

# Projeto, análise numérica e experimental do comportamento estrutural de sistema rotativo para assentos de veículos automóveis da categoria M1

JOSÉ MANUEL PEREIRA DE OLIVEIRA

novembro de 2020

**PROJETO, ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO  
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE SISTEMA ROTATIVO  
PARA BANCOS DE VEÍCULOS AUTOMÓVEIS DA  
CATEGORIA M1**

José Manuel Pereira de Oliveira  
1000891

**2019-2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



# **PROJETO, ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE SISTEMA ROTATIVO PARA BANCOS DE VEÍCULOS AUTOMÓVEIS DA CATEGORIA M1**

José Manuel Pereira de Oliveira  
1000891

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

**2019-2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira

Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Politécnico do Porto

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP

## **Arguente**

Doutor Abel Dias dos Santos

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP



## AGRADECIMENTOS

Pretendo expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização do presente trabalho, nomeadamente aos autores e investigadores que eu não tive oportunidade de conhecer pessoalmente, mas cujos trabalhos contribuíram para aprofundar o tema desta dissertação.

Ao docente do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Doutor, Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, na qualidade de orientador, por ter confiado na minha capacidade para apresentar um projeto na área das construções mecânicas, que basicamente consistiu no desenvolvimento de um produto para satisfazer uma necessidade real da indústria automóvel, por toda a atenção dispensada à realização do meu trabalho, nomeadamente pelos vários conselhos e exigências fundamentais para a sua realização, e especialmente pelo apoio e incentivo continuamente recebidos, que em muito contribuíram para que nunca desistisse do propósito de realizar esta dissertação numa conjuntura em que a comunicação presencial foi interdita e que naturalmente suscitou uma maior autonomia do discente.

Muito obrigado...



## PALAVRAS CHAVE

Projeto, Indústria automóvel, Qualidade, Método de elementos finitos (MEF), Simulação numérica, Otimização estrutural, Ensaio experimental de validação, Ensaio de homologação.

## RESUMO

Devido à elevada competitividade internacional, a engenharia da indústria automóvel é fortemente pressionada a seguir os requisitos com maior expressividade no mercado, nomeadamente para aumentar a segurança e o conforto, para reduzir o consumo de matérias primas e custos, assim como para reduzir o tempo de chegada de produtos novos ao mercado.

A presente dissertação tem como objetivo principal a realização de um projeto para satisfazer uma necessidade real da indústria automóvel. O produto objeto de estudo e desenvolvimento foi um sistema, designado por base rotativa, para permitir a rotação dos bancos do condutor e passageiro de veículos da categoria M1, autocaravanas, destinado sobretudo ao mercado alemão.

No projeto da presente dissertação procura-se descrever as principais fases de desenvolvimento, otimização e validação do produto, assim como, descrever os requisitos exigidos para a sua realização. Para atingir os objetivos do projeto, recorreu-se a várias ferramentas computacionais de modelação e definição dos desenhos do projeto, de otimização estrutural do modelo, de simulação numérica pelo MEF (Método de Elementos Finitos) e à experimentação, através de ensaios destrutivos do modelo.

Este trabalho, para além de ser um desafio interessante de engenharia que se concretizou num produto real, permitiu também perceber que no projeto é importante saber combinar os métodos numéricos e os métodos experimentais, assim como, obter um modelo virtual o mais aproximado possível do modelo real que permita reduzir o número de ensaios experimentais.

De acordo com as expetativas, todo o ciclo de *design* & desenvolvimento do produto só foi oficialmente validado após a realização com sucesso do ensaio experimental de homologação num laboratório da TUV na Alemanha. Para certificar este produto foi necessário atender a regulamentação estabelecida na diretiva 76/115/CEE (ECE – R14).



**KEYWORDS**

Mechanical design, Automotive industry, Quality, Finite element method (FEM), Numerical simulation, Structural optimization, Experimental validation test, Homologation test.

**ABSTRACT**

*Due to the high international competitiveness, the engineering of the automotive industry is strongly pressured to follow the requirements with greater expressiveness in the market, namely, to increase safety and comfort, to reduce the consumption of raw materials and costs, as well to increase the speed to market of new products.*

*The main goal of this dissertation's work is to carry out a project to satisfy a real need in the automotive industry.*

*The product under study and development was a system, designated as a swivel base, to allow the rotation of the driver and passenger seats of vehicles of the M1 category (vans), for the German market.*

*In the project of this dissertation, the main phases of product development, optimization and validation are described, as well as the requirements required for its realization.*

*To achieve the objectives of the project, several computational tools were used for modeling and defining the design drawings, structural optimization of the model, numerical simulation by the FEM (Finite Element Method) and experimentation, through destructive tests of the model.*

*The work developed in this dissertation allowed not only to carry out a complete project, but also to understand the importance of knowing how to combine numerical and experimental methods, as well as obtaining a virtual model as close as possible to the real model in order to reduce the number of experimental tests.*

*According to expectations, the entire product design & development cycle was only officially validated after the successful approval test in a TUV laboratory in Germany. To certify this product, it was necessary to comply with the regulations established in directive 76/115 / EEC (ECE - R14).*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

APQP	<i>Advanced Product Quality Planning and Control Plan</i>
BIW	<i>Body in white</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
C-NCAP	<i>China New Car Assessment Program</i>
EFTA	<i>European Free Trade Association</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
GTÜ	<i>Gesellschaft für Technische Überwachung.</i>
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>
I&D	Investigação & Desenvolvimento
IDI	Investigação, Desenvolvimento & Inovação
MAS	<i>Measurement Systems Analysis</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos ( <i>FEM - Finite Element Method</i> )
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PMBOK	<i>Project Management Book of Knowledge</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>
PPAP	<i>Production Part Approval Process</i>
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
P&S	Produtos & Serviços
PIB	Produto interno bruto
PTV	Princípio dos Trabalhos Virtuais
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SPC	<i>Statistical Process Control</i>
UNECE	Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa ( <i>UNECE - United Nations Economic Commission for Europe</i> )
TOPS	<i>Team Oriented Problem Solving</i>
TÜV	<i>Technischer Überwachungsverein</i> (Associação de Inspeções Técnicas)
VSP	<i>Voiture Sans Permis</i>



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

---

Acreditação	A atividade de acreditação consiste na avaliação e reconhecimento da competência técnica de entidades para efetuar atividades específicas de avaliação da conformidade (e.g. ensaios, calibrações, certificações e inspeções). A atividade de acreditação está sujeita a legislação comunitária que obriga a um funcionamento harmonizado, verificado através de um sistema de avaliação pelos pares. Em consequência, cada Estado-Membro da UE (e EFTA) designou um único organismo nacional de acreditação.
Atividades de Inovação (IDI)	Consideram-se atividades de IDI, “todas as atividades de carácter científico, tecnológico, organizacional, financeiro e comercial, incluindo investimento em novo conhecimento, direcionado para a implementação de inovações” (cf. Manual de Oslo, OCDE, 2005: pág. 47,149)
Certificação de uma empresa	A certificação é um processo de avaliação da conformidade, realizado por entidades reconhecidas, que tem como objetivo demonstrar que um dado sistema de gestão, produto, processo ou serviço, cumpre com os requisitos que lhe são aplicáveis. Nalguns casos a avaliação da conformidade é legalmente exigida, normalmente relacionada com a segurança desse produto ou serviço. A avaliação da conformidade pode também ser uma exigência contratual ou uma garantia que um dado produto ou serviço se adequa ao uso pretendido.
Criatividade	Capacidade de gerar, associar ou combinar ideias com o objetivo de contribuir para a criação de uma obra, quase sempre distintiva e original, quer intelectual quer material.
Desenvolvimento	Trabalho sistemático desenvolvido com utilização do conhecimento gerado no trabalho de investigação e na experiência, com o propósito de criar ou significativamente melhorar materiais, produtos, processos ou serviços, inovações de marketing ou inovações organizacionais.
Estado da arte	Situação, num dado momento, do estado dos conhecimentos. O seu estudo proporciona um conhecimento da situação mais avançada na disciplina de que se trata.
Euro NCAP	O <i>European New Car Assessment Programme</i> é um programa de segurança automóvel fundado em 1997, pelo " <i>Transport Research Laboratory</i> " para o Departamento de Transportes do Reino Unido. Atualmente é suportado e financiado pela União Europeia.

---

Furgão	(inglês: <i>van</i> ) - tipo de carro, de carroçaria fechada, que pode ser usado para transporte de pessoas e/ou mercadorias.
Homologação	O procedimento através do qual uma entidade homologadora certifica que um modelo de veículo ou tipo de sistema, de componente ou de unidade técnica cumpre as disposições administrativas e os requisitos técnicos aplicáveis.
Investigação	a) investigação fundamental ou básica: ampliação dos conhecimentos gerais científicos e técnicos não relacionados diretamente com produtos ou processos industriais ou comerciais; b) investigação aplicada: investigação direcionada para adquirir novos conhecimentos com vista à sua exploração no desenvolvimento de novos produtos ou processos, ou para suscitar melhorias importantes de produtos ou processos existentes.
WP.29	O Fórum Mundial da UNECE para Harmonização dos Regulamentos de Veículos (WP.29) é um fórum regulatório mundial exclusivo dentro da estrutura institucional do Comité de Transporte Terrestre da UNECE.
Norma	Documento estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que fornece regras, diretrizes ou características, para atividades ou seus resultados, garantindo um nível de ordem ótimo num dado contexto. As Normas têm um papel fundamental no aumento dos níveis de qualidade, segurança, eficiência, interoperabilidade, bem como no fornecimento de todos estes benefícios, com um custo mais económico. De uma forma geral, as Normas são voluntárias. Tornam-se obrigatórias se houver algum diploma legal que determine o seu cumprimento.
LS-DYNA	É um pacote avançado de <i>software</i> de simulação multifísica de uso geral desenvolvido pela <i>Livermore Software Technology Corporation</i> (LSTC). Enquanto o pacote continua a conter mais e mais possibilidades para o cálculo de muitos problemas complexos do mundo real, suas origens e competências essenciais estão na análise de elementos finitos dinâmicos transitórios lineares, não lineares, usando a integração explícita do tempo. O LS-DYNA é usado pelas indústrias automobilística, aeroespacial, de construção e engenharia civil, militar, de fabricação e de bioengenharia.
Pam-Crash	É um pacote de <i>software</i> usado para simulação de acidentes e design de sistemas de segurança dos ocupantes, principalmente na indústria automóvel. O <i>software</i> permite que os engenheiros simulem o desempenho de um projeto de veículo proposto e avaliem o potencial de ferimentos nos ocupantes em vários cenários de colisão.

---

Plano de projeto	Documento que especifica o que é necessário para alcançar o(s) objetivo(s) do projeto.
TÜV Rheinland	TÜV Rheinland é um fornecedor global de serviços técnicos, de segurança e de certificação. Originalmente chamada Dampfkessel-Überwachungs-Verein (Inspeções de caldeiras a vapor), a TÜV Rheinland foi fundada em 1872 e tem sede em Colónia, na Alemanha. Em 1936, esta empresa foi rebatizada como grupo TÜV Rheinland (Organização de Inspeções Técnicas).

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Idade média da frota da UE por tipo de veículo (Fonte – ACEA) [1].	12
Figura 2-2 - Produção estimada de automóveis de passageiros em países selecionados em 2018, por país (em milhões de unidades) (Fonte - Statista 2019) [2].	12
Figura 2-3 -Automóveis de passageiros (vendas por segmento) (Fonte - Statista 2019) [2].	13
Figura 2-4 - Remunerações anuais médias e VAB por trabalhador, ramo fabricação de veículos automóveis, reboques, semirreboques e componentes para veículos automóveis- 2010 a 2016 (Fonte: Contas Nacionais Anuais Definitivas, INE) [3].	15
Figura 2-5 - Principais Indicadores das Empresas da Indústria Automóvel – 2017 (Fonte: INE) [3, 4].	15
Figura 2-6 - Localização geográfica (NUTS II) das empresas da indústria automóvel em Portugal – 2016 (Fonte: INE) [3, 4].	16
Figura 2-7 - Produção de veículos automóveis em Portugal (Fonte: ACAP) [3, 6].	17
Figura 2-8 – Sociedades constituídas e sociedades dissolvidas de empresas de fabrico de componentes automóveis (Fonte: INE) [3, 4].	17
Figura 2-9 - Top 5 da Produção Mundial das Empresas da Indústria Automóvel - 2008 e 2015 [3].	18
Figura 2-10 - Peso (%) dos países com maior Produção e VAB das Empresas da Indústria Automóvel em 2015 [3].	18
Figura 2-11 - Processo de <i>design</i> e desenvolvimento [15].	28
Figura 2-12 – Vista explodida das partes de um assento tipo (adaptado de [26]).	33
Figura 2-13 – Gráfico da resitência em função de massa específica para vários materiais [27].	35
Figura 2-14 – Testes de tração de resistência estática – ECE R14 (elaboração própria).	43
Figura 2-15 – Teste de tração de resistência estática (ensaio realizado no interior do veículo) [47].	44
Figura 2-16 – Discretização de elementos finitos [48].	45
Figura 2-17 – Tipos básicos de elementos bidimensionais [50].	46
Figura 2-18 – Cálculo estrutural de uma carroçaria [51].	48
Figura 2-19 – Sinóptico da análise estrutural usando o MEF (adaptado de [51]).	49
Figura 2-20 - Simulação de colisão virtual ( <i>software</i> PAM-CRASH) versus crash test real [52].	50
Figura 2-21 - Modelo de elementos finitos do carro [53].	52
Figura 2-22 – Deformação do veículo no final do teste de colisão, (a) Vista em perspetiva, (b) Vista frontal, (c) Vista superior, (d) Vista inferior [53].	52
Figura 2-23 - Curva de aceleração do pilar B durante a colisão [53].	53
Figura 2-24 – Deformação da viga frontal [53].	54
Figura 2-25 - Deslocamento relativo do painel de instrumentos após aumento da espessura [53].	54
Figura 2-26 - Deformação do carro após melhorias do modelo [53].	55
Figura 2-27 - Distribuição típica do peso do assento de passageiro [54].	56
Figura 2-28 - Fluxograma das fases de conceção do produto (adaptado de [54]).	57
Figura 2-29 - Modelação da estrutura do banco duplo de passageiros do autocarro [54].	57
Figura 2-30 - Curvas de tensão-deformação dos aços S420MC e St-52 [54].	58
Figura 2-31 - Modelo numérico com cinto de segurança 3 pontos e dispositivos de tração [54].	58

Figura 2-32 – Resultados de simulações numéricas em função dos materiais e espessuras do modelo [54].	59
Figura 2-33 – O efeito das espessuras do perfil do chassi na FEA [54].	60
Figura 2-34 – Estrutura do encosto do banco após ensaio ECE - R14 [54].	60
Figura 2-35 – Restrições aplicadas à estrutura do assento [55].	62
Figura 2-36 – Resultado análise modal da estrutura do assento [55].	62
Figura 2-37 – Modelo numérico de teste do assento do condutor [55].	63
Figura 2-38 – Resultados da análise de resistência estática do cinto de segurança do assento [55].	64
Figura 2-39 – Suporte para reforço das corredeiras – dimensões do suporte com perfil em forma J [55].	64
Figura 2-40 – Resultados da análise de resistência estática após alterações da estrutura [55].	65
Figura 2-41 – Modelo numérico do banco e aplicação dos carregamentos [56].	67
Figura 2-42 – Gráfico esquemático de transformação da curva de tensão-deformação do material MAT24 [56].	67
Figura 2-43 – Posição geométrica das fixações do cinto de segurança e resultados do cálculo numérico [56].	68
Figura 2-44 – Resultados das deformações dos componentes críticos [56].	68
Figura 2-45 – Ancoragem inferior da fixação do cinto de segurança [56].	69
Figura 2-46 – Resultados das deformações de componentes otimizados. [56].	70
Figura 3-1 – Autocaravanas com bancos montados sobre sistemas de bases rotativas [57].	76
Figura 3-2 – Protótipo de uma base rotativa executada na fase de ensaios.	77
Figura 3-3 – Apresentação das principais funções da base rotativa para o utilizador.	77
Figura 3-4 – Vista explodida dos principais componentes e subsistemas da base rotativa.	78
Figura 3-5 – Vistas inferiores do banco com sistema de acionamento e bloqueio das corredeiras.	82
Figura 3-6 – Ensaio do trenó realizado ao conjunto banco e base rotativa.	84
Figura 3-7 – Cálculo Dimensões dos dispositivos de tração: (a) superior; (b) inferior [36, 40].	86
Figura 3-8 – Restrições definidas pela diretiva 76/115/EEC e pelo regulamento ECE – R14 (adaptado de [36, 40]).	87
Figura 3-9 – Evolução dos carregamentos dos dispositivos de tração num ensaio da UTAC (facultado pela empresa).	87
Figura 3-10 – Exemplos de bases rotativas comercializadas no mercado europeu (desenhos cedidos pelo cliente).	89
Figura 3-11 – Base rotativa da concorrência ensaiada à tração.	90
Figura 3-12 – Apresentação dos produtos homologados - Aguti [57].	91
Figura 3-13 – Apresentação de detalhes técnicos dos produtos homologados - Aguti [57].	92
Figura 3-14 – Comportamento estrutural da base rotativa VW T5 - Aguti após ensaio de tração ECE – R14 em plataforma rígida [57].	93
Figura 3-15 – Comportamento estrutural da base rotativa VW T5 com base suporte - Aguti após ensaio de tração ECE – R14 no interior do chassi [57].	93
Figura 3-16 – Gráfico do ensaio de homologação – Base rotativa VW T5 - Aguti [57].	94
Figura 3-17 – Gráfico do ensaio de homologação – Base rotativa VW T5 com base suporte - Aguti [57].	95
Figura 3-18 – Vistas em perspetiva da base rotativa.	98
Figura 3-19 – Supressão de componentes não estruturais do modelo.	99
Figura 3-20 – Exemplificação de simplificações da geometria de componentes do modelo.	100

Figura 3-21 – Curva convencional tensão-deformação dos aços .....	102
Figura 3-22 – Posições, recuada e avançada do banco sobre a base rotativa.....	103
Figura 3-23 – Exemplificação dos tipos de contatos e restrições entre componentes do modelo.....	104
Figura 3-24 – Exemplificação do refinamento da malha em zonas ou pontos singulares do modelo. ....	105
Figura 3-25 – Plataforma do ensaio de tração das fixações do cinto de segurança com banco recuado. .....	107
Figura 3-26 – Plataforma do ensaio de tração das fixações do cinto de segurança com banco avançado. .....	108
Figura 3-27 – Indicação dos esforços aplicados de modo remoto na base rotativa para os cenários 1 e 2. .....	110
Figura 3-28 – Indicação dos momentos aplicados na base rotativa para os cenários 1 e 2.....	110
Figura 3-29 – Refinamento localizado da malha do modelo com resultados elevados de tensões.....	111
Figura 3-30 – Refinamento localizado da malha do modelo com resultados de deslocamentos. ....	112
Figura 3-31 – Resultados da tensão de Von Mises para os cenários 1 e 2 do modelo.....	112
Figura 3-32 – Resultados dos deslocamentos para os cenários 1 e 2 do modelo. ....	112
Figura 3-33 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto superior da base rotativa. ....	113
Figura 3-34 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto superior da base rotativa (continuação). ....	114
Figura 3-35 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto do sistema rotativo. ....	115
Figura 3-36 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto inferior da base rotativa.....	115
Figura 3-37 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto inferior da base rotativa (continuação).....	116
Figura 3-38 – Preparação do ensaio real do modelo nas instalações da empresa.....	118
Figura 3-39 – Ensaio real do modelo realizado nas instalações da empresa. ....	119
Figura 3-40 – Gráfico das forças de tração do ensaio ECE – R14.....	120
Figura 3-41 – Otimização topológica do reforço da base inferior. ....	121
Figura 3-42 – Otimização topológica da travessa reforço da base superior. ....	121
Figura 3-43 – Solução empírica de otimização de um componente. ....	122
Figura 3-44 – Resultados dos deslocamentos do modelo otimizado. ....	122
Figura 3-45 – Perspetivas isométricas e multi-vistas do desenho de conjunto do sistema base rotativa. .....	124
Figura 3-46 – Vista em corte do conjunto base rotativa. ....	125
Figura 3-47 – Vistas de subconjuntos e funções do conjunto base rotativa. ....	126
Figura 3-48 – Vistas do desenho de subconjunto do sistema rotativo. ....	126
Figura 3-49 – Medição do binário de rotação de um protótipo da base rotativa.....	127
Figura 3-50 – Perspetivas isométricas e multi-vistas do desenho de subconjunto da base inferior da base rotativa.....	127
Figura 3-51 – Vistas do desenho de subconjunto da base superior da base rotativa. ....	128
Figura 3-52 – Desenho do layout de ensaio ECE – R14 da base rotativa com banco recuado.....	129
Figura 3-53 – Desenho do layout de ensaio ECE – R14 da base rotativa com banco avançado.....	129
Figura 3-54 – Definição de montagem do banco e base rotativa no veículo. ....	130
Figura 3-55 – Manual de instruções de montagem do banco e base rotativa no veículo.....	131
Figura 3-56 – Exemplo de ensaio de tração ECE R14 realizado com a estrutura do veículo.....	133
Figura 3-57 – Plataforma de ensaios de homologação ECE- R14 [58]. ....	134
Figura 3-58 – Bancos nas posições recuada e avançada (cenários 1 e 2) [58]. ....	135

---

Figura 3-59 – Vistas do comportamento geral das estruturas após ensaios [58]. .....	135
Figura 3-60 – Deformações máximas das estruturas após ensaios [54]. .....	136
Figura 3-61 – Gráfico do ensaio de homologação – banco na posição recuado [58]. .....	139
Figura 3-62 – Gráfico do ensaio de homologação – banco na posição avançado [58]. .....	140

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Emprego na Europa (Fonte ACEA) (adaptado de [1]). .....	10
Tabela 2-2 – Produção (Fonte ACEA) (adaptado de [1]). .....	10
Tabela 2-3 – Comércio (Fonte ACEA) (adaptado de [1]). .....	10
Tabela 2-4 – Veículos em uso (Fonte ACEA) (adaptado de [1]). .....	11
Tabela 2-5 – Tributação (Fonte ACEA) (adaptado de [1]). .....	11
Tabela 2-6 – Inovação (Fonte ACEA) (adaptado de [1]). .....	11
Tabela 2-7 – Resumo das melhorias efetuadas no modelo otimizado do assento (adaptado de [56]). ....	70
Tabela 3-1 – Valores mínimos e máximos do ensaio ECE – R14 (Base Rotativa). .....	94
Tabela 3-2 – Valores mínimos e máximos do ensaio ECE – R14 (Base Rotativa com base suporte). .....	96
Tabela 3-3 – Definição dos vetores normalizados (unitários) – Cenário 1. ....	108
Tabela 3-4 – Definição dos vetores normalizados (unitários) – Cenário 2. ....	108
Tabela 3-5 – Resumo dos resultados das simulações numéricas e ensaios reais. ....	123
Tabela 3-6 – Totalidade dos resultados das simulações numéricas e ensaios reais. ....	138
Tabela 3-7 – Resumo dos resultados dos ensaios de tração realizados no laboratório de homologação. .....	140



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	3
1.1	Contextualização .....	3
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Organização do relatório.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Indústria automóvel.....	9
2.2	Indústria automóvel a nível mundial .....	9
2.3	Indústria automóvel em Portugal e História do setor.....	13
2.4	O peso do setor automóvel na economia portuguesa.....	14
2.5	As empresas do setor automóvel em Portugal.....	15
2.6	A produção de veículos automóveis .....	16
2.7	A produção de componentes automóveis .....	17
2.8	Comparativo internacional das empresas do setor .....	18
2.9	A qualidade na indústria automóvel e as principais ferramentas .....	19
2.9.1	APQP (Planeamento avançado da qualidade do produto).....	19
2.9.2	FMEA (Modo de falha e análise de efeitos).....	20
2.9.3	MSA (Análise dos sistemas de medição) .....	20
2.9.4	SPC (Controlo estatístico do processo).....	20
2.9.5	Método 8D - Análise e resolução de problemas (“ <i>Eight Disciplines</i> ”).....	21
2.9.6	PPAP (Processo de Aprovação de Peças de Produção) .....	22
2.9.7	A norma EN ISO 9001 - Certificação ISO 9001 - Gestão da Qualidade .....	23
2.9.8	IATF (The International Automotive Task Force).....	23
2.9.9	Certificação IATF 16949:2016 - SGQ da Indústria Automóvel.....	24
2.9.10	Os requisitos competitividade com maior expressão na indústria automóvel .....	24
2.9.11	Requisitos e certificação de um Sistema de Gestão de IDI.....	25
2.9.12	Manual de Oslo.....	26
2.9.13	Design e desenvolvimento de produtos e serviços, segundo a ISO 9001:2015 .....	27
2.10	Projeto na indústria automóvel .....	28
2.10.1	Projeto de IDI versus Projeto de um produto novo.....	28
2.10.2	Normalização da gestão de projetos.....	30
2.11	Sistemas e modularização na indústria automóvel .....	31

2.11.1	Funções do interior do automóvel e a sua modularização.....	31
2.11.2	Seleção de materiais e considerações de projeto para a indústria automóvel.....	34
<b>2.12</b>	<b>Regulamentação aplicada à indústria automóvel.....</b>	<b>35</b>
2.12.1	Regulamentação na área da segurança.....	36
2.12.2	Regulamentação na área do Ambiente.....	37
2.12.3	Diferenciação entre Diretivas CE, Regulamentos UNECE.....	37
2.12.4	Diretivas CE.....	37
2.12.5	Regulamentos UNECE.....	38
2.12.6	Regulamentos CE.....	38
2.12.7	Diferença entre Diretivas da UE, Regulamentos da ONU e Regulamentos técnicos globais da ONU (GTRs da ONU).....	38
<b>2.13</b>	<b>Ergonomia na indústria automóvel.....</b>	<b>39</b>
2.13.1	Definição de ergonomia.....	39
2.13.2	Ergonomia no projeto do veículo.....	40
2.13.3	Normas, diretrizes e recomendações de ergonomia para promover a acomodação dos ocupantes de veículos automóveis.....	40
2.13.4	Generalidades sobre antropometria no veículo automóvel.....	41
2.13.5	Definição dos pontos H e R.....	42
<b>2.14</b>	<b>Homologação de veículo, sistemas e componentes na Comunidade Europeia.....</b>	<b>42</b>
<b>2.15</b>	<b>Homologação de bancos para veículos das categorias M1 e N1.....</b>	<b>43</b>
<b>2.16</b>	<b>Método de Elementos Finitos.....</b>	<b>44</b>
2.16.1	Fundamentos do MEF.....	45
2.16.2	Áreas de aplicação do FEM.....	47
<b>2.17</b>	<b>MEF na indústria automóvel.....</b>	<b>47</b>
2.17.1	Cálculo da carroçaria completa.....	49
2.17.2	Análise da resistência da carroçaria.....	49
2.17.3	Análise do comportamento dinâmico.....	49
2.17.4	Análise do comportamento em colisões.....	50
2.17.5	Análise dos sistemas de proteção dos ocupantes.....	50
2.17.6	MEF no projeto da estrutura de um automóvel.....	51
<b>2.18</b>	<b>Casos de estudo sobre o projeto e validação da segurança de bancos para veículos automóveis.....</b>	<b>55</b>
2.18.1	Caso de estudo 1 - Projeto de um banco duplo de passageiros ECE – R14.....	55
2.18.2	Caso de estudo 2 - A importância das Normas FMVSS na segurança dos ocupantes.....	61
2.18.3	Caso de estudo 3 - Análise da resistência do cinto de segurança para veículos.....	65
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>75</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução ao trabalho prático desenvolvido.....</b>	<b>75</b>

3.1.1	Breve apresentação do produto objeto de desenvolvimento .....	76
3.1.2	Caracterização da empresa .....	78
3.1.3	Objetivos do trabalho prático .....	79
3.1.4	Identificação das especificações técnicas e requisitos do produto.....	79
3.1.5	Legislação necessária para o desenvolvimento do projeto.....	83
3.1.6	Descrição da Diretiva 76/115/EEC (Regulamento ECE - R14).....	84
3.1.7	Especificações do ensaio de tração com base na Diretiva 76/115/EEC (ECE - R14).....	85
3.1.8	Benchmarking de produtos concorrentes.....	88
3.2	Descrição da fase de anteprojecto (projecto preliminar) .....	96
3.2.1	O que é o MEF do Stress Analysis?.....	97
3.2.2	Modelação do produto / construção do modelo numérico.....	97
3.3	Análise numérica do modelo .....	98
3.3.1	Supressão/exclusão de componentes não estruturais do modelo .....	99
3.3.2	Simplificação da geometria de componentes do modelo.....	99
3.3.3	Definição dos materiais nos componentes do modelo .....	100
3.3.4	Definição das ligações entre os diferentes componentes.....	102
3.3.5	Definição da malha de análise de elementos finitos.....	105
3.3.6	Definição dos carregamentos e das ligações ao exterior .....	105
3.3.7	Apresentação e discussão dos resultados das simulações MEF.....	111
3.3.8	Validação do modelo numérico através de ensaios reais .....	117
3.3.9	Soluções de otimização do modelo.....	120
3.4	Descrição da fase do projecto detalhado (projecto final) .....	123
3.4.1	Desenhos do projecto final .....	123
3.4.2	Desenhos dos sistemas e subsistemas (desenhos de pormenor) .....	124
3.4.3	Desenhos do layout do ensaio ECE - R14 para homologação .....	128
3.4.4	Desenhos de montagem do banco e base rotativa no veículo .....	130
3.5	Ensaio de homologação ECE – R14.....	131
3.5.1	Protocolo do ensaio de tração ECE – R14.....	132
3.5.2	Preparação dos ensaios de homologação (ECE – R14).....	133
3.5.3	Avaliação dos resultados dos ensaios de homologação (ECE – R14) .....	135
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	145
4.1	Conclusões .....	145
4.2	Proposta de trabalhos futuros .....	148
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	151
6	ANEXOS.....	157
6.1	ANEXO 1 – Desenhos dos sistemas e subsistemas e de definição.....	157

---

6.2	<b>ANEXO 2</b> – Desenhos dos layouts dos ensaios ECE -R14 .....	157
6.3	<b>ANEXO 3</b> – Desenhos de montagem do banco e base rotativa no veículo .....	157

# INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do relatório



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

É do conhecimento geral que indústria automóvel em Portugal é particularmente significativa. A indústria automóvel pertence à Indústria transformadora, e é composta por três grandes áreas de atividade: fabricação de automóveis, fabricação de carroçarias e reboques e fabricação de componentes e acessórios para automóveis. Normalmente, quando se refere a atividade deste setor em Portugal, pensa-se imediatamente na produção das grandes fábricas construtoras ou montagem de veículos. No entanto, em Portugal, o setor de componentes para automóveis é um pilar fundamental da economia portuguesa com uma forte vertente exportadora, dependendo esta realidade do contributo de várias empresas portuguesas que têm de enfrentar uma forte concorrência do mercado global.

Atualmente, a elevada competitividade internacional é uma realidade intrínseca a todas as empresas e ramos de negócio. As empresas em geral da indústria automóvel tendem a seguir os requisitos com maior expressividade no mercado, nomeadamente, maior segurança, mais conforto, redução do consumo de matérias primas e se possível a preços baixos. Para além destes requisitos, as empresas têm ainda de adotar outras estratégias para conquistar e agradar os consumidores, tais como: reduzir o tempo de chegada do produto ao mercado "*speed to market*", a procura de novas opções estéticas, a redução de custos em todas as fases do processo, especialmente nas fases que antecedem e incluem a fabricação do produto: conceção, desenvolvimento e produção. Por outro lado, as disposições legislativas em termos de segurança são também um desafio que normalmente as marcas ultrapassam no propósito de conquistar mercado. Todos estes requisitos induzem novos desafios às empresas da indústria automóvel e exigem cada vez mais eficácia e eficiência da engenharia do produto e dos processos. A satisfação destes requisitos passa também pela diminuição dos ciclos de desenvolvimento de produto, de modo a potenciar a eficiência de todo o processo.

A evolução da engenharia assistida por computador e o desenvolvimento de plataformas em ambiente mais "amigável" do utilizador, as chamadas plataformas CAE, alterou de forma distinta a abordagem de desenvolvimento dos projetos. Por exemplo, a rapidez com que se consegue obter resultados de um projeto de simulação pode tornar uma empresa muito mais inovadora e competitiva, comparativamente às que não adotam estas técnicas.

A presente dissertação tem como objetivo desenvolver um trabalho de projeto e otimização de um produto que se integra no setor de componentes automóveis.

Concretamente, o trabalho consiste na realização de um projeto e otimização de um sistema rotativo (base rotativa) para bancos do condutor e passageiro de veículos automóveis da categoria M1, mais precisamente autocaravanas. Este trabalho visa satisfazer uma necessidade real de uma empresa de produção de componentes automóveis sediada na zona do Grande Porto, que para além de produzir componentes de automóveis também desenvolve produtos novos internamente ou através do “*outsourcing*”.

Considera-se importante salientar que este trabalho será desenvolvido na atual conjuntura da indústria automóvel e tendo em conta todos os requisitos implícitos e explícitos inerentes ao desenvolvimento do produto, assim como, foi com grande motivação que o desafio de desenvolver um novo produto foi aceite na expectativa de ser um projeto de sucesso, o que significa na prática o produto ser competitivo no mercado automóvel.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento do projeto de um sistema rotativo (base rotativa) para bancos de veículos automóveis da categoria M1 (autocaravanas). Para atingir o objetivo principal, ou seja, projetar um produto com sucesso, foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o caderno de encargos e requisitos do cliente e detetar eventuais omissões;
- Identificar o estado da concorrência em produtos idênticos “*benchmarking*”;
- Antecipar as ações da concorrência na definição do novo produto;
- Respeitar as políticas regulamentares e normativas associadas ao produto a projetar;
- Identificar os diferentes requisitos técnicos que o produto deve assegurar em termos funcionais, requisitos legais e requisitos de homologação;
- Analisar as restrições tecnológicas associadas ao seu processo de desenvolvimento ou produção;
- Alcançar as especificações técnicas, para que seja possível fabricar o produto com os processos produtivos disponíveis e capacidades dos fornecedores;
- Respeitar a multiplicidade de requisitos a serem atendidos, considerando todas as fases do ciclo de vida do produto e seus clientes;
- Realizar análises numéricas pelo MEF para otimizar o produto de forma a ser competitivo em termos de produto e custo;
- Realizar ensaios de resistência estática ao produto físico (ensaio destrutivo) para validar o comportamento estrutural.

### 1.3 Organização do relatório

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos distintos.

No presente capítulo é feito o enquadramento do tema e uma explanação do interesse e objetivo principal do trabalho, assim como dos objetivos específicos para alcançar tal objetivo. Este capítulo introdutório termina com a apresentação da organização e estrutura do texto do presente relatório.

No início do capítulo 2 apresenta-se o estado do conhecimento atual em relação ao setor da indústria automóvel a nível mundial e em Portugal. Em particular, faz-se uma descrição da importância económica deste ramo de atividade, da evolução deste setor e do peso desta indústria no comércio internacional e nacional, assim como a indicação dos principais fabricantes e da produção automóvel. Esta parte da apresentação termina com o tema Qualidade na indústria automóvel.

Em virtude do presente trabalho ser um projeto de desenvolvimento de um produto novo para um veículo automóvel, foi dado neste capítulo especial enfoque ao estado do conhecimento do Projeto em geral na indústria automóvel. Assim, procedeu-se a uma descrição estruturada dos principais tópicos relacionados com este tema, destacando-se: o *design* & desenvolvimento, a normalização e regulamentação, a ergonomia, a homologação e, por último, a importância do MEF como uma ferramenta auxiliar do projeto nesta indústria. Este capítulo, que antecede o capítulo do trabalho de projeto e otimização propriamente dito, é considerado muito importante, porque contém conhecimentos de várias matérias que permitem desenvolver e elevar a qualidade do projeto desta dissertação, assim como, reduzir o grau de incerteza associado ao projeto.

Na parte final do capítulo 2, são apresentados três casos de estudo relativos ao projeto e respetiva validação da segurança de bancos para veículos automóveis. O objetivo da apresentação destes casos de estudo é conhecer o estado da arte de projetos análogos ao trabalho de projeto desenvolvido na presente dissertação.

No capítulo 3, apresenta-se todo o trabalho relativo ao projeto do sistema rotativo (base rotativa) desenvolvido para os bancos do condutor e do passageiro de um veículo automóvel da categoria M1, a sua otimização através do MEF, a análise dos resultados do modelo numérico, a análise dos resultados dos ensaios experimentais, nos quais se incluem os ensaios de homologação.

No capítulo 4, fazem-se considerações finais sobre os resultados obtidos nas simulações numéricas pelo MEF e de todo o trabalho experimental de ensaios reais. Apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado, assim como alguns aspetos que podem ser objeto de desenvolvimentos futuros.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Indústria automóvel
- 2.2 Indústria automóvel a nível mundial
- 2.3 Indústria automóvel em Portugal e História do setor
- 2.4 O peso do setor automóvel na economia portuguesa
- 2.5 As empresas do setor automóvel em Portugal
- 2.6 A produção de veículos automóveis
- 2.7 A produção de componentes automóveis
- 2.8 Comparativo internacional das empresas do setor
- 2.9 A qualidade na indústria automóvel e as principais ferramentas
- 2.10 Projeto na indústria automóvel
- 2.11 Sistemas e modularização na indústria automóvel
- 2.12 Regulamentação aplicada à indústria automóvel
- 2.13 Ergonomia na indústria automóvel
- 2.14 Homologação de veículo, sistemas e componentes na Comunidade Europeia
- 2.15 Homologação de bancos para veículos das categorias M1 e N1
- 2.16 Método de Elementos Finitos
- 2.17 MEF na indústria automóvel
- 2.18 Casos de estudo sobre o projeto e validação da segurança de bancos para veículos automóveis



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Indústria automóvel

A indústria automóvel é caracterizada por ser uma indústria que está relacionada com o projeto, investigação, desenvolvimento, produção, publicidade e a comercialização de veículos automóveis para passageiros e veículos comerciais que são produzidos em todo o mundo.

Desde a época da criação do automóvel que assistimos a uma crescente democratização do automóvel. A frota automóvel tem continuamente crescido a nível mundial não só porque a população mundial tem crescido, mas também devido a outros fatores, tais como: a redução de custos de produção, a inovação nos processos de fabrico e o desenvolvimento de novos materiais.

Paralelamente à democratização do automóvel, assiste-se também a um conjunto de problemas com impacto ambiental e na sociedade, e que afetam a qualidade de vida das pessoas, nomeadamente, a poluição sonora e ambiental, a taxa de sinistralidade, (acidentes mortais e/ou de invalidez de seres humanos), os congestionamentos de trânsito, o número excessivo de automóveis nos centros urbanos, a degradação de monumentos históricos, e o stress causado no ser humano.

Por outro lado, denota-se que os grandes fabricantes da indústria de automóvel não aparentam estar muito preocupados com o crescimento colossal do número de veículos motorizados que circulam no nosso planeta, assim como, se percebe facilmente que a concorrência entre eles é muito feroz e que esta indústria gasta muitos milhões de euros todos os anos com o objetivo de tentar convencer o utilizador final de que o seu modelo automóvel é a melhor opção.

O poder ou a influência desta indústria é tão grande que alguns fabricantes de automóveis são facilmente conotados como um símbolo ou representante nacional, como por exemplo, a Renault em França, a Mercedes Benz e BMW na Alemanha, a Ford nos Estados Unidos, ou a Ferrari na Itália, entre outros.

### 2.2 Indústria automóvel a nível mundial

Seguidamente, apresenta-se uma visão geral da indústria automóvel e das principais indústrias da Europa, tendo como ponto de referência os dados recentes da *European Automobile Manufacturers Association* (ACEA).

De acordo com os dados facultados por esta associação, em 2017, o sector automóvel proporcionava emprego de uma forma direta ou indireta a 13,8 milhões de europeus,

representando 6,1% do emprego total da UE. Em 2018, os fabricantes da UE produziram 16,5 milhões de automóveis de passageiros - representando 21% da produção global de automóveis - e mais de 2,6 milhões de veículos comerciais. Quase 6,1 milhões desses veículos a motor foram exportados em 2018, gerando um excedente comercial de 84,4 mil milhões de euros para a União Europeia (Tabela 2-1, Tabela 2-2 e Tabela 2-3) [1].

Tabela 2-1 – Emprego na Europa (Fonte ACEA) (adaptado de [1]).

Emprego		
Fabricação de veículos a motor (UE)	2,6 milhões de pessoas = 8,5% do emprego da UE na indústria transformadora	2017
Total (Indústria transformadora, serviços e construção da UE)	13,8 milhões de pessoas = 6,1% do emprego total na UE	2017

Tabela 2-2 – Produção (Fonte ACEA) (adaptado de [1]).

Produção		
Veículos motorizados (mundo)	98,1 milhões de unidades	2018
Veículos a motor (UE)	19,2 milhões de unidades = 20% da produção global de veículos automotores	2018
Carros de passageiros (mundo)	79,3 milhões de unidades	2018
Automóveis de passageiros (UE)	16,5 milhões de unidades = 21% da produção global de automóveis de passageiros	2018

Tabela 2-3 – Comércio (Fonte ACEA) (adaptado de [1]).

Comércio		
Exportações (extra-UE)	138,4 mil milhões de euros	2018
Importações (extra-UE)	54,0 mil milhões de euros	2018
Superavit comercial	84,4 mil milhões de euros	2018

Segundo dados da fonte ACEA, esta indústria não é apenas capaz de gerar empregos e crescimento económico, porque os automóveis são também uma fonte vital de receitas dos governos. Os novos dados mostram que existem cerca de 308 milhões de veículos a motor em circulação nas estradas da UE, dos quais 268 milhões são automóveis. A tributação sobre estes veículos vale 428 mil milhões de euros por ano apenas nos países da UE15, o que representa mais de duas vezes e meia o orçamento total da EU (Tabela 2-4 e Tabela 2-5) [1].

Tabela 2-4 – Veículos em uso (Fonte ACEA) (adaptado de [1]).

Veículos em uso		
Veículos a motor (UE)	308,3 milhões de unidades	2017
Automóveis de passageiros (UE)	268,0 milhões de unidades	2017
Taxa de motorização (UE)	602 veículos por 1.000 habitantes	2017
Idade média dos automóveis (UE)	11,1 anos	2017

Tabela 2-5 – Tributação (Fonte ACEA) (adaptado de [1]).

Tributação		
Rendimentos orçamentais dos veículos a motor (UE15)	428 mil milhões de euros	2017

Segundo dados da fonte ACEA [1], o mesmo nível de ambição aplica-se igualmente ao objetivo de tornar a mobilidade mais limpa, mais inteligente e segura no futuro. Para o efeito, as empresas de montagem e fornecedores da UE aumentaram os seus investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) em 6,7%, atingindo em 2017 um máximo histórico de 57,4 mil milhões de euros. Isto significa que o setor automóvel europeu é o investidor número um em inovação (Tabela 2-6).

Tabela 2-6 – Inovação (Fonte ACEA) (adaptado de [1]).

Inovação		
Investimento em Pesquisa e Desenvolvimento	57,4 mil milhões de euros	2017

Segundo a fonte ACEA [1], a frota de veículos a motor da UE está a envelhecer ano após ano, sendo em 2017 a idade média dos automóveis de passageiros de 11,1 anos, dos veículos comerciais ligeiros de 11 anos e dos veículos comerciais pesados de 12 anos.

O gráfico da Figura 2-1, caracteriza a idade média da frota da UE por tipo de veículos entre os anos 2013 – 2017.

De acordo com os dados recentes da fonte Statista [2], a China foi o país líder em termos de produção de automóveis de passageiros com 23,53 milhões de unidades produzidas neste país em 2018, valor muito superior quando comparado com o Japão que é vice-campeão com cerca de 8,36 milhões de unidades (Figura 2-2).

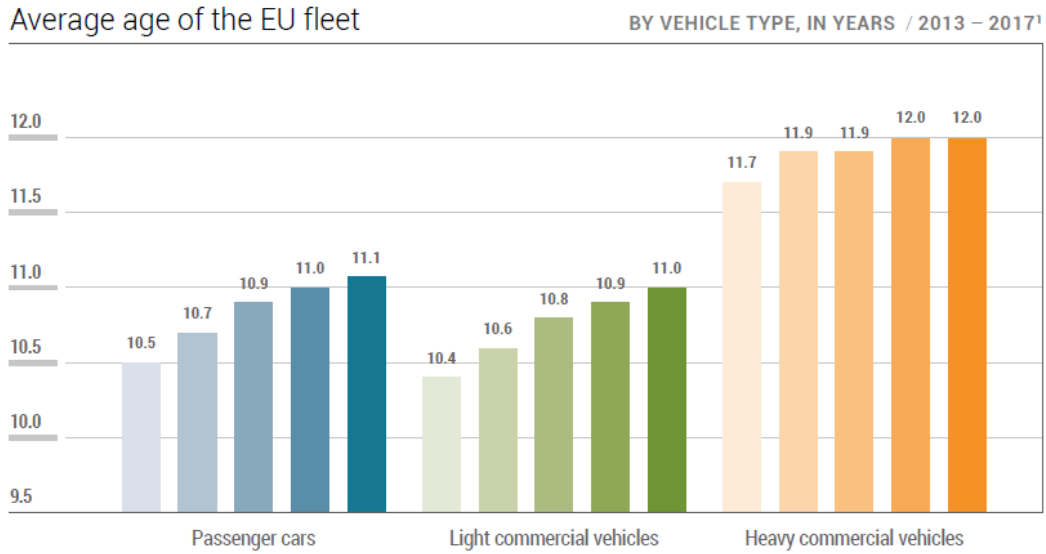


Figura 2-1 - Idade média da frota da UE por tipo de veículo (Fonte – ACEA) [1].

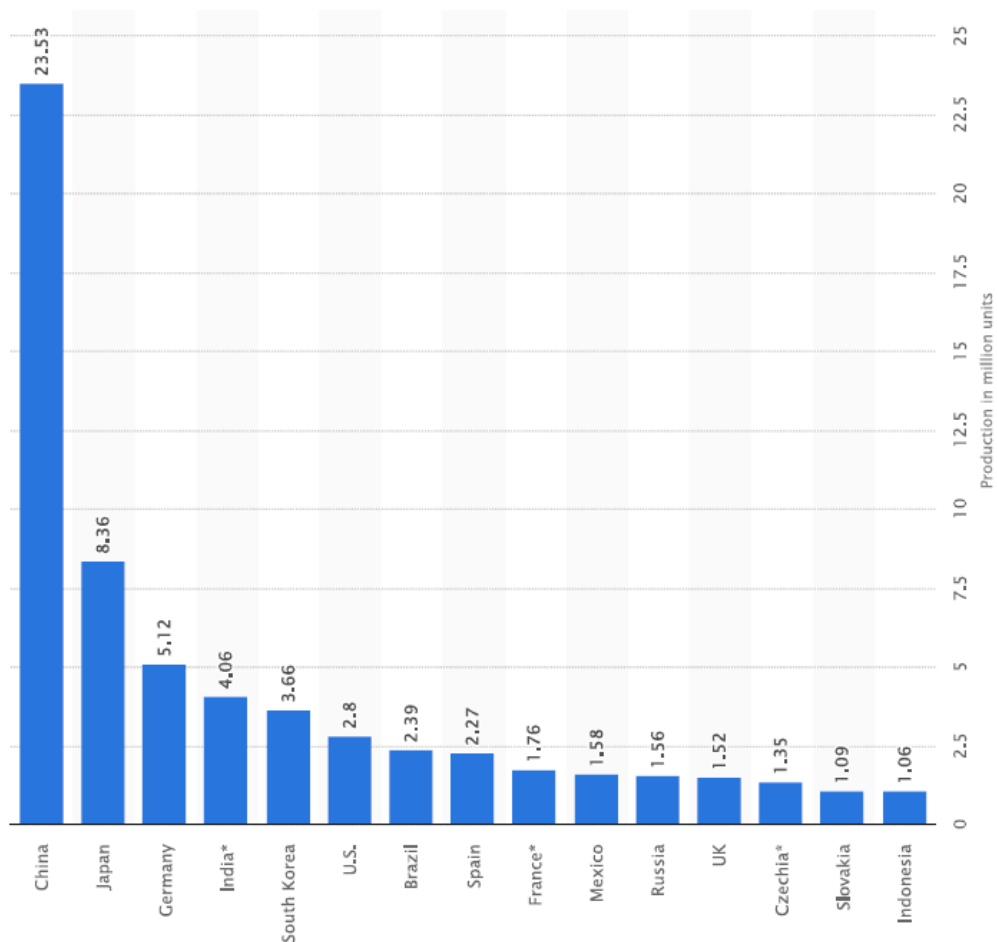


Figura 2-2 - Produção estimada de automóveis de passageiros em países selecionados em 2018, por país (em milhões de unidades) (Fonte - Statista 2019) [2].

Em 2018, a China permanece no top da produção de veículos ligeiros por país. Fabricantes da China, como SAIC, Changan, Dongfeng, Geely e BAIC - que formaram

uma *joint-venture* com a Daimler, continuam a ganhar quota de mercado. *Joint-ventures* com parceiros estrangeiros foram a chave para o sucesso da China como produtor de veículos motorizados, nomeadamente no segmento de automóveis de passageiros e no segmento de camiões. Países como o Japão, a Alemanha, a Índia e a Coreia do Sul completaram a lista dos maiores produtores de automóveis do mundo. Nos principais fabricantes de automóveis em todo o mundo incluiu-se a Alemanha (Figura 2-2).

De acordo com a fonte Statista [2], é expetável que as vendas de automóveis de passageiros, atinga o valor de 16,01 milhões de veículos em 2023, considerando todos os segmentos de automóveis de passageiros (Figura 2-3).

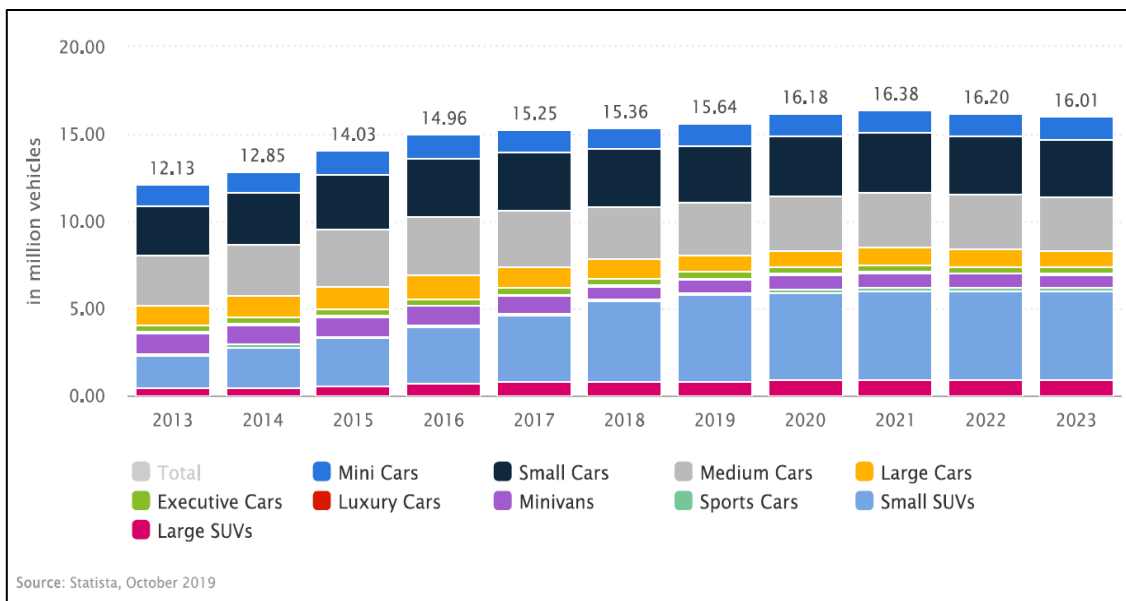


Figura 2-3 -Automóveis de passageiros (vendas por segmento) (Fonte - Statista 2019) [2].

### 2.3 Indústria automóvel em Portugal e História do setor

Em Portugal, a Indústria Automóvel é considerada estratégica na economia nacional, tendo em conta os contributos deste setor na produção, no emprego, no PIB e nas exportações portuguesas. A história da indústria automóvel portuguesa é relativamente recente e pode ser descrita, essencialmente, em três etapas.

Nas décadas de 60 e 70 a indústria automóvel portuguesa é caracterizada uma fase em que o setor automóvel era bastante ineficiente, sendo sobretudo constituído por um grande número de unidades de montagem, de pequena dimensão.

No final da década de 70, instalaram-se em Portugal duas fábricas da Renault, nomeadamente, a fábrica de motores e caixas de velocidade de Cacia e a linha de montagem de Setúbal, tendo estas unidades um papel fundamental na indústria de componentes de automóveis em Portugal, dado que promoveram o desenvolvimento de novas tecnologias de processo, tais como a estampagem, os revestimentos e a soldadura.

Na fase que medeia o final da década de 70 até 1988, surgem no sector automóvel empresas com maior dimensão, sendo a produção destinada ao mercado externo. Esta fase foi sobretudo marcada pelo reconhecimento da importância deste sector como impulsionador da industrialização e da economia do país.

Em 1989, surge o conhecido projeto Volkswagen AutoEuropa que na realidade é uma parceria Ford-Volkswagen. Este projeto é considerado como o grande impulsionador de desenvolvimento do setor automóvel em Portugal que permitiu a evolução do setor em termos de internacionalização, inovação, desenvolvimento e aplicação de I&D. Nesta fase, o volume de negócios e as exportações aumentaram exponencialmente.

Atualmente, o setor da indústria automóvel é sobretudo constituído por empresas multinacionais, cuja produção é destinada ao mercado externo, com uma mão-de-obra a um custo relativamente baixo face aos concorrentes. No entanto, existem ainda debilidades na indústria automóvel em Portugal, nomeadamente no setor de componentes automóveis. Verifica-se que este é composto por um elevado número de empresas familiares e PME com baixa produtividade e fraca capacidade de investimento em I&D, custos elevados de alguns fatores de produção (energia), dificuldades burocráticas na internacionalização dos produtos, a necessidade de maior qualificação dos recursos humanos em áreas especializadas, e dificuldades de financiamento de novos projetos.

Face às debilidades existentes no setor e à forte concorrência de fábricas instaladas em países da Europa de Leste, Norte de África e Ásia, ou seja, a ameaça de perda de competitividade e de quota no fornecimento das grandes fábricas exige a necessidade de uma reestruturação do setor no sentido de o tornar mais tecnológico, internacionalizado e competitivo [3].

## 2.4 O peso do setor automóvel na economia portuguesa

De acordo com dados do INE (2018), referidos por Santos [3], o setor da indústria automóvel representa atualmente cerca de 0,7% do PIB português, 0,7% do total de emprego e 11,1% do total das exportações nacionais de mercadorias.

No gráfico (Figura 2-4) pode-se verificar que, na série dos 7 anos em análise, as remunerações representaram, em média, cerca de 60,5% do valor acrescentado gerado no setor automóvel, valores igualmente superiores aos registados para a média da indústria transformadora e para a média nacional. Em 2016, cerca de 63% do valor acrescentado gerado nesta indústria destinava-se a remunerar os trabalhadores do setor [3].

