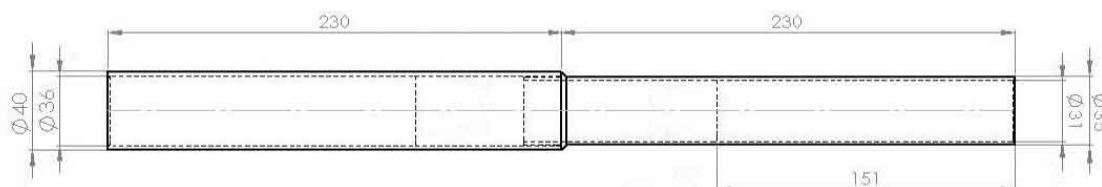


Figura 4-5 – Provette para realizar o ensaio de fadiga

O provete é colocado na máquina como apresentado na Figura 4-6.



Figura 4-6 – Colocação do provete

Antes de iniciar os ensaios foi necessário calcular as forças a que iria ser sujeito o provete no decorrer do ensaio, para tal recorreu-se a cálculos teóricos que serão apresentados de seguida.

4.1.4.2. Resultados

Após a realização de vários ensaios, com diferentes condições iniciais, como apresentado no anexo A, na Tabela 4-4 reúne-se todos os valores necessários para obter a curva S-N.

Tabela 4-4 – Valores obtidos experimentalmente

Carga [N]	σ_{med} [MPa]	N	Log (σ_{med})	Log (N)
15000	72,024	1000000	1,857	6,000
20600	98,913	435961	1,995	5,639
20600	98,913	508656	1,995	5,706
27500	132,044	114126	2,121	5,057
27500	132,044	147501	2,121	5,169
27500	132,044	81578	2,121	4,912

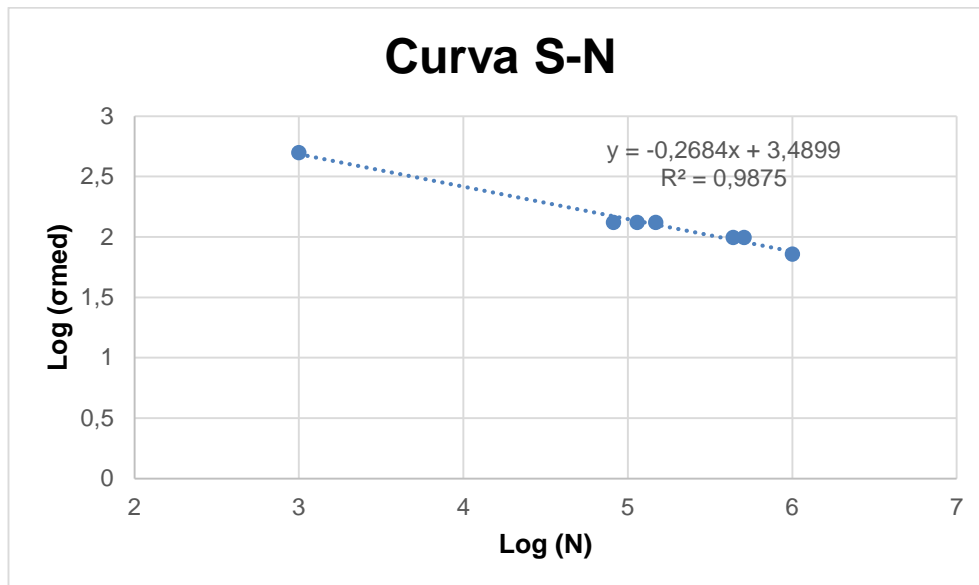


Gráfico 4-4 - Curva S-N obtida experimentalmente

A partir do Gráfico 4-4 obtém-se a equação que permite extrapolar todos os valores pretendidos, isto é, se se pretender um número específico de ciclos substitui-se na equação e sabe-se a tensão máxima que pode ser aplicada.

4.2. Conceção

Neste subcapítulo apresentam-se todos os métodos utilizados para se obter a modelação do chassi bem como as metodologias para efetuar as simulações numéricas do chassi.

4.2.1. Modelação

A modelação foi efetuada com recurso a uma ferramenta de modelação computacional, existindo para esta tarefa vários softwares CAD, tais como, *SolidWorks*, *CATIA*, *Autodesk Inventor*. Neste caso optou-se pelo Solidworks por uma questão de disponibilidade.

A primeira fase passou por efetuar medições no chassi existente nas instalações da *DEpieres Desportos Motorizados Lda*, a partir das quais se iniciou o processo de modelação.

A passagem do modelo físico para um modelo virtual realizou-se utilizando um modo de

operações do software, designado por *3D Sketch*, que consiste em desenhar o chassi num plano sem projeções, apresentando unicamente linhas que correspondem aos elementos.

Na Figura 4-7 apresenta-se o chassi apenas através de linhas que posteriormente se definirão como entidades tubulares com as dimensões pretendidas.

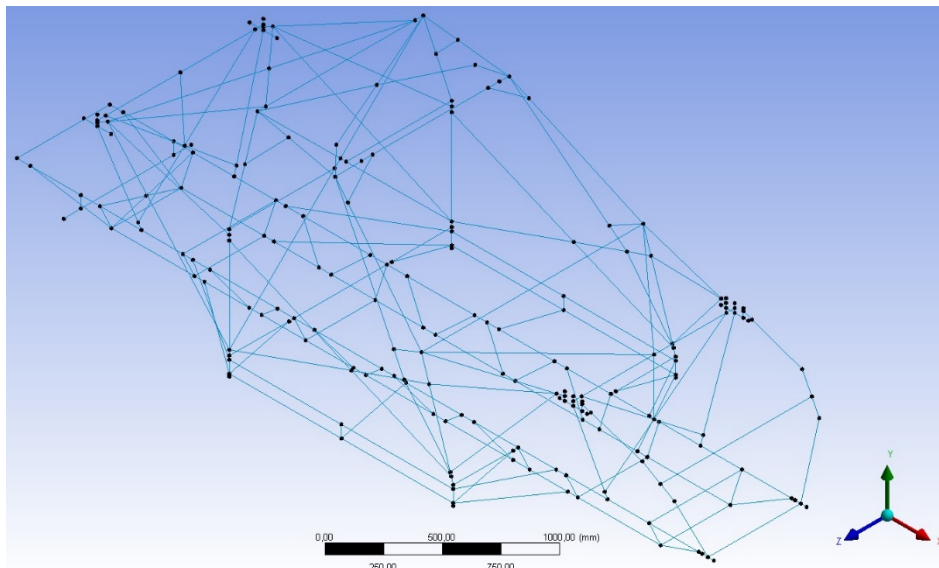


Figura 4-7 – Chassi D06 desenhado em linhas

A segunda fase da modelação passa por converter as linhas em tubos, para isso utiliza-se o módulo *Weldments*, que permite associar a cada linha uma secção. Como na biblioteca geral do software não existiam as dimensões dos tubos pretendidas, foi necessário criá-las. Para tal criaram-se vários ficheiros que foram guardados como Lib Feat Part com a extensão “.*sldlfp*”, onde se desenharam as várias secções circulares necessárias, 50 mm, 40 mm, 30mm e 25 mm de diâmetro exterior e com 2 mm de parede, na Tabela 4-5 apresenta-se as secções utilizadas as suas principais características. Sendo necessário depois colocar os ficheiros na pasta correspondente à biblioteca do módulo *Weldments*.

Tabela 4-5 – Propriedades das secções utilizadas

Secção	Medidas [mm]	Área [mm ²]	Momento de Inércia (eixo xx) [mm ⁴]	Constante Torsional [mm ⁴]
Circular	50 x 2	301,59	85968	1,7165e05
Circular	40 x 2	238,76	42671	85232
Circular	30 x 2	216,77	14403	28791
Circular	25 x 2	144,51	9508,7	19002
Quadrada	40 x 2	304	73365	1,1284e04

Na Figura 4-8 apresenta-se o chassi D06 modelado já com os perfis associados às linhas e o eixo de coordenadas correspondentes.

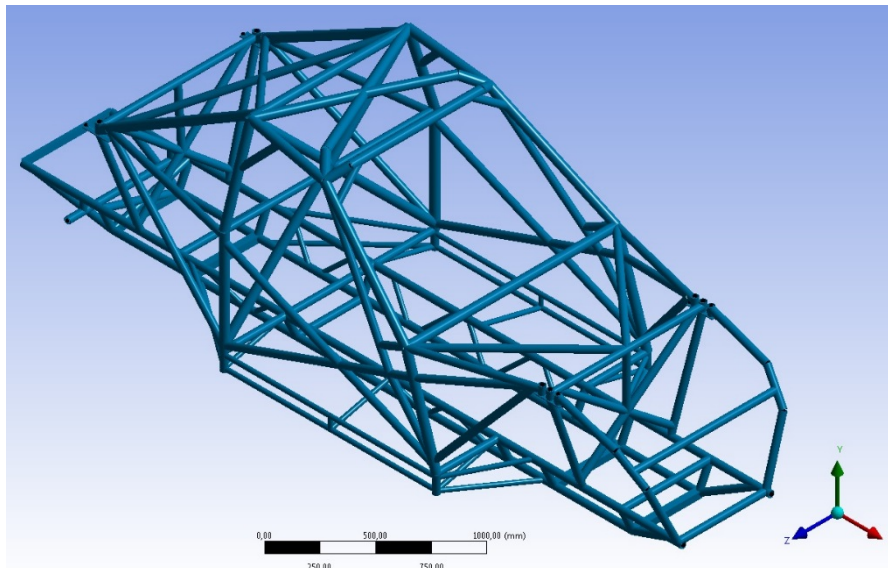


Figura 4-8 – Chassi D06 modelado

Nesta fase já se podem obter alguns dados relevantes, como o peso da estrutura, o comprimento, a largura, e a altura que são apresentados na Tabela 4-6

Tabela 4-6 – Dimensões do chassi D06

Comprimento [mm]	4200
Largura [mm]	1344,8
Altura [mm]	1340
Peso [kg]	186,41

4.2.2. Simulação

Neste subcapítulo vai-se proceder às simulações estática e modal, para caracterizar o chassi D06.

Nas análises estática e dinâmica o pré-processamento é igual, por essa razão apresenta-se a descrição do mesmo antes de se especificar o tipo de análise.

4.2.2.1. Pré-processamento

Nesta fase define-se o tipo de elemento, as propriedades do material, o tipo de secção. Este processo foi efetuado através de linhas de código sendo estas apresentadas de seguida. Para este caso considera-se o elemento Beam 188, pois é adequado para a análise de estruturas de viga com espessura fina a moderadamente grossa

```
KEYW, PR_STRUC, 1
/PREP7
/UNITS, SI
!*
ET,1,BEAM188 !Tipo de elemento
!
MP,EX,1,2.26726E+11 !Modulo de elasticidade
MP,NUXY,1,0.302 !Coeficiente de Poisson!
MP,DENSD,1,7898 !Densidade
```

```

DENS=7898
!
!Definir Secções
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,1,BEAM,HREC,20x40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.02,0.04,0.002,0.002,0.002,0.002
ESYS,0
SECNUM,1
TSHAP,LINE
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,2,BEAM,HREC,40x40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.04,0.04,0.002,0.002,0.002,0.002
ESYS,0
SECNUM,2
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,3,BEAM,CTUBE,40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.018,0.02
ESYS,0
SECNUM,3
TSHAP,LINE
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,4,BEAM,CTUBE,50x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.023,0.025
ESYS,0
SECNUM,4
TSHAP,LINETYPE
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,5,BEAM,RECT,165x5,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.165,0.005
ESYS,0
SECNUM,5
TSHAP,LINE
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,6,BEAM,CTUBE,30x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.013,0.015
ESYS,0
SECNUM,6
!*
TYPE,1
MAT,1

```



```
SECTYPE,7,BEAM,CTUBE,25x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.0105,0.0125
ESYS,0
SECNUM,7
TSHAP,LINE
!
```

Procede-se ainda à modelação do chassi em linha de código, sendo necessário definir os pontos, as linhas, os nós e os elementos, após isto atribui-se a cada elemento o tipo de secção correspondente, todo este processo é apresentado no Anexo B – Algoritmo de execução em apdl para simulação do chassi D06.

4.2.2.2. *Análise Estática*

Para realizar todas as análise estáticas vai considerar-se uma situação limite, em curva, para se obter a rigidez torsional do chassi, para tal vão aplicar-se os constrangimentos de deslocamentos nos pontos de fixação da suspensão na traseira do chassi e aplicar-se-á a carga calculada através da equação 5-1, nos pontos de ancoragem da suspensão dianteira. De notar que a as cargas aplicadas serão em sentidos opostos.

Considerando numa curva que o carro sofre uma força de 0,6 G's, pela equação da segunda lei de Newton, é possível saber a força exercida na estrutura.

$$F = 0,6 \times g \times m = 0,6 \times 9,8 \times 1900 = 11172N \quad [5-1]$$

Como vamos aplicar a força em cada lado do chassi vai decompor-se em duas partes iguais.

$$\frac{11172}{2} = 5586 N \quad [5-2]$$

4.2.2.2.1. Processamento

No processamento define-se o tipo de análise como estática, definem-se os pontos onde vai estar fixo o chassi, restringindo todos os graus de liberdade. Aplicam-se as forças que atuam no chassi.

Todo este processo foi executado com recurso a linhas de código, que são apresentadas de seguida:

```
/SOL
FLST,2,10,1,ORDE,8
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,-18
FITEM,2,20
FITEM,2,22
FITEM,2,32
FITEM,2,34
```

```

FITEM,2,-37
!*
/GO
D,P51X, , , , ,ALL, , , , ,
FLST,2,5,1,ORDE,5
FITEM,2,15
FITEM,2,101
FITEM,2,-102
FITEM,2,106
FITEM,2,138
!*
/GO
F,P51X,FY,5586
FLST,2,5,1,ORDE,5
FITEM,2,103
FITEM,2,-104
FITEM,2,115
FITEM,2,139
FITEM,2,-140
!*
/GO
F,P51X,FY,-5586
!/STATUS,SOLU
SOLVE
!*
    
```

4.2.2.2.2. Pós-Processamento

O momento no eixo do x que existe na estrutura tem o seu valor máximo de 167,99 N·m na zona assinalada a vermelho na Figura 4-9.

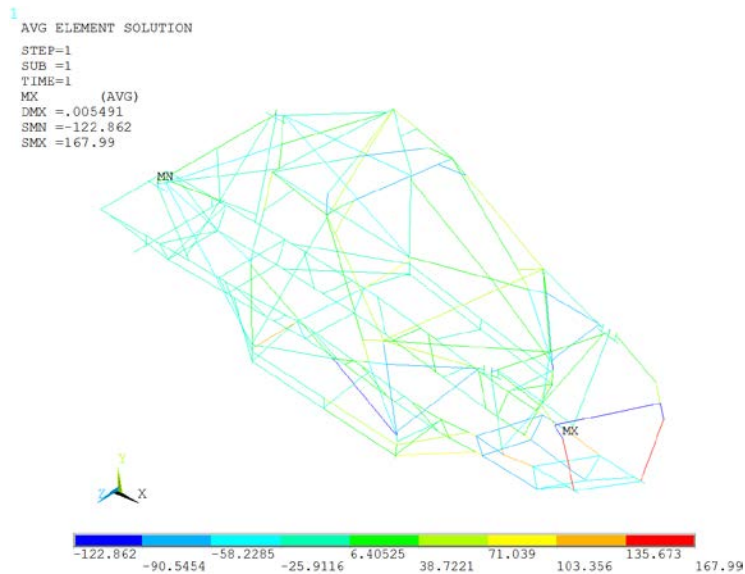


Figura 4-9 – Chassi D06 – momento no eixo x

O valor da rotação em torno do eixo dos x é de 0,008973 rad, na Figura 4-10 pode-se visualizar a zona mais crítica. Considera-se o maior valor em módulo.

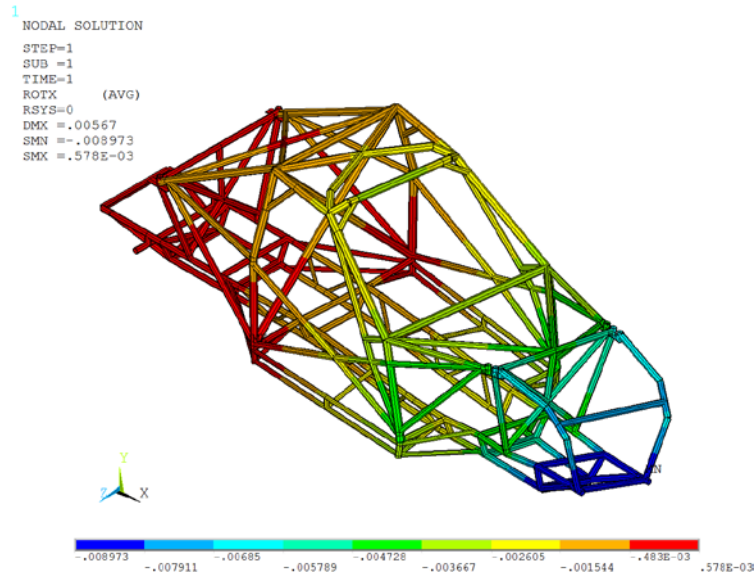


Figura 4-10 – Chassi D06 – rotação em x

O deslocamento em x originado por esta carga é de 0,527 mm, como se pode comprovar na Figura 4-11.

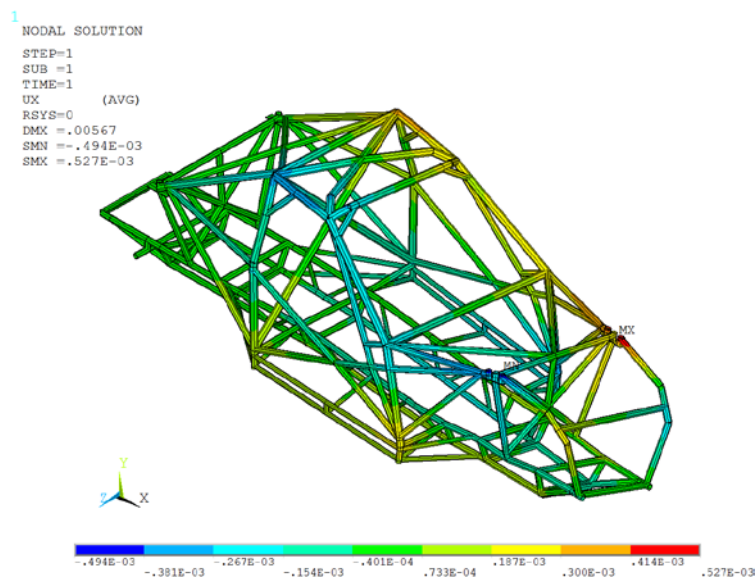


Figura 4-11 – Chassi D06 – deslocamento em x

O deslocamento em y de 4,157 mm, apresentada na Figura 4-12, indica a flexão a que o chassi é submetido aquando da aplicação de uma força.

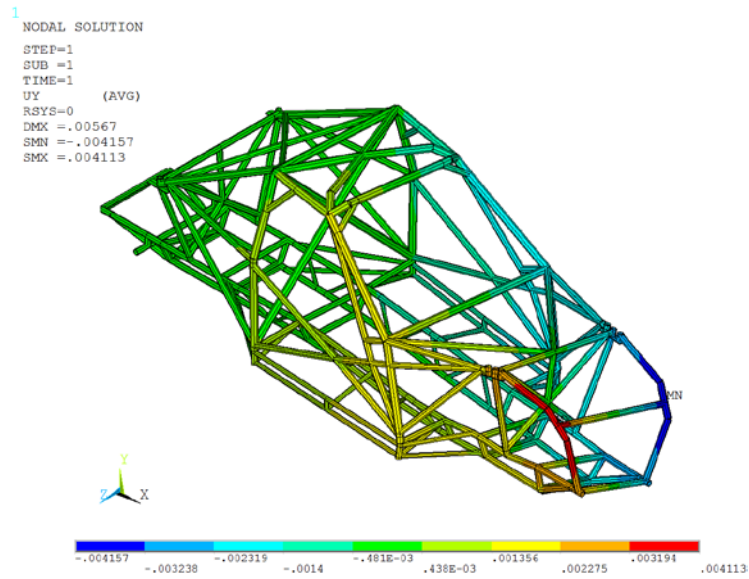


Figura 4-12 – Chassi D06 – deslocamento em y

De forma a verificar-se a tensão máxima que afeta o chassi retirou-se o valor da tensão de Von Mises, que se apresenta na Figura 4-13.

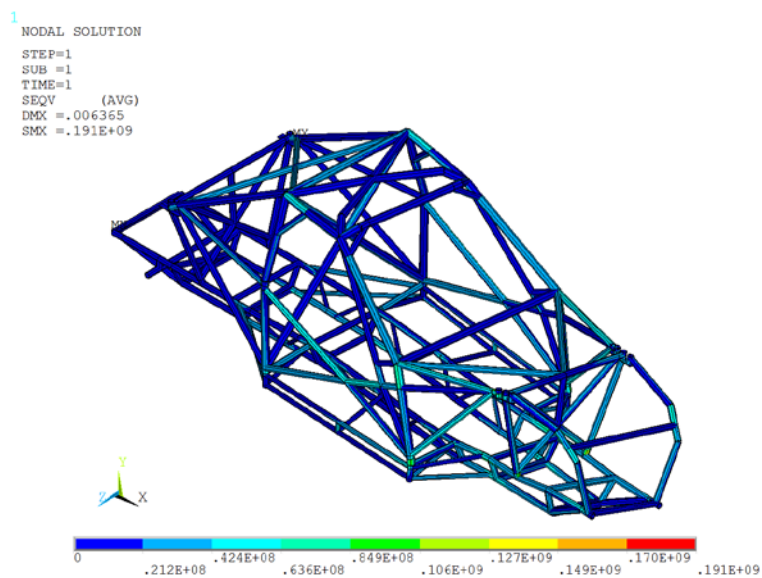


Figura 4-13 – Chassi D06 – tensão de Von Mises

Na Tabela 4-7 são apresentados os resultados das análises efetuadas ao chassi D06.

Tabela 4-7 – Chassi D06 – Resumo das propriedades

Momento x (N.m)	167,99
Rotação x (rad)	0,008973
Rigidez Torsional (N.m/rad)	18721,72
Tensão Von Mises (MPa)	191
Deslocamento x (mm)	0.527
Deslocamento y (mm)	4,157
Peso (kg)	186,96

4.2.2.3. *Análise Modal*

4.2.2.3.1. Processamento

O método para extrair os modos de vibração utilizado foi o Block Lanczos, pretende-se obter 5 modos e define-se o mesmo número de modos a expandir.

Nas definições da análise modal pelo método de Block Lanczos, a frequência varia de 1 Hz até 200 Hz, a frequência começa em 1 pois dessa forma evita-se a presença dos modos de vibração dos graus de liberdade, não se aplica nenhuma força nem nenhum constrangimento.

Estas definições são inseridas no software através das linhas de código apresentadas a seguir:

```
!*
ANTYPE,2
!*
MODOPT,LANB,5
EQSLV,SPAR
MXPAND,5, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODOPT,LANB,5,1,200, ,OFF
/STATUS,SOLU
FINISH
/POST1
SET,LIST
```

4.2.2.3.2. Pós-Processamento

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-8, onde se apresenta o modo e as frequências naturais da estrutura.

Tabela 4-8 – Chassi D06 – resultados da análise modal

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Tipo de modo
1	64,35	Global de Torção
2	90,84	Global de Flexão Vertical
3	92,04	Global Misto
4	109,57	Local de Flexão Lateral
5	113,51	Global Misto

O modo 1, presente na Figura 4-14, que ocorre aos 64,35Hz é o primeiro modo global de torção.



Figura 4-14 – Chassi D06 – modo 1

O modo 2, que se pode visualizar na Figura 4-15, acontece aos 90,84Hz, sendo o primeiro modo global de flexão vertical.



Figura 4-15 – Chassi D06 – modo 2

Os restantes modos de vibração podem ser visualizados no Anexo D – Simulações.

4.2.2.4. Centro de Gravidade

A localização do centro de gravidade é obtida através da interpolação de valores, no eixo dos x considera-se que a traseira é o 0% e a frente são os 100%. Relativamente ao cálculo da localização do centro de gravidade no eixo dos y, considera-se os 0% na parte inferior do chassi e a altura máxima como o valor para os 100%. Para o eixo dos z, os 0% correspondem à lateral direita (observador sentado no carro) e os 100% correspondem à lateral esquerda. Na Tabela 4-9 apresenta-se a localização e a disposição do centro de gravidade no chassi D06.

Tabela 4-9 – Chassi D06 – localização do centro de gravidade

Eixo [referencial]	Coordenadas [inicial; final]	Localização	Disposição
x	[0;4200]	2145,8	51,09%
y	[-150;1190]	353,49	37,57%
z	[390;-954,8]	-280,85	49,88%

4.3. Otimização

Neste subcapítulo vão-se efetuar alterações no chassi D06 de forma a otimizá-lo, isto é, com as alterações pretende-se que o comportamento dinâmico e estático do chassi sofra evoluções.

4.3.1. Aproximação empírica

No decorrer deste subcapítulo vão apresentar-se alternativas geradas manualmente de forma a obter melhorias na zona crítica. A zona crítica detetada é a zona inferior onde o piloto e o co-piloto vão sentados. As alternativas propostas tem como base e limitações as condições de atravancamento que existem nessa zona, essas limitações são devidas à passagem dos órgãos mecânicos.

4.3.1.1. Alternativa 1

Nesta primeira alteração vão aplicar-se barras novas nas zonas mais laterais do chassi, pois estas encontram-se na zona critica e não apresentam restrições nenhuma, a disposição das barras que foram colocadas é visível (representadas a verde) na Figura 4-16. Estas barras possuem 40mm de diâmetro exterior.

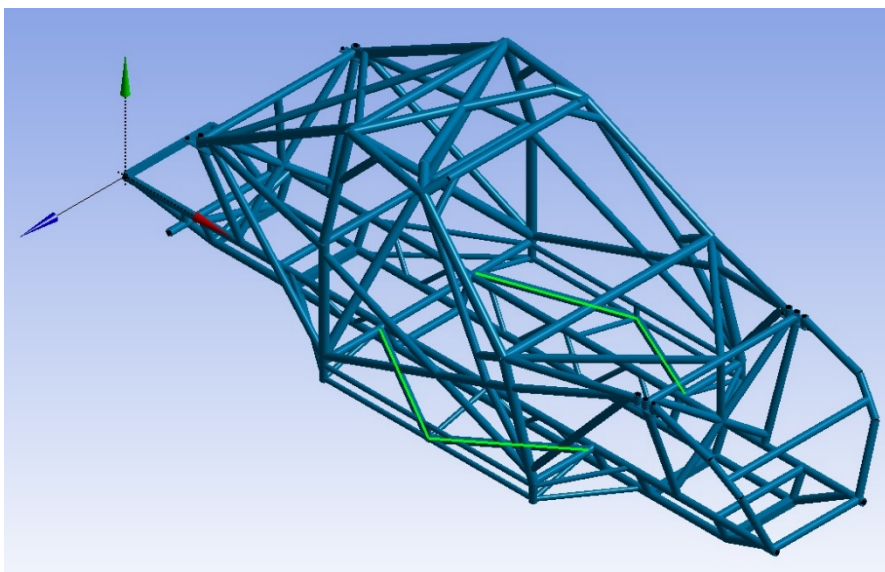


Figura 4-16 – Alternativa 1 – alterações efetuadas

4.3.1.1.1. Pré-Processamento

Procede-se da mesma forma apresentada no ponto 4.2.2.1, sendo que é necessário acrescentar, ao Anexo B – Algoritmo de execução em apdl para simulação do chassi D06, as linhas e os elementos correspondentes às barras que foram criadas, sendo isto também realizado com recurso a linha de código que se apresenta de seguida.

! definição de linhas	! definição dos elementos
L,40,151	E,40,151
L,208,151	E,208,151
L,206,167	E,206,167
L,41,167	E,41,167

4.3.1.1.2. Análise Estática

4.3.1.1.2.1. Processamento

As condições para executar esta análise são as mesmas que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.2.1.

4.3.1.1.2.2. Pós-Processamento

O momento no eixo do x que existe na estrutura tem o seu valor máximo de 156,739 N·m sendo representado pela zona assinalada a vermelho na Figura 4-17.

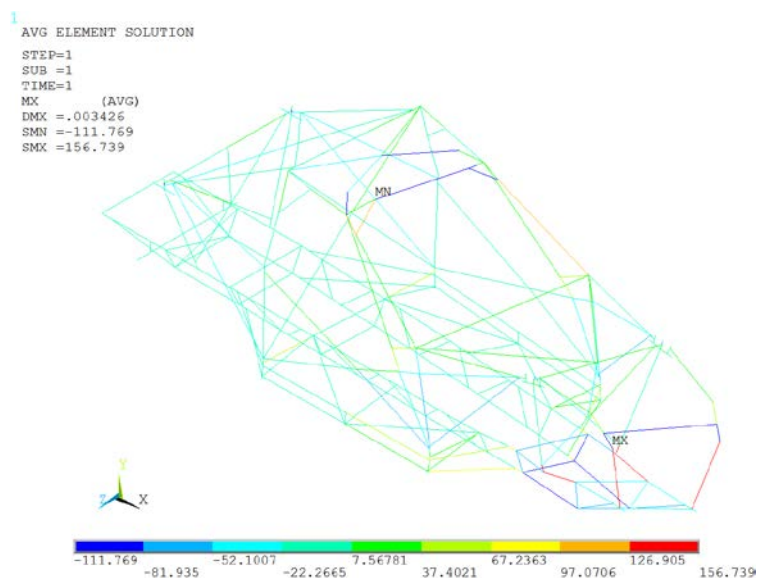


Figura 4-17 – Alternativa 1 – momento em x

O valor da rotação em torno do eixo dos x é de 0,007671 rad, na Figura 4-18 pode-se visualizar a zona mais crítica, apresentada a azul, considera-se o maior valor em modulo.

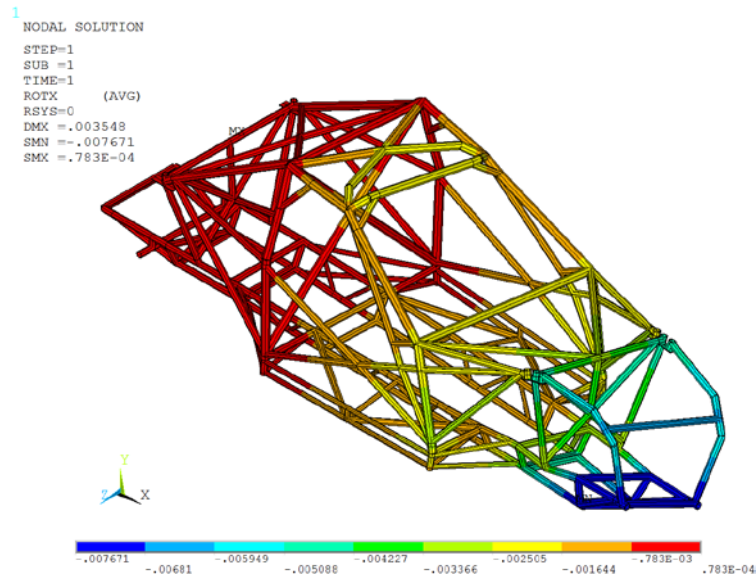


Figura 4-18 – Alternativa 1 – rotação em x

O deslocamento em x é 0,437 mm, como se verifica na Figura 4-19.

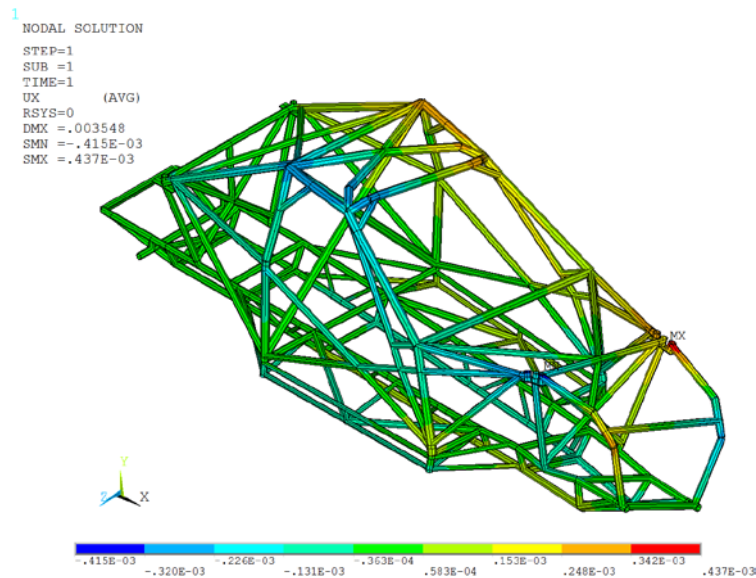


Figura 4-19 – Alternativa 1 – deslocamento em x

O deslocamento em y é 3,469 mm sendo apresentada na Figura 4-20. Considera-se o maior valor em módulo.

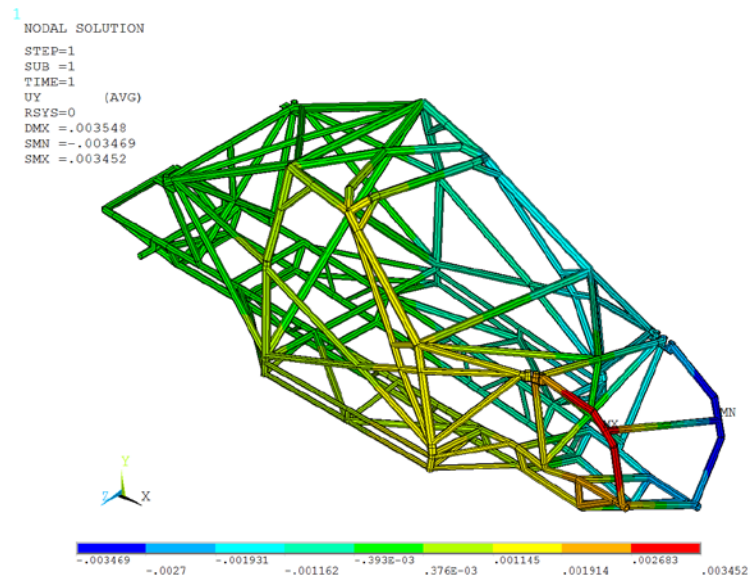


Figura 4-20 – Alternativa 1 – deslocamento em y

O valor da tensão de Von Mises é de 203 MPa, na Figura 4-21 pode-se verificar como se distribuem as tensões ao longo do chassi.