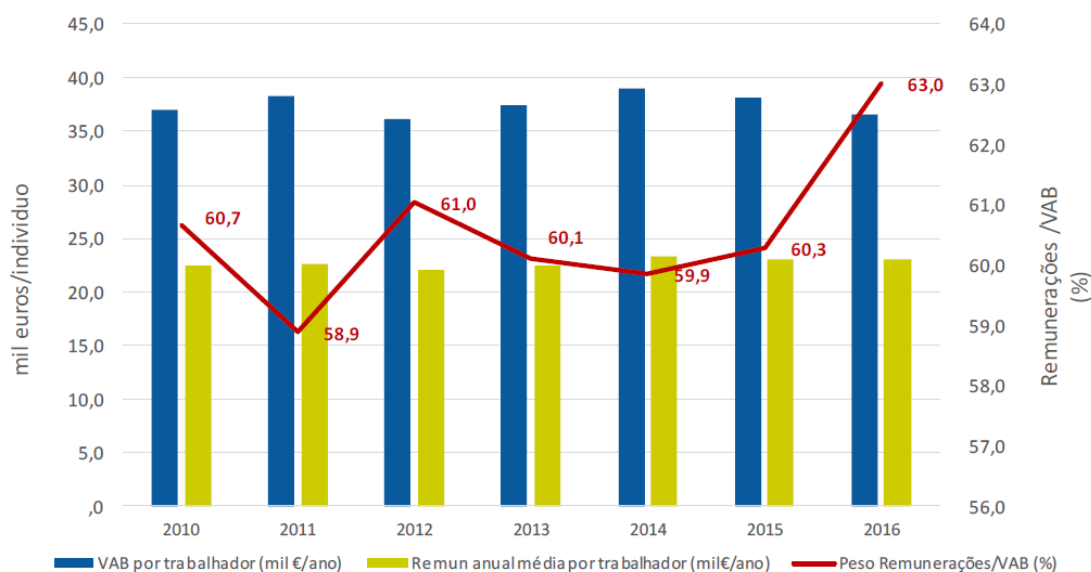


Figura 2-4 - Remunerações anuais médias e VAB por trabalhador, ramo fabricação de veículos automóveis, reboques, semirreboques e componentes para veículos automóveis- 2010 a 2016 (Fonte: Contas Nacionais Anuais Definitivas, INE) [3].

## 2.5 As empresas do setor automóvel em Portugal

A indústria automóvel pertence à Indústria transformadora, e é composta por três grandes áreas de atividade:

- Fabricação de automóveis,
- Fabricação de carroçarias e reboques;
- Fabricação de componentes e acessórios para automóveis.

As empresas da atividade de fabrico de componentes constituem-se como a atividade mais significativa da indústria automóvel.

Segundo Santos [3], em 2017, esta atividade representava 72% do total de empresas do setor, 66% do total de volume de negócios e 73% do VAB. São também estas as empresas que mais contribuem para o emprego do setor, com maior número de pessoas ao serviço (76%) (Figura 2-5) [3, 4].

CAE	Atividade	Empresas (N.º)	Pessoal ao Serviço (N.º)	Volume de Negócios (M €)	VAB (M €)
291	Fabricação de veículos automóveis	34	6 433	2 672	311
292	Fabricação de carroçarias, reboques e semi-reboques	169	2 516	231	56
293	Fabricação de componentes e acessórios para veículos automóveis	532	28 122	5 655	982
<b>Total Indústria Automóvel</b>		<b>735</b>	<b>37 071</b>	<b>8 558</b>	<b>1 349</b>

Figura 2-5 - Principais Indicadores das Empresas da Indústria Automóvel – 2017 (Fonte: INE) [3, 4].

Relativamente à localização geográfica, as empresas da indústria automóvel concentram-se principalmente na Região Norte (cerca de 47%) e geram 50,3% do total do VAB. Destaca-se, ainda, na Região Norte, a Área Metropolitana do Porto (28% do total de empresas), mais especificamente, o concelho de Vila Nova de Gaia (7,7%) (Figura 2-6) [3, 4].

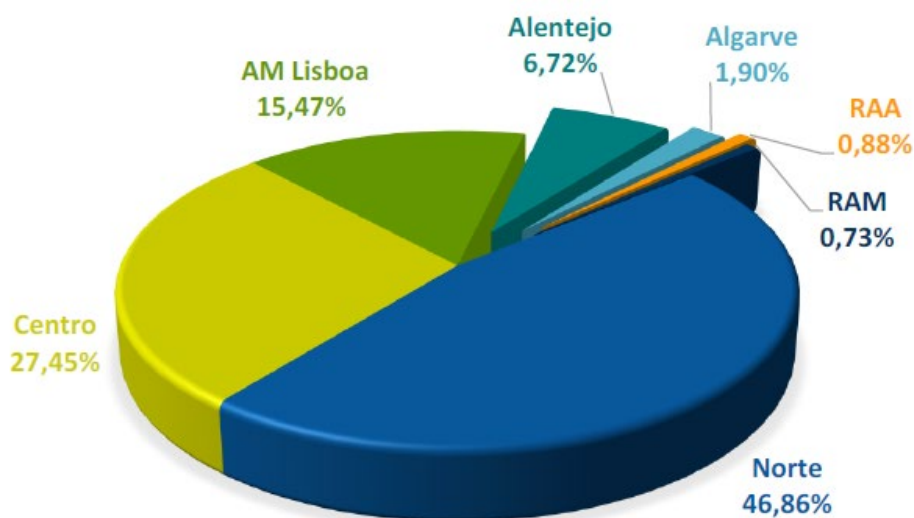


Figura 2-6 - Localização geográfica (NUTS II) das empresas da indústria automóvel em Portugal – 2016 (Fonte: INE) [3, 4].

## 2.6 A produção de veículos automóveis

De acordo com os dados do INE [4], referidos por Santos [3], existem atualmente 34 empresas com atividade principal de fabrico de veículos automóveis, nas quais se engloba a produção, montagem e transformação de automóveis ligeiros e pesados de passageiros, de transporte de mercadorias, de veículos especiais e de tratores rodoviários.

Quando se refere a atividade produção de automóveis em Portugal, considera-se normalmente a produção das 5 fábricas construtoras de veículos: a Volkswagen AutoEuropa, em Palmela; a Mitsubishi Fuso Trucks, no Tramagal; a PSA Peugeot Citroen, em Mangualde; a Toyota Caetano, em Ovar; e a Caetano Bus, em Gaia [3, 5].

Segundo a ACAP - Associação Automóvel de Portugal [6], em 2017, produziram-se 175.544 veículos (+ 22,7% face ao ano anterior), dos quais, cerca de 60%, pela AutoEuropa.

Em Portugal, a maioria dos veículos produzidos são ligeiros, sobretudo de passageiros (72% da produção total de veículos). Ainda de acordo com a mesma fonte, em 2017, 95,9% do total da produção nacional de veículos automóveis destinou-se a exportação e a produção nacional de veículos ligeiros de passageiros destinada a exportação ascendeu a 99% (Figura 2-7) [3].

Ano	Veículos Ligeiros		Veículos Pesados	Total Geral
	Ligeiros de Passageiros	Comerciais Ligeiros	Pesados Mercadorias	
2015	115 468	37 134	4 024	156 626
2016	99 200	39 712	4 184	143 096
2017	126 426	42 816	6 302	175 544

Figura 2-7 - Produção de veículos automóveis em Portugal (Fonte: ACAP) [3, 6].

## 2.7 A produção de componentes automóveis

Segundo os dados do INE [4], referidos por Santos [3], entre 2008 e 2017, o número de empresas com atividade de fabrico de componentes e acessórios para veículos automóveis baixou cerca de 4%. No entanto, o VAB do subsetor cresceu cerca de 45% no referido período. Este subsetor tem atualmente cerca de 76% do total de número de pessoas ao serviço na indústria automóvel, 66% do total do volume de negócios e 73% do total do VAB.

Quanto à natureza jurídica destas empresas, verifica-se que em 2016, 52% eram empresas individuais e as restantes 48%, sociedades, sendo principalmente PME (94%), localizadas na sua maioria na Região Norte, mais especificamente na A.M. Porto. O rácio negativo entre constituições e dissoluções, apresentado em 2016, foi invertido em 2017, tendo neste ano sido criadas 14 empresas e dissolvidas 4 (Figura 2-8).

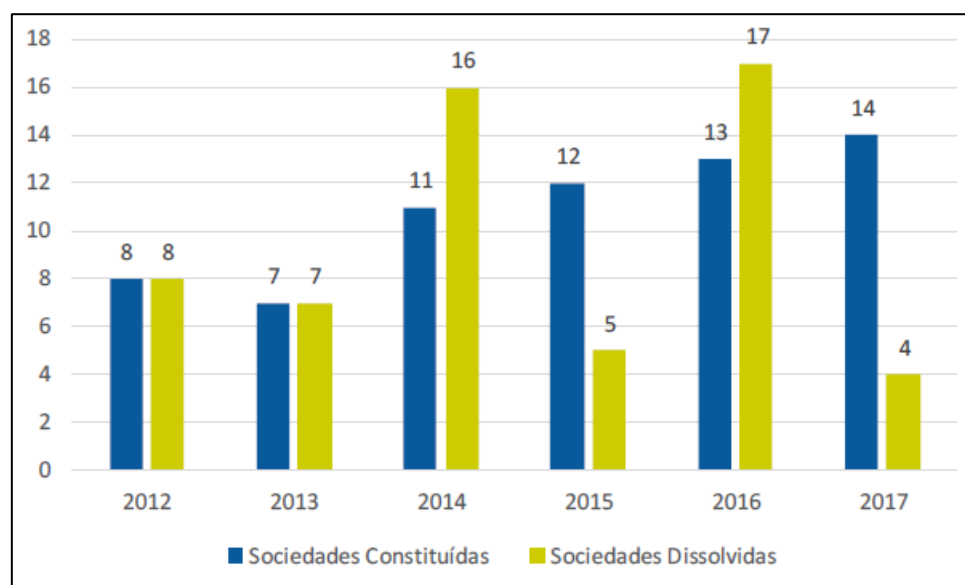


Figura 2-8 – Sociedades constituídas e sociedades dissolvidas de empresas de fabrico de componentes automóveis (Fonte: INE) [3, 4].

Em Portugal, para além das fábricas produtoras de veículos automóveis existem centenas de fábricas fabricantes de componentes para automóveis, sendo as mais importantes a Continental, Delphi, Faurecia, Renault Cacia e Bosch [5].

## 2.8 Comparativo internacional das empresas do setor

No ranking mundial, no período entre 2008 e 2015, verifica-se que os principais países produtores do setor automóvel não alteraram praticamente a sua posição, sendo que no último ano, os EUA, o Japão, a Alemanha, a Coreia do Sul e o México lideram as posições do Top 5 ao nível da produção das empresas do setor.

Assinalavelmente, Portugal manteve a sua posição (18ª) e viu crescer o valor da produção (18,88%) (Figura 2-9) [3].

País	Produção					
	2008		2015		Taxa de Variação 2008-2015 (%)	Variação no Ranking 2008-2015
	Valor (M €)	Rank	Valor (M €)	Rank		
USA	287 503,80	3	611 318,49	1	112,63	-2
JPN	357 470,22	1	389 034,59	2	8,83	1
DEU	305 590,00	2	383 546,00	3	25,51	1
KOR	73 641,20	4	150 522,75	4	104,40	0
MEX	60 597,71	6	136 938,48	5	125,98	-1
PRT	6 345,83	18	7 544,20	18	18,88	0

Figura 2-9 - Top 5 da Produção Mundial das Empresas da Indústria Automóvel - 2008 e 2015 [3].

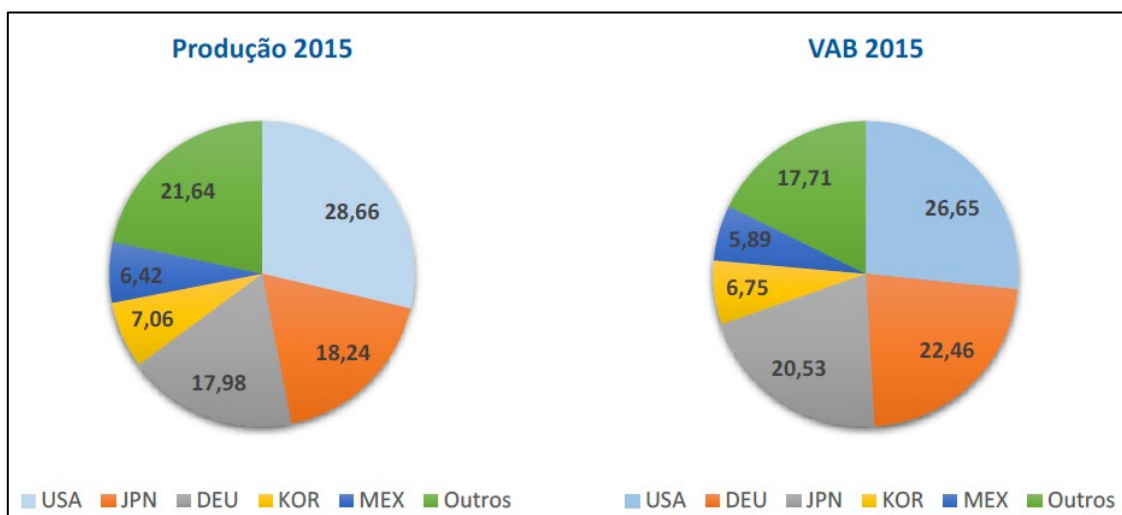


Figura 2-10 - Peso (%) dos países com maior Produção e VAB das Empresas da Indústria Automóvel em 2015 [3].

Os 5 países com maior produção e VAB da indústria automóvel representam 78,4% e 82,3%, respetivamente, face ao total das duas variáveis económicas (Produção e VAB 2015) nos 30 países analisados, em 2015: EUA, Japão, Alemanha, Coreia do Sul e México (Figura 2-10) [3].

## 2.9 A qualidade na indústria automóvel e as principais ferramentas

Os requisitos, Qualidade, Segurança e Proteção Ambiental são termos que há muito tempo fazem parte do contexto da indústria automóvel. O setor automóvel foi pioneiro na aplicação de normas de qualidade, continuando a manter uma posição muito destacada no seu compromisso com a melhoria contínua, assim como todas as empresas deste setor automóvel são objeto da certificação. A certificação é um processo de avaliação da conformidade, realizado por entidades reconhecidas (acreditadas), que tem como objetivo demonstrar que um dado sistema de gestão, produto, processo ou serviço, cumpre com os requisitos que lhe são aplicáveis, contribuindo esta para a melhoria da sua competitividade das empresas.

As ferramentas da qualidade formam as bases para a implementação e manutenção de qualquer Sistema de Gestão da Qualidade e resultam do contributo dos principais fabricantes da indústria automóvel. Atualmente, a maioria dos fabricantes e fornecedores da indústria automóvel exige o uso de uma ou mais destas ferramentas. São usadas durante as fases de desenvolvimento de produto e processo, na introdução de novos produtos, assim como durante o processo de melhoria ou análise de falha do produto, e alterações de engenharia. Estas ferramentas podem ser usadas simultaneamente, assim como existe uma interdependência entre elas.

As ferramentas básicas de Qualidade são definidas como cinco técnicas complementares e / ou métodos que suportam as expectativas da IATF 16949.

As tradicionais cinco ferramentas são seguidamente listadas segundo a ordem de uso ao projetar produtos ou processos [7]:

- Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (*APQP - Advanced Product Quality Planning and Control Plan*);
- Análise de modo e efeitos de falha (*FMEA - Failure Mode and Effects Analysis*);
- Análise de Sistemas de Medição (*MAS - Measurement Systems Analysis*);
- Controle Estatístico de Processo (*SPC - Statistical Process Control*);
- Processo de Aprovação de Peça do Produto (*PPAP - Production Part Approval Process*).

### 2.9.1 APQP (Planeamento avançado da qualidade do produto)

O APQP apoia a intenção de melhoria contínua da IATF 16949 e envolve as restantes Ferramentas de Qualidade, envolvidas na prevenção e controle de produtos e processos. O APQP é um processo que permite ao fabricante (fornecedor) demonstrar que é capaz de projetar e fabricar um produto de acordo com os requisitos do Cliente. Os principais objetivos do APQP são a comunicação eficaz, conclusão oportuna das tarefas, redução de problemas de qualidade e minimização de riscos relacionados à qualidade durante o lançamento do produto. As etapas do APQP são: pré-planeamento ou input, planeamento e definição, *design* e desenvolvimento do

produto, *design* e desenvolvimento do processo, validação do produto e do processo e, finalmente, avaliação do feedback e ações corretivas [7, 8].

### 2.9.2 FMEA ( Modo de falha e análise de efeitos )

Esta ferramenta consiste num método para identificação e priorização de diferentes modos de falha e efeitos resultantes. O risco representa uma relação entre os modos de falha, seus efeitos potenciais e causas de falha. O FMEA provou ser uma valiosa ferramenta de avaliação do risco no processo desenvolvimento e de produção, e atualmente é apresentado sob diferentes variantes, nomeadamente: DFMEA (FMEA de *design*) e PFMEA (FMEA de Processo) de projeto e processo. Os principais termos da FMEA são [9]:

- Severidade (S) - refere-se à gravidade das possíveis consequências de um determinado modo de falha;
- Ocorrência (O) - refere-se à probabilidade de ocorrer um determinado modo de falha;
- Detecção (D) - refere-se à facilidade em identificar o modo de falha.

Com base em S, O e D, a organização determina o número de prioridade de risco (RPN) para cada modo de falha e define as prioridades para reduzir os riscos.

### 2.9.3 MSA ( Análise dos sistemas de medição )

O MSA é um método que avalia a precisão de um sistema de medição e permite compreender como a variação da medição contribui para a variação geral do processo. A sigla é formada a partir do nome em inglês da ferramenta: *Measurement System Analysis*, que significa análise do sistema de medição. Para fazer essa avaliação, recorre-se a um conjunto de técnicas experimentais, a partir das quais são aplicados cálculos matemáticos que determinam a variação existente num processo de medição. Este recurso é bastante usado na metodologia *Lean Six Sigma*, que procura reduzir os desperdícios e o desvio padrão em processos industriais e organizacionais em geral.

Resumidamente, o MSA é um conjunto de análises estatísticas e métodos de avaliação da variabilidade no processo de medição. É usado para determinar a viabilidade de uma metodologia de avaliação ou medição para uso numa característica de peça específica do processo. O MSA analisa parâmetros distintos, tais como: linearidade, estabilidade repetibilidade e reprodutibilidade. As diretrizes para aceitação são "Erro percentual de tolerância" e "Erro percentual de variação" [10].

### 2.9.4 SPC ( Controlo estatístico do processo )

O SPC é um conjunto de métodos estatísticos avançados que são aplicados no controlo da qualidade, sendo usado para monitorizar e controlar os processos de fabrico. O SPC é aplicável a qualquer processo em que o "output" possa ser medido, e o seu principal

objetivo é reduzir os produtos não-conforme com o mínimo de desperdício. As principais ferramentas do SPC são as cartas de controlo [11].

### 2.9.5 Método 8D - Análise e resolução de problemas (“*Eight Disciplines*”)

Na década de setenta o método 8D era usado na indústria militar americana segundo a norma MIL-STD 1520. Esta ferramenta de análise e resolução de problemas era designada em inglês por: “*Corrective Action and Disposition System for Nonconforming Material*”. O método 8D foi posteriormente adaptado e desenvolvido pela Ford Motor Company e estruturado em 1987 num manual conhecido por TOPS (*Team Oriented Problem Solving*) para a resolução de problemas em equipa. Esta metodologia popularizou-se rapidamente por toda a indústria automóvel e não só, sendo este método atualmente designado por Global 8D (G8D).

O método 8D está orientado para o tratamento de não conformidades, em particular as que são detetadas já no cliente. Numa primeira fase procuram-se soluções imediatas para conter "dentro de portas" e evitar/impedir a produção e expedição de produtos não conformes. Este método permite ainda uma análise sistematizada e estruturada com detalhe das causas das não conformidades e a seleção e implementação de ações corretivas eficazes, também aplicáveis a produtos ou processos similares.

A metodologia 8D é uma técnica fundamental para a melhoria contínua que é exigida pela grande maioria dos construtores automóveis, assim como é cada vez mais generalizada a quase todos os setores industriais e até de serviços, quer para não conformidades detetadas externamente, mas também para as principais não conformidades detetadas antes da expedição de produtos, ou prestação do serviço ao cliente.

Segundo o manual *Global 8D* concebido em 1996 pela FORD [12], a metodologia para a resolução de problemas consiste em oito passos que têm como objetivo a identificação, correção e eliminação das “não-conformidades”, procurando a causa raiz das suas origens. Define também ações corretivas imediatas, de forma a eliminar o problema no momento, e as ações corretivas para que tal problema não volte a reincidir. É ainda avaliado o impacto ao nível de custos, tempo, efeito no cliente e na organização.

A metodologia 8D divide-se em oito passos ou disciplinas, a saber [12]:

- **D1 – Formar uma equipa:** O primeiro passo é constituir uma equipa de pessoas com conhecimento, tempo, autoridade e capacidades para resolver o problema, e implementar ações corretivas. O grupo deverá escolher um líder;
- **D2 – Descrever o problema:** Nesta passo, o objetivo é descrever o problema de forma detalhada, isto é, compreender o problema sob diversos aspetos – o quê, quando e onde ocorre, e a sua relação direta com o problema detetado. Sempre que possível deve ser quantificado em relação à sua frequência;

- **D3 - Implementar ações corretivas:** Neste passo deverão ser definidas e implementadas ações imediatas de contenção de forma a proteger o cliente do problema até as ações permanentes serem implementadas;
- **D4 – Definir a causa raiz e análise de impacto:** Neste passo devem ser identificadas as potenciais causas que podem explicar a origem do problema ocorrido. As potenciais causas devem ser testadas/validadas com a descrição do problema e os dados recolhidos para depois se escolher a ação ou as ações para eliminar a causa raiz. As ferramentas da qualidade recomendadas para este passo são: diagrama de Ishikawa, 5 Porquês, Brainstorming;
- **D5 – Escolher e verificar as ações corretivas:** Implementar a ação ou as ações corretivas e verificar se estas eliminam o problema através da eliminação da causa raiz, e se não provocam efeitos colaterais indesejados. Se necessário deve proceder-se à definição de novas soluções;
- **D6 – Implementar ou validar permanentemente as ações corretivas:** Neste passo define-se e implementam-se as ações corretivas permanentes que deverão ser monitorizadas para garantir a eliminação da causa raiz;
- **D7 – Prevenir a recorrência após resolução do problema:** Pretende-se que este e problemas similares não voltem a ocorrer. A prevenção da recorrência deverá ser feita através da alteração de especificações, formação e revisão do procedimento de trabalho, melhoria das práticas e procedimentos de trabalho. Deve-se também verificar se as ações corretivas se mantêm com o tempo e se continuam eficazes;
- **D8 – Felicitar a equipa:** Os esforços coletivos da equipa na resolução do problema devem ser reconhecidos e felicitados. A congratulação tem como objetivo manter a equipa motivada no futuro.

Os conhecimentos e aprendizagens adquiridas devem ser partilhados com toda a organização.

#### 2.9.6 PPAP ( Processo de Aprovação de Peças de Produção )

A ferramenta, PPAP, é um processo de demonstração de que o produto produzido responde aos requisitos para o qual foi concebido e que o respetivo processo de produção pode fornecer de modo consistente tais produtos. O resultado do PPAP é um conjunto de documentos designado por “*PPAP package*” que tem de ser aprovado pelo fornecedor e pelo cliente para demonstrar que os requisitos do cliente são compreendidos, o produto atende aos requisitos e o processo de produção é capaz de fornecer produto em conformidade.

Para fornecedores da indústria automotiva, o processo de PPAP é atualmente regido pelo manual do PPAP publicado pelo *Automotive Industry Action Group* (AIAG).

O PPAP é implantado em cinco níveis com base no risco, a saber [13]:

- Os níveis 1 e 2, são os níveis de risco mais baixos e são reservados para projetos simples e fornecedores / fabricantes mais importantes;

- O nível 3 é o nível padrão, que requer que todos os elementos aplicáveis sejam fornecidos;
- O nível 4 é o nível de seleção personalizado, usado quando mudanças específicas exigem um exame mais detalhado;
- O nível 5 é reservado para as peças e fornecedores de maior risco. Quando o nível 5 é indicado, é necessária uma colaboração adicional entre fornecedor e cliente. Este nível geralmente resulta na visita do cliente durante o desenvolvimento da ferramenta principal e, possivelmente, durante a primeira execução da produção.

### 2.9.7 A norma EN ISO 9001 - Certificação ISO 9001 - Gestão da Qualidade

A norma EN ISO 9001 tem como objetivo e campo de aplicação especificar requisitos para um sistema de gestão da qualidade quando uma organização:

- Necessita demonstrar a sua aptidão para fornecer produtos e serviços que satisfaçam tanto os requisitos do cliente como as exigências estatutárias e regulamentares aplicáveis;
- Visa aumentar a satisfação do cliente através da aplicação eficaz do sistema.

A norma internacional ISO 9001 é aplicável a organizações de qualquer dimensão, que queiram sistematizar a gestão e obter uma rentabilidade e eficácia máximas.

Na revisão em 2015, foram reduzidos os requisitos que poderiam ser considerados como "burocráticos" e é potencializado ainda mais o foco na gestão eficaz, na análise do contexto onde as empresas desenvolvem as suas atividades e a consideração dos riscos associados. Nesta revisão adotou-se uma estrutura de ciclo de melhoria, que poderá ser utilizada por todos os modelos de gestão, assim como facilitar a integração de, entre outros, aspetos como os ambientais, de segurança e saúde no trabalho, e de responsabilidade social.

O resultado da utilização e da conformidade com a ISO 9001 são tempos de produção mais curtos, fiabilidade elevada de entrega e serviços e produtos consistentemente de elevada qualidade, beneficiando os seus clientes e a sua empresa [14, 15].

### 2.9.8 IATF (The International Automotive Task Force)

A IATF (*International Automotive Task Force*) é um grupo de fabricantes de veículos automóveis que tem como objetivo principal fornecer produtos de melhor qualidade para os clientes da indústria automóvel em todo o mundo. Para atingir o objetivo principal a IATF propõe-se a [7]:

- Desenvolver um acordo sobre os principais requisitos do sistema internacional de qualidade, principalmente para os fornecedores diretos de materiais de produção das empresas participantes, produtos, peças e serviços de acabamento (p.e.: tratamento térmico, pintura e revestimento);

- Desenvolver políticas e procedimentos para o registo de terceiros na IATF de forma a garantir a consistência em todo o mundo;
- Fornecer formação adequada sobre os requisitos do referencial da IATF. Estabelecer ligações formais com as entidades competentes para apoiar os objetivos da IATF.

### 2.9.9 Certificação IATF 16949:2016 - SGQ da Indústria Automóvel

Em outubro de 2016, a norma ISO/TS 16949 foi substituída pela IATF 16949:2016 (*International Automotive Task Force*).

A adoção da norma IATF 16949 demonstra um nível superior dedicado à excelência da qualidade para clientes e organizações da indústria automóvel.

Este novo referencial está alinhado com os princípios da norma ISO 9001:2015, respeitando a sua estrutura e requisitos, e incorpora os mais recentes padrões da indústria automóvel da Europa e dos Estados Unidos.

Uma organização da indústria automóvel que procure a certificação IATF 16949 também deve cumprir com a norma ISO 9001:2015 em termos de abrangência, estrutura e requisitos.

O objetivo desta norma é garantir que os componentes, peças e sistemas de segurança do automóvel cumprem os requisitos especificados pelos clientes, bem como a regulamentação aplicável. As principais vantagens da implementação e posterior certificação de acordo com este referencial desta norma são [7, 14, 16]:

- A satisfação de pré-requisitos para fornecimento de produtos e/ou serviços aos fabricantes de automóveis;
- A concretização de vantagens competitivas efetivas para as organizações que pretendam estabelecer relações duradouras com os fabricantes de automóveis ou seus fornecedores;
- A implementação sistemática, integrada e coerente de ferramentas e procedimentos orientados para as especificidades do setor automóvel.

### 2.9.10 Os requisitos competitividade com maior expressão na indústria automóvel

Num mercado competitivo e global, as organizações procuram a diferenciação com o objetivo de conquistar novos clientes e mercados.

Atualmente, os fabricantes da indústria automóvel em geral tendem a seguir os requisitos com maior expressividade no mercado, nomeadamente: maior segurança, mais conforto, redução do consumo de matérias primas e se possível a preços baixos. Estes requisitos induzem novos desafios na construção automóvel, a saber:

- O aumento do conforto e da segurança: mais conforto e mais segurança, o que significa normalmente mais materiais e mais equipamentos;

- A redução de consumo em termos de materiais: traduz-se em substanciais reduções de peso sem prejuízo das especificações de conforto e segurança. Por exemplo, materiais com menores densidades como o alumínio, magnésio ou compósitos poliméricos e aços de elevada resistência.

Existem ainda outras estratégias para conquistar e agradar os consumidores, tais como: reduzir o tempo de chegada do produto ao mercado "*speed to market*", procurar novas opções estéticas e reduzir custos em todas as fases do processo, especialmente nas fases que antecedem e incluem o fabrico do automóvel: conceção, desenvolvimento e produção. Por outro lado, as disposições legislativas em termos de segurança têm-se tornado um desafio que normalmente as marcas ultrapassam no propósito de conquistar mercado.

Relativamente à legislação ambiental, duas componentes intrinsecamente interligadas têm sido um real desafio para os fabricantes de automóveis: a redução do consumo e das emissões, estando associado a estas, a redução de peso. No caso da legislação relativa à reciclagem que tem impacto na seleção dos materiais, verifica-se que o empenho dos fabricantes não é tão evidente porque normalmente não implica a redução de custos [17].

#### 2.9.11 Requisitos e certificação de um Sistema de Gestão de IDI

As economias mais avançadas são aquelas em que as organizações têm maior capacidade de Inovação. A organização deve estabelecer, documentar, implementar e manter um sistema de gestão da investigação, desenvolvimento e inovação (SGIDI) e melhorar continuamente a sua eficácia, de acordo com os requisitos estabelecidos nesta Norma. Para tal, a organização deve:

- Determinar o modo como irá cumprir os requisitos;
- Definir o âmbito das atividades de investigação, desenvolvimento e inovação;
- Documentar, de forma regular e atualizada, as atividades associadas ao Sistema de Gestão de IDI, independentemente da forma organizativa existente.

Um Sistema de gestão da IDI é uma parte do sistema geral de gestão que inclui a estrutura organizativa, a planificação das atividades, as responsabilidades, as práticas, os procedimentos, os processos e os recursos para desenvolver, implementar, rever e atualizar a política de IDI da organização [18].

Uma empresa que tenha a necessidade de criar e desenvolver novos produtos deve integrar no seu sistema de gestão da qualidade um Sistema de Gestão de IDI certificado. O organismo certificador, através da realização de uma auditoria, demonstra que a organização implementou e mantém um Sistema de Gestão de Investigação, Desenvolvimento e Inovação com a finalidade de melhorar o seu desempenho inovador, dando cumprimento à política e objetivos por si determinados e estando conforme com os requisitos estabelecidos na norma NP 4457:2007. As vantagens da certificação do Sistema de Gestão de IDI, de acordo com a NP 4457:2007,

são fundamentalmente os que decorrem da sua implementação, otimizados pela confiança trazida pelo processo de certificação ao sistema e pela possibilidade de demonstrar essa confiança a terceiros [14, 15].

A Norma Portuguesa 4457, publicada pelo Instituto Português da Qualidade define os requisitos de um sistema eficaz de gestão de IDI, sendo aplicável a qualquer organização. O conceito de Inovação subjacente a esta norma é o mais abrangente possível, incluindo novos produtos, serviços, processos, métodos de marketing ou organizacionais.

O sistema de gestão da IDI de acordo com a NP 4457 é a forma ideal para as organizações canalizarem todo o seu conhecimento e toda a sua criatividade, concretizando-os em Inovação.

A norma NP 4457:2007 é compatível com outros sistemas de gestão, como sejam a ISO 9001, OHSAS 18001, ISO 14001, ISO 22001, ISO 27001, entre outras [14, 19, 20].

### 2.9.12 Manual de Oslo

A primeira edição do Manual de Oslo sobre a inovação tecnológica foi editada em 1990 pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE). Este manual tem o objetivo de orientar e padronizar conceitos, metodologias e construção de estatísticas e indicadores de pesquisa de P&D de países industrializados.

Segundo o manual de Oslo (OCDE, 2005), nem tudo o que é lançado no mercado é necessariamente uma inovação. O Manual distingue quatro tipos de inovação: Produto, Processo, Marketing e Organizacional.

Segundo o manual, para haver inovação de produto é necessária a introdução de melhorias significativas nas características do produto ou serviço, como por exemplo melhorias nas especificações técnicas, componentes e materiais, alterando as características funcionais do produto. Os principais benefícios da implementação e posterior certificação de acordo com este referencial são:

- Sistematizar as suas atividades de IDI para aproveitar o “saber fazer” interno;
- Estabelecer objetivos e metas que contribuam para o controlo de recursos associados às atividades;
- Planear, organizar e monitorizar as unidades de IDI;
- Melhorar a sua imagem organizacional e competitividade perante outras organizações do setor no âmbito nacional e internacional;
- Acompanhar o desenvolvimento tecnológico de forma a antecipar o mercado e identificar oportunidades de melhoria;
- Integrar a gestão de IDI com outros sistemas de gestão implementados na organização;

- Estabelecer a interação da IDI com outros departamentos e divisões da organização;
- Obter tecnologia patenteada que permita a sua posterior licença para venda;
- Demonstrar à administração pública e a todos os organismos que avaliam projetos de IDI para possível financiamento, a transparência desta atividade na organização;
- Monitorizar, identificar oportunidades de melhoria e implementar ações corretivas, de acordo com os resultados obtidos nas suas atividades de investigação, desenvolvimento e inovação.

Em 2018 foi lançada a quarta edição do Manual de Oslo, atualizando alguns de seus conceitos [14, 21].

### 2.9.13 Design e desenvolvimento de produtos e serviços, segundo a ISO 9001:2015

A ISO 9000:2015 define em 3.4.8 “*design* e desenvolvimento” como “um conjunto de processos que transformam requisitos de um objeto em requisitos mais detalhados desse objeto”. O *design* e o desenvolvimento é um processo para definir as características dos produtos e serviços (P&S), assegurando que o seu fornecimento satisfaz as necessidades e expectativas dos clientes, implícitas, explícitas ou mesmo desconhecidas, assim como, contribuem para a melhoria do desempenho organizacional. Um processo de *design* e desenvolvimento procura a determinação prévia dos requisitos aplicáveis e a verificação atempada da sua conformidade, diminuindo a probabilidade de ocorrência de problemas em fases posteriores.

A edição portuguesa da norma ISO 9000:2015, adota o termo “*design*” em vez de “conceção”, considerando este conceito global e mais abrangente, permitindo estabelecer uma base comum para P&S e tendo em conta os aspetos técnicos relativos ao desempenho, ou seja, adequação ao uso, bem como os aspetos comerciais, estéticos, afetivos, entre outros.

Segundo a norma, não se deve confundir a “investigação e desenvolvimento” (I&D/D&D) com o “*design* e desenvolvimento”, uma vez que o primeiro conceito não é, em toda a sua extensão, um requisito desta norma. Uma organização pode ter atividades de “*design* e desenvolvimento” sem que tenha um departamento ou processos de “I&D”. De seguida, indicam-se as principais etapas do processo de *design* e desenvolvimento, a saber que são detalhadas nesta norma (Figura 2-11) [15, 22]:

- Planeamento do *design* e desenvolvimento;
- Entradas para o *design* e desenvolvimento;
- Controlos do *design* e desenvolvimento;
- Saídas do *design* e desenvolvimento;
- Alterações ao *design* e desenvolvimento.



Figura 2-11 - Processo de *design* e desenvolvimento [15].

## 2.10 Projeto na indústria automóvel

Segundo Pereira [23], a prevenção dos problemas durante a produção de um produto passa em larga medida pelo controlo que for efetuado ao nível da conceção, de forma a eliminar nesta fase eventuais insuficiências ou defeitos que mais tarde se revelariam. Refere ainda, que os defeitos de produto em mais de 50% dos casos têm origem na fase de conceção e que cerca de 75% do custo de lançamento de um produto é consumido na fase de conceção, o que implica obrigatoriamente o controlo da conceção do produto.

### 2.10.1 Projeto de IDI versus Projeto de um produto novo

Um projeto de IDI é um processo único que consiste num conjunto de atividades coordenadas e controladas com datas de início e fim, levadas a cabo para atingir um objetivo de acordo com requisitos específicos, os quais incluem os compromissos de prazos, custos e recursos.

Um projeto de IDI visa criar ou valorizar conhecimento com o objetivo de alcançar inovações de produto, de processo, de marketing ou organizacionais [14].

Segundo Completo [24], projeto pode ser definido de uma forma geral como um conjunto de atividades que tem um ponto inicial e um estado final definidos, com metas estabelecidas e um conjunto de recursos limitados. Especificamente, um projeto de produto tem como objetivo um produto definível, ou seja, que está especificado em termos de custo, qualidade e prazo que resulta das atividades do projeto.

Outro aspeto importante de um projeto é a sua singularidade, dado que existe sempre algum fator diferente, mesmo quando esse projeto é repetido. Em qualquer projeto está sempre associada a noção de incerteza, dado que ao planeamento está associado um conjunto de riscos normalmente relacionados com o custo, a qualidade e o prazo.

Apesar de toda a preparação e monitorização de um projeto, os recursos para a sua execução alteram-se durante o seu ciclo de vida, pelo que se exige uma estrutura organizacional capaz de antecipar e solucionar as dificuldades que possam colocar em causa os objetivos inicialmente definidos para o projeto. No âmbito do projeto existem diferentes tipologias:

- Projetos radicais - implicam significativas modificações relativamente aos produtos ou conceitos existentes (p.e.: podem requerer um processo de produção inovador);

- Projetos de próxima geração - normalmente implicam alterações significativas no projeto do produto, sem a introdução de novas tecnologias ou materiais;
- Projetos derivados - compreendem projetos que criam produtos que são derivados, híbridos ou com pequenas alterações relativamente aos produtos existentes.

Na fase inicial de um projeto devem ser definidas as principais soluções construtivas e as principais especificações do produto: definição dos materiais, tecnologia, processos de fabricação e principais soluções construtivas. Estas podem ser objeto de definição através de um caderno de encargos, desenvolvido numa fase de planeamento ou anteprojecto [24].

O segredo de um bom projeto consiste em garantir que as incertezas sejam minimizadas. O processo de projeto de um produto novo está, normalmente, associado a um nível de incerteza e riscos que estão diretamente ligados à sua complexidade técnica, assim como, às competências humanas e técnicas disponíveis para a sua concretização. As atividades básicas de um projeto de um produto seguem um ciclo iterativo do tipo: planear, conceber, construir, testar, otimizar e produzir.

Este ciclo iterativo poderá ser repetido várias vezes em algumas das suas fases, até que o produto corresponda aos objetivos funcionais e de custo. Este processo iterativo exige a manipulação e gestão de informação de um conjunto de atividades que visam os seguintes objetivos [24]:

- Identificar o estado da concorrência em produtos idênticos;
- Antecipar as ações da concorrência na definição do novo produto;
- Respeitar as políticas regulamentares e normativas associadas ao produto a projetar;
- Identificar os diferentes requisitos técnicos que o produto deve assegurar em termos funcionais, requisitos legais e requisitos de homologação;
- Analisar as restrições tecnológicas associadas ao seu processo de desenvolvimento ou produção;
- Alcançar as especificações técnicas, para que seja possível fabricar com os processos produtivos disponíveis e capacidades dos fornecedores;
- Respeitar a multiplicidade de requisitos a serem atendidos, considerando todas as fases do ciclo de vida do órgão mecânico e seus clientes.

Normalmente, as principais fases e atividades de um projeto de um novo produto, desenvolvem-se em 6 fases [24]:

- **Planeamento:** Designa-se por fase 0, porque se desenvolve antes da aprovação do arranque do projeto de desenvolvimento. Deve definir o mercado alvo, os objetivos financeiros, as limitações e oportunidades;

- **Desenvolvimento do conceito:** São desenvolvidas e avaliadas alternativas de conceito de produto e um ou mais são selecionados. Descrição das vantagens e inconvenientes dos conceitos e comparação com a concorrência (*Benchmarking*);
- **Definição arquitetura:** Definição da arquitetura principal e principais subsistemas. O esquema de montagem final é desenvolvido nesta fase.
- **Projeto detalhado:** Completa a definição em termos geométricos, materiais e tolerâncias. Define o que é comprado ou fabricado. Define as fichas de técnicas para fabricação. Procede à definição das ferramentas e equipamento para produção;
- **Teste e afinação:** Construção e ensaios de diferentes versões de pré-produção (protótipos fabricados segundo a especificações de série, mas ainda não produzidas nos meios industriais. As amostras iniciais são já fabricadas com os equipamentos de produção);
- **Arranque de pré-série:** Formação da força de trabalho e puxar pelos fornecedores, ao mesmo tempo que identifica falhas e corrige o processo produtivo.

### 2.10.2 Normalização da gestão de projetos

O *Project Management Institute* (PMI), instituto que reúne e discute as melhores práticas de gestão de projetos, desenvolveu um guia das melhores práticas em gestão de Projetos, que é o *Project Management Book of Knowledge* (PMBOK).

O objetivo do *PMBOK Guide* é a identificação do subconjunto do corpo de conhecimentos da gestão de projetos que é conhecido geralmente como “boa prática”.

Cada organização ou equipa de gestão de projetos deve decidir quais das atividades, metodologias, ferramentas e técnicas expressas no *PMBOK Guide* devem ser aplicadas, para que o projeto tenha sucesso. De acordo este guia, um projeto é: “*Um empreendimento temporário com o objetivo de criar um produto ou serviço único*”. Temporário significa que cada projeto tem um início e um fim bem definidos. Único significa que o produto ou serviço produzido é de alguma forma diferente de todos os outros produtos ou serviços semelhantes.

O *PMBOK Guide* descreve a natureza dos processos da gestão de projetos, sendo estes divididos em 5 grupos, definidos como os Grupos Processos da Gestão de Projetos:

- Grupo de processos de iniciação – define e autoriza o projeto, ou a fase do projeto;
- Grupo de processos de planeamento – define e refina objetivos e planeia o curso da ação necessário para alcançar os objetivos e o âmbito para que o projeto foi iniciado;

- Grupo de processos de execução – integra pessoas e outros recursos, para levar a cabo o plano de gestão do projeto;
- Grupo de processos de monitorização e controlo – mede e monitoriza regularmente o progresso, para identificar desvios em relação ao plano de gestão do projeto, de forma que possam ser tomadas as ações corretivas necessárias para satisfazer os objetivos do projeto;
- Grupo de processos de encerramento – integra os processos para concluir formalmente todas as atividades de um projeto ou de uma fase do projeto, entregar um produto ou serviço concluído a terceiros, ou encerrar um projeto cancelado (nesta fase são elaborados os documentos de lições aprendidas, que servirão de base para futuros projetos).

O PMBOK *Guide* organiza os processos de gestão de projetos que integram os 5 grupos de processos referidos anteriormente, em nove áreas de conhecimento, a saber: gestão do âmbito, gestão do custo, gestão do prazo, gestão da qualidade, gestão dos recursos humanos, gestão da comunicação, gestão do risco, gestão das aquisições, gestão da integração do projeto [22, 25].

## 2.11 Sistemas e modularização na indústria automóvel

O conceito de módulo é frequentemente utilizado e existem vários exemplos da presença de módulos no nosso dia a dia, tais como: os eletrodomésticos, os computadores e os móveis das cozinhas dos nossos apartamentos. Algumas soluções modulares estão já presentes na indústria automóvel, embora não seja possível prever a sua evolução no futuro. Resumidamente, são definidos os seguintes conceitos [17]:

- Sistema: é uma função que está fisicamente distribuída ao longo do veículo. (p.e.: segurança e iluminação);
- Módulo: é uma unidade fisicamente distinta que contém componentes de diversos sistemas (p.e.: *cockpit*, assentos).

Seguidamente serão apresentadas as funções, partes, materiais e tecnologias mais comuns utilizados nos módulos do produto automóvel.

### 2.11.1 Funções do interior do automóvel e a sua modularização

O interior de um automóvel está associado a um conjunto de funções motivadas por três grandes grupos de requisitos, nomeadamente [17]:

- Primeiro grupo de requisitos - diz respeito as funções impostas por disposições legais (segurança, saúde, ambiente);
- Segundo grupo de requisitos - diz respeito à satisfação das necessidades do consumidor (estética, conforto, variabilidade);

- Terceiro grupo de requisitos – é relativo a requisitos de fabrico e funcionamento (dimensões, resistência de materiais, arquitetura de produto).

Algumas funções são críticas porque condicionam o seu funcionamento e algumas destas estão limitadas pela legislação, nomeadamente as relacionadas com a segurança. Outras funções são apenas requisitos desejáveis, mas fundamentais na venda do produto. Da diversidade de funções dos interiores dos automóveis, apresentam-se as classificadas como básicas, por serem fundamentais para a definição do conceito de interior, nomeadamente: isolamento do exterior, posição de transporte, segurança, conforto e estética.

Atualmente, existe na indústria automóvel uma clara tendência para a crescente modularização, identificando-se seguidamente os principais módulos [17]:

- Painel porta;
- *Cockpit*/painel de instrumentos;
- Assentos;
- Pilares;
- Teto;
- Chão;
- Chapeleira.

A evolução dos módulos está condicionada ao projeto global, não só do interior, mas de todo o automóvel, assim como está dependente de vários constrangimentos, tais como a segurança, ergonomia, funcionalidade.

No projeto de qualquer produto, os requisitos funcionais críticos devem ser atendidos para que o módulo funcione, tais como: a transparência ótica das janelas; a resistência ao impacto do para-choques; a resiliência da espuma dos assentos.

Para além dos requisitos críticos funcionais que se encontram associados a aspetos técnicos como a resistência mecânica, definem-se cada vez mais os requisitos desejáveis ou adicionais, que procuram ir de encontro das expectativas dos utilizadores e desta forma explorar novas necessidades de mercado.

Seguidamente é feita uma breve caracterização de um dos módulos do interior do automóvel (assentos), identificando-se os seus principais componentes, funções, materiais e tecnologias de fabrico mais utilizadas na sua produção.

**Módulo – Assentos:** Os assentos são provavelmente os módulos mais visíveis do interior do veículo. Foi dos primeiros a autonomizar-se como módulo, dado que é fácil de conceber e normalmente é construído fora das instalações da montagem final.

Ao assento são atribuídas funções específicas relacionadas com ergonomia e segurança, mas também funções gerais aplicáveis aos outros módulos. A seguir descreve-se algumas dessas funções [17]:

- Posição de condução e/ou transporte: acesso aos instrumentos de condução e controlo do veículo;

- Conforto: atenuação de vibrações, regulação da posição, inclinação e altura, resiliência e dureza das espumas, textura das capas, condução térmica das capas, climatização;
- Segurança: resistência da estrutura em conjunto com a fixação a plataforma, funcionamento em conjunto com o cinto de segurança e airbags, absorção de energia de impactos pelas espumas e apoio de cabeça;
- Estética: combinação visual com o conjunto do interior; dimensão e forma compatível com o espaço interior (grau de enchimento das espumas, costuras nas capas);
- Flexibilidade de posições e movimentos: sistema de fixação do assento, movimentos possíveis.

Os assentos tipo são constituídos e construídos por partes (Figura 2-12).



1 – Estrutura da base; 2 – Carril deslizante; 3 – Perfil de montagem; 4 – Suporte fixação do cinto; 5 – Suspensão de arame mola da base; 6 – Mecanismo de reclinção; 7 – Estrutura do encosto; 8 – Suspensão do encosto; 9 – Hastes de regulação em altura do apoio de cabeça; 10 – Costa do encosto; 11 – Espuma do encosto; 12 – Espuma da almofada.

Figura 2-12 – Vista explodida das partes de um assento tipo (adaptado de [26]).

### 2.11.2 Seleção de materiais e considerações de projeto para a indústria automóvel

A seleção de materiais é uma fase de extrema importância no projeto de um produto. Geralmente, é exigido um conjunto de propriedades, eventualmente contraditórias entre si, sendo necessário selecionar, entre os muitos materiais possíveis, as que melhor correspondem aos requisitos do produto. Neste ponto é analisado um método para selecionar materiais na fase de projeto. Normalmente, a seleção de materiais é realizada valorizando os seguintes aspetos [17]:

- Projeto mecânico;
- Custo;
- Forma, textura, toque, cor e decoração do produto.

O projeto de um componente equivale ao seu desempenho, o que é função de:

- Necessidades funcionais;
- Geometria;
- Propriedades do material de que é constituído.

Um projeto de sucesso está normalmente associado a um processo de otimização. O projeto ótimo é aquele que faz a seleção do material, respeitando as necessidades funcionais e maximizando o desempenho, sendo a otimização sujeita a constrangimentos, nomeadamente os impostos pelas propriedades do material.

Segundo Ashby [27], o processo de conceção de um produto apresenta várias fases e começa geralmente com uma necessidade transmitida pelo mercado, a saber:

- **Conceito:** consideração de todas as opiniões; determinação da estrutura de funções; avaliação da viabilidade do sistema técnico;
- **Desenvolvimento:** modelação e análise dos conjuntos de componentes; otimização da função; aproximação da escala;
- **Detalhe:** análise detalhada de componentes; seleção do processo de produção; especificações/desenhos técnicos detalhados.

Na fase de conceito considera-se um maior conjunto de materiais que na fase de desenvolvimento e, nesta, um número de materiais superior ao da fase de detalhe. Nesta fase, deve-se procurar o conjunto de materiais que maximize o desempenho do componente, devendo-se ter em consideração os constrangimentos impostos (não negociáveis), como por exemplo, a temperatura a suportar por um determinado componente. A seleção de materiais nas fases posteriores é realizada procurando combinar as propriedades com vista a maximizar o desempenho do componente. No projeto é importante não avaliar isoladamente as propriedades dos materiais, mas sim avaliar as combinações ou agrupamentos de propriedades.

Uma forma de chegar à escolha ótima do material consiste no cálculo dos índices de desempenho. São denominados índices de desempenho os agrupamentos das

propriedades dos materiais que, quando maximizados, permitem obter uma combinação otimizada dessas propriedades.

A determinação de materiais que satisfaçam os constrangimentos e que maximizem o desempenho do componente pode ser feita com o auxílio de gráficos de seleção de materiais, tais como os fornecidos por Ashby, conforme ilustrado na Figura 2-13 [27].

Este e outros gráficos de seleção de materiais encontram-se disponíveis na literatura e permitem observar o comportamento de vários materiais relativamente a algumas das propriedades relevantes para o produto.

Resumidamente, verifica-se que o projetista procura através do processo de seleção, não um material em si, mas uma combinação específica ou um perfil de propriedades. As propriedades importantes a considerar para a seleção de um material, e a incluir em índices de desempenho, dependem do produto que se pretende produzir [17, 27].

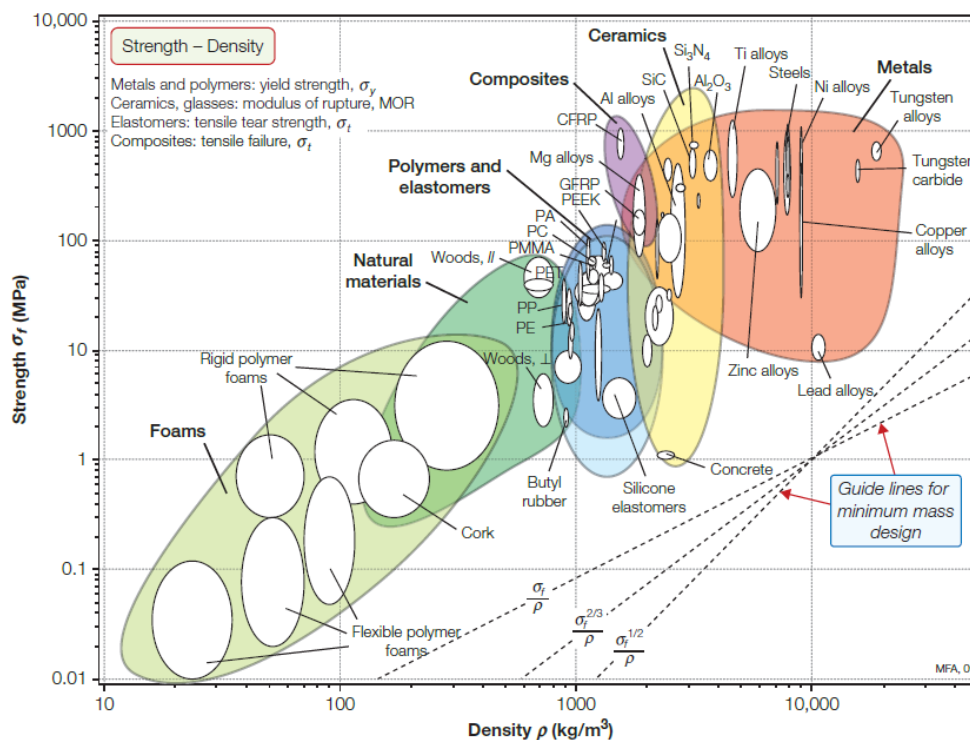


Figura 2-13 – Gráfico da resistência em função de massa específica para vários materiais [27].

## 2.12 Regulamentação aplicada à indústria automóvel

A indústria automóvel também está sujeita a imposições legais que teoricamente causam constrangimentos, mas que poderão ser transformados em novas oportunidades para os fabricantes. Seguidamente, apresenta-se uma breve caracterização de oportunidades e constrangimentos induzidos pela regulamentação, baseada sobretudo nos requisitos legais que os componentes e materiais do interior

dos automóveis estão sujeitos. Na legislação atualmente em vigor podem-se identificar duas grandes áreas: a segurança e o ambiente.

A matéria regulamentar na área da segurança está diretamente relacionada com a homologação de veículos, através da prescrição de uma série de requisitos, testes e ensaios que os módulos que compõem o interior dos automóveis estão sujeitos.

Na regulamentação ao nível das preocupações com o ambiente, destaca-se a reciclagem de materiais e as emissões de gases poluentes decorrentes da combustão (que se repercutem nas propriedades dos materiais, nomeadamente, na massa volúmica) [17].

Seguidamente, estes dois temas serão apresentados de forma sistematizada.

### 2.12.1 Regulamentação na área da segurança

Desde há várias décadas que a área da segurança de veículos automóveis é uma área regulamentar bem consolidada na indústria automóvel, dado que sempre existiu uma preocupação em garantir a segurança dos ocupantes.

A homologação sujeita o veículo automóvel a uma série de requisitos, testes e ensaios que estes devem satisfazer de modo a poderem ser comercializados e a circular em no espaço geográfico abrangido pela regulamentação.

As diretivas da União Europeia convergem na Diretiva 70/156/CEE do Conselho, de 6 de fevereiro de 1970, relativa a aproximação das legislações dos Estados-Membros respeitantes à receção dos veículos a motor e seus reboques. Esta diretiva tem vindo a sofrer alterações no seu texto, ao longo dos anos, e a ser complementada por uma série de outras à medida que os requisitos com a segurança evoluem. Concretamente, ao nível dos interiores automóveis, a Diretiva 74/60/CEE do Conselho, de 17 de dezembro de 1973, relativa à aproximação das legislações dos Estados-Membros respeitantes ao arranjo interior dos veículos a motor, constitui o documento base, tendo como suporte uma família de diretivas mais específicas (bancos, cintos de segurança, portas). Entretanto, esta diretiva foi alterada pela Diretiva 2000/4/CE de 28 de Fevereiro de 2000.

Os regulamentos da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) possuem uma estrutura similar às diretivas europeias e os textos regulamentares também são, em muitos casos, semelhantes, fruto de um esforço conjunto no sentido de harmonizar a regulamentação. No caso dos requisitos definidos para os interiores do automóvel foram identificados e classificados do seguinte modo [17, 28-30]:

- Requisitos relacionais - são os que se prendem com as relações entre módulos e/ou componentes; por exemplo, o bancos da frente tem como requisitos possuir apoio de cabeça;
- Requisitos dimensionais - são aqueles que definem ou delimitam as dimensões de módulos e/ou componentes; como exemplo, a altura do apoio de cabeça;

- Requisitos relacionados com a resistência mecânica - são os maioritariamente relacionados com testes e ensaios e que aferem as propriedades de módulos e/ou componentes; e disso exemplo, o ensaio de resistência dos assentos.

### 2.12.2 Regulamentação na área do Ambiente

A regulamentação na área do ambiente é mais recente que a regulamentação da segurança. No início, esta regulamentação era mais dedicada às emissões de poluentes atmosféricos provenientes da combustão, no entanto, a sua abrangência tem vindo a alargar-se a matérias como a reciclagem dos veículos.

Na União Europeia as preocupações com o ambiente, sobretudo com os impactos decorrentes do ciclo de vida de produtos e serviços tem-se refletido em diversas diretivas no sentido do estabelecimento da responsabilidade dos fabricantes.

Na área dos veículos automóveis (e dos seus interiores) destacam-se requisitos de reciclagem e da eliminação de metais pesados da sua constituição.

Os requisitos encontrados relativos ao ambiente foram, classificados nas seguintes classes [17]:

- Requisitos de substâncias / materiais - são requisitos que obrigam ou proíbem determinadas substâncias ou materiais; é disso exemplo, a proibição de metais pesados;
- Requisitos de reciclabilidade - são aqueles que definem objetivos para as taxas de reciclabilidade dos veículos e que se repercutem nos materiais e componentes;
- Requisitos de peso dos materiais - são requisitos indiretos que resultam da necessidade de tornar os veículos mais leves, com vista a uma diminuição das emissões provenientes da combustão.

### 2.12.3 Diferenciação entre Diretivas CE, Regulamentos UNECE

Os regulamentos de veículos são requisitos que os automóveis devem atender para serem aprovados para venda ou uso num determinado país ou região em particular. Eles geralmente são determinados por legislação e administrados por um órgão do governo. Os regulamentos dizem respeito a aspetos como iluminação, controlo, resistência ao choque, proteção do meio ambiente e proteção contra roubo. No entanto, estes regulamentos apresentam-se de forma diferenciada pelo que seguidamente se identificam as diferenças.

### 2.12.4 Diretivas CE

As Diretivas CE dirigem-se aos Estados-Membros, tendo como principal objetivo a aproximação das legislações. A diretiva liga os Estados-Membros no que respeita ao resultado a atingir, mas permite-lhes escolher a forma e os meios que privilegiarão para alcançar as metas comunitárias, no âmbito dos respetivos ordenamentos jurídicos

internos. As Diretivas para entrarem em vigor tem que ser publicadas no Jornal Oficial das Comunidades Europeias. Depois da sua publicação, cada Estado-membro tem um prazo para introduzir os requisitos da respetiva diretiva na legislação Nacional.

Após a publicação da legislação (em Portugal no Diário da República), considera-se a Diretiva transposta para a legislação Nacional. A partir do momento da sua entrada em vigor, todos os fabricantes de veículos têm de cumprir com os novos requisitos implementados, de acordo com o prazo estabelecido pela diretiva [28].

#### 2.12.5 Regulamentos UNECE

Relativamente aos regulamentos UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*), verifica-se que contrariamente às diretivas que se dirigem apenas aos Estados-Membros, estes dirigem-se para além da Comunidade Europeia, estendendo-se aos países que aderiram ao Acordo de 1958 da UNECE, como por exemplo Croácia, Ucrânia, Suíça, Turquia, Japão, Federação Russa, África do Sul.

Existem regulamentos equivalentes à maioria das Diretivas CE. Esta equivalência poderá ser vista na tabela 20 do anexo IV da diretiva 70/156/CEE.

A origem dos regulamentos parte da experiência de um grupo de trabalho composto por comissões específicas formadas por especialistas, designado por WP29 (*"World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations"*). O objetivo do WP29 é iniciar ações apontadas para a Harmonização Mundial de Regulamentos Técnicos para os veículos [28, 31].

#### 2.12.6 Regulamentos CE

Os regulamentos, sendo um ato geral e obrigatório ao contrário das diretivas, não necessitam de ser transpostos para a legislação nacional, sendo de aplicação direta nos Estados-membros. Existem muito poucos regulamentos CE em comparação com os regulamentos da UNECE.

#### 2.12.7 Diferença entre Diretivas da UE, Regulamentos da ONU e Regulamentos técnicos globais da ONU (GTRs da ONU)

Na Comissão Europeia em Bruxelas, os Estados-Membros da União Europeia (UE) iniciam e elaboram diretivas da UE. Essas diretivas são adotadas por maioria qualificada num processo de codecisão pelo Conselho da UE e pelo Parlamento Europeu (PE). As diretivas da UE são vinculativas, ou seja, são aplicáveis obrigatoriamente por todos os Estados-Membros da UE.

No âmbito da UNECE, em Genebra, o WP.29 e seus órgãos subsidiários desenvolvem os Regulamentos do Acordo de 1958, em cooperação com todas as Partes Contratantes (países membros) do Acordo e organizações não-governamentais (ONGs). Os regulamentos da ONU não são aplicáveis de forma obrigatória, mas se uma Parte Contratante (PC) decidir aplicar um regulamento da ONU, a adoção torna-se um

ato vinculativo. Uma PC que adotou um regulamento nos termos do Acordo de 1958 pode conceder homologações nos termos desse regulamento e é obrigada a aceitar a homologação de qualquer outra PC que adotou o mesmo regulamento.

O Fórum Mundial de Harmonização dos Regulamentos de Veículos e a Comissão Europeia (WP.29) estão atualmente a trabalhar na harmonização entre os Regulamentos da ONU e as Diretivas da UE. Atualmente, algumas das diretivas da UE são tecnicamente equivalentes aos regulamentos da ONU ou apenas se referem aos requisitos do correspondente regulamento da ONU.

Os Regulamentos técnicos globais (GTRs) da ONU são os regulamentos técnicos estabelecidos no Acordo de 1998 e não se referem a um procedimento de aprovação ou certificação de tipo, conforme mencionado nas Diretivas da UE ou nos Regulamentos da ONU. O Regulamento da ONU é considerado candidato à elaboração de GTRs da ONU [31].

## 2.13 Ergonomia na indústria automóvel

Segundo Happian-Smith [32], na indústria automóvel era prática comum a ergonomia entrar apenas no final do processo de *design* automotivo, assim como, têm sido usados dados antropométricos que não correspondem às reais necessidade de conforto dos ocupantes das viaturas. No entanto, uma série de fatores têm contribuído para melhorar esta situação dramática ao longo dos últimos anos. Atualmente, a maioria dos fabricantes estão a produzir veículos automóveis bem projetados e seguros, sendo a ergonomia considerada uma das áreas mais importantes na competitividade da indústria automóvel. O *design* centrado no utilizador está a aumentar em todas as áreas do *design* automóvel, verificando-se que o comprador está cada vez mais consciente das questões sobre a ergonomia do produto e muito mais seletiva sobre os produtos que compram.

Até há bem pouco tempo, alguns dos principais fabricantes da indústria automóvel ainda não tinham os seus próprios técnicos de ergonomia, mas atualmente quase todos empregam profissionais desta área, verificando-se que ergonomia está presente no projeto.

### 2.13.1 Definição de ergonomia

De acordo com a IEA - Associação Internacional de Ergonomia, a ergonomia define-se como a disciplina científica que se preocupa com o entendimento das interações entre seres humanos e outros elementos de um sistema, e a profissão que aplica teoria, princípios, dados e métodos ao *design*, a fim de otimizar o bem-estar humano e o desempenho geral do sistema. A ergonomia ajuda a harmonizar as coisas que interagem com as pessoas em termos de necessidades, habilidades e limitações das pessoas [33].

Segundo Bhise [34], a ergonomia é uma ciência multidisciplinar que envolve várias áreas de informação sobre as pessoas (por exemplo, psicologia, antropometria, biomecânica, anatomia, fisiologia e psicofísica).

O objetivo básico da ergonomia é projetar equipamentos que se adequem o melhor possível aos utilizadores (condutores e passageiros) e ao equipamento (veículo) de modo a permitir melhorar a segurança dos utilizadores, o conforto, o desempenho e eficiência (produtividade) do produto.

### 2.13.2 Ergonomia no projeto do veículo

Segundo Bhise [34], o projeto de um veículo automóvel envolve a integração de várias disciplinas (*designers*, engenheiros de carroçarias, engenheiros de chassis, engenheiros de sistemas de propulsão, engenheiros de processos, gestores de produtos, pesquisadores de mercado, engenheiros de ergonomia e engenheiros eletrotécnicos). As atividades de *design* são impulsionadas pela coordenação complexa e consideração simultânea de muitos requisitos (do cliente, funcionais de engenharia, comerciais, regulamentares, governamentais, de fabricação) e soluções de compromisso entre os requisitos de diferentes sistemas no veículo.

A ergonomia envolve que o equipamento deve ser projetado de forma que as pessoas se possam acomodar confortavelmente/naturalmente dentro do equipamento e usar o equipamento sem nenhuma postura corporal inadequada.

A ergonomia é geralmente "projetar para a maioria", isto é, para assegurar que a maioria de utilizadores dentro da população pretendida dos utilizadores do produto possam caber dentro do produto. Resumidamente, o processo de conceção de um veículo deve, assim, envolver as considerações dos principais componentes do projeto, que são os seguintes:

- Condutor/utilizador (características, capacidades e limitações);
- Veículo (tipo/tamanho, estilo de corpo, espaço, sistemas, subsistemas e componentes);
- Ambiente (estrada, tráfego, clima, dia/anoitecer/noite).

### 2.13.3 Normas, diretrizes e recomendações de ergonomia para promover a acomodação dos ocupantes de veículos automóveis

Há uma ampla gama de normas, diretrizes e recomendações disponíveis em muitas áreas de ergonomia que são pertinentes ao design automóvel. Esta informação é extremamente útil sobretudo nas fases iniciais da conceção e projeto porque estão facilmente disponíveis.

A *Society of Automotive Engineers* (SAE), nos EUA, atualmente designada por *SAE International*, tem sido particularmente ativa na criação dessas normas, e muitas delas fazem parte da legislação que abrange o *design* automóvel. As normas mais relevantes

para a ergonomia quando se considera a envolvente dos ocupantes são: SAE J826, SAE J1100, SAE J1517, SAE J941, SAE J1052 e SAE J287.

Estas e outras normas associadas formam a base para o estudo do ocupante na indústria automóvel em todo o mundo e podem ser encontradas no Manual SAE (1996) [32]. As normas internacionais ajudam na definição de parâmetros, componentes e atributos do veículo. Existem normas que podem ser usadas e alteradas para atender às necessidades e requisitos específicos do engenheiro e existem requisitos legais que não podem ser alterados e devem ser seguidos pelo engenheiro. As normas SAE representam a maior coleção de normas definidas para o desenvolvimento de veículos. O engenheiro da conceção do veículo deve estar familiarizado com as principais normas que representam o conjunto básico das normas SAE. Seguidamente faz-se uma breve descrição de algumas dessas normas:

- J1100 - define regras comuns sobre como determinar as dimensões do veículo;
- J826 - descreve duas representações do ser humano dentro do veículo;
- J1516 e J1517 - posicionam o ser humano dentro do veículo;
- J941 - mostra a definição da zona ocular (a posição teórica dos olhos do condutor), (ISO 4513/BS AU 176);
- J1052 - define uma zona de exclusão para as cabeças dos ocupantes;
- J287 - permite determinar o alcance das mãos dos condutores às zonas dos controlos (ISO 4040/BS AU 199).

#### 2.13.4 Generalidades sobre antropometria no veículo automóvel

Segundo Happian-Smith [32], a antropometria pode ser definida como a medida das dimensões do corpo humano e pode ser dividida em antropometria estática e dinâmica. A antropometria estática preocupa-se com a medição do ser humano em posições rígidas e padronizadas onde o movimento corporal não é uma variável. Por outro lado, a antropometria dinâmica preocupa-se com a medição do ser humano no trabalho ou em movimento. Dados antropométricos dinâmicos podem ser usados para estabelecer locais de controlo usando “envelopes” de alcance para as mãos e pés e locais de apoios de cabeça, cintos de segurança e airbags, usando dados referentes aos arcos descritos por várias partes do corpo em condições de colisão. A biomecânica é a medição do alcance, força, resistência, velocidade e precisão dos movimentos humanos e esses dados também são usados no *design* de controlos para estabelecer trajetórias satisfatórias de movimento de controlo e forças operacionais. Dados antropométricos e biomecânicos são geralmente especificados em termos de percentis. A população é dividida em 100 categorias percentuais, classificadas do menor para o maior, em relação a um determinado tipo específico de medida corporal.

Os dados antropométricos e biomecânicos são extremamente úteis para o *designer* nas fases iniciais da conceção do veículo. No entanto, é muito importante que, qualquer novo projeto ou modificação seja estudado usando modelos e protótipos. A

estatística pode indicar e fornecer dados o alcance do ser humano, mas não informa como o *design*, a localização, a direção, e o alcance de vários controles, podem afetar o desempenho, o conforto e a segurança da condução.

#### 2.13.5 Definição dos pontos H e R

O ponto “H” é o centro de articulação da linha de centro do tronco com a linha de centro das pernas na posição sentado. Este ponto também é definido como o centro de rotação das pernas com o tronco, utilizando-se um manequim com o posicionamento das pernas na condição de condutor do veículo. O ponto “R” é conhecido como ponto H nominal. Este é delimitado por uma área onde se localizam diversos pontos H de diversos manequins. Esta área é delimitada em função dos cursos de ajuste longitudinal e vertical do banco. O ponto H nominal é definido para um manequim tridimensional SAE 95 percentil. Os pontos “H” e “R” são referências no desenvolvimento do projeto de um veículo. O posicionamento de diversos componentes e subsistemas no veículo utilizam o ponto H e R como pontos de referência. Por exemplo, os pontos de ancoragem dos cintos de segurança são projetados com base à referência do ponto H de cada passageiro. As definições dos pontos H e R podem ser consultadas com detalhe nas normas SAE e regulamentos da UNECE, nomeadamente o regulamento ECE – R14 [35-38].

#### 2.14 Homologação de veículo, sistemas e componentes na Comunidade Europeia

Na Europa, existem dois sistemas de aprovação de veículos. Um deles é baseado em diretivas e regulamentos da CE para a aprovação de veículos inteiros, sistemas de veículos e componentes separados. O outro é baseado em torno de Regulamentos da ONU e prevê a aprovação de sistemas de veículos e componentes separados, mas não veículos inteiros. A diretiva 2007/46/CE estabelece um quadro para a homologação dos veículos a motor e seus reboques, e dos sistemas, componentes e unidades técnicas destinados a serem utilizados nesses veículos. O sistema de aprovação europeu baseia-se no conceito de homologação e, de forma simples, esse processo fornece um mecanismo para garantir que os veículos atendam aos padrões ambientais e de segurança relevantes. Como não é prático testar todos os veículos fabricados, um veículo de produção é testado como sendo representativo do modelo. por um organismo de aprovação (p.e.: VCA no Reino Unido, UTAC em França). Uma inspeção bem sucedida resultará na emissão de um certificado de homologação até que uma norma seja atualizada ou que o *design* do veículo seja alterado. A conformidade da produção é parte integrante do processo de aprovação e envolve a avaliação dos processos de fabricação para garantir que cada produto seja fabricado de acordo com a especificação aprovada. Se um sistema formal de qualidade estiver em vigor, como ISO 9001 ou ISO / TS 16949, o nível de inspeção de poderá ser reduzido [38, 39].

## 2.15 Homologação de bancos para veículos das categorias M1 e N1

Os veículos das categorias M1 e N1 são definidos de acordo com as diretivas 70/156/CEE e 2007/46/CE:

- Categoria M1: veículos a motor concebidos e construídos para o transporte de passageiros com oito lugares sentados no máximo, além do lugar do condutor e com, pelo menos, quatro rodas;
- Categoria N1: veículos a motor concebidos e construídos para o transporte de mercadorias com massa máxima não superior a 3,5 t e com, pelo menos, quatro rodas.

Para obter a aprovação de um veículo, o veículo inteiro como um todo deve atender a uma série de diretivas da UE e requisitos de teste. Existem quatro diretivas europeias (regulamentos) que tratam de assentos de veículos, conforme especificado de seguida:

- ECE R 14 (Diretiva 76/115/EEC - *Seat Belt Anchorage*): Disposições uniformes relativas a homologação de veículos no que se refere a fixação dos cintos de segurança [40, 41];
- ECE R 16 (Diretiva 77/541/EEC - *Seat Belts & Restraint Systems*): Disposições uniformes relativas a homologação de cintos de segurança e sistemas de retenção para crianças para pessoas em veículos a motor [42, 43];
- ECE R 17 (Diretiva 74/408/EEC - *Seat Strength & Head Restraints*): Disposições uniformes relativas a homologação de veículos no que se refere as fixações dos bancos e aos apoios de cabeça [44, 45];
- ECE R 21 (Diretiva 74/60/EEC - *Interior Fittings*): Regulamento uniforme para a homologação de veículos no que respeita a acessórios interiores [29, 46].

As diretivas têm regras sobre como o teste deve ser realizado em relação ao ponto H. Seguidamente, é apresentada uma breve descrição dos principais testes que são executados em cada regulamento/diretiva.



(a) Ensaio com piso de alumínio igual ao do veículo.

(b) Ensaio com piso rígido.

Figura 2-14 – Testes de tração de resistência estática – ECE R14 (elaboração própria).

Nas imagens da Figura 2-14 estão ilustrados dois testes de tração de resistência estática realizados fora do veículo. De acordo com as diretiva 76/115 / EEC, ECE-R 14, este ensaio consiste em ensaiar a resistência à tração das fixações e dos cintos dos assentos dos veículos. Na Figura 2-14 (a) o ensaio foi realizado num piso igual ao do veículo e na Figura 2-14 (b) o ensaio foi realizado num piso de base rígida.

Na Figura 2-15 está ilustrado um teste de tração de acordo com a diretiva 76/115 / EEC (ECE- R 14), mas realizado no interior do veículo.



Figura 2-15 – Teste de tração de resistência estática (ensaio realizado no interior do veículo) [47].

## 2.16 Método de Elementos Finitos

Na conceção de novos projetos é frequente o projetista ter de decidir sobre o dimensionamento dos componentes, nomeadamente a geometria e que dimensões definir para que estes suportem os diferentes esforços que vão estar solicitados. Durante muito tempo, este tipo de decisões baseava-se muito na intuição e na experiência do projetista (empirismo e experiência heurística).

Atualmente, a existência de ferramentas de análise pelo MEF em ambiente de modelação e montagem, permite muito rapidamente ajustar a forma e as dimensões dos componentes, em função dos estudos efetuados, tendo em conta as propriedades físicas e mecânicas dos componentes ou conjunto objeto de análise.

Num projeto de uma estrutura, por exemplo, os resultados do estudo podem ser visualizados em forma de análise de tensões, deformações e coeficientes de segurança, permitindo tomar decisões mais sustentadas sobre o *design* do componente. Este processo vai permitir apresentar produtos de melhor qualidade e reduzir custos com material, sem comprometer as suas funcionalidades.

Segundo, Campilho [48], um dos passos fundamentais para uma análise de MEF consiste na criação da malha de elementos finitos. No caso de a geometria dos elementos apresentar fronteiras curvas, verifica-se que a malha não preenche toda a

área desses elementos. No entanto, este problema pode ser minimizado conforme ilustrado na Figura 2-16.

Na Figura 2-16 (a), está ilustrada a utilização de uma malha bastante grosseira (41 elementos) de elementos quadrangulares, enquanto na Figura 2-16 (b), se considera o uso uma malha mais refinada (192 elementos). A malha com maior refinamento permite englobar uma porção maior do domínio na discretização de elementos finitos, além de se conseguir uma aproximação mais fiel da fronteira do domínio. É de salientar, que neste cenário, o uso de elementos triangulares permitiria um resultado ainda mais próximo do domínio real.

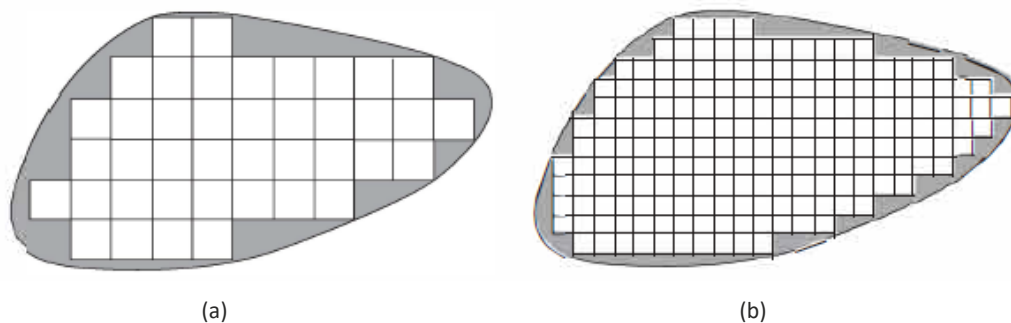


Figura 2-16 – Discretização de elementos finitos [48]

Segundo Azevedo [49], o MEF apresenta atualmente um nível de desenvolvimento que permite a sua utilização pela generalidade dos projetistas de estruturas. No entanto, a tentação para aceitar os resultados provenientes do programa é grande e existe o sério risco de a segurança de uma estrutura ser justificada com base em cálculos completamente desajustados. Este facto tem sido confirmado pelo elevado número de acidentes em estruturas acabadas de construir, bem como pela grande quantidade de reparações que tem sido necessário efetuar em construções recentes. A transmissão aos estudantes de engenharia dos fundamentos do MEF, e também de uma introdução à correspondente programação em computador, constituem certamente fatores que conduzirão os futuros projetistas a uma utilização mais segura do *software* de análise de estruturas.

### 2.16.1 Fundamentos do MEF

Segundo Azevedo [49], a formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume  $V$ ) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume  $V_i$ ).

Esta técnica corresponde ao integral de volume de uma função  $f$ .

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (\text{Eq. 1})$$

Na (Eq. 1) pressupõe-se que

$$V_i = \sum_{i=1}^n V_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Se for possível calcular todos os integrais estendidos aos subdomínios  $V_i$ , basta efetuar o somatório correspondente ao segundo membro de (Eq. 1) para se obter o integral estendido a todo o domínio. Cada subdomínio  $V_i$  corresponde a um elemento finito de geometria simples (p.e.: segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro ou paralelepípedo). O somatório indicado em (Eq. 1) vai dar origem à operação designada montagem, que apresenta muitas semelhanças com a que é efetuada nas estruturas reticuladas. A equação integral (Eq. 1) é proveniente da aplicação do método dos resíduos pesados ou de um princípio variacional. No caso da aplicação do MEF à análise de estruturas a formulação mais intuitiva é a que se baseia no Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV).

Segundo da Silva [50], o MEF não apresenta limite de grau de liberdade no problema a analisar e possibilita a resolução de qualquer tipo de problema. Refere que uma estrutura real é obtida pela combinação de elementos básicos e que, para obter os deslocamentos em qualquer ponto do objeto em estudo, começa-se por assumir uma equação para os deslocamentos nos nós. Refere ainda que na resolução de uma estrutura pelo MEF procura-se obter o valor do deslocamento de cada barra e após a determinação do deslocamento em cada barra, pode-se obter o valor da tensão e da deformação que são constantes ao longo da barra. Assim, é necessário determinar os deslocamentos de cada nó.

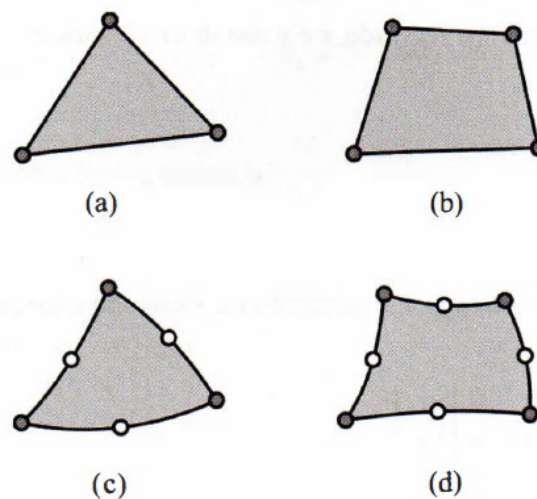


Figura 2-17 – Tipos básicos de elementos bidimensionais [50].

No MEF, para além dos elementos triangulares indicados na Figura 2-17 (a) e (c), é possível aplicar outros tipos de elementos, como por exemplo o elemento quadrático representado na Figura 2-17 (b), assim como os elementos também podem ter nós intermédios no meio dos lados, como representado na Figura 2-17 (c) e na Figura 2-17 (d). Os nós intermédios são considerados adequados para trabalhar com formas curvas.

### 2.16.2 Áreas de aplicação do FEM

Segundo Campilho [48], são múltiplas as aplicações do MEF, assim como estão constantemente a aparecer novas formulações de elementos construídas para resolver problemas específicos.

Seguidamente são apresentadas algumas aplicações nas suas vertentes mais comuns:

- Análises de tensões e térmicas de componentes mecânicos;
- Análise sísmica de barragens, cidades e arranha-céus;
- Análise de “*crash tests*” em carros, comboios ou aviões;
- Análise de dispersão de poluição e contaminantes ou escoamento de ar em condutas;
- Análise eletromagnética de ondas em antenas, transístores e transmissores de aviões;
- Análise de operações cirúrgicas como cirurgia plástica.

Na indústria automóvel, as análises lineares podem ajudar a resolver problemas em áreas distintas, a saber:

- Análise acústica para reduzir o ruído interior;
- Análise de vibrações,
- Melhoria do conforto,
- Otimização da rigidez do chassi,
- Aumento da vida a fadiga dos componentes da suspensão,
- Otimização da aerodinâmica;
- Projeto do motor para que as temperaturas e tensões não excedam os limites admissíveis.

### 2.17 MEF na indústria automóvel

Segundo Bosch [51], as propriedades estáticas, dinâmicas e acústicas dos componentes, de uma carroçaria inteira ou veículo completo podem ser calculadas através do MEF. Este método baseia-se no conceito de que qualquer estrutura complexa é capaz de ser decomposta em elementos estruturais simples (vigas, painéis), cujo comportamento elástico é conhecido e pode ser descrito com facilidade em termos matemáticos. Com auxílio de um modelo matemático, as propriedades elásticas de um corpo real podem ser descritas com precisão suficiente (Figura 2-18).

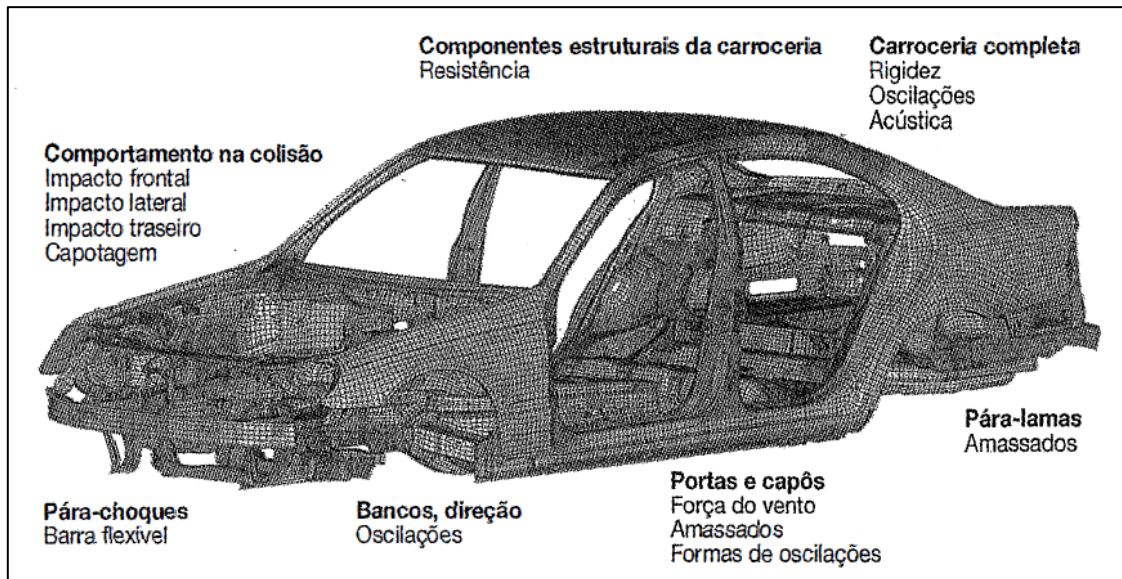


Figura 2-18 – Cálculo estrutural de uma carroçaria [51].

Resumidamente, apresenta-se a seguir as principais vantagens e limitações da utilização do MEF no projeto, consideradas por Bosch [51]:

Vantagens do MEF:

- Permite o cálculo de estruturas de qualquer nível de complexidade;
- Considera as propriedades anisotrópicas e não lineares dos materiais;
- Facilidade para analisar variantes;
- Disponibilidade de sistemas de programas testados e aprovados;
- Qualidade superior dos produtos;
- Redução enorme no tempo de projeto.

Limitações do MEF:

- A precisão dos resultados depende do tipo de elemento e nível de decomposição da estrutura;
- As alterações da espessura de chapas e características do material resultantes de processos de conformação plástica não são consideradas;
- As junções soldadas não podem ser reproduzidas com exatidão.

Para o cálculo pelo MEF existem vários sistemas disponíveis, tais como: Abaqus, ANSYS, Autodesk Simulation, Pam Crash, LS-DYNA, Nastran, SolidWorks, entre outros.

Na Figura 2-19 está representado um sinóptico da análise estrutural com recurso ao MEF.

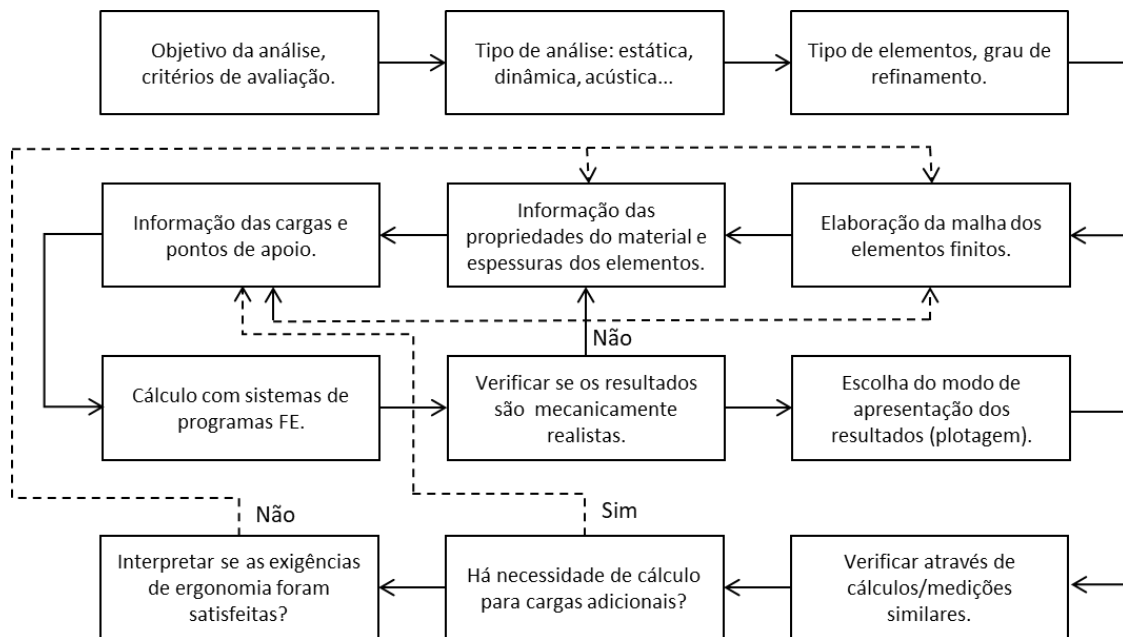


Figura 2-19 – Sinóptico da análise estrutural usando o MEF (adaptado de [51]).

De acordo com o referido por Bosch [51], são seguidamente descritas algumas especificidades relativas ao cálculo e análises pelo MEF aplicado a uma carroçaria de um automóvel.

### 2.17.1 Cálculo da carroçaria completa

Para efetuar o cálculo de uma carroçaria completa, a estrutura é decomposta em elementos com o grau de refinamento adequado ao problema a ser solucionado. Em 2002, era necessário processar aproximadamente 370.000 elementos com mais de 1,9 milhões de incógnitas. Os resultados sob carga estática são fornecidos na forma de deformação, tensões e trabalho de deformação, entre outras [51].

### 2.17.2 Análise da resistência da carroçaria

Para a análise de resistência, as peças individuais e secções da carroçaria sujeitas a sobrecargas especiais (sistemas de fixação ou cargas adicionais) são submetidas a ensaios numéricos detalhados. Os resultados destes ensaios têm como objetivo verificar a resistência do modelo ou reduzir tensões através de alterações no projeto. As cargas definitivas para o cálculo da integridade funcional podem ser determinadas através de cálculos não lineares do veículo como um todo [51].

### 2.17.3 Análise do comportamento dinâmico

As análises dinâmicas são realizadas na carroçaria completa, assim como nos componentes individuais. Estas análises permitem determinar o comportamento do modelo em termos de vibrações (frequências e modos naturais de vibração) e a resposta do sistema a frequências de excitação periódicas ou genericamente dependentes do tempo, possibilitando a identificação de ressonâncias críticas [51] (as

ressonâncias surgem quando a frequência de excitação harmónica é igual à frequência natural).

Para efetuar a análise do conforto na condução e do comportamento acústico no interior do veículo, o modelo da carroçaria é complementado com modelos de MEF do chassi, motor, portas, entre outros, assim como com o modelo de MEF do interior do veículo [51].

#### 2.17.4 Análise do comportamento em colisões

Ensaios de acidentes com veículos, tais como: impacto frontal, lateral e traseiro, capotagem e queda, assim como acidentes de trânsito, são processos dinâmicos, em grande parte não lineares, que não podem ser descritos com o uso de programas de *software* elementos finitos comerciais. Para a simulação numérica deste tipo de casos, foram desenvolvidos programas especiais (p.e.: DYNA3D, PAM-CRASH) que incluem a descrição de deformações plásticas severas e determinam as áreas de contato entre várias partes do veículo que surgem durante o processo de colisão [51].

Na Figura 2-20 estão ilustradas duas imagens relativas a um ensaio de colisão frontal, onde está bem patente a elevada qualidade de simulação do *software* de MEF utilizado (o resultado das deformações sofridas na simulação virtual é muito semelhante ao do teste real).



Figura 2-20 - Simulação de colisão virtual (*software* PAM-CRASH) versus crash test real [52]

#### 2.17.5 Análise dos sistemas de proteção dos ocupantes

No projeto e otimização de sistemas de proteção dos ocupantes, são realizadas com auxílio da simulação computadorizada as seguintes simulações numéricas [51]:

- Projeto e otimização de sistemas de retenção relativamente a impactos frontais e traseiros por meio de simulação de testes de colisão para os casos em que a

interação entre a estrutura e o manequim “*Dummy*” é desprezável. A ferramenta utilizada é o sistema de corpos múltiplos (p.e.: Madymo-3D) combinado com um programa FE (p.e.: LS-DYNA-3D);

- Projeto de componentes de proteção relacionados com impactos laterais em simulações integradas, isto é, simulação completa do veículo com manequim, banco e painéis de revestimento. O cálculo é efetuado com recurso ao programa FE (p.e.: LS-DYNA-3D);
- Projeto e otimização do espaço interior do veículo de acordo com a norma FMVSS. O objetivo desta norma é permitir a proteção do impacto da cabeça para os ocupantes. Por conseguinte, para satisfazer os requisitos, certas partes do interior do veículo têm de ser acolchoadas e não podem ser colocadas peças cortantes ou pontiagudas no interior do veículo dado que um ocupante estaria sujeito a entrar em contacto com estas peças durante um acidente frontal. Esta norma aplica-se aos veículo multiusos de passageiros, camiões e autocarros. O cálculo é efetuado com recurso ao programa FE (p.e.: LS-DYNA-3D).

#### 2.17.6 MEF no projeto da estrutura de um automóvel

Seguidamente, apresenta-se uma síntese de um trabalho de análise de simulação dinâmica relativa à colisão frontal de um veículo automóvel. O objetivo desta apresentação é compreender a importância do MEF no projeto de um automóvel, assim como, as potencialidades dos softwares utilizados.

Para avaliar o *crashworthiness*, do veículo, ou seja, a capacidade da estrutura proteger os seus ocupantes durante um impacto, foram realizadas simulações numéricas com recurso ao método de elementos finitos. Inicialmente, o modelo da carroçaria foi criado no software CATIA e, em seguida, foi necessário proceder à reparação da geometria e da malha do modelo com recurso ao *software* Hyper Mesh, e para simular o teste de colisão frontal, foi usado o *software* LS-DYNA.

Neste estudo [53], é referido que as propriedades dos materiais têm uma grande influência nos testes de simulação de colisão do veículo. Assim, na parte principal do carro que é composta por peças metálicas de chapa fina foi adotado um material com características mecânicas elastoplásticas. Tendo em conta a função de outros componentes, foram definidos materiais adequados para simular componentes em que o resultado da colisão é quase indeformável (motor, transmissão) e componentes com amortecimento elástico, assim como, para simular material de solda.

No modelo de MEF foram usadas as formas comuns de ligação entre os componentes. Destaca-se que, na ligação entre as chapas metálicas finas da estrutura do automóvel foram usadas ligações de soldadura por resistência ou soldadura por pontos “*spot welding*”, conforme é designada frequentemente.

O modelo global de elementos finitos do veículo foi definido tendo em conta a regulamentação “C-NCAP Management Rules (2012 Edition)”, nomeadamente, foram definidos para os ensaios de simulação de colisão os seguintes parâmetros e respetivos

valores: a velocidade inicial igual a 50 km/h; a aceleração da gravidade igual a  $9,8 \text{ m/s}^2$  e o tempo de colisão do carro igual a 120 ms. O modelo de elementos finitos do carro pode ser observado na Figura 2-21. Após o processamento da simulação do modelo, existe a possibilidade de a deformação do veículo ser analisada em momentos diferentes.

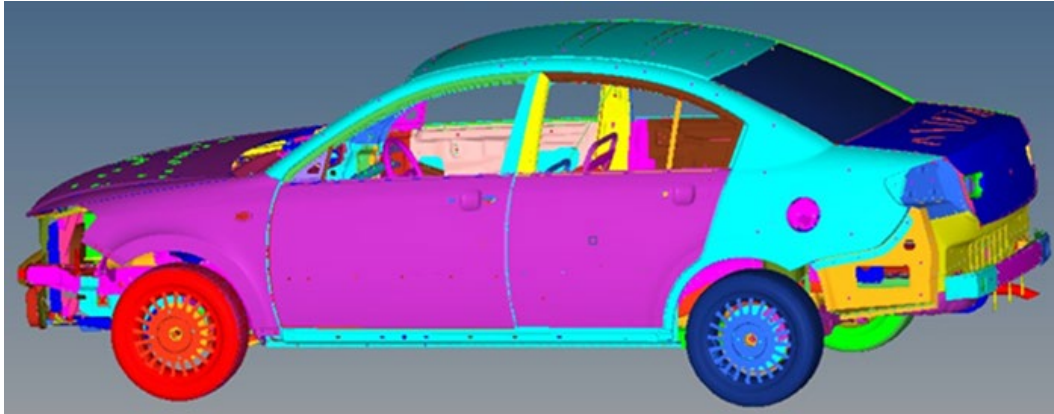


Figura 2-21 - Modelo de elementos finitos do carro [53].

A deformação no final do teste de colisão frontal do veículo, nomeadamente, as deformações dos componentes de absorção frontal de energia do veículo podem ser observadas na Figura 2-22. Verifica-se que o capot está completamente dobrado, os pneus interferem com o para-choques, o para-choques e a viga frontal estão completamente deformados. No entanto, em ambos os lados do veículo, as portas e as colunas não apresentam deformações perceptíveis, o que permite ajudar a tripulação a abrir as portas para escapar. Pode-se ainda observar que o depósito de combustível não apresenta grande deformação, o que impede o carro de se incendiar. O chão e o tubo de escape estão ligeiramente inclinados e a parte de trás do carro, notoriamente está mais elevada.

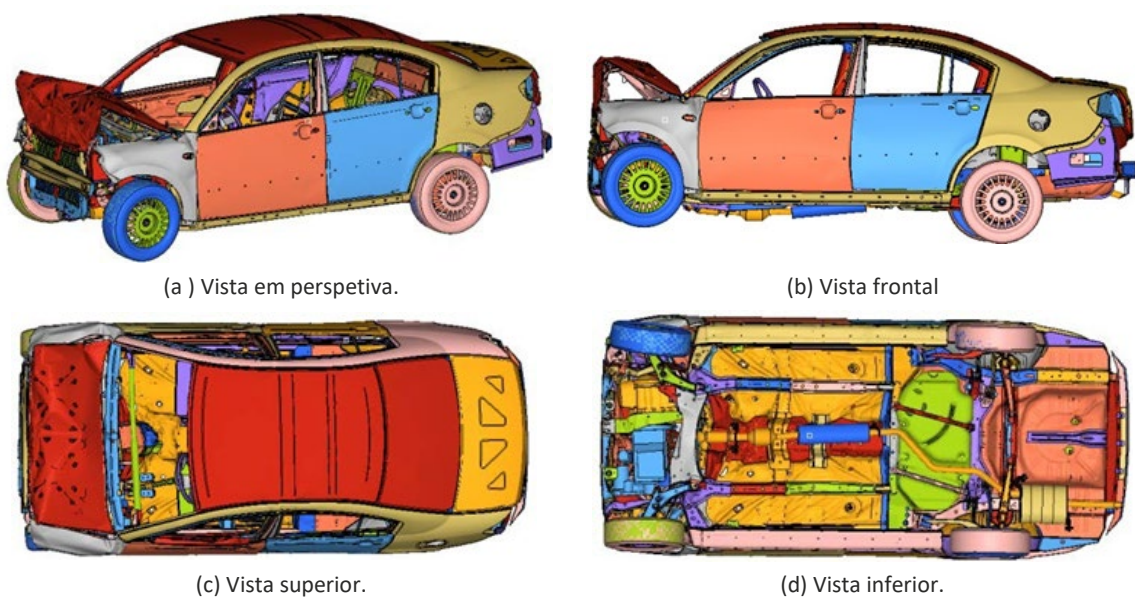


Figura 2-22 – Deformação do veículo no final do teste de colisão, (a) Vista em perspectiva, (b) Vista frontal, (c) Vista superior, (d) Vista inferior [53].

Neste estudo é referido que a viga frontal é o principal componente de absorção de energia cinética durante a simulação do teste de colisão e que a traseira do veículo deve apenas sofrer uma ligeira deformação para que o veículo possa absorver eficientemente a energia cinética, evitar uma aceleração elevada e evitar que o capot invada o espaço do condutor e passageiro da frente.

Na análise do teste de colisão é referido que a viga frontal apresenta uma grande deformação que é útil para a absorção de energia, mas que também é prejudicial dado que provoca a intrusão do painel de instrumentos no espaço interior dos ocupantes. Neste caso o painel de instrumentos deslocou-se 381 mm para o interior do habitáculo, pondo em causa a segurança dos ocupantes. É ainda referido que após a colisão não se verifica deformação no pilar B e que o parâmetro aceleração pode ser um bom representante da realidade sentida pelo passageiro no processo de colisão quando se avalia a desaceleração deste componente. Assim, a desaceleração do pilar B é geralmente usada como um indicador de avaliação da resposta de aceleração do veículo. As curvas de aceleração relativas aos pilares B, direito e esquerdo, durante a colisão, estão representadas no gráfico da Figura 2-23. Neste gráfico pode-se verificar que a colisão automóvel tem uma duração de 87 ms, a aceleração máxima do pilar B direito é de 36,3 g no instante de 54,8 ms e a aceleração máxima do pilar B esquerdo é de 40,1 g no instante 71.1 ms.

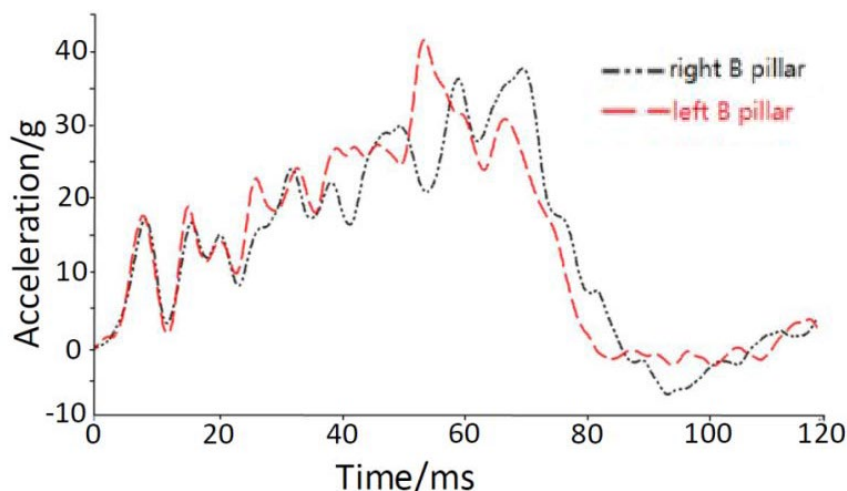


Figura 2-23 - Curva de aceleração do pilar B durante a colisão [53].

Na análise comparativa antes e depois das melhorias é referido que a principal estrutura absorvente de energia do teste de colisão é a viga frontal. A deformação verificada inicialmente nesta viga é uma conformação plástica que resulta sobretudo de uma combinação de deformação por esmagamento e deformação por flexão.

Durante a simulação do teste de colisão a viga frontal apresentou uma baixa eficiência de absorção de energia. Na imagem da Figura 2-24 (a) pode-se observar que a deformação na viga frontal é grave, sendo referido que a energia total absorvida é 31.520 J, ou seja, 19,7% da energia total resultante da colisão do veículo.

Para evitar a deformação da viga frontal a espessura foi alterada de 1,8 mm para 2,5 mm. Na imagem da Figura 2-24 (b) pode-se observar melhorias nos resultados da

deformação provocada pela flexão e esmagamento da viga frontal, sendo referido que a absorção de energia aumentou para 37.920 J, representando 23,7% da energia total resultante da colisão do veículo, ou seja, verificou-se uma melhoria significativa após esta alteração.

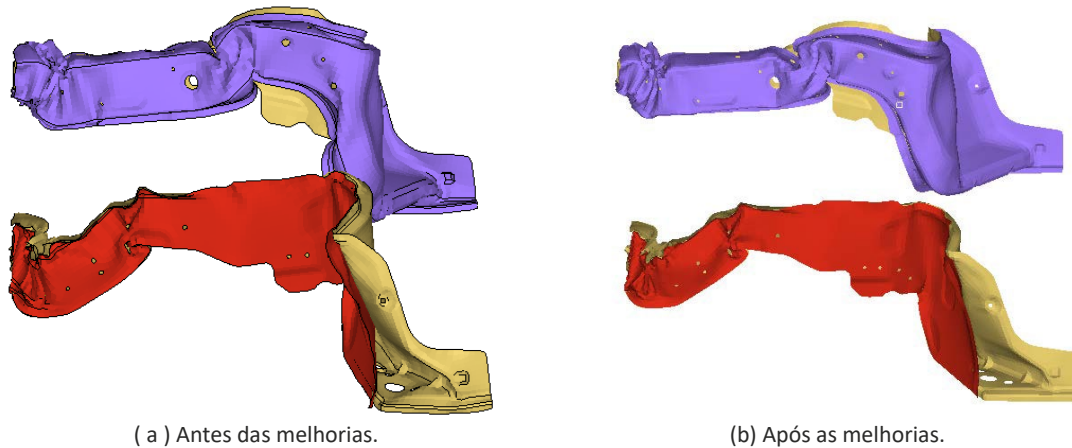


Figura 2-24 – Deformação da viga frontal [53].

Com vista a reduzir eficazmente a intrusão do painel de instrumentos e aumentar o espaço dos ocupantes da frente, a espessura deste componente foi alterada de 1,0 mm para 1,5 mm, verificando-se uma redução na intrusão de 381 mm para 272 mm. Na Figura 2-25 pode-se observar o resultado do deslocamento relativo do painel de instrumentos após aumento da espessura.

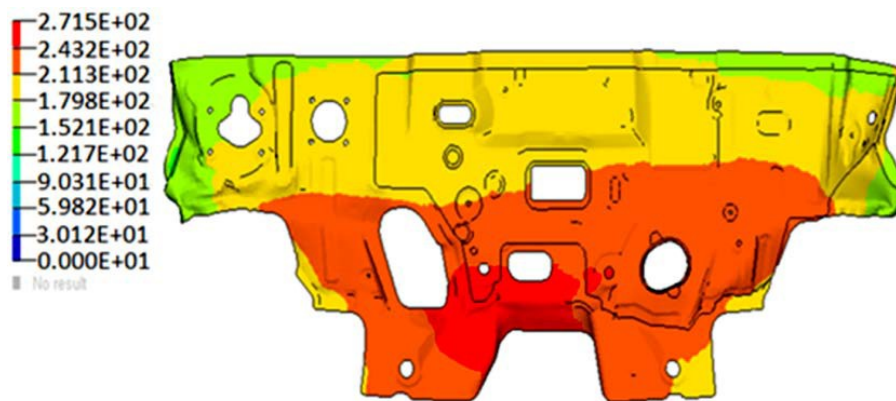


Figura 2-25 - Deslocamento relativo do painel de instrumentos após aumento da espessura [53].

Após as alterações efetuadas ao modelo do carro para o teste de colisão, verificou-se que o desempenho melhorou localmente. No entanto, a eficiência de absorção de energia do carro não melhorou significativamente. Conforme se pode observar na Figura 2-26, o pilar A apresenta uma ligeira deformação após o teste de colisão. Esta deformação impede a abertura da porta da frente para os ocupantes poderem escapar, assim como o valor da intrusão do painel de instrumentos no espaço interior continua a ser muito significativo.

Na conclusão deste estudo é referido que, após as melhorias do modelo, os resultados da simulação pelo MEF indicam que a viga frontal não tem resistência suficiente para impedir a sua deformação, a absorção de energia é insuficiente e a intrusão do espaço

interior dos ocupantes pelo painel de instrumentos é excessiva e facilmente coloca em causa a segurança dos ocupantes.

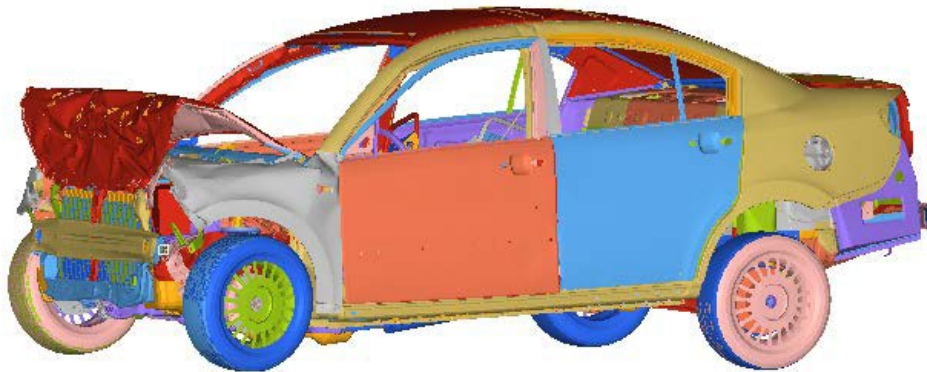


Figura 2-26 - Deformação do carro após melhorias do modelo [53].

Como sugestões de melhoria é referida a possibilidade de ser adicionada na parte de trás do para-choques uma estrutura tipo caixa absorvente para melhorar o desempenho da absorção da energia de colisão e reduzir a quantidade de intrusão do painel de instrumentos. É também sugerido aumentar a resistência das portas da frente através de reforços no interior destas, o que consequentemente aumentará a resistência dos pilares A e permitirá deste modo facilitar a saída dos ocupantes pelas portas da frente.

## 2.18 Casos de estudo sobre o projeto e validação da segurança de bancos para veículos automóveis

Após a apresentação da revisão bibliográfica relativa ao estado de conhecimento em geral da indústria automóvel, e em particular, das ferramentas que são usadas durante as várias fases do projeto, entre as quais se inclui o MEF, apresentam-se seguidamente três casos de estudo relativos ao projeto e respetiva validação da segurança de bancos para veículos automóveis.

O principal objetivo da apresentação destes casos de estudo é conhecer o estado da arte de projetos análogos ao trabalho de projeto desenvolvido na presente dissertação, assim como aumentar o conhecimento sobre o desenvolvimento de este tipo de produtos.

### 2.18.1 Caso de estudo 1 - Projeto de um banco duplo de passageiros ECE – R14

De seguida, apresenta-se um caso de estudo de um projeto com preocupações de sustentabilidade, fiabilidade e segurança na indústria automóvel, que consistiu em projetar um banco duplo para um veículo de transporte de passageiros (autocarro), tendo em conta o fator leveza e o regulamento ECE - R14.

No trabalho realizado por Yuce [54], a estrutura do banco duplo de passageiros foi selecionada como o produto de maior impacto na massa dos veículos devido à quantidade de bancos por veículo. Relativamente à regulamentação de segurança para

veículos de transporte de passageiros, são referidos vários regulamentos aplicáveis a este tipo de veículos, tais como os regulamentos europeus, ECE – R66, ECE R80 e ECE – R14. No entanto, este último é considerado como o mais importante para proporcionar segurança aos passageiros. É ainda referido que as forças aplicadas ao cinto de segurança são determinadas pela categoria do veículo (M2 ou M3) e pelo número de pontos do cinto de segurança.

Segundo Yuce [54], os bancos assumem um papel importante no transporte passageiros porque têm de assegurar o conforto e segurança dos ocupantes, considerando que estes devem proteger os ocupantes num eventual acidente. Além do referido, os bancos também devem absorver vibração e ruído para as viagens serem confortáveis. Refere ainda que, a redução de peso é um fator de importância crescente, e que os fabricantes de bancos são fortemente pressionados a desenvolver estruturas leves sem negligenciar o fator segurança. Por outro lado, é referido que as exigências funcionais crescentes dos parâmetros de segurança, do conforto e da tecnologia para bancos de passageiros aumentaram a complexidade e o peso do banco.

Na Figura 2-27 pode-se verificar a distribuição típica do peso de um banco de passageiros, destacando-se o aço utilizado nas estruturas que representa 65% do peso total do banco.