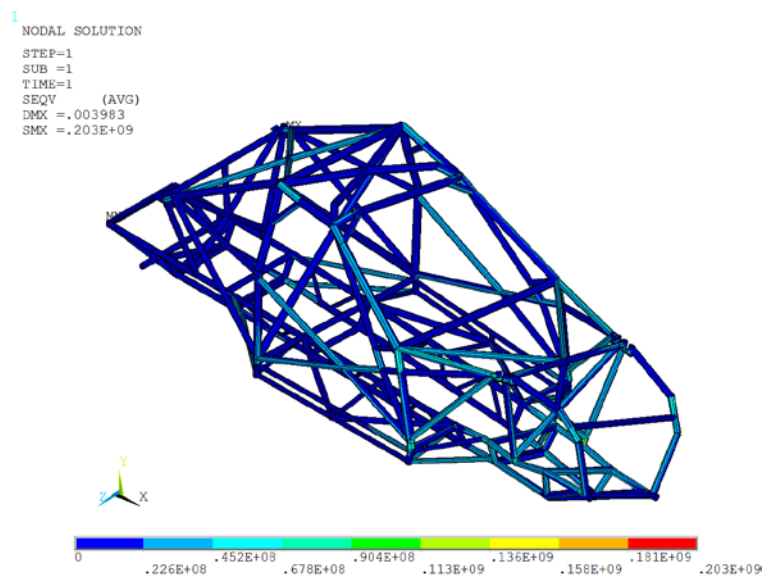


Figura 4-21 – Alternativa 1 – tensão de Von Mises

Na Tabela 4-10 apresentam-se os valores obtidos na análise estática efetuada à alternativa 1, bem como a comparação destes valores com os valores obtidos para o chassi D06.

Tabela 4-10 – Alternativa 1 – resumo das propriedades

Momento x (N.m)	156,74	-7,18%
Rotação x (rad)	0,0000888	-16,97%
Rigidez Torsional (N.m/rad)	20432,67	8,37%
Tensão Von Mises (MPa)	203	5,91%
Deslocamento x (mm)	0,437	-20,59%
Deslocamento y (mm)	3,469	-19,83%
Peso (kg)	192,88	3,07%

4.3.1.1.3. Análise Modal

4.3.1.1.3.1. *Processamento*

As condições para executar esta análise são as mesmas que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.3.1.

4.3.1.1.3.2. *Pós-Processamento*

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-11, onde se apresenta o modo, as frequências naturais da estrutura, a variação destas quando comparadas com o chassi D06 e o tipo de modo de vibração.

Tabela 4-11 – Alternativa 1 – resultados da análise modal

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Tipo de modo
1	79,67	Global de Torção
2	90,74	Global de Flexão Vertical
3	92,05	Global Misto
4	114,75	Global de Flexão Lateral
5	113,71	Global Misto

O modo 1 (Figura 4-22) ocorre aos 79,67 Hz sendo o primeiro modo global de torção. Quando comparado com o mesmo modo do chassi D06, este modo aumentou 19,24%.

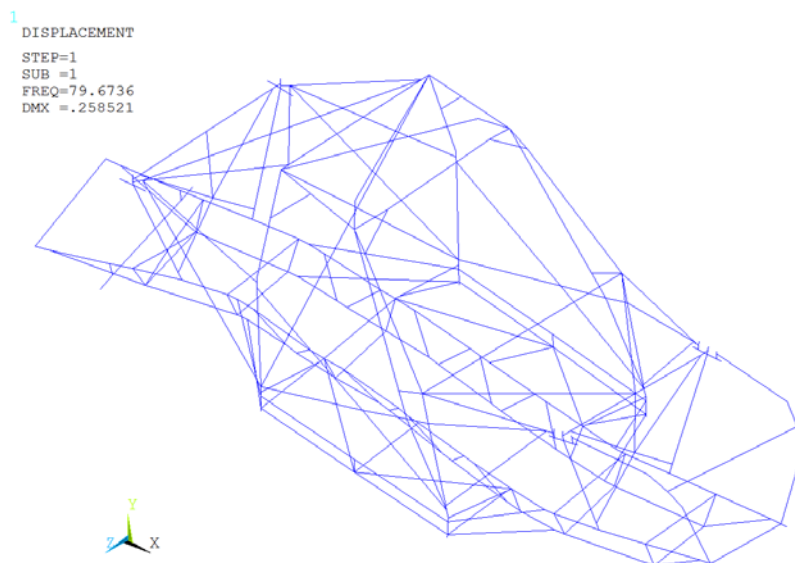


Figura 4-22 – Alternativa 1 – modo 1

O modo 2 (Figura 4-23) é o primeiro modo global de flexão e ocorre aos 90,74Hz. Este modo diminui 0,11% em comparação com o mesmo modo do chassi D06.

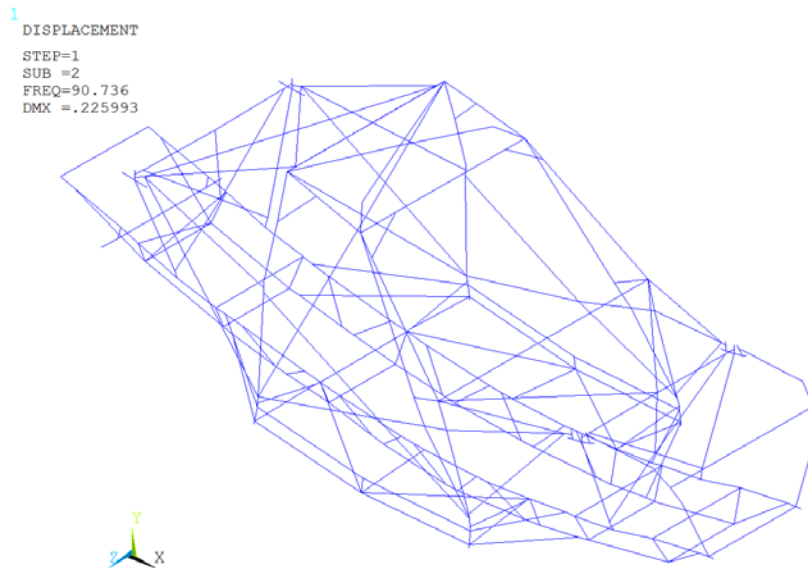


Figura 4-23 – Alternativa 1 – modo 2

4.3.1.1.4. Centro de Gravidade

O centro de gravidade foi obtido pelo mesmo método descrito em 4.2.2.4, sendo que se apresenta na Tabela 4-12 os valores para o centro de gravidade com as alterações introduzidas. A coluna referente à diferença indica a alteração em mm da localização relativamente ao chassi D06.

Tabela 4-12 – Alternativa 1 – localização do centro de gravidade

Eixo (referencial)	Coordenadas [inicial; final]	Localização	Diferença (mm)	Disposição
x	[0;4200]	2151,9	6,10	51,24%
y	[-150;1190]	341,19	-12,30	36,66%
z	[390;-954,8]	-280,82	0,03	49,88%

4.3.1.2. Alternativa 2

Como os resultados da alternativa 1 se mostraram positivos, enveredou-se por explorar esta zona, para tal alterou-se a disposição das barras, sendo visível (representadas a verde) na Figura 4-24 a sua nova configuração. As novas barras são iguais às aplicadas na alternativa 1.

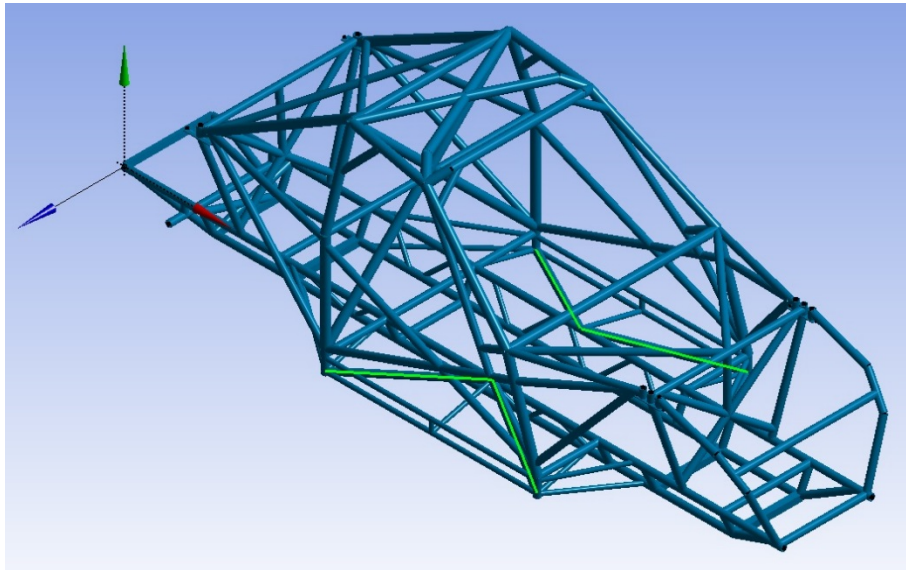


Figura 4-24 – Alternativa 2 – alterações efetuadas

4.3.1.2.1. Pré-Processamento

Para proceder à alteração do chassi, inseriram-se as novas linhas e os novos elementos através das linhas de código apresentadas em baixo ao algoritmo apresentado no Anexo B – Algoritmo de execução em apdl para simulação do chassi D06.

! definição de linhas	! definição de elementos
L,159,168	E,159,168
L,163,168	E,163,168
L,144,152	E,144,152
L,149,152	E,149,152

4.3.1.2.2. Análise Estática

4.3.1.2.2.1. Processamento

Seguiu-se o procedimento adotado em 4.2.2.2.1.

4.3.1.2.2.2. Pós-Processamento

O momento no eixo do x da estrutura é de 157,916 N·m tem o seu valor máximo na zona assinalada a vermelho na Figura 4-25.

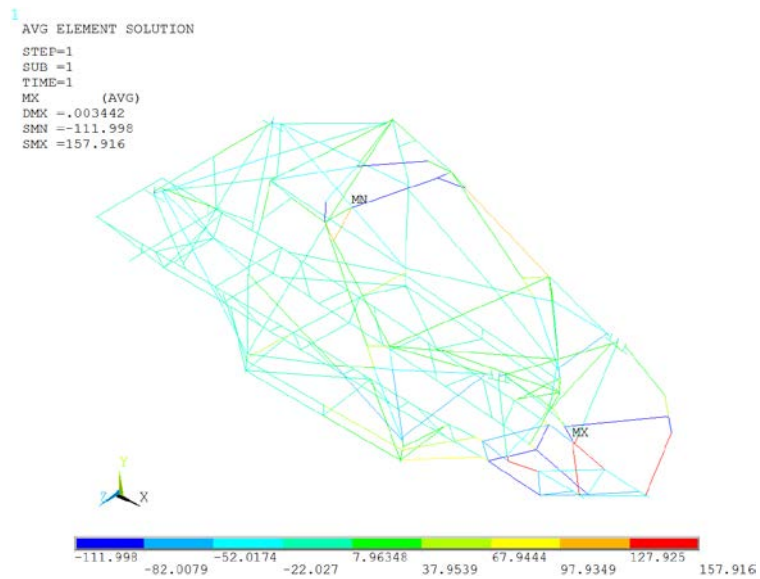


Figura 4-25 – Alternativa 2 – momento em x

A rotação em torno do eixo dos x é de 0,007667 rad, na Figura 4-26, pode-se visualizar a zona mais crítica, de notar que se considera o maior valor em modulo.

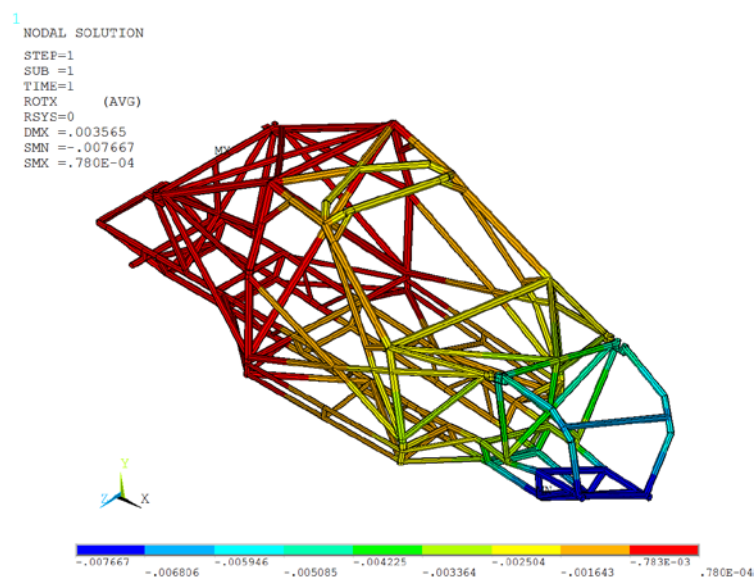


Figura 4-26 – Alternativa 2 – rotação em x

A deformação em x sofrida é de 0,44 mm, como se comprova na Figura 4-27.

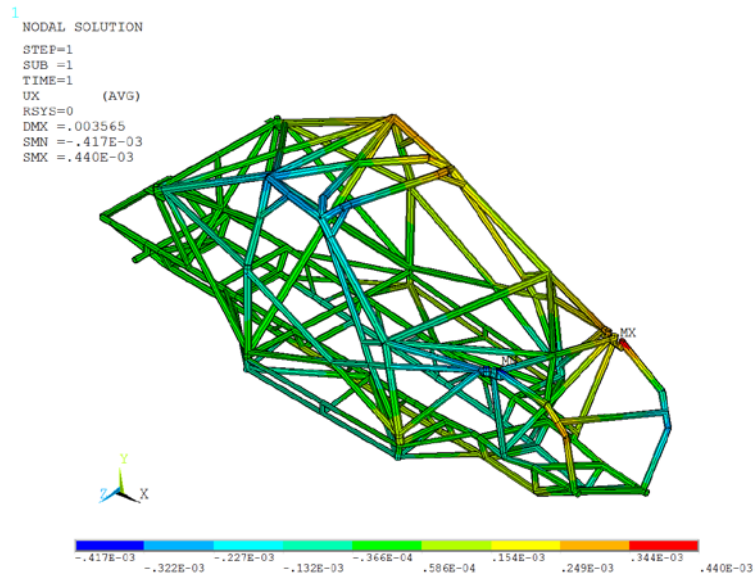


Figura 4-27 – Alternativa 2 – deslocamento em x

A deformação em y tem o seu valor máximo de 3,481, considera-se o maior valor em modulo, sendo apresentada na Figura 4-28.

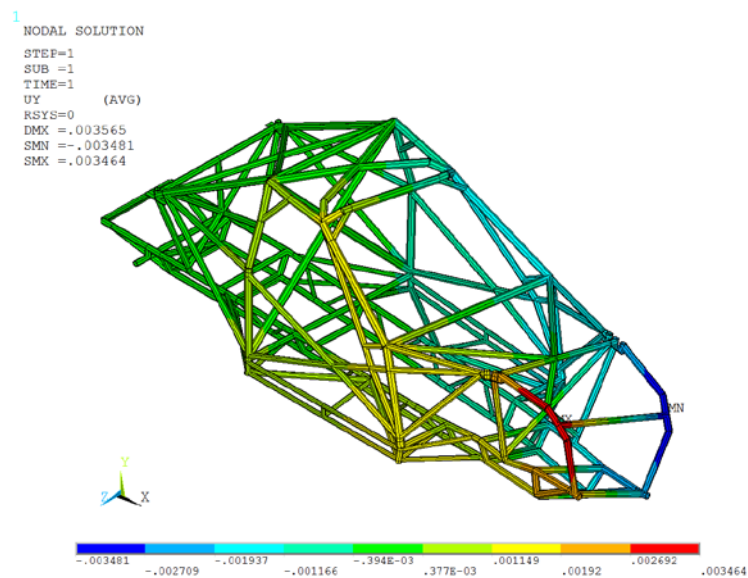


Figura 4-28 – Alternativa 2 – deslocamento em y

Na Figura 4-29 verifica-se a tensão máxima existente no chassi, sendo o valor máximo desta de 203 MPa.

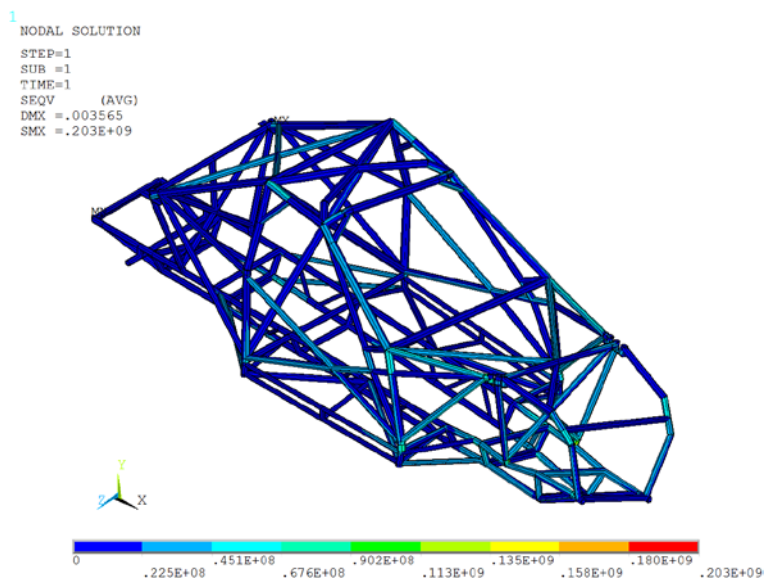


Figura 4-29 – Alternativa 2 – tensão de Von Mises

Na Tabela 4-13, apresenta-se os valores obtidos na análise estática efetuada à alternativa 2, bem como a comparação destes valores com os valores obtidos para o chassi D06.

Tabela 4-13 – Alternativa 2 – resumo das propriedades

Momento x (N.m)	157,916	-6,379%
Rotação x (rad)	0,007667	-17,034%
Rigidez Torsional (N.m/rad)	20596,84	9,104%
Tensão Von Mises (MPa)	203	5,911%
Deslocamento x (mm)	0,440	-19,773%
Deslocamento y (mm)	3,481	-19,420%
Peso (kg)	192,88	3.068%

4.3.1.2.3. Análise Modal

4.3.1.2.3.1. *Processamento*

Seguiu-se o procedimento igual ao adotado em 4.2.2.3.1.

4.3.1.2.3.2. *Pós-Processamento*

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-14, onde se apresenta o modo e as frequências naturais da estrutura.

Tabela 4-14 – Alternativa 2 – resultados da análise modal

Modo de vibração	Frequência [Hz]	Tipo de modo
1	79,22	Global de Torção
2	90,69	Global de Flexão Vertical
3	91,97	Global Misto
4	114,26	Global de Flexão Lateral
5	124,48	Global Misto

O modo 1 (Figura 4-30), é o primeiro modo global de torção, ocorre aos 79,22 Hz, o que

representa um aumento de 18,78% relativamente ao chassi D06.



Figura 4-30 – Alternativa 2 – modo 1

O modo 2 (Figura 4-31) surge aos 90,69 Hz, representando uma diminuição de 0,16% comparando com o chassi D06, é o primeiro modo global de flexão.



Figura 4-31 – Alternativa 2 – modo 2

4.3.1.2.4. Centro de Gravidade

O centro de gravidade foi obtido pelo mesmo método descrito em 4.2.2.4, sendo que se apresenta na Tabela 4-15, os valores para o centro de gravidade com as alterações introduzidas. A coluna referente à diferença indica a alteração em mm da localização relativamente ao chassi D06.

Tabela 4-15 – Alternativa 2 – localização do centro de gravidade

Eixo [referencial]	Coordenadas [inicial; final]	Localização	Diferença [mm]	Disposição
x	[0;4200]	2151,9	6,10	51,24%
y	[-150;1190]	341,19	-12,30	36,66%
z	[390;-954,8]	-280,82	0,03	49,88%

4.3.1.3. Alternativa 3

Nesta alternativa aplicam-se mais barras na zona crítica, sendo visível (representadas a verde) na Figura 4-32 a forma como foram dispostas. As barras aplicadas possuem 40mm de diâmetro exterior.

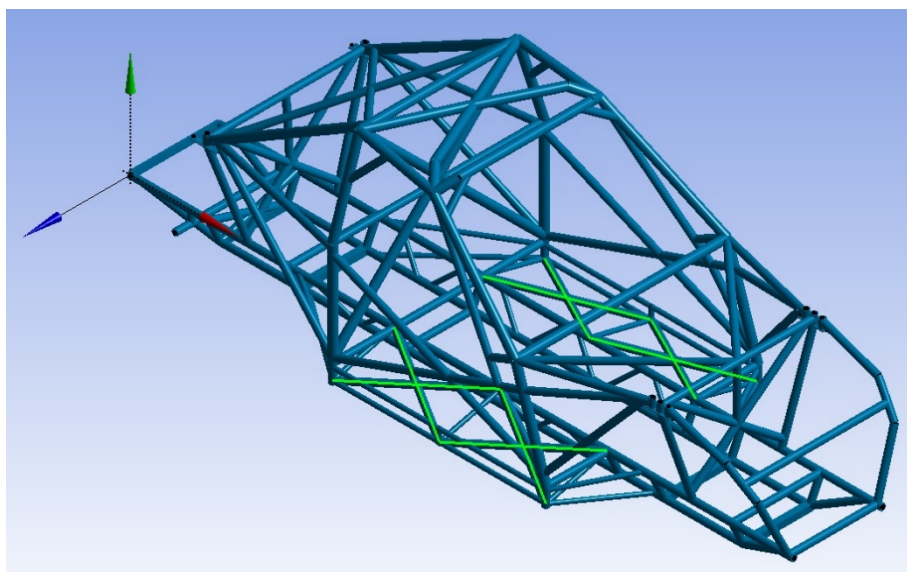


Figura 4-32 – Alternativa 3 – alterações efetuadas

4.3.1.3.1. Pré- Processamento

Para proceder à criação desta alternativa é necessário definir os novos pontos e nós, sendo posteriormente criadas as linhas e os elementos. De seguida apresentam-se as linhas de código que originam esta alternativa

!definição dos keypoints	! definição dos nós
K,301,	N,301,
K,302,	N,302,
K,303,	N,303,
K,304,	N,304,
! definição das linhas	!definição dos elementos
L,40,303	E,40,303
L,303,151	E,303,151
L,149,303	E,149,303
L,303,152	E,303,152
L,152,304	E,152,304
L,304,144	E,304,144
L,151,304	E,151,304
L,304,208	E,304,208

L,41,302	E,41,302
L,302,167	E,302,167
L,159,302	E,159,302
L,302,168	E,302,168
L,168,301	E,168,301
L,301,163	E,301,163
L,167,301	E,167,301
L,301,206	E,301,206

4.3.1.3.2. Análise Estática

4.3.1.3.2.1. *Processamento*

Seguiu-se o mesmo procedimento adotado em 734.2.2.2.1.

4.3.1.3.2.2. *Pós-Processamento*

O momento no eixo do x que existe na estrutura é máximo com 156,351 N·m na zona assinalada a vermelho na Figura 4-33.

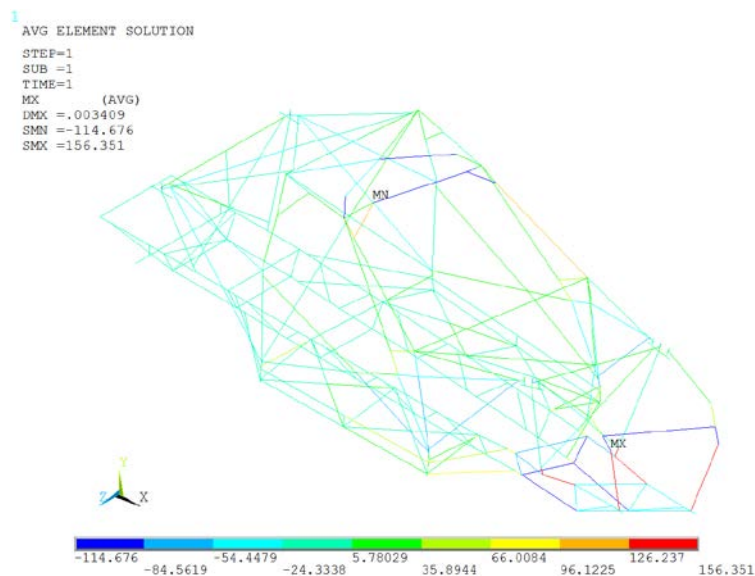


Figura 4-33 – Alternativa 3 – momento em x

O valor da rotação em torno do eixo dos x é de 0,007566 rad, na Figura 4-34 podendo visualizar-se a zona mais critica, assinalada a azul, pois considera-se o maior valor em modulo.

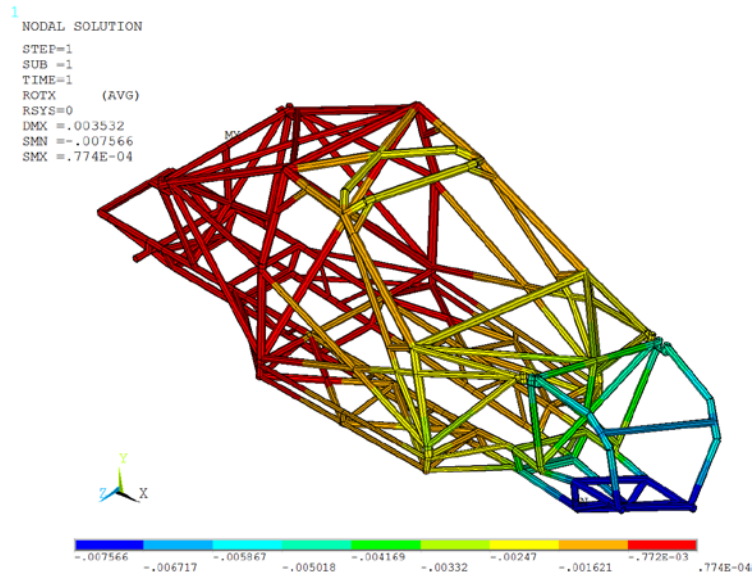


Figura 4-34 – Alternativa 3 – rotação em x

O deslocamento máximo relativamente ao eixo x é de 0,433 mm, como se pode atestar na Figura 4-35.

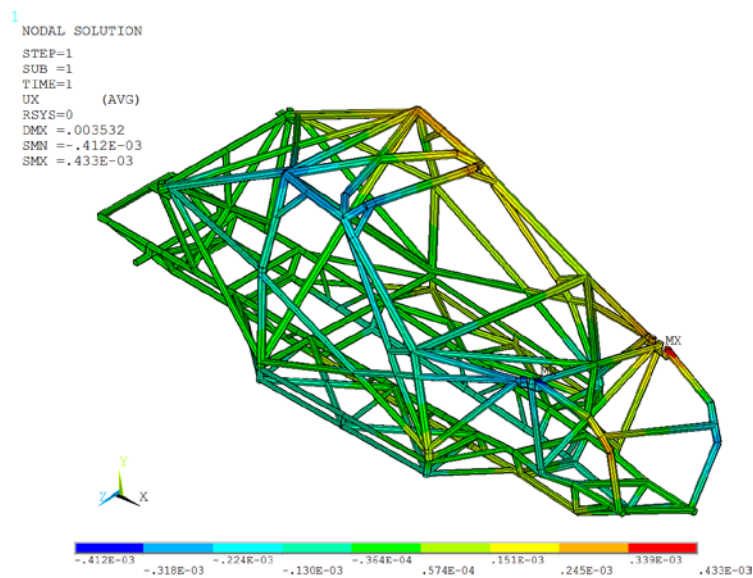


Figura 4-35 – Alternativa 3 – deslocamento em x

O deslocamento em y tem o seu valor máximo de 3,558mm, considera-se o maior valor em modulo, como exibido na Figura 4-36.

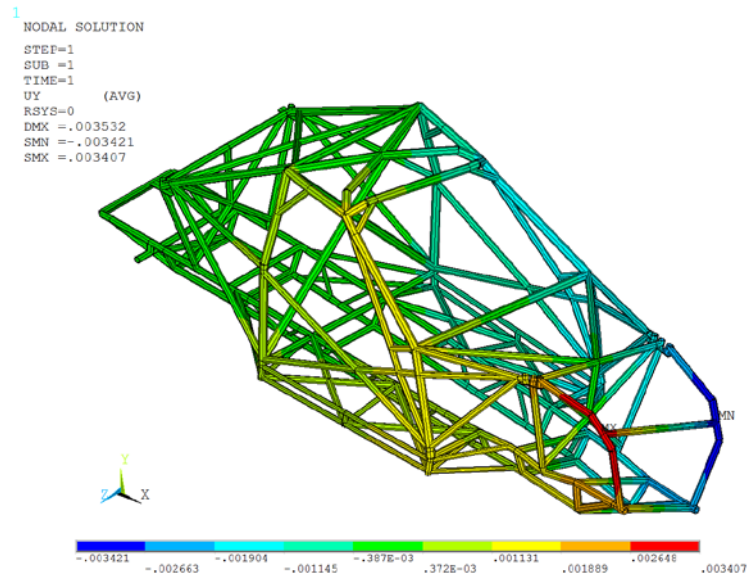


Figura 4-36 – Alternativa 3 – deslocamento em y

A Figura 4-37 apresenta a distribuições de tensão a que o chassi está sujeito, através desta simulação retira-se o valor de tensão mais elevado, que é de 204 MPa.

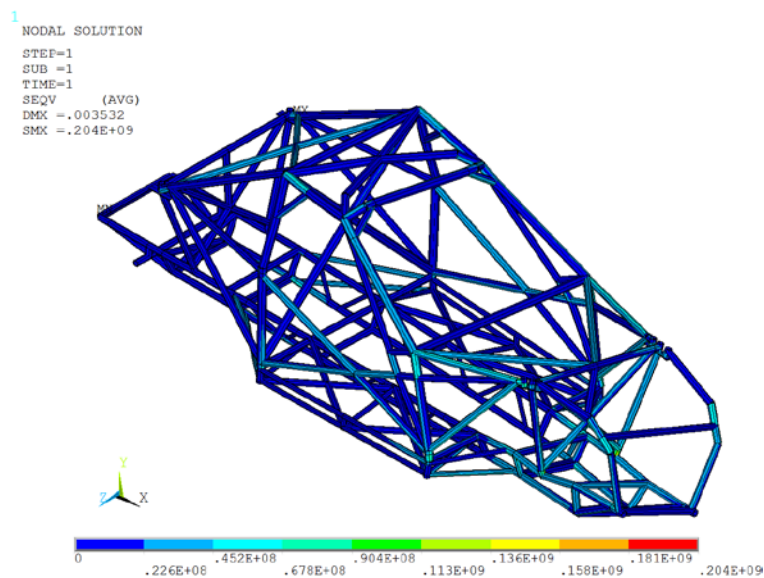


Figura 4-37 – Alternativa 3 – tensão de Von Mises

Na Tabela 4-16 apresentam-se os valores obtidos na análise estática efetuada à alternativa 3, bem como a comparação destes valores com os valores obtidos para o chassi D06.

Tabela 4-16 – Alternativa 3 – resumo das propriedades

Momento x (N.m)	156,35	-7,44%
Rotação x (rad)	0,0075660	-18,60%
Rigidez Torsional (N.m/rad)	20664,95	9,40%
Tensão Von Mises (MPa)	204	6,37%
Deslocamento x (mm)	0.433	-21,71%
Deslocamento y (mm)	3,421	-21,51%
Peso (kg)	198,88	5.95%

4.3.1.3.3. Análise Modal

4.3.1.3.3.1. *Processamento*

Seguiu-se o procedimento igual ao adotado em 4.2.2.3.1.

4.3.1.3.3.2. *Pós - Processamento*

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-17, onde se apresenta o modo e as frequências naturais da estrutura.

Tabela 4-17 – Alternativa 3 – resultados da análise modal

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Tipo de modo
1	80,16	Global de Torção
2	89,41	Global de Flexão Vertical
3	91,85	Global Misto
4	114,10	Global de Flexão Lateral
5	120,77	Global Misto

O modo 1 (Figura 4-38) ocorre aos 80,16 Hz o que representa um aumento de 19,73%.

Este modo é o primeiro modo global de torção.



Figura 4-38 – Alternativa 3 – modo 1

O modo 2 (Figura 4-39) representa o primeiro modo global de flexão e ocorre aos 89,41 Hz representando uma diminuição de 1,6%.

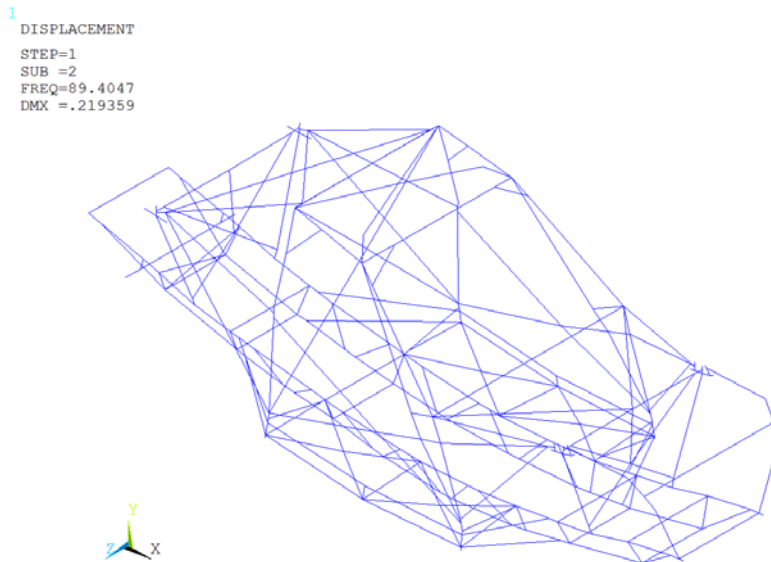


Figura 4-39 – Alternativa 3 – modo 2

4.3.1.3.4. Centro de Gravidade

O centro de gravidade foi obtido pelo mesmo método descrito em 4.2.2.4, sendo que se apresenta na Tabela 4-18 os valores para o centro de gravidade com as alterações introduzidas. A coluna referente à diferença indica a alteração em mm da localização relativamente ao chassi D06.