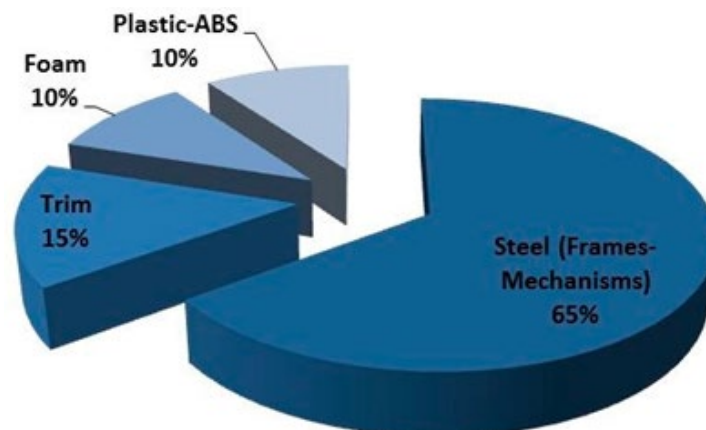


Figura 2-27 - Distribuição típica do peso do assento de passageiro [54]

Relativamente à metodologia utilizada no projeto, Yuce [54] refere que o *design*/conceção auxiliado por computador (CAD) e a análise pelo MEF são usados pela generalidade das indústrias como uma ferramenta decisiva para o *design* e otimização de produtos. Assim, considera que no projeto de um banco de passageiro, a maioria das variáveis estão relacionadas com a geometria e os materiais, e que a simulação numérica através do MEF é uma ferramenta valiosa para facilitar e encurtar o complexo processo de conceção.

No fluxograma da Figura 2-28 apresenta-se a metodologia seguida neste projeto, nomeadamente as várias fases previstas de desenvolvimento do banco duplo para um veículo de transporte de passageiros, abrangido pelo regulamento ECE – R14.

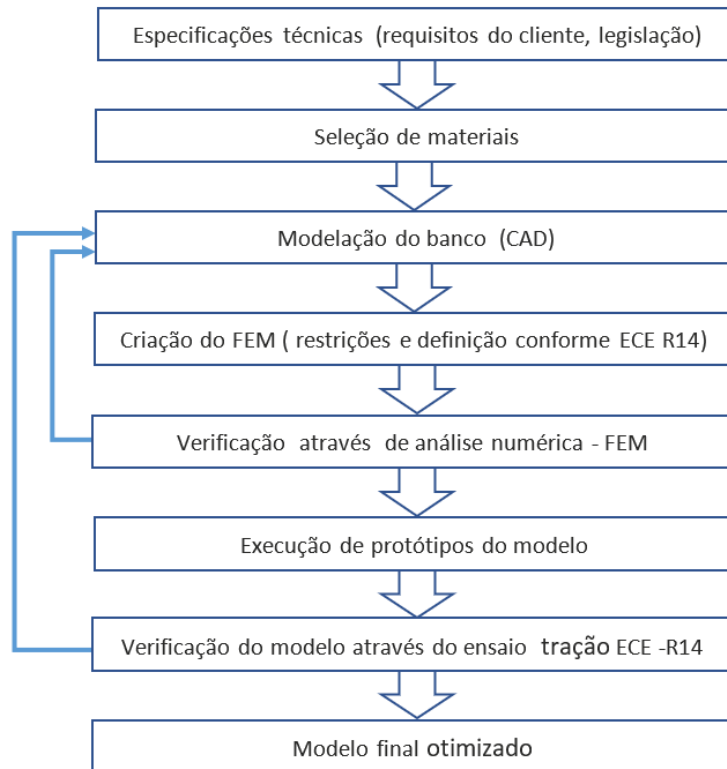


Figura 2-28 - Fluxograma das fases de concepção do produto (adaptado de [54]).

Neste estudo, a seleção dos materiais foi efetuada tendo em conta os indicadores de desempenho dos materiais, sendo selecionado o aço de alta resistência. Após a fase de seleção de materiais procedeu-se à modelação de um banco duplo de passageiros do autocarro para fins de simulação (Figura 2-29).



Figura 2-29 - Modelação da estrutura do banco duplo de passageiros do autocarro [54].

Para estimar o comportamento não linear do material, foi necessário definir as curvas de tensão-deformação reais dos materiais. No processo de seleção de materiais, selecionaram-se os aços de alta resistência S420MC e St-52 em vez de aço convencional St-37, como os materiais candidatos para a estrutura do banco. Para

obter as curvas de tensão-deformação reais desses materiais, foram realizados testes de tração em amostras. As propriedades mecânicas e as curvas da tensão-deformação dos materiais são apresentadas no gráfico indicado na Figura 2-30.

Após a determinação das propriedades materiais, o aço de alta resistência S420MC foi considerado como o material mais adequado na comparação com o aço St-52.

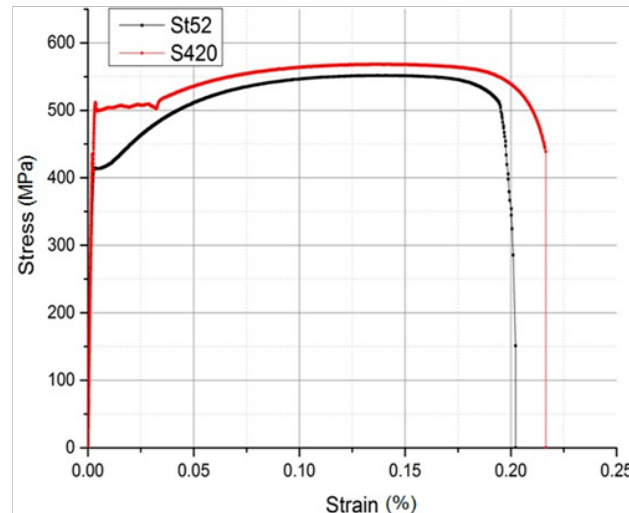


Figura 2-30 - Curvas de tensão-deformação dos aços S420MC e St-52 [54].

Neste estudo, foi considerado que todas as ancoragens do banco protótipo foram simuladas tendo em conta as cargas de impacto do veículo prescritas pelo regulamento ECE - R14. As condições de simulação para as análises de elementos finitos da estrutura do banco foram definidas de acordo com o regulamento ECE - R14. A força de tração foi aplicada com um ângulo de  $10^\circ \pm 5^\circ$  acima da horizontal num plano paralelo ao plano do veículo. As cargas prescritas no regulamento, nomeadamente as forças dorsal e ventral, respetivamente, 4500 N e 6766 N, foram aplicadas sobre dispositivos de tração, conforme ilustrado na Figura 2-31. As forças foram determinadas pelo regulamento ECE - R14 em função da categoria do veículo (M3) e do tipo de cinto de segurança (três pontos).

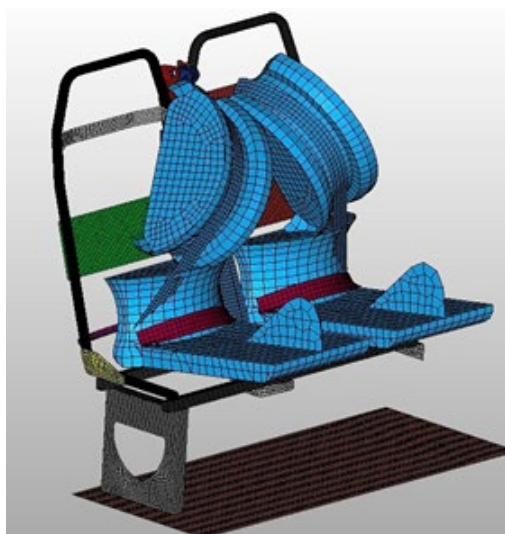


Figura 2-31 - Modelo numérico com cinto de segurança 3 pontos e dispositivos de tração [54].

Na fase final do estudo, procedeu-se à experimentação com base em ensaios reais da estrutura. No final do ensaio, em termos de resultados, esperava-se que o banco e as ancoragens mantivessem sua integridade e o deslocamento longitudinal não excedesse os valores permitidos. Para validar o ensaio, foi considerado que, durante e no final dos testes, a estrutura do encosto do banco não podia ultrapassar as condições fronteira estabelecidas pelo regulamento ECE - R14.

Neste estudo, foram analisadas várias simulações numéricas em função dos materiais e espessuras do modelo. Nas imagens da Figura 2-32 estão ilustrados vários resultados da simulação MEF efetuada à estrutura do banco duplo, nomeadamente, os valores da tensão de Von Mises da estrutura do banco, os deslocamentos da estrutura do encosto e a deformação plástica da estrutura do banco. Nesta análise destaca-se que o valor total observado de deformação foi de 9,5%, e que o deslocamento de encosto foi consistente com o regulamento ECE – R14. Com base nos resultados da análise MEF, é referido neste estudo que os perfis de aço de alta resistência proporcionaram uma boa estabilidade estrutural do banco.

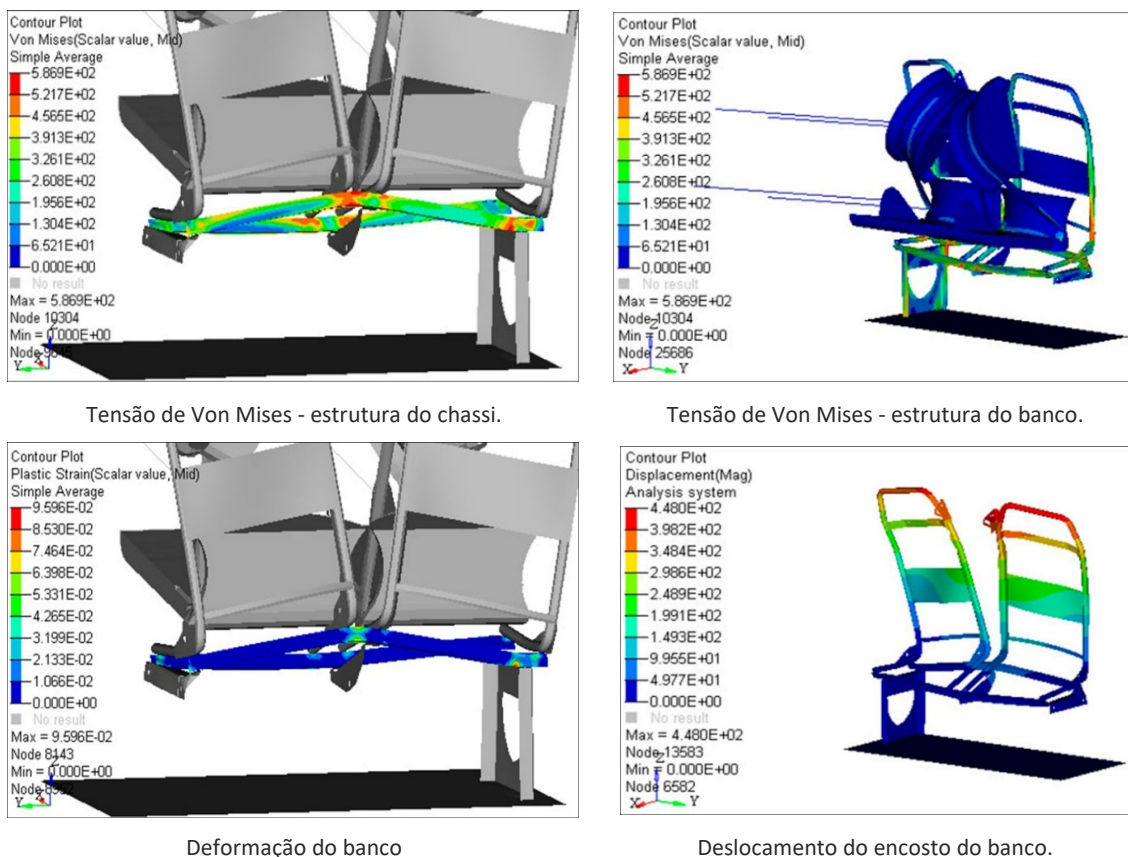


Figura 2-32 – Resultados de simulações numéricas em função dos materiais e espessuras do modelo [54].

No gráfico apresentado na Figura 2-33 pode-se observar o efeito da espessura do perfil do chassi na evolução da deformação plástica na estrutura do banco.

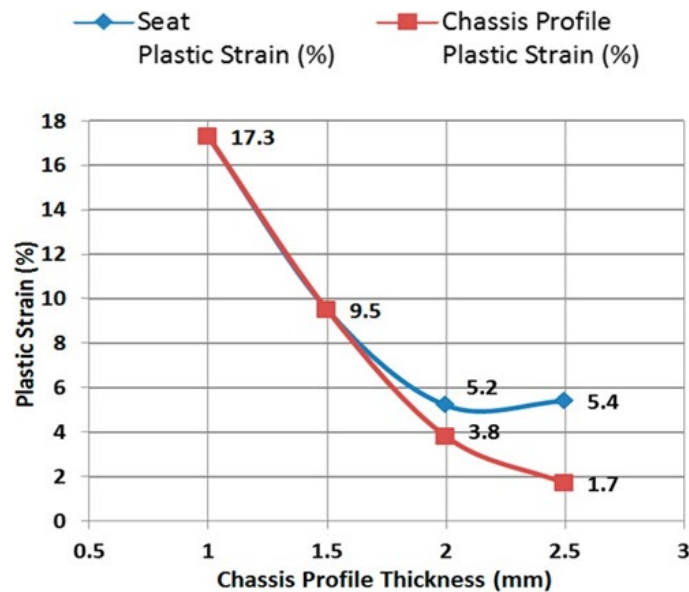


Figura 2-33 – O efeito das espessuras do perfil do chassi na FEA [54].

Após a análise dos resultados da simulação numérica, procedeu-se à fabricação de protótipos de bancos para serem submetidos a ensaios experimentais. No fim destes ensaios, verificou-se uma boa correlação entre os resultados da simulação numérica e os ensaios reais da estrutura do banco. Todo este trabalho de análise e verificação permitiu validar um modelo de um banco otimizado com uma redução de peso de 20% sem comprometer os critérios de segurança ou de conforto.

Com base no ensaio de tração, ECE - R14, é referido neste estudo que estrutura do encosto do banco é considerada uma das partes críticas do banco, e que tradicionalmente é fabricada com de tubos de aço St-37, de espessura 2,5 mm. A estrutura do encosto deste projeto foi fabricada com aço de alta resistência e espessura de 2 mm. Assim, na estrutura do encosto verificou-se apenas uma ligeira redução do peso. Durante os ensaios de tração ECE - R14, verificou-se na estrutura do encosto que as tensões máximas ocorreram nas zonas de flexão e zonas de contato com o chassi, como se pode observar na Figura 2-34.

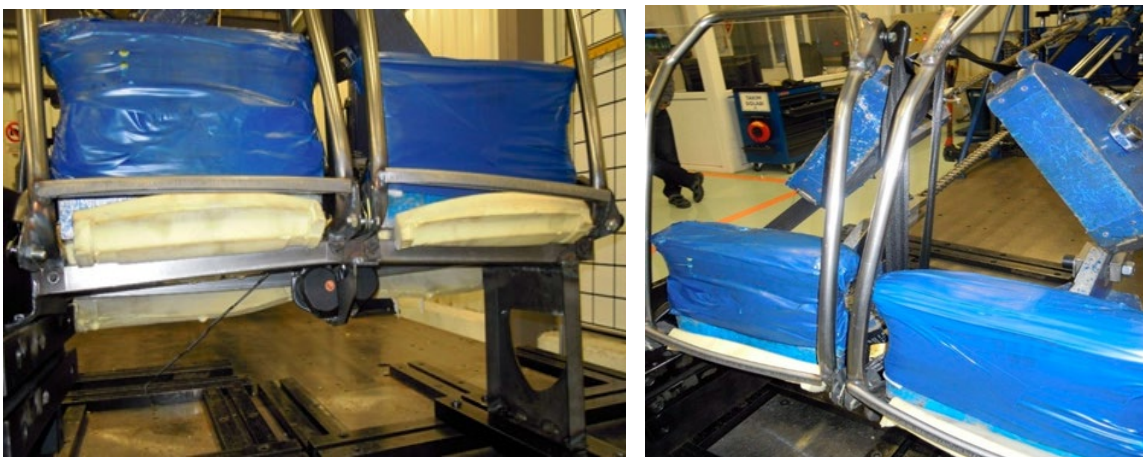


Figura 2-34 – Estrutura do encosto do banco após ensaio ECE - R14 [54].

Na análise não linear do comportamento mecânico da estrutura foi possível verificar que as tensões eram sempre consideravelmente menores do que a tensão de rotura final do material atribuído. Este estudo permitiu demonstrar que os componentes de aço de alta resistência na estrutura do banco são capazes de atender aos regulamentos de segurança, assim como, permitiu projetar uma estrutura com a mesma rigidez das estruturas convencionais. Em conclusão, do ponto de vista do transporte sustentável, constatou-se que uma redução de peso na estrutura do banco, traduz-se numa economia considerável de combustível para todos os veículos de transporte, especialmente, de passageiros.

### 2.18.2 Caso de estudo 2 - A importância das Normas FMVSS na segurança dos ocupantes

O principal objetivo da apresentação deste caso de estudo é conhecer a importância das Normas Federais de Segurança dos Veículos Automóveis (FMVSS - Federal Motor Vehicle Safety Standards), 207/210 na segurança dos ocupantes.

Neste caso de estudo, Salim [55], começa por destacar dois objetivos. Em primeiro lugar considera que é necessário compreender a importância das normas FMVSS na segurança dos ocupantes e em segundo lugar aumentar a resistência dos componentes para evitar a avaria ou falha do assento do condutor.

O objeto deste caso de estudo foi o modelo de uma estrutura do assento do condutor do veículo de passageiros, Toyota Yaris Sedan. O assento foi modelado e analisado com recurso ao *software* Hyper Mesh e LS Dyna. A soldadura das várias partes do assento foi definida durante a criação do modelo.

Após a definição do modelo, procedeu-se primeiramente a uma análise modal do modelo e após validação dos resultados, procedeu-se a uma simulação MEF para análise de resistência estática do cinto de segurança.

O estudo da análise modal visa apresentar resultados sobre as frequências associadas ao modelo em que os contornos do modelo representam uma deformação equivalente à sua vibração própria.

Neste estudo é referida a importância de se garantir uma correta definição do modelo numérico MEF (verificação das ligações de soldadura, sem peças livres). Massas não estruturais como espuma, motores ajustadores, sistemas elétricos, não estão incluídas na análise modal. Na análise, o assento fica completamente posicionado e bloqueado na posição traseira. O conjunto de repouso da cabeça não está incluído no modelo numérico FEM, uma vez que não tem qualquer significado no ensaio de fixação do cinto de segurança.

A configuração de análise modal foi realizada considerando que o assento está fixado na base do veículo. Todos os movimentos de translação e momentos foram restringidos na base do assento conforme se pode observar na Figura 2-35.

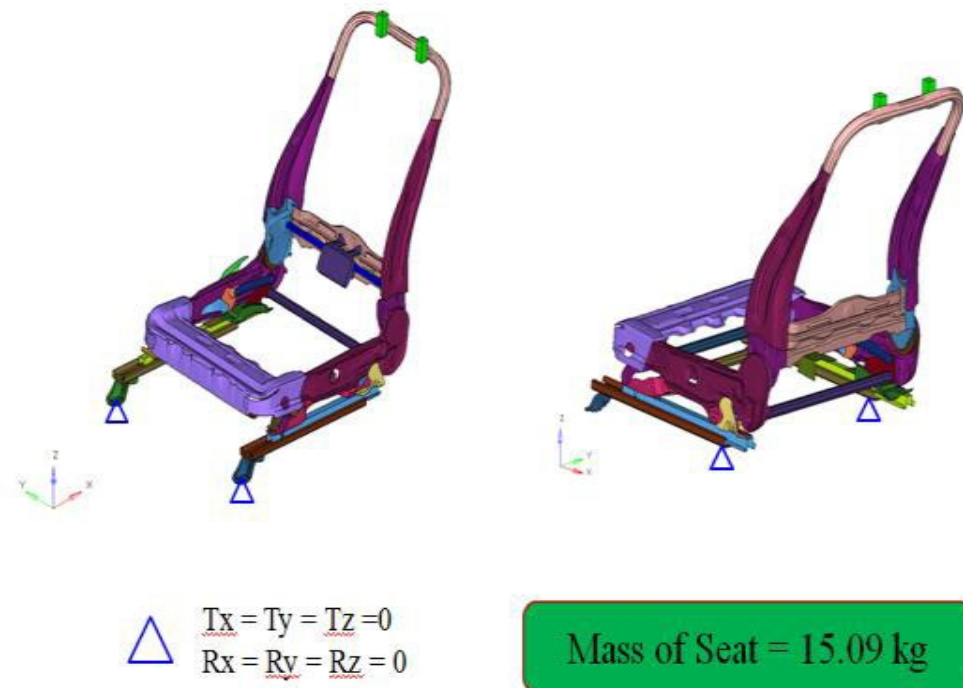


Figura 2-35 – Restrições aplicadas à estrutura do assento [55].

Na Figura 2-36 estão ilustradas algumas das imagens da análise modal efetuada à estrutura do assento, nomeadamente os modos de frequência 1 e 11. Resumidamente, é referido neste estudo que o assento passou neste teste e que este está em condições de passar à análise do ensaio de resistência estática do cinto de segurança.

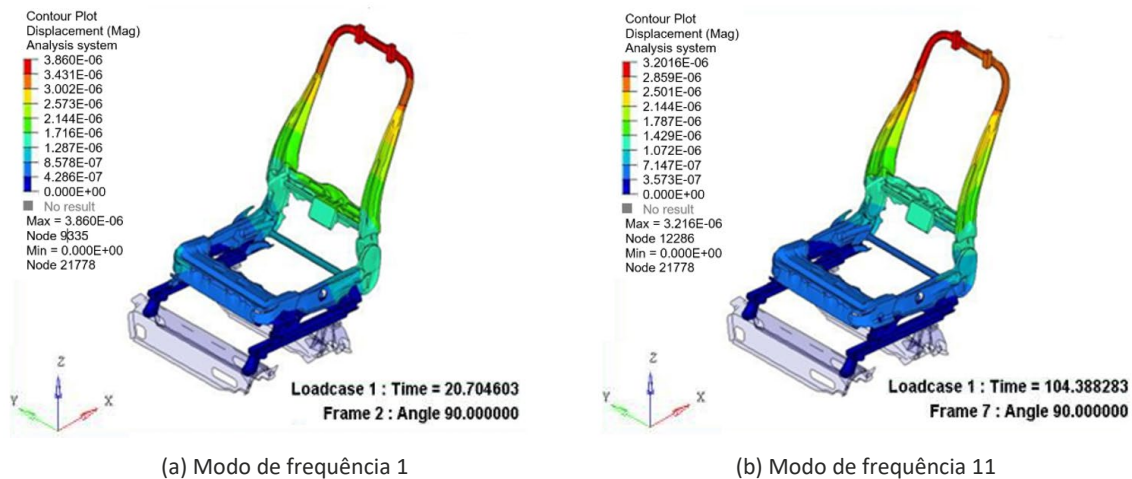


Figura 2-36 – Resultado análise modal da estrutura do assento [55].

De seguida, descreve-se o procedimento de ensaio relativo à montagem do cinto de segurança para a simulação MEF do modelo. Durante o teste, o assento foi montado na posição inferior e recuado. Todos os mecanismos, tais como os mecanismos de regulação em altura, das corredeiras e de reclinção foram mantidos em condições de bloqueio. O ângulo de reclinção do encosto do assento foi mantido na posição de projeto do assento. Procedeu-se à fixação dos pontos de ancoragem superior e inferior

do cinto de segurança tendo em atenção o seu correto posicionamento. O ponto superior do cinto correspondente ao nó de extremidade do ombro está ligado à estrutura do veículo e o ponto inferior do cinto do cinto está ligado à estrutura do assento. Uma barra rígida foi soldada na parte estrutural mais recuada do assento (localizada no centro de gravidade do assento). Foram aplicadas cargas no valor de 13345 kN na zona dorsal e na zona ventral de acordo com a norma FMVSS 210. Uma carga de 20 vezes o peso total do assento, foi aplicada no centro de gravidade do assento na direção horizontal (direção x) de acordo com a norma FMVSS 207. Todas as cargas foram aplicadas simultaneamente. A configuração do modelo numérico do assento para a simulação MEF da resistência estática do cinto de segurança foi efetuada considerando que as soldas, parafusos e articulações rebitadas são componentes seguros, que os materiais são isotrópicos, que a estrutura do veículo “body in white” (BIW) foi considerada como rígida, assim como o mecanismo de bloqueio não foi considerado. Para a massa do assento completo foi considerado o valor de 24,20 kg. A força de 4748 N resultante do valor 20 vezes o peso total do assento ( $F = 20 \times \text{peso do banco} \times 9,81$ ), assim como, as cargas no valor de 13345 kN, aplicadas na zona dorsal e na zona ventral do assento foram majoradas até 20% durante a simulação para garantir a segurança do condutor, ou seja, acima dos critérios das cargas impostas pela regulamentação (Figura 2-37).

Relativamente ao critério de validação da estrutura do assento, é referido que não deve haver qualquer separação estrutural, falha catastrófica e nenhuma separação das calhas das corredeiras.

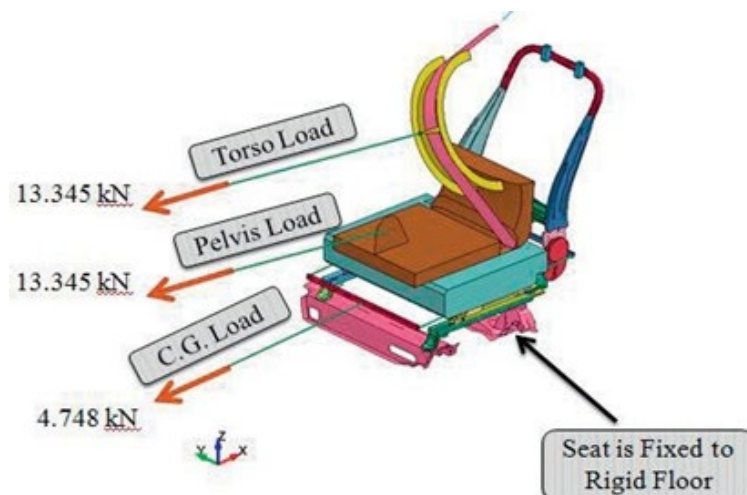
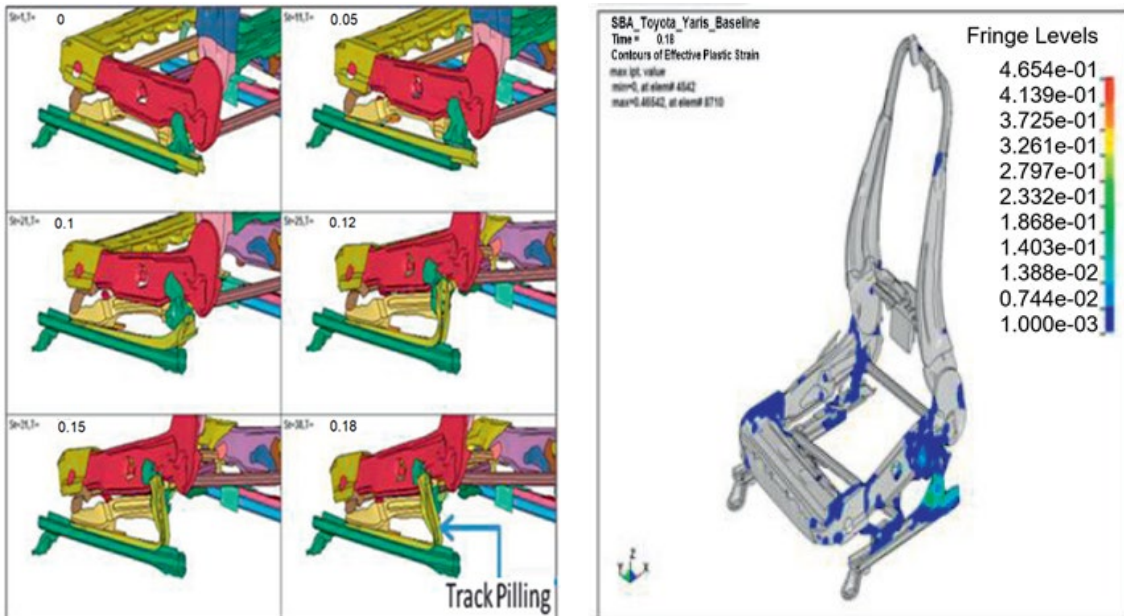


Figura 2-37 – Modelo numérico de teste do assento do condutor [55].

Após a simulação MEF do modelo, verificou-se que os resultados obtidos não satisfazem os critérios para a validação estrutural. Concretamente, pode-se observar nas imagens ilustradas na Figura 2-38 a existência de falha nas calhas das corredeiras dos assentos, uma vez que a deformação apresentada nestes componentes é superior à deformação admissível. Nesta simulação é também possível observar a existência de um fenómeno designado por “peeling”, que se inicia a 0,105 segundos (logo após atingir 100% da carg. Este fenómeno consiste numa separação entre as calhas das

corrediças superior e inferior, associado a uma grande deformação da calha superior localizada na parte posterior do banco, como pode ser observado na Figura 2-40 (a).

Os resultados deste estudo permitiram concluir que existe a necessidade de efetuar melhorias em vários componentes críticos, nomeadamente nas corrediças do assento, nos parafusos de fixação ao piso de base rígida na parte posterior, no sistema de elevação e no ajustador de elevação frontal para suportar a carga total de solicitação.



(a) Instantes do período da simulação numérica.

(b) Deformação da estrutura do banco.

Figura 2-38 – Resultados da análise de resistência estática do cinto de segurança do assento [55].

Com vista a melhorar a resistência geral da estrutura do banco, procedeu-se a várias alterações da conceção da estrutura, tais como, aumentar a espessura, usar material de alta resistência (alto limite elástico), adicionar um suporte com perfil com forma “J” para conferir resistência adicional à zona crítica da corrediças, sem deixar de ser uma solução económica, fácil de fabricar e montar, como se pode observar na Figura 2-39.

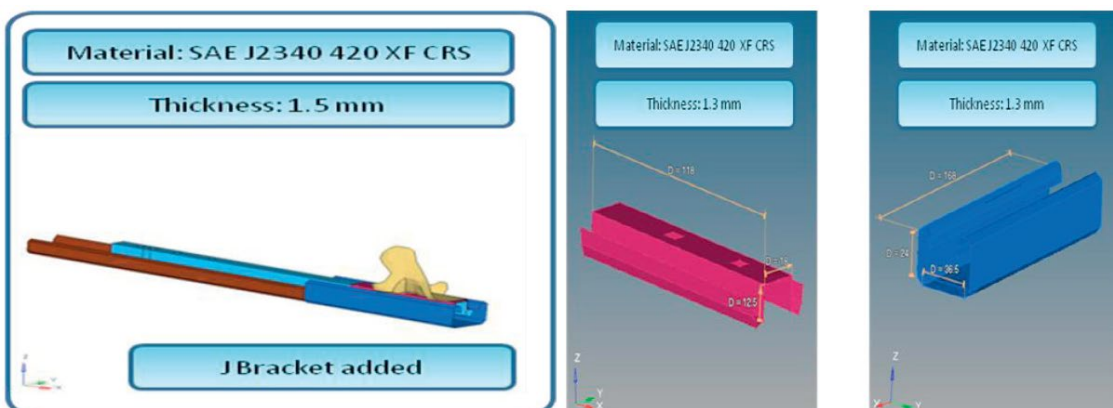


Figura 2-39 – Suporte para reforço das corrediças – dimensões do suporte com perfil em forma J [55].

Neste estudo, verificou-se que após as alterações preconizadas com base nas sugestões iniciais, os resultados obtidos na simulação MEF permitem concluir que o assento cumpre os critérios de validação estrutural, uma vez que as deformações

apresentadas nas zonas ou componentes críticos estão abaixo da deformação plástica permitida. Nomeadamente, verifica-se que as alterações adotadas nas corredeiras permitiram suportar a totalidade das cargas. O desenho final do perfil tipo “J” satisfaz o requisito de integridade estrutural, não se verificando o efeito “peeling”, como se pode observar na Figura 2-40.

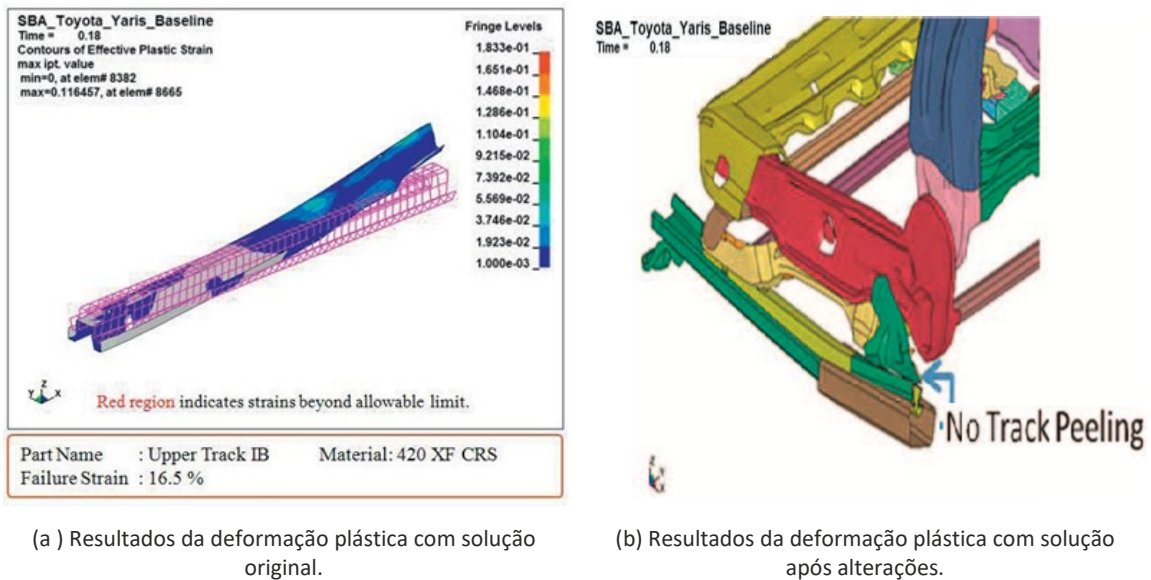


Figura 2-40 – Resultados da análise de resistência estática após alterações da estrutura [55].

Nas conclusões deste caso de estudo destaca-se que o ensaio de resistência estática das fixações do cinto de segurança é considerado como um dos ensaios mais importantes para avaliar a resistência do assento e que permite fornecer diretrizes para a conceção dos assentos sem necessitar dos dados reais do teste de colisão.

Nos primeiros resultados da simulação pelo MEF verificou-se que a conceção inicial para a base do assento do condutor não satisfazia os requisitos do teste SBA – Toyota Yaris. No entanto, com base nas alterações de conceção inicialmente sugeridas, verificou-se que estas permitiram bons resultados na simulação MEF.

Na parte final deste estudo é referido que a solução encontrada pode ser objeto de otimização no futuro com recurso a métodos e materiais de conceção não tradicionais, sendo este desafio uma oportunidade para aprofundar e analisar o potencial de novos métodos de conceção e validação do modelo.

### 2.18.3 Caso de estudo 3 - Análise da resistência do cinto de segurança para veículos

Este caso de estudo tem como objeto de análise da resistência do cinto de segurança para veículos um assento da primeira fila para veículos automóveis.

No início deste estudo, Peicheng [56] refere que, para melhorar a eficiência da conceção dos assentos e melhorar a segurança dos assentos dos veículos, é necessário efetuar análises através da engenharia assistida por computador (EAC) ou CAE

(*Computer Aided Engineering*) sobre a segurança do assento antes de efetuar testes físicos.

Segundo Peicheng [56], é importante a teoria da análise pelo MEF e do *software* de MEF HyperWorks serem aplicados na fase de anteprojetado dos assentos dos veículos, cintos de segurança, bem como nos membros superiores e nas zonas de contato dos manequins. Os tempos de solicitação das cargas do assento são definidos de acordo com a norma GB 14167-2013 da República Popular da China, e o cálculo CAE é realizado com base no *software* LS-DYNA, que permite obter os gráficos de tensão versus deformação dos assentos do veículo correspondente.

Este trabalho tem como objetivo otimizar o modelo de um assento tendo como base de trabalho os resultados das análises CAE. O *software* LS-DYNA é usado para cálculo, tendo este um papel importante no fluxograma da concepção do modelo para satisfazer os requisitos regulamentares, permitindo este reduzir custos de desenvolvimento, reduzir o número de testes físicos e encurtar o ciclo de concepção.

Neste estudo é destacado o facto dos assentos dos veículos não só proporcionarem conforto à tripulação, mas também desempenharem um papel importante na proteção da vida dos passageiros em caso de colisão de veículos. Sobre o fator segurança é referido que, a resistência das fixações do cinto de segurança do veículo é considerada um indicador importante que decorre do cumprimento das normas de segurança dos veículos, assim como tem um papel importante nos ensaios obrigatórios dos veículos. Com vista a aumentar o nível de proteção dos passageiros numa situação de colisão de veículos, muitas empresas de assentos colocaram requisitos de desempenho do produto mais elevados do que os regulamentos em vigor.

Neste trabalho, a modelação geométrica do assento, dos cintos de segurança, bem como dos membros superiores e dos manequins foi completada através do *software* tridimensional CATIA, enquanto que o modelo numérico MEF, foi configurado utilizando o *software* de análise de elementos finitos Hyperworks. Para os componentes principais foi definida uma malha de 5 mm, procedendo-se ao refinamento desta em alguns componentes para melhorar a fiabilidade da análise numérica. É referida a necessidade de se proceder a um tratamento prévio do modelo da simulação numérica MEF, que basicamente incidiu sobre as ligações entre as várias partes do assento, os parafusos de fixação, as soldas das juntas, dado que uma má configuração do modelo tem um grande impacto nos resultados das tensões do mesmo.

Resumidamente, é referido neste estudo que o carregamento do modelo do assento deve seguir a norma GB 14167-2013.

Seguidamente, são descritos os carregamentos aplicados no modelo, podendo as amplitudes e direções das forças ser observadas na Figura 2-41.

- Força aplicada no sistema de tração dorsal: 13500 N  $\pm$  200 N;
- Força aplicada no sistema de tração ventral: 13500 N  $\pm$  200 N;

- Força aplicada no centro de gravidade do assento: 2550 N.

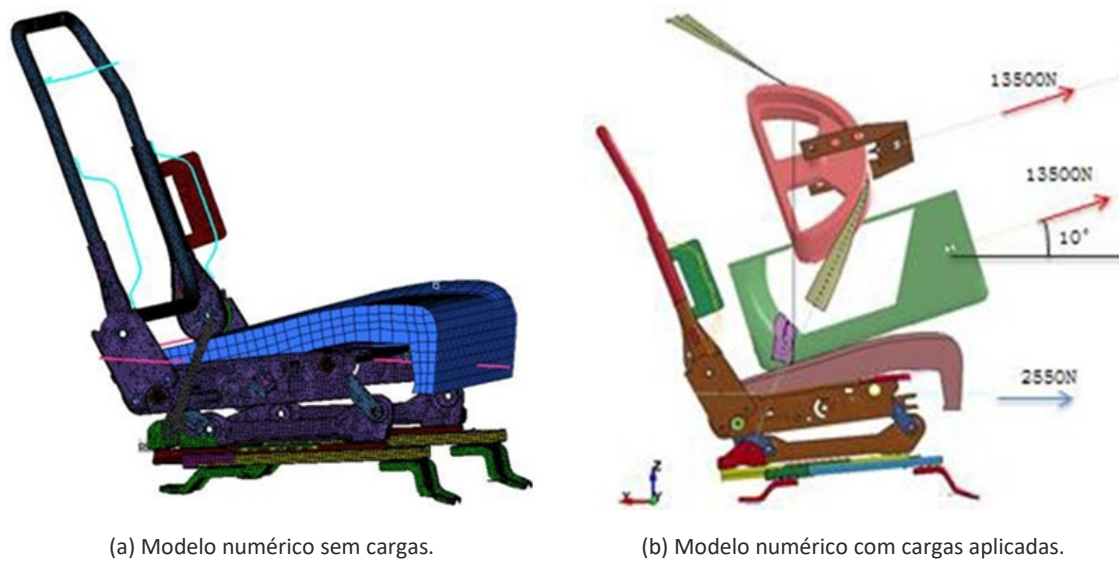


Figura 2-41 – Modelo numérico do banco e aplicação dos carregamentos [56].

Neste estudo, o material é considerado um parâmetro importante para o cálculo numérico do assento dado que a precisão dos resultados depende dos parâmetros corretos do material. É ainda salientado que idealmente a relação de tensão - deformação do material deve ser obtida numa condição unidimensional e medida experimentalmente.

Este estudo refere que o assento é basicamente uma peça de estampagem de chapa fina e que o material definido para o modelo foi designado com a nomenclatura “MAT24”. Dado ser considerado que a inclinação da curva de tensão - deformação é a mesma na fase de deformação elástica, então apenas a curva de tensão - deformação da fase plástica precisa de ser inserida na curva de tensão-deformação do material definido para o modelo. Na Figura 2-42 está representado o gráfico de transformação da curva de tensão-deformação.

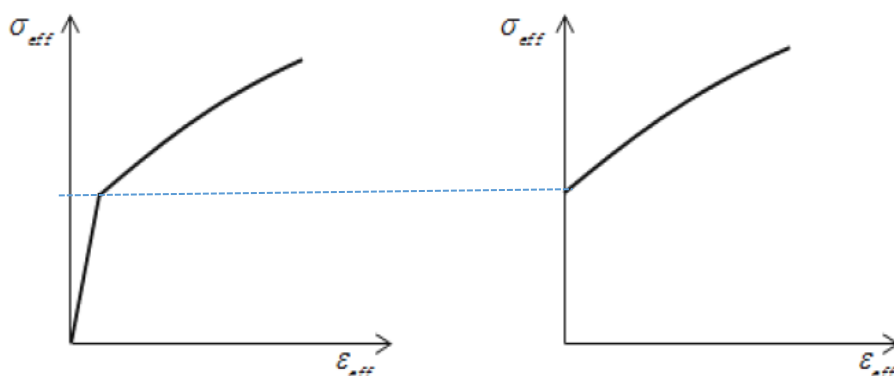
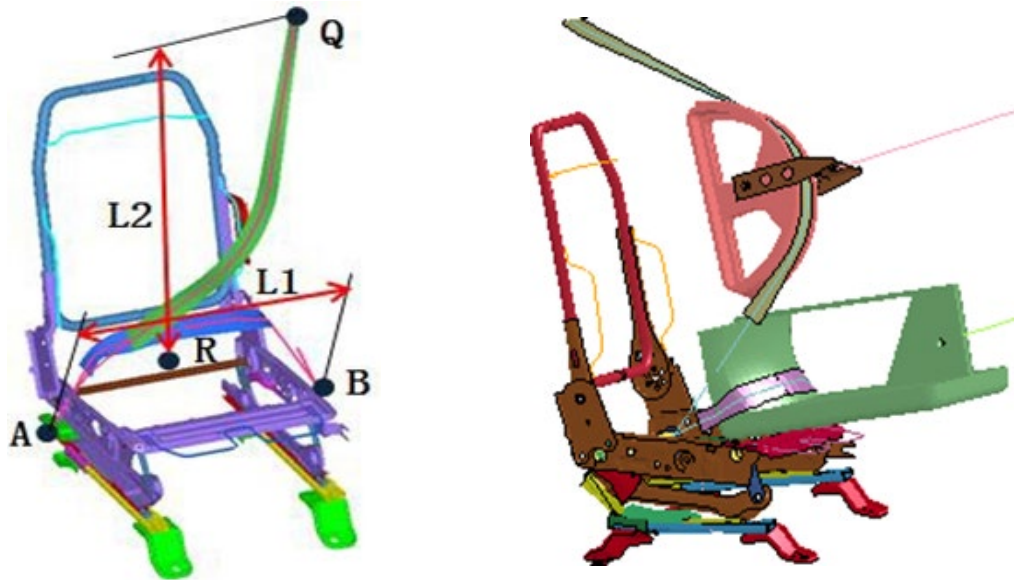


Figura 2-42 – Gráfico esquemático de transformação da curva de tensão-deformação do material MAT24 [56].

Relativamente aos critérios de avaliação dos resultados é referido que no processo de análise do CAE, o espaçamento mínimo das fixações efetivas inferiores deve ser tal que existam duas fixações A e B que passem pelo cinto de segurança, e a distância entre os

pontos A e B seja pelo menos de  $L1=350$  mm (são considerados nestes pontos dois planos verticais paralelos ao plano central longitudinal do veículo). Sobre a fixação efetiva superior Q é referido que esta deve estar acima do ponto horizontal R e  $L2=450$  mm, tal como indicado na Figura 2-43 (a). Para obter a deformação global do modelo numérico do assento recorreu-se ao *software* LS-DYNA, como se pode observar na Figura 2-43 (b).



(a) Posição geométrica das fixações do cinto de segurança.

(b) Resultados do cálculo numérico LS-DYNA.

Figura 2-43 – Posição geométrica das fixações do cinto de segurança e resultados do cálculo numérico [56].

Na Figura 2-44 pode-se observar os resultados das deformações verificadas nos vários componentes de uma ancoragem de fixação do cinto de segurança do assento.

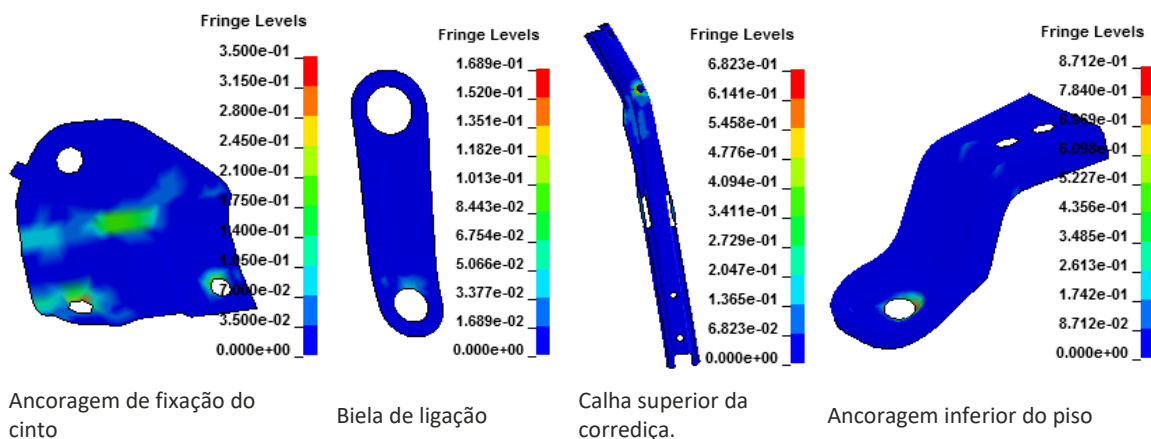
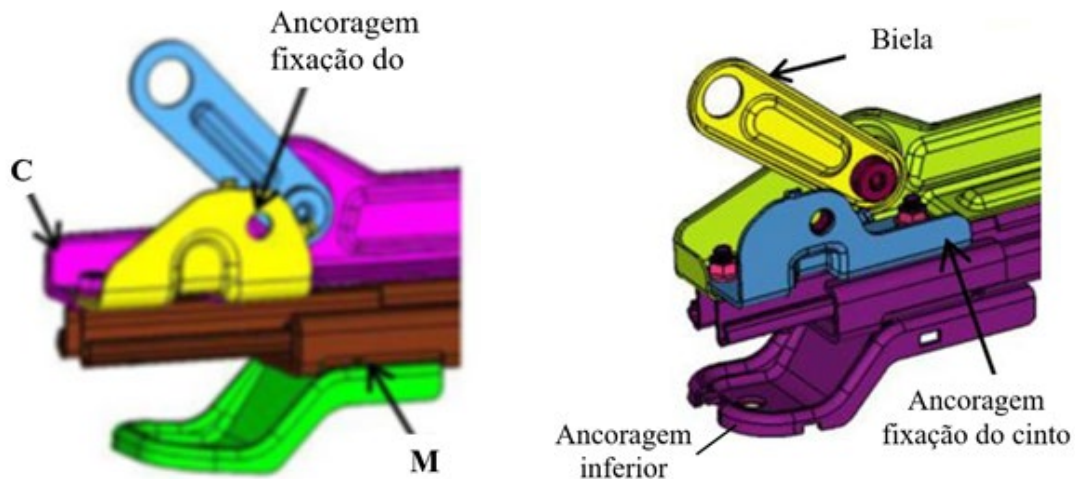


Figura 2-44 – Resultados das deformações dos componentes críticos [56].

De acordo com a análise de resultados efetuada neste estudo, o banco colapsou, verificando-se que a deformação dos componentes inferiores do cinto de segurança e de outros componentes importantes, excedeu a deformação máxima admissível do material, pelo que a estrutura do assento não é suficientemente resistente ou segura. Sobre a razão desta falha, é referido que os componentes inferiores do cinto de segurança estão sujeitos a grandes tensões, nomeadamente, o ponto C, que por sua

vez gera em relação ao ponto M um momento de valor elevado e, conseqüentemente, provoca uma deformação da calha de deslizamento superior (viga encastrada), conforme apresentado na Figura 2-45 (a), assim como o agravamento da sollicitação da força de carregamento total do assento, resultando em colapso.



(a) Solução da ancoragem de fixação do cinto de segurança antes da otimização. (b) Solução da ancoragem de fixação do cinto de segurança após otimização.

Figura 2-45 – Ancoragem inferior da fixação do cinto de segurança [56].

Na otimização do modelo do assento foram adotadas várias melhorias na estrutura, nomeadamente, onde se situam os componentes inferiores do cinto de segurança, conforme se apresenta na Figura 2-45 (b). A ancoragem do cinto de segurança está localizada no ponto A, conforme se pode observar na Figura 2-43 (a).

Na calha superior deslizante reduziu-se a distância entre o ponto C e o ponto M para reduzir o momento fletor gerado nesta consola. A extremidade esquerda da ancoragem de fixação do cinto foi aumentada em 10 mm para também reduzir o momento fletor da extremidade da calha de deslizamento. Na frente e nos lados da ancoragem inferior foram executadas ranhuras para reduzir as tensões concentradas nesta ancoragem. Na biela de ligação, aumentou-se a área e a profundidade da estampagem longitudinal, e acrescentou-se uma estampagem em todo o perímetro da periferia da peça, no sentido de aumentar a sua resistência através do aumento da inércia da seção deste componente, conforme se apresenta na Figura 2-45 (b).

Seguidamente apresentam-se os resultados da análise CAE e os critérios de avaliação de resultados obtidos nas simulações numéricas deste trabalho.

Na Tabela 2-7 são apresentados os resultados obtidos nas análises numéricas, antes e após a otimização do modelo do assento. Antes da otimização pode-se verificar que todos componentes indicados na tabela apresentam uma deformação plástica superior à deformação máxima admissível do respetivo material. A título de exemplo, refere-se que o resultado da deformação da peça designada por “ancoragem de fixação do cinto” é 0,35 e a deformação máxima admissível do material SAPH440 é de 0,3. Após a otimização dos componentes, o modelo do assento foi submetido novamente ao

cálculo do *software* LS-DYNA e pode-se verificar que todos os componentes verificam o limite da deformação imposta pelo respetivo material.

Tabela 2-7 – Resumo das melhorias efetuadas no modelo otimizado do assento (adaptado de [56]).

Peças	Material	Máxima deformação plástica do material (%)	Deformação plástica (%)	
			Antes da otimização	Após a otimização
Ancoragem de fixação do cinto	SAPH440	30	35	9
Ancoragem inferior do piso	SAPH440	30	87	10
Calha superior da corredeira	S500MC	12	68	15
Biela de ligação	980DP	12	16	0,03

Na Figura 2-46 estão ilustrados alguns dos componentes importantes e os respetivos resultados das deformações após a otimização do modelo.

Com base nos resultados da análise do CAE, verificou-se também que a distância mínima entre as ancoragens inferiores de fixação do cinto (fixações efetivas entre os pontos A e B), é superior a  $L1=350$  mm, assim como a distância mínima entre os pontos Q e R, relativa à ancoragem localizada no ponto Q, é superior a  $L2=450$  mm, permitindo estes resultados cumprir os requisitos regulamentares.

Com base nos resultados obtidos após otimização do modelo pode-se concluir que o assento satisfaz completamente os requisitos regulamentares e as restrições de desempenho do material.

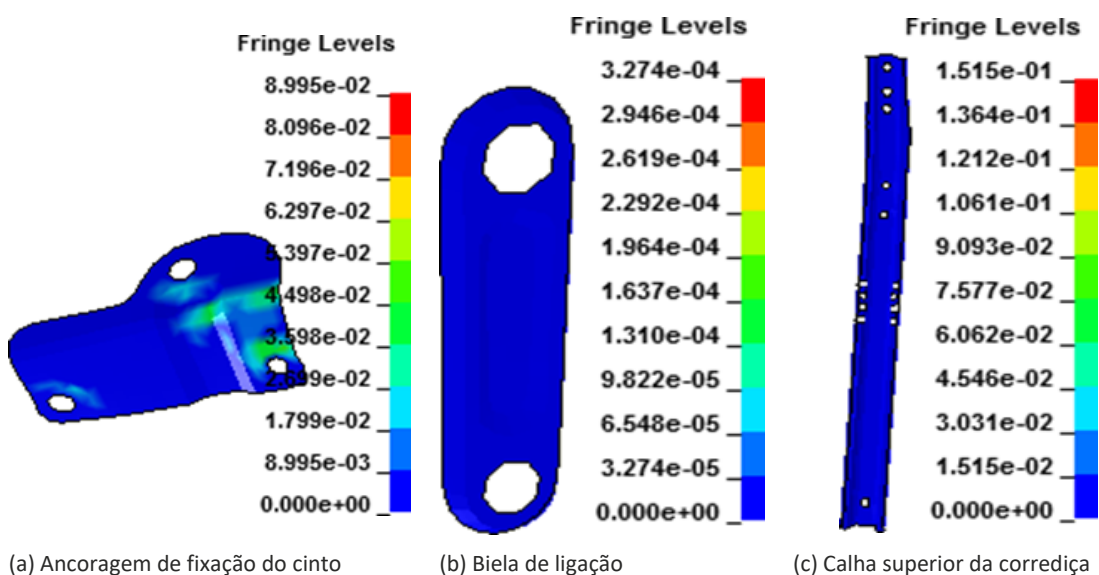


Figura 2-46 – Resultados das deformações de componentes otimizados. [56].

Na parte final da conclusão deste caso de estudo é salientado que o método utilizado neste trabalho para a segurança dos assentos tem um contributo muito importante na redução dos custos de desenvolvimento, permitindo encurtar o ciclo de desenvolvimento e melhorar a taxa de sucesso dos ensaios físicos.



# DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Introdução ao trabalho prático desenvolvido
- 3.2 Descrição da fase de anteprojeto (projeto preliminar)
- 3.3 Análise numérica do modelo
- 3.4 Descrição da fase do projeto detalhado (projeto final)
- 3.5 Ensaios de homologação ECE – R14



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Introdução ao trabalho prático desenvolvido

Atualmente, no desenvolvimento de projetos de engenharia para a concepção de novos produtos, estão disponíveis ferramentas de análise por elementos finitos, que facilmente permitem ao projetista tomar decisões sobre a forma e que dimensões definir para que os componentes suportem da melhor maneira os diferentes esforços a que vão estar solicitados. A tomada deste tipo de decisões foi durante muito tempo baseada sobretudo na intuição e na experiência do projetista apoiada em projetos anteriores, mas agora essas decisões podem ser baseadas numa análise coerente, considerando as propriedades físicas e mecânicas dos componentes.