Tabela 4-18 – Alternativa 3 – valores do centro de gravidade

Eixo [referencial]	Coordenadas [inicial; final]	Localização	Diferença [mm]	Disposição
x	[0;4200]	2157,6	11,80	51,37%
y	[-150;1190]	329,62	-23,87	35,79%
z	[390;-954,8]	-280,92	-0,07	49,89%

4.3.1.4. *Análise dos resultados*

Fazendo a análise dos resultados obtidos para as alternativas propostas de melhoria do chassi, verifica-se que todas apresentam aperfeiçoamentos comparativamente ao chassi inicial.

Como é visível na Tabela 4-19, a alternativa 3 é a que apresenta os melhores resultados comparativamente ao chassi inicial. O aspeto negativo é o aumento de peso, mas este mantém-se dentro do limite estabelecido. Verificou-se um aumento de 9,4% na rigidez torsional, uma redução da deformação vertical de 21,51% e da deformação lateral 21,71%. As tensões existentes aumentaram, mas continuam a manter-se abaixo da tensão suportada pela soldadura.

Tabela 4-19 – Comparação dos resultados da análise estática

	A1 vs D06	A2 vs D06	A3 vs D06
Momento xx (N.m)	-7,18%	-6,38%	-7,44%
Rotação x (rad)	-16,97%	-17,03%	-18,60%
Rigidez Torsional (N.m/rad)	8,37%	9,10%	9,40%
Tensão Von Mises (MPa)	5,91%	5,91%	6,37%
Deslocamento x (mm)	-20,59%	-19,77%	-21,71%
Deslocamento y (mm)	-19,83%	-19,42%	-21,51%
Peso (kg)	3,07%	3,07%	5,95%

Relativamente à análise modal, apresenta-se a variação dos modos de vibração na Tabela 4-20. De salientar que se elevou o primeiro modo de torção em todas as alternativas, sendo o valor mais alto para a alternativa 3. O modo correspondente à flexão diminui ligeiramente mas como a gama de frequência em que se encontra é elevada, isto não é muito crítico.

Tabela 4-20 – Comparação dos resultados da análise modal

Modo	A1 vs D06	A2 vs D06	A3 vs D06
1	19,24%	18,78%	19,73%
2	-0,11%	-0,16%	-1,60%
3	0,01%	-0,07%	-0,20%
4	4,51%	4,10%	3,97%
5	7,50%	8,81%	6,01%

Como é possível verificar na Tabela 4-21, é com a alternativa 3 que mais se consegue baixar a disposição do centro de gravidade, nas outras direções as alterações são pouco significativas

Tabela 4-21 – Comparação dos resultados para a disposição do centro de gravidade

	D06	A1		A2		A3	
x	51,09%	51,24%	0,15%	51,24%	0,15%	51,37%	0,28%
y	37,57%	36,66%	-0,92%	36,66%	-0,92%	35,79%	-1,78%
z	49,88%	49,88%	0,00%	49,88%	0,00%	49,89%	0,01%

Desta forma a alternativa 3 é a que vai continuar a ser estudada.

4.3.2. Análise de sensibilidade

Esta verificação é efetuada de forma a poder-se aferir a evolução da alternativa 3, com pequenas alterações para depois ser possível definir as condições no updating.

4.3.2.1. Alternativa 4

Nesta alternativa as barras, assinaladas a verde na Figura 4-40, são deslocadas 10 mm no sentido negativo do eixo x. Desta forma pretende-se perceber o comportamento do chassi com a variação das barras. O peso do chassi permanece igual.

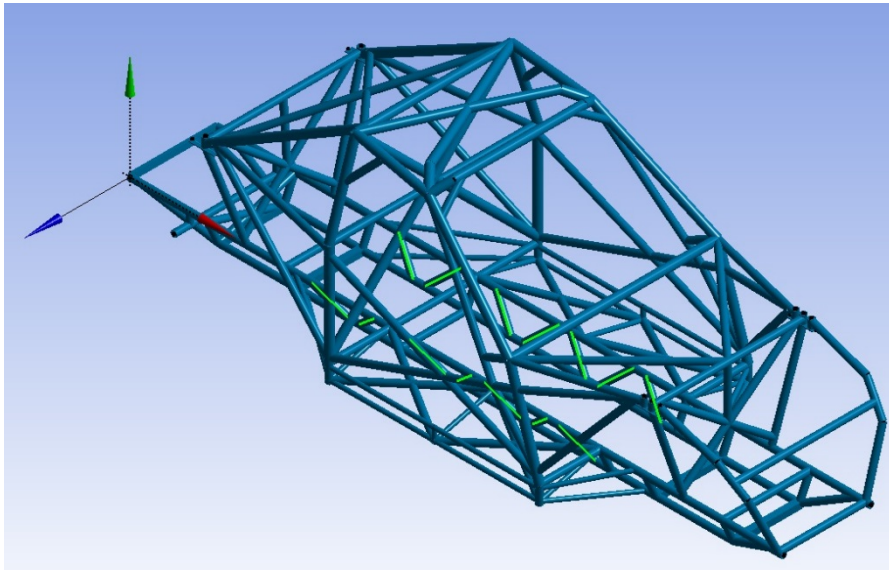


Figura 4-40 – Alternativa 4 – alterações efetuadas

4.3.2.1.1. Pré-Processamento

Procede-se da mesma forma apresentada no ponto 4.3.1.3.1, sendo que é necessário alterar as coordenadas referentes aos keypoints e nós das barras alteradas. Estas alterações são introduzidas através de linhas de código.

! definição dos keypoints	! definição dos nós
K,177,1.1539,0,0	N,177,1.1539,0,0
K,178,1.3195,-0.15,-0.07	N,178,1.3195,-0.15,-0.07
K,179,1.3945,-0.15,-0.07	N,179,1.3945,-0.15,-0.07
K,180,1.56,0,0	N,180,1.56,0,0
K,181,1.7823,0,0	N,181,1.7823,0,0
K,182,1.9479,-0.15,-0.07	N,182,1.9479,-0.15,-0.07
K,183,2.0229,-0.15,-0.07	N,183,2.0229,-0.15,-0.07
K,184,2.1884,0,0	N,184,2.1884,0,0
K,185,2.2634,0,0	N,185,2.2634,0,0
K,204,2.4289,-0.15,-0.07	N,204,2.4289,-0.15,-0.07
K,186,2.5039,-0.15,-0.07	N,186,2.5039,-0.15,-0.07
K,187,2.6695,0,0	N,187,2.6695,0,0
K,188,2.7445,0,0	N,188,2.7445,0,0
K,189,2.91,-0.15,-0.07	N,189,2.91,-0.15,-0.07
K,190,1.1539,0,-0.56	N,190,1.1539,0,-0.56
K,191,1.3195,-0.15,-0.49	N,191,1.3195,-0.15,-0.49
K,192,1.3945,-0.15,-0.49	N,192,1.3945,-0.15,-0.49
K,193,1.56,0,-0.56	N,193,1.56,0,-0.56
K,194,1.7823,0,-0.56	N,194,1.7823,0,-0.56
K,195,1.9479,-0.15,-0.49	N,195,1.9479,-0.15,-0.49
K,196,2.0229,-0.15,-0.49	N,196,2.0229,-0.15,-0.49
K,197,2.1884,0,-0.56	N,197,2.1884,0,-0.56
K,198,2.2634,0,-0.56	N,198,2.2634,0,-0.56
K,199,2.4289,-0.15,-0.49	N,199,2.4289,-0.15,-0.49
K,200,2.5039,-0.15,-0.49	N,200,2.5039,-0.15,-0.49
K,201,2.6694,0,-0.56	N,201,2.6694,0,-0.56
K,202,2.7445,0,-0.56	N,202,2.7445,0,-0.56
K,203,2.91,-0.15,-0.49	N,203,2.91,-0.15,-0.49

4.3.2.1.2. Análise Estática

4.3.2.1.2.1. *Processamento*

As condições para executar esta análise são as mesmas que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.2.1.

4.3.2.1.2.2. *Pós-Processamento*

O momento no eixo do x que existe na estrutura tem o seu valor máximo de 156,336 N·m na zona assinalada a vermelho na Figura 4-41.

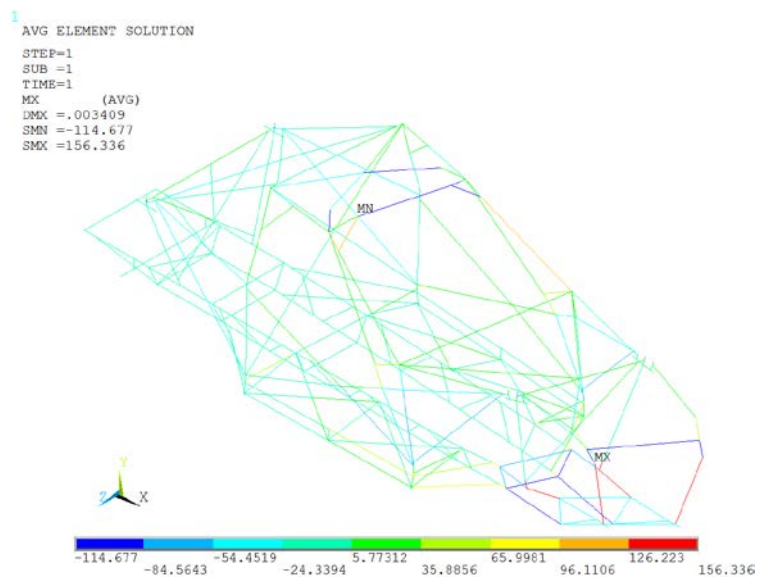


Figura 4-41 – Alternativa 4 – momento em x

O valor da rotação em torno do eixo dos x é de 0,007565 rad, na Figura 4-42 pode-se visualizar a zona mais crítica. Considera-se o maior valor em módulo.

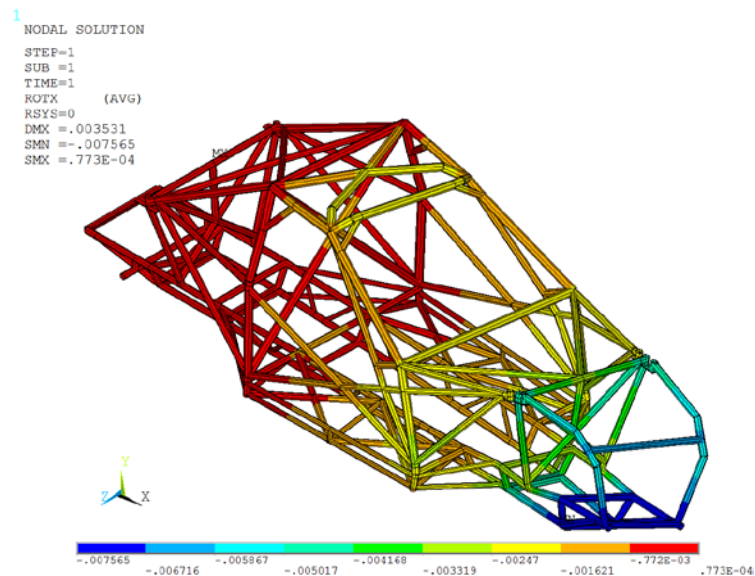


Figura 4-42 – Alternativa 4 – rotação em x

O deslocamento originado por esta carga em relação ao eixo dos x é de 0,432 mm, como se pode comprovar na Figura 4-43.

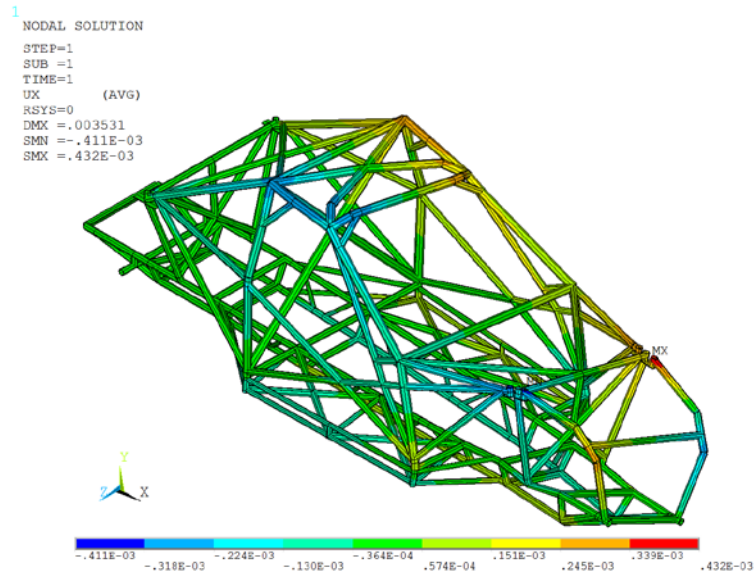


Figura 4-43 – Alternativa 4 – deslocamento em x

O deslocamento em y, apresentada na Figura 4-44, é de 3,421 mm.

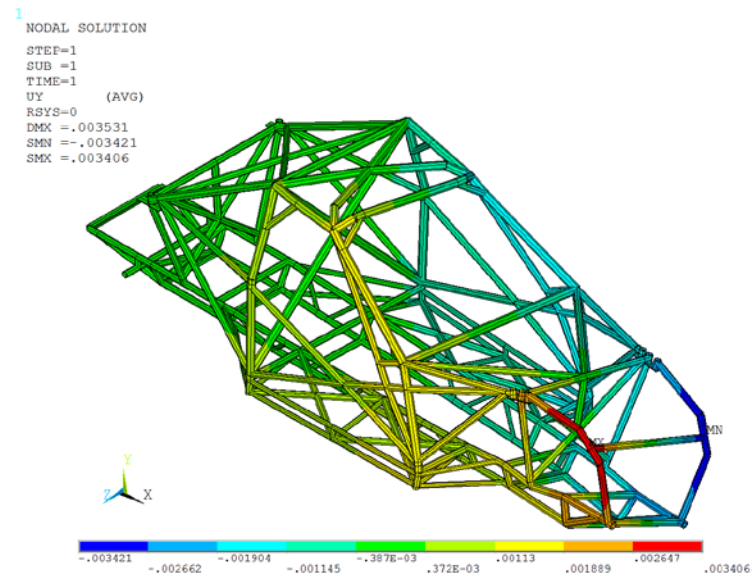


Figura 4-44 – Alternativa 4 – deslocamento em y

A tensão máxima que existe no chassi é de 203 MPa, como é visível na Figura 4-45.

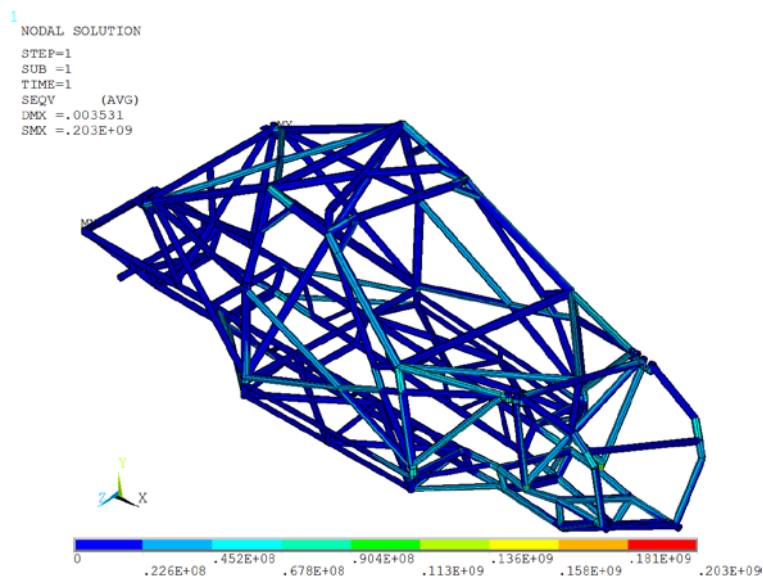


Figura 4-45 – Alternativa 4 – tensão de Von Mises

Na Tabela 4-22, apresentam-se os valores obtidos na análise estática efetuada à alternativa 4, bem como a comparação destes valores com os valores obtidos para a alternativa 3.

Tabela 4-22 – Alternativa 4 – resumo das propriedades

Momento x (N.m)	156,336	-0,010%
Rotação x (rad)	0,007565	-0,013%
Torção (N.m/rad)	20665,70	0,004%
Tensão Von Mises (MPa)	203	-0,493%
Deslocamento x (mm)	0,432	-0,231%
Deslocamento y (mm)	3,421	0%
Peso (kg)	198,8	0%

4.3.2.1.3. Análise Modal

4.3.2.1.3.1. *Processamento*

Utiliza-se as mesmas condições, que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.3.1.

4.3.2.1.3.2. *Pós-Processamento*

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-23, apresentando -se o modo e as frequências naturais.

Tabela 4-23 – Alternativa 4 – resultados da análise modal

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Tipo de modo
1	80,15	Global de Torção
2	89,41	Global de Flexão Vertical
3	91,86	Global Misto
4	114,09	Global de Flexão Lateral
5	120,77	Global Misto

O modo 1 (Figura 4-46) representa o primeiro modo global de torção, este ocorre aos 80,15 Hz significando um decréscimo de 0,012% quando comparado com o mesmo modo da alternativa 3.



Figura 4-46 – Alternativa 4 – modo 1

O modo 2 (Figura 4-47) é o primeiro modo global de flexão que surge, ocorrendo aos 89.41 Hz, o que corresponde a um decréscimo de 0,003% relativamente à alternativa 3.



Figura 4-47 – Alternativa 4 – modo 2

4.3.2.1.4. Centro de Gravidade

O centro de gravidade foi obtido pelo mesmo método descrito em 4.2.2.4, sendo que se apresenta na Tabela 4-24 os valores para o centro de gravidade com as alterações introduzidas. A coluna referente à diferença indica a alteração em milímetros da localização relativamente aos valores da alternativa 3.

Tabela 4-24 – Alternativa 4 - localização do centro de gravidade

Eixo (referencial)	Coordenadas [inicial; final]	Localização	Diferença (mm)	Disposição
x	[0;4200]	2157,5	-0,10	51,37%
y	[-150;1190]	329,62	0	35,79%
z	[390;-954,8]	-280,92	0	49,89%

4.3.2.2. Alternativa 5

Esta alternativa é semelhante à apresentada em 964.3.2.1, sendo que a variação da colocação das barras (representadas a verde na Figura 4-48) é 10 mm no sentido positivo do eixo x. Com esta alteração o peso do chassi não varia.

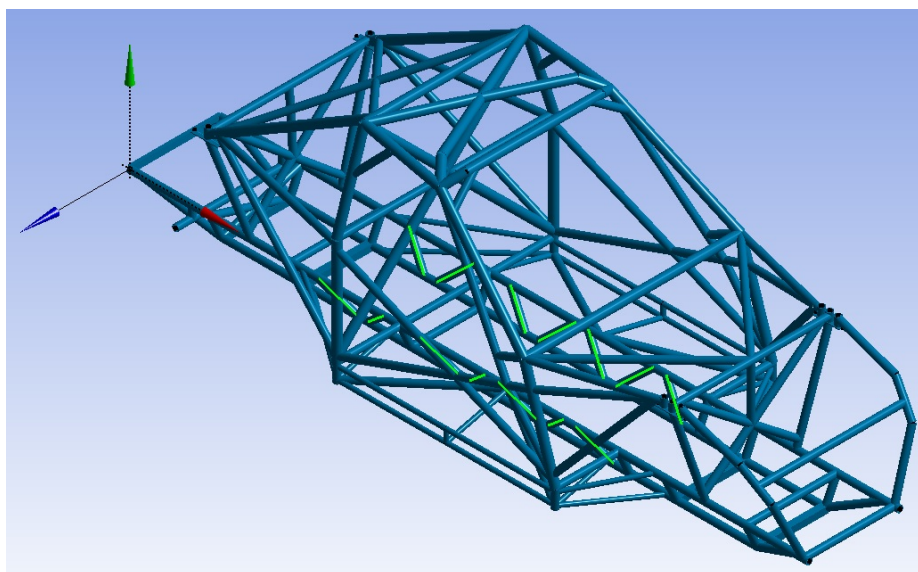


Figura 4-48 – Alternativa 5 – alterações efetuadas

4.3.2.2.1. Pré-Processamento

Procede-se da mesma forma apresentada no ponto 4.3.1.3.1, sendo que é necessário alterar as coordenadas referentes aos keypoints e nós das barras alteradas. Estas alterações são introduzidas através das linhas de código.

! definição dos keypoints	! definição dos nós
K,177,1.1739,0,0	N,177,1.1739,0,0
K,178,1.3395,-0.15,-0.07	N,178,1.3395,-0.15,-0.07
K,179,1.4145,-0.15,-0.07	N,179,1.4145,-0.15,-0.07
K,180,1.58,0,0	N,180,1.58,0,0
K,181,1.8023,0,0	N,181,1.8023,0,0
K,182,1.9679,-0.15,-0.07	N,182,1.9679,-0.15,-0.07
K,183,2.0429,-0.15,-0.07	N,183,2.0429,-0.15,-0.07
K,184,2.2084,0,0	N,184,2.2084,0,0
K,185,2.2834,0,0	N,185,2.2834,0,0
K,204,2.4489,-0.15,-0.07	N,204,2.4489,-0.15,-0.07
K,186,2.5239,-0.15,-0.07	N,186,2.5239,-0.15,-0.07
K,187,2.6895,0,0	N,187,2.6895,0,0
K,188,2.7645,0,0	N,188,2.7645,0,0

K,189,2.93,-0.15,-0.07	N,189,2.93,-0.15,-0.07
K,190,1.1739,0,-0.56	N,190,1.1739,0,-0.56
K,191,1.3395,-0.15,-0.49	N,191,1.3395,-0.15,-0.49
K,192,1.4145,-0.15,-0.49	N,192,1.4145,-0.15,-0.49
K,193,1.58,0,-0.56	N,193,1.58,0,-0.56
K,194,1.8023,0,-0.56	N,194,1.8023,0,-0.56
K,195,1.9679,-0.15,-0.49	N,195,1.9679,-0.15,-0.49
K,196,2.0429,-0.15,-0.49	N,196,2.0429,-0.15,-0.49
K,197,2.2084,0,-0.56	N,197,2.2084,0,-0.56
K,198,2.2834,0,-0.56	N,198,2.2834,0,-0.56
K,199,2.4489,-0.15,-0.49	N,199,2.4489,-0.15,-0.49
K,200,2.5239,-0.15,-0.49	N,200,2.5239,-0.15,-0.49
K,201,2.6894,0,-0.56	N,201,2.6894,0,-0.56
K,202,2.7645,0,-0.56	N,202,2.7645,0,-0.56
K,203,2.93,-0.15,-0.49	N,203,2.93,-0.15,-0.49

4.3.2.2.2. Análise Estática

4.3.2.2.2.1. *Processamento*

As condições para executar esta análise são as mesmas que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.2.1.

4.3.2.2.2.2. *Pós-Processamento*

O momento no eixo do x que existe na estrutura tem o seu valor máximo de 156,367 N·m na zona assinalada a vermelho na Figura 4-49.

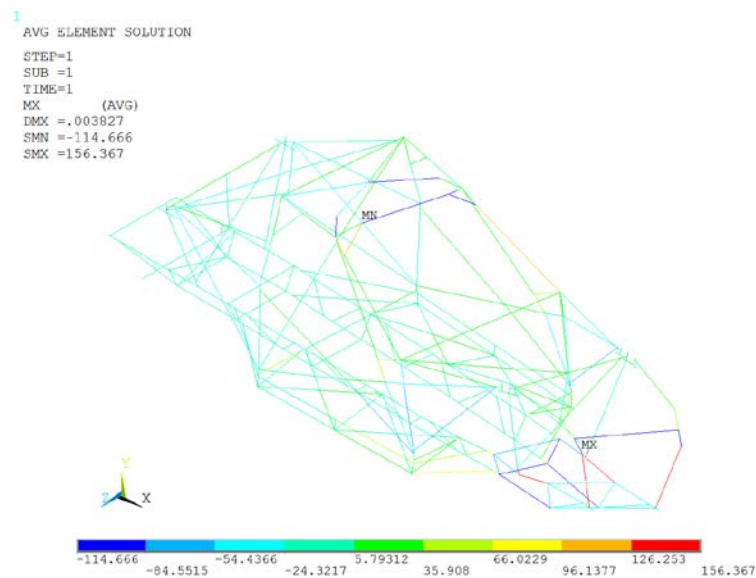


Figura 4-49 – Alternativa 5 – momento em x

O valor da rotação em torno do eixo dos x é de 0,008495 rad, na Figura 4-50 pode-se visualizar a zona mais crítica. Utiliza-se o maior valor em módulo.

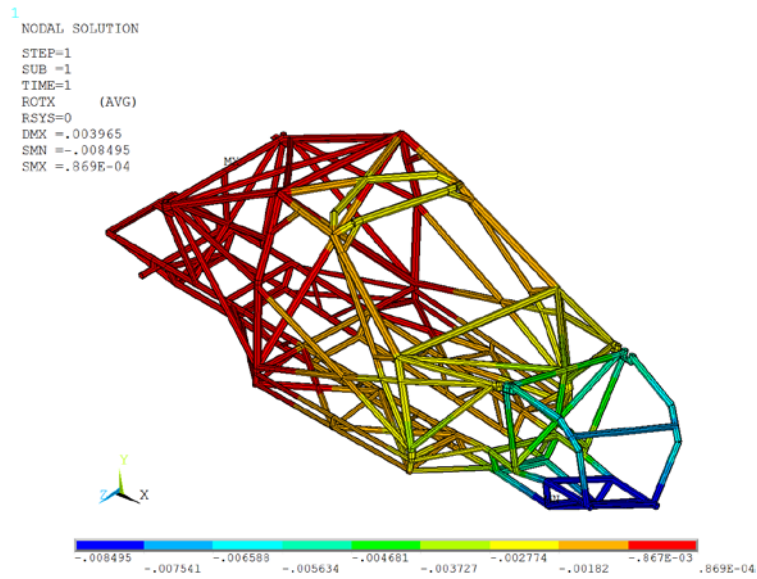


Figura 4-50 – Alternativa 5 – rotação em x

O deslocamento em x originado pela carga é de 0,486 mm, como se pode verificar na Figura 4-51.

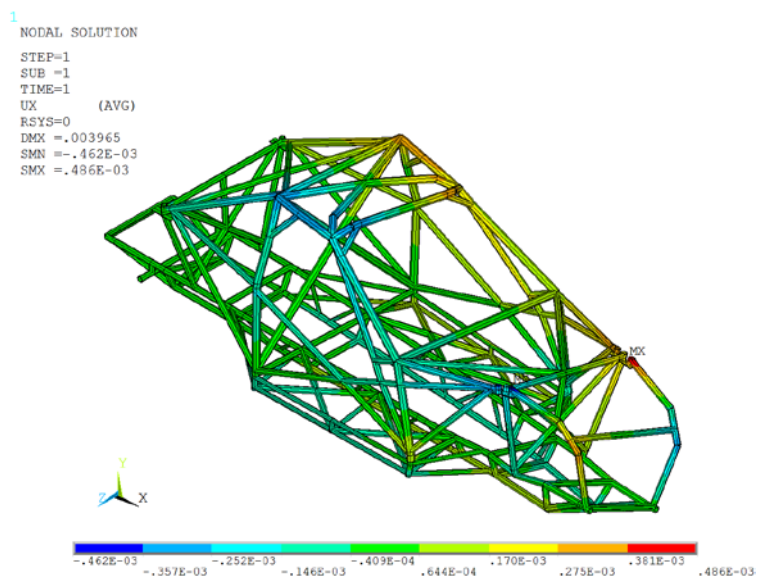


Figura 4-51 – Alternativa 5 – deslocamento em x

O deslocamento em y, mostrada na Figura 4-52, é de 3,841 mm, considera-se o maior valor em módulo.

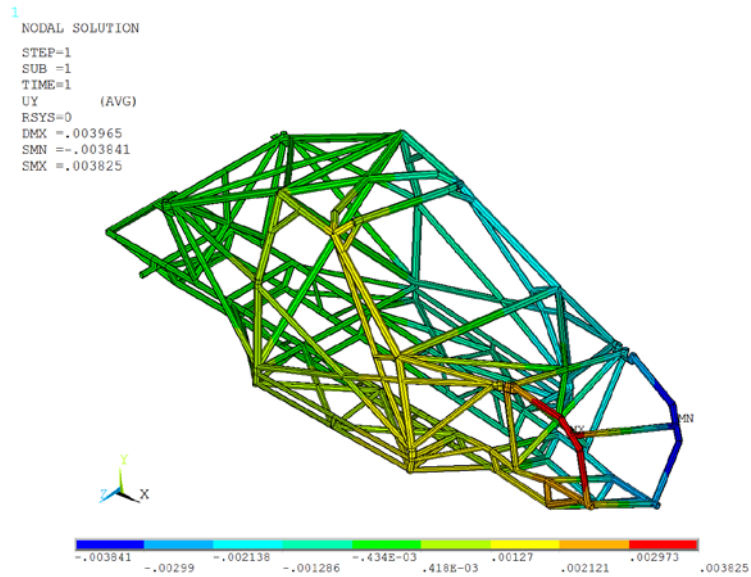


Figura 4-52 – Alternativa 5 – deslocamento em y

Através da tensão de Von Mises, apresentada na Figura 4-53, quantifica-se a maior tensão existente no chassi.

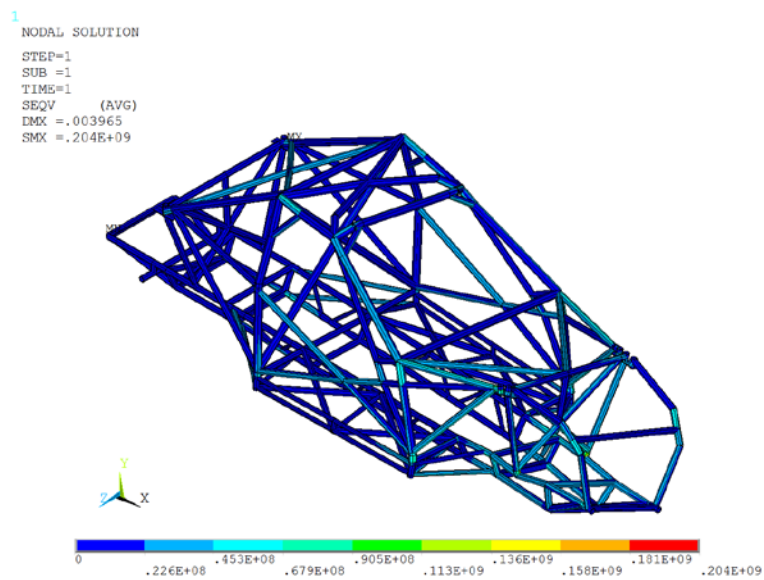


Figura 4-53 – Alternativa 5 – tensão de Von Mises

Na Tabela 4-25 apresentam-se os valores obtidos na análise estática efetuada à alternativa 5, bem como a comparação destes valores com os valores obtidos para a alternativa 3.

Tabela 4-25 – Alternativa 5 – resumo das propriedades

Momento x (N.m)	156,367	0,01%
Rotação x (rad)	0,008495	10,936%
Torção (N.m/rad)	18406,95	-12,267%
Tensão Von Mises (MPa)	203	0%
Deslocamento x (mm)	0,486	10,905%
Deslocamento y (mm)	3,841	10,935%
Peso (kg)	198,8	0%

4.3.2.2.3. Análise Modal

4.3.2.2.3.1. *Processamento*

As condições para executar esta análise são as mesmas que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.3.1.

4.3.2.2.3.2. *Pós-Processamento*

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-26, onde se apresenta o modo e as frequências naturais da estrutura.

Tabela 4-26 – Alternativa 5 – resultados da análise modal

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Tipo de modo
1	80,17	Global de Torção
2	89,40	Global de Flexão Vertical
3	91,85	Global Misto
4	114,12	Global de Flexão Lateral
5	120,76	Global Misto

O primeiro modo global de torção (Figura 4-54) ocorre aos 80,17 Hz o que corresponde a um aumento de 0,016% comparando com o mesmo modo obtido para a alternativa 3.



Figura 4-54 – Alternativa 5 – modo 1

O modo 2 (Figura 4-55) corresponde ao primeiro modo global de flexão, este ocorre aos 89,40 Hz, sendo inferior em 0,006% ao mesmo modo da alternativa 3.

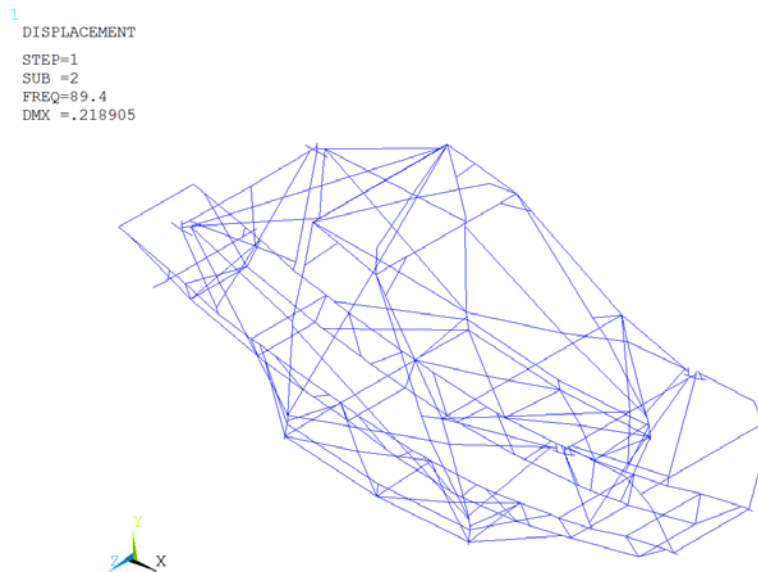


Figura 4-55 – Alternativa 5 – modo 2

4.3.2.2.4. Centro de Gravidade

O centro de gravidade foi obtido pelo mesmo método descrito em 4.2.2.4, sendo que se apresentam na Tabela 4-27 os valores para o centro de gravidade com as alterações introduzidas. A coluna referente à diferença indica a alteração em mm da localização relativamente à alternativa 3.

Tabela 4-27 – Alternativa 5 - localização do centro de gravidade

Eixo [referencial]	Coordenadas [inicial; final]	Localização	Diferença [mm]	Disposição
x	[0;4200]	2157,8	0,2	51,38%
y	[-150;1190]	329,62	0	35,79%
z	[390;-954,8]	-280,92	0	49,89%

4.3.2.3. Alternativa 6

Nesta alternativa vai aumentar-se o diâmetro dos tubos laterais, assinalados a verde na Figura 4-56, de 30 mm para 40 mm e desta forma quantificar o desempenho.

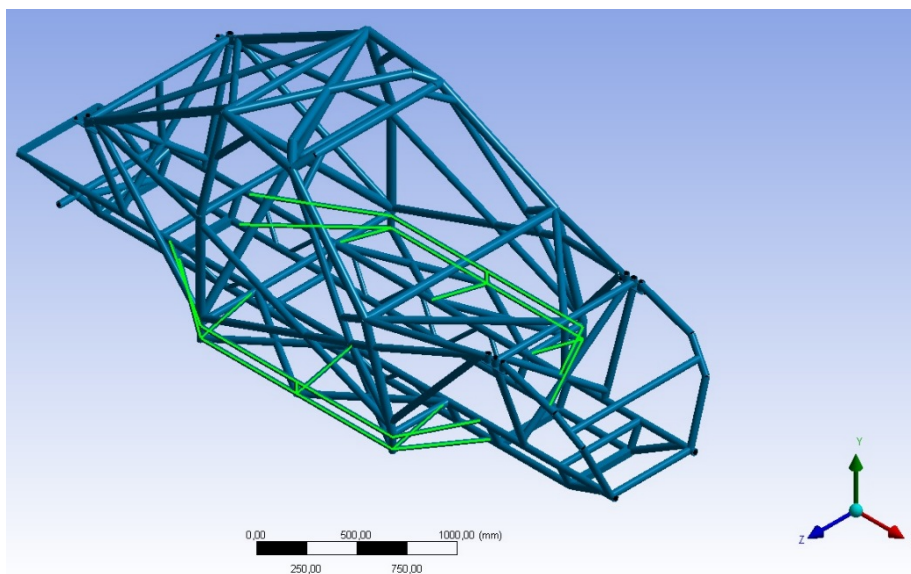


Figura 4-56 – Alternativa 6 – alterações efetuadas

4.3.2.3.1. Pré-Processamento

Procede-se da mesma forma apresentada no ponto 4.3.1.3.1, sendo necessário alterar os elementos correspondentes as barras que se pretendem alterar, ajustando-se os valores para a secção pretendida, como se demonstra através das linhas de código abaixo.

! definição das secções

!*

TYPE,1

MAT,1

SECTYPE,3,BEAM,CTUBE,40x2,0

SECOFFSET,CENT,

SECDDATA,0.018,0.02

ESYS,0

SECNUM,3

TSHAP,LINE

!

E,143,144

E,145,146

E,144,147

E,145,150

E,150,148

E,144,151

E,151,149

E,150,151

E,151,152

E,149,153

E,149,154

E,148,155

E,158,159

E,159,160

E,161,162

E,159,167

E,167,163

E,163,164

E,163,165
 E,166,167
 E,167,168
 E,156,157
 E,157,166
 E,166,161

4.3.2.3.2. Análise Estática

4.3.2.3.2.1. *Processamento*

As condições para executar esta análise são as apresentadas anteriormente no ponto 4.2.2.2.1.

4.3.2.3.2.2. *Pós-Processamento*

O momento no eixo do x tem o seu valor máximo de 157,873 N·m na zona assinalada a vermelho na Figura 4-57.

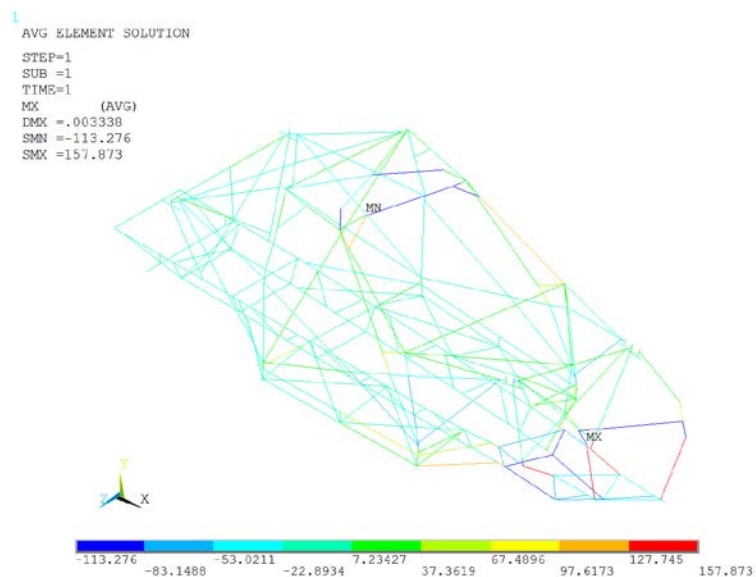


Figura 4-57 – Alternativa 6 – momento em x

A rotação em torno do eixo dos x é de 0,007378 rad, na Figura 4-58 pode-se visualizar a zona mais crítica. Considera-se o maior valor em módulo.

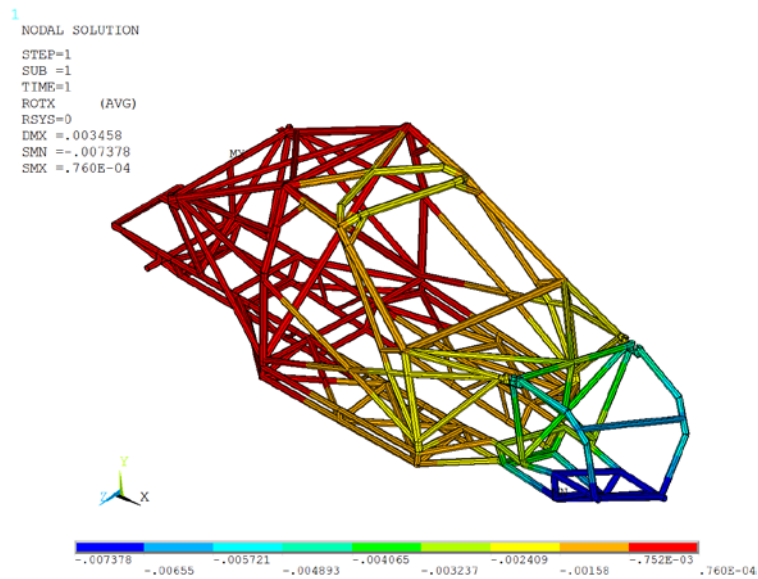


Figura 4-58 – Alternativa 6 – rotação em x

O deslocamento em x é de 0,432 mm, como se comprova na Figura 4-59.

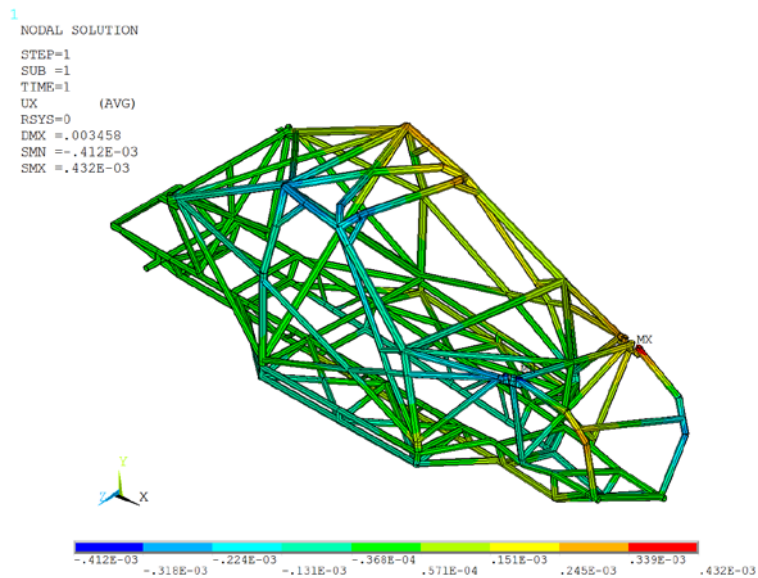


Figura 4-59 – Alternativa 6 – deslocamento em x

O deslocamento em y, apresentada na Figura 4-60, é de 3,324 mm.

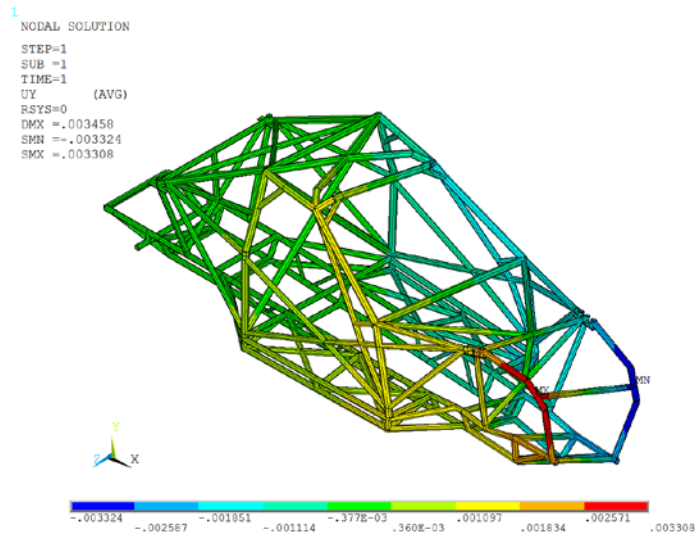


Figura 4-60 – Alternativa 6 – deslocamento em y

A tensão de Von Mises, Figura 4-61, é de 201 MPa

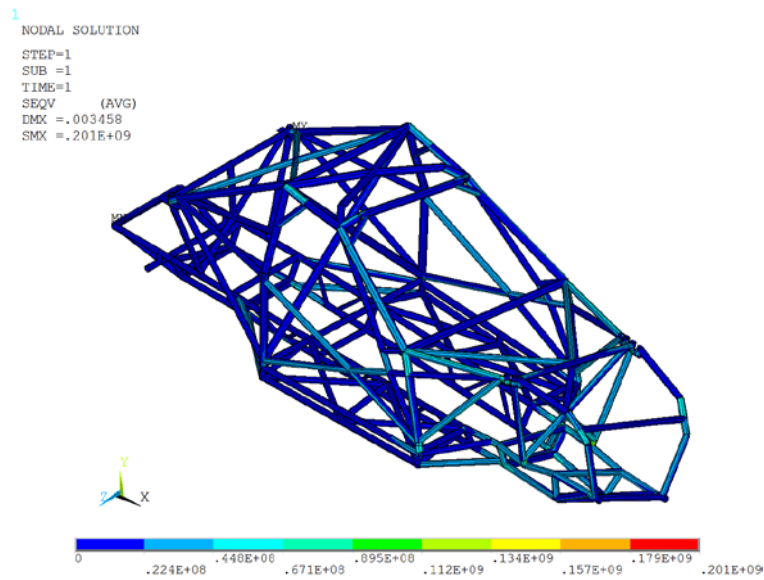


Figura 4-61 – Alternativa 6 – tensão de Von Mises

Na Tabela 4-28 apresenta-se os valores obtidos na análise estática efetuada à alternativa 6, bem como a comparação destes valores com os valores obtidos para a alternativa 3

Tabela 4-28 – Alternativa 6 - resumo das propriedades

Momento x (N.m)	157,873	0,964%
Rotação x (rad)	0,007378	-2,548%
Torção (N.m/rad)	21397,80	3,425%
Tensão Von Mises (MPa)	201	-1,493%
Deslocamento x (mm)	0,432	-0,231%
Deslocamento y (mm)	3,324	-2,918%
Peso (kg)	205,13	3.068%

4.3.2.3.3. Análise Modal

4.3.2.3.3.1. *Processamento*

As condições para executar esta análise são as mesmas que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.3.1.

4.3.2.3.3.2. *Pós-Processamento*

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-29, onde se apresenta o modo e as frequências naturais da estrutura.

Tabela 4-29 – Alternativa 6 – resultados da análise modal

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Tipo de Modo
1	80,31	Global de Torção
2	91,35	Global de Flexão Vertical
3	92,23	Global Misto
4	113,99	Global de Flexão Lateral
5	122,78	Global Misto

O primeiro modo global de torção (Figura 4-62) ocorre aos 80,31 Hz o que corresponde a um aumento de 0,187% comparando com o mesmo modo obtido para a alternativa 3.

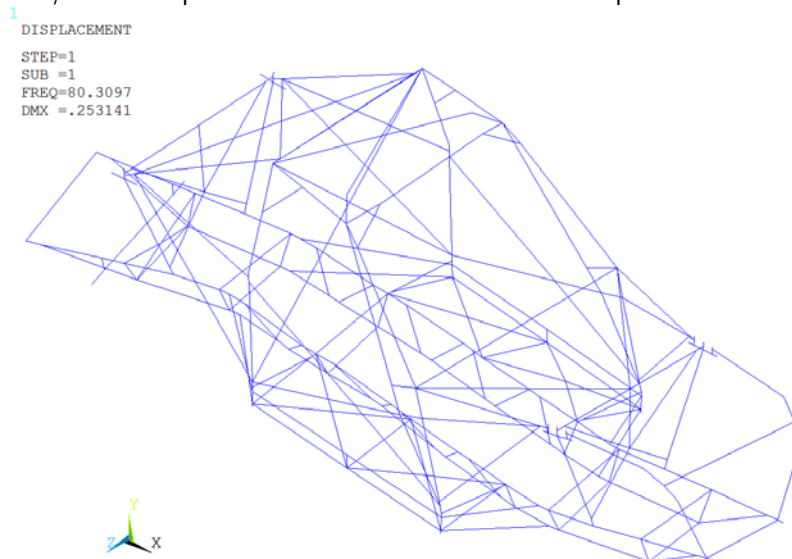


Figura 4-62 – Alternativa 6 – modo 1

O modo 2 (Figura 4-63) corresponde ao primeiro modo global de flexão, este ocorre aos 91,35Hz, sendo superior em 2,128% ao mesmo modo da alternativa 3.

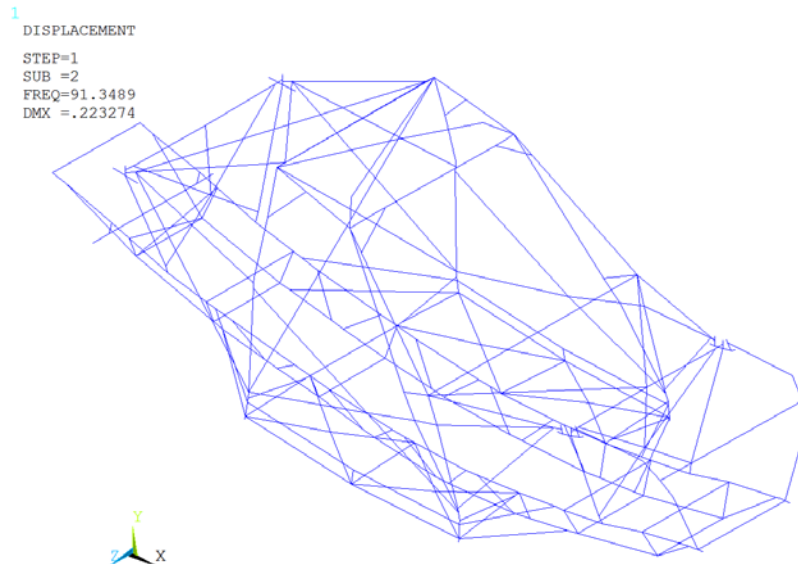


Figura 4-63 – Alternativa 6 – modo 2

4.3.2.3.4. Centro de Gravidade

O centro de gravidade foi obtido pelo mesmo método descrito em 4.2.2.4, sendo que se apresentam na Tabela 4-30 os valores para o centro de gravidade com as alterações introduzidas. A coluna referente à diferença indica a alteração da localização relativamente à alternativa 3.

Tabela 4-30 – Alternativa 6 – localização do centro de gravidade

Eixo [referencial]	Coordenadas [inicial; final]	Localização	Diferença [mm]	Disposição
x	[0;4200]	2160,1	2,50	51,43%
y	[-150;1190]	317,58	-12,04	34,89%
z	[390;-954,8]	-280,89	0,03	49,89%

4.3.2.4. *Análise dos resultados*

A análise de sensibilidade, como o próprio nome indica, tem como único propósito aferir as variáveis a estudar no updating. Como é possível verificar, todas as alterações provocadas nas variáveis surtiram alterações ao seu comportamento. Desta forma conclui-se que as variáveis em estudo têm margem para atingir um ponto ótimo.

Como se pode verificar na Tabela 4-31, a alternativa 4 aumenta a rigidez torsional ligeiramente e provoca a redução das tensões existentes no chassi. A deformação vertical mantém-se inalterada e a deformação lateral reduz ligeiramente. A alternativa 5 apresenta os piores resultados, diminuindo a rigidez torsional e aumentando as deformações consideravelmente. Relativamente ao peso, este mantém-se inalterado. Quanto à alternativa 6, os seus resultados são positivos, pois apresenta um aumento da rigidez torsional, as deformações diminuem e as tensões

geradas também diminuem. O principal problema é o incremento de peso que aumenta consideravelmente, ficando muito próximo do limite estabelecido.

Tabela 4-31 – Comparação dos resultados da análise estática

	A3 vs A4	A3 vs A5	A3 vs A6
Momento x (N.m)	-0,0096%	0,0102%	0,9641%
Rotação x (rad)	-0,0132%	10,9358%	-2,5481%
Rigidez Torsional (N.m/rad)	0,0036%	-12,2671%	3,4249%
Tensão Von Mises (MPa)	-0,4926%	0,0000%	-1,4925%
Deformação x (mm)	-0,2315%	10,9053%	-0,2315%
Deformação y (mm)	0,0000%	10,9347%	-2,9182%
Peso (kg)	0,0000%	0,0000%	3,0858%

Na Tabela 4-32 é possível verificar que a variação das frequências naturais é muito ligeira para a alternativa 4 e 5, sendo que a alternativa 4 apresenta melhorias no modo global de flexão e piora os seus resultados para o modo global de torção. Por seu turno na alternativa 5 existe uma redução da frequência no modo global de flexão e um aumento no modo global de torção. A alternativa 6 apresenta melhorias tanto no modo global de torção como no modo global de flexão.

Tabela 4-32 – Comparação dos resultados da análise modal

Modo	A3 vs A4	A3 vs A5	A3 vs A6
1	-0,0125%	0,0162%	0,1868%
2	0,0034%	-0,0056%	2,1281%
3	0,0054%	-0,0054%	0,4088%
4	-0,0088%	0,0175%	-0,0965%
5	0,0000%	-0,0083%	1,6371%

Com recurso à Tabela 4-33 verifica-se que nas alternativas 4 e 5 o centro de gravidade varia unicamente no sentido longitudinal. O centro de gravidade da alternativa 6 apresenta variações longitudinalmente e transversalmente de forma ligeira mas no sentido vertical baixa mais acentuadamente.

Tabela 4-33 – Comparação da disposição do centro de gravidade

	A3	A4		A5		A6	
x	51,3714%	51,3690%	-0,0024%	51,3762%	0,0048%	51,4310%	0,0595%
y	35,7925%	35,7925%	0,0000%	35,7925%	0,0000%	34,8940%	-0,8985%
z	49,8899%	49,8899%	0,0000%	49,8899%	0,0000%	49,8877%	-0,0022%

Desta forma confirma-se que existe a possibilidade de ajustamento das variáveis que se pretendia colocar em análise no updating. Assim espera-se obter uma melhoria no chassi sem aumentar em demasia o peso ou até mesmo reduzi-lo.

4.3.3. Updating

Após a análise de sensibilidade, e verificando onde se poderia intervir optou-se pelas barras que ligam os dois andares do chassi e pelas barras laterais, como se visualiza a verde na Figura 4-64.

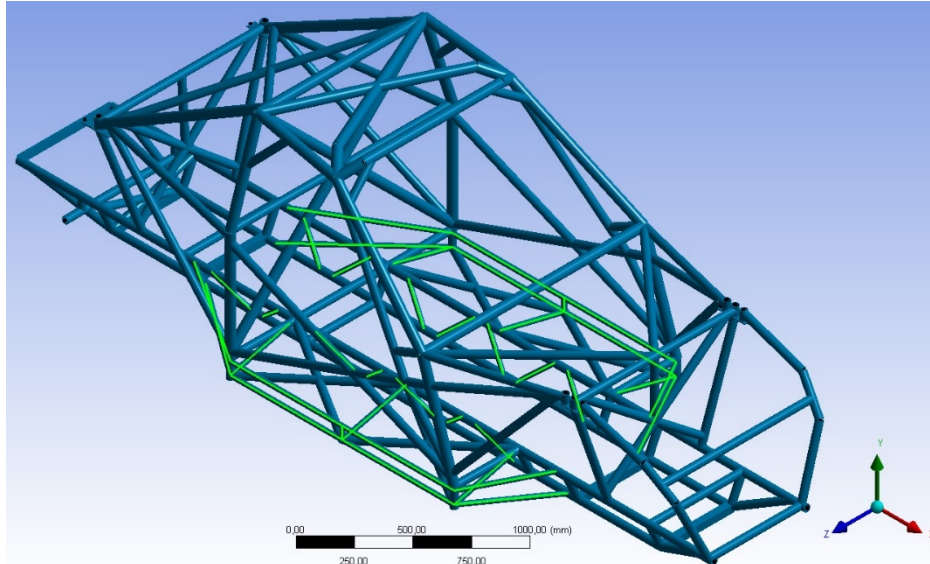


Figura 4-64 – Updating – alterações efetuadas

4.3.3.1. Preparação

Para se executar o updating é necessário criar um ficheiro de texto, *.txt* ao qual se atribui o nome “*MODnum*”, este ficheiro é apresentado na íntegra no Anexo C – Criação do modelo numérico para execução no updating. No ficheiro define-se o nome das incógnitas para todos os valores que se pretende otimizar, altera-se o valor da coordenada pela incógnita correspondente, define-se o valor inicial da incógnita, neste caso utiliza-se o valor da coordenada inicial. Este valor será a referencia para definir os intervalos de variação.

No ficheiro “*calcon21a*” definem-se os limites superior e inferior para as incógnitas poderem variar.

Este passo é efetuado como demonstrado de seguida.

```
ka=strncmp(fid(l),'PR177',5)
  PRN(nnc,4)=0.165/1.1639;
  PRN(nnc,5)=0.100/1.1639;
  PR177n=PR177n+1;
end
kb=strncmp(fid(l),'PR178',5);
  PRN(nnc,4)=0.164/1.3295;
  PRN(nnc,5)=0.100/1.3295;
  PR178n=PR178n+1;
end
kee=strncmp(fid(l),'PR179',5);
  PRN(nnc,4)=0.090/1.4045;
  PRN(nnc,5)=0.100/1.4045;
```

```

    PR179n=PR179n+1;
end
kd=strncmp(fid(l),'PR180',5);
    PRN(nnc,4)=0.165/1.57;
    PRN(nnc,5)=0.100/1.57;
    PR180n=PR180n+1;
end
ke=strncmp(fid(l),'PR181',5);
    PRN(nnc,4)=0.122/1.7923;
    PRN(nnc,5)=0.165/1.7923;
    PR181n=PR181n+1;
end
kf=strncmp(fid(l),'PR182',5);
    PRN(nnc,4)=0.165/1.9579;
    PRN(nnc,5)=0.100/1.9579;
    PR182n=PR182n+1;
end
kg=strncmp(fid(l),'PR183',5);
    PRN(nnc,4)=0.165/2.0329;
    PRN(nnc,5)=0.100/2.0329;
    PR183n=PR183n+1;
end
kh=strncmp(fid(l),'PR184',6);
    PRN(nnc,4)=0.122/2.1984;
    PRN(nnc,5)=0.165/2.1984;
    PR184n=PR184n+1;
end
ki=strncmp(fid(l),'PR185',6);
    PRN(nnc,4)=0.122/2.2734;
    PRN(nnc,5)=0.165/2.2734;
    PR185n=PR185n+1;
end
kj=strncmp(fid(l),'PR204',6);
    PRN(nnc,4)=0.165/2.4389;
    PRN(nnc,5)=0.100/2.4389;
    PR204n=PR204n+1;
end
kk=strncmp(fid(l),'PR186',6);
    PRN(nnc,4)=0.165/2.5139;
    PRN(nnc,5)=0.100/2.5139;
    PR186n=PR186n+1;
end
kl=strncmp(fid(l),'PR187',6);
    PRN(nnc,4)=0.122/2.6795;
    PRN(nnc,5)=0.165/2.6795;
    PR187n=PR187n+1;
end
km=strncmp(fid(l),'PR188',6);
    PRN(nnc,4)=0.122/2.7545;
    PRN(nnc,5)=0.165/2.7545;
    PR188n=PR188n+1;
end
kn=strncmp(fid(l),'PR189',6);
    PRN(nnc,4)=0.165/2.92;
    PRN(nnc,5)=0.100/2.92;
    PR189n=PR189n+1;
end
ko=strncmp(fid(l),'PR190',5);

```

```
PRN(nnc,4)=0.165/1.1639;
PRN(nnc,5)=0.100/1.1639;
PR190n=PR190n+1;
end
kp=strncmp(fid(l),'PR191',5);
PRN(nnc,4)=0.164/1.3295;
PRN(nnc,5)=0.100/1.3295;
PR191n=PR191n+1;
end
kq=strncmp(fid(l),'PR192',5);
PRN(nnc,4)=0.090/1.4045;
PRN(nnc,5)=0.100/1.4045;
PR192n=PR192n+1;
end
kr=strncmp(fid(l),'PR193',5);
PRN(nnc,4)=0.165/1.57;
PRN(nnc,5)=0.100/1.57;
PR193n=PR193n+1;
end
ks=strncmp(fid(l),'PR194',5);
PRN(nnc,4)=0.122/1.7923;
PRN(nnc,5)=0.165/1.7923;
PR194n=PR194n+1;
end
kt=strncmp(fid(l),'PR195',5);
PRN(nnc,4)=0.165/1.9579;
PRN(nnc,5)=0.100/1.9579;
PR195n=PR195n+1;
end
ku=strncmp(fid(l),'PR196',5);
PRN(nnc,4)=0.165/2.0329;
PRN(nnc,5)=0.100/2.0329;
PR196n=PR196n+1;
end
kv=strncmp(fid(l),'PR197',5);
PRN(nnc,4)=0.122/2.1984;
PRN(nnc,5)=0.165/2.1984;
PR197n=PR197n+1;
end
kw=strncmp(fid(l),'PR198',5);
PRN(nnc,4)=0.122/2.2734;
PRN(nnc,5)=0.165/2.2734;
PR198n=PR198n+1;
end
kx=strncmp(fid(l),'PR199',5);
PRN(nnc,4)=0.165/2.4389;
PRN(nnc,5)=0.100/2.4389;
PR199n=PR199n+1;
end
ky=strncmp(fid(l),'PR200',5);
PRN(nnc,4)=0.165/2.5139;
PRN(nnc,5)=0.100/2.5139;
PR200n=PR200n+1;
end
kz=strncmp(fid(l),'PR201',5);
PRN(nnc,4)=0.122/2.6795;
PRN(nnc,5)=0.165/2.6795;
PR201n=PR201n+1;
```

```
end
kaa=strncmp(fid(l),'PR202',5);
  PRN(nnc,4)=0.122/2.7545;
  PRN(nnc,5)=0.165/2.7545;
  PR202n=PR202n+1;
end
kbb=strncmp(fid(l),'PR203',5);
  PRN(nnc,4)=0.165/2.92;
  PRN(nnc,5)=0.100/2.92;
  PR203n=PR203n+1;
end
kff=strncmp(fid(l),'PRE2',4);
  PRN(nnc,4)=0.005/0.015;
  PRN(nnc,5)=0.010/0.015;
  PRE2n=PRE2n+1;
end
```

Após o termino do cálculo são devolvidos os valores ótimos para cada incógnita, esses valores são apresentados em baixo.

```
PR177=1.1617
PR178=1.3061
PR179=1.3839
PR180=1.6068
PR181=1.8572
PR182=1.8333
PR183=1.9792
PR184=2.1984
PR185=2.2734
PR204=2.4389
PR186=2.5139
PR187=2.6795
PR188=2.7545
PR189=2.92
PR190=1.2113
PR191=1.2861
PR192=1.4594
PR193=1.5936
PR194=1.8382
PR195=2.0203
PR196=2.0760
PR197=2.1569
PR198=2.2082
PR199=2.4031
PR200=2.5847
PR201=2.6605
PR202=2.7220
PR203=2.7999
PR2=1.76
```

4.3.3.2. Pré-Processamento

Para efetuar as simulações é necessário proceder as alterações no ficheiro utilizado na alternativa 3, onde se substitui as coordenadas dos keypoints e dos nós que foram otimizados, bem como se altera o valor do raio interior e exterior.

! Definição dos keypoints	! Definição dos nós
K,177,1.1617,0,0	N,177,1.1617,0,0
K,178,1.3061,-0.15,-0.07	N,178,1.3061,-0.15,-0.07
K,179,1.3839,-0.15,-0.07	N,179,1.3839,-0.15,-0.07
K,180,1.6068,0,0	N,180,1.6068,0,0
K,181,1.8572,0,0	N,181,1.8572,0,0
K,182,1.8333,-0.15,-0.07	N,182,1.8333,-0.15,-0.07
K,183,1.9792,-0.15,-0.07	N,183,1.9792,-0.15,-0.07
K,184,2.1984,0,0	N,184,2.1984,0,0
K,185,2.2734,0,0	N,185,2.2734,0,0
K,204,2.4389,-0.15,-0.07	N,204,2.4389,-0.15,-0.07
K,186,2.5139,-0.15,-0.07	N,186,2.5139,-0.15,-0.07
K,187,2.6795,0,0	N,187,2.6795,0,0
K,188,2.7545,0,0	N,188,2.7545,0,0
K,189,2.92,-0.15,-0.07	N,189,2.92,-0.15,-0.07
K,190,1.2113,0,-0.56	N,190,1.2113,0,-0.56
K,191,1.2861,-0.15,-0.49	N,191,1.2861,-0.15,-0.49
K,192,1.4594,-0.15,-0.49	N,192,1.4594,-0.15,-0.49
K,193,1.5936,0,-0.56	N,193,1.5936,0,-0.56
K,194,1.8382,0,-0.56	N,194,1.8382,0,-0.56
K,195,2.0203,-0.15,-0.49	N,195,2.0203,-0.15,-0.49
K,196,2.0760,-0.15,-0.49	N,196,2.0760,-0.15,-0.49
K,197,2.1569,0,-0.56	N,197,2.1569,0,-0.56
K,198,2.2082,0,-0.56	N,198,2.2082,0,-0.56
K,199,2.4031,-0.15,-0.49	N,199,2.4031,-0.15,-0.49
K,200,2.5847,-0.15,-0.49	N,200,2.5847,-0.15,-0.49
K,201,2.6605,0,-0.56	N,201,2.6605,0,-0.56
K,202,2.7220,0,-0.56	N,202,2.7220,0,-0.56
K,203,2.7999,-0.15,-0.49	N,203,2.7999,-0.15,-0.49
! definição de secções	
TYPE,1	
MAT,1	
SECTYPE,6,BEAM,CTUBE,30x2,0	
SECOFFSET,CENT,	
SECDATA,0.0156,0.0176	
ESYS,0	
SECNUM,6	
TSHAP,LINE	
!	

4.3.3.3. Análise Estática

4.3.3.3.1. Processamento

As condições para executar esta análise são as mesmas que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.2.1.

4.3.3.3.2. Pós-Processamento

O momento no eixo do x existente na estrutura é 156,855 N·m na zona assinalada a vermelho na Figura 4-65.

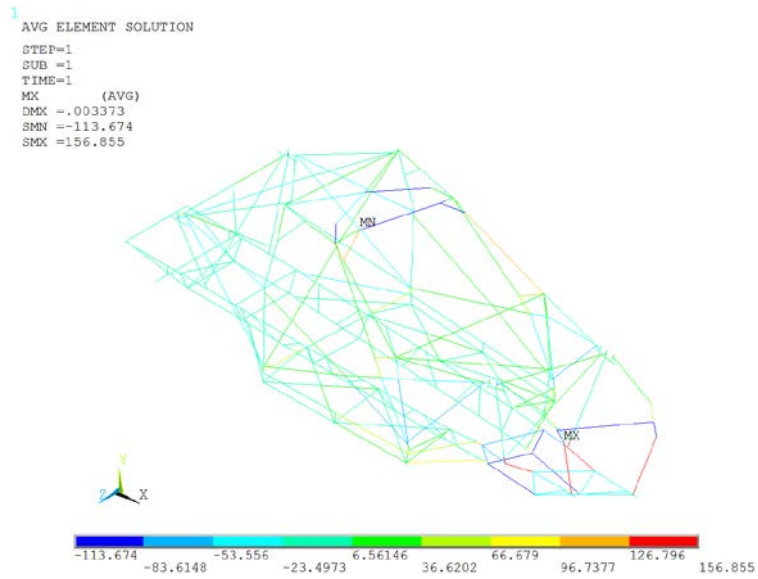


Figura 4-65 – Updating – momento em x

O valor da rotação em torno do eixo dos x é de 0,007461 rad, na Figura 4-66 pode-se visualizar a zona mais crítica.