A existência, destas ferramentas, em ambiente de modelação e montagens, permite ao projetista realizar simulações muito rapidamente para otimizar a forma e as dimensões dos componentes, em função dos estudos efetuados.

Os resultados destas simulações podem ser visualizados em forma de análise de tensões, deformações e coeficientes de segurança, permitindo tomar decisões mais sustentadas sobre o *design* do componente. Este método de análise permite apresentar produtos de melhor qualidade e reduzir custos com materiais, sem comprometer as suas funcionalidades.

Neste trabalho, foi usado o módulo de *Stress Analysis*, da Autodesk Inventor Professional, para a realização de análises por elementos finitos, tendo como objetivo a otimização dos modelos ou montagens. Este módulo é composto por um conjunto de ferramentas que simulam as condições de funcionamento de um componente ou de montagens, após definir a aplicação das cargas, pressões, tipos de apoio e apresentação de resultados.

No projeto, este tipo de análise é bastante útil, dado que permite definir as condições de funcionamento do componente ou sistema/subsistema, e, a partir da análise, verificar quais são as zonas do modelo que estão abaixo dos requisitos mínimos de segurança ou resistência exigidos.

Com esta ferramenta de trabalho, é possível perceber quais os componentes que tem de ser reforçados, ou se é necessário substituir o material de um determinado componente por outro com uma resistência mecânica superior. Por outro lado, também é possível otimizar as peças fazendo-se estudos para reduzir as espessuras dos componentes, por exemplo, com o objetivo de reduzir a massa do componente, em zonas em que os coeficientes de segurança apresentem um valor muito superior ao

estipulado. Um valor de segurança de 1 define que estamos a trabalhar sobre o limite elástico do material. Em condições normais de projeto mecânico trabalhamos com valores superiores a 1, dependendo o seu valor do nível de segurança exigido para o projeto.

Seguidamente faz-se uma descrição de toda a informação considerada importante para o processo de conceção e desenvolvimento do produto base rotativa, ou seja, converter os requisitos do produto em requisitos mais detalhados e definir as suas características, de forma a assegurar que o seu fornecimento satisfaz as necessidades e expectativas dos clientes.

### 3.1.1 Breve apresentação do produto objeto de desenvolvimento

Na presente dissertação, o produto que foi objeto de modelação em CAD 3D, cálculo estrutural e otimização, foi uma base rotativa para ser montada sob os bancos do condutor e passageiro do veículo Volkswagen T5, transformado em autocaravana. Na Figura 3-1 apresentam-se algumas imagens da instalação de bancos do condutor e passageiro sobre sistemas de bases rotativas da concorrência em vários modelos de autocaravanas.



Figura 3-1 – Autocaravanas com bancos montados sobre sistemas de bases rotativas [57].

Na Figura 3-2 pode-se observar um protótipo da base rotativa referente ao projeto deste trabalho que foi executado durante a fase de ensaios destrutivos (ECE – R14) e ensaios funcionais e durabilidade.

Na Figura 3-3 estão ilustradas imagens que permitem uma visão geral do produto base rotativa e uma perceção das principais funcionalidades para satisfazer o utilizador final. A função rotação pode ser observada nas ilustrações da Figura 3-3 (a) e da Figura 3-3 (b), respetivamente, a posição boqueada para permitir segurança ao utilizador quando o veículo está em marcha e a posição rodada para permitir acessibilidade ao utilizador do espaço detrás da posição de bloqueio. Nas ilustrações da Figura 3-3 (c) e da Figura 3-3 (d), pode-se observar a função de bloqueio da rotação da base rotativa, respetivamente, a posição bloqueada pela ação da chapa mola aplicada na alavanca e a posição não bloqueada após a alavanca ter sido acionada. Refere-se que, por questões de segurança do utilizador, a alavanca foi concebida para ser acionada no

sentido ascendente dado que outra opção de alavanca com acionamento descendente foi considerada mais propensa a acionamentos acidentais durante a marcha do veículo.



Figura 3-2 – Protótipo de uma base rotativa executada na fase de ensaios.

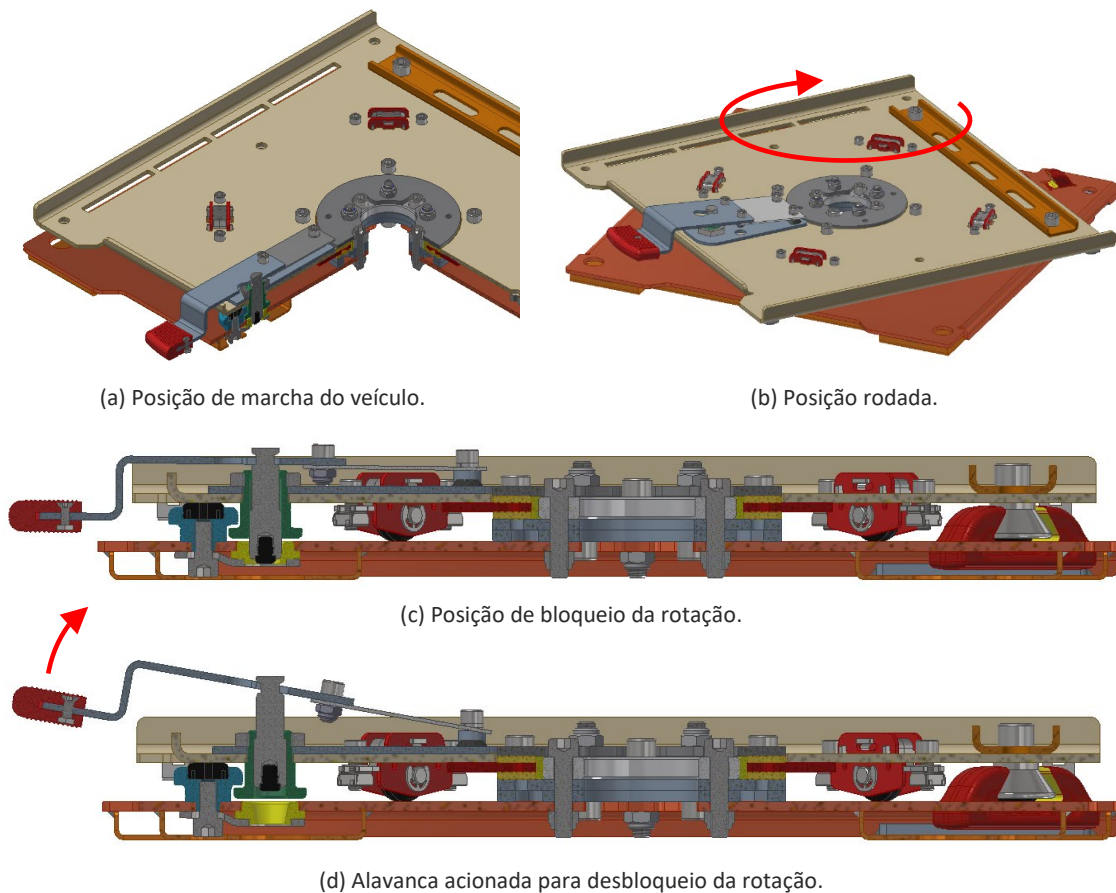
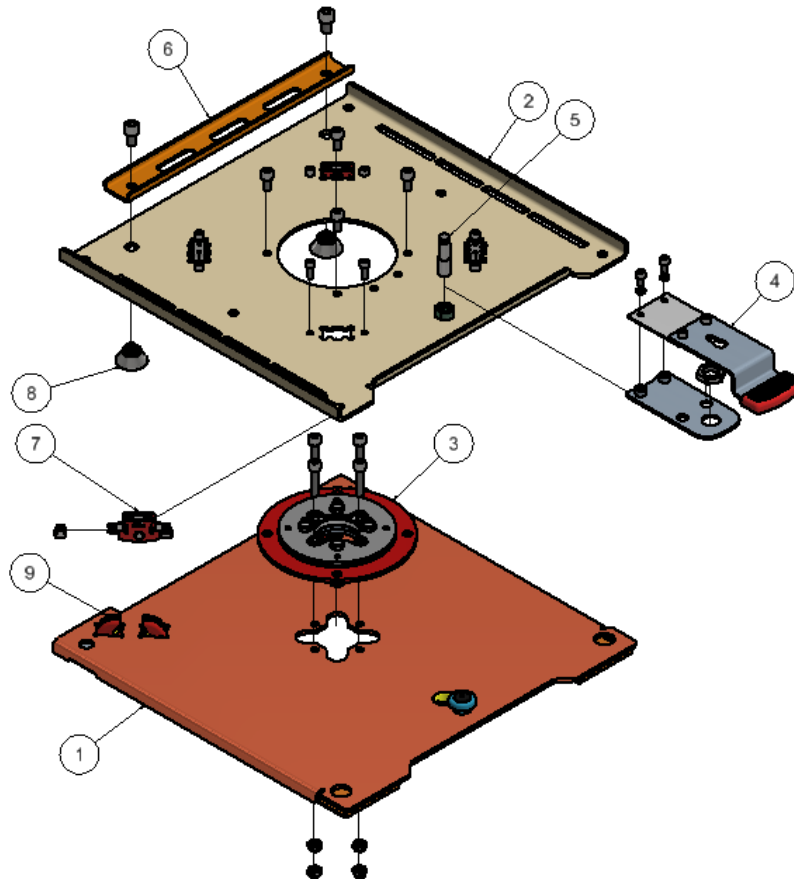


Figura 3-3 – Apresentação das principais funções da base rotativa para o utilizador.

Para melhor se compreender o conceito do produto desenvolvido neste projeto e visualizar as soluções adotadas, apresenta-se na Figura 3-4 uma vista explodida com a descrição dos principais componentes e subsistemas da base rotativa que serão objeto de descrição mais detalhada mais à frente neste trabalho.



1 – Subconjunto inferior da base rotativa; 2 – Subconjunto superior da base rotativa; 3 – Subconjunto do sistema rotativo (anel rotativo); 4 – Subconjunto da alavanca do sistema de bloqueio da rotação da base; 5 – Pino de bloqueio da rotação; 6 – Reforço superior da estrutura; 7 – Subconjunto do rodízio; 8 – Ancoragem superior e 9 – Ancoragem inferior.

Figura 3-4 – Vista explodida dos principais componentes e subsistemas da base rotativa.

### 3.1.2 Caracterização da empresa

O presente trabalho visa satisfazer uma necessidade real de uma empresa de produção de componentes automóveis sediada na zona do Grande Porto que, para além de produzir componentes de automóveis, também desenvolve produtos novos internamente ou através do “outsourcing”.

Esta empresa foi fundada na década de 60 e está certificada pelas normas ISO 9001, IATF 16949:2016 e IRIS. Atualmente a empresa é constituída por três unidades fabris, com as seguintes funções: um pavilhão para produção de componentes metálicos, um pavilhão afeto à produção dos componentes estruturais dos bancos e outro para a montagem final dos assentos. Nesta empresa pode-se encontrar vários tipos de equipamentos como máquinas de corte CNC, máquinas de corte por laser, máquinas

de soldadura de alta frequência, máquinas de soldadura por ultrassom, máquinas de soldadura MIG, TIG e soldadura por resistência “*spot welding*”, robôs de soldadura, máquinas para bordar e costurar, prensas hidráulicas, prensas mecânicas, equipamento para corte e dobragem de tubos e placas de aço, equipamentos de aparafusamento com controlo de binário, máquinas de injeção de espuma, entre outros.

Os principais mercados desta empresa incluem vários sectores da mobilidade, comercializando produtos para a indústria automóvel e para o mercado ferroviário, onde se destacam os assentos para autocarros, autocaravanas, metros, comboios, veículos de emergência (ambulâncias), veículos militares e veículos sem licença de condução – VSP (do francês *Voiture Sans Permis*).

### 3.1.3 Objetivos do trabalho prático

No desenvolvimento do projeto de um sistema rotativo designado por base rotativa para bancos de veículos automóveis da categoria M1 (autocaravanas), foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o caderno de encargos e requisitos do cliente de modo a converter essas exigências num produto final que satisfaça as necessidades do cliente;
- Identificar o estado da concorrência em produtos idênticos (*benchmarking*);
- Respeitar a regulamentação e normativas associadas ao produto a projetar;
- Identificar os diferentes requisitos técnicos que o produto deve assegurar em termos funcionais, requisitos legais e requisitos de homologação;
- Analisar as restrições tecnológicas associadas ao seu processo de desenvolvimento ou produção;
- Alcançar as especificações técnicas, para que seja possível fabricar com os processos produtivos disponíveis e capacidades dos fornecedores;
- Realizar análises numéricas pelo MEF para otimizar o produto de forma a que esta seja competitivo em termos de produto e custo, através da otimização de componentes e redução de peso;
- Realizar ensaios de resistência estática ao produto físico (ensaio destrutivo) na empresa e num organismo de homologação para validar o comportamento estrutural do produto.

### 3.1.4 Identificação das especificações técnicas e requisitos do produto

Conforme já foi descrito no capítulo 2 (ver § 2.10.1), as atividades básicas de um projeto de um produto seguem um ciclo iterativo do tipo: planejar, conceber, construir, testar, otimizar e produzir, podendo este ciclo iterativo ser repetido várias vezes em algumas das suas fases, até que o produto corresponda aos objetivos funcionais e de custo.

O processo de identificação dos requisitos do cliente a partir das necessidades expressas, é apenas uma parte do desenvolvimento do produto e está ligada com a criação e seleção do conceito e o estabelecimento das especificações técnicas do produto. Considera-se também importante realçar que cada área da empresa, nomeadamente Marketing, Engenharia, Produção, Qualidade, Pós-venda, vê o produto por uma perspetiva diferente mas complementar, e pode contribuir com informação relevante que deverá ser integrada nos requisitos funcionais do produto [24].

No processo de identificação dos requisitos do cliente deve-se ter em conta os seguintes aspetos [24]:

- Focar no produto as necessidades do cliente;
- Identificar as necessidades latentes e explícitas;
- Existir a capacidade de justificar as especificações técnicas do produto;
- Assegurar que nenhuma necessidade crítica é omissa ou negligenciada;
- Assegurar que as necessidades do cliente são compreendidas por todos os intervenientes do projeto.

Resumidamente, este processo de identificação de necessidades do cliente pode ser dividido nos seguintes passos [24]:

- Recolher a informação (dados brutos) dos clientes;
- Interpretar a informação em termos de necessidades dos clientes;
- Classificar as necessidades numa hierarquia de primárias, secundárias e terciárias;
- Definir a importância relativa das necessidades;
- Refletir sobre os resultados da análise das necessidades dos clientes.

O desenvolvimento de um produto, nomeadamente, a fase da conceção, assenta num princípio básico que consiste na conversão das necessidades dos clientes em especificações técnicas, tais como as funções do produto, materiais, processos, entre outras. Para além dos requisitos que dependem diretamente do cliente, os requisitos do produto devem regra geral conter aspetos tais como [23]:

- Características funcionais do sistema e subsistemas;
- Características de ordem temporal (fiabilidade, manutibilidade);
- Características psicológicas (estilo, cor);
- Características dimensionais;
- Condições de instalação;
- Normas e regulamentos aplicáveis;
- Requisitos exigidos na receção do produto;

- Normalização do produto/componentes;
- Processos de fabrico versus quantidades de produção.

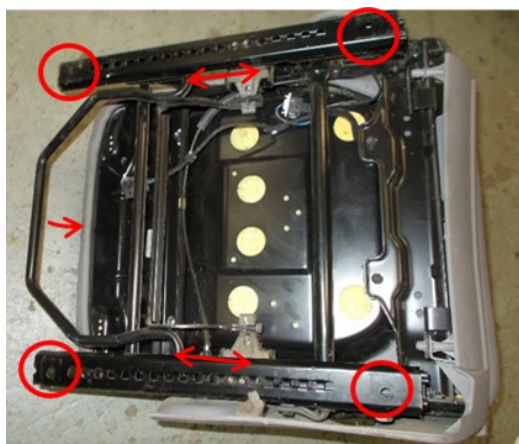
A área da engenharia do projeto tem um papel muito importante na definição física do produto e na resposta às necessidades dos clientes, sendo esta, responsável pelo projeto e execução dos desenhos de engenharia do produto.

Tendo em atenção, a informação apresentada anteriormente, o produto base rotativa foi projetado tendo em conta as exigências de projeto e execução do produto para ser incorporado nos bancos do veículo autocaravana Volkswagen T5.

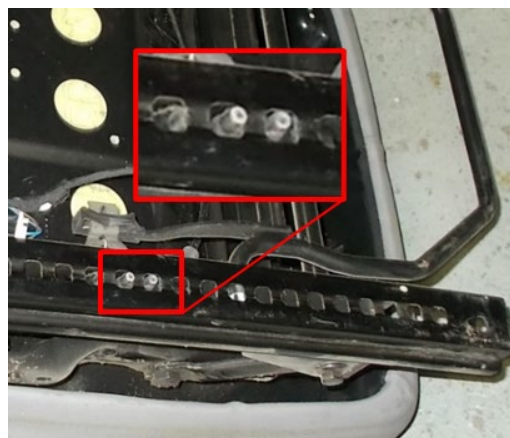
Seguidamente, enumeram-se os principais requisitos e as principais condicionantes relativas às funções e parâmetros geométricos do produto que fazem parte do caderno de encargos:

- Os acabamentos superficiais dos materiais devem ser possuir proteção à corrosão;
- As bases rotativas devem ser instaladas no veículo Volkswagen T5 entre os bancos do condutor e do passageiro, e as bases suporte fixadas ao piso do veículo;
- A base rotativa deverá ter uma altura útil máxima 35 mm (altura entre as interfaces banco da viatura e a base suporte do veículo);
- O sistema de bloqueio da rotação da base rotativa deve ser concebido de modo a não existir folgas na rotação no banco ou vibrações suscetíveis de ruídos;
- O sistema de bloqueio da rotação da base rotativa deverá bloquear apenas na posição de condução;
- O acionamento do sistema de bloqueio da rotação da base rotativa deve ser concebido de forma a não permitir o desengate acidental deste sistema durante a marcha do veículo;
- O sistema de rotação da base rotativa deverá ser isento de manutenção;
- Todos os subsistemas da base rotativa devem ser modulares, nomeadamente os subsistemas: rotativo, bloqueio, alavanca de desbloqueio, ancoragens de segurança, rodízios de rotação da base (o objetivo é aplicar estes subsistemas noutras bases para outros veículos);
- A geometria da base rotativa deverá ter em atenção a passagem de cablagens elétricas (possuir furo central de diâmetro mínimo 50 mm), assim como a geometria adequada para não interferir com o acionamento do travão de mão do veículo (Figura 3-5 (c) e Figura 3-5 (d));
- O sistema rotativo deve ser concebido de forma a não deteriorar os acabamentos das superfícies metálicas dos componentes em contato com este;
- A massa do sistema completo, base rotativa não deverá ser superior a 18 kg;

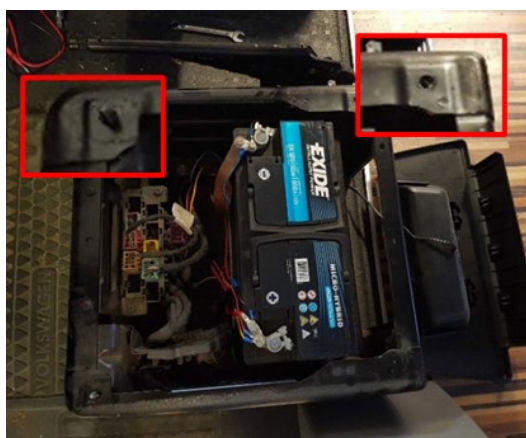
- A parte inferior da base rotativa deve ser concebida de forma a atender as ligações aparafusadas existentes na parte superior da base suporte da viatura, ou seja, a existência de dois parafusos na parte frontal e duas porcas na parte posterior (Figura 3-5 (c) e Figura 3-5 (d));
- A parte inferior da base rotativa deve ser concebida de forma a não interferir com a altura das baterias elétricas eventualmente existentes no interior da base suporte da viatura (Figura 3-5 (c));
- A parte superior da base rotativa deve ser concebida de forma a permitir uma correta ligação aparafusada nas extremidades das corredeiras inferiores e a possibilitar o acionamento basculante do manípulo frontal relativo ao avanço e recuo do banco. Os pinos do sistema de bloqueio das corredeiras que penetram as calhas perfuradas inferiores não devem intercetar a parte superior da base rotativa (Figura 3-5 (a) e Figura 3-5 (b));
- A função segurança da base rotativa deve ser validada para veículos da categoria M1. A homologação do produto deverá estar em conformidade com os regulamentos ECE R14 e R17 e deverá ser efetuada por um organismo de aprovação/certificação alemão.



(a) Vista inferior do banco - corredeiras.



(b) Vista inferior do banco – pinos de bloqueio.



(c) Vista superior da base da viatura.



(d) Vista superior da base da viatura – travão de mão.

Figura 3-5 – Vistas inferiores do banco com sistema de acionamento e bloqueio das corredeiras.

### 3.1.5 Legislação necessária para o desenvolvimento do projeto

A legislação aplicável ao desenvolvimento do produto, base rotativa, para veículos da categoria M1 (neste caso autocaravanas) é aquela que opera no espaço comunitário europeu e que já foi referida no capítulo 2 (ver § 2.3.1). No entanto, é importante referir que existem variantes das normas relativas à homologação de estruturas e componentes para veículos de transporte coletivo, mesmo dentro do espaço comunitário, sendo regra geral adotadas as exigências da norma mais restritiva, garantindo-se assim a segurança e fiabilidade do produto.

De acordo com o caderno de encargos, devem ser respeitadas na construção do produto as diretivas europeias (regulamentos) seguintes:

- ECE - R 14 (Diretiva 76/115/EEC - *Seat Belt Anchorage*): Disposições uniformes relativas a homologação de veículos no que se refere a fixação dos cintos de segurança [36, 40];
- ECE - R 17 (Diretiva 74/408/EEC - *Seat Strength & Head Restraints*): Disposições uniformes relativas a homologação de veículos no que se refere as fixações dos bancos e aos apoios de cabeça [38, 42].

A diretiva 76/115/EEC será analisada em detalhe neste trabalho, por ser a base das especificações do ensaio de resistência estática (ensaio de resistência à tração das fixações dos cintos dos assentos) pelo qual o produto é validado e permitirá definir as condições de simulação do modelo do produto pelo MEF.

Complementarmente, será tomada como referência a experiência obtida na realização de ensaios análogos efetuados noutros assentos no organismo de aprovação UTAC, sediado em França.

Relativamente à validação pela diretiva 74/408/EEC (regulamento ECE - R17), o conjunto banco e base rotativa deve ser fixado firmemente a um carrinho de ensaio guiado por um trilho para ser submetido a uma situação de impacto dinâmico.

Resumidamente, este ensaio frequentemente designado por ensaio de trenó, permite avaliar a resistência dos sistemas de bloqueamento aos efeitos de inércia quando uma aceleração longitudinal horizontal com um valor de 20 g for aplicada ao conjunto (banco e base rotativa), para a frente e para trás, e não se verificar um desengate dos sistemas de bloqueamento.

Na Figura 3-6 está ilustrado um ensaio do trenó para verificar a estabilidade das fixações do conjunto banco e base rotativa de acordo com o regulamento ECE - R17. Este ensaio foi realizado numa bancada de ensaio com quatro bancos, dois deles montados na direção frontal e os outros dois na direção traseira. Com base nos critérios de validação da regulamentação referida para este ensaio, não pode ocorrer nenhuma falha durante ou após o ensaio, na estrutura do assento, nas ancoragens, nos sistemas de ajuste do banco e nos dispositivos de travamento ou bloqueio. No entanto, são permitidas deformações plásticas, incluindo fraturas, se estas não causarem um risco adicional de ferimentos aos ocupantes em caso de impacto.



Figura 3-6 – Ensaio do trenó realizado ao conjunto banco e base rotativa.

Embora este ensaio faça parte processo de homologação do produto, não será simulado virtualmente, ou seja, apenas será validado no laboratório de ensaios na Alemanha.

### 3.1.6 Descrição da Diretiva 76/115/EEC (Regulamento ECE - R14)

A Diretiva do Conselho das Comunidades Europeias 76/115/CEE (corrigida pela diretiva 2005/41/EC) é equivalente ao Regulamento ECE - R14 da CEE, salvo algumas exceções relativas à validação do ensaio. Esta diretiva, relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros respeitantes às fixações dos cintos de segurança dos veículos a motor, define as posições das fixações dos cintos de segurança na estrutura do assento, e define ainda os métodos de ensaio aos quais são sujeitas as fixações para serem certificadas.

De acordo com a diretiva, as fixações são as partes da estrutura do veículo ou do banco ou quaisquer outras partes do veículo nas quais devem ser fixados os cintos de segurança.

O cinto de segurança ou simplesmente cinto é um conjunto de precintas com fivela de segurança, dispositivos de ajustamento e elementos de fixação, que pode ser fixado no interior de um veículo, concebido de maneira a reduzir o risco de lesões para o utente em caso de colisão ou desaceleração brusca do veículo, limitando as possibilidades de movimento do corpo do utente. O cinto engloba igualmente qualquer dispositivo de absorção de energia ou de retração do cinto [36, 40].

As fixações dos cintos de segurança devem ser concebidas, executadas e montadas de forma a possibilitar uma correta instalação dos cintos, reduzir o risco de deslizamento do cinto e reduzir o risco de deterioração da cinta por contacto com as partes rígidas e cortantes da estrutura do banco ou do veículo.

A “fixação efetiva” é o ponto onde uma precinta deveria estar ligada para dar a mesma posição que a prevista quando o cinto está a ser utilizado, podendo este ponto ser ou não a fixação real, conforme a configuração do cinto e o modo como este está ligado à

fixação. Os pontos efetivos de fixação do cinto são os que devem ser utilizados nos ensaios de homologação.

A diretiva define ainda uma série de parâmetros relativos à posição dos bancos, nomeadamente pontos e linhas de referência para a sua validação que não serão objeto de aplicação nestes ensaios.

### 3.1.7 Especificações do ensaio de tração com base na Diretiva 76/115/EEC (ECE - R14)

Seguidamente será efetuada uma breve descrição das especificações do ensaio de resistência estática das fixações do cinto de segurança para um veículo da categoria M1, de acordo com a diretiva 76/115/EEC e o Regulamento ECE - R14 [36, 40]:

- Quando o encosto do banco é reclinável, este deverá ser bloqueado de modo a formar um ângulo efetivo tão próximo quanto possível de  $25^\circ$  para os veículos desta categoria. O ângulo referido é formado entre a linha vertical que passa no ponto H (R) e a linha inclinada de torso (Figura 3-8);
- Todas as fixações relativas ao cinto do banco devem ser ensaiadas simultaneamente;
- A força de tração deve ser aplicada no sentido correspondente ao lugar sentado segundo um ângulo de  $10^\circ \pm 5^\circ$  acima da horizontal num plano paralelo ao plano médio longitudinal do veículo;
- A aplicação das cargas superior (dorsal) e inferior (ventral), deve ser efetuada num prazo tão curto quanto possível e as fixações devem resistir às cargas especificadas durante pelo menos 0,2 segundos;
- A fixação superior e a fixação inferior oposta do mesmo cinto devem ser solicitadas por um dispositivo de tração conforme previsto no regulamento;
- As fixações inferiores devem ser solicitadas por um dispositivo de tração conforme previsto no regulamento (Figura 3-6);
- Nos veículos da categoria M1 será aplicada uma carga de ensaio de  $1350 \pm 20$  daN aos dispositivos de tração superior e inferior que reproduzem a posição e a geometria do cinto nas zonas dorsal e ventral no banco (Figura 3-7);
- Nos bancos cujas fixações se encontrem posicionadas na sua totalidade na estrutura do banco ou repartidas entre a estrutura do veículo e a do banco, as cargas indicadas para os dispositivos de tração devem ser complementadas com uma força igual a vinte vezes o peso do banco completo (incluindo todos os componentes ou sistemas agregados a este);
- De acordo com a presente diretiva, no final do ensaio, todas as fixações devem resistir aos carregamentos apresentados anteriormente. Admite-se uma deformação permanente, incluindo uma rutura parcial de uma fixação ou da zona que a envolve, na condição de que a força prescrita tenha sido mantida durante o tempo previsto;

- Para os veículos da categoria M1 esta diretiva define que, no decurso do ensaio, a fixação efetiva superior deve estar situada acima de um plano horizontal que passe pelo ponto C, indicado na Figura 3-8;
- O regulamento ECE - R14 impõe uma restrição relativa à fixação superior para os veículos de categoria M1 com massa total inferior a 2,5 toneladas. Neste caso, se a fixação superior estiver ligada à estrutura do banco, a fixação efetiva superior não se deve deslocar durante o ensaio para além de um plano transversal que passe pelo ponto H e pelo ponto C, indicados na Figura 3-8;
- O regulamento ECE - R14 impõe ainda mais uma restrição relativa à fixação superior para os veículos de categoria M1 com massa total igual ou superior a 2,5 toneladas. Neste caso, se a fixação superior estiver ligada à estrutura do banco, a fixação efetiva superior não deve deslocar-se durante o ensaio para além de um plano inclinado que passa pelo ponto H, formando este um ângulo de  $10^\circ$  com o plano transversal que passa na linha definida pelos pontos H e C, conforme indicado na Figura 3-8.

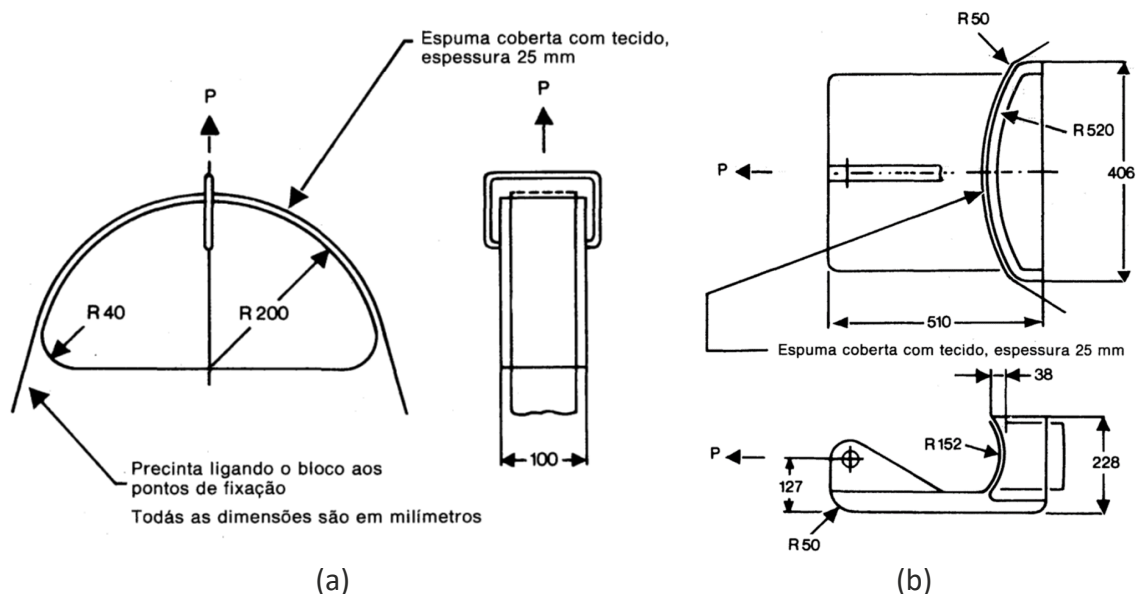


Figura 3-7 – Cálculo Dimensões dos dispositivos de tração: (a) superior; (b) inferior [36, 40].

No projeto do presente trabalho, verifica-se que as fixações do cinto estão repartidas entre a estrutura do veículo e a estrutura do banco, nomeadamente a fixação superior não está ligada à estrutura do banco, mas sim à estrutura do veículo. Logo, as restrições referidas na Figura 3-8 não são aplicáveis aos ensaios de resistência estática a efetuar ao conjunto do banco e base rotativa.

De acordo com a regulamentação referida anteriormente, as cargas superior e inferior, devem ser complementadas com uma força de vinte vezes o peso total do conjunto banco e base rotativa. No entanto, apenas o dispositivo de tração inferior foi majorado desta força dado que tem sido a prática adotada nos vários ensaios análogos que esta empresa tem realizado nos organismos de homologação de bancos, nomeadamente, a UTAC - França, IWW Trier - Alemanha e IDIADA - Espanha.

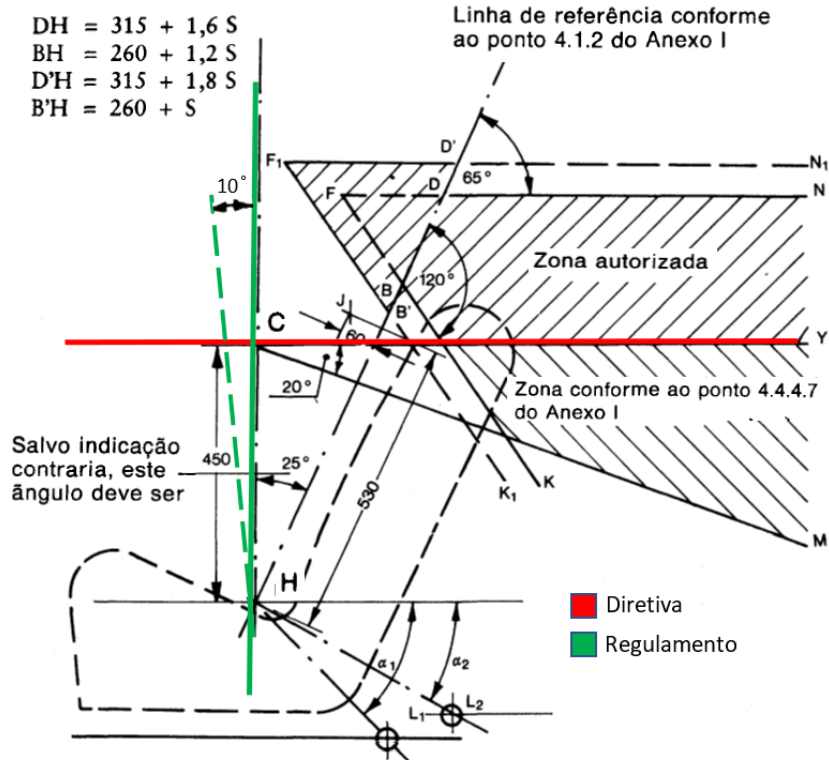


Figura 3-8 – Restrições definidas pela diretiva 76/115/EEC e pelo regulamento ECE – R14 (adaptado de [36, 40]).

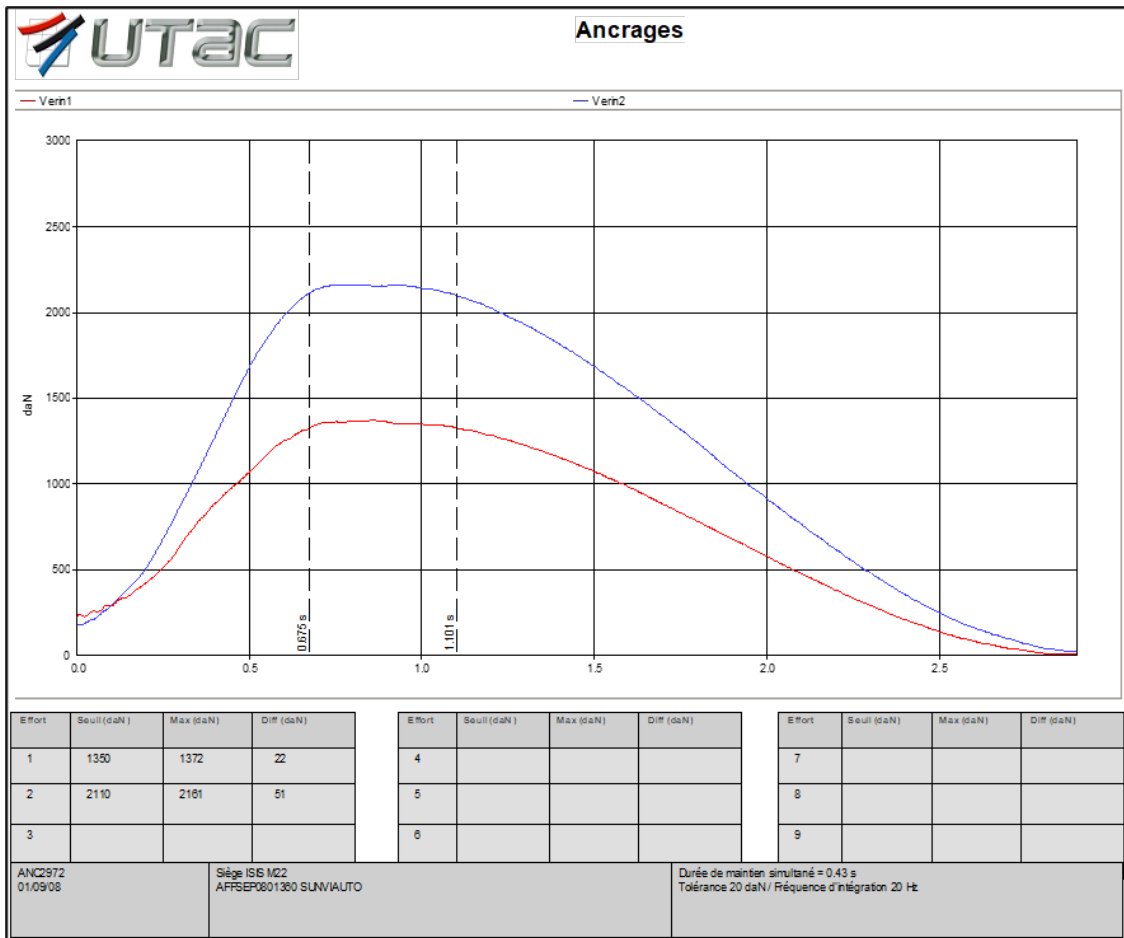


Figura 3-9 – Evolução dos carregamentos dos dispositivos de tração num ensaio da UTAC (facultado pela empresa).

Como exemplificação do anteriormente referido apresenta-se, no gráfico da Figura 3-9, uma representação da evolução das forças aplicadas num banco ensaiado na UTAC. A curva com linha azul representa a evolução da força da zona dorsal (superior) e a curva com linha vermelha representa a evolução da força da zona ventral (inferior), atingindo estas durante um tempo superior a 0,2 s, os valores máximos de 2110 daN e 1372 daN, respetivamente. Como se pode observar no gráfico, apenas a força representada pela linha azul foi majorada em função do peso do banco.

### 3.1.8 Benchmarking de produtos concorrentes

Existem vários tipos de “*benchmarking*”, assim como é facilmente possível encontrar imensa literatura ou dissertações sobre este tema. Neste projeto fez-se um estudo de produtos concorrentes baseada no “*benchmarking* competitivo”, que incidiu sobretudo sobre a análise comparativa e ponderada dos produtos dos concorrentes diretos, porque à medida que o mercado se torna mais global, as empresas apercebem-se que têm de igualar ou exceder a qualidade dos produtos da concorrência.

Assim, o desenvolvimento do produto base rotativa para os bancos do condutor e passageiro de veículos da categoria M1 (autocaravanas) com destino ao mercado europeu, nomeadamente da Alemanha e Inglaterra, foi precedido de uma análise de mercado efetuado pela empresa com a colaboração de um dos seus parceiros, com sede na Alemanha.

Este estudo incidiu sobre os produtos dos concorrentes mais diretos de forma a poder analisar dois fatores que são muito importantes em qualquer produto: qualidade e preço. Na Figura 3-10 estão ilustrados alguns exemplos de bases rotativas comercializadas no mercado europeu, cujos desenhos foram facultados pelo cliente/parceiro sediado na Alemanha.

Ao fator qualidade associa-se não só uma correta seleção de materiais e processos de fabrico, mas também todo o trabalho de pesquisa e desenvolvimento do produto. Este fator qualitativo foi validado e medido através de ensaios de durabilidade e testes destrutivos para a obtenção de certificados do produto, que por sua vez estão associados à segurança e credibilidade do mesmo.

Relativamente ao fator preço, refere-se que este não depende só das características do produto. Por exemplo, o facto de a empresa que desenvolve o produto não estar no mesmo país das entidades que fazem os ensaios de certificação dos produtos e das empresas produtoras de veículos tem consequentemente custos acrescidos no produto, levando inevitavelmente a empresa a investir em qualidade ou fatores de diferenciação.

Um dos fatores de diferenciação é sem dúvida o peso do produto que é também um dos objetivos a ter em atenção no seu desenvolvimento. A minimização do peso significa também reduzir o peso do veículo e consequentemente aumentar a eficiência do veículo e reduzir a pegada ecológica, assim como diminuir os custos de transporte.

O facto de as empresas possuírem laboratórios de ensaios próprios para o desenvolvimento e certificação de produtos pode ser uma vantagem competitiva para as mesmas, sendo para isso necessário que os laboratórios estejam também certificados.

Embora não esteja certificado, a empresa em causa possui um equipamento para realizar ensaios de tração das fixações dos cintos dos bancos, o que permite um desenvolvimento mais rápido e fiável do produto. Neste trabalho, previamente à realização de ensaios nas entidades certificadoras, será realizado um estudo numérico de elementos finitos e ensaios de tração reais, de modo a evitar ensaios falhados de homologação e o elevado desperdício de tempo e custos associados à repetição de ensaios.

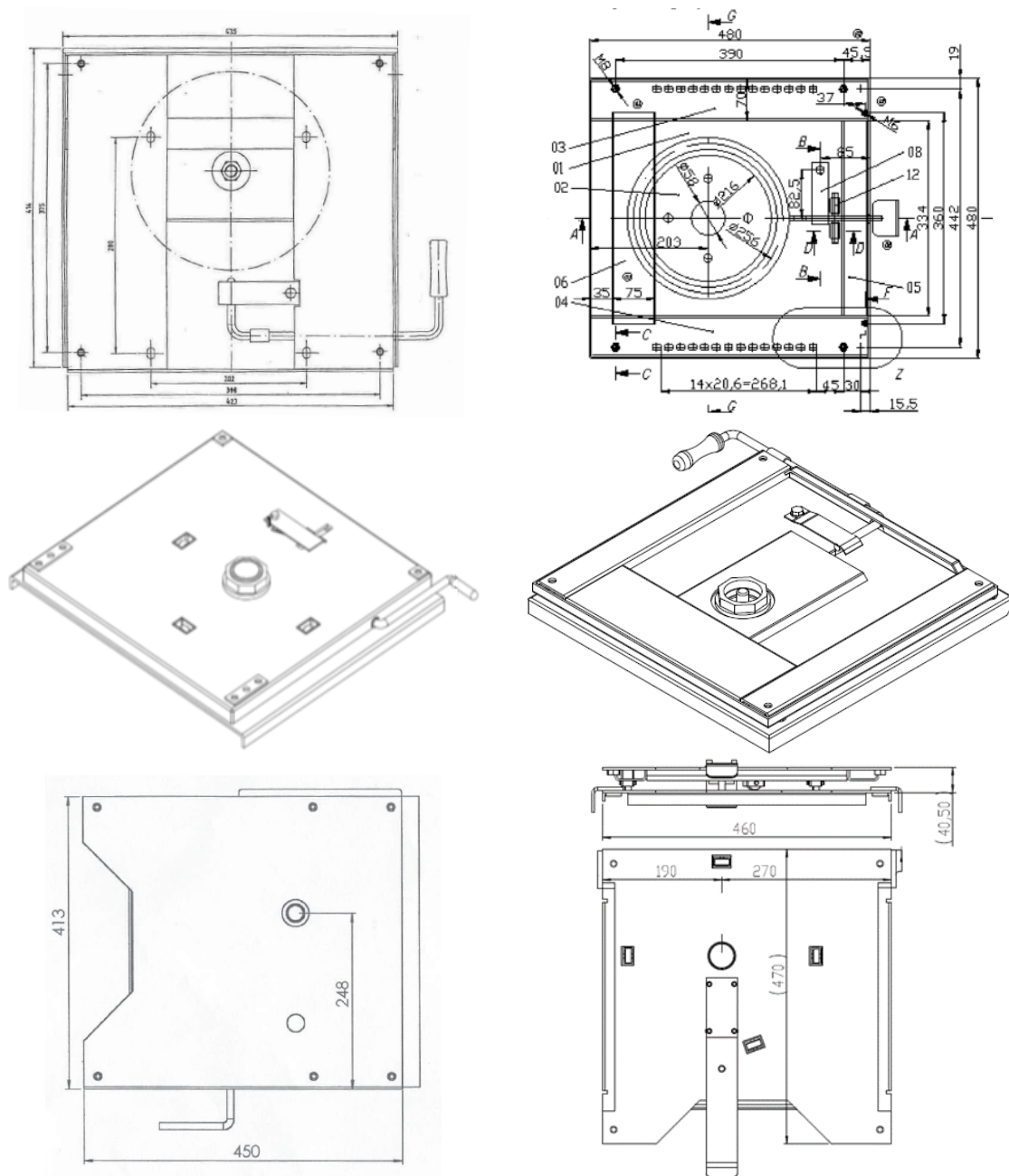


Figura 3-10 – Exemplos de bases rotativas comercializadas no mercado europeu (desenhos cedidos pelo cliente).

Por ordem decrescente de importância foram tidos em conta na análise dos produtos os atributos: segurança, peso, custo, facilidade de rotação, ausência de folgas (para evitar vibrações no banco) e corrosão dos materiais. Entende-se por produtos seguros aqueles com certificado de homologação ou que foram ensaiados com sucesso nas instalações da empresa (ensaio de tração das fixações dos cintos).

O estudo consistiu na determinação do índice de importância dos atributos referidos anteriormente através de um cálculo ponderado. Após este cálculo, procedeu-se à adimensionalização dos valores das propriedades/características de cada produto (valores quantitativos e qualitativos) e finalmente determinou-se o índice de desempenho de cada produto.

Resumidamente, concluiu-se que as bases rotativas com melhor índice de desempenho foram as que apresentaram melhores características de segurança e custo. Sendo o fator segurança considerado muito importante, verificou-se que na amostra de produtos analisados, as bases rotativas com menor peso para veículos da categoria M1 não passaram no ensaio de tração efetuado na empresa (a amostra continha bases rotativas com massas entre 14 e 22 kg). Na Figura 3-11 pode-se verificar o resultado de um ensaio efetuado a uma base rotativa para veículos da categoria M1, de massa igual a 14,5 kg e cujo fabrico tem origem num dos países do leste da europa. Resumidamente, o ensaio resultou no colapso da parte superior da base rotativa e falha no sistema de bloqueio da rotação.



(a) Registo após ensaio



(b) Deformação e rotação

Figura 3-11 –Base rotativa da concorrência ensaiada à tração.

De seguida, apresenta-se um caso de “benchmarking” relativo a uma base rotativa certificada para veículos (Volkswagen T5 e T6), das categorias M1 e N1 (ver definições § 2.3.1), que é produzida por uma empresa alemã, Aguti Produktentwicklung & Design GmbH. Esta empresa desenvolve e fabrica sistemas de assentos para fabricantes de carroçarias de autocaravanas e veículos especiais que são usados em toda a Europa e internacionalmente em vários veículos. Para além dos assentos e sistemas para autocaravanas, a Aguti é especializada na conceção, construção e produção de assentos personalizados para uma vasta gama de veículos. Em termos de produção, a

empresa pode fazer produções únicas ou produções série baseadas em protótipos criados pela própria empresa.

A análise deste produto concorrente foi considerada de grande interesse para o “benchmarking” dado que, para além de ser um produto certificado foi desenvolvido e é produzido por uma empresa sediada na Alemanha, ou seja, um forte concorrente direto no mercado alemão. A informação disponível para análise deste produto é sobretudo baseada no relatório de homologação, nomeadamente nos resultados dos ensaios de resistência estática das fixações do cinto de segurança para veículos das categorias M1 e N1, de acordo com o Regulamento ECE - R14 e nas características definidas nos desenhos dos produtos anexos ao relatório.

Na Figura 3-12 estão ilustrados os produtos desenvolvidos pelo fabricante alemão Aguti, nomeadamente a base rotativa Figura 3-12 8ª) e a base suporte Figura 3-12 (b), que foram submetidos aos ensaios de tração ECE – R14 e certificados por um laboratório de homologação alemão, GTÜ (*Gesellschaft für Technische Überwachung mbH*). Os bancos ilustrados nas imagens (c) e (d) da Figura 3-12 são produtos desenvolvidos pelo fabricante do veículo Volkswagen T5.

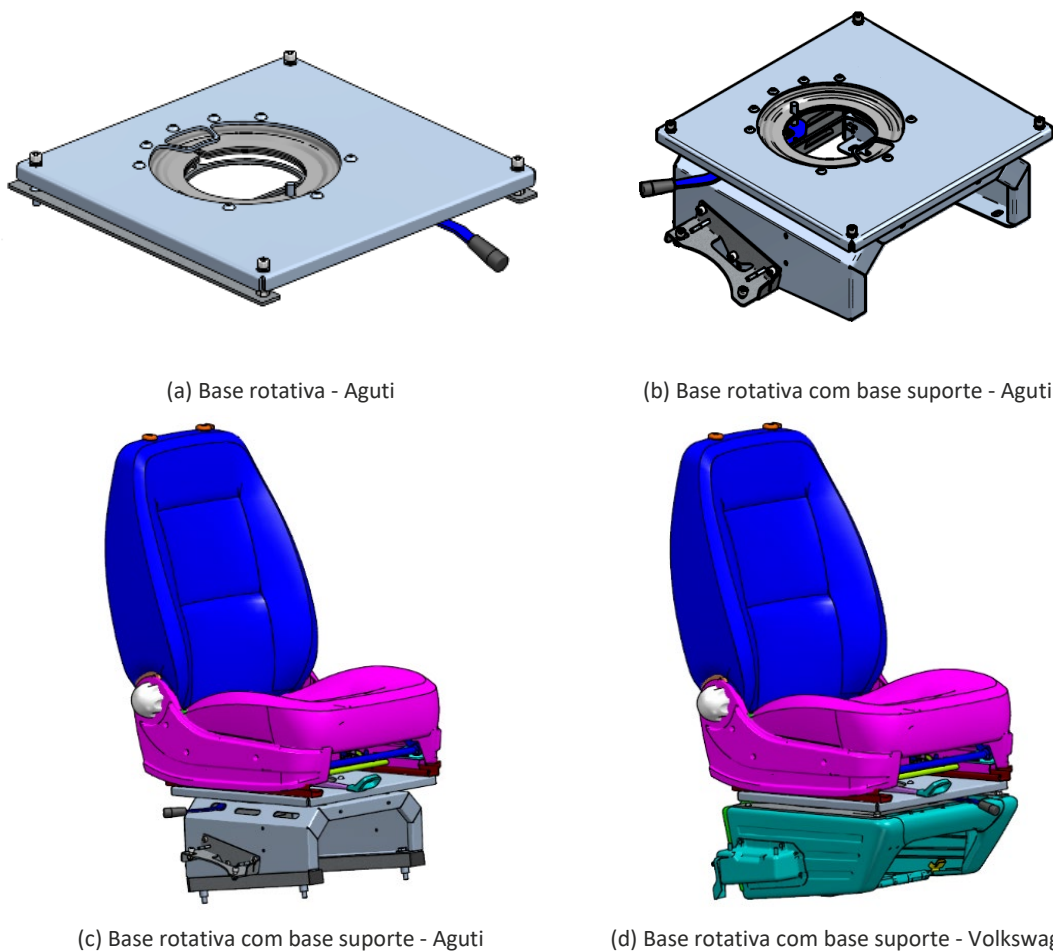
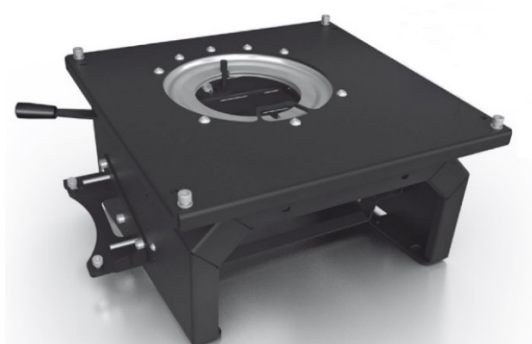


Figura 3-12 – Apresentação dos produtos homologados - Aguti [57].

Nas imagens da Figura 3-13 apresentam-se alguns detalhes técnicos dos produtos base rotativa e base suporte do fabricante Aguti. Na Figura 3-13 (a) pode-se observar uma

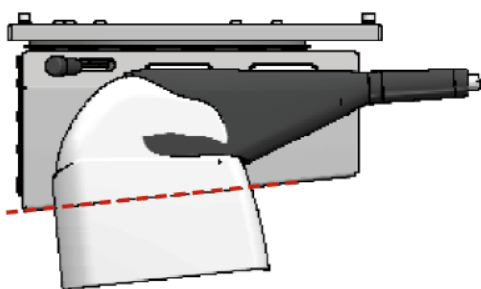
alavanca de acionamento lateral do sistema de desbloqueio da rotação da base e o suporte concebido para a instalação do travão de mão. Destaca-se a importância da localização deste suporte por forma a não existir interferência entre o travão de mão e a base rotativa durante a rotação, conforme ilustrado na Figura 3-13 (c). Na Figura 3-13 (b) pode-se observar que a instalação de baterias elétricas no interior da base suporte é facilitada pelo acesso na parte posterior da base. Após a instalação este espaço é fechado com uma tampa aparafusada à base suporte, como se pode observar na Figura 3-13 (d).



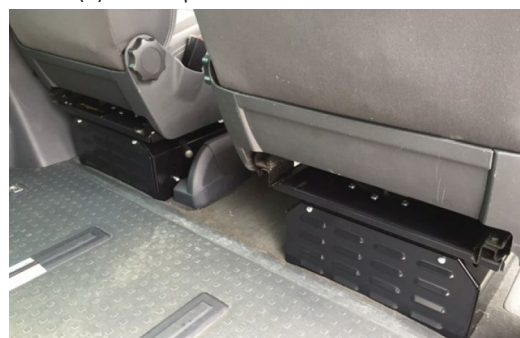
(a) Base rotativa e base suporte produzidos pela Aguti.



(b) Base suporte com baterias elétricas.



(c) Travão de mão na posição travado.



(d) Tampa para acesso ao interior da base suporte

Figura 3-13 – Apresentação de detalhes técnicos dos produtos homologados - Aguti [57].

As imagens da e da Figura 3-15 obtidas após os ensaios de tração ECE – R14, permitem uma visão global em termos qualitativos do comportamento estrutural da base rotativa e da base suporte do fabricante Aguti. Na imagem da Figura 3-14 pode-se observar que a base rotativa – Aguti, montada sobre a base suporte do fabricante do veículo Volkswagen T5 e ensaiada em plataforma rígida (fora do veículo) manteve a integridade estrutural e a posição inicial de instalação (sem rotação e sem desengate do sistema de bloqueio).

Na imagem da Figura 3-15 pode-se observar que a base rotativa está montada sobre a base suporte do fabricante Aguti e que o ensaio foi realizado no interior do chassi do veículo Volkswagen T5. Neste ensaio ambas as estruturas mantiveram a integridade estrutural e a sua posição inicial de instalação (sem rotação e sem desengate do sistema de bloqueio). Nestas imagens também é possível observar que os bancos montados sobre as bases rotativas apresentam evidentes deformações por flexão e por torção resultantes das solicitações relativas aos carregamentos dos ensaios ECE –

R14, mas que não colocam em causa a segurança dos ocupantes. Os bancos utilizados nestes ensaios são bancos originais do fabricante do veículo Volkswagen T5.