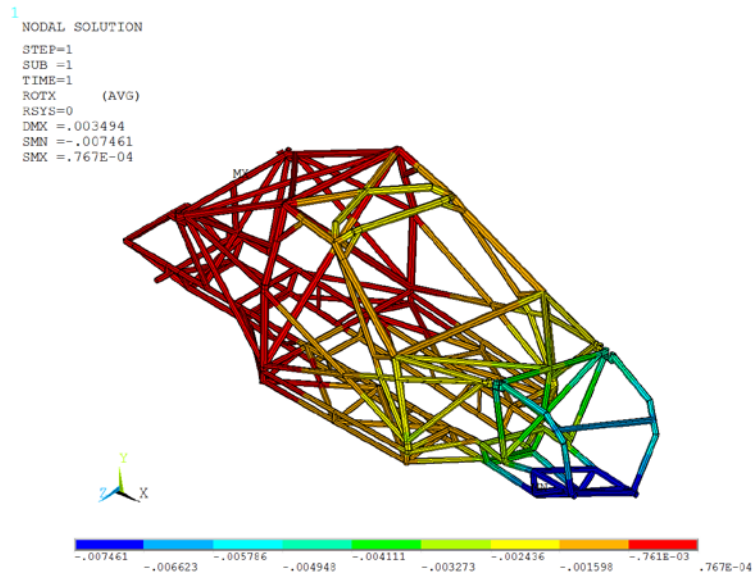


Figura 4-66 – Updating – rotação em x

O deslocamento em x é de 0,432 mm, como se pode testemunhar na Figura 4-67.

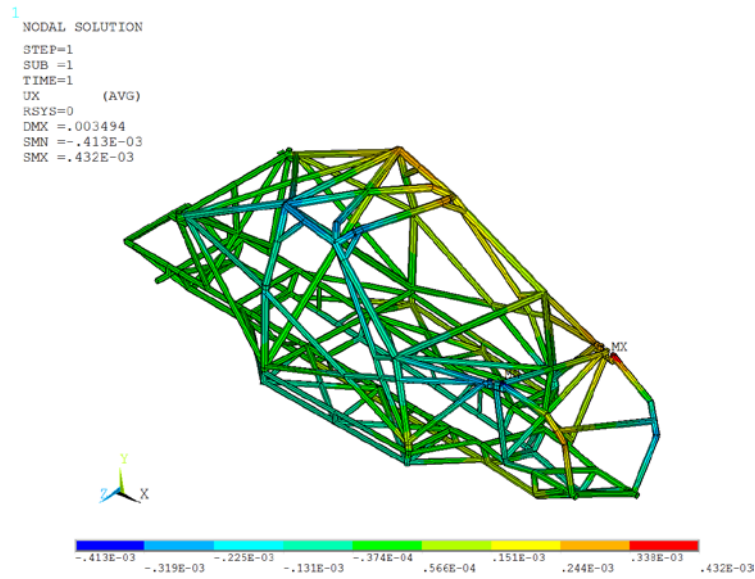


Figura 4-67 – Updating – deslocamento em x

O deslocamento em y, apresentada na Figura 4-68, é de 3,376 mm.

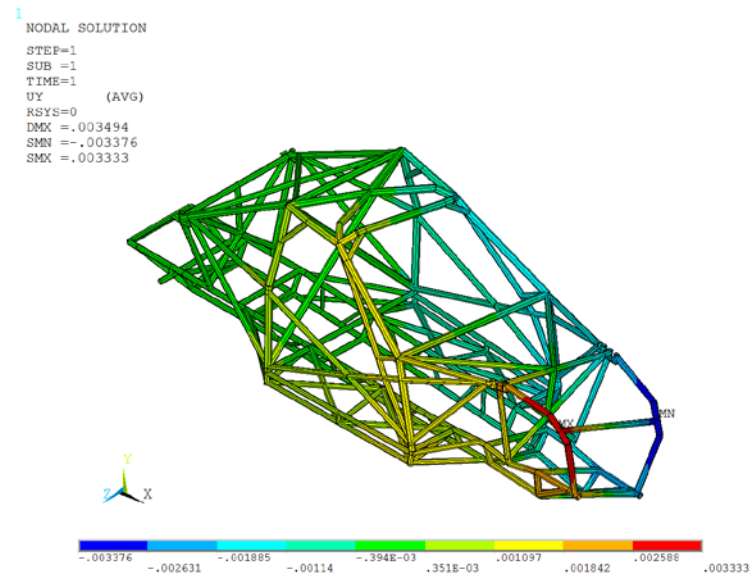


Figura 4-68 – Updating – deslocamento em y

Na Figura 4-69 é apresentada a tensão de Von Mises que atua no chassi.

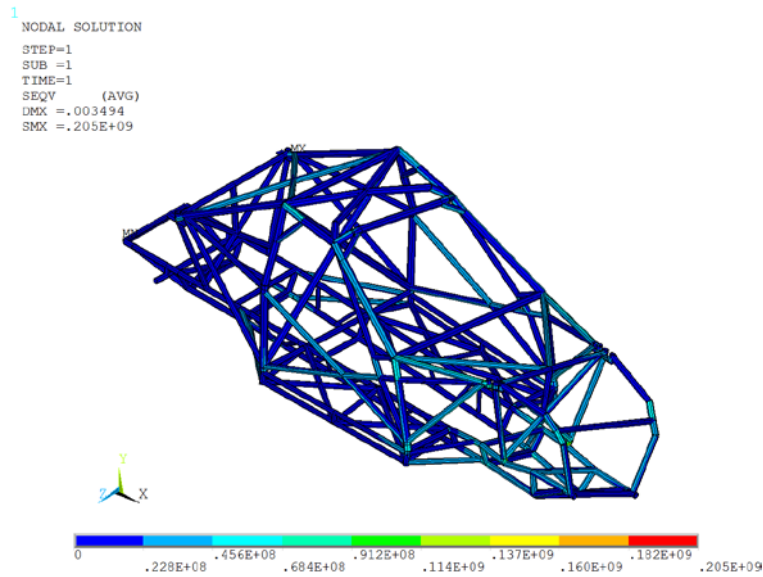


Figura 4-69 – Updating – tensão de von Mises

Na Tabela 4-34 apresenta-se os valores obtidos na análise estática efetuada ao updating, bem como a comparação destes valores com os valores obtidos para a alternativa 3

Tabela 4-34 – Updating - resumo das propriedades

Momento x (N.m)	156,855	0,321%
Rotação x (rad)	0,007461	-1,407%
Rigidez Torsional (N.m/rad)	21023,32	1,705%
Tensão Von Mises (MPa)	205	0,488%
Deslocamento x (mm)	0,432	-0,231%
Deslocamento y (mm)	3,376	-1,333%
Peso (kg)	201,87	1.521%

4.3.3.4. Análise Modal

4.3.3.4.1. Processamento

As condições para executar esta análise são as mesmas que foram apresentadas anteriormente, no ponto 4.2.2.3.1.

4.3.3.4.2. Pós-Processamento

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-35, onde se apresenta o modo e as frequências naturais da estrutura.

Tabela 4-35 – Updating – resultados da análise modal

Modo de vibração	Frequência [Hz]	Tipo de Modo
1	80,02	Global de Torção
2	90,17	Global de Flexão Vertical
3	92,06	Global Misto
4	113,95	Global de Flexão Lateral
5	120,71	Global Misto

O primeiro modo global de torção (Figura 4-70) ocorre aos 80,022 Hz o que corresponde a um decréscimo de 0,172% comparando com o mesmo modo obtido para a alternativa 3.

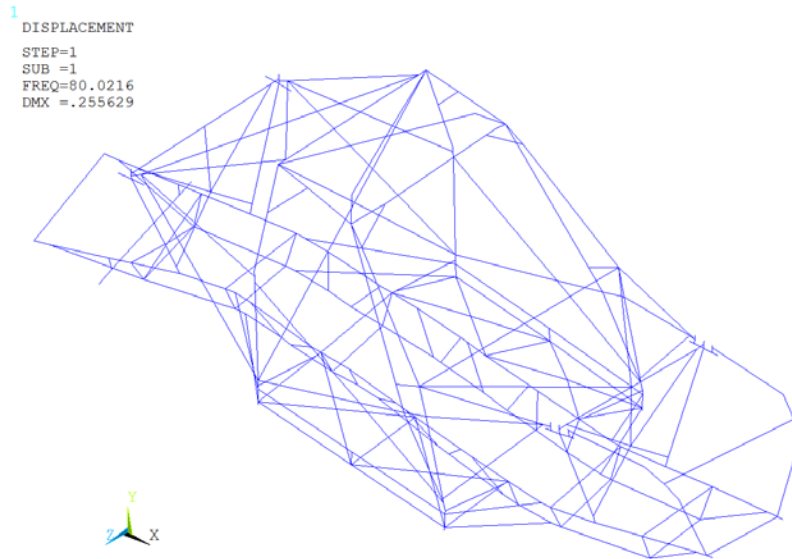


Figura 4-70 – Updating – modo 1

O modo 2 (Figura 4-71) corresponde ao primeiro modo global de flexão, este ocorre aos 90,167 HZ, sendo superior em 0,845% ao mesmo modo da alternativa 3.

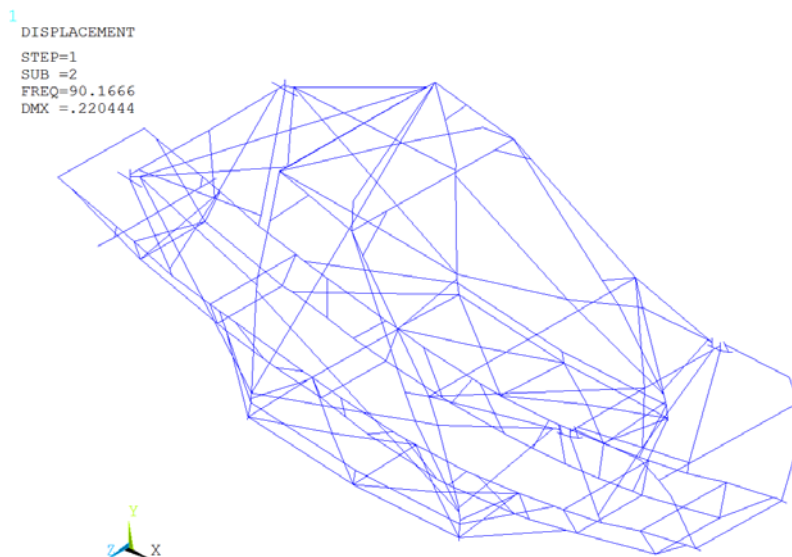


Figura 4-71 – Updating – modo 2

4.3.3.5. Centro de Gravidade

O centro de gravidade foi obtido pelo mesmo método descrito em 4.2.2.4, sendo que se apresenta na Tabela 4-36 os valores para o centro de gravidade com as alterações introduzidas. A coluna referente à diferença indica a alteração em mm da localização relativamente à alternativa 3.

Tabela 4-36 – Updating – localização do centro de gravidade

Eixo [referencial]	Coordenadas [inicial; final]	Localização	Diferença [mm]	Disposição
x	[0;4200]	2158,9	1,30	51,40%
y	[-150;1190]	334,35	-5,93	35,35%
z	[390;-954,8]	-280,42	0,5	49,85%

4.3.3.6. Análise dos resultados

Esta análise de resultados incide sobre a comparação dos resultados obtidos nas simulações efetuadas para o chassi inicial, a alternativa 3 e o updating, avaliando-se desta forma as evoluções existentes no desenrolar do trabalho.

O valor da rigidez torsional após o updating aumentou 1,71% relativamente à alternativa 3, se se comparar o chassi inicial e o final o aumento é de 11%. O valor obtido para a deformação vertical diminui 1,33% quando se compara a alternativa 3 com o updating, quando se compara o updating com o inicial verifica-se uma redução de 23%. A deformação longitudinal reduz 0,23% quando se compara o updating com a alternativa 3, mas comparando o updating com o chassi inicial a redução cifra-se em 22%. Comparando as tensões existentes, existe um aumento de 0,49% entre a alternativa 3 e o updating, se a comparação for feita entre o chassi inicial e o updating existe um aumento de 6,83%. O peso aumenta 1,52 quando se compara a alternativa 3 com o updating, quando se compara o updating e o chassi inicial existe um aumento de 7,38%.

Tabela 4-37 – Comparação dos resultados da análise estática

	U vs A3	U vs D06
Momento x (N.m)	0,32%	-7,1%
Rotação x (rad)	1,41%	-20,27%
Rigidez Torsional (N.m/rad)	1,71%	10,95%
Tensão Von Mises (MPa)	0,49%	6,83%
Deformação x (mm)	-0,23%	-21,99%
Deformação y (mm)	-1,33%	-23,13%
Peso (kg)	1,52%	7,38%

A primeira frequência natural que corresponde ao modo global de torção aumentou 19,59% comparando o chassi inicial e o updating, no entanto reduziu 0,17% se compararmos o updating

com a alternativa 3. A segunda frequência natural onde se desenvolve o primeiro modo global de flexão diminui 0,74% comparando o updating com o chassi inicial, mas o updating em relação à alternativa 3 aumentou 0,85%.

Tabela 4-38 – Comparação dos resultados da análise modal

Modo	U vs A3	U vs D06
1	-0,17%	19,59%
2	0,85%	-0,74%
3	0,23%	0,03%
4	-0,13%	3,84%
5	-0,05%	-0,96%

Na direção longitudinal a sua disposição deslocou-se 0,6% para a frente do veículo comparando o chassi inicial e o updating, se a comparação for entre a alternativa 3 e o updating o deslocamento é de 0,06%. Na direção vertical a sua disposição reduziu-se em 1,83% comparando a alternativa 3 e o updating, se a comparação for entre o chassi inicial e o updating existe uma redução de 9,21%. Na direção transversal existe uma variação negativa de 0,18% e de 0,15%, entre a alternativa 3 e o updating e entre o chassi inicial e o updating respetivamente.

Tabela 4-39 – Comparação da disposição do centro de gravidade

	D06	A3	U	U vs A3	U vs D06
x	51,09%	51,37%	51,40%	0,06%	0,61%
y	37,57%	34,79%	35,35%	-1,83%	-9,21%
z	49,88%	49,89%	49,85%	-0,18%	-0,15%

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1. Conclusões

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível estabelecer a ponte entre o ensino e o mundo empresarial, absorvendo-se o que melhor têm esses dois mundos que apesar de serem distintos, partilham o mesmo objetivo. O estudo apresentado neste trabalho permitiu obter conhecimentos mais aprofundados sobre como se procede ao desenvolvimento de um automóvel de competição que se insere na categoria T1 no Campeonato Nacional de Todo-Terreno. Desta forma foi possível aplicar os conhecimentos adquiridos nas diferentes unidades curriculares para se atingir os objetivos propostos.

Neste trabalho procedeu-se à análise de tensões, deformações e da rigidez torsional de um chassi que se insere na categoria 1 dos campeonatos de todo terreno, verificando-se ainda se estava conforme as condições impostas pelos regulamentos da FIA.

Após a análise dos resultados obtidos com as simulações numéricas ao chassi inicial, verificou-se a necessidade de proceder a alterações do mesmo para melhorar a sua resposta a nível estático, dinâmico e na disposição do seu centro de gravidade. Essas alterações serão efetuadas nos pontos em que as simulações revelaram como críticos. Esses pontos encontravam-se na parte inferior do chassi, localizada por baixo do cockpit. As alterações efetuadas tiverem em consideração as limitações de atravancamento existentes.

Analisando os resultados de forma global, considera-se que os objetivos foram cumpridos, pois os parâmetros onde era expectável obter-se melhorias caminharam nesse sentido. A rigidez torsional aumentou 11% passando dos 18721 N·m/rad para 21023 N·m/rad, a deformação vertical reduziu desde os 4,15 mm para os 3,4 mm diminuindo desta forma 23%, a deformação longitudinal que inicialmente era de 0,53 mm reduziu para 0,43 mm representando uma perda de 22%, as tensões existentes no chassi aumentaram desde os 191 MPa para os 205 MPa o que corresponde a um aumento de 7% mas mantiveram-se dentro dos limites para se manter a fiabilidade esperada. O peso aumentou 7,4%, inicialmente era de 186 Kg para os 201 Kg, ficando dentro da margem existente para o seu aumento. As variações consideradas são entre o chassi inicial e o chassi final após a otimização do updating.

Para caracterizar o comportamento dinâmico realizaram-se análises modais numéricas. As frequências naturais encontram-se numa gama fora do campo dos carregamentos externos

prováveis. Que poderia ser gerada pela sobreposição dos efeitos dinâmicos envolvidos. A primeira frequência natural que corresponde ao modo global de torção passou dos 64,4 Hz para 80 Hz aumentando desta forma 20%. A segunda frequência natural onde se desenvolve o primeiro modo global de flexão inicialmente era 91 Hz passou para 90 Hz diminuindo 0,74 % com efeito pouco significativos.

O centro de gravidade pode-se considerar que foi otimizado, pois longitudinalmente a sua disposição ficou em 51,40%, representando um deslocamento de 13,1 mm para a frente do veículo comparativamente ao chassi inicial que tinha a sua disposição em 51,09%, transversalmente a disposição passou dos 49,88% para os 49,85%, representando um deslocamento de 0,43 mm para o lado direito do veículo. Nestas duas direções é de notar que o centro de gravidade continua aproximado do centro da estrutura. Inicialmente o centro de gravidade na direção vertical encontrava-se com a disposição de 38% conseguindo-se diminuir 29,8 mm, assumindo no final a 35%.

A nível pessoal este trabalho permitiu absorver conhecimentos junto de pessoas que ao longo dos anos se dedicaram ao desenvolvimento de estruturas tubulares para chassis, conhecimentos esses que foram obtidos através da experiência e aplicação prática.

5.2. Sugestão para trabalhos futuros

A evolução de produtos é uma necessidade fulcral nas empresas que pretendam competir e sobreviver no mercado, para tal estas devem estar em constante evolução. De seguida apresentam-se algumas sugestões de melhoria para este projeto.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros sugere-se que se execute a validação dos resultados numéricos aquando da construção de um novo chassi, pois desta forma é possível aferir a correlação entre os resultados obtidos numericamente e os resultados experimentais, visto que a fiabilidade dos elementos finitos é elevado mas não está isenta de erros.

Para melhorar a segurança do piloto e do co-piloto sugere-se que se realize uma análise ao impacto, pois em competição comete-se sempre excessos que podem resultar em acidentes. Sendo o todo terreno uma competição que ocorre em estradas ladeadas de árvores, quando ocorrem os excessos, estes é quase sempre crítica.

Realizar uma análise aos materiais existentes no mercado, para dessa forma reduzir a diferença entre o limite do material e da soldadura, pois nesta fase o material suporta 815 MPa e

a soldadura 496 MPa. Se existir um material com o limite mais próximo do limite da soldadura conseguir-se-ia reduzir custos, ao nível da aquisição do material bem como facilitaria a soldadura.

Outra sugestão, esta até ligeiramente mais radical, seria estudar um chassi monocoque para a zona do habitáculo e criar sub-chassis tubulares na zona frontal e traseira do veículo. Esta sugestão é baseada no que alguns construtores estão a realizar nos seus novos veículos, como por exemplo a Toyota Hilux ou a Ford Ranger, é preciso ter em consciência que este método seria mais dispendioso pelo que seria necessário realizar um estudo para verificar a viabilidade deste projeto.

6. Bibliografia

1. <https://pt.scribd.com/doc/16954783/METODOLOGIA-DE-PROJETO-E-CONSTRUCAO-DE-CHASSIS-TUBULARES-SPACEFRAME-DE-VEICULOS-LEVES>. [Acedido 2014 17-04].
2. <https://www.flickr.com/photos/sjb4photos/5638989715/>. [Acedido 2014 10-06].
3. <http://www.coachbuilt.com/bui/h/hayes/hayes.htm>. [Acedido 2014 15-06].
4. Genta, G. and L. Morello, *The Automotive Chassis: Volume 1: Components Design*. 2008: Springer.
5. <http://www.cordhaven.com/EBAY/AuburnSpeedster/Chassis-Engine/web/Picture555136.jpg>. [Acedido 2014 30-06].
6. http://www.classicandperformancecar.com/buying/octanebuyingguide/263089/citroen_traction_avant_19341957.html. [Acedido 2014 17-04].
7. http://www.registrotouringsuperleggera.com/ITA_storia.html. [Acedido 2014 17-04].
8. <http://luiscezar.blogspot.pt/2009/05/lancia-aprilia.html>. [Acedido 2014 30-06].
9. Bradley, D., et al., *Automotive Industry Analysis*. 2005, ME.
10. http://www.classicandperformancecar.com/buying/octanebuyingguide/281914/land_rovers_series_1_19481958.html. [Acedido 2014 18-04].
11. <http://corvettes.about.com/od/history/a/CorvetteHistoryByTheNumbers.htm>. [Acedido 2014 18-04].
12. http://www.rollingthunderz.com/corvette_rfcs_c1.shtml. [Acedido 2014 10-04].
13. Brown, J.C., A.J. Robertson, and S.T. Serpento, *Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals*. 2002: Butterworth-Heinemann.
14. <http://www.davecandoit.com/Landy/SeriesII/> [Acedido 2014 18-04].
15. Costin, M. and D. Phipps, *Racing and Sports Car Chassis Design*. 1974: B. T. Batsford Limited.
16. <http://lotuselan.wordpress.com/elan-in-depth/>. [Acedido 2014 22-04].
17. <http://mechanicalrocks.com/tag/ulsab-monocoque-chassis/>. [Acedido 2014 22-04].
18. Wakeham, K.J., *Introduction To Chassis Design Revision 1.0*. 2009.

19. <http://2.bp.blogspot.com/-8cTSrVb3VoU/TxaAKrmwPjI/AAAAAAAAAMM/dD9AIV0eLFY/s1600/monocoque.jpg> [Acedido 2014 22-04].
20. <http://www.redrc.net/wp-content/uploads/2009/03/d-drivemono-1.jpg>. [Acedido 2014 23-04].
21. <http://www.royalauto.in/wp-content/uploads/2010/02/Auto-Types-of-Chassis1.pdf>. [Acedido 2014 22-04].
22. <http://www.countach.ch/History/LP400/>. [Acedido 2014 22-04].
23. <http://www.ultimatecarpage.com/img/42213/Mercedes-Benz-300-SL-Alloy-Gullwing-Coupe.html>. [Acedido 2014 23-04].
24. http://www.autozine.org/technical_school/chassis/tech_chassis.htm. [Acedido 2014 23-04].
25. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Lotus_Elan_car_chassis.jpg.
26. Milliken, W.F. and D.L. Milliken, *Race Car Vehicle Dynamics*. 1995: Society of Automotive Engineers.
27. <http://www.autoblog.com/2008/07/16/mitsubishi-mrx09-racing-lancer-to-tackle-dakar-in-09/>. [Acedido 2014 15-03].
28. <http://www.ultimatecarpage.com/img/30092/Mitsubishi-Racing-Lancer-MRX09.html>. [Acedido 2014 15-03].
29. http://www.miguelbarbosa.com/?page_id=188. [Acedido 2014 15-03].
30. <http://www.redbull.com/en/motorsports/offroad/stories/1331625597916/when-the-vw-race-touareg-dominated-the-dakar-rally>. [Acedido 2014 15-03].
31. http://www.ultimatecarpage.com/pic/4552/Volkswagen-Race-Touareg-3_1.html. [Acedido 2014 15-03].
32. <http://www.ultimatecarpage.com/spec/4552/Volkswagen-Race-Touareg-3.html>. [Acedido 2014 15-03].
33. <http://www.crankandpiston.com/on-the-track/mini-all4-racing-driven/>. [Acedido 2014 15-03].
34. <http://www.rallyraid.net/wp-content/uploads/2011/07/2007miniyser.jpg>. [Acedido 2014 15-03].
35. <http://www.x-raid.de/mini-all4-racing.html>. [Acedido 2014 15-03].
36. <http://www.imperialtoyotamotorsport.co.za/page/home>. [Acedido 2014 15-03].

37. http://www.imperialtoyota.co.za/news/new_engine_for_the_2014_imperial_toyota_hilux_dakar_challenger. [Acedido 2014 15-03].
38. <http://www.innovation-group.com/sa/news?newsid=766>. [Acedido 2014 15-03].
39. Kuhn, H., D. Medlin, and A.I.H. Committee, *Mechanical Testing and Evaluation*. 2000: ASM International.
40. Davis, J.R., *Tensile Testing, 2nd Edition*. 2004: A S M International.
41. F. P. Beer e E. R. Johnston, *Resistência dos Materiais*. 3ª ed. 1989, São Paulo, Brasil: Makron Books.
42. Xiao, X., *Dynamic tensile testing of plastic materials*. *Polymer Testing*, 2008. **27**(2): p. 164-178.
43. Hannon, A. and P. Tiernan, *A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008. **198**(1–3): p. 1-13.
44. Carneiro, V.H., J. Meireles, and H. Puga, *Auxetic materials – A review*. *Materials Science-Poland*, 2013. **31**(4): p. 561-571.
45. Davim, J.P. and A.G. Magalhães, *Ensaio mecânicos e tecnológicos: inclui exercícios resolvidos e propostos*. 2004: PUBLINDUSTRIA.
46. Moura Branco, C.A.G., *Mecânica dos materiais*. 1998: CALOUSTE GULBENKIAN.
47. Askeland, D. and P. Fulay, *Essentials of Materials Science & Engineering - SI Version*. 2009: Cengage Learning.
48. Dowling, N.E., *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 2013: Pearson.
49. Ashby, M.F., *Materials Selection in Mechanical Design*. 2004: Elsevier Science.
50. Hearn, E.J., *Mechanics of Materials Volume 1: An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials*. 1997: Elsevier Science.
51. Craig, R.R., *Mechanics of Materials*. 2011: John Wiley & Sons.
52. Courtney, T.H., *Mechanical Behavior of Materials: Second Edition*. 2005: Waveland Press.
53. Benham, P.P. and F.V. Warnock, *Mechanics of Solids and Structures*. 1973: Pitman.
54. Hearn, E.J., *Mechanics of Materials 2: The Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials*. 1997: Elsevier Science.
55. Rees, D.W.A., *Mechanics of Solids and Structures*. 2000: Imperial College Press.
56. Fu, Z.F. and J. He, *Modal Analysis*. 2001: Elsevier Science.

57. Ewins, D.J., *Modal testing: theory, practice, and application*. 2000: Research Studies Press.
58. Meireles, J.F., *Análise dinâmica de estruturas por modelos de elementos finitos identificados experimentalmente*, in *Engenharia Mecânica*. 2008, Universidade do Minho.
59. Harris, C.M. and A.G. Piersol, *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 2002: McGraw-Hill.
60. Kelly, S.G., *Fundamentals of Mechanical Vibrations*. 2000: McGraw-Hill Higher Education.
61. Rao, S.S., *Mechanical Vibrations*. 1995: Addison-Wesley.
62. Chandrupatla, T.R. and A.D. Belegundu, *Introduction to Finite Elements in Engineering*. 2002: Prentice Hall.
63.
http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2011_Analise_Estrutural_Chassi_Transplanta_dora_Solidworks.pdf
64. Cook, R.D., *CONCEPTS AND APPLICATIONS OF FINITE ELEMENT ANALYSIS, 4TH ED.* 2007: Wiley India Pvt. Limited.
65. Branco, C.M., A.A. Fernandes, and P.M.S.T. Castro, *Fadiga de estruturas soldadas*. 1986: Fundação Calouste Gulbenkian.
66. Reddy, J.N., *An Introduction to the Finite Element Method*. 2006: McGraw-Hill.
67. Moaveni, S., *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*. 2008: Pearson Prentice Hall.
68. Lawrence, K.L., *ANSYS Tutorial: Release 14*. 2012: SDC Publications.
69. Inc, A., *Ansys Help*. 2013.
70. http://www.math.tu-dresden.de/~schwetli/teaching/tools/using_ml.pdf. [Acedido 2014 10-10].
71. http://www.math.tu-berlin.de/Vorlesungen/WS03/NonLinOpt/optim_tb.pdf. [Acedido 2014 10-10].
72. <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>. [Acedido 2014 10-10].
73. Silva, H.M., *Determination of the material/geometry of the section most adequate for a static loaded beam subjected to a combination of bending and torsion*, in *Engenharia Mecânica*. 2011, Universidade do Minho.
74. GmbH, S.M., *Sandner, Technical Specifications*. 2006: Alemanha.

Anexos

A. Anexo A – Ensaio Experimentais

Ensaio dinâmico (Fadiga)

Resultados

As condições em que o ensaio foi realizado são apresentadas na Tabela A-1.

Tabela A-1 – Condições de ensaio

Força máxima	50 KN
Tensão máxima	209.41 MPa
Força mínima	5 KN
Tensão mínima	20.94 MPa
Amplitude	27.5 KN
Frequência	10 Hz
Tipo de onda	Sinusoidal

1º Lote de Provetes

O primeiro ensaio realizou-se com as condições estabelecidas na Tabela A-1, obtendo-se para o primeiro provete 128490 ciclos e para o segundo provete 124461 ciclos, o que é pouco para o desejado. Isto deveu-se à utilização de um arame de soldadura de carbono normal o que não deveria acontecer. Na Tabela A-2 apresentam-se as imagens após o ensaio da zona de rutura dos provetes.

Tabela A-2 – 1º lote de provetes após o ensaio



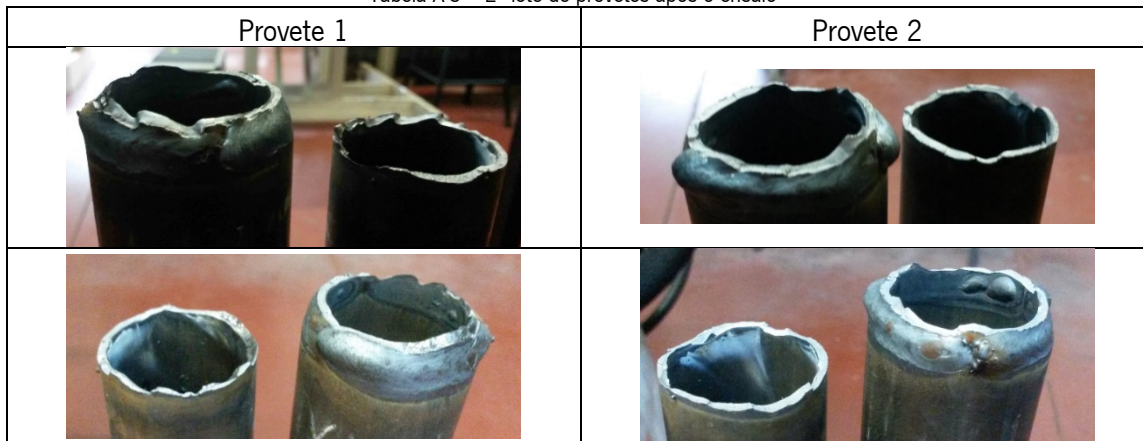
Nos provetes testados nesta fase, a rutura deu-se na zona termicamente afetada pela soldadura, sendo perfeitamente visível o início da fenda causadora da rutura.

2º Lote de Provetes

Após a análise destes resultados foram feitos novos provetes com o arame de soldadura utilizado na conceção dos chassis. O arame de soldadura tinha a referência EN 12070 CrMo1Si.

Os ensaios foram realizados com as condições apresentadas na Tabela A-1. A vida alcançada nestes ensaios ficou-se pelos 57446 ciclos para o provete 1 e 54225 ciclos para o provete 2, entrando em rutura de seguida. Na Tabela A-3, apresentam-se as imagens da zona onde ocorreu a rutura.

Tabela A-3 – 2º lote de provetes após o ensaio



A rutura dos provetes aconteceu na zona termicamente afetada, com o aquecimento ocorrido aquando da soldadura, esta zona do provete pode-se ter tornado mais frágil. Após estes resultado realizou-se um ensaio para quantificar a dureza do material.

Realizou-se ainda um ensaio onde se afagou a soldadura de ligação dos provetes, apresentado na Figura A-1, realizando este 59208 ciclos.



Figura A-1 – Soldadura afagada

Neste caso a rutura deu-se no cordão de soldadura, e os tubos separam-se sem que se tenham deformado, como demonstrado na Tabela A-4.

Tabela A-4 – Provetes após o ensaio





5° Lote de Provetes



Este lote de provetes foi efetuado com a finalidade de se eliminar a folga existente entre o tubo de maior diâmetro e o de menor diâmetro. Para tal efetuaram-se dois cortes longitudinais no tubo de maior diâmetro, sendo visível na Figura 2-1. Utilizou-se o mesmo material de soldadura e o mesmo método de soldadura.

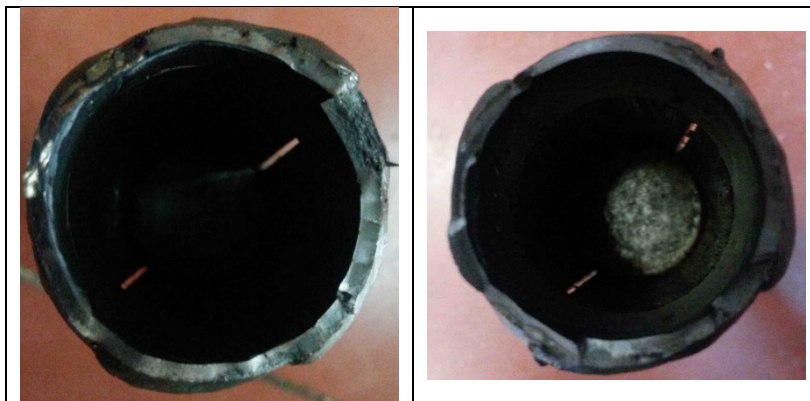


Figura A-2 – Provette com o corte longitudinal

Foram submetidos ao ensaio de fadiga com as condições apresentadas na Tabela A-5, o provete 1 aguentou 123448 ciclos e o provete 2 partiu após 120392 ciclos.

Tabela A-5 – 5° Lote de provetes após o ensaio

Provette 1	Provette 2
	







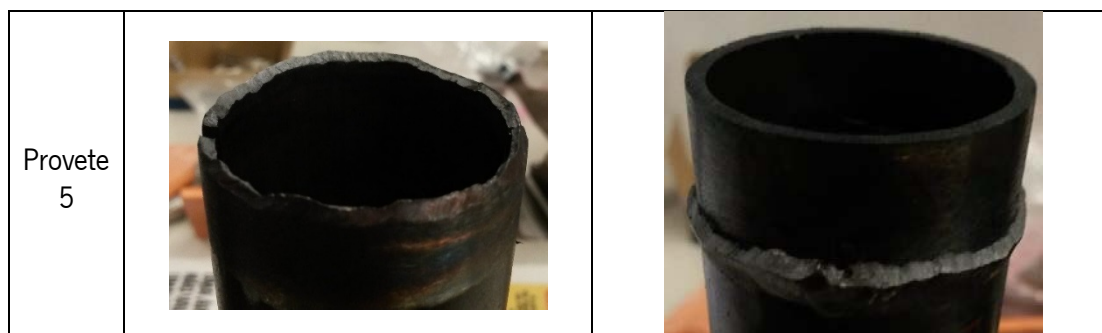
6° Lote de Provetes

Estes provetes foram obtidos da mesma forma que os provetes do 5° lote, para que não existisse folga entre os dois tubos. Como elétrodo foi utilizado o ER 80S - B2, o gás utilizado era constituído por 100% de Árgon com um fluxo de 10 L/min, a intensidade da máquina foi de 70 A.

Foram efetuados vários ensaios, na tabela 4 apresentam-se as condições iniciais do ensaio, para o provete 3 o número de ciclos foi de 114126, para o provete 4 obteve-se 147501 ciclos, o provete 5 atingiu os 81578 ciclos. Na Tabela A-6 apresentam-se imagens dos provetes após a fratura.

Tabela A-6 – Provetes após a rotura

<p>Provete 3</p>		
<p>Provete 4</p>		



Com estes valores decidiu-se reduzir a tensão máxima e a tensão mínima, na Tabela A-7 apresentam-se as condições iniciais com as quais se atingiu 1000000 ciclos.

Tabela A-7 – Condições para efetuar o ensaio

Ensaio 1		Ensaio 2	
Força máxima	15 KN	Força máxima	25 KN
Tensão máxima	72.024 MPa	Tensão máxima	120.04 MPa
Força mínima	5 KN	Força mínima	5 KN
Tensão mínima	24.008 MPa	Tensão mínima	24.008 MPa
Amplitude	6.75 KN	Amplitude	11.25 KN
Frequência	15 Hz	Frequência	20 Hz
Tipo de onda	Sinusoidal	Tipo de onda	Sinusoidal

Após estes resultados alteraram-se as condições iniciais dos ensaios, sendo estas apresentadas na Tabela A-8.

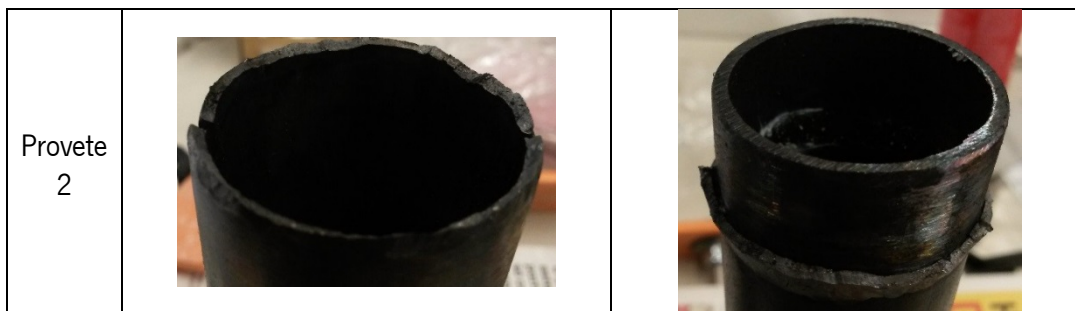
Tabela A-8 – Condições iniciais para o ensaio

Força máxima	37.5 KN
Tensão máxima	180.06 MPa
Força mínima	3.7 KN
Tensão mínima	18.006 MPa
Amplitude	16.875 KN
Frequência	15 Hz
Tipo de onda	Sinusoidal

Os provetes 1 e 2 foram submetidos a ensaios com as condições apresentadas na Tabela A-8, sendo que o provete 1 atingiu os 435961 ciclos e o provete 2 aguentou 508656 ciclos. Na Tabela A-9 apresentam-se os provetes após a rutura.

Tabela A-9 – Provetes após o ensaio





Com os resultados obtidos já somos capazes de traçar a curva S-N para o material com a soldadura.

Ensaio de dureza

Preparação

Para se efetuar este ensaio é necessário cortar o provete na zona a estudar, procedendo-se ao polimento da mesma para que os riscos do corte desapareçam e a matriz seja completamente visível. Para tal utilizou-se uma lixa de 180 para efetuar o desbaste e para o polimento final utilizou-se uma lixa de 620, podendo ser observado o polimento na Figura A-3



Figura A-3 – Polimento da amostra

Escolheu-se a escala de Vickers e para realizar as marcações utilizou-se a matriz correspondente. Para que a matriz ficasse registada no material foi necessário aplicar uma carga que neste caso foi de 30 Kgf durante 20 segundos, como demonstrado na Figura A-4.



Figura A-4 – Marcação da matriz de escala no provete

Após a matriz ter sido marcada na peça foi necessário medir as diagonais das matrizes, para se efetuar os cálculos relativos à dureza. Para se efetuar a medição utiliza-se um microscópio ótico. Na Figura A-5 apresenta-se a colocação da peça no microscópio e a lente a utilizar, pois a lente 10x dá uma medição direta em micrómetros.



Figura A-5 – Colocação da peça no microscópio ótico

Resultados

Após a medição efetuada, com o microscópio ótico, retirou-se os valores das diagonais da matriz apresentando-os na Tabela A-10.

Material Base

Tabela A-10 – Valores de dureza do material base

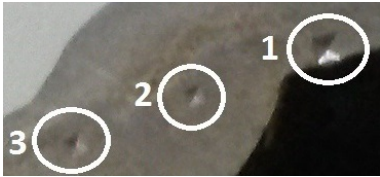
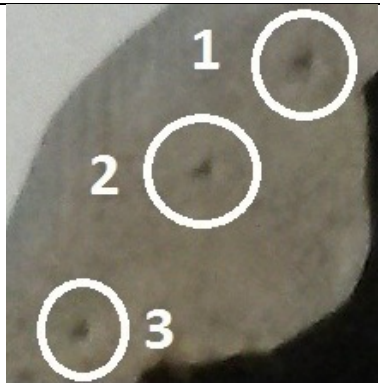
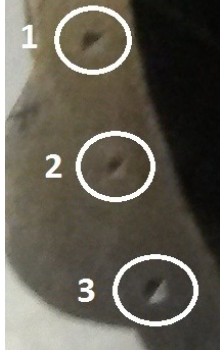
Ponto	d [μm]	d_{med}	HV
1	69	0.69	116.82
	69		
2	67	0.665	125.77
	66		
3	70	0.705	111.91
	71		

Para cada intensidade de soldadura foram efetuados três cordões e em cada cordão foram feitas três incisões com a matriz, duas na zona periférica do cordão e uma no centro do cordão.

Para intensidade 6 do cordão foram obtidos os dados apresentados na Tabela A-11.


Teste de soldadura

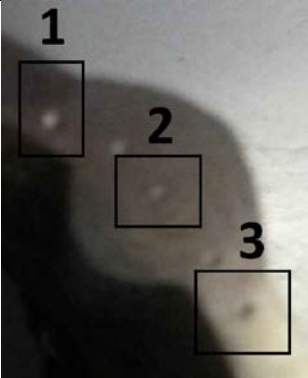
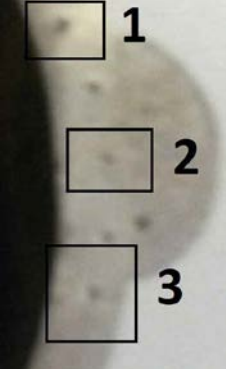
Tabela A-11 – Dados do ensaio de dureza para a intensidade de soldadura 6

Cordão	Imagem	Pontos	d [μm]	d _{med}	HV
1		1	80	0.78	91.42
			76		
		2	53	0.52	205.70
			51		
		3	55	0.58	177.36
			57		
2		1	56	0.55	183.87
			54		
		2	49	0.495	227.00
			50		
		3	51	0.52	205.70
			53		
3		1	55	0.555	180.57
			56		
		2	40	0.425	307.93
			45		
		3	54	0.535	194.32
			53		

Relativamente à soldadura com intensidade 5 obtiveram-se os dados apresentados na Tabela A-12

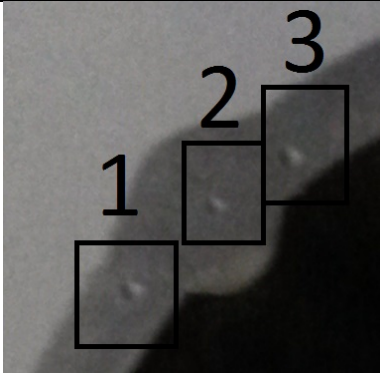
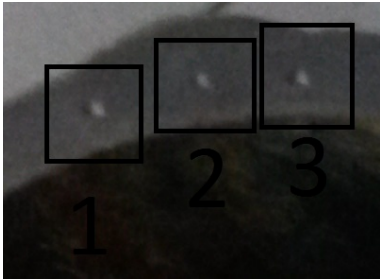
Tabela A-12 – Dados do ensaio de dureza para a intensidade de soldadura 5

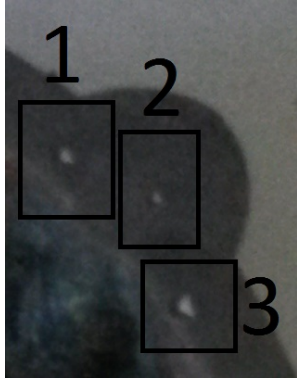
Cordão	Imagem	Pontos	d [μm]	d _{med}	HV
1		1	60	0.60	154.50
			60		
		2	50	0.50	222.48
			50		
		3	61	0.60	154.50
			59		

2		1	61	0.62	144.69
			63		
		2	51	0.51	213.84
			51		
		3	59	0.595	157.11
			60		
3		1	59	0.595	157.11
			60		
		2	49	0.49	231.65
			49		
		3	74	0.715	108.80
			69		

Os dados correspondentes a soldadura com intensidade 4 encontram-se na Tabela A-13.

Tabela A-13 – Dados do ensaio de dureza para a intensidade de soldadura 4

Cordão	Imagem	Pontos	d [μm]	d _{med}	HV
1		1	54	0.525	201.80
			51		
		2	50	0.50	222.48
			50		
		3	59	0.59	159.78
			59		
2		1	60	0.60	154.50
			60		
		2	49	0.495	227.00
			50		
		3	60	0.605	151.96
			61		

3		1	63	0.625	142.39
			62		
		2	50	0.50	222.48
			50		
		3	61	0.61	149.48
			61		

3º Lote de Provetes

Com este lote pretendeu-se testar a dureza de um provete obtido através de soldadura TIG, utilizando o material de adição com a referência aws5.28er80s-Ni, de forma a avaliar o comportamento do material quando sujeito a este tipo de soldadura.

Na Figura A-6 podemos ver o provete, e verificar os cortes efetuados para se efetuar os ensaios de dureza.



Figura A-6 – Provetes soldado com TIG

A decisão de cortar o provete em duas partes distintas deveu-se ao facto de a soldadura ter comportamentos diferentes consoante a zona em que é efetuada pois existem zonas de maior facilidade de acesso que outras.

Após o ensaio obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela A-14, para amostra 1 e na Tabela A-15 para amostra 2.

Tabela A-14 – Dureza da amostra 1

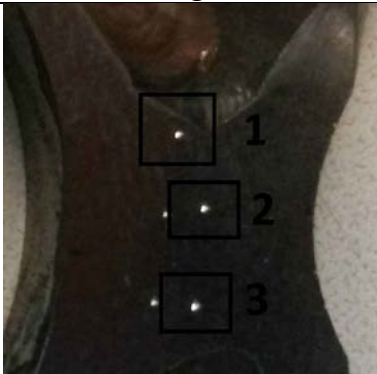
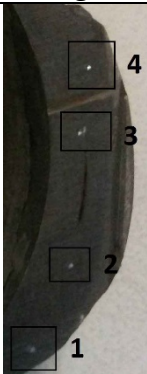
Pontos	Imagem	d [μm]	d _{med}	HV
1		42	0.425	307.93
		43		
2		45	0.455	268.66
		46		
3		46	0.46	262.85
		46		

Tabela A-15 – Dureza da amostra 2

Pontos	Imagem	d [μm]	d _{med}	HV
1		38	0.385	375.24
		39		
2		45	0.445	280.87
		44		
3		40	0.40	347.63
		40		
4		44	0.43	300.81
		42		

Desta forma consegue-se verificar que a soldadura com TIG faz com que a dureza aumente na zona da soldadura.

4º Lote de provetes

Neste lote os provetes foram soldados com soldadura TIG, com o material de adição ER-80S-B2.

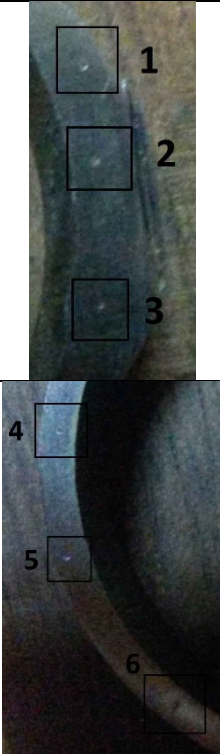
Cada provete foi soldado com diferentes parâmetros, este são apresentados na Tabela A-16:

Tabela A-16 – Condições de Soldadura

Provete 1	Provete 2
Não tem pré aquecimento	Tem pré aquecimento
Fluxo de 10 l/min	Fluxo de 10 l/min
Tempo de pré gás: 1.9 segundos	Tempo de pré gás: 1.9 segundos
Tempo de pós gás: 4 segundos	Tempo de pós gás: 4 segundos

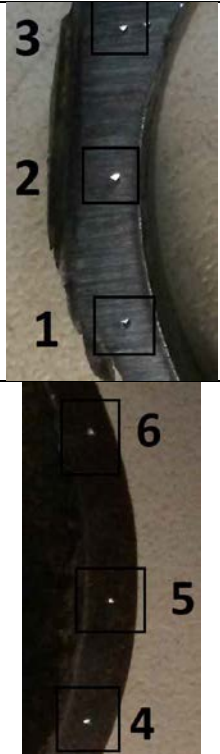
Os valores obtidos para a dureza do provete 1 são apresentados na Tabela A-17.

Tabela A-17 – Resultados da dureza do provete 1

Pontos	Imagem	d [μm]	d _{med}	HV
1		48	0.48	241.41
		48		
2		45	0.44	287.29
		43		
3		42	0.415	322.95
		41		
4	46	0.45	274.67	
	44			
5	45	0.445	280.87	
	44			
6	45	0.44	287.29	
	43			

Os valores obtidos para a dureza do provete 2 são apresentados na Tabela A-18.

Tabela A-18 – Resultados da dureza do provete 2

Pontos	Imagem	d [μm]	d _{med}	HV
1		42	0.415	322.95
		41		
2		42	0.42	315.31
		42		
3		47	0.475	246.52
		48		
4	40	0.39	365.68	
	38			
5	36	0.365	417.49	
	37			
6	50	0.485	236.45	
	47			

B. Anexo B – Algoritmo de execução em apdl para simulação do chassi D06


```

! Definição dos keypoints
!
K,1,0,0,0,
K,2,0,0,-0.56
K,3,4.13,0,0
K,4,4.2,0,0
K,5,4.13,0,-0.56
K,6,4.2,0,-0.56
K,7,0.385,0,0
K,8,0.385,-0.07,0
K,9,0.385,0,-0.56
K,10,0.385,-0.07,-0.56
K,11,0.385,-0.07,-0.665
K,12,0.385,-0.07,0.105
K,13,0.08,0,0
K,14,0.5,-0.15,-0.07
K,15,3.81,-0.15,-0.07
K,16,4.11,0,0
K,17,0.5,0,0
K,18,0.5,-0.15,-0.49
K,19,0.5,-0.08572,-0.28
K,20,0.5,0,-0.56
K,21,0.75,0,0
K,22,0.70435,0.63,0.22
K,23,0.70435,0.69,0.22
K,24,0.70435,0.66,-0.78
K,25,0.70435,0.66,-0.73
K,26,0.74658,0.04709,0.01644
K,27,0.70435,0.66,0.17
K,28,0.72981,0.2905,-0.28
K,29,0.74658,0.04709,-0.57645
K,30,0.70435,0.66,-0.28
K,31,0.75,0,-0.56
K,32,0.70435,0.63,-0.78
K,33,0.70435,0.69,-0.78
K,34,1,-0.15,-0.07
K,35,1,0,0
K,36,1,0,-0.56
K,37,1,-0.15,-0.49
K,38,1.67,-0.15,-0.07
K,39,1.67,-0.15,-0.49
K,40,1.67,0,0
K,41,1.67,0,-0.56
K,42,1.67,0,0.39
K,43,1.67,0,-0.95
K,44,1.67,-0.11,0.39
K,45,1.67,-0.11,-0.95
K,46,1.67,0.6,0.39
K,47,1.67,0.66,0.39
K,48,1.67,1.19,0.22
K,49,1.67,1.19,-0.78
K,205,1.67,0.66,-0.95
K,50,1.67,0.6,-0.95
K,51,1.67,0.03,0.39
K,52,1.67,0.69427,-0.28
K,53,1.67,0.03,-0.95
K,54,2.1624,1.1065,0.24384
K,55,2.8249,0.59349,0.38686

```

K,56,3.02,0,0.39
K,57,2.2118,1.1592,0.13576
K,58,2.2118,1.1592,-0.69576
K,59,2.1624,1.1065,-0.80382
K,60,2.8199,0.5899,-0.95483
K,61,3.02,0,-0.95
K,62,2.0637,1.1701,-0.69787
K,63,2.061,1.1678,0.13576
K,64,1.8796,1.1781,-0.28915
K,65,1.67,1.19,-0.73
K,66,0.70435,0.648,-0.78
K,67,1.67,1.19,0.17
K,68,0.70435,0.648,0.22
K,69,0.76533,0.68222,0.21684
K,70,1.67,0.63,0.39
K,71,0.76533,0.68222,-0.77684
K,72,1.67,0.63,-0.95
K,73,1.24,0.94867,-0.28
K,74,2.638,0.50569,0.36662
K,75,2.7221,0.39941,0.38835
K,76,3.0075,0.038,0.3898
K,78,2.4064,0.29056,0.3899
K,79,2.8717,0.451,0.38761
K,80,1.67,0.95194,0.29636
K,81,1.867,1.1566,0.22953
K,82,2.2598,1.031,0.26486
K,83,2.2118,1.1592,0.06811
K,84,1.67,0.66,-0.24532
K,85,1.67,0.66,-0.31419
K,86,1.67,0.95194,-0.85636
K,87,1.867,1.1566,-0.78953
K,88,2.2118,1.1592,-0.6281
K,89,2.2591,1.0305,-0.82603
K,90,2.6402,0.5035,-0.9305
K,91,2.7234,0.39848,-0.95257
K,92,2.8684,0.44782,-0.95366
K,93,3.0072,0.03788,-0.95031
K,94,2.4061,0.29054,-0.95017
K,95,3.5075,0.61505,-0.76605
K,96,3.4689,0.61364,-0.77664
K,97,3.0008,0.05683,-0.95047
K,98,3.5075,0.61505,0.20625
K,99,3.4688,0.61383,0.21629
K,100,3.0013,0.05699,0.3897
K,101,3.31,0,0
K,102,3.31,-0.15,-0.07
K,103,3.31,-0.15,-0.49
K,104,3.31,0,-0.56
K,105,3.56,0,0
K,106,3.56,0.59005,0.20605
K,107,3.56,0.64005,0.2065
K,108,3.5075,0.59005,0.20605
K,109,3.5075,0.64005,0.20605
K,110,3.6125,0.59005,0.20605
K,111,3.6125,0.64005,0.20605
K,112,3.56,0.61505,0.20605
K,113,3.56,0.61505,-0.76605
K,114,3.56,0,-0.56

K,115,3.56,0.59005,-0.76605
 K,116,3.56,0.64005,-0.76605
 K,117,3.5075,0.59005,-0.76605
 K,118,3.5075,0.64005,-0.76605
 K,119,3.6125,0.59005,-0.76605
 K,120,3.6125,0.64005,-0.76605
 K,121,3.56,0.0472,-0.57649
 K,122,3.56,0.61505,0.15605
 K,123,3.56,0.61505,-0.71605
 K,124,3.56,0.27703,-0.28
 K,125,3.56,0.0472,0.01648
 K,126,3.56,0.61505,-0.28
 K,127,3.6125,0.62505,-0.76605
 K,128,3.9672,0.49946,-0.76605
 K,129,4.1152,0.34077,-0.72061
 K,130,4.165,0,-0.56
 K,131,4.165,0,0
 K,132,4.1152,0.34428,0.15273
 K,133,3.9672,0.49946,0.19674
 K,134,3.6125,0.62505,0.20605
 K,135,4.0509,0.41129,0.17173
 K,136,4.0509,0.41129,-0.74035
 K,138,3.81,0,0
 K,139,3.81,0,-0.56
 K,140,3.81,-0.15,-0.49
 K,142,4.11,0,-0.56
 K,143,3.25,-0.15,-0.07
 K,144,3.02,-0.095,0.39
 K,145,3.02,-0.022,0.39
 K,146,3.25,0,0
 K,147,3.02,-0.00169,0.02995
 K,148,1.67,-0.022,0.39
 K,149,1.67,-0.095,0.39
 K,150,2.345,-0.022,0.39
 K,151,2.345,-0.095,0.39
 K,152,2.345,0,0
 K,153,1.67,-0.00169,0.02995
 K,154,1.06,-0.15,-0.07
 K,155,1.06,0,0
 K,156,1.06,0,-0.56
 K,157,1.67,-0.022,-0.95
 K,158,1.06,-0.15,-0.49
 K,159,1.67,-0.095,-0.95
 K,160,1.67,-0.00169,-0.58995
 K,161,3.02,-0.022,-0.95
 K,162,3.25,0,-0.56
 K,163,3.02,-0.095,-0.95
 K,164,3.25,-0.15,-0.49
 K,165,3.02,-0.00169,-0.58995
 K,166,2.345,-0.022,-0.95
 K,167,2.345,-0.095,-0.95
 K,168,2.345,0,-0.56
 K,169,3.4775,0.59005,-0.76605
 K,170,3.6425,0.59005,-0.76605
 K,171,3.4775,0.59005,0.20605
 K,172,3.6425,0.59005,0.20605
 K,173,0.62185,0.63,0.22
 K,174,0.78685,0.63,0.22

K,175,0.62185,0.63,-0.78
K,176,0.78685,0.63,-0.78
K,177,1.1639,0,0
K,178,1.3295,-0.15,-0.07
K,179,1.4045,-0.15,-0.07
K,180,1.57,0,0
K,181,1.7923,0,0
K,182,1.9579,-0.15,-0.07
K,183,2.0329,-0.15,-0.07
K,184,2.1984,0,0
K,185,2.2734,0,0
K,204,2.4389,-0.15,-0.07
K,186,2.5139,-0.15,-0.07
K,187,2.6795,0,0
K,188,2.7545,0,0
K,189,2.92,-0.15,-0.07
K,190,1.1639,0,-0.56
K,191,1.3295,-0.15,-0.49
K,192,1.4045,-0.15,-0.49
K,193,1.57,0,-0.56
K,194,1.7923,0,-0.56
K,195,1.9579,-0.15,-0.49
K,196,2.0329,-0.15,-0.49
K,197,2.1984,0,-0.56
K,198,2.2734,0,-0.56
K,199,2.4389,-0.15,-0.49
K,200,2.5139,-0.15,-0.49
K,201,2.6794,0,-0.56
K,202,2.7545,0,-0.56
K,203,2.92,-0.15,-0.49
K,206,3.02,0,-0.56
K,207,3.02,-0.15,-0.49
K,208,3.02,0,0
K,209,3.02,-0.15,-0.07
K,210,3.02,-0.11,-0.95
K,211,3.02,-0.11,0.39
K,212,0.70435,0.66,0.22
K,213,0.08,0,-0.56
!
!Definição dos nós
!
N,1,0,0,0,
N,2,0,0,-0.56
N,3,4.13,0,0
N,4,4.2,0,0
N,5,4.13,0,-0.56
N,6,4.2,0,-0.56
N,7,0.385,0,0
N,8,0.385,-0.07,0
N,9,0.385,0,-0.56
N,10,0.385,-0.07,-0.56
N,11,0.385,-0.07,-0.665
N,12,0.385,-0.07,0.105
N,13,0.08,0,0
N,14,0.5,-0.15,-0.07
N,15,3.81,-0.15,-0.07
N,16,4.11,0,0
N,17,0.5,0,0

N,18,0.5,-0.15,-0.49
N,19,0.5,-0.08572,-0.28
N,20,0.5,0,-0.56
N,21,0.75,0,0
N,22,0.70435,0.63,0.22
N,23,0.70435,0.69,0.22
N,24,0.70435,0.66,-0.78
N,25,0.70435,0.66,-0.73
N,26,0.74658,0.04709,0.01644
N,27,0.70435,0.66,0.17
N,28,0.72981,0.2905,-0.28
N,29,0.74658,0.04709,-0.57645
N,30,0.70435,0.66,-0.28
N,31,0.75,0,-0.56
N,32,0.70435,0.63,-0.78
N,33,0.70435,0.69,-0.78
N,34,1,-0.15,-0.07
N,35,1,0,0
N,36,1,0,-0.56
N,37,1,-0.15,-0.49
N,38,1.67,-0.15,-0.07
N,39,1.67,-0.15,-0.49
N,40,1.67,0,0
N,41,1.67,0,-0.56
N,42,1.67,0,0.39
N,43,1.67,0,-0.95
N,44,1.67,-0.11,0.39
N,45,1.67,-0.11,-0.95
N,46,1.67,0.6,0.39
N,47,1.67,0.66,0.39
N,48,1.67,1.19,0.22
N,49,1.67,1.19,-0.78
N,205,1.67,0.66,-0.95
N,50,1.67,0.6,-0.95
N,51,1.67,0.03,0.39
N,52,1.67,0.69427,-0.28
N,53,1.67,0.03,-0.95
N,54,2.1624,1.1065,0.24384
N,55,2.8249,0.59349,0.38686
N,56,3.02,0,0.39
N,57,2.2118,1.1592,0.13576
N,58,2.2118,1.1592,-0.69576
N,59,2.1624,1.1065,-0.80382
N,60,2.8199,0.5899,-0.95483
N,61,3.02,0,-0.95
N,62,2.0637,1.1701,-0.69787
N,63,2.061,1.1678,0.13576
N,64,1.8796,1.1781,-0.28915
N,65,1.67,1.19,-0.73
N,66,0.70435,0.648,-0.78
N,67,1.67,1.19,0.17
N,68,0.70435,0.648,0.22
N,69,0.76533,0.68222,0.21684
N,70,1.67,0.63,0.39
N,71,0.76533,0.68222,-0.77684
N,72,1.67,0.63,-0.95
N,73,1.24,0.94867,-0.28
N,74,2.638,0.50569,0.36662

N,75,2.7221,0.39941,0.38835
N,76,3.0075,0.038,0.3898
N,78,2.4064,0.29056,0.3899
N,79,2.8717,0.451,0.38761
N,80,1.67,0.95194,0.29636
N,81,1.867,1.1566,0.22953
N,82,2.2598,1.031,0.26486
N,83,2.2118,1.1592,0.06811
N,84,1.67,0.66,-0.24532
N,85,1.67,0.66,-0.31419
N,86,1.67,0.95194,-0.85636
N,87,1.867,1.1566,-0.78953
N,88,2.2118,1.1592,-0.6281
N,89,2.2591,1.0305,-0.82603
N,90,2.6402,0.5035,-0.9305
N,91,2.7234,0.39848,-0.95257
N,92,2.8684,0.44782,-0.95366
N,93,3.0072,0.03788,-0.95031
N,94,2.4061,0.29054,-0.95017
N,95,3.5075,0.61505,-0.76605
N,96,3.4689,0.61364,-0.77664
N,97,3.0008,0.05683,-0.95047
N,98,3.5075,0.61505,0.20625
N,99,3.4688,0.61383,0.21629
N,100,3.0013,0.05699,0.3897
N,101,3.31,0,0
N,102,3.31,-0.15,-0.07
N,103,3.31,-0.15,-0.49
N,104,3.31,0,-0.56
N,105,3.56,0,0
N,106,3.56,0.59005,0.20605
N,107,3.56,0.64005,0.2065
N,108,3.5075,0.59005,0.20605
N,109,3.5075,0.64005,0.20605
N,110,3.6125,0.59005,0.20605
N,111,3.6125,0.64005,0.20605
N,112,3.56,0.61505,0.20605
N,113,3.56,0.61505,-0.76605
N,114,3.56,0,-0.56
N,115,3.56,0.59005,-0.76605
N,116,3.56,0.64005,-0.76605
N,117,3.5075,0.59005,-0.76605
N,118,3.5075,0.64005,-0.76605
N,119,3.6125,0.59005,-0.76605
N,120,3.6125,0.64005,-0.76605
N,121,3.56,0.0472,-0.57649
N,122,3.56,0.61505,0.15605
N,123,3.56,0.61505,-0.71605
N,124,3.56,0.27703,-0.28
N,125,3.56,0.0472,0.01648
N,126,3.56,0.61505,-0.28
N,127,3.6125,0.62505,-0.76605
N,128,3.9672,0.49946,-0.76605
N,129,4.1152,0.34077,-0.72061
N,130,4.165,0,-0.56
N,131,4.165,0,0
N,132,4.1152,0.34428,0.15273
N,133,3.9672,0.49946,0.19674

N,134,3.6125,0.62505,0.20605
 N,135,4.0509,0.41129,0.17173
 N,136,4.0509,0.41129,-0.74035
 N,138,3.81,0,0
 N,139,3.81,0,-0.56
 N,140,3.81,-0.15,-0.49
 N,142,4.11,0,-0.56
 N,143,3.25,-0.15,-0.07
 N,144,3.02,-0.095,0.39
 N,145,3.02,-0.022,0.39
 N,146,3.25,0,0
 N,147,3.02,-0.00169,0.02995
 N,148,1.67,-0.022,0.39
 N,149,1.67,-0.095,0.39
 N,150,2.345,-0.022,0.39
 N,151,2.345,-0.095,0.39
 N,152,2.345,0,0
 N,153,1.67,-0.00169,0.02995
 N,154,1.06,-0.15,-0.07
 N,155,1.06,0,0
 N,156,1.06,0,-0.56
 N,157,1.67,-0.022,-0.95
 N,158,1.06,-0.15,-0.49
 N,159,1.67,-0.095,-0.95
 N,160,1.67,-0.00169,-0.58995
 N,161,3.02,-0.022,-0.95
 N,162,3.25,0,-0.56
 N,163,3.02,-0.095,-0.95
 N,164,3.25,-0.15,-0.49
 N,165,3.02,-0.00169,-0.58995
 N,166,2.345,-0.022,-0.95
 N,167,2.345,-0.095,-0.95
 N,168,2.345,0,-0.56
 N,169,3.4775,0.59005,-0.76605
 N,170,3.6425,0.59005,-0.76605
 N,171,3.4775,0.59005,0.20605
 N,172,3.6425,0.59005,0.20605
 N,173,0.62185,0.63,0.22
 N,174,0.78685,0.63,0.22
 N,175,0.62185,0.63,-0.78
 N,176,0.78685,0.63,-0.78
 N,177,1.1639,0,0
 N,178,1.3295,-0.15,-0.07
 N,179,1.4045,-0.15,-0.07
 N,180,1.57,0,0
 N,181,1.7923,0,0
 N,182,1.9579,-0.15,-0.07
 N,183,2.0329,-0.15,-0.07
 N,184,2.1984,0,0
 N,185,2.2734,0,0
 N,204,2.4389,-0.15,-0.07
 N,186,2.5139,-0.15,-0.07
 N,187,2.6795,0,0
 N,188,2.7545,0,0
 N,189,2.92,-0.15,-0.07
 N,190,1.1639,0,-0.56
 N,191,1.3295,-0.15,-0.49
 N,192,1.4045,-0.15,-0.49

N,193,1.57,0,-0.56
N,194,1.7923,0,-0.56
N,195,1.9579,-0.15,-0.49
N,196,2.0329,-0.15,-0.49
N,197,2.1984,0,-0.56
N,198,2.2734,0,-0.56
N,199,2.4389,-0.15,-0.49
N,200,2.5139,-0.15,-0.49
N,201,2.6794,0,-0.56
N,202,2.7545,0,-0.56
N,203,2.92,-0.15,-0.49
N,206,3.02,0,-0.56
N,207,3.02,-0.15,-0.49
N,208,3.02,0,0
N,209,3.02,-0.15,-0.07
N,210,3.02,-0.11,-0.95
N,211,3.02,-0.11,0.39
N,212,0.70435,0.66,0.22
N,213,0.08,0,-0.56
!
!Definição das linhas
!
L,1,2
L,14,18
L,34,37
L,102,103
L,15,140
L,1,13
L,13,7
L,7,17
L,17,21
L,21,35
L,35,155
L,155,177
L,177,180
L,180,40
L,40,181
L,181,184
L,184,185
L,185,152
L,152,187
L,187,188
L,188,208
L,208,146
L,146,101
L,101,105
L,105,138
L,138,16
L,16,3
L,3,131
L,131,4
L,13,14
L,14,34
L,34,154
L,154,178
L,178,179
L,179,38
L,38,182

L,182,183
L,183,204
L,204,186
L,186,189
L,189,209
L,209,143
L,143,102
L,102,15
L,15,16
L,22,68
L,68,212
L,32,66
L,66,24
L,24,33
L,212,23
L,2,213
L,213,9
L,9,20
L,20,31
L,31,36
L,36,156
L,156,190
L,190,193
L,193,41
L,41,194
L,194,197
L,197,198
L,198,168
L,168,201
L,201,202
L,202,206
L,206,162
L,162,104
L,104,114
L,114,139
L,139,142
L,142,5
L,5,130
L,130,6
L,213,18
L,18,37
L,37,158
L,158,191
L,191,192
L,192,39
L,39,195
L,195,196
L,196,199
L,199,200
L,200,203
L,203,207
L,207,164
L,164,103
L,103,140
L,140,142
L,17,14
L,18,20
L,34,35