Figura 3-14 – Comportamento estrutural da base rotativa VW T5 - Aguti após ensaio de tração ECE – R14 em plataforma rígida [57].



Figura 3-15 – Comportamento estrutural da base rotativa VW T5 com base suporte - Aguti após ensaio de tração ECE – R14 no interior do chassi [57].

Seguidamente, apresentam-se os gráficos extraídos dos resultados dos ensaios do relatório de homologação, relativos à evolução dos carregamentos dos dispositivos de tração dos ensaios efetuados aos produtos base rotativa VW T5 e base suporte.

No gráfico da Figura 3-16 estão representados os 3 carregamentos, relativos à evolução das forças durante o ensaio da base rotativa VW T5 - Aguti. Neste gráfico pode-se observar nas linhas superiores (F1 e F4) a evolução das forças aplicadas nas zonas dorsal e ventral, e na linha inferior (F7) a evolução da força relativa à componente do peso do banco.

De acordo com o regulamento ECE – R14 e os resultados do relatório de homologação, respetivamente, os valores mínimos requeridos para o ensaio e os valores máximos obtidos no ensaio, estão indicados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Valores mínimos e máximos do ensaio ECE – R14 (Base Rotativa).

Designação	Valor mínimo requerido (N)	Valor máximo obtido (N)
Z1	13500	14014
Z4	13500	13838,3
Z7	8044	8412,2

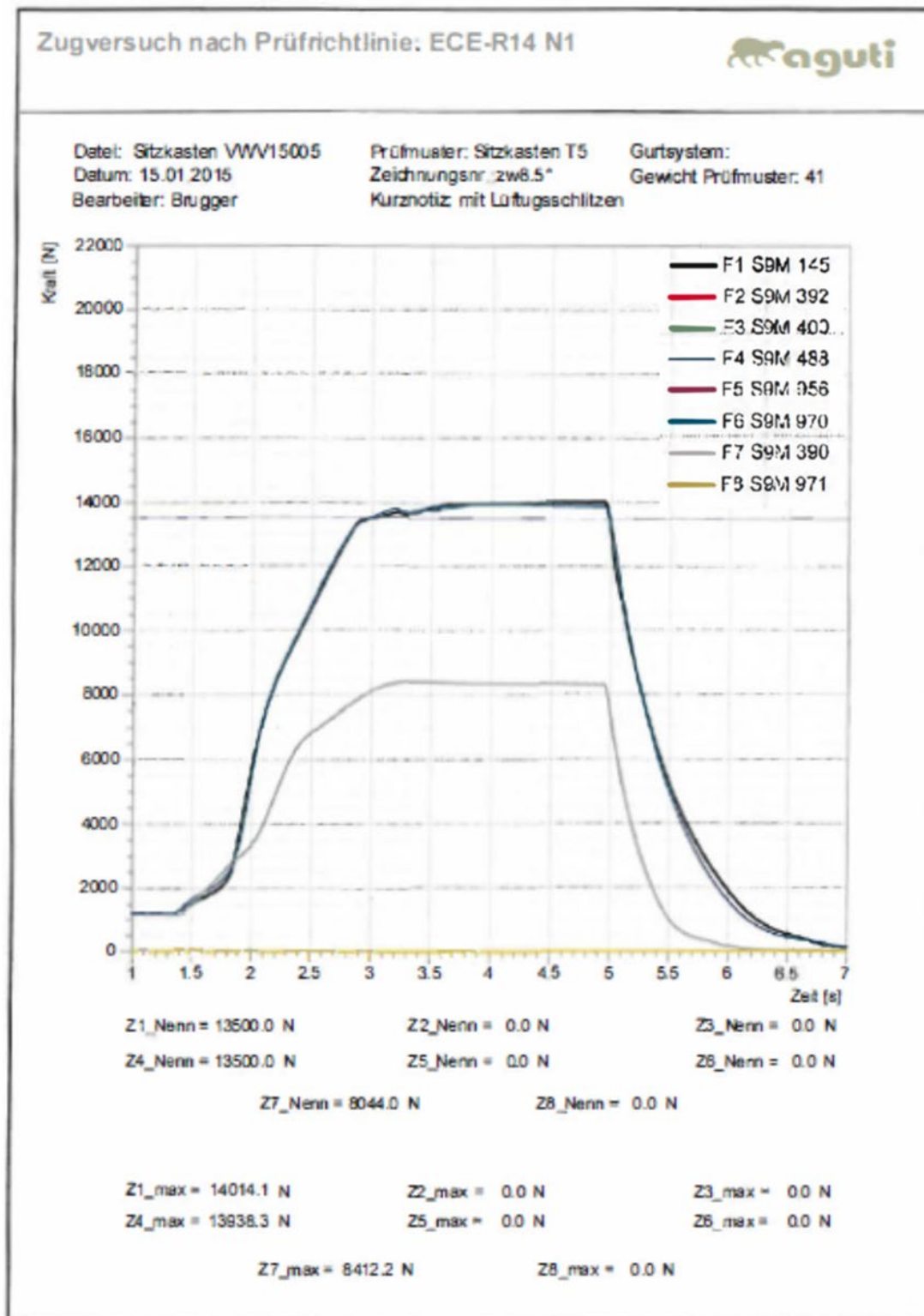


Figura 3-16 – Gráfico do ensaio de homologação – Base rotativa VW T5 - Aguti [57].

No gráfico da Figura 3-17 estão representados os 3 carregamentos, relativos à evolução das forças durante o ensaio da base rotativa VW T5 com a base suporte - Aguti. Neste gráfico pode-se observar nas linhas superiores (F3 e F6) a evolução das forças aplicadas nas zonas dorsal e ventral, e na linha inferior (F8) a evolução da força relativa à componente do peso do banco.

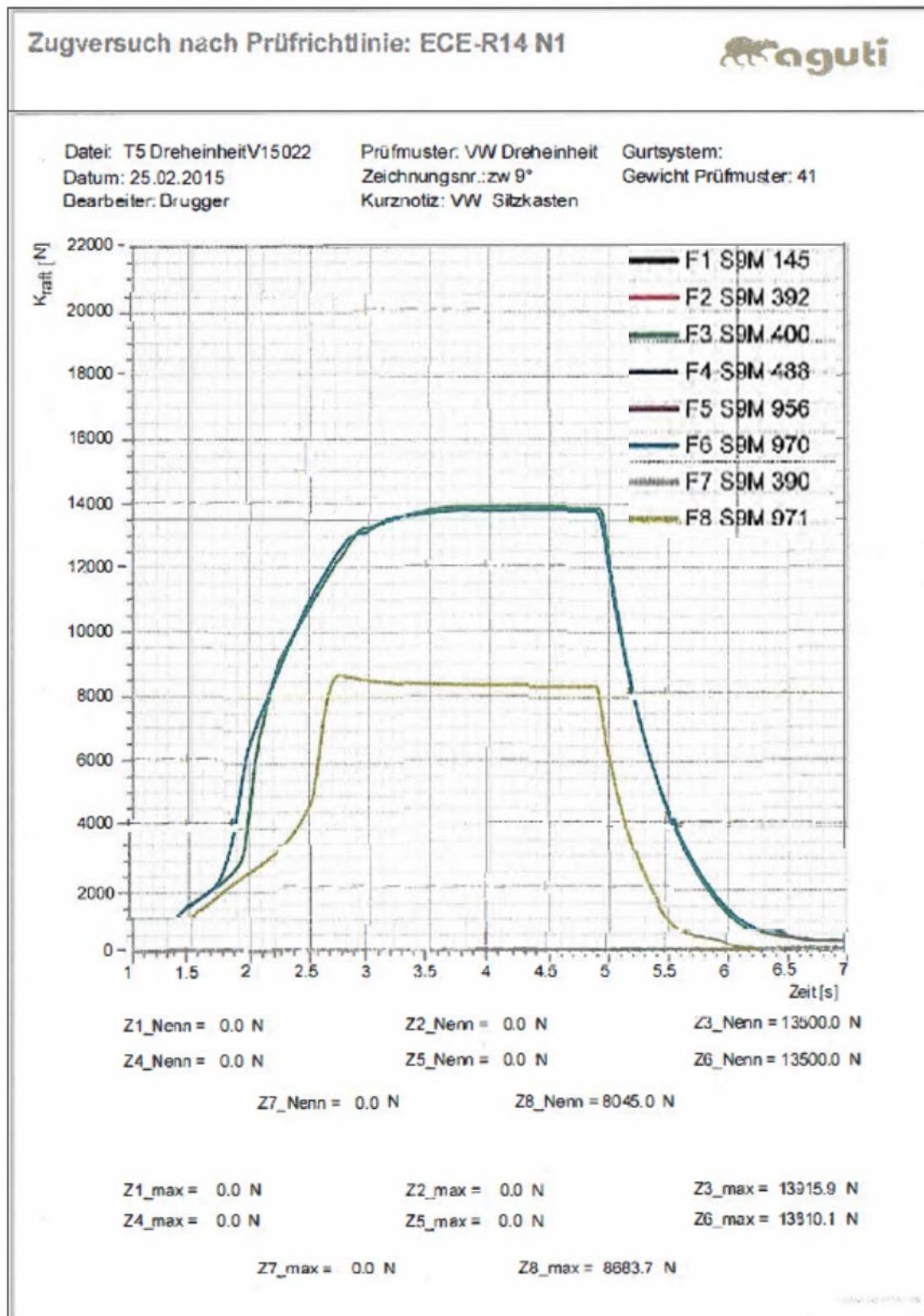


Figura 3-17 – Gráfico do ensaio de homologação – Base rotativa VW T5 com base suporte - Aguti [57].

De acordo com o regulamento ECE – R14 e os resultados do relatório de homologação, respetivamente, os valores mínimos requeridos para o ensaio e os valores máximos obtidos no ensaio, estão indicados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Valores mínimos e máximos do ensaio ECE – R14 (Base Rotativa com base suporte).

Designação	Valor mínimo requerido (N)	Valor máximo obtido (N)
Z3	13500	13915,9
Z6	13500	13810,1
Z8	8045	8683,7

De acordo com os dados indicados no relatório de homologação a massa total do conjunto (banco, base rotativa e base suporte) considerada para o ensaio é 41 kg. Os valores mínimos requeridos para os ensaios, denominados por “Z7” e “Z8”, foram determinados majorando 20 vezes o peso do conjunto ensaiado.

Nestes gráficos pode-se observar que todas as forças ultrapassam ligeiramente os valores requeridos para os ensaios de tração ECE – R14, assim como o tempo de manutenção das forças é muito superior ao tempo de manutenção requerido de 0,2 segundos.

### 3.2 Descrição da fase de anteprojecto (projecto preliminar)

Geralmente, numa empresa, um projecto deste tipo envolve a constituição de uma equipa que elabora um planeamento detalhado de todas as actividades que é necessário desenvolver até à conclusão desta fase do projecto, tendo em atenção o envolvimento de vários departamentos da empresa, tais como da engenharia de produção, da qualidade, do cliente e dos fornecedores.

Nesta fase de anteprojecto, foram exploradas as várias opções de projecto e construídos modelos experimentais dos produtos para serem submetidos a verificações e ensaios, assim como a eventuais correções do produto. Em resumo, foi nesta fase que foi feita a seleção das opções que melhor satisfaziam o projecto sob o ponto de vista técnico e económico, e se procedeu à comparação dos resultados obtidos com os objetivos iniciais estimados. Na secção deste capítulo, apenas será descrito o trabalho de desenvolvimento do produto relativo à modelação, cálculo estrutural, construção física do modelo e ensaios reais de validação do produto.

No anteprojecto do produto objeto de desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a ferramenta de CAD 3D da Autodesk, o Inventor Professional. Embora os desenhos de anteprojecto sejam desenhos preliminares, estes foram desenhados com rigor e detalhe, de modo a permitir uma definição do conceito inicial o mais próximo da realidade e efetuar várias simulações com o módulo de *Stress Analysis* para analisar a resistência estrutural do modelo. Por outro lado, estes desenhos têm como objetivo fazer uma representação geral da solução para ser discutida e validada pelo cliente, assim como servir de base à escolha final da solução. Por exemplo, se após a discussão

da solução se pretender um sistema rotativo aligeirado e mais barato, esta é a fase ideal para se propor uma simplificação do mesmo.

### 3.2.1 O que é o MEF do Stress Analysis?

O Método dos Elementos Finitos (MEF ou FEM), que frequentemente, também é designado de FEA (Finite Element Analysis), na verdade, não é tão complexo quanto parece.

O MEF é um método de cálculo numérico que encontra soluções aproximadas para problemas cujo grau de dificuldade pode variar de simples a muito complexo; sendo os problemas resolvidos com equações diferenciais parciais.

O que o MEF faz é dividir um enorme problema em partes menores e mais simples. Os cálculos são feitos em cada uma dessas partes mais simples, criando um sistema de equações que caracterizam todo o problema. Assim, quando o cálculo numérico de uma estrutura complexa é feito no Autodesk Inventor, *Stress Analysis*, o software literalmente transforma esta estrutura em pequenas partes (é o que faz a discretização do domínio) e, em seguida, resolve os cálculos com um sistema de equações. Esse sistema tem diferentes parâmetros de entrada, como restrições, materiais e cargas.

### 3.2.2 Modelação do produto / construção do modelo numérico

O ensaio de tração relativo à diretiva 76/115/CEE e ao Regulamento ECE-14 foi simulado usando o *software* de elementos finitos, *Stress Analysis*, sendo para isso necessário criar um modelo de elementos finitos com os parâmetros que se consideraram ser os mais adequados. Assim, nesta secção serão descritos e analisados alguns dos parâmetros, condições e estratégias fundamentais para permitir estabelecer o modelo numérico objeto de estudo. Estes fatores estão presentes no pré-processamento e processamento da análise estrutural do produto pelo MEF. Durante este estudo, foram também tidos em atenção os fatores tempo de simulação e o respetivo esforço computacional requerido, assim como foi efetuada posteriormente uma comparação dos resultados dessas simulações com os valores do ensaio real de modo a validar as escolhas das soluções.

Durante a construção do modelo numérico foi necessário tomar uma série de decisões, tais como simplificações associadas à geometria de alguns dos componentes, à definição dos elementos para efetuar a discretização espacial, à definição da malha de elementos finitos, entre outras. O impacto que estas decisões têm nos resultados das simulações do modelo numérico é muitas vezes ignorado por parte de quem efetua uma análise por elementos finitos. Estas são algumas das razões pelas quais a tarefa de obtenção de um bom modelo numérico nem sempre é fácil, ou seja, obter um modelo que represente com alguma fiabilidade o fenómeno a simular.

### 3.3 Análise numérica do modelo

Antes de se proceder à descrição da análise numérica efetuada ao modelo, apresentam-se as vistas superior e inferior em perspetiva, do produto modelado em 3D, base rotativa que é o objeto do projeto deste trabalho (Figura 3-18).

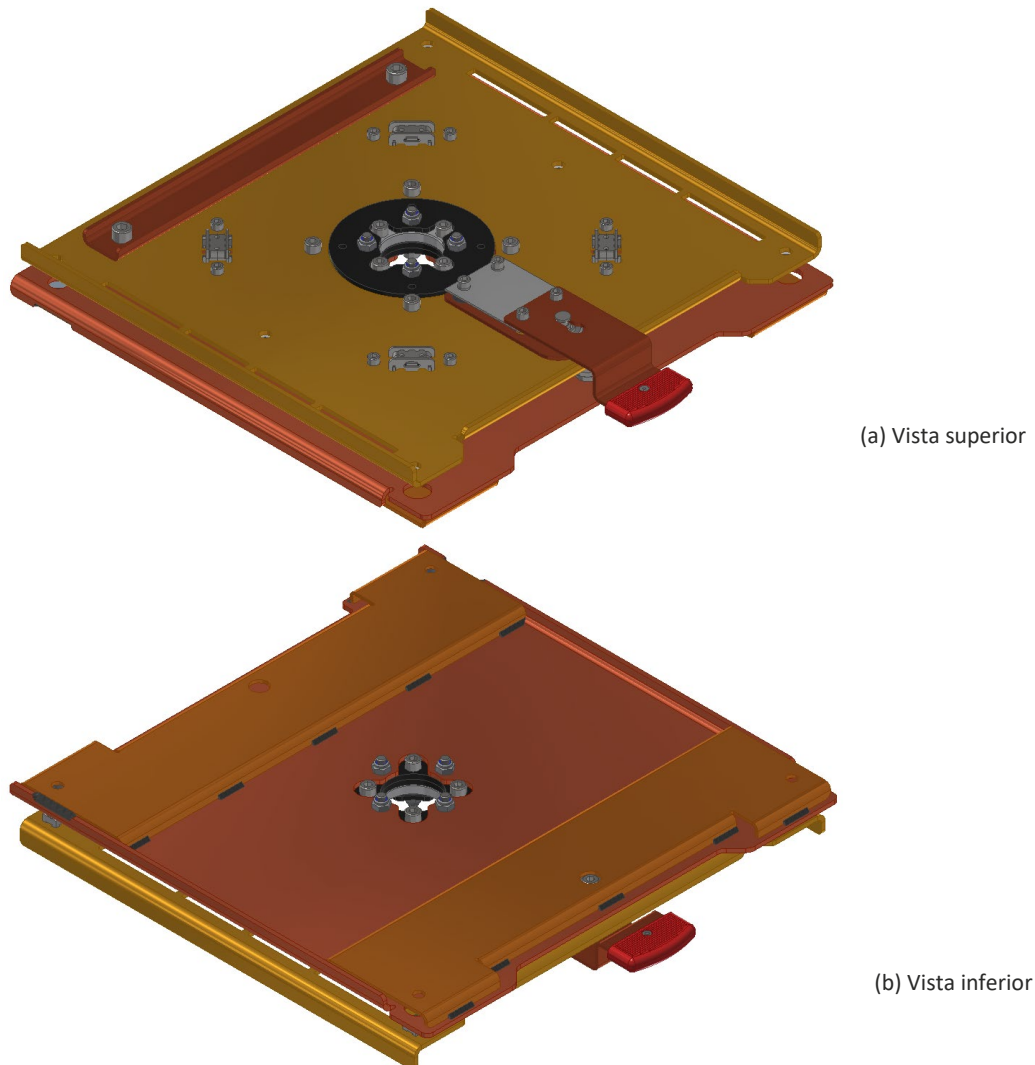


Figura 3-18 – Vistas em perspetiva da base rotativa.

A análise pelo MEF com o *Stress Analysis* do presente trabalho consistiu resumidamente no seguinte procedimento:

- Supressão/exclusão de componentes não estruturais do modelo;
- Simplificação de componentes para evitar pontos singulares e zonas de concentrações de tensões;
- Aplicação de restrições/ligações, contactos, cargas/forças, malha e materiais nos vários componentes ou subconjuntos do modelo;
- Otimização das peças sobredimensionadas e verificação das reações nos parafusos de fixação do produto à base do veículo e das corredeiras do banco;

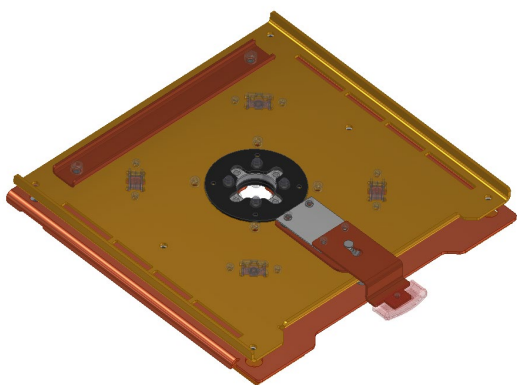
- Simulação/visualização e verificação dos resultados da análise do modelo e por componente (mais condicionante).

Seguidamente, serão apresentadas algumas das decisões, simplificações e pressupostos associados à criação do modelo numérico que servirá para simular o produto base rotativa sujeito ao ensaio de tração descrito na diretiva 76/115/CEE e no Regulamento ECE-14.

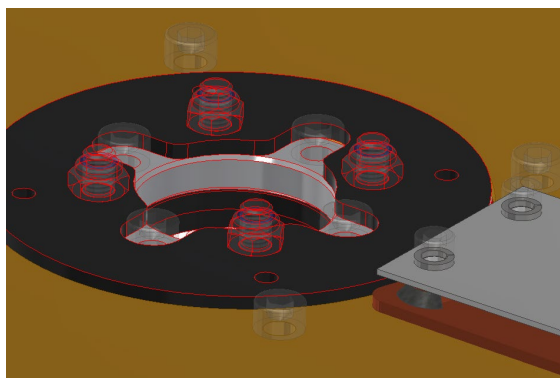
### 3.3.1 Supressão/exclusão de componentes não estruturais do modelo

Para tornar o modelo menos complexo computacionalmente (menos pesado), e numa perspetiva de simular vários cenários sem tempos de processamento exagerados, foram efetuadas no pré-processamento da análise várias supressões de componentes que não afetavam a análise.

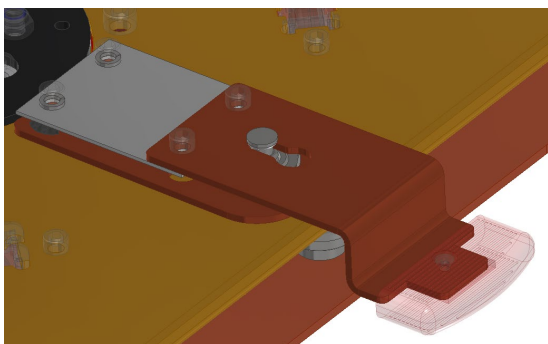
Na Figura 3-19 estão ilustradas várias imagens de componentes que foram excluídos da análise, nomeadamente parafusos, porcas e peças de plástico.



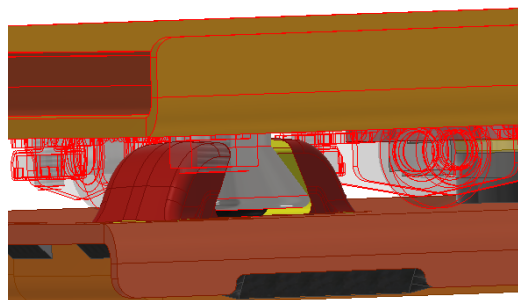
Supressão de componentes não estruturais do modelo.



Supressão de parafusos e porcas.



Supressão de peças de plástico.



Supressão dos suportes dos rodízios.

Figura 3-19 – Supressão de componentes não estruturais do modelo.

### 3.3.2 Simplificação da geometria de componentes do modelo

Com vista a evitar nos componentes do modelo pontos singulares suscetíveis de concentrações muito elevadas de tensões e facilitar a análise dos resultados, foram efetuadas no pré-processamento algumas simplificações ao nível da geometria de alguns componentes, conforme se pode observar nas imagens da Figura 3-20. Nas

imagens da esquerda é possível observar a existência de picos de tensão de valor muito elevado e nas imagens da direita as alterações efetuadas à geometria dos respetivos componentes. Estes componentes não foram excluídos da análise porque também têm uma função estrutural ou de segurança no modelo.

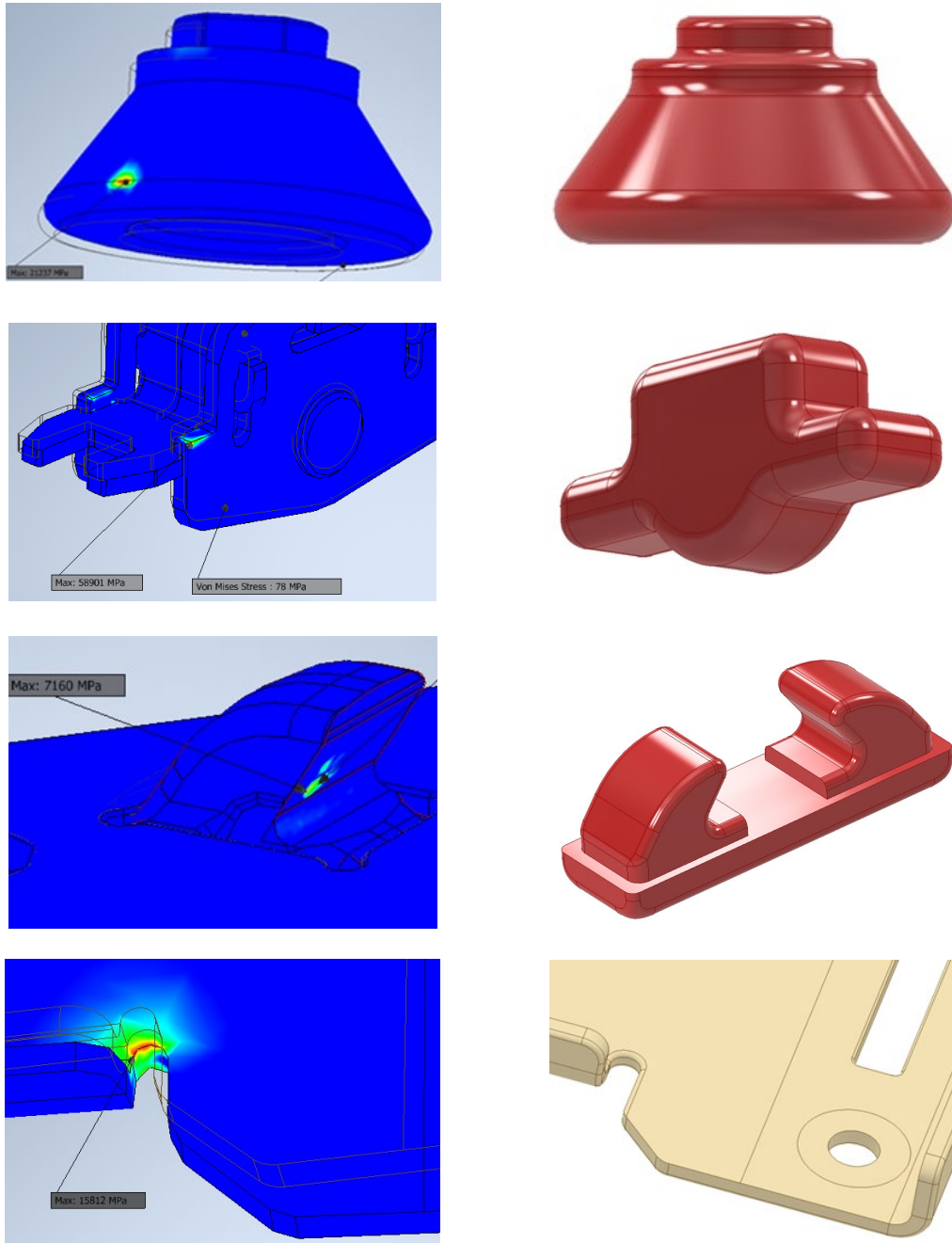


Figura 3-20 – Exemplificação de simplificações da geometria de componentes do modelo.

### 3.3.3 Definição dos materiais nos componentes do modelo

No presente estudo foi necessário definir os materiais dos vários componentes do modelo. Genericamente, o material utilizado nos diversos componentes da estrutura do modelo foi o aço. No entanto, a seleção dos materiais foi realizada de forma a

satisfazer os requisitos e propriedades necessárias para cada componente do modelo numérico. Após ponderação e por ordem decrescente de importância, foram consideradas as seguintes propriedades e características dos materiais para o fabrico dos componentes:

- Resistência mecânica do material (tensão de cedência);
- Custo do material (tendo em atenção o “*benchmarking*”);
- Disponibilidade dos materiais no mercado (facilidade de encontrar o material no mercado);
- Facilidade de processamento do material.

Assim, a seleção dos materiais foi realizada tendo em conta as propriedades e características mais relevantes dos materiais e os respetivos pesos (importância) atribuídos às mesmas. Nomeadamente, para os componentes de chapa mais solicitados como por exemplo os reforços estruturais, selecionaram-se os aços de alto limite elástico, S420 MC e S700 (Docol). Genericamente, para os componentes com geometria de revolução obtidos pelo processo de torneamento, tais como casquilhos e grampos selecionou-se o aço Ck45. Especificamente, para as ancoragens obtidas pelo processo de forjamento e posterior fresagem das zonas funcionais selecionou-se o aço 42CrMo4. No conjunto anel rotativo, os componentes com função antifricção são constituídos por materiais poliméricos, mas estes não têm função estrutural. Todos os materiais selecionados para este projeto estão especificados nos desenhos de definição (ver anexo 1).

A definição dos materiais e respetivas características dos componentes pode ser alterada na simulação numérica. Contudo, manteve-se a definição dos materiais originais, ou seja, a definição original do modelo da estrutura.

Nesta análise numérica é muito importante referir que uma das condições de validação do ensaio destrutivo de tração é admitir a deformação permanente da estrutura após a aplicação das cargas. Isto significa que fazer uma análise elástica não será teoricamente o mais recomendado, sendo por isso admissível a necessidade de se considerar uma análise elastoplástica.

Por limitações de *software*, este estudo foi efetuado considerando um comportamento elástico dos materiais. Este comportamento é descrito pelo módulo de elasticidade (constante de proporcionalidade entre a tensão e deformação) e o coeficiente de Poisson (medida da razão entre a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga). Os aços utilizados na simulação têm os valores típicos para este tipo de material, a saber: Módulo de Young (E), 210000 MPa e o Coeficiente de Poisson, 0,3 ( $\nu$ ).

Um comportamento perfeitamente elástico, como é possível verificar no gráfico da Figura 3-21, corresponde à região na zona inicial da curva, onde a força e o deslocamento aumentam proporcionalmente, correspondendo ao comportamento puramente elástico do material. Num projeto de dimensionamento estrutural, as

estruturas devem trabalhar na região elástica, de modo a não sofrerem deformações permanentes. Contudo, tendo em conta o tipo de estrutura e a deformação plástica que o banco e a base rotativa sofrem durante o ensaio de tração, o comportamento elástico corresponde apenas às etapas iniciais.

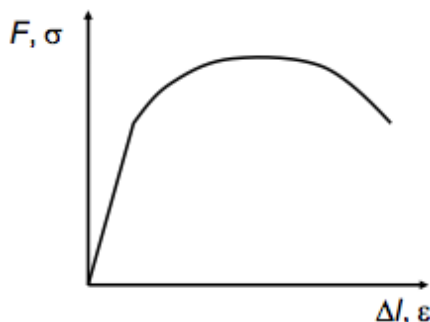


Figura 3-21 – Curva convencional tensão-deformação dos aços

Por outro lado, o mecanismo de deformação plástica é um fenómeno importante no comportamento de estruturas, pois é um indicador de cedência do material que, em determinadas circunstâncias, pode conduzir à falha do material, pela rotura.

Considera-se importante referir que a possibilidade futura da realização de uma simulação com deformação plástica permitirá uma análise elastoplástica com um comportamento não-linear do material, sendo espectável a obtenção de deslocamentos maiores e tensões mais baixas.

### 3.3.4 Definição das ligações entre os diferentes componentes

Na análise estrutural de um modelo de uma montagem é necessário definir as relações dinâmicas entre os diferentes componentes. Os diferentes tipos de contato permitem transferir as cargas entre os vários componentes. Na realidade, todos os corpos interagem entre si e numa simulação é necessário ter em atenção as ações e reações dos corpos envolvidos. Entenda-se por interação, um tipo de ação que ocorre entre duas ou mais entidades e quando a ação de uma delas provoca uma reação da outra ou das restantes.

Neste ponto, serão analisadas algumas das principais condições de interação utilizadas no estudo. Assim sendo, serão apresentadas algumas das estratégias utilizadas para simular as ligações entre os diferentes componentes do modelo.

Após a definição do modelo, nomeadamente, as geometrias, os materiais de todos os componentes e efetuar a montagem de modo a definir o conjunto final (base rotativa), definiram-se todas as ligações existentes entre os componentes por forma a permitir simulações o mais realistas possível, ou seja, simular de acordo com os graus de liberdade existentes no modelo real. Por exemplo, permitir simular a rotação do sistema rotativo central na eventualidade do sistema de desbloqueio da rotação ficar inoperacional pelas ações dos esforços de sollicitação do modelo.

Neste estudo considerou-se a montagem do banco com corrediças sobre a base rotativa nas duas posições extremas de serviço do banco, ou seja, nas posições

recuado e avançado, como se pode observar nas imagens da Figura 3-22. Estas posições de serviço serão consideradas no estudo da análise numérica do modelo, que respetivamente, serão designadas de Cenário 1 e Cenário 2.

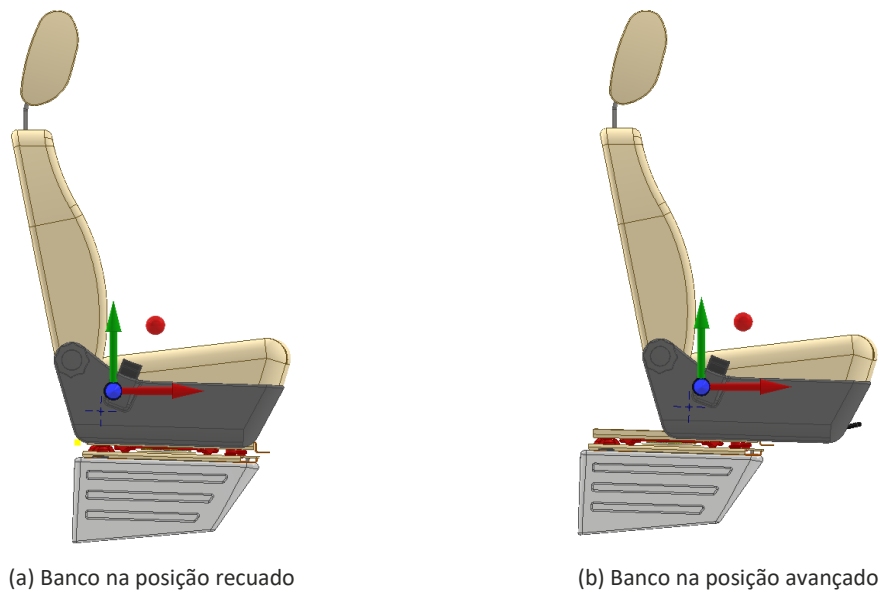


Figura 3-22 – Posições, recuada e avançada do banco sobre a base rotativa.

Considera-se importante referir que neste estudo foi necessário definir uma elevada quantidade de ligações entre os diferentes componentes (seguramente mais de trezentas ligações/contatos foram objeto de análise e alterações). Seguidamente, apresentam-se algumas das principais condições de interação utilizadas neste estudo, nomeadamente contatos e restrições, conforme se pode observar na Figura 3-23.

- Na Figura 3-23 (a) e (b), pode-se observar a existência de contatos do tipo de ligação rígida entre faces de diferentes componentes. Este tipo de contatos inclui processos como a soldadura ou a fixação de ligações aparafusadas entre componentes. É importante referir que o modelo, mais especificamente o conjunto inferior da base rotativa, foi desenhado com cordões de soldadura. No entanto, a soldadura não foi considerada na simulação numérica.
- Na Figura 3-23 (c), os contatos existentes são do tipo de ligação que permite a separação entre os diferentes componentes (casquilhos, batente e base superior), mas não permite a sua penetração.
- Na Figura 3-23 d) e e), os contatos existentes são do tipo de ligação que simula um tipo de ligação que permite o deslocamento relativo entre as faces dos componentes, mas não permite a sua separação.
- Na Figura 3-23 f), pode-se observar que no conjunto da base inferior foram aplicadas restrições de fixação que permitem simular os graus de liberdade existentes nos quatro pontos de fixação à base do veículo. Na zona de contato inferior da base rotativa, parte da frente, foi aplicada uma restrição que permite simular o atrito entre as faces apoiadas, permitindo esta restrição movimentos tangenciais ao longo das faces em contato.

- Na Figura 3-23 g) e h), pode-se observar que foram aplicados contatos do tipo de ligação rígida nas corredeiras inferiores do banco, mais especificamente nas zonas circulares de influência das cabeças dos parafusos que fixam essas corredeiras ao conjunto da parte superior da base rotativa. Nestas imagens também se pode observar as zonas de influência das corredeiras superiores do banco, nas posições recuado e avançado.

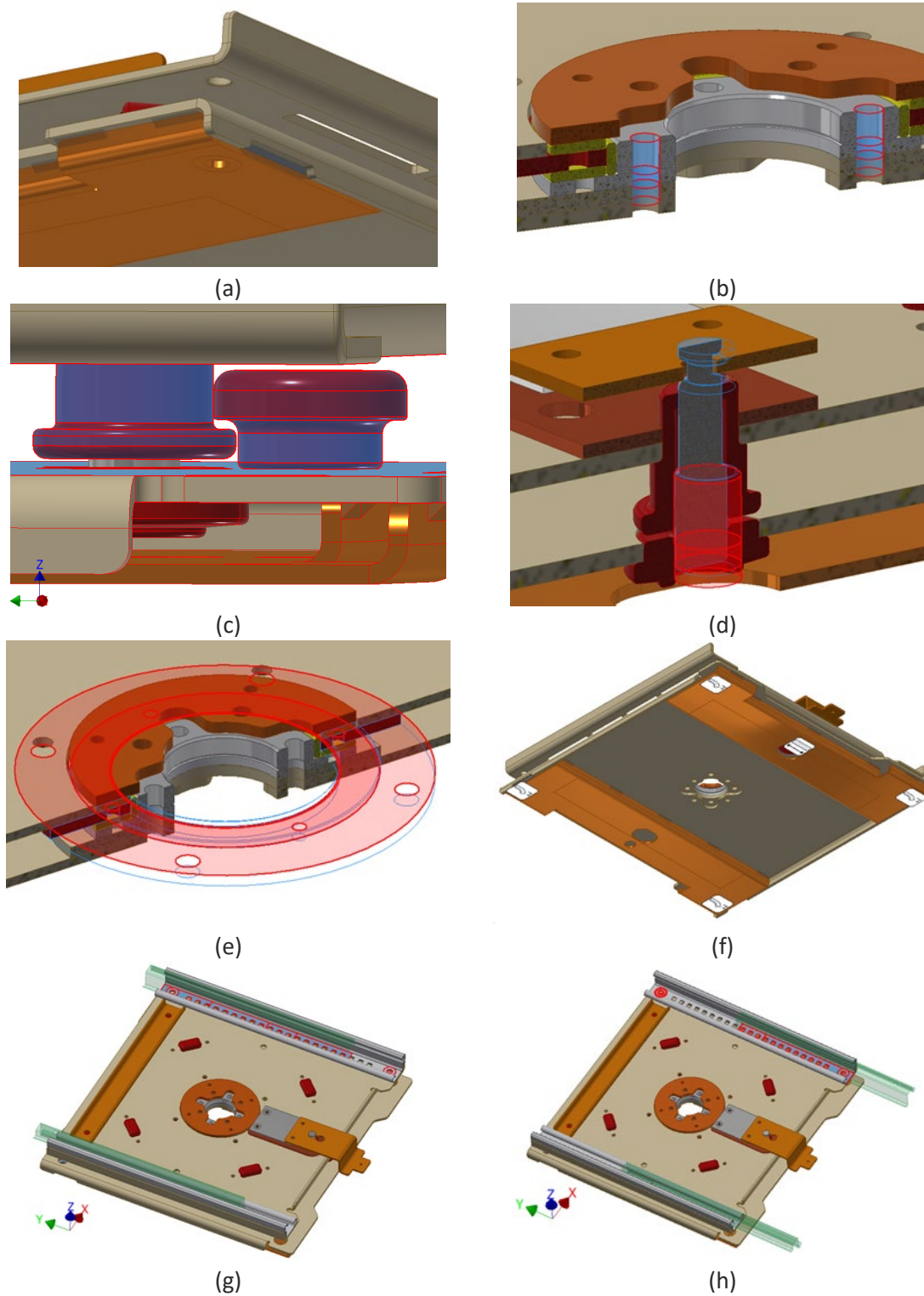


Figura 3-23 – Exemplificação dos tipos de contatos e restrições entre componentes do modelo.

### 3.3.5 Definição da malha de análise de elementos finitos

Para que uma análise numérica seja executada é necessário definir uma malha de elementos finitos. O módulo *Stress Analysis* do Autodesk Inventor, apresenta nas faces dos objetos uma malha composta por elementos triangulares que partilham pontos comuns designados por nós. Este *software* permite uma parametrização da malha, nomeadamente a definição das dimensões dos elementos. Quanto maior for a quantidade de divisões de malha solicitada, mais complexos são os cálculos, mas maior é a precisão da simulação.

Inicialmente foram usadas as configurações de malha padrão do software, com exceção das zonas e pontos singulares suscetíveis a picos de tensões. No entanto, como nas primeiras iterações verificaram-se valores muito elevados de tensões concentradas, procedeu-se a uma configuração de malha mais fina nas superfícies de alguns componentes. As imagens da Figura 3-24 ilustram vários casos de refinamento da malha em zonas ou pontos singulares do modelo onde era necessário aumentar a precisão da solução numérica.

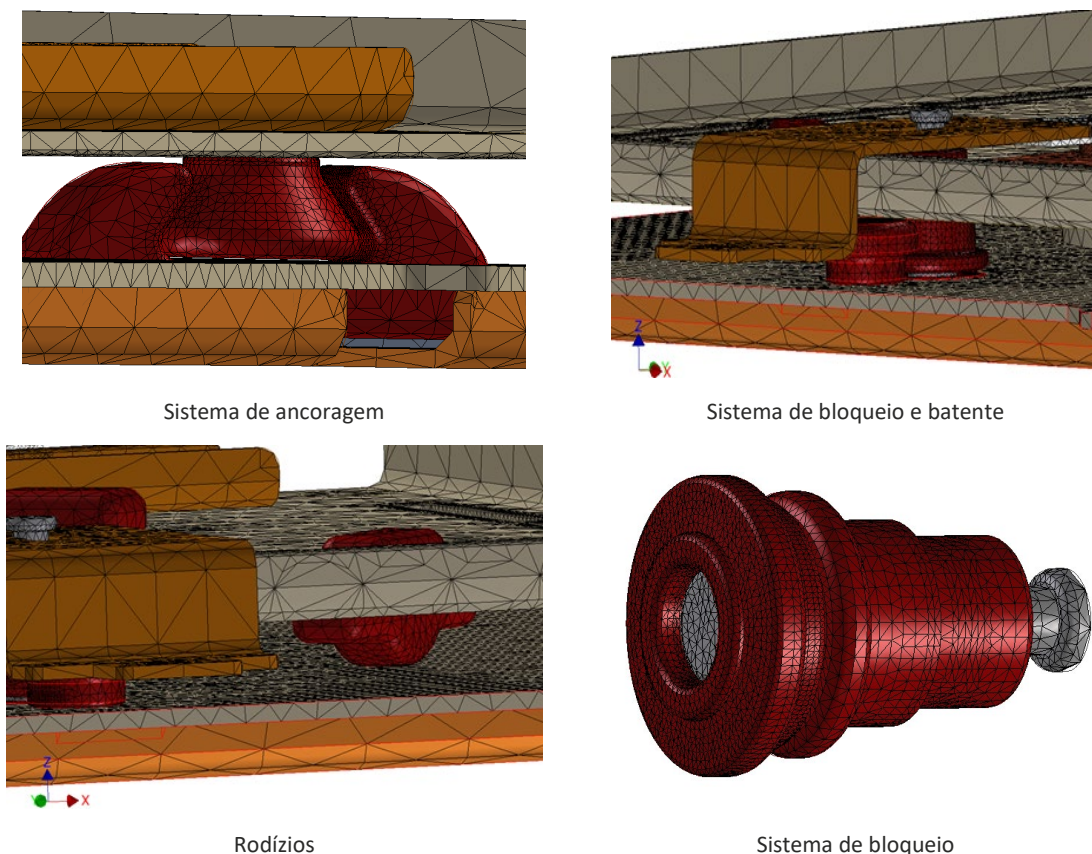


Figura 3-24 – Exemplificação do refinamento da malha em zonas ou pontos singulares do modelo.

### 3.3.6 Definição dos carregamentos e das ligações ao exterior

Logo no início do estudo de simulação numérica do modelo, ou seja, na fase de pré-processamento surgiram algumas questões sobre a definição do modelo numérico, que foram as seguintes:

- Será necessário modelar e simular o comportamento estrutural do banco do veículo que é montado sobre a base rotativa?
- Será necessário modelar e simular o comportamento estrutural dos cintos e dos dispositivos de tração?
- Como simular o comportamento estrutural da base rotativa, sabendo-se que os esforços de solitação não estão aplicados diretamente na mesma?

Seguidamente descreve-se a estratégia adotada para dar resposta a estas questões. Considerar a modelação para simulação dos dispositivos de tração, da estrutura do banco e do cinto, seria teoricamente a opção que se aproximaria mais da situação real. No entanto, esta estratégia não era viável devido a várias razões, tais como: o banco já se encontra homologado pelo fabricante, não existem especificações técnicas dos materiais do banco, a modelação da estrutura do banco não foi facultada pelo fabricante, a simulação dos componentes de tração seria sempre uma aproximação já que o rigor da colocação destes dispositivos é relativo, assim como, o peso computacional associado a esta simulação não pode ser desprezado.

Normalmente, nos ensaios de tração dos cintos de segurança dos bancos é utilizada uma cinta de largura 50 mm. Neste estudo, admitiu-se que esta pode ser analisada como um cabo, já que efetivamente o seu comprimento não varia.

Conforme se pode observar na Figura 3-25 e na Figura 3-26, os cabos foram modelados no layout da plataforma de ensaios de tração ECE – R14 para mais facilmente se definir as respetivas trajetórias e permitir determinar as componentes das forças de tensão instaladas nos mesmos quando solicitados aos carregamentos do tração do ensaio. Os pontos relativos às ancoragens dos cintos foram definidos com base nos pontos das ancoragens de fixação do cinto do veículo Volkswagen T5, com coordenadas definidas a partir do referencial veículo (ver desenhos do anexo 2).

Neste projeto, o produto objeto de desenvolvimento é o conjunto da base rotativa, constituído por várias partes, algumas das quais têm movimentos relativos, nomeadamente: o pino do sistema de bloqueio da rotação da base rotativa, no qual a função bloqueio é feita pela ação de uma mola de chapa de aço e a função desbloqueio é feita pelo acionamento da alavanca; as ancoragens/grampos de segurança na parte posterior do conjunto; o sistema rotativo central; e por último, as corrediças do banco que permitem as posições extremas: banco recuado e banco avançado (ver desenhos no anexo 1).

Na análise numérica do modelo base rotativa, foram considerados dois cenários operacionais, a saber:

- Cenário 1 – base rotativa solicitada com o banco recuado;
- Cenário 2 – base rotativa solicitada com o banco avançado.

Note-se que as corrediças e os bancos não são o objeto de desenvolvimento deste projeto e de simulação numérica, embora todos estes produtos tenham de passar no teste real de homologação.

As imagens da Figura 3-25 e da Figura 3-26 ilustram os cenários operacionais da simulação e a nomenclatura das forças aplicadas no banco. Conforme foi especificado no ponto 3.1.7 deste capítulo, as forças do ensaio de tração ( $F_{sup}$  e  $F_{inf}$ ) são aplicadas nos dispositivos de tração que posicionam e apoiam o cinto de teste, que por sua vez transmitem esforços para a precinta do banco (ponto de ancoragem, P1) e para as precintas instaladas no pilar da plataforma (pontos de ancoragem do cinto, P2, P3 e P4). Estas forças têm um valor de 13,5 kN na zona superior (dorso) e de 20,1 kN na zona inferior (ventral) e estão inclinadas  $10^\circ$  com a horizontal. A força 20.1 kN foi calculada, considerando a massa do banco e da base rotativa igual a 33 kg. Assim, de acordo com o regulamento ECE – R14 a base rotativa deverá ser ensaiada no teste de tração com as seguintes cargas:

- Força superior ( $F_{sup}$ ) = 13500 N;
- Força inferior ( $F_{sup}$ ) =  $13500 + 20 \times 10 \times 33 = 20100$  N.

Para simular a estrutura através do MEF, foi necessário proceder à decomposição das forças de tração superior e inferior para cada um dos cenários, ou seja, calcular as tensões instaladas nos cabos superior ( $T_{sd}$  e  $T_{se}$ ) e inferior ( $T_{id}$  e  $T_{ie}$ ) dos dispositivos de tração, assim como as forças de reação superior e inferior no conjunto banco/base rotativa ( $R_{sup}$  e  $R_{inf}$ ), conforme se pode observar nas imagens da Figura 3-25 e da Figura 3-26.

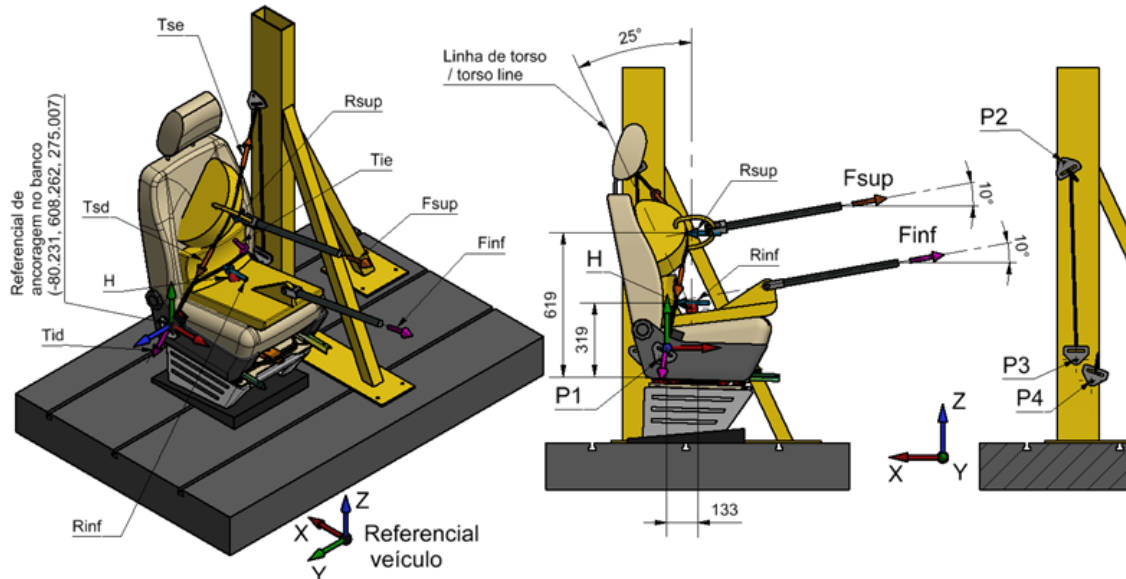


Figura 3-25 – Plataforma do ensaio de tração das fixações do cinto de segurança com banco recuado.

As direções de todas as forças do sistema foram determinadas através dos desenhos tridimensionais, permitindo estes retirar os pontos de aplicação das forças e calcular os respetivos vetores normalizados ou unitários, cujos valores são apresentados na Tabela 3-3 e Tabela 3-4.

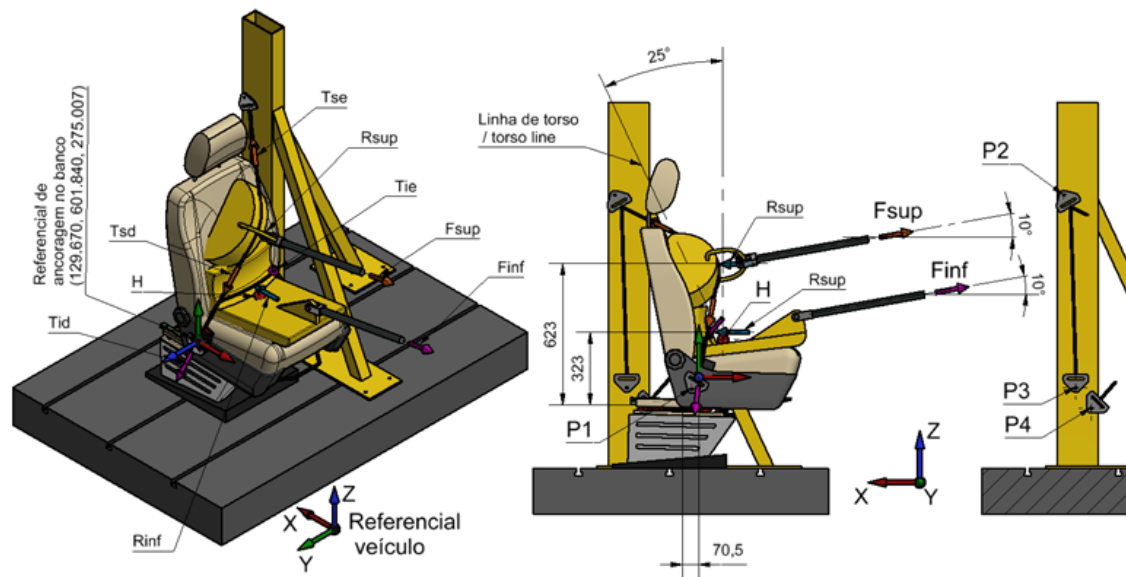


Figura 3-26 – Plataforma do ensaio de tração das fixações do cinto de segurança com banco avançado.

Tabela 3-3 – Definição dos vetores normalizados (unitários) – Cenário 1.

Designação da força	Vetor normalizado
$F_{sup}$	(0,985; 0,174; 0,000)
$T_{sd}$	(-0,162; -0,859; 0,486)
$T_{se}$	(-0,448; 0,497; -0,743)
$R_{sup}$	(-1,000; 0,000; 0,000)
$F_{inf}$	(0,985; 0,174; 0,000)
$T_{id}$	(-0,122; -0,842; 0,525)
$T_{ie}$	(-0,123; -0,778; -0,6169)
$R_{inf}$	(-1,000; 0,000; 0,0009)

Tabela 3-4 – Definição dos vetores normalizados (unitários) – Cenário 2.