L,37,36
L,101,102
L,103,104
L,15,138
L,139,140
L,138,139
L,101,104
L,35,36
L,21,26
L,26,22
L,31,29
L,29,32
L,24,25
L,25,30
L,30,27
L,27,212
L,27,28
L,28,29
L,26,28
L,28,25
L,7,8
L,9,10
L,12,8
L,8,10
L,10,11
L,17,19
L,19,18
L,14,19
L,19,20
L,44,149
L,149,148
L,148,42
L,45,159
L,159,157
L,157,43
L,43,53
L,211,144
L,144,145
L,145,56
L,210,163
L,163,161
L,161,61
L,43,160
L,160,41
L,61,165
L,165,206
L,42,153
L,153,40
L,56,147
L,147,208
L,40,38
L,41,39
L,38,39
L,40,41
L,69,70
L,69,51
L,69,73
L,73,65

L,73,67
L,73,71
L,71,72
L,71,53
L,54,74
L,74,55
L,74,75
L,75,79
L,75,76
L,59,90
L,90,60
L,90,91
L,91,92
L,91,93
L,76,78
L,78,46
L,78,75
L,51,78
L,94,53
L,94,91
L,94,93
L,94,50
L,80,81
L,82,83
L,88,89
L,86,87
L,108,98
L,98,109
L,106,112
L,112,107
L,110,134
L,134,111
L,55,99
L,99,98
L,79,99
L,100,99
L,117,95
L,95,118
L,115,113
L,113,116
L,119,127
L,127,120
L,96,95
L,95,60
L,92,96
L,97,96
L,112,122
L,122,126
L,126,123
L,123,113
L,126,55
L,126,60
L,105,125
L,125,106
L,114,121
L,121,115
L,121,124
L,124,122

L,123,124
L,124,125
L,130,131
L,134,133
L,133,135
L,135,132
L,132,131
L,127,128
L,128,136
L,136,129
L,129,130
L,135,136
L,208,209
L,206,207
L,28,30
L,124,126
L,55,60
L,48,67
L,67,65
L,65,49
L,67,69
L,69,68
L,65,71
L,71,66
L,48,49
L,43,53
L,53,50
L,50,72
L,72,205
L,205,86
L,86,49
L,49,87
L,87,59
L,59,89
L,89,60
L,60,92
L,92,97
L,97,93
L,93,61
L,56,76
L,76,100
L,100,79
L,79,55
L,55,82
L,82,54
L,54,81
L,81,48
L,48,80
L,80,47
L,47,70
L,70,46
L,46,51
L,51,42
L,54,57
L,57,83
L,83,88
L,88,58
L,58,59

L,59,62
L,62,64
L,64,48
L,49,64
L,64,63
L,63,54
L,53,52
L,52,48
L,51,52
L,49,52
L,171,108
L,108,106
L,106,110
L,110,172
L,173,22
L,22,174
L,175,32
L,32,176
L,169,117
L,117,115
L,115,119
L,119,170
L,143,144
L,145,146
L,144,147
L,145,150
L,150,148
L,144,151
L,151,149
L,150,151
L,151,152
L,149,153
L,149,154
L,148,155
L,158,159
L,159,160
L,161,162
L,159,167
L,167,163
L,163,164
L,163,165
L,166,167
L,167,168
L,156,157
L,157,166
L,166,161
L,177,178
L,179,180
L,181,182
L,183,184
L,185,204
L,186,187
L,188,189
L,190,191
L,192,193
L,194,195
L,196,197
L,198,199

```
L,200,201
L,202,203
!
!Definir Secções
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,1,BEAM,HREC,20x40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.02,0.04,0.002,0.002,0.002,0.002
ESYS,0
SECNUM,1
TSHAP,LINE
!
E,1,2
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,2,BEAM,HREC,40x40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.04,0.04,0.002,0.002,0.002,0.002
ESYS,0
SECNUM,2
TSHAP,LINE
!
E,14,18
E,34,37
E,102,103
E,15,140
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,3,BEAM,CTUBE,40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.018,0.02
ESYS,0
SECNUM,3
TSHAP,LINE
!
E,1,13
E,13,7
E,7,17
E,17,21
E,21,35
E,35,155
E,155,177
E,177,180
E,180,40
E,40,181
E,181,184
E,184,185
E,185,152
E,152,187
E,187,188
E,188,208
E,208,146
E,146,101
E,101,105
```

E,105,138
E,138,16
E,16,3
E,3,131
E,131,4
E,13,14
E,14,34
E,34,154
E,154,178
E,178,179
E,179,38
E,38,182
E,182,183
E,183,204
E,204,186
E,186,189
E,189,209
E,209,143
E,143,102
E,102,15
E,15,16
E,22,68
E,68,212
E,32,66
E,66,24
E,24,33
E,212,23
E,2,213
E,213,9
E,9,20
E,20,31
E,31,36
E,36,156
E,156,190
E,190,193
E,193,41
E,41,194
E,194,197
E,197,198
E,198,168
E,168,201
E,201,202
E,202,206
E,206,162
E,162,104
E,104,114
E,114,139
E,139,142
E,142,5
E,5,130
E,130,6
E,213,18
E,18,37
E,37,158
E,158,191
E,191,192
E,192,39
E,39,195

E,195,196
E,196,199
E,199,200
E,200,203
E,203,207
E,207,164
E,164,103
E,103,140
E,140,142
E,17,14
E,18,20
E,34,35
E,37,36
E,101,102
E,103,104
E,15,138
E,139,140
E,138,139
E,101,104
E,35,36
E,21,26
E,26,22
E,31,29
E,29,32
E,24,25
E,25,30
E,30,27
E,27,212
E,27,28
E,28,29
E,26,28
E,28,25
E,7,8
E,9,10
E,12,8
E,8,10
E,10,11
E,17,19
E,19,18
E,14,19
E,19,20
E,44,149
E,149,148
E,148,42
E,45,159
E,159,157
E,157,43
E,43,53
E,211,144
E,144,145
E,145,56
E,210,163
E,163,161
E,161,61
E,43,160
E,160,41
E,61,165
E,165,206

E,42,153
E,153,40
E,56,147
E,147,208
E,40,38
E,41,39
E,38,39
E,40,41
E,69,70
E,69,51
E,69,73
E,73,65
E,73,67
E,73,71
E,71,72
E,71,53
E,54,74
E,74,55
E,74,75
E,75,79
E,75,76
E,59,90
E,90,60
E,90,91
E,91,92
E,91,93
E,76,78
E,78,46
E,78,75
E,51,78
E,94,53
E,94,91
E,94,93
E,94,50
E,80,81
E,82,83
E,88,89
E,86,87
E,108,98
E,98,109
E,106,112
E,112,107
E,110,134
E,134,111
E,55,99
E,99,98
E,79,99
E,100,99
E,117,95
E,95,118
E,115,113
E,113,116
E,119,127
E,127,120
E,96,95
E,95,60
E,92,96
E,97,96

```
E,112,122
E,122,126
E,126,123
E,123,113
E,126,55
E,126,60
E,105,125
E,125,106
E,114,121
E,121,115
E,121,124
E,124,122
E,123,124
E,124,125
E,130,131
E,134,133
E,133,135
E,135,132
E,132,131
E,127,128
E,128,136
E,136,129
E,129,130
E,135,136
E,208,209
E,206,207
E,28,30
E,124,126
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,4,BEAM,CTUBE,50x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.023,0.025
ESYS,0
SECNUM,4
TSHAP,LINETYPE
!
E,55,60
E,48,67
E,67,65
E,65,49
E,67,69
E,69,68
E,65,71
E,71,66
E,48,49
E,43,53
E,53,50
E,50,72
E,72,205
E,205,86
E,86,49
E,49,87
E,87,59
E,59,89
E,89,60
E,60,92
```

```
E,92,97
E,97,93
E,93,61
E,56,76
E,76,100
E,100,79
E,79,55
E,55,82
E,82,54
E,54,81
E,81,48
E,48,80
E,80,47
E,47,70
E,70,46
E,46,51
E,51,42
E,54,57
E,57,83
E,83,88
E,88,58
E,58,59
E,59,62
E,62,64
E,64,48
E,49,64
E,64,63
E,63,54
E,53,52
E,52,48
E,51,52
E,49,52
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,5,BEAM,RECT,165x5,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.165,0.005
ESYS,0
SECNUM,5
TSHAP,LINE
!
E,171,108
E,108,106
E,106,110
E,110,172
E,173,22
E,22,174
E,175,32
E,32,176
E,169,117
E,117,115
E,115,119
E,119,170
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,6,BEAM,CTUBE,30x2,0
```

```
SECOFFSET,CENT,  
SECDATA,0.013,0.015  
ESYS,0  
SECNUM,6  
TSHAP,LINE  
!  
E,143,144  
E,145,146  
E,144,147  
E,145,150  
E,150,148  
E,144,151  
E,151,149  
E,150,151  
E,151,152  
E,149,153  
E,149,154  
E,148,155  
E,158,159  
E,159,160  
E,161,162  
E,159,167  
E,167,163  
E,163,164  
E,163,165  
E,166,167  
E,167,168  
E,156,157  
E,157,166  
E,166,161  
!*  
TYPE,1  
MAT,1  
SECTYPE,7,BEAM,CTUBE,25x2,0  
SECOFFSET,CENT,  
SECDATA,0.0105,0.0125  
ESYS,0  
SECNUM,7  
TSHAP,LINE  
!  
E,177,178  
E,179,180  
E,181,182  
E,183,184  
E,185,204  
E,186,187  
E,188,189  
E,190,191  
E,192,193  
E,194,195  
E,196,197  
E,198,199  
E,200,201  
E,202,203  
!*  
!
```

C. Anexo C – Criação do modelo numérico para execução no updating


```

KEYW, PR_STRUC, 1
/PREP7
/UNITS, SI
!*
ET,1,BEAM188 !Tipo de elemento
!
MP,EX,1,2.02047E+11 !Modulo de elasticidade
MP,NUXY,1,0.302 !Coeficiente de Poisson!
MP,DENSD,1,7898 !Densidade
DENSD=7898
! definição das incógnitas
PR177=1.1639
PR178=1.3295
PR179=1.4045
PR180=1.57
PR181=1.7923
PR182=1.9579
PR183=2.0329
PR184=2.1984
PR185=2.2734
PR204=2.4389
PR186=2.5139
PR187=2.6795
PR188=2.7545
PR189=2.92
PR190=1.1639
PR191=1.3295
PR192=1.4045
PR193=1.57
PR194=1.7923
PR195=1.9579
PR196=2.0329
PR197=2.1984
PR198=2.2734
PR199=2.4389
PR200=2.5139
PR201=2.6794
PR202=2.7545
PR203=2.92
PRE2=1.5
!*
RE2=PRE2* 1E-02
!*
! Definição dos keypoints
!
K,1,0,0,0,
K,2,0,0,-0.56
K,3,4.13,0,0
K,4,4.2,0,0
K,5,4.13,0,-0.56
K,6,4.2,0,-0.56
K,7,0.385,0,0
K,8,0.385,-0.07,0
K,9,0.385,0,-0.56
K,10,0.385,-0.07,-0.56
K,11,0.385,-0.07,-0.665
K,12,0.385,-0.07,0.105
K,13,0.08,0,0

```

K,14,0.5,-0.15,-0.07
K,15,3.81,-0.15,-0.07
K,16,4.11,0,0
K,17,0.5,0,0
K,18,0.5,-0.15,-0.49
K,19,0.5,-0.08572,-0.28
K,20,0.5,0,-0.56
K,21,0.75,0,0
K,22,0.70435,0.63,0.22
K,23,0.70435,0.69,0.22
K,24,0.70435,0.66,-0.78
K,25,0.70435,0.66,-0.73
K,26,0.74658,0.04709,0.01644
K,27,0.70435,0.66,0.17
K,28,0.72981,0.2905,-0.28
K,29,0.74658,0.04709,-0.57645
K,30,0.70435,0.66,-0.28
K,31,0.75,0,-0.56
K,32,0.70435,0.63,-0.78
K,33,0.70435,0.69,-0.78
K,34,1,-0.15,-0.07
K,35,1,0,0
K,36,1,0,-0.56
K,37,1,-0.15,-0.49
K,38,1.67,-0.15,-0.07
K,39,1.67,-0.15,-0.49
K,40,1.67,0,0
K,41,1.67,0,-0.56
K,42,1.67,0,0.39
K,43,1.67,0,-0.95
K,44,1.67,-0.11,0.39
K,45,1.67,-0.11,-0.95
K,46,1.67,0.6,0.39
K,47,1.67,0.66,0.39
K,48,1.67,1.19,0.22
K,49,1.67,1.19,-0.78
K,205,1.67,0.66,-0.95
K,50,1.67,0.6,-0.95
K,51,1.67,0.03,0.39
K,52,1.67,0.69427,-0.28
K,53,1.67,0.03,-0.95
K,54,2.1624,1.1065,0.24384
K,55,2.8249,0.59349,0.38686
K,56,3.02,0,0.39
K,57,2.2118,1.1592,0.13576
K,58,2.2118,1.1592,-0.69576
K,59,2.1624,1.1065,-0.80382
K,60,2.8199,0.5899,-0.95483
K,61,3.02,0,-0.95
K,62,2.0637,1.1701,-0.69787
K,63,2.061,1.1678,0.13576
K,64,1.8796,1.1781,-0.28915
K,65,1.67,1.19,-0.73
K,66,0.70435,0.648,-0.78
K,67,1.67,1.19,0.17
K,68,0.70435,0.648,0.22
K,69,0.76533,0.68222,0.21684
K,70,1.67,0.63,0.39

K,71,0.76533,0.68222,-0.77684
 K,72,1.67,0.63,-0.95
 K,73,1.24,0.94867,-0.28
 K,74,2.638,0.50569,0.36662
 K,75,2.7221,0.39941,0.38835
 K,76,3.0075,0.038,0.3898
 K,78,2.4064,0.29056,0.3899
 K,79,2.8717,0.451,0.38761
 K,80,1.67,0.95194,0.29636
 K,81,1.867,1.1566,0.22953
 K,82,2.2598,1.031,0.26486
 K,83,2.2118,1.1592,0.06811
 K,84,1.67,0.66,-0.24532
 K,85,1.67,0.66,-0.31419
 K,86,1.67,0.95194,-0.85636
 K,87,1.867,1.1566,-0.78953
 K,88,2.2118,1.1592,-0.6281
 K,89,2.2591,1.0305,-0.82603
 K,90,2.6402,0.5035,-0.9305
 K,91,2.7234,0.39848,-0.95257
 K,92,2.8684,0.44782,-0.95366
 K,93,3.0072,0.03788,-0.95031
 K,94,2.4061,0.29054,-0.95017
 K,95,3.5075,0.61505,-0.76605
 K,96,3.4689,0.61364,-0.77664
 K,97,3.0008,0.05683,-0.95047
 K,98,3.5075,0.61505,0.20625
 K,99,3.4688,0.61383,0.21629
 K,100,3.0013,0.05699,0.3897
 K,101,3.31,0,0
 K,102,3.31,-0.15,-0.07
 K,103,3.31,-0.15,-0.49
 K,104,3.31,0,-0.56
 K,105,3.56,0,0
 K,106,3.56,0.59005,0.20605
 K,107,3.56,0.64005,0.2065
 K,108,3.5075,0.59005,0.20605
 K,109,3.5075,0.64005,0.20605
 K,110,3.6125,0.59005,0.20605
 K,111,3.6125,0.64005,0.20605
 K,112,3.56,0.61505,0.20605
 K,113,3.56,0.61505,-0.76605
 K,114,3.56,0,-0.56
 K,115,3.56,0.59005,-0.76605
 K,116,3.56,0.64005,-0.76605
 K,117,3.5075,0.59005,-0.76605
 K,118,3.5075,0.64005,-0.76605
 K,119,3.6125,0.59005,-0.76605
 K,120,3.6125,0.64005,-0.76605
 K,121,3.56,0.0472,-0.57649
 K,122,3.56,0.61505,0.15605
 K,123,3.56,0.61505,-0.71605
 K,124,3.56,0.27703,-0.28
 K,125,3.56,0.0472,0.01648
 K,126,3.56,0.61505,-0.28
 K,127,3.6125,0.62505,-0.76605
 K,128,3.9672,0.49946,-0.76605
 K,129,4.1152,0.34077,-0.72061

K,130,4.165,0,-0.56
K,131,4.165,0,0
K,132,4.1152,0.34428,0.15273
K,133,3.9672,0.49946,0.19674
K,134,3.6125,0.62505,0.20605
K,135,4.0509,0.41129,0.17173
K,136,4.0509,0.41129,-0.74035
K,138,3.81,0,0
K,139,3.81,0,-0.56
K,140,3.81,-0.15,-0.49
K,142,4.11,0,-0.56
K,143,3.25,-0.15,-0.07
K,144,3.02,-0.095,0.39
K,145,3.02,-0.022,0.39
K,146,3.25,0,0
K,147,3.02,-0.00169,0.02995
K,148,1.67,-0.022,0.39
K,149,1.67,-0.095,0.39
K,150,2.345,-0.022,0.39
K,151,2.345,-0.095,0.39
K,152,2.345,0,0
K,153,1.67,-0.00169,0.02995
K,154,1.06,-0.15,-0.07
K,155,1.06,0,0
K,156,1.06,0,-0.56
K,157,1.67,-0.022,-0.95
K,158,1.06,-0.15,-0.49
K,159,1.67,-0.095,-0.95
K,160,1.67,-0.00169,-0.58995
K,161,3.02,-0.022,-0.95
K,162,3.25,0,-0.56
K,163,3.02,-0.095,-0.95
K,164,3.25,-0.15,-0.49
K,165,3.02,-0.00169,-0.58995
K,166,2.345,-0.022,-0.95
K,167,2.345,-0.095,-0.95
K,168,2.345,0,-0.56
K,169,3.4775,0.59005,-0.76605
K,170,3.6425,0.59005,-0.76605
K,171,3.4775,0.59005,0.20605
K,172,3.6425,0.59005,0.20605
K,173,0.62185,0.63,0.22
K,174,0.78685,0.63,0.22
K,175,0.62185,0.63,-0.78
K,176,0.78685,0.63,-0.78
K,177,PR177,0,0
K,178,PR178,-0.15,-0.07
K,179,PR179,-0.15,-0.07
K,180,PR180,0,0
K,181,PR181,0,0
K,182,PR182,-0.15,-0.07
K,183,PR183,-0.15,-0.07
K,184,PR184,0,0
K,185,PR185,0,0
K,204,PR204,-0.15,-0.07
K,186,PR186,-0.15,-0.07
K,187,PR187,0,0
K,188,PR188,0,0

K,189,PR189,-0.15,-0.07
 K,190,PR190,0,-0.56
 K,191,PR191,-0.15,-0.49
 K,192,PR192,-0.15,-0.49
 K,193,PR193,0,-0.56
 K,194,PR194,0,-0.56
 K,195,PR195,-0.15,-0.49
 K,196,PR196,-0.15,-0.49
 K,197,PR197,0,-0.56
 K,198,PR198,0,-0.56
 K,199,PR199,-0.15,-0.49
 K,200,PR200,-0.15,-0.49
 K,201,PR201,0,-0.56
 K,202,PR202,0,-0.56
 K,203,PR203,-0.15,-0.49
 K,206,3.02,0,-0.56
 K,207,3.02,-0.15,-0.49
 K,208,3.02,0,0
 K,209,3.02,-0.15,-0.07
 K,210,3.02,-0.11,-0.95
 K,211,3.02,-0.11,0.39
 K,212,0.70435,0.66,0.22
 K,213,0.08,0,-0.56
 K,301,2.6825,-0.0475,-0.775
 K,302,2.0075,-0.0475,-0.755
 K,303,2.0075,-0.0475,0.195
 K,304,2.6825,-0.0475,0.195
 !
 !Definição dos nós
 !
 N,1,0,0,0,
 N,2,0,0,-0.56
 N,3,4.13,0,0
 N,4,4.2,0,0
 N,5,4.13,0,-0.56
 N,6,4.2,0,-0.56
 N,7,0.385,0,0
 N,8,0.385,-0.07,0
 N,9,0.385,0,-0.56
 N,10,0.385,-0.07,-0.56
 N,11,0.385,-0.07,-0.665
 N,12,0.385,-0.07,0.105
 N,13,0.08,0,0
 N,14,0.5,-0.15,-0.07
 N,15,3.81,-0.15,-0.07
 N,16,4.11,0,0
 N,17,0.5,0,0
 N,18,0.5,-0.15,-0.49
 N,19,0.5,-0.08572,-0.28
 N,20,0.5,0,-0.56
 N,21,0.75,0,0
 N,22,0.70435,0.63,0.22
 N,23,0.70435,0.69,0.22
 N,24,0.70435,0.66,-0.78
 N,25,0.70435,0.66,-0.73
 N,26,0.74658,0.04709,0.01644
 N,27,0.70435,0.66,0.17
 N,28,0.72981,0.2905,-0.28

N,29,0.74658,0.04709,-0.57645
N,30,0.70435,0.66,-0.28
N,31,0.75,0,-0.56
N,32,0.70435,0.63,-0.78
N,33,0.70435,0.69,-0.78
N,34,1,-0.15,-0.07
N,35,1,0,0
N,36,1,0,-0.56
N,37,1,-0.15,-0.49
N,38,1.67,-0.15,-0.07
N,39,1.67,-0.15,-0.49
N,40,1.67,0,0
N,41,1.67,0,-0.56
N,42,1.67,0,0.39
N,43,1.67,0,-0.95
N,44,1.67,-0.11,0.39
N,45,1.67,-0.11,-0.95
N,46,1.67,0.6,0.39
N,47,1.67,0.66,0.39
N,48,1.67,1.19,0.22
N,49,1.67,1.19,-0.78
N,205,1.67,0.66,-0.95
N,50,1.67,0.6,-0.95
N,51,1.67,0.03,0.39
N,52,1.67,0.69427,-0.28
N,53,1.67,0.03,-0.95
N,54,2.1624,1.1065,0.24384
N,55,2.8249,0.59349,0.38686
N,56,3.02,0,0.39
N,57,2.2118,1.1592,0.13576
N,58,2.2118,1.1592,-0.69576
N,59,2.1624,1.1065,-0.80382
N,60,2.8199,0.5899,-0.95483
N,61,3.02,0,-0.95
N,62,2.0637,1.1701,-0.69787
N,63,2.061,1.1678,0.13576
N,64,1.8796,1.1781,-0.28915
N,65,1.67,1.19,-0.73
N,66,0.70435,0.648,-0.78
N,67,1.67,1.19,0.17
N,68,0.70435,0.648,0.22
N,69,0.76533,0.68222,0.21684
N,70,1.67,0.63,0.39
N,71,0.76533,0.68222,-0.77684
N,72,1.67,0.63,-0.95
N,73,1.24,0.94867,-0.28
N,74,2.638,0.50569,0.36662
N,75,2.7221,0.39941,0.38835
N,76,3.0075,0.038,0.3898
N,78,2.4064,0.29056,0.3899
N,79,2.8717,0.451,0.38761
N,80,1.67,0.95194,0.29636
N,81,1.867,1.1566,0.22953
N,82,2.2598,1.031,0.26486
N,83,2.2118,1.1592,0.06811
N,84,1.67,0.66,-0.24532
N,85,1.67,0.66,-0.31419
N,86,1.67,0.95194,-0.85636

N,87,1.867,1.1566,-0.78953
N,88,2.2118,1.1592,-0.6281
N,89,2.2591,1.0305,-0.82603
N,90,2.6402,0.5035,-0.9305
N,91,2.7234,0.39848,-0.95257
N,92,2.8684,0.44782,-0.95366
N,93,3.0072,0.03788,-0.95031
N,94,2.4061,0.29054,-0.95017
N,95,3.5075,0.61505,-0.76605
N,96,3.4689,0.61364,-0.77664
N,97,3.0008,0.05683,-0.95047
N,98,3.5075,0.61505,0.20625
N,99,3.4688,0.61383,0.21629
N,100,3.0013,0.05699,0.3897
N,101,3.31,0,0
N,102,3.31,-0.15,-0.07
N,103,3.31,-0.15,-0.49
N,104,3.31,0,-0.56
N,105,3.56,0,0
N,106,3.56,0.59005,0.20605
N,107,3.56,0.64005,0.2065
N,108,3.5075,0.59005,0.20605
N,109,3.5075,0.64005,0.20605
N,110,3.6125,0.59005,0.20605
N,111,3.6125,0.64005,0.20605
N,112,3.56,0.61505,0.20605
N,113,3.56,0.61505,-0.76605
N,114,3.56,0,-0.56
N,115,3.56,0.59005,-0.76605
N,116,3.56,0.64005,-0.76605
N,117,3.5075,0.59005,-0.76605
N,118,3.5075,0.64005,-0.76605
N,119,3.6125,0.59005,-0.76605
N,120,3.6125,0.64005,-0.76605
N,121,3.56,0.0472,-0.57649
N,122,3.56,0.61505,0.15605
N,123,3.56,0.61505,-0.71605
N,124,3.56,0.27703,-0.28
N,125,3.56,0.0472,0.01648
N,126,3.56,0.61505,-0.28
N,127,3.6125,0.62505,-0.76605
N,128,3.9672,0.49946,-0.76605
N,129,4.1152,0.34077,-0.72061
N,130,4.165,0,-0.56
N,131,4.165,0,0
N,132,4.1152,0.34428,0.15273
N,133,3.9672,0.49946,0.19674
N,134,3.6125,0.62505,0.20605
N,135,4.0509,0.41129,0.17173
N,136,4.0509,0.41129,-0.74035
N,138,3.81,0,0
N,139,3.81,0,-0.56
N,140,3.81,-0.15,-0.49
N,142,4.11,0,-0.56
N,143,3.25,-0.15,-0.07
N,144,3.02,-0.095,0.39
N,145,3.02,-0.022,0.39
N,146,3.25,0,0

N,147,3.02,-0.00169,0.02995
N,148,1.67,-0.022,0.39
N,149,1.67,-0.095,0.39
N,150,2.345,-0.022,0.39
N,151,2.345,-0.095,0.39
N,152,2.345,0,0
N,153,1.67,-0.00169,0.02995
N,154,1.06,-0.15,-0.07
N,155,1.06,0,0
N,156,1.06,0,-0.56
N,157,1.67,-0.022,-0.95
N,158,1.06,-0.15,-0.49
N,159,1.67,-0.095,-0.95
N,160,1.67,-0.00169,-0.58995
N,161,3.02,-0.022,-0.95
N,162,3.25,0,-0.56
N,163,3.02,-0.095,-0.95
N,164,3.25,-0.15,-0.49
N,165,3.02,-0.00169,-0.58995
N,166,2.345,-0.022,-0.95
N,167,2.345,-0.095,-0.95
N,168,2.345,0,-0.56
N,169,3.4775,0.59005,-0.76605
N,170,3.6425,0.59005,-0.76605
N,171,3.4775,0.59005,0.20605
N,172,3.6425,0.59005,0.20605
N,173,0.62185,0.63,0.22
N,174,0.78685,0.63,0.22
N,175,0.62185,0.63,-0.78
N,176,0.78685,0.63,-0.78
N,177,PR177,0,0
N,178,PR178,-0.15,-0.07
N,179,PR179,-0.15,-0.07
N,180,PR180,0,0
N,181,PR181,0,0
N,182,PR182,-0.15,-0.07
N,183,PR183,-0.15,-0.07
N,184,PR184,0,0
N,185,PR185,0,0
N,204,PR204,-0.15,-0.07
N,186,PR186,-0.15,-0.07
N,187,PR187,0,0
N,188,PR188,0,0
N,189,PR189,-0.15,-0.07
N,190,PR190,0,-0.56
N,191,PR191,-0.15,-0.49
N,192,PR192,-0.15,-0.49
N,193,PR193,0,-0.56
N,194,PR194,0,-0.56
N,195,PR195,-0.15,-0.49
N,196,PR196,-0.15,-0.49
N,197,PR197,0,-0.56
N,198,PR198,0,-0.56
N,199,PR199,-0.15,-0.49
N,200,PR200,-0.15,-0.49
N,201,PR201,0,-0.56
N,202,PR202,0,-0.56
N,203,PR203,-0.15,-0.49

N,206,3.02,0,-0.56
N,207,3.02,-0.15,-0.49
N,208,3.02,0,0
N,209,3.02,-0.15,-0.07
N,210,3.02,-0.11,-0.95
N,211,3.02,-0.11,0.39
N,212,0.70435,0.66,0.22
N,213,0.08,0,-0.56
N,301,2.6825,-0.0475,-0.775
N,302,2.0075,-0.0475,-0.755
N,303,2.0075,-0.0475,0.195
N,304,2.6825,-0.0475,0.195

!
!Definição das linhas

!
L,1,2
L,14,18
L,34,37
L,102,103
L,15,140
L,1,13
L,13,7
L,7,17
L,17,21
L,21,35
L,35,155
L,155,177
L,177,180
L,180,40
L,40,181
L,181,184
L,184,185
L,185,152
L,152,187
L,187,188
L,188,208
L,208,146
L,146,101
L,101,105
L,105,138
L,138,16
L,16,3
L,3,131
L,131,4
L,13,14
L,14,34
L,34,154
L,154,178
L,178,179
L,179,38
L,38,182
L,182,183
L,183,204
L,204,186
L,186,189
L,189,209
L,209,143
L,143,102

L,102,15
L,15,16
L,22,68
L,68,212
L,32,66
L,66,24
L,24,33
L,212,23
L,2,213
L,213,9
L,9,20
L,20,31
L,31,36
L,36,156
L,156,190
L,190,193
L,193,41
L,41,194
L,194,197
L,197,198
L,198,168
L,168,201
L,201,202
L,202,206
L,206,162
L,162,104
L,104,114
L,114,139
L,139,142
L,142,5
L,5,130
L,130,6
L,213,18
L,18,37
L,37,158
L,158,191
L,191,192
L,192,39
L,39,195
L,195,196
L,196,199
L,199,200
L,200,203
L,203,207
L,207,164
L,164,103
L,103,140
L,140,142
L,17,14
L,18,20
L,34,35
L,37,36
L,101,102
L,103,104
L,15,138
L,139,140
L,138,139
L,101,104

L,35,36
L,21,26
L,26,22
L,31,29
L,29,32
L,24,25
L,25,30
L,30,27
L,27,212
L,27,28
L,28,29
L,26,28
L,28,25
L,7,8
L,9,10
L,12,8
L,8,10
L,10,11
L,17,19
L,19,18
L,14,19
L,19,20
L,44,149
L,149,148
L,148,42
L,45,159
L,159,157
L,157,43
L,43,53
L,211,144
L,144,145
L,145,56
L,210,163
L,163,161
L,161,61
L,43,160
L,160,41
L,61,165
L,165,206
L,42,153
L,153,40
L,56,147
L,147,208
L,40,38
L,41,39
L,38,39
L,40,41
L,69,70
L,69,51
L,69,73
L,73,65
L,73,67
L,73,71
L,71,72
L,71,53
L,54,74
L,74,55
L,74,75

L,75,79
L,75,76
L,59,90
L,90,60
L,90,91
L,91,92
L,91,93
L,76,78
L,78,46
L,78,75
L,51,78
L,94,53
L,94,91
L,94,93
L,94,50
L,80,81
L,82,83
L,88,89
L,86,87
L,108,98
L,98,109
L,106,112
L,112,107
L,110,134
L,134,111
L,55,99
L,99,98
L,79,99
L,100,99
L,117,95
L,95,118
L,115,113
L,113,116
L,119,127
L,127,120
L,96,95
L,95,60
L,92,96
L,97,96
L,112,122
L,122,126
L,126,123
L,123,113
L,126,55
L,126,60
L,105,125
L,125,106
L,114,121
L,121,115
L,121,124
L,124,122
L,123,124
L,124,125
L,130,131
L,134,133
L,133,135
L,135,132
L,132,131

L,127,128
L,128,136
L,136,129
L,129,130
L,135,136
L,208,209
L,206,207
L,28,30
L,124,126
L,55,60
L,48,67
L,67,65
L,65,49
L,67,69
L,69,68
L,65,71
L,71,66
L,48,49
L,43,53
L,53,50
L,50,72
L,72,205
L,205,86
L,86,49
L,49,87
L,87,59
L,59,89
L,89,60
L,60,92
L,92,97
L,97,93
L,93,61
L,56,76
L,76,100
L,100,79
L,79,55
L,55,82
L,82,54
L,54,81
L,81,48
L,48,80
L,80,47
L,47,70
L,70,46
L,46,51
L,51,42
L,54,57
L,57,83
L,83,88
L,88,58
L,58,59
L,59,62
L,62,64
L,64,48
L,49,64
L,64,63
L,63,54
L,53,52

L,52,48
L,51,52
L,49,52
L,171,108
L,108,106
L,106,110
L,110,172
L,173,22
L,22,174
L,175,32
L,32,176
L,169,117
L,117,115
L,115,119
L,119,170
L,143,144
L,145,146
L,144,147
L,145,150
L,150,148
L,144,151
L,151,149
L,150,151
L,151,152
L,149,153
L,149,154
L,148,155
L,158,159
L,159,160
L,161,162
L,159,167
L,167,163
L,163,164
L,163,165
L,166,167
L,167,168
L,156,157
L,157,166
L,166,161
L,177,178
L,179,180
L,181,182
L,183,184
L,185,204
L,186,187
L,188,189
L,190,191
L,192,193
L,194,195
L,196,197
L,198,199
L,200,201
L,202,203
L,159,302
L,302,168
L,163,301
L,301,168
L,206,301

```

L,301,167
L,41,302
L,302,167
L,149,303
L,303,152
L,40,303
L,303,151
L,152,304
L,304,144
L,208,304
L,304,151
!
!Definir Secções
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,1,BEAM,HREC,20x40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.02,0.04,0.002,0.002,0.002,0.002
ESYS,0
SECNUM,1
TSHAP,LINE
!
E,1,2
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,2,BEAM,HREC,40x40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.04,0.04,0.002,0.002,0.002,0.002
ESYS,0
SECNUM,2
TSHAP,LINE
!
E,14,18
E,34,37
E,102,103
E,15,140
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,3,BEAM,CTUBE,40x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.018,0.02
ESYS,0
SECNUM,3
TSHAP,LINE
!
E,1,13
E,13,7
E,7,17
E,17,21
E,21,35
E,35,155
E,155,177
E,177,180
E,180,40
E,40,181