Designação da força	Vetor normalizado
$F_{sup}$	(0,985; 0,174; 0,000)
$T_{sd}$	(-0,162; -0,859; 0,486)
$T_{se}$	(-0,728; 0,357; -0,586)
$R_{sup}$	(-1,000; 0,000; 0,000)
$F_{inf}$	(0,985; 0,174; 0,000)
$T_{id}$	(-0,088; -0,8260; 0,556)
$T_{ie}$	(-0,563; -0,642; -0,521)
$R_{inf}$	(-1,000; 0,000; 0,0009)

O cálculo dos esforços internos gerados no modelo pela ação dos carregamentos de tração do ensaio ECE – R14 para os cenários 1 e 2, foi efetuado considerando a

simulação do modelo em estado de equilíbrio estático. Assim, através das equações de equilíbrio do sistema tridimensional de forças e do cálculo vetorial, determinou-se a amplitude dos esforços de reação instalados nos cabos superior ( $T_{sd}$  e  $T_{se}$ ) e inferior ( $T_{id}$  e  $T_{ie}$ ), assim como as forças de reação superior e inferior no conjunto banco/base rotativa ( $R_{sup}$  e  $R_{inf}$ ). Conforme se pode observar nas imagens da Figura 3-25 e da Figura 3-26, estes esforços de reação estão aplicados nos pontos de ancoragem dos cabos superior e inferior (P1, P2 e P4) e nos pontos superior e inferior de tangência entre os dispositivos de tração e os cabos, correspondentes às zonas dorsal e ventral do banco. Seguidamente, apresenta-se o cálculo dos esforços internos para a definição do modelo numérico:

- Carregamento superior (dorsal) – cenário 1:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 0.985 \\ 0.174 \\ 0.000 \end{cases} \times \begin{cases} 13500 \\ 13500 \\ 13500 \end{cases} + \begin{cases} -0.162 \\ -0.859 \\ 0.486 \end{cases} \times \begin{cases} T_{sd} \\ T_{sd} \\ T_{sd} \end{cases} + \begin{cases} -0.448 \\ 0.497 \\ -0.743 \end{cases} \times \begin{cases} T_{se} \\ T_{se} \\ T_{se} \end{cases} + \begin{cases} -1.000 \\ 0.000 \\ 0.000 \end{cases} \times \begin{cases} R_{sup} \\ R_{sup} \\ R_{sup} \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} T_{sd} \\ T_{se} \\ R_{sup} \end{cases} = \begin{bmatrix} -0.162 & -0.448 & -1.000 \\ -0.859 & -0.497 & 0.000 \\ 0.486 & -0.743 & 0.000 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{cases} -13294.892 \\ -2344.320 \\ 0.000 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} T_{sd} \\ T_{se} \\ R_{sup} \end{cases} = \begin{cases} 4394.350 \\ 2874.850 \\ 11293.980 \end{cases} \text{ [N]}$$

O valor do momento do vetor resultante:  $M_{sup} = R_{sup} \times 619 = 6\,990\,970,660 \text{ Nmm}$

- Carregamento inferior (ventral) – cenário 1:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 0.985 \\ 0.174 \\ 0.000 \end{cases} \times \begin{cases} 20100 \\ 20100 \\ 20100 \end{cases} + \begin{cases} -0.122 \\ -0.842 \\ 0.525 \end{cases} \times \begin{cases} T_{id} \\ T_{id} \\ T_{id} \end{cases} + \begin{cases} -0.123 \\ -0.778 \\ -0.616 \end{cases} \times \begin{cases} T_{ie} \\ T_{ie} \\ T_{ie} \end{cases} + \begin{cases} -1.000 \\ 0.000 \\ 0.000 \end{cases} \times \begin{cases} R_{inf} \\ R_{inf} \\ R_{inf} \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} T_{id} \\ T_{ie} \\ R_{inf} \end{cases} = \begin{bmatrix} -0.122 & -0.123 & -1.000 \\ -0.842 & -0.778 & 0.000 \\ 0.525 & -0.616 & 0.000 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{cases} -19794.640 \\ -3490.303 \\ 0.000 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} T_{id} \\ T_{ie} \\ R_{inf} \end{cases} = \begin{cases} 2317.310 \\ 1976.620 \\ 19268.930 \end{cases} \text{ [N]}$$

O valor do momento do vetor resultante:  $M_{inf} = R_{inf} \times 319 = 6\,146\,788,900 \text{ Nmm}$

- Carregamento superior (dorsal) – cenário 2:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 0.985 \\ 0.174 \\ 0.000 \end{cases} \times \begin{cases} 13500 \\ 13500 \\ 13500 \end{cases} + \begin{cases} -0.162 \\ -0.859 \\ 0.486 \end{cases} \times \begin{cases} T_{sd} \\ T_{sd} \\ T_{sd} \end{cases} + \begin{cases} -0.728 \\ 0.357 \\ -0.586 \end{cases} \times \begin{cases} T_{se} \\ T_{se} \\ T_{se} \end{cases} + \begin{cases} -1.000 \\ 0.000 \\ 0.000 \end{cases} \times \begin{cases} R_{sup} \\ R_{sup} \\ R_{sup} \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} T_{sd} \\ T_{se} \\ R_{sup} \end{cases} = \begin{bmatrix} -0.162 & -0.728 & -1.000 \\ -0.859 & 0.357 & 0.000 \\ 0.486 & -0.586 & 0.000 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{cases} -13294.895 \\ -2344.305 \\ 0.000 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} T_{sd} \\ T_{se} \\ R_{sup} \end{cases} = \begin{cases} 4167.900 \\ 3458.130 \\ 10103.160 \end{cases} \text{ [N]}$$

O valor do momento do vetor resultante:  $M_{sup} = R_{sup} \times 623 = 6\,294\,265,890 \text{ Nmm}$

- Carregamento inferior (ventral) – cenário 2:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 0.985 \\ 0.174 \\ 0.000 \end{cases} \times \begin{cases} 20100 \\ 20100 \\ 20100 \end{cases} + \begin{cases} -0.088 \\ -0.826 \\ 0.556 \end{cases} \times \begin{cases} T_{id} \\ T_{id} \\ T_{id} \end{cases} + \begin{cases} -0.563 \\ -0.642 \\ -0.521 \end{cases} \times \begin{cases} T_{ie} \\ T_{ie} \\ T_{ie} \end{cases} + \begin{cases} -1.000 \\ 0.000 \\ 0.000 \end{cases} \times \begin{cases} R_{inf} \\ R_{inf} \\ R_{inf} \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} T_{id} \\ T_{ie} \\ R_{inf} \end{cases} = \begin{bmatrix} -0.088 & -0.563 & -1.000 \\ -0.826 & -0.642 & 0.000 \\ 0.556 & -0.521 & 0.000 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{cases} -19794.640 \\ -3490.303 \\ 0.000 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} T_{id} \\ T_{ie} \\ R_{inf} \end{cases} = \begin{cases} 2308.630 \\ 2466.630 \\ 18201.320 \end{cases} \text{ [N]}$$

O valor do momento do vetor resultante:  $M_{inf} = R_{inf} \times 323 = 5\,879\,025,430 \text{ Nmm}$ .

Após a determinação dos esforços internos (valores simétricos aos valores das reações) gerados no banco, foi necessário transferir esses esforços para a base rotativa, nas posições recuado e avançado do banco, respetivamente, cenários 1 e 2 (Figura 3-27). Como o software de análise numérica tem uma ferramenta que permite aplicar cargas de modo remoto, adotou-se a estratégia de solicitar a base rotativa com forças aplicadas de modo remoto, isto é, definiu-se o ponto de aplicação e a direção de cada uma das forças e, depois, as respetivas zonas solicitadas, ou seja, as zonas de interface entre as corredeiras do banco e a base rotativa. Nas imagens da Figura 3-27 pode-se observar as amplitudes, direções e sentidos dos esforços designados por:  $T_{sd}$ ,  $T_{id}$ ,  $R_{sup}$  e  $R_{inf}$ . Nestas imagens pode-se também observar que as zonas de contacto (cor vermelha) entre as calhas superiores e inferiores das corredeiras são significativamente menores quando as corredeiras estão na posição avançada (cenário 2).

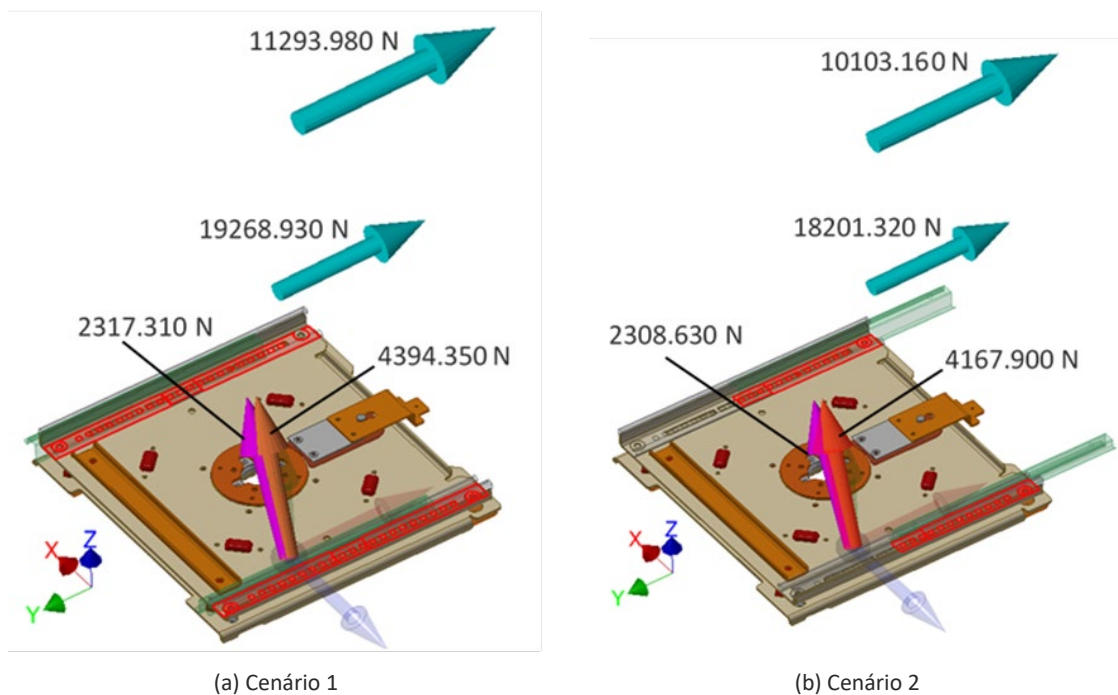


Figura 3-27 – Indicação dos esforços aplicados de modo remoto na base rotativa para os cenários 1 e 2.

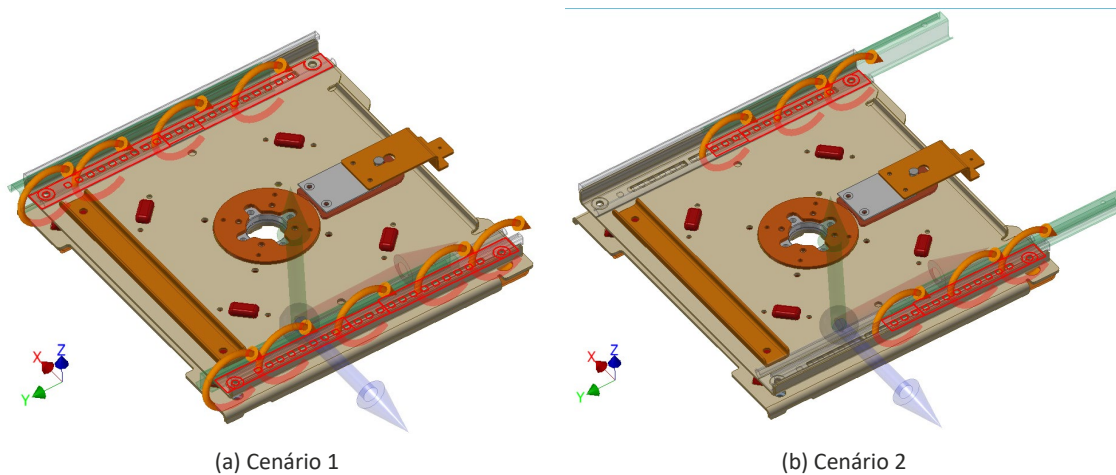


Figura 3-28 – Indicação dos momentos aplicados na base rotativa para os cenários 1 e 2.

Relativamente aos esforços internos gerados na secção da interface superior da base rotativa, nomeadamente nas zonas de contato entre as corrediças do banco e a parte superior da base rotativa, foram também considerados os momentos designados por  $M_{sup}$  e  $M_{inf}$ , resultantes das forças de solitação da parte superior e inferior do banco (forças de sinal contrário aos valores das reações  $R_{sup}$  e  $R_{inf}$ ), relativamente ao eixo y (considerando o referencial veículo indicado na Figura 3-25 e na Figura 3-26). Nas imagens da Figura 3-28 pode-se observar os momentos gerados nas zonas de interface entre as corrediças do banco e a base rotativa e que estas zonas são significativamente menores quando as corrediças estão na posição avançada (cenário 2).

### 3.3.7 Apresentação e discussão dos resultados das simulações MEF

Após a definição de toda a etapa de pré-processamento do modelo numérico, procedeu-se à simulação numérica pelo MEF. O tempo de processamento para a resolução numérica do modelo foi aproximadamente de 60 minutos por cada iteração com a configuração inicial da malha. Este constrangimento condicionou bastante os estudos paramétricos que inicialmente se previam efetuar à globalidade do projeto numa fase de pós validação do modelo numérico, nomeadamente o estudo de convergência dos resultados para o refinamento sucessivo de malhas.

No início da análise do modelo, considera-se importante destacar que, após vários refinamentos de malha, nem sempre foi possível eliminar ou minimizar satisfatoriamente os picos de tensão em zonas ou pontos singulares do modelo. Em várias partes do modelo verificou-se a existência de elevadas tensões de Von Mises concentradas em zonas ou pontos singulares. Por outro lado, verificou-se que na generalidade dos componentes os resultados dos deslocamentos eram admissíveis para a estratégia inicialmente adotada, ou seja, optou-se por validar o modelo tendo como critério a verificação das deformações/deslocamentos e não das tensões.

As imagens da Figura 3-29 e da Figura 3-30 ilustram um dos casos de refinamento localizado da malha em zonas ou pontos singulares do modelo onde foi necessário aumentar a precisão da solução numérica e nas quais é possível observar os resultados em termos quantitativos e qualitativos da tensão de Von Mises e dos deslocamentos.

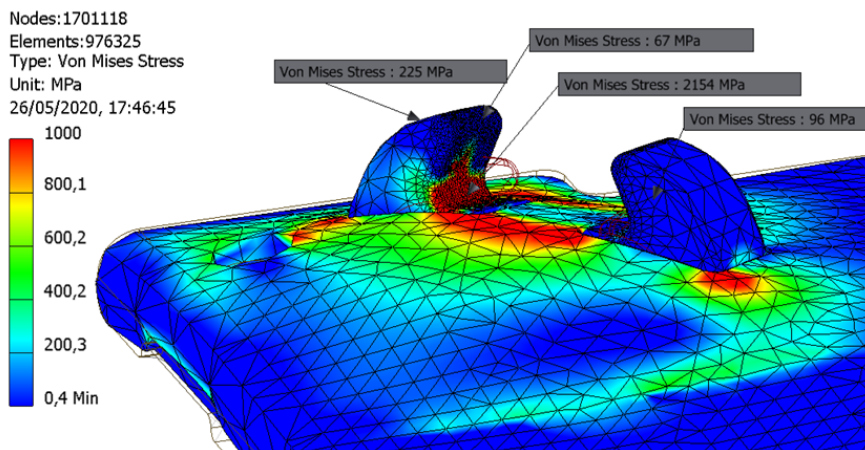


Figura 3-29 – Refinamento localizado da malha do modelo com resultados elevados de tensões.

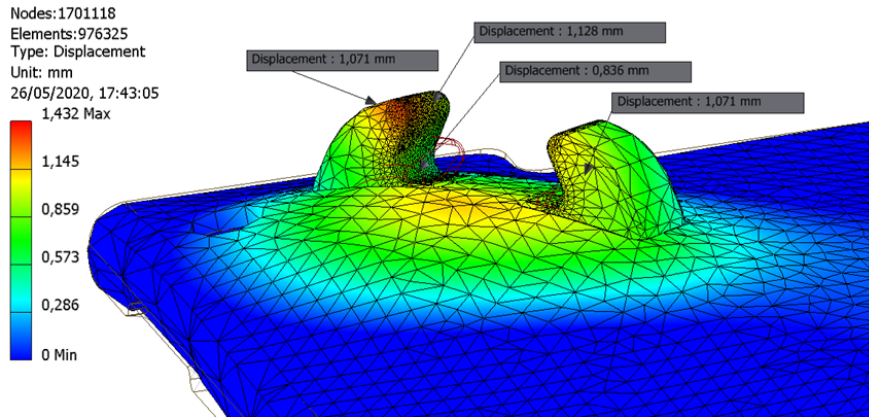
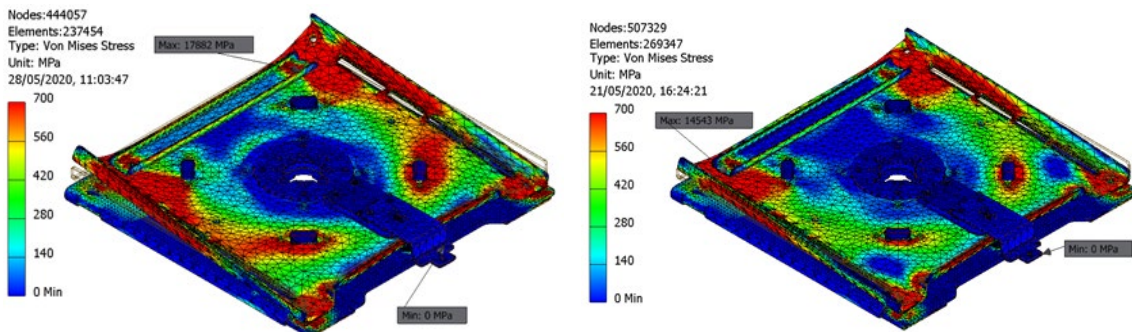


Figura 3-30 – Refinamento localizado da malha do modelo com resultados de deslocamentos.

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos com o *software Stress Analysis*, para os cenários 1 e 2, respetivamente, banco recuado e banco avançado, que foram considerados mais relevantes para a análise numérica.

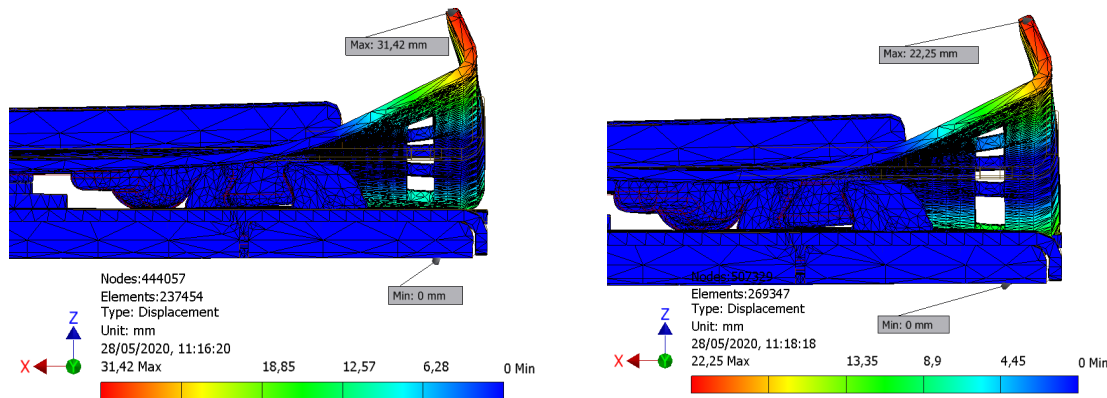
Considerando a estratégia adotada de validação do modelo para este estudo, a avaliação comparativa entre os cenários 1 e 2 será prioritariamente efetuada com base nos resultados dos deslocamentos das partes e subconjuntos do modelo com maior significado quantitativo e qualitativo. Esta análise numérica permitirá perceber qual o cenário mais crítico para posteriormente se proceder à otimização do modelo.



(a) Cenário 1

(b) Cenário 2

Figura 3-31 – Resultados da tensão de Von Mises para os cenários 1 e 2 do modelo.



(a) Cenário 1

(b) Cenário 2

Figura 3-32 – Resultados dos deslocamentos para os cenários 1 e 2 do modelo.

Com base na análise das imagens da Figura 3-31 e da Figura 3-32 verifica-se que, nos cenários 1 e 2, as tensões de Von Mises são muito elevadas, com valores muitíssimo superiores às tensões de cedência dos aços aplicados no modelo, e concentradas sobretudo no subconjunto da parte superior da base rotativa e nas ancoragens localizadas na parte posterior. Uma análise mais detalhada permite verificar que estas tensões se concentram em pontos singulares do modelo. Relativamente aos deslocamentos e considerando pontos de análise homólogos, verifica-se que o valor de deslocamento na direção Z é maior no cenário 1, ou seja, na posição em que as corredeiras do banco estão recuadas. Os valores dos deslocamentos nos cenários 1 e 2, são respetivamente, 31,42 mm e 22,25 mm.

Após se ter verificado que a simulação numérica do cenário 1 é a mais crítica, apresentam-se de seguida os resultados da análise numérica dos subconjuntos do modelo, relativos a esse cenário. Nas imagens da Figura 3-33 e da Figura 3-34 pode-se observar os resultados das tensões máximas de Von Mises e dos deslocamentos máximos de alguns dos componentes do subconjunto superior da base rotativa. Nesta análise destaca-se a placa superior da base rotativa que, apresenta um valor de tensão máxima de Von Mises de 10455 MPa localizado na zona de ancoragem e um valor de deslocamento máximo na direção Z de 31,42 mm, localizado na extremidade livre da zona deformada da placa.

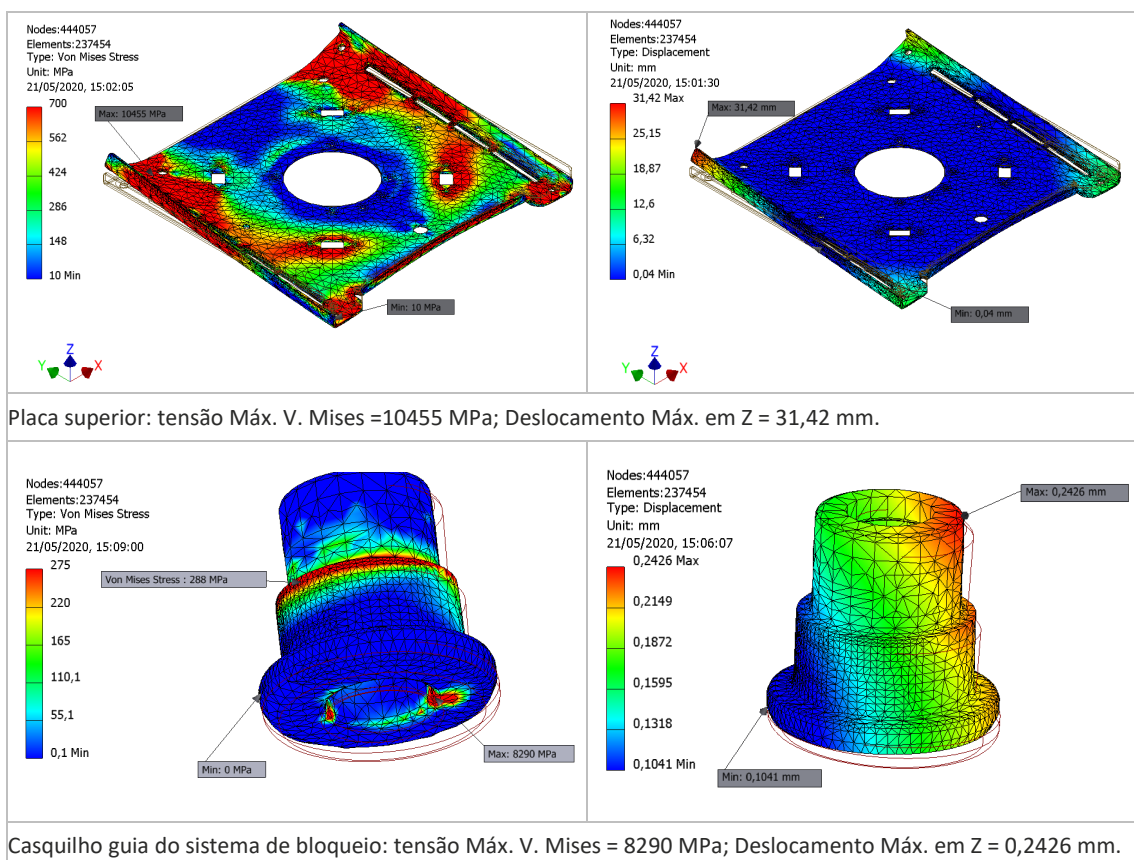


Figura 3-33 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto superior da base rotativa.

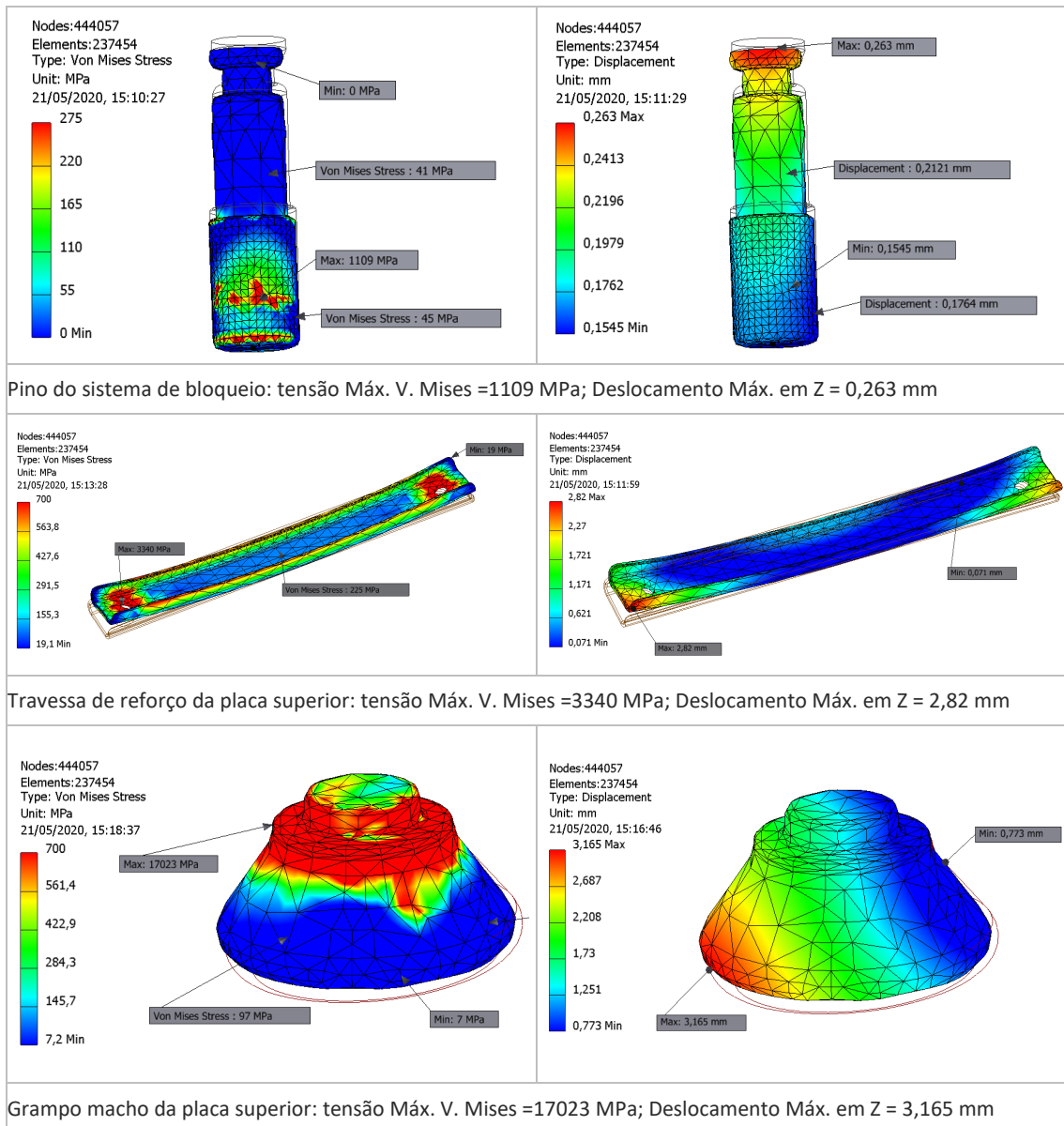


Figura 3-34 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto superior da base rotativa (continuação).

Na imagem da Figura 3-35 pode-se observar os resultados das tensões máximas de Von Mises e dos deslocamentos máximos do sistema rotativo e alguns dos seus componentes. Nesta análise destaca-se o componente “flange rotativa” que apresenta um valor de tensão máxima de Von Mises de 422,8 MPa, ou seja, um valor muito próximo do valor da tensão de cedência do material seleccionado (S420). No entanto, é importante referir que a função principal deste sistema não é estrutural, mas sim a rotação da base.

Nas imagens da Figura 3-36 e da Figura 3-37 pode-se observar os resultados das tensões máximas de Von Mises e dos deslocamentos máximos do subconjunto inferior da base rotativa e de alguns dos seus componentes. Nesta análise destaca-se o componente “casquilho batente” que, apresenta um valor muito elevado de tensão de Von Mises de 9294 MPa numa zona muito concentrada (zona singular). Por outro lado, pode-se verificar que o subconjunto em análise apresenta um valor de deslocamento

na direção Z de 1,308 mm, localizado num ponto singular do “grampo fêmea”. No entanto, o deslocamento verificado não coloca em causa a capacidade resistente deste componente, dado que a sua localização é distante da zona funcional da ancoragem.

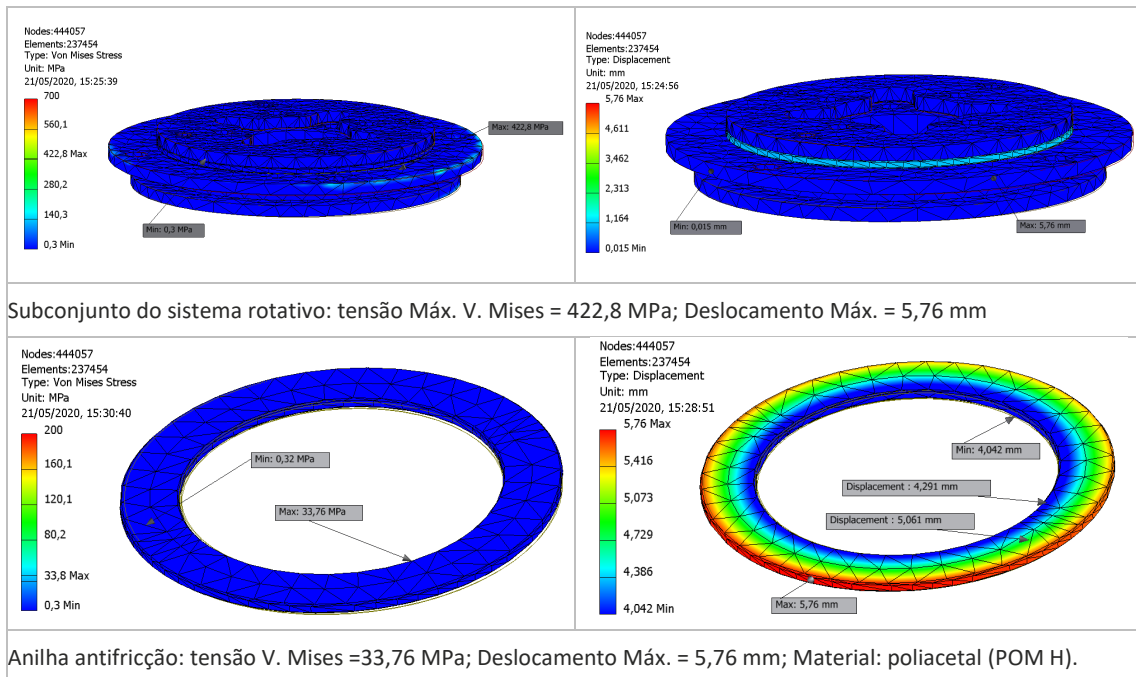


Figura 3-35 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto do sistema rotativo.

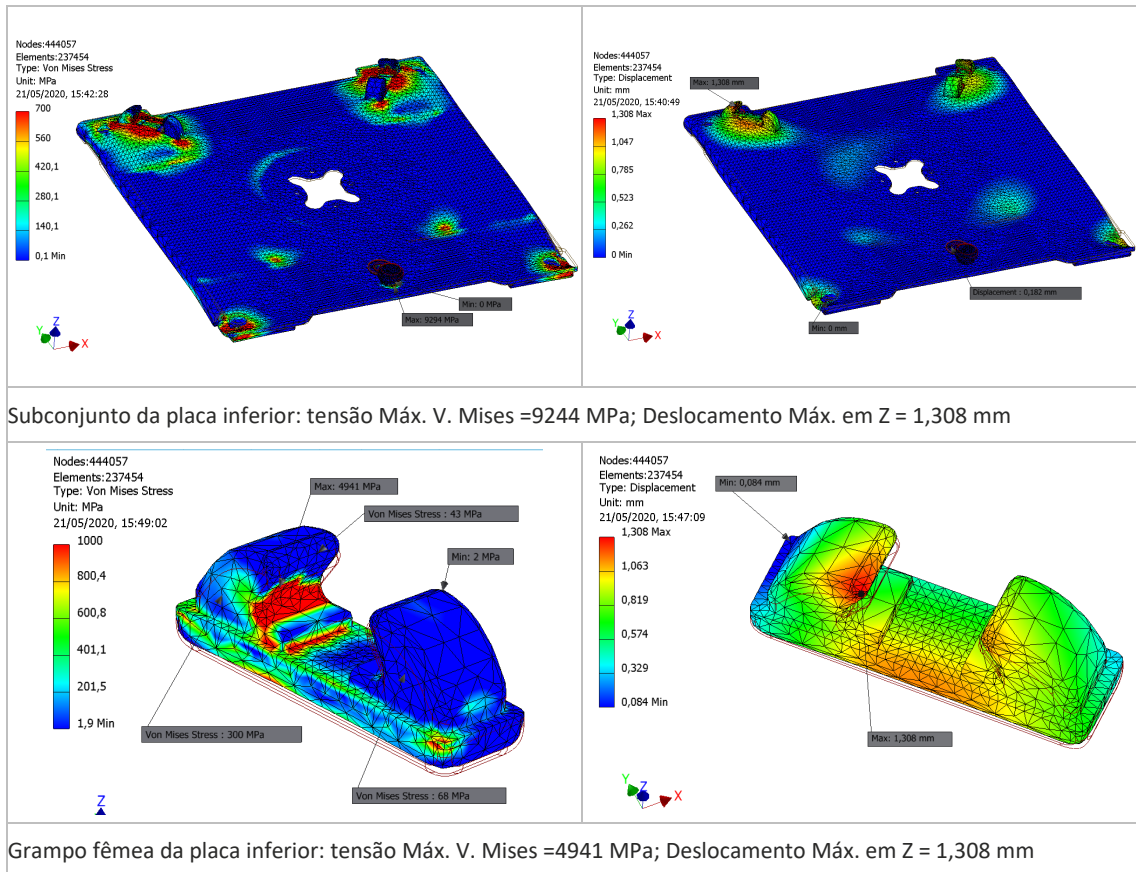


Figura 3-36 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto inferior da base rotativa.

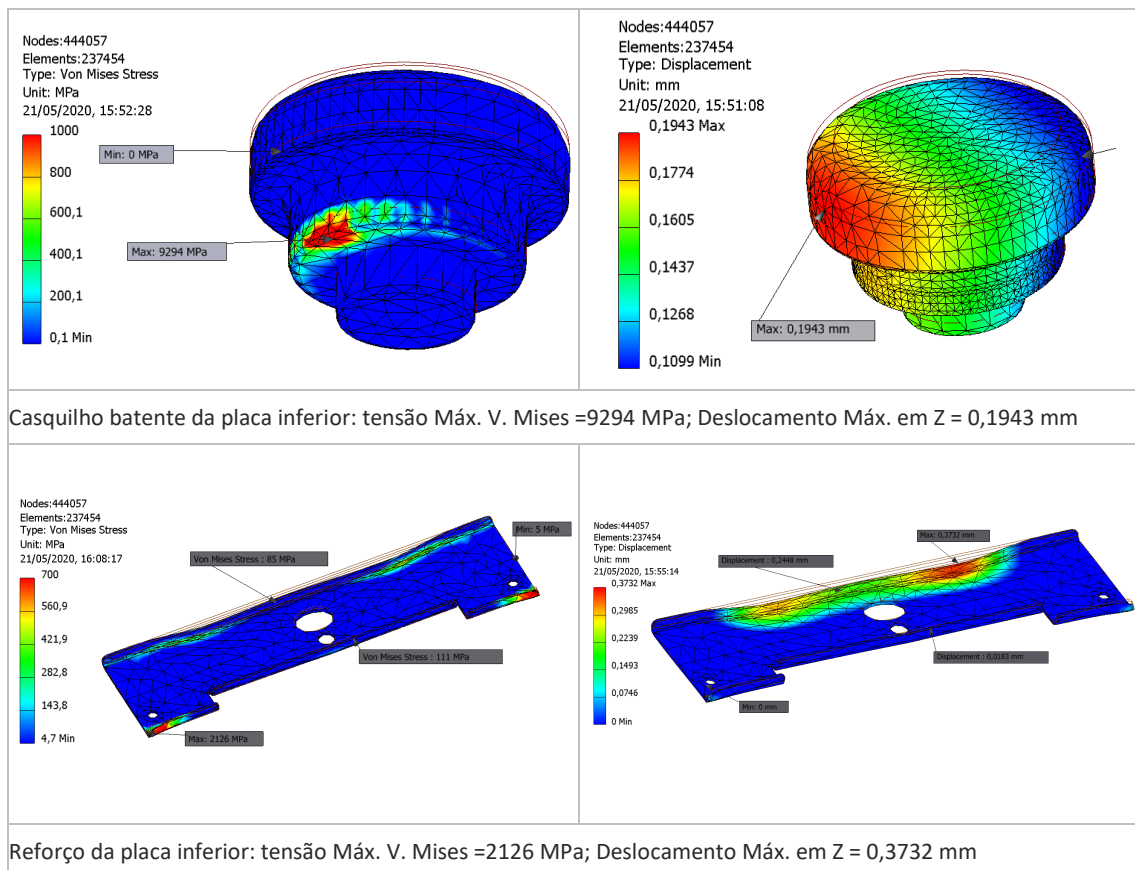


Figura 3-37 – Resultados do MEF relativos ao subconjunto inferior da base rotativa (continuação).

Fazendo-se uma análise global da simulação numérica com base nos resultados ilustrados nas imagens anteriores verifica-se que, a generalidade dos componentes apresenta tensões muito elevadas em zonas concentradas muito específicas, ultrapassando os valores das tensões de cedência definidos nos materiais dos respetivos componentes. Por outro lado, a globalidade dos componentes apresenta valores de deslocamentos muito baixos, excetuando o deslocamento com o valor de 31,42 mm, localizado na parte posterior da placa do subconjunto superior da base rotativa, verificando-se que estas regiões se encontram no regime plástico (deformação permanente).

É de salientar que em termos qualitativos as deformações verificadas na placa superior nos locais junto às fixações posteriores das corredeiras já eram previsíveis antes das simulações numéricas. Conforme se pode verificar no projeto, o comprimento do componente tipo perfil U, designado por “travessa reforço” não abrange toda a largura da placa superior devido ao espaço ocupado pelas corredeiras. Por outro lado, não existe espaço sob a placa para reforçar esses locais dado que provocaria interferências entre componentes durante a rotação da base. Lembra-se ainda que existe no caderno de encargos uma especificação que restringe a altura útil total da base rotativa.

No entanto, esta simulação permitiu verificar em termos quantitativos que os valores destas deformações nos locais referidos serão admissíveis desde que não condicionem a validação do modelo no ensaio de tração. Concretamente, a regulamentação associada a este ensaio, a diretiva 76/115/CEE e o regulamento ECE-R14, admitem dentro de certas condições a existência de deformação permanente.

### 3.3.8 Validação do modelo numérico através de ensaios reais

Conforme foi referido várias vezes neste trabalho, as simulações de modelos numéricos permitem evitar desperdícios de dinheiro e tempo no desenvolvimento de um produto. No entanto, dada a necessidade de homologar o produto num organismo de aprovação (TUV-Alemanha) e existindo a possibilidade de realizar previamente o ensaio de tração no equipamento da empresa, procedeu-se à execução de alguns protótipos para a referida experimentação. Refere-se que o custo para homologação completa por veículo de acordo com o especificado no caderno de encargos, ou seja, tendo em conta os regulamentos ECE-14 e ECE-17, ultrapassa largamente os 20.000 euros. Lembra-se ainda que os ensaios de homologação são realizados com os bancos do veículo montados na base rotativa o que aumenta o risco de insucesso dos ensaios, ou seja, também existe a possibilidade destes falharem nos ensaios. Neste caso, considera-se que poderá existir deformação dos bancos, mas sem rutura ou separação das duas estruturas.

Neste projeto, o facto de ser possível validar o modelo através da experimentação na empresa permitiu minimizar o risco de falha nos ensaios de homologação e, concomitantemente, validar os resultados das simulações numéricas.

Na Figura 3-38 apresentam-se algumas imagens relativas ao ensaio de tração ECE-R14 da base rotativa com o banco na posição de recuado, antes dos carregamentos dos dispositivos de tração superior e inferior. Nestas imagens pode-se observar o banco montado sobre a base rotativa nas situações, sem pré-carga e com pré-carga, respetivamente, na Figura 3-38 (a) e na Figura 3-38 (b). A função da pré-carga é tensionar os cabos e ajustar os dispositivos de tração antes dos carregamentos finais. A pré-carga foi realizada com um valor de 1500 N.

Neste ensaio utilizou-se um método expedito para medir os deslocamentos máximos de pontos definidos na parte superior da base rotativa que se presume ser a peça mais solicitada à deformação. Basicamente, o procedimento de medição consiste em medir a distância entre dois pontos correspondentes ao comprimento de fio de nylon deslocado durante o ensaio.

Refere-se que seria errado medir diretamente o deslocamento máximo num ponto da peça deformada após ensaio porque existe o fenómeno da recuperação elástica do material. Assim, um dos pontos do fio foi fixado com liberdade de deslizamento numa peça com zero graus de liberdade (não sujeita a deformação durante o ensaio) e o outro ponto foi fixado à peça mais solicitada à deformação, neste caso a placa superior da base rotativa. Na Figura 3-38 (c) pode-se observar um exemplo da aplicação do

procedimento de medição. Neste caso, para medir o eventual deslocamento vertical do pino de bloqueio, cuja função é bloquear a rotação da base. Este procedimento foi adotado para outros pontos de verificação.

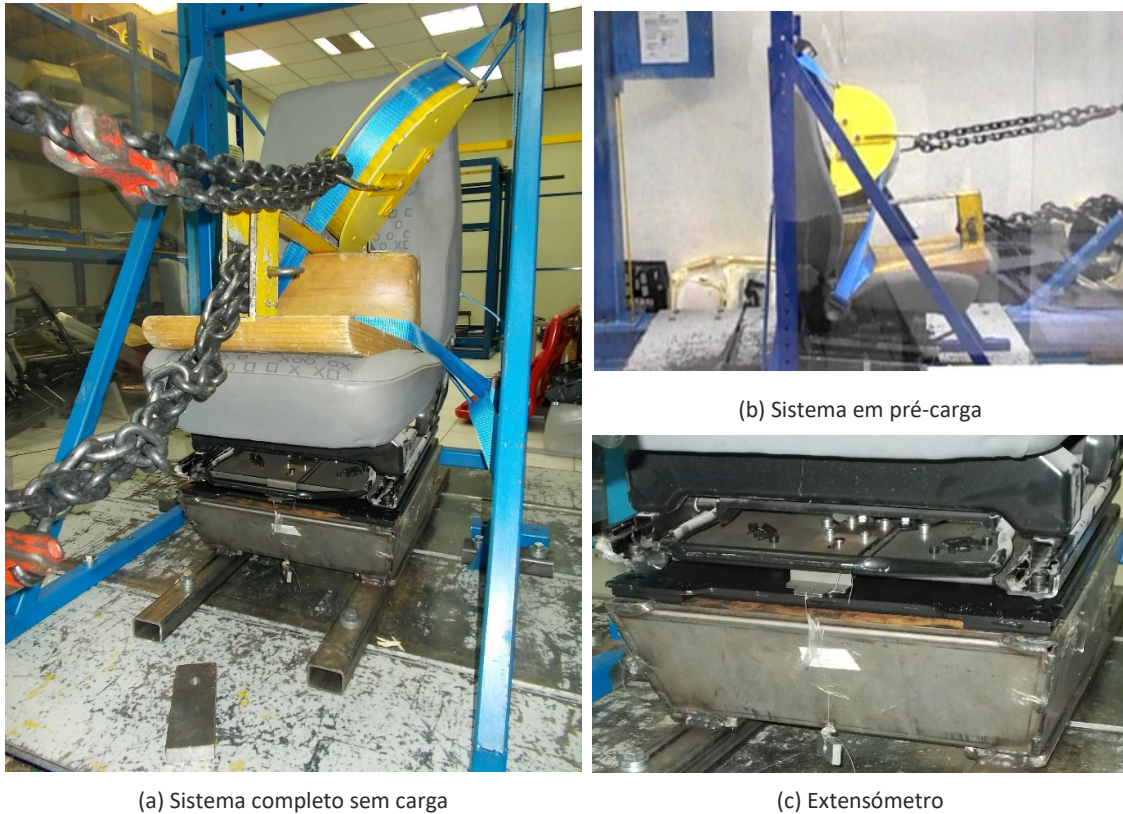


Figura 3-38 – Preparação do ensaio real do modelo nas instalações da empresa.

As imagens da Figura 3-39 permitem uma avaliação global em termos qualitativos do comportamento do banco e da base rotativa após o ensaio de tração no laboratório da empresa, assim como identificar os componentes que sofreram mais deformação. Conforme se pode observar nestas imagens, o banco e a base rotativa apresentam deformações assimétricas relativamente ao plano médio longitudinal.

Na Figura 3-39 (b) é possível observar que a zona de maior deformação está localizada na parte posterior da base rotativa, junto à corrediça, sendo o valor do deslocamento final de 32 mm.

O deslocamento máximo, de valor igual a 41 mm, foi obtido após o ensaio através da medição do comprimento linear de fio deslocado com o auxílio de um paquímetro. Este ensaio permitiu ainda concluir que a principal deformação é similar à deformação descrita pela estrutura do modelo na simulação numérica do cenário 1 (banco recuado). A extensão da zona afetada por esta deformação pode ser observada na Figura 3-39 (c).

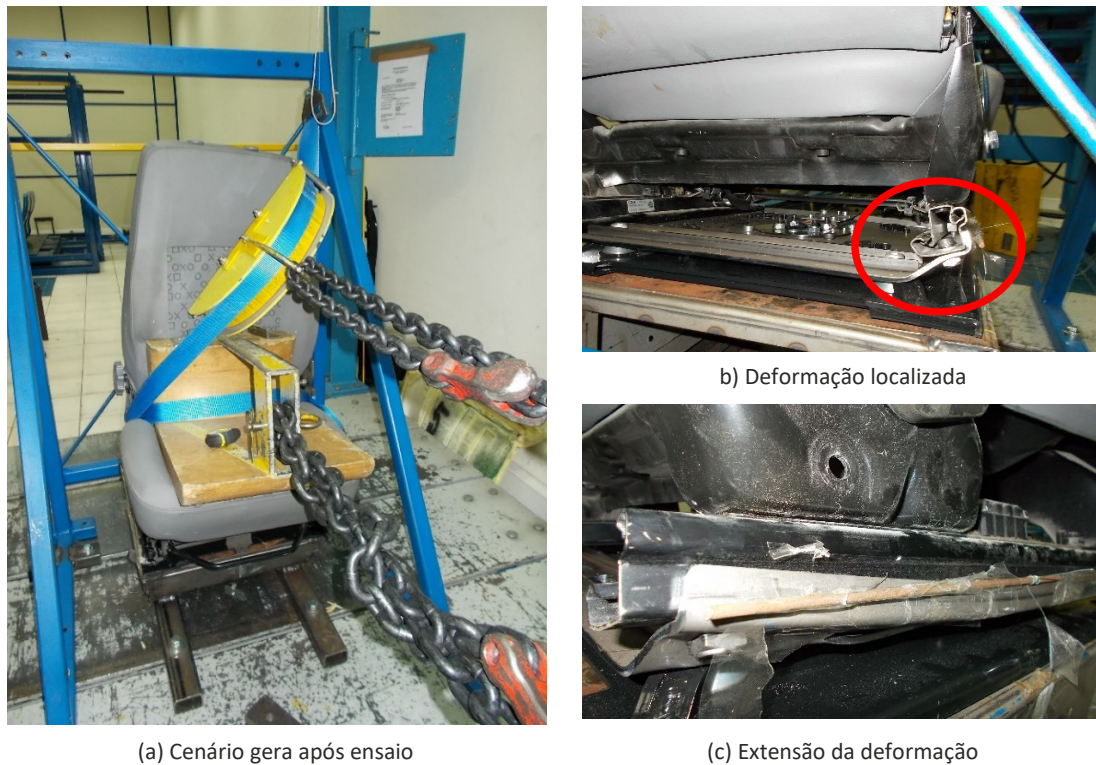


Figura 3-39 – Ensaio real do modelo realizado nas instalações da empresa.

Com base nos dados do gráfico da Figura 3-40, é possível analisar a evolução das forças na estrutura da base rotativa, verificando-se que esta suportou o carregamento durante o intervalo de tempo exigido de 0,2 s, sendo o tempo de manutenção do carregamento superior a 6 s. Também é possível verificar no gráfico que as forças de tração superior e inferior ultrapassaram os valores exigidos pelo regulamento, respetivamente, 20,9 kN e 14,1 kN. Os valores atingidos no ensaio foram significativamente superiores aos valores previstos, devido ao facto da calibração da máquina de tração ser efetuada por um processo manual de regulação de válvulas hidráulicas que depende do erro do equipamento e do fator humano.

Neste gráfico, é ainda possível analisar uma quebra das forças no intervalo entre 16 e 17 segundos, sendo esta atribuída ao deslocamento inicial sofrido pela estrutura, ou seja, onde se verifica a existência de uma deformação muito localizada durante os carregamentos. Por último, a interrupção abrupta das forças na parte final do gráfico deve-se ao desligamento (corte de energia através do botão emergência) do equipamento de ensaios.

A análise dos resultados obtidos neste ensaio experimental permitiu validar o modelo construído, ou seja, aumentar a sua fiabilidade, assim como avançar para a fase de otimização estrutural do modelo.

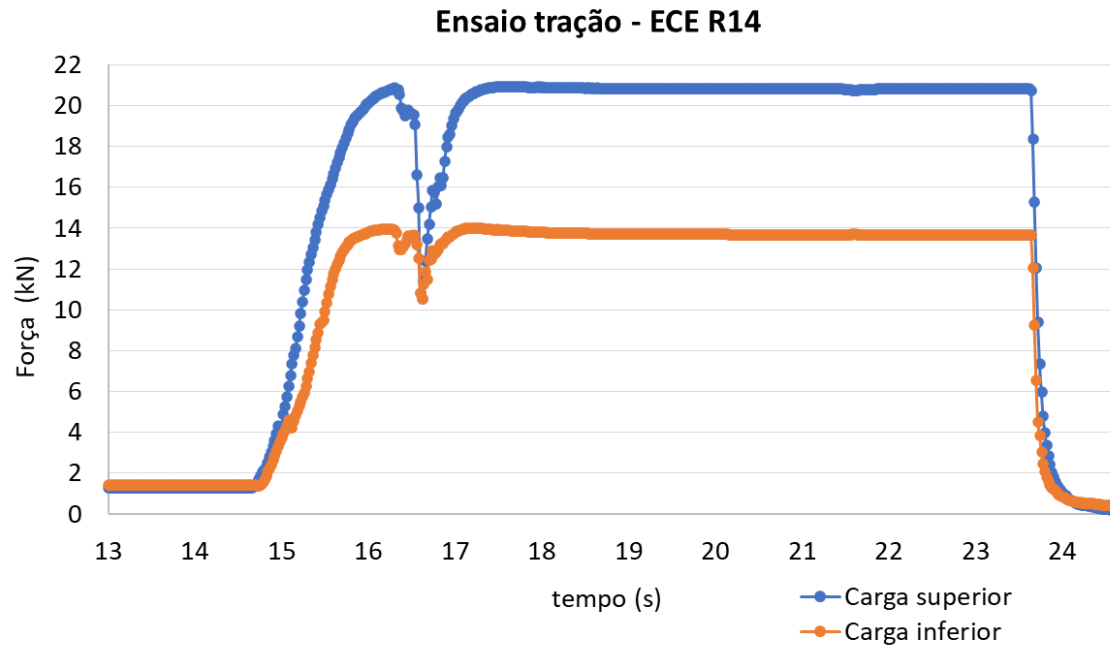


Figura 3-40 – Gráfico das forças de tração do ensaio ECE – R14

### 3.3.9 Soluções de otimização do modelo

Atualmente projetar um produto que cumpra os requisitos básicos de funcionamento, ou dizer que este satisfaz as exigências do cliente, significa que apenas se está a realizar uma parte do projeto. De facto, projetar significa também conseguir o melhor sistema possível, ou seja, um modelo otimizado.

Frequentemente, um projeto estrutural tem como objetivo a diminuição do peso total da estrutura, sendo impostas restrições relativas à tensão máxima, aos deslocamentos máximos, ao volume máximo e aos modos de vibração admitidos.

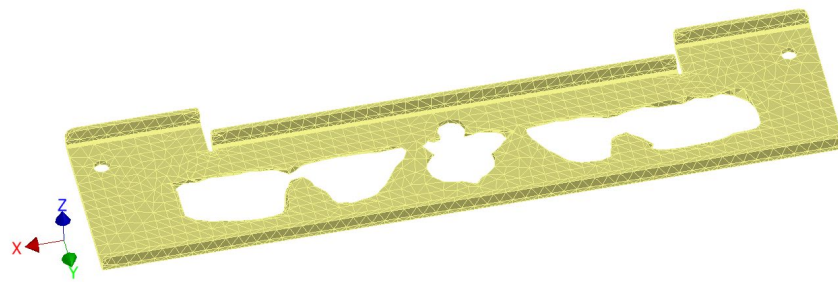
Neste projeto para minimizar o peso da estrutura, adotou-se a estratégia de otimizar o modelo analisando-se primeiramente, os componentes onde se verificam as menores tensões e deslocamentos, ou seja, onde à partida foi mais fácil atuar.

Nesta etapa de pós validação do modelo não foi possível fazer um estudo paramétrico à globalidade do modelo devido aos constrangimentos anteriormente referidos, nomeadamente de tempo elevado de processamento das simulações e valores elevados de tensões concentradas em pontos singulares.

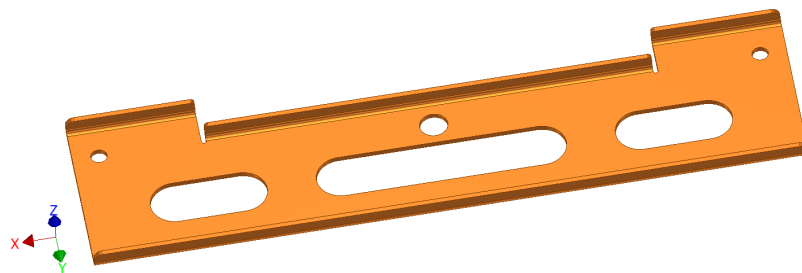
Antes de se proceder à apresentação de possíveis soluções otimizadas da estrutura metálica da base rotativa, considera-se importante referir que o processo de otimização estrutural é um processo iterativo. Assim, as alterações efetuadas na estrutura foram realizadas de modo progressivo, e o impacto que estas têm na simulação foi sucessivamente analisado.

Preferencialmente, adotou-se neste trabalho a otimização estrutural baseada na otimização topológica. Este tipo de otimização tem como objetivo definir a melhor

distribuição de material num domínio pré-determinado, ou seja, definir a melhor forma a atribuir ao objeto para permitir a eliminação de material desnecessário.



a) Otimização topológica do componente inicial

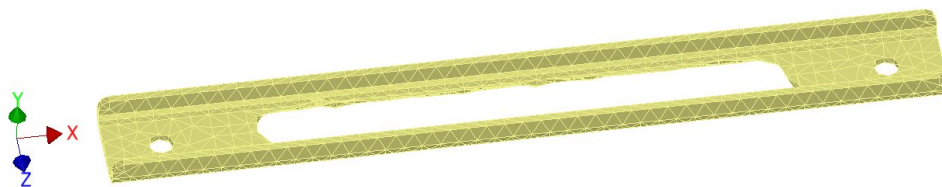


(b) Componente otimizado

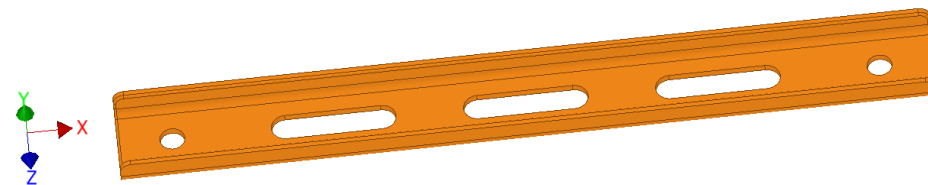
Figura 3-41 – Otimização topológica do reforço da base inferior.

Os primeiros componentes analisados neste estudo foram os componentes, designados por “reforços da base inferior”. Na Figura 3-41 (a) é possível observar a topologia do componente inicial que serviu de orientação para a criação das novas geometrias deste componente, como se pode observar na Figura 3-41 (b).

A otimização topológica da “travessa reforço” da base superior está ilustrada nas imagens da Figura 3-42 (a) e (b).



(a) Otimização topológica do componente inicial



(b) Componente otimizado

Figura 3-42 – Otimização topológica da travessa reforço da base superior.

Neste estudo foram também adotadas soluções empíricas com o objetivo de tornar a estrutura mais leve, ou seja, simples alterações de geometrias ou aberturas em zonas não funcionais de alguns componentes. Na Figura 3-43 exemplifica-se a solução adotada para um componente do sistema anel rotativo.

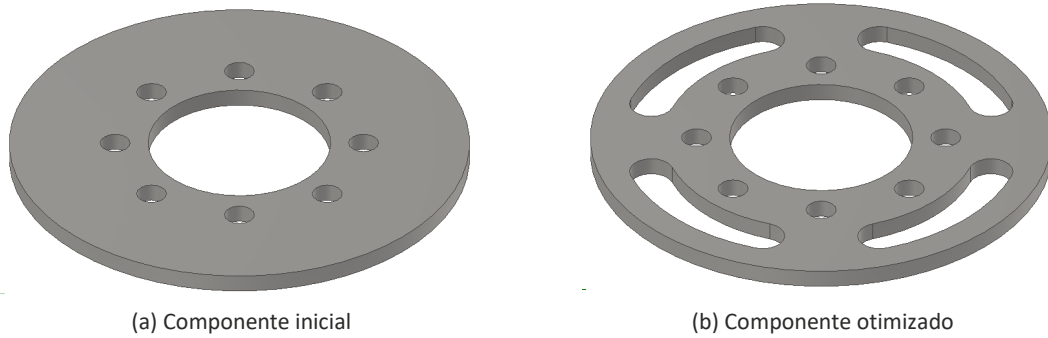


Figura 3-43 – Solução empírica de otimização de um componente.

Por último, como terceira solução de otimização, foi imposta a redução da espessura da chapa e da alteração do material em alguns componentes. Esta solução foi adotada por exemplo nos componentes “reforços da base inferior”, reduzindo-se a espessura de 3 para 2 mm, e alterando o aço de S420 para S700, ou seja, a sua resistência, aumentando a tensão de cedência de 420 MPa para 700 MPa.

Considera-se também importante referir que a solução otimizada de um determinado componente da estrutura pode garantir os critérios de validação do modelo. No entanto, se forem efetuadas otimizações nos diversos componentes da estrutura a combinação dos vários componentes otimizados pode em conjunto não verificar as restrições impostas ao modelo modificado. Assim, as geometrias obtidas anteriormente foram seguidamente implementadas no conjunto da base rotativa e sujeitas aos carregamentos do ensaio ECE - R14, através de nova simulação numérica.

Após a simulação numérica do modelo otimizado, verifica-se que o deslocamento máximo na direção Z tem o valor de 31,61 mm e localiza-se na mesma zona das simulações anteriormente analisadas. Em termos qualitativos é possível observar que o tipo de deformação é similar à deformação verificada nas simulações anteriores e no ensaio real de tração realizado na empresa (Figura 3-44).

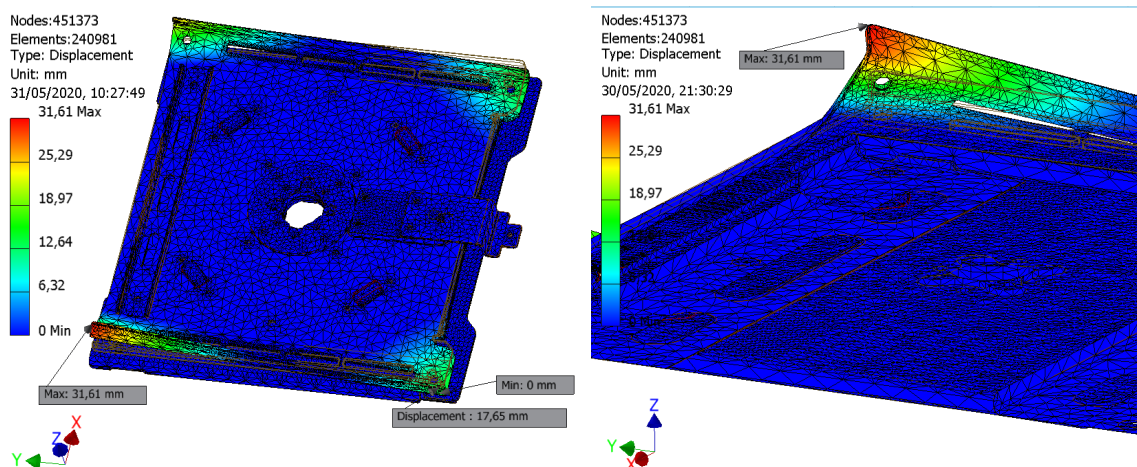


Figura 3-44 – Resultados dos deslocamentos do modelo otimizado.

De seguida, apresenta-se na Tabela 3-5 um resumo dos resultados dos deslocamentos máximos obtidos nas simulações numéricas do modelo otimizado e não otimizado, e

no ensaio real de tração. Esta tabela permite ainda analisar a evolução obtida na redução de peso do modelo, verificando-se que o modelo otimizado permitiu uma redução de 5,8 % da massa inicial e uma redução de 8,2 %, relativamente à massa máxima admissível definida no caderno de encargos.

Tabela 3-5 – Resumo dos resultados das simulações numéricas e ensaios reais.

Designação	Deslocamento máximo em Z (mm)	Massa (kg)
Simulação numérica do modelo não otimizado	31,42	17,525
Ensaio real do modelo não otimizado	41	17,525
Simulação numérica do modelo otimizado	31,61	16,518

### 3.4 Descrição da fase do projeto detalhado (projeto final)

Nesta fase de desenvolvimento do produto procede-se à definição geral do produto e dos seus componentes, assim como à construção de protótipos (pré-produção), fabricados segundo especificações de série, mas ainda não produzidos nos meios industriais para serem verificados e ensaiados exaustivamente. Este procedimento tem como objetivo confirmar todos os requisitos exigidos, ou seja, se o produto funciona corretamente, nomeadamente se a fiabilidade e a manutibilidade estão dentro dos critérios esperados.

Após as verificações e testes efetuados, é confirmada a configuração do produto, são selecionados os materiais e componentes sob o ponto de vista tecnológico, qualidade e tipo, que preferencialmente devem ser selecionados dentro do catálogo de materiais e componentes normalizados da empresa.

Esta fase que precede a produção pré-série, consiste em produzir uma determinada quantidade de unidades para serem analisadas e avaliadas pelos setores da empresa que tenham capacidade para identificar eventuais deficiências do processo ou do produto. A produção pré-série já é fabricada com os equipamentos de produção. Após a avaliação dos resultados obtidos nos testes e na experiência da produção, o projeto é validado ou é devolvido ao departamento de projeto para ser corrigido.

Por último, considera-se importante referir que durante o desenvolvimento do produto, a “análise do valor” pode desempenhar um papel fundamental para a otimização do quociente Qualidade/Custo do produto.

#### 3.4.1 Desenhos do projeto final

Nesta seção serão apresentados os desenhos de projeto do produto base rotativa. Os desenhos de projeto são desenhos de conjunto já completamente definidos relativamente às características de todos os seus elementos e às relações mútuas entre

eles. Os desenhos de conjunto representam com rigor e pormenor a solução adotada, que resulta do anteprojecto aceite pelo cliente. Estes desenhos são a base dos desenhos de definição. Neste trabalho as condições de resistência da solução adotada foram definidas com base nos cálculos efetuados pelo MEF. Por outro lado, os desenhos de definição estabelecem as exigências funcionais a que deve satisfazer um determinado componente do conjunto. Estes desenhos definem as formas, geometrias, o material e os revestimentos, do componente no estado de utilização. Todos os componentes do projecto estão indicados nas listas de artigos, sendo estas incluídas nos desenhos de conjunto. As listas de artigos são a nomenclatura que completa o desenho de conjunto, onde são numerados todos os componentes, devidamente referenciados, do modelo que foi desenhado em CAD 3D. Nas listas de artigos estão definidas, por designações completas as peças normalizadas que fazem parte do conjunto. Conforme se poderá verificar nos anexos dos desenhos deste trabalho, a quantidade de desenhos é enorme, razão pela qual serão apresentados nesta seção apenas os principais desenhos e partes funcionais dos sistemas e subsistemas do produto, base rotativa, modelado e simulado pelo MEF.

### 3.4.2 Desenhos dos sistemas e subsistemas (desenhos de pormenor)

De seguida, apresentam-se os principais desenhos do sistema principal, conjunto do produto objeto de desenvolvimento, designado por base rotativa.

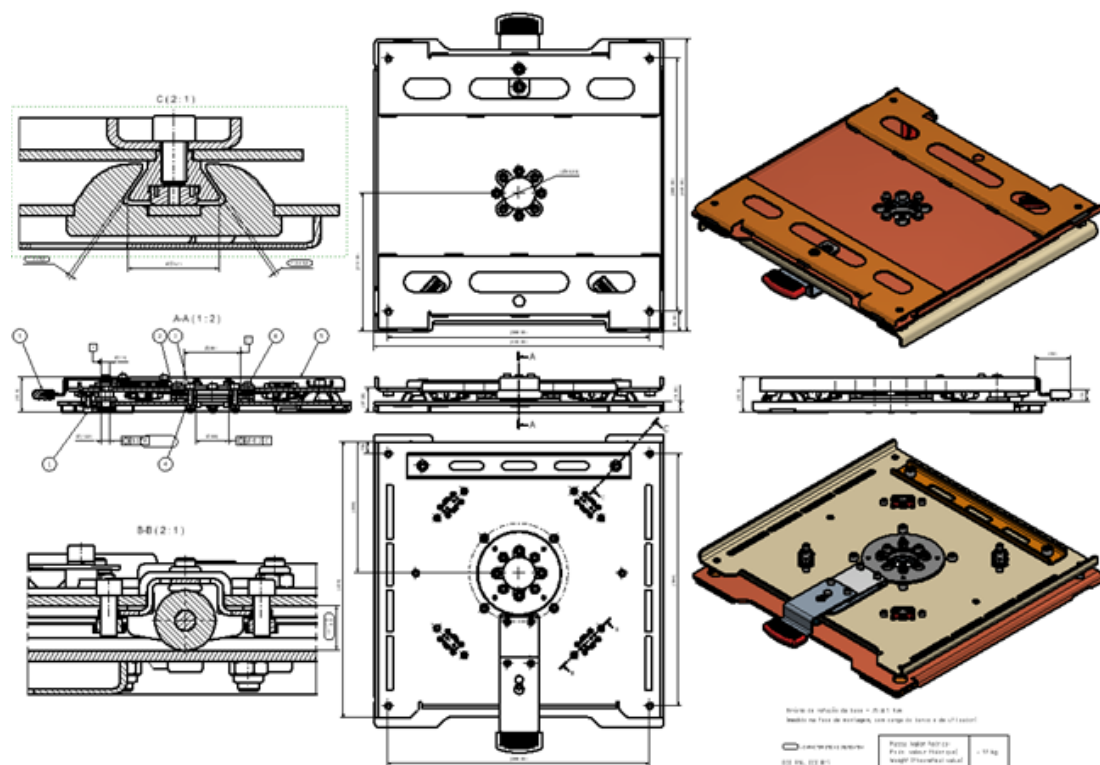


Figura 3-45 – Perspetivas isométricas e multi-vistas do desenho de conjunto do sistema base rotativa.

Na imagem da Figura 3-45 estão ilustradas várias vistas e perspetivas isométricas do desenho de conjunto base rotativa. Este sistema é constituído pelos subsistemas: subconjunto inferior da base rotativa, subconjunto superior da base rotativa,

subconjunto do sistema rotativo, subconjunto da alavanca do sistema de bloqueio da rotação da base. Este desenho de conjunto e os respetivos desenhos de definição podem ser consultados em detalhe no anexo 1.

No desenho ampliado da vista em corte (Figura 3-46) e na Figura 3-47 destacam-se alguns detalhes funcionais do sistema base rotativa. Nomeadamente, podem-se observar algumas das características de toleranciamento geométrico que devem ser controladas após a montagem deste conjunto e durante a fase de produção de modo a garantir o correto funcionamento.

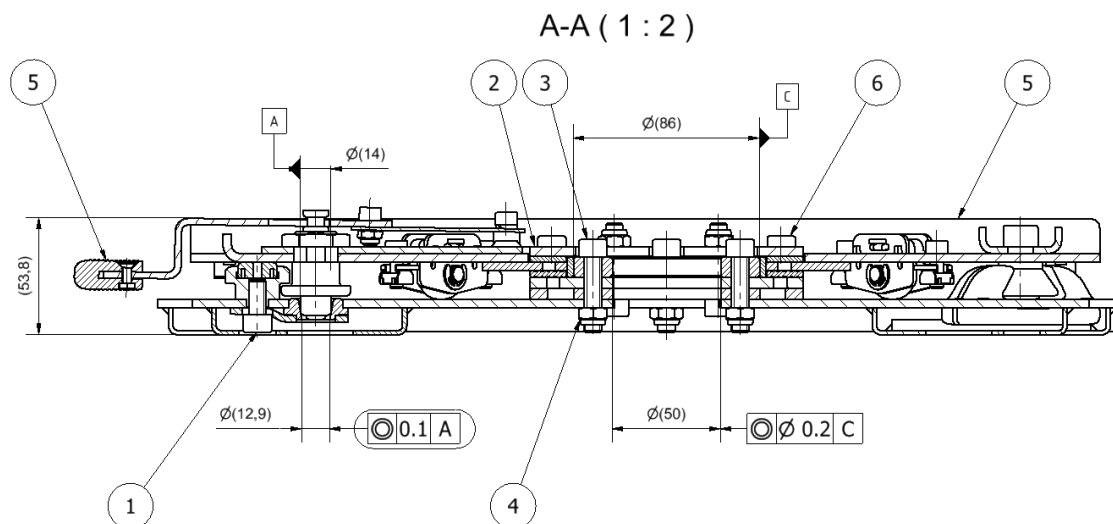


Figura 3-46 – Vista em corte do conjunto base rotativa.

Na Figura 3-47 (a) está ilustrada a solução do sistema de bloqueio para evitar folgas/vibrações do conjunto banco e base rotativa durante a sua utilização, sendo este um dos requisitos do cliente. Pode-se observar que o pino do sistema de bloqueio é comprimido contra um casquilho cónico pela ação transmitida por uma alavanca que está ligada a uma chapa de aço mola, sendo a rigidez de 6 N/mm. O desbloqueio deste sistema é efetuado através do acionamento da pega aparafusada na extremidade da alavanca que está ilustrada na Figura 3-47 (a) e (c). Para os 4 rodízios da base rotativa, concebeu-se um conjunto suporte das rodas constituído por componentes de chapa que estão ligados entre si por encaixe rápido, como se poder observar na Figura 3-47 (b). Para evitar o colapso da estrutura durante o ensaio de tração ECE – R14, foram concebidas 2 ancoragens que estão localizadas na parte posterior da base rotativa. Na Figura 3-47 d) está ilustrada uma das ancoragens. As ancoragens são constituídas por pares de grampos, sendo os grampos macho (corpo de revolução cónico) obtidos pelo processo de torneamento e os grampos fêmea obtidos pelo processo de forja e posterior fresagem nas zonas funcionais.

No desenho de conjunto, ilustrado na Figura 3-48, está definida a solução adotada para o sistema rotativo, designado por anel rotativo. Este subconjunto foi concebido de modo a ser montado como um módulo independente do conjunto base rotativa, no qual é aplicado um binário de aperto de 3 Nm na ligação aparafusada. Este binário tem como objetivo permitir uma rotação do sistema sem folgas e vibrações. Este

subconjunto é montado no conjunto principal com parafusos e porcas anti desaperto. Na constituição deste conjunto destacam-se os componentes poliméricos, de poliacetal (POM – H), nomeadamente as 2 anilhas antifricção, superior e inferior, e o anel antifricção, cuja função é reduzir o atrito entre as superfícies de contato dos componentes e conceber um sistema rotativo isento de manutenção. Este desenho de conjunto e os respetivos desenhos de definição podem ser consultados em detalhe no anexo 1.

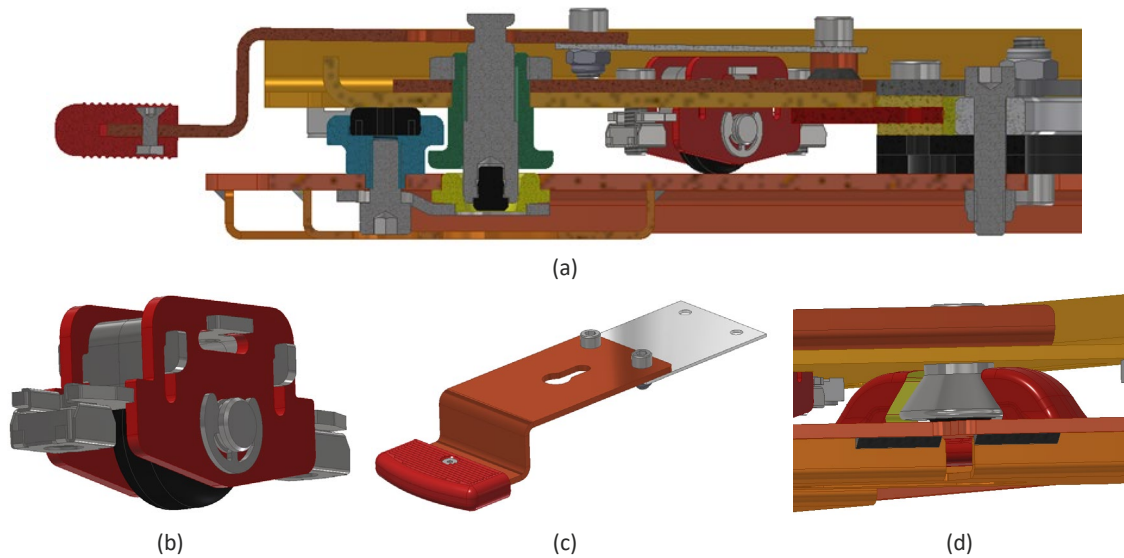


Figura 3-47 – Vistas de subconjuntos e funções do conjunto base rotativa.

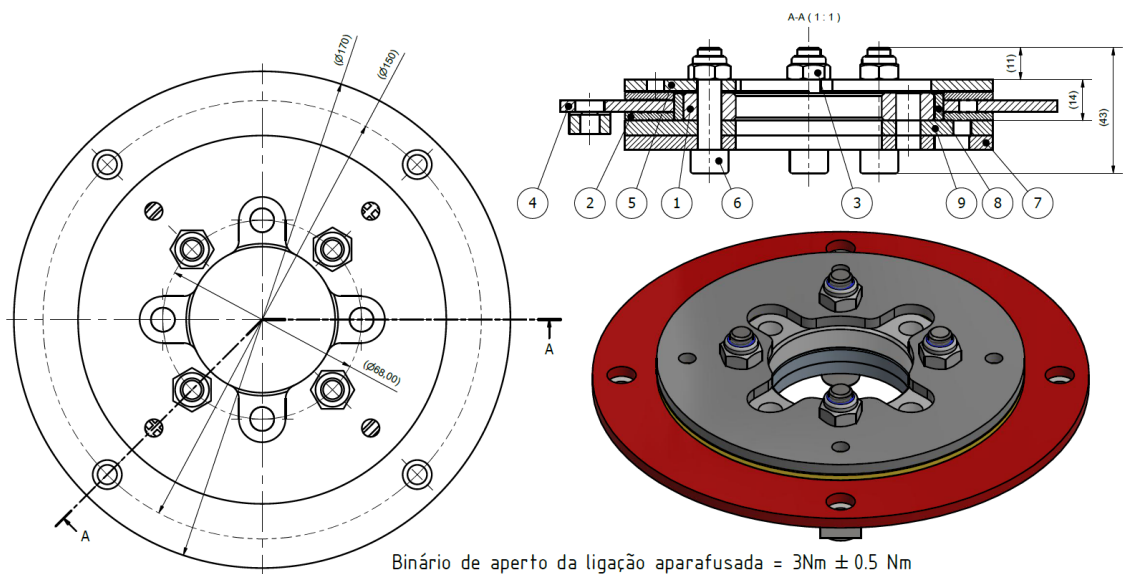


Figura 3-48 – Vistas do desenho de subconjunto do sistema rotativo.

O binário indicado no desenho de conjunto do sistema rotativo com o valor de 3 Nm (Figura 3-48) para de aperto da ligação aparafusada, foi definido experimentalmente num protótipo da base rotativa, após carregamento do mesmo com uma carga de 70

kg para simular o peso do utilizador, conforme se pode observar nas imagens da Figura 3-49.



Figura 3-49 – Medição do binário de rotação de um protótipo da base rotativa.

Na Figura 3-50 está ilustrado o desenho de subconjunto da base inferior da base rotativa. Neste subconjunto, o processo de soldadura MIG foi reduzido o mais possível através de ensaios realizados durante a fase de execução dos protótipos, de modo a evitar empenos nos vários componentes, dado que estes seriam prejudiciais ao correto funcionamento do sistema. Após a validação dos processos de fabrico deste subconjunto, especificou-se no desenho uma tolerância geométrica de planeza na zona da trajetória da rotação dos rodízios para ser controlada na fase de produção. Este desenho de conjunto e os respetivos desenhos de definição podem ser consultados em detalhe no anexo 1.

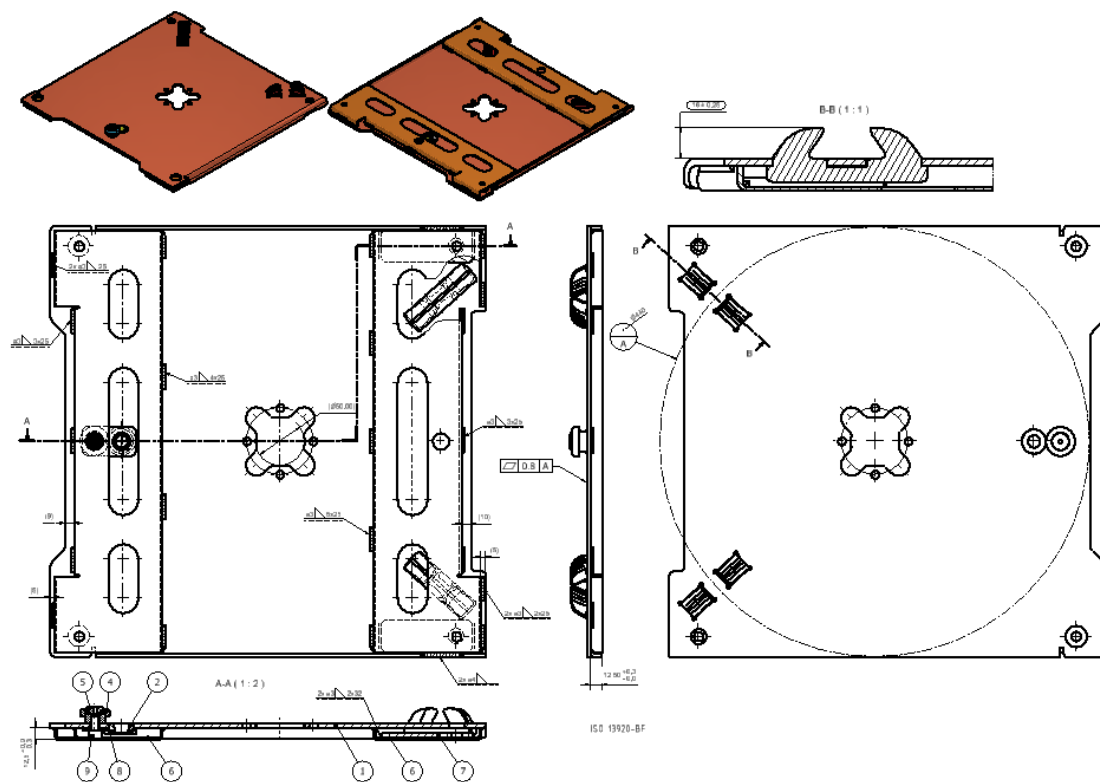


Figura 3-50 – Perspetivas isométricas e multi-vistas do desenho de subconjunto da base inferior da base rotativa.

Na Figura 3-51 está ilustrado o desenho de subconjunto da base superior da base rotativa. Neste subconjunto, foi possível excluir totalmente o processo de soldadura MIG, pelas razões referidas anteriormente, sendo a montagem dos vários componentes realizada por ligações aparafusadas. Este desenho de conjunto e os respetivos desenhos de definição podem ser consultados em detalhe no anexo 1.

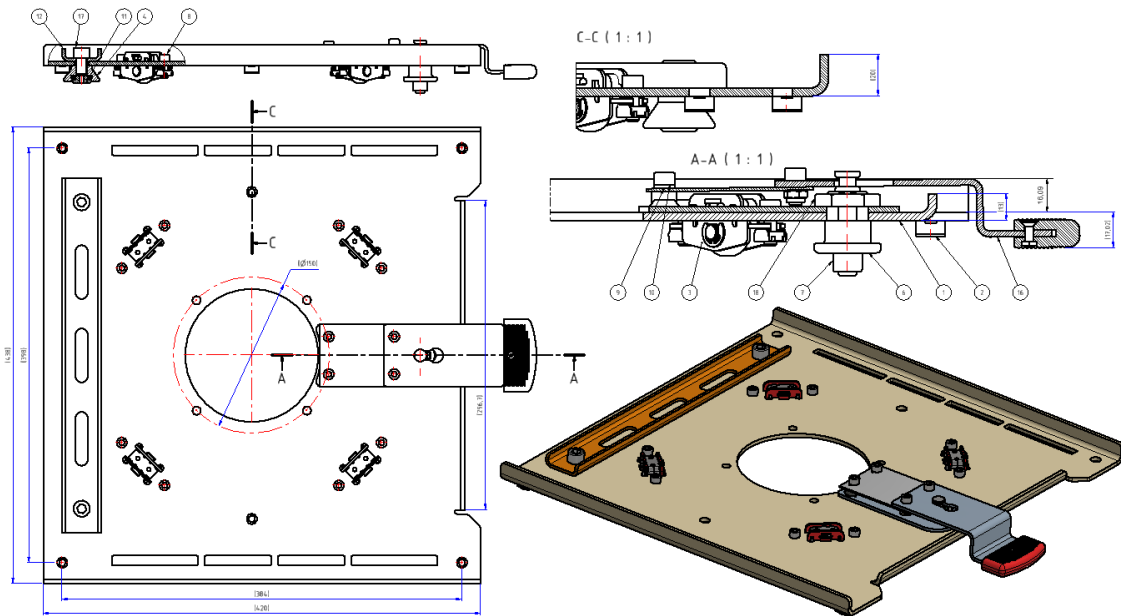


Figura 3-51 – Vistas do desenho de subconjunto da base superior da base rotativa.

### 3.4.3 Desenhos do layout do ensaio ECE - R14 para homologação

Para a homologação da base rotativa foi necessário realizar os desenhos dos layouts da plataforma de ensaios relativos ao ensaio de resistência das fixações do cinto de segurança, conforme o regulamento ECE – 14. Estes desenhos foram usados não só pela entidade homologadora na Alemanha, mas também nos ensaios previamente realizados nas instalações da empresa (Figura 3-52 e Figura 3-53).

Nestes desenhos, pode-se observar o banco nas posições, recuado e banco avançado (cenários 1 e 2) relativamente à base rotativa e aos pontos de ancoragem do cinto localizados no pilar da estrutura suporte montada na plataforma de ensaios.

As tabelas incluídas nos desenhos indicam as coordenadas dos pontos de ancoragem referentes às fixações do cinto de segurança, e ao ponto H. As coordenadas indicadas são relativas ao referencial veículo, tendo estas sido facultadas pelo fabricante do veículo. Estes desenhos podem ser consultados em detalhe no anexo 2.

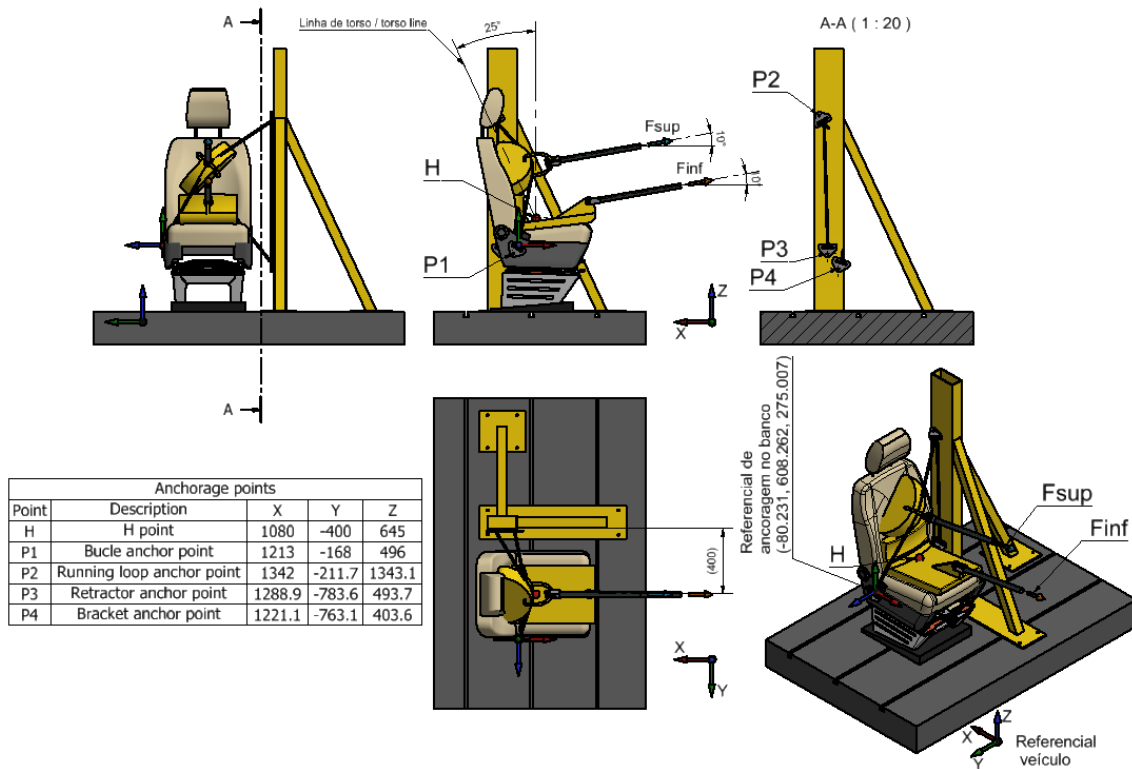


Figura 3-52 – Desenho do layout de ensaio ECE – R14 da base rotativa com banco recuado.

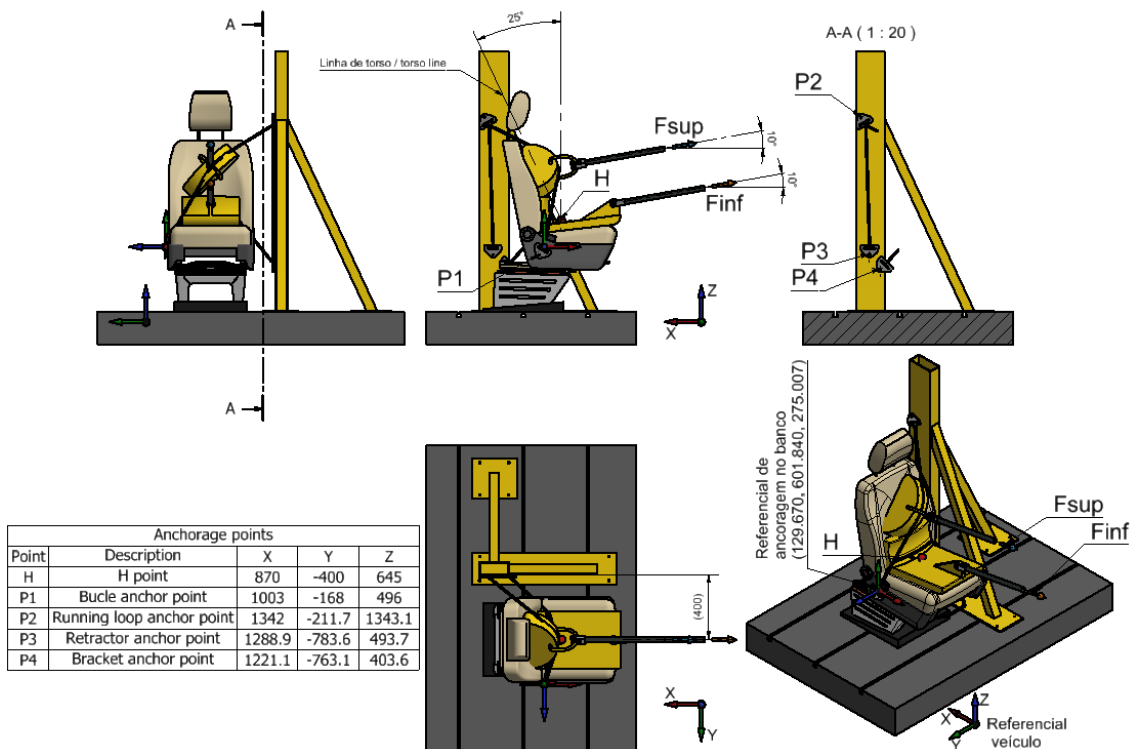
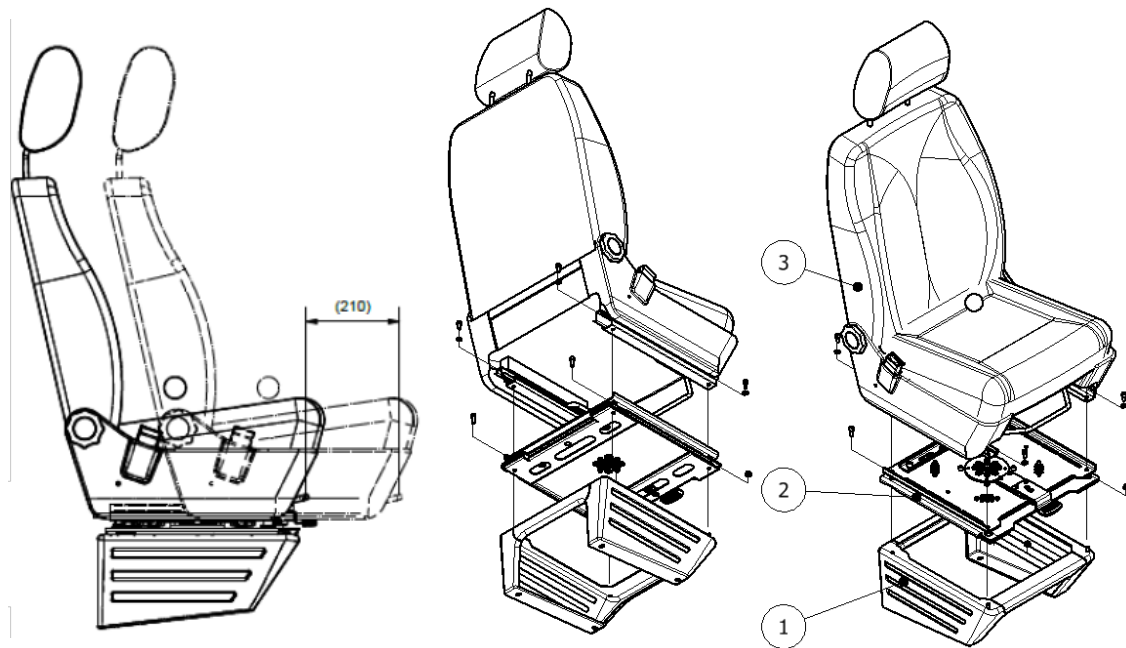


Figura 3-53 – Desenho do layout de ensaio ECE – R14 da base rotativa com banco avançado.

### 3.4.4 Desenhos de montagem do banco e base rotativa no veículo

Seguidamente são apresentados os desenhos relativos à instalação e utilização do produto base rotativa. Estes desenhos fornecem as indicações necessárias para uma correta e segura montagem do banco e da base rotativa na base suporte do veículo Volkswagen T5.

Nas imagens da Figura 3-54 apresentam-se algumas das vistas do desenho técnico de montagem dos produtos no veículo. As vistas explodidas permitem facilmente perceber a sequência de montagem e as ligações aparafusadas existentes entre os vários componentes/conjuntos. Neste desenho pode-se observar que as corrediças de deslizamento frontal do banco permitem um curso máximo de 210 mm. A definição completa da montagem pode ser consultada no anexo 3. Este desenho foi sobretudo utilizado nas fases de construção de protótipos, da realização de ensaios funcionais e destrutivos ou de homologação.

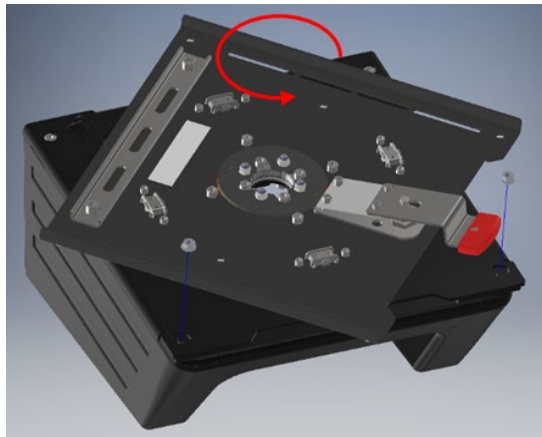


1 – Base da viatura VW T5; 2 – Base rotativa; 3 – Banco VW T5.

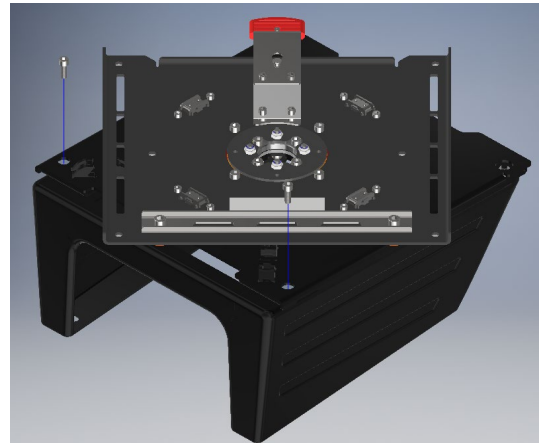
Figura 3-54 – Definição de montagem do banco e base rotativa no veículo.

Nas imagens da Figura 3-55 apresentam-se as instruções de montagem para a instalação dos conjuntos, banco e base rotativa no veículo, e instruir o utilizador final sobre o modo de funcionamento e utilização do produto.

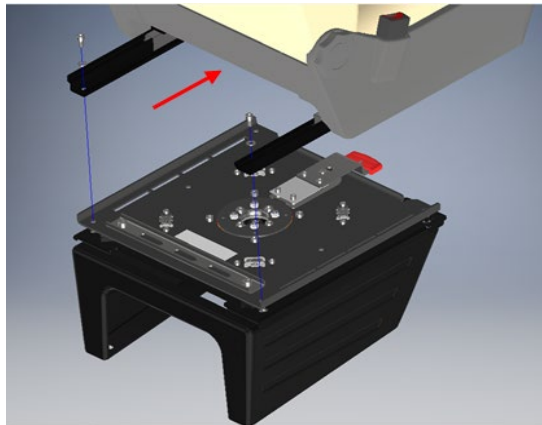
Resumidamente, as instruções de montagem são descritas em quatro fases, designadas nas imagens por (a), (b), (c) e (d). O documento elaborado para o efeito pode ser consultado no anexo 3.



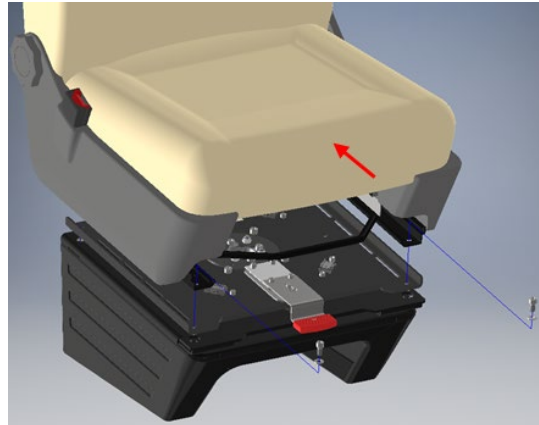
- (a) Levantar a alavanca e rodar a base rotativa conforme indicado na figura. Depois, fixar a frente da base rotativa na base da viatura com 2 porcas H M8 de flange, recatilhada.



- (b) Fixar a traseira da base rotativa na base da viatura com 2 parafusos CHC M8x22 – 12.9



- (c) Após deslocar o banco para frente, fixar a parte posterior das corrediças inferiores à base rotativa com 2 parafusos CHC M8x16 – 12.9 e respetivas anilhas.



- (d) Após deslocar o banco para trás, fixar a parte da frente das corrediças inferiores à base rotativa com 2 parafusos CHC M8x16 – 12.9 e respetivas anilhas.

Figura 3-55 – Manual de instruções de montagem do banco e base rotativa no veículo.

### 3.5 Ensaios de homologação ECE – R14

Após a validação interna do produto objeto de desenvolvimento deste trabalho, procedeu-se ao processo de homologação para garantir que o produto cumpre com os padrões de segurança previstos na regulamentação, sendo importante para as empresas que comercializam este tipo de produtos obter os certificados destes ensaios. A homologação da base rotativa foi efetuada pela Magna, que é um dos laboratórios de certificação da TUV na Alemanha. Os resultados dos ensaios de homologação relativos ao ensaio de tração ECE-R14 permitirão também efetuar uma análise comparativa com os resultados obtidos nas simulações numéricas e nos ensaios reais realizados internamente pela empresa.

### 3.5.1 Protocolo do ensaio de tração ECE – R14

O protocolo do ensaio de tração ECE – R14, mais especificamente o ensaio de resistência das fixações do cinto de segurança, foi estabelecido com o laboratório de ensaios da TUV- Alemanha, atendendo os seguintes pontos:

**Objetivo:** Validar a resistência das fixações do cinto de segurança de 3 pontos dos bancos do veículo Volkswagen T5, em conformidade com o definido no Regulamento, ECE -R14.

**Âmbito:** Homologar os bancos do condutor e passageiro e todos os acessórios intermédios montados entre o banco e a viatura, tais como as corredeiras e a base rotativa.

**Recursos necessários:** máquina de tração e dispositivos de tração para simular a geometria do passageiro.

**Método/procedimento do ensaio:**

- Ensaiar as bases rotativas e os bancos do condutor e passageiro nas posições, de recuado e avançado;
- Fixar o banco e os acessórios intermédios (base rotativa) a uma estrutura rígida, neste caso à base suporte do veículo, que por sua vez é fixada à plataforma da máquina de tração, ou seja, a opção sem estrutura do veículo (dependendo do protocolo, existe a possibilidade do ensaio ser realizado com o respetivo estrutura do veículo, conforme se pode observar na Figura 3-56);
- Fixar as ancoragens de fixação do cinto de segurança na estrutura suporte da plataforma e no banco, de acordo com as coordenadas dos pontos de ancoragem do veículo Volkswagen T5;
- Aplicar as forças de tração previstas no regulamento aos respetivos dispositivos de tração superior (dorsal) e inferior (ventral) para simular a inércia de um passageiro com um cinto de segurança de 3 pontos que no caso de acidente frontal estará sujeito a uma projeção para a frente do veículo;
- Considerar para o peso total do banco, o valor de 33 kg, incluindo acessórios;
- Considerar as amplitudes das forças de tração regulamentares para um banco com cinto de 3 pontos de veículos da categoria M1, nomeadamente:  $1350 \pm 20$  daN nas ancoragens superiores e  $1350 \pm 20$  daN, mais 20 vezes o peso do banco completo para as ancoragens inferiores;
- Aplicar as forças de tração na direção da marcha da viatura e com um ângulo de  $10 \pm 5^\circ$  acima da horizontal;
- Aplicar uma pré-carga de  $500 \pm 25$ N nos dispositivos de tração e de seguida aplicar a cargas do ensaio de tração. Os carregamentos devem ser mantidos por um período mínimo de 0,2 s e num máximo de 30 s;
- Apresentar os resultados do ensaio através de gráficos, com eixos Força-tempo.



Figura 3-56 – Exemplo de ensaio de tração ECE R14 realizado com a estrutura do veículo.

#### **Critérios de validação dos resultados:**

O ensaio será considerado válido se todas as ancoragens de fixação do cinto de segurança forem capazes de resistir ao ensaio prescrito no ECE – R14.

Poderá ser admitida uma deformação permanente, inclusivamente uma rotura parcial ou total de qualquer ancoragem ou zona circundante desde que a carga definida seja mantida durante o tempo mínimo de 0,2 s. No entanto, não são permitidas fissuras ou deformações que sejam suscetíveis de causar ferimentos nos ocupantes.

#### **3.5.2 Preparação dos ensaios de homologação (ECE – R14)**

Na Figura 3-57 está ilustrada uma página do relatório dos ensaios de resistência das ancoragens do cinto de segurança (ECE – R14), elaborado pelo laboratório de certificação, da TUV – Alemanha [58]. Este conjunto de imagens permite uma visão global da plataforma de ensaios ECE – R14, nomeadamente da estrutura suporte das ancoragens do cinto de segurança que substitui o chassi do veículo, dos dispositivos de tração e da posição dos bancos relativamente à base rotativa.

A preparação/montagem dos bancos e respetivas bases rotativas foi efetuada de modo a considerar as posições extremas do banco relativamente à base, ou seja, as posições recuada e avançada do banco (cenários 1 e 2). Assim, pode-se verificar que um dos bancos apresenta-se na posição recuado e o outro na posição avançado, como se pode observar com evidência nas imagens designadas por “Photo 1: Right view” e “Photo 3: Front view” da Figura 3-57 e na Figura 3-58. Nestas imagens é possível observar que o banco da direita está montado na posição avançado e que o banco da esquerda está montado na posição recuado. Entende-se por banco posicionado à direita, o que está posicionado mais à frente na plataforma no sentido dos carregamentos de tração. É ainda possível observar que foram aplicados no cinto de segurança os dispositivos de tração superior e inferior. Para além destes dispositivos, verifica-se que na parte inferior do banco foi aplicado um dispositivo de tração para

aplicação da carga correspondente a 20 vezes o peso do banco, podendo este ser identificado através da cor verde das cintas.

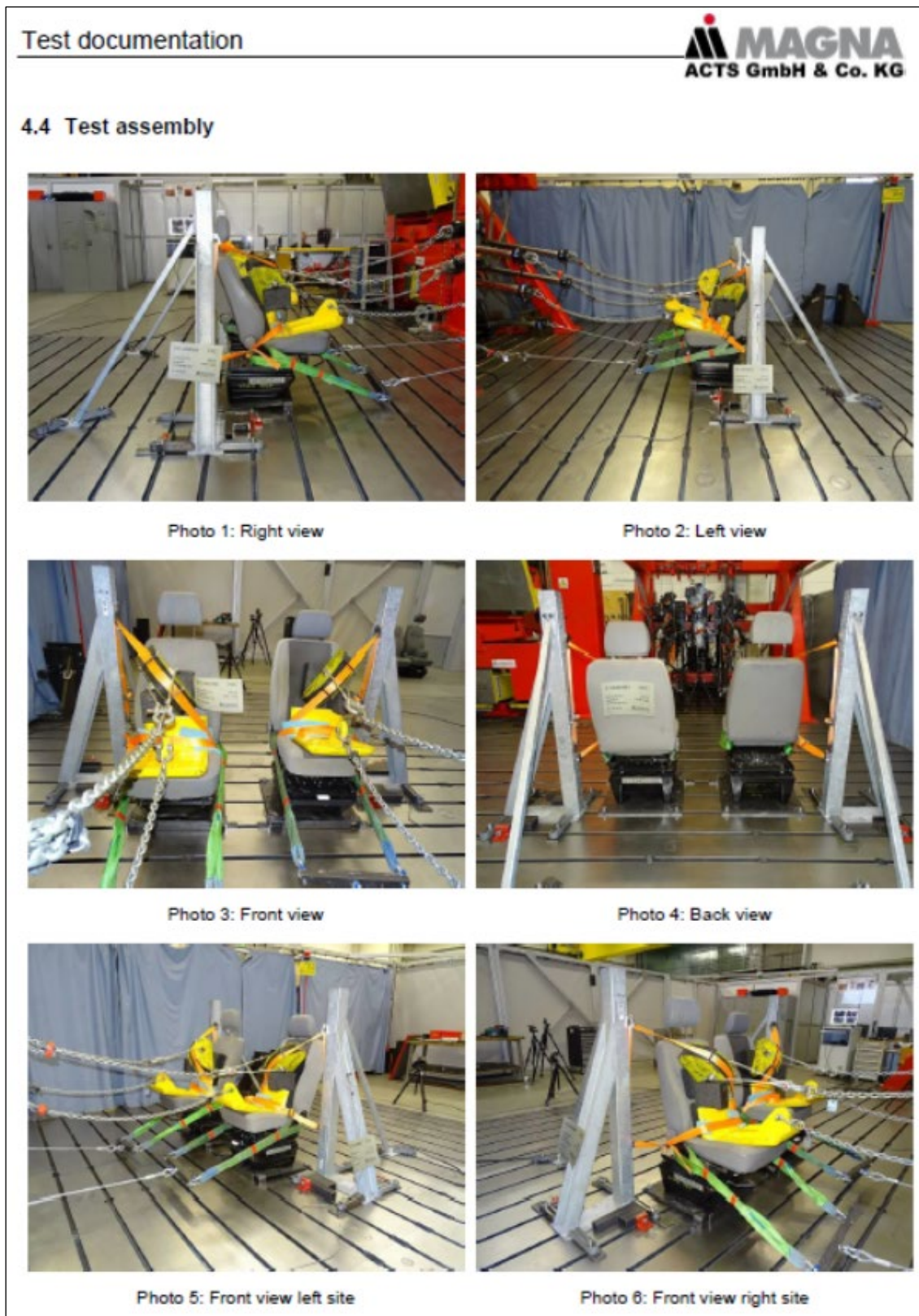


Figura 3-57 – Plataforma de ensaios de homologação ECE- R14 [58].

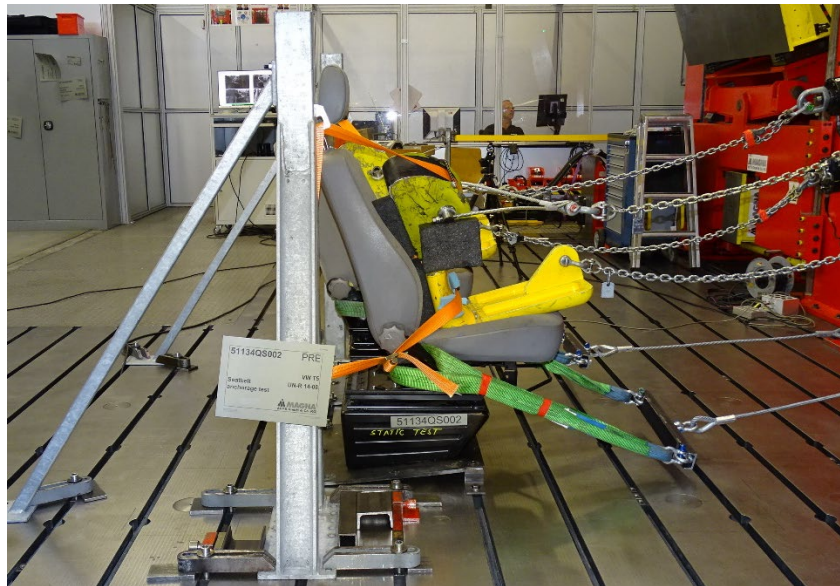
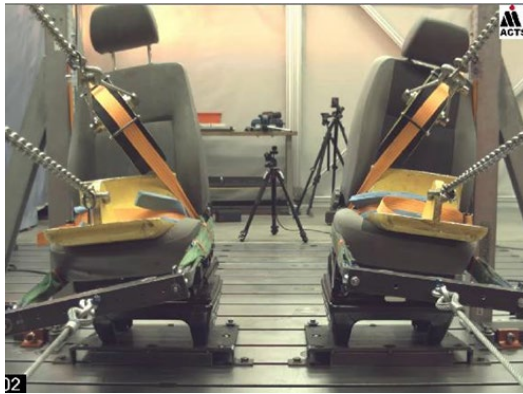


Figura 3-58 – Bancos nas posições recuada e avançada (cenários 1 e 2) [58].

### 3.5.3 Avaliação dos resultados dos ensaios de homologação (ECE – R14)

As imagens apresentadas na Figura 3-59, extraídas do relatório da TUV [58], permitem uma visão geral dos resultados dos ensaios relativos ao ensaio de tração ECE – R14, nomeadamente do comportamento das estruturas ensaiadas.



(a) Vista frontal



(b) Vista de trás



(c) Vista da direita



(d) Vista da esquerda

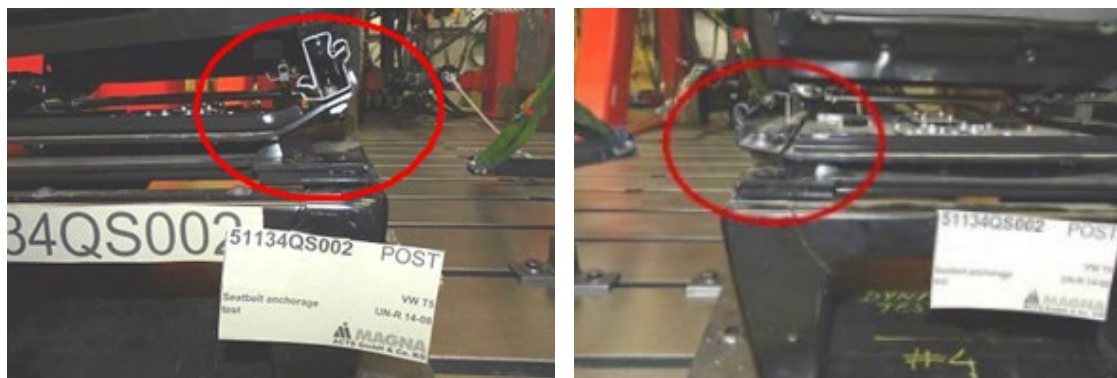
Figura 3-59 – Vistas do comportamento geral das estruturas após ensaios [58].

Nas várias vistas da Figura 3-59 (a) (b) (c) e (d), é possível verificar após os ensaios