```

E,181,184
E,184,185
E,185,152
E,152,187
E,187,188
E,188,208
E,208,146
E,146,101
E,101,105
E,105,138
E,138,16
E,16,3
E,3,131
E,131,4
E,13,14
E,14,34
E,34,154
E,154,178
E,178,179
E,179,38
E,38,182
E,182,183
E,183,204
E,204,186
E,186,189
E,189,209
E,209,143
E,143,102
E,102,15
E,15,16
E,22,68
E,68,212
E,32,66
E,66,24
E,24,33
E,212,23
E,2,213
E,213,9
E,9,20
E,20,31
E,31,36
E,36,156
E,156,190
E,190,193
E,193,41
E,41,194
E,194,197
E,197,198
E,198,168
E,168,201
E,201,202
E,202,206
E,206,162
E,162,104
E,104,114
E,114,139
E,139,142
E,142,5

E,5,130
E,130,6
E,213,18
E,18,37
E,37,158
E,158,191
E,191,192
E,192,39
E,39,195
E,195,196
E,196,199
E,199,200
E,200,203
E,203,207
E,207,164
E,164,103
E,103,140
E,140,142
E,17,14
E,18,20
E,34,35
E,37,36
E,101,102
E,103,104
E,15,138
E,139,140
E,138,139
E,101,104
E,35,36
E,21,26
E,26,22
E,31,29
E,29,32
E,24,25
E,25,30
E,30,27
E,27,212
E,27,28
E,28,29
E,26,28
E,28,25
E,7,8
E,9,10
E,12,8
E,8,10
E,10,11
E,17,19
E,19,18
E,14,19
E,19,20
E,44,149
E,149,148
E,148,42
E,45,159
E,159,157
E,157,43
E,43,53
E,211,144

E,144,145
E,145,56
E,210,163
E,163,161
E,161,61
E,43,160
E,160,41
E,61,165
E,165,206
E,42,153
E,153,40
E,56,147
E,147,208
E,40,38
E,41,39
E,38,39
E,40,41
E,69,70
E,69,51
E,69,73
E,73,65
E,73,67
E,73,71
E,71,72
E,71,53
E,54,74
E,74,55
E,74,75
E,75,79
E,75,76
E,59,90
E,90,60
E,90,91
E,91,92
E,91,93
E,76,78
E,78,46
E,78,75
E,51,78
E,94,53
E,94,91
E,94,93
E,94,50
E,80,81
E,82,83
E,88,89
E,86,87
E,108,98
E,98,109
E,106,112
E,112,107
E,110,134
E,134,111
E,55,99
E,99,98
E,79,99
E,100,99
E,117,95

E,95,118
E,115,113
E,113,116
E,119,127
E,127,120
E,96,95
E,95,60
E,92,96
E,97,96
E,112,122
E,122,126
E,126,123
E,123,113
E,126,55
E,126,60
E,105,125
E,125,106
E,114,121
E,121,115
E,121,124
E,124,122
E,123,124
E,124,125
E,130,131
E,134,133
E,133,135
E,135,132
E,132,131
E,127,128
E,128,136
E,136,129
E,129,130
E,135,136
E,208,209
E,206,207
E,28,30
E,124,126
E,159,302
E,302,168
E,163,301
E,301,168
E,206,301
E,301,167
E,41,302
E,302,167
E,149,303
E,303,152
E,40,303
E,303,151
E,152,304
E,304,144
E,208,304
E,304,151
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,4,BEAM,CTUBE,50x2,0
SECOFFSET,CENT,

SECDATA,0.023,0.025
ESYS,0
SECNUM,4
TSHAP,LINETYPE
!
E,55,60
E,48,67
E,67,65
E,65,49
E,67,69
E,69,68
E,65,71
E,71,66
E,48,49
E,43,53
E,53,50
E,50,72
E,72,205
E,205,86
E,86,49
E,49,87
E,87,59
E,59,89
E,89,60
E,60,92
E,92,97
E,97,93
E,93,61
E,56,76
E,76,100
E,100,79
E,79,55
E,55,82
E,82,54
E,54,81
E,81,48
E,48,80
E,80,47
E,47,70
E,70,46
E,46,51
E,51,42
E,54,57
E,57,83
E,83,88
E,88,58
E,58,59
E,59,62
E,62,64
E,64,48
E,49,64
E,64,63
E,63,54
E,53,52
E,52,48
E,51,52
E,49,52
!*

```

TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,5,BEAM,RECT,165x5,0
SECOFFSET,CENT,
SECDDATA,0.165,0.005
ESYS,0
SECNUM,5
TSHAP,LINE
!
E,171,108
E,108,106
E,106,110
E,110,172
E,173,22
E,22,174
E,175,32
E,32,176
E,169,117
E,117,115
E,115,119
E,119,170
!*
TYPE,1
MAT,1
SECTYPE,6,BEAM,CTUBE,30x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDDATA,(RE2-0.002),RE2
ESYS,0
SECNUM,6
TSHAP,LINE
!
E,143,144
E,145,146
E,144,147
E,145,150
E,150,148
E,144,151
E,151,149
E,150,151
E,151,152
E,149,153
E,149,154
E,148,155
E,158,159
E,159,160
E,161,162
E,159,167
E,167,163
E,163,164
E,163,165
E,166,167
E,167,168
E,156,157
E,157,166
E,166,161
!*
TYPE,1
MAT,1

```

```
SECTYPE,7,BEAM,CTUBE,25x2,0
SECOFFSET,CENT,
SECDATA,0.0105,0.0125
ESYS,0
SECNUM,7
TSHAP,LINE
!
E,177,178
E,179,180
E,181,182
E,183,184
E,185,204
E,186,187
E,188,189
E,190,191
E,192,193
E,194,195
E,196,197
E,198,199
E,200,201
E,202,203
!*
/SOL
FLST,2,10,1,ORDE,8
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,-18
FITEM,2,20
FITEM,2,22
FITEM,2,32
FITEM,2,34
FITEM,2,-37
!*
/GO
D,P51X,,,,,ALL,,,,,
FLST,2,5,1,ORDE,5
FITEM,2,15
FITEM,2,101
FITEM,2,-102
FITEM,2,106
FITEM,2,138
!*
/GO
F,P51X,FY,5586
FLST,2,5,1,ORDE,5
FITEM,2,103
FITEM,2,-104
FITEM,2,115
FITEM,2,139
FITEM,2,-140
!*
/GO
F,P51X,FY,-5586
! /STATUS,SOLU
SOLVE
!*
FINISH
/POST1
```

```

!*
*DIM, matri1, , 1, 1
NSORT, U, X, 0
*GET, UMAX1, SORT, 0, MAX
*VFILL, matri1(1,1), DATA, UMAX1
!*
*DIM, matri2, , 1, 1
NSORT, U, Y, 0
*GET, UMAX2, SORT, 0, MAX
*VFILL, matri2(1,1), DATA, UMAX2
!*
*DIM, matri3, , 1, 2
NSORT, ROT, X, 0
*GET, ROTX, SORT, 0, MAX
*VFILL, matri3(1,1), DATA, ROTX
!*
*DIM, massa1, , 1, 1
VOL=0
p=1
*GET, EMAX, ELEM, 0, NUM, MAX
*DO, p, 1, EMAX
*GET, VOL1, ELEM, p, VOLU
VOL=VOL+VOL1
*ENDDO
MASSA=VOL*DENS
!*
*VFILL, massa1(1,1), DATA, MASSA
!*
!*
/output,ESTATICAnum1,txt,C:\Programas\MATLAB\R2011b\MATwork
!*
*VWRITE,matri1(1,1)
(1XF11.5,' ',F10.5)
!*
/output
!*
/output,ESTATICAnum2,txt,C:\Programas\MATLAB\R2011b\MATwork
!*
*VWRITE,matri2(1,1)
(1XF11.5,' ',F10.5)
!*
/output
!*
/output,ESTATICAnum3,txt,C:\Programas\MATLAB\R2011b\MATwork
!*
*VWRITE,matri3(1,1)
(1XF11.5,' ',F10.5)
!*
/output
!*
/output,MASSAnum,txt,C:\Programas\MATLAB\R2011b\MATwork
!*
*VWRITE,masa1(1,1)
(1XF11.5,' ',F10.5)
!*
/output      ! TERMINA IMPRESSÃO
!*
FINISH

```


D. Anexo D – Simulações

Análise Modal – Chassi D06

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =3
FREQ=92.0365
DMX =.299747

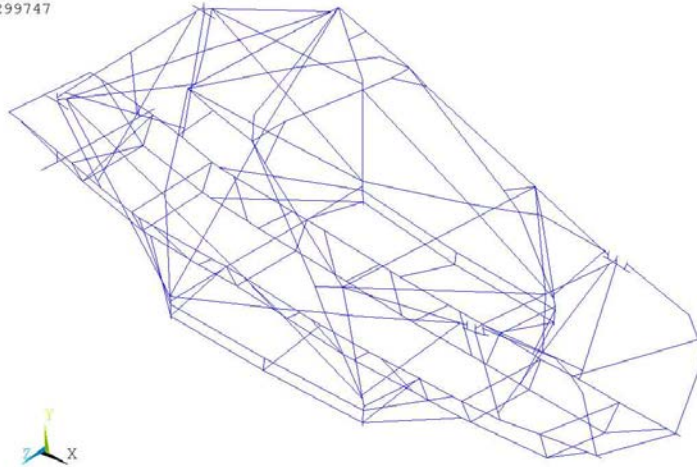


Figura D-1 – Chassi D06 – Modo 3

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =4
FREQ=109.565
DMX =.208632

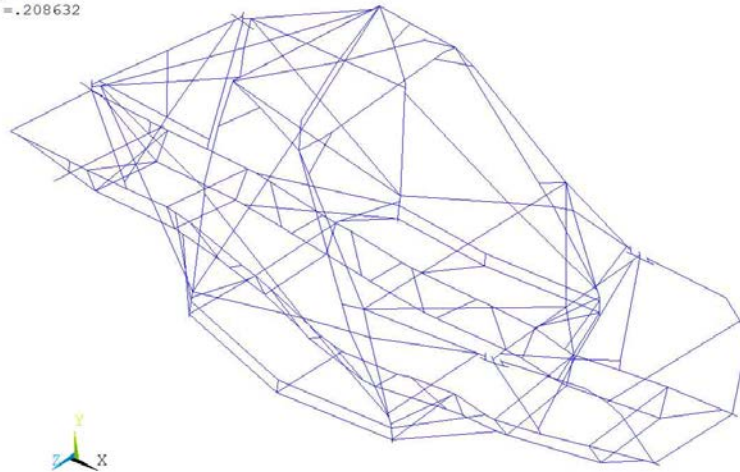


Figura D-2 – Chassi D06 – Modo 4

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =5
FREQ=113.511
DMX =.36218

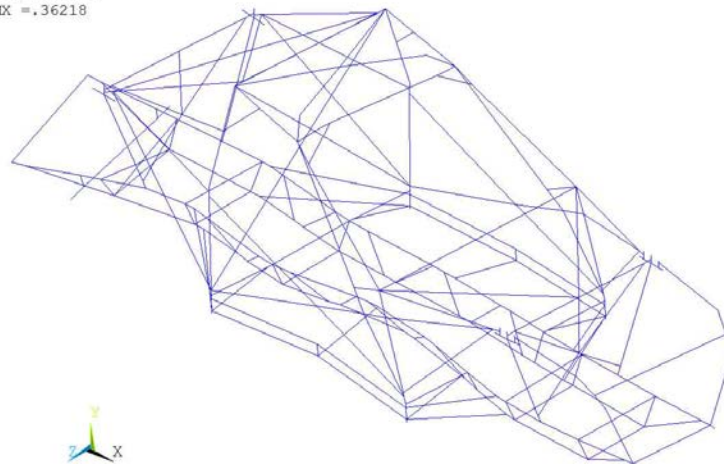


Figura D-3 – Chassi D06 – Modo 5

Análise Modal – Alternativa 1

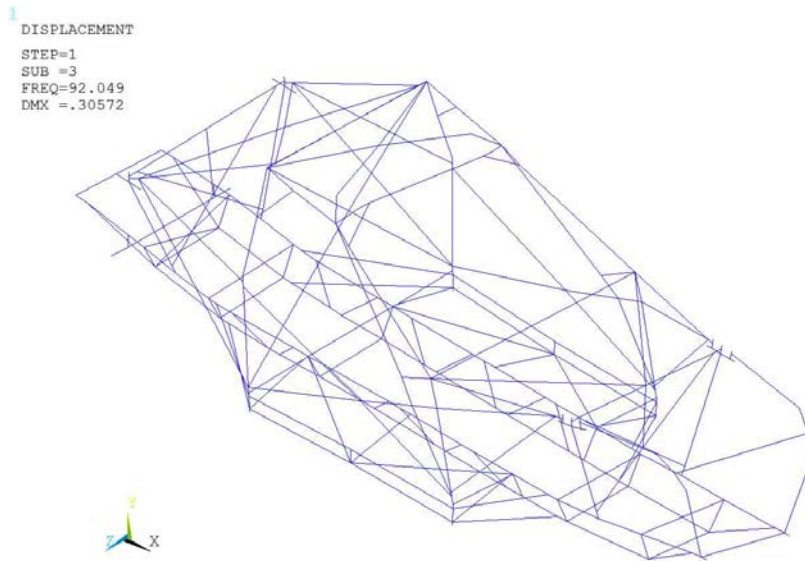


Figura D-4 – Alternativa 1 – modo 3



Figura D-5 – Alternativa 1 – modo 4

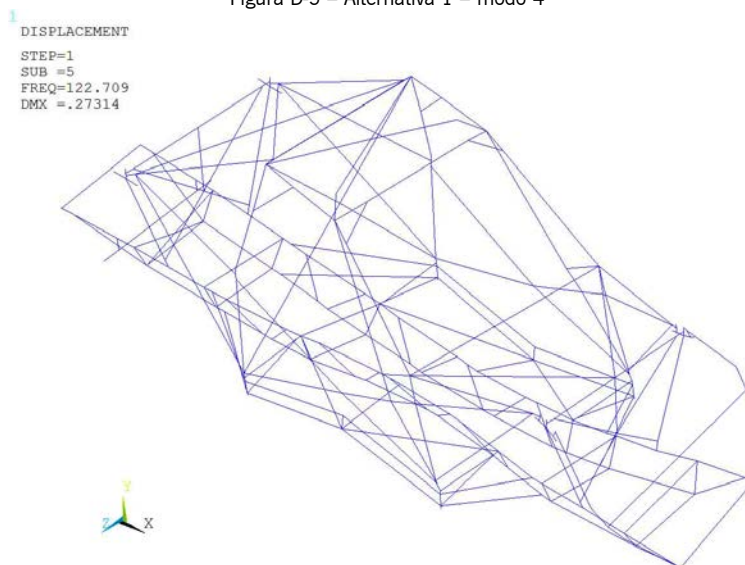


Figura D-6 – Alternativa 1 – modo 5

Análise Modal – Alternativa 2

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =3
FREQ=91.9702
DMX =.304411

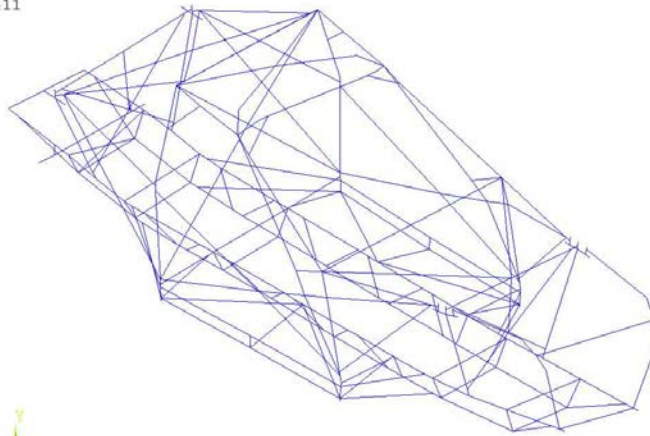


Figura D-7 – Alternativa 2 – modo 3

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =4
FREQ=114.26
DMX =.28322

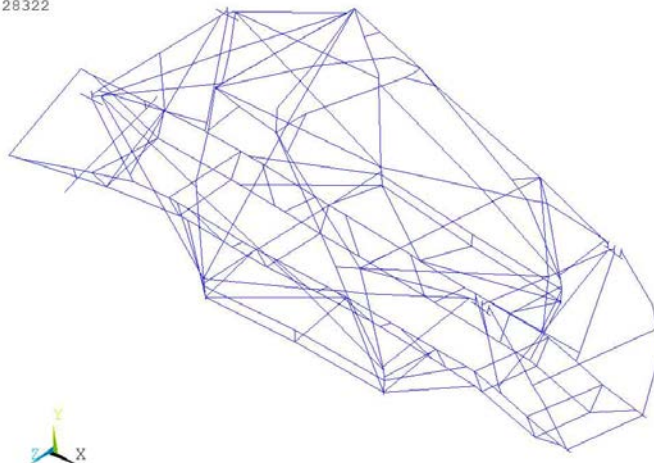


Figura D-8 – Alternativa 2 – modo 4

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =5
FREQ=124.478
DMX =.270893

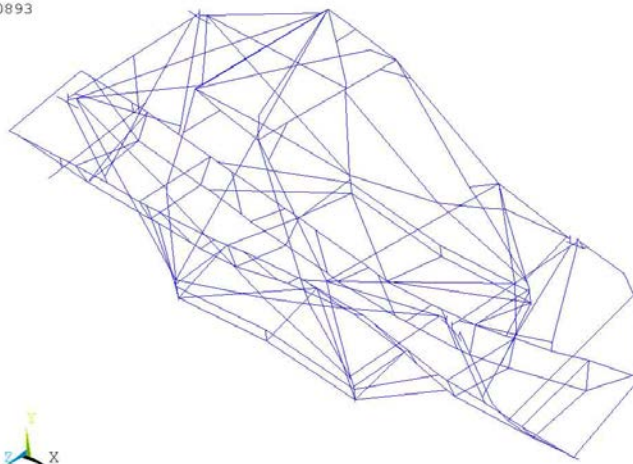


Figura D-9 – Alternativa 2 – modo 5

Análise Modal – Alternativa 3

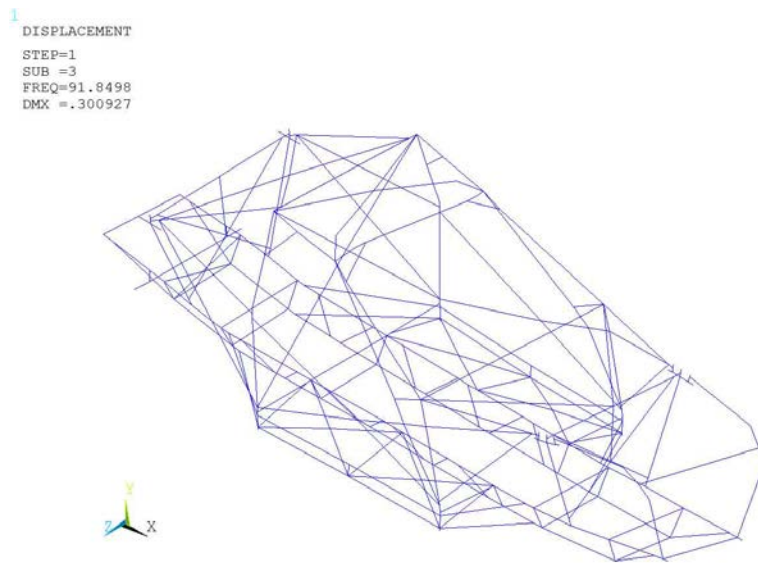


Figura D-10 – Alternativa 3 – modo 3

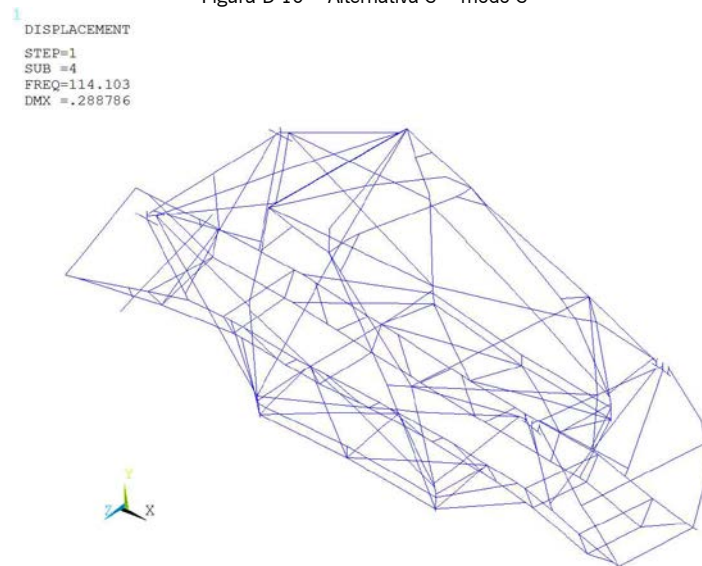


Figura D-11 – Alternativa 3 – modo 4

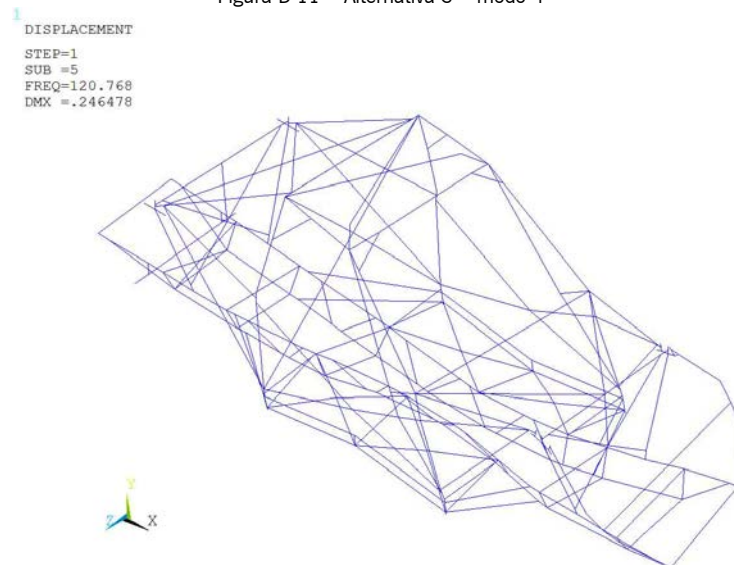


Figura D-12 – Alternativa 3 – modo 5

Análise Modal – Alternativa 4

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =3
FREQ=91.8546
DMX =.301158

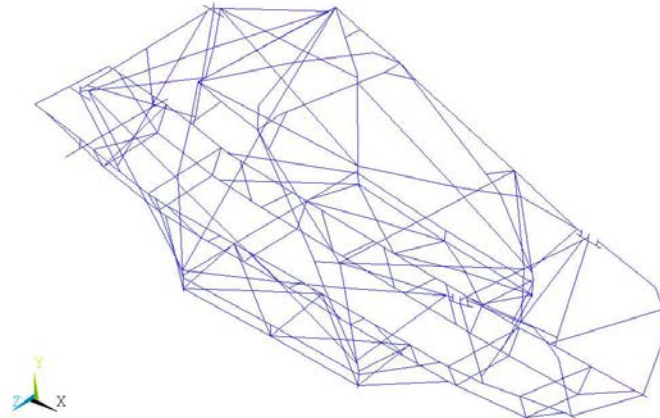


Figura D-13 – Alternativa 4 – modo 3

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =4
FREQ=114.092
DMX =.288768

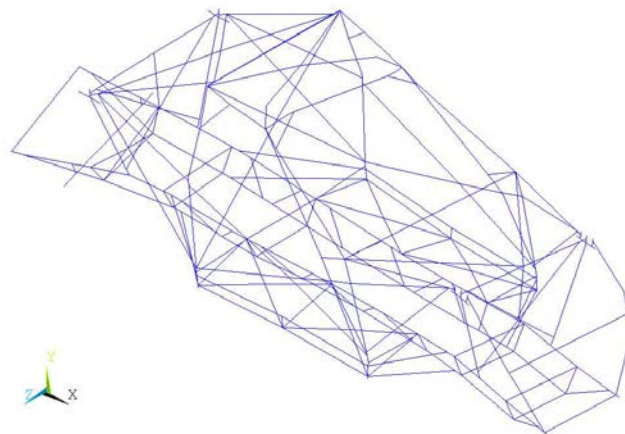


Figura D-14 – Alternativa 4 – modo 4

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =5
FREQ=120.771
DMX =.245494

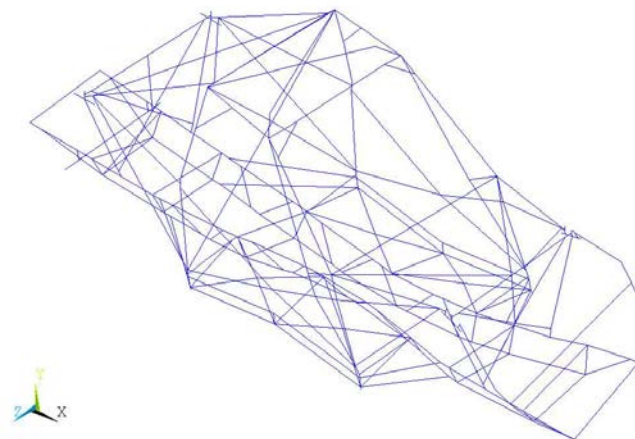


Figura D-15 – Alternativa 4 – modo 5

Análise Modal - Alternativa 5

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =3
FREQ=91.8449
DMX =.300679

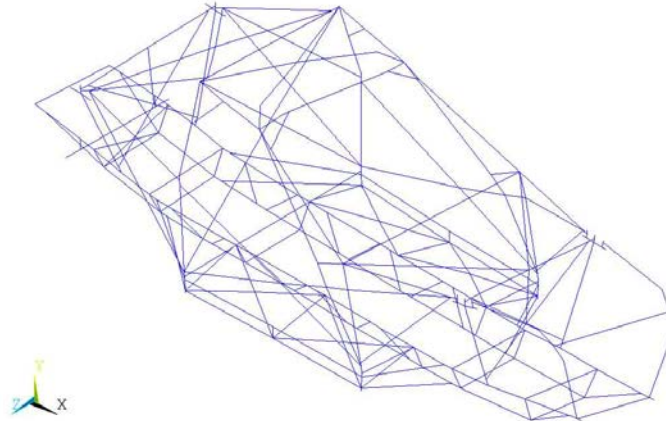


Figura D-16 – Alternativa 5 – modo 3

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =4
FREQ=114.115
DMX =.288812

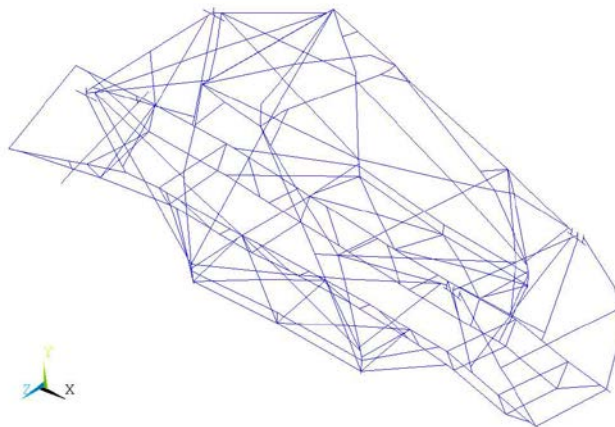


Figura D-17 – Alternativa 5 – modo 4

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =5
FREQ=120.757
DMX =.247397

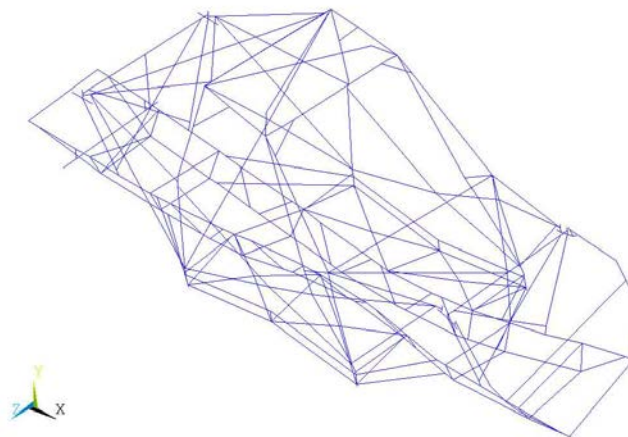


Figura D-18 – Alternativa 5 – modo 5

Análise Modal – Alternativa 6

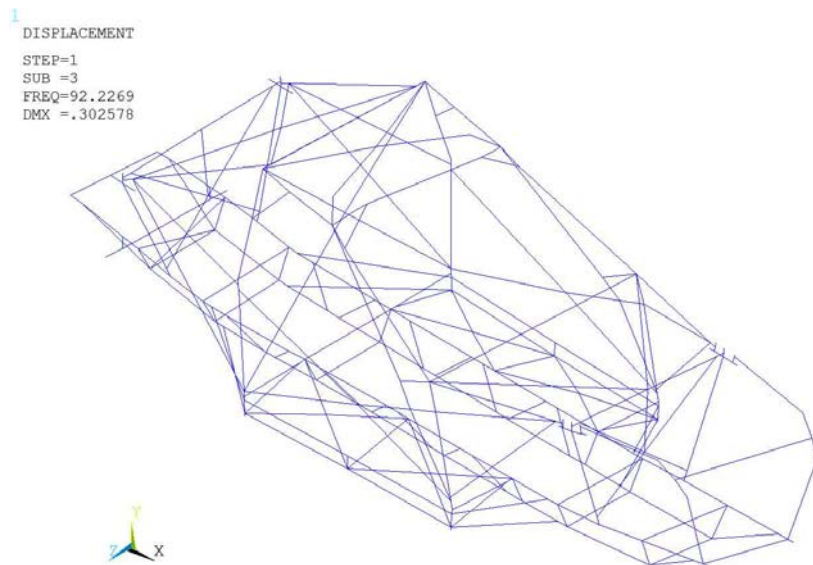


Figura D-19 – Alternativa 6 – modo 3

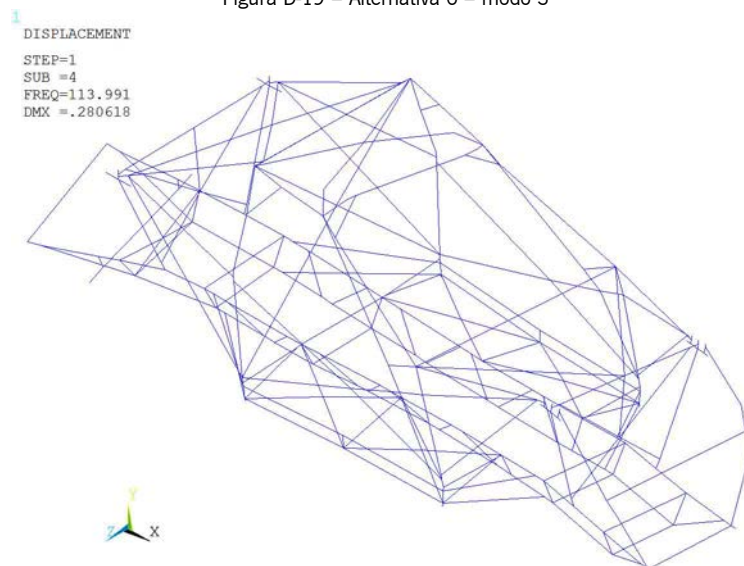


Figura D-20 – Alternativa 6 – modo 4

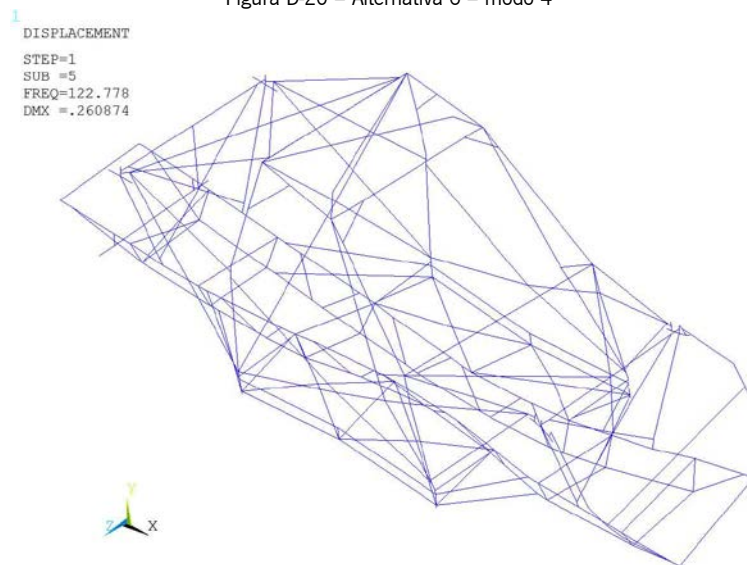


Figura D-21 – Alternativa 6 – modo 5

Análise Modal – Updating



Figura D-22 – Updating – modo 3



Figura D-23 – Updating – modo 4

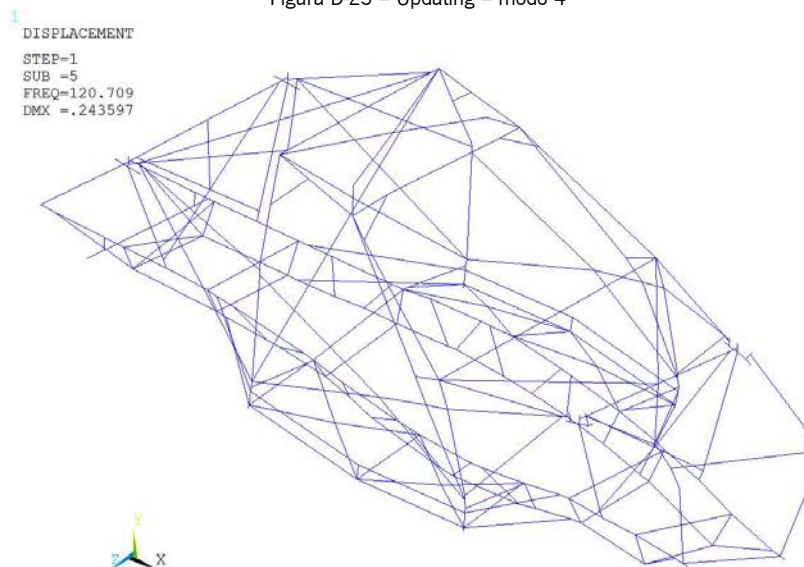


Figura D-24 – Updating – modo 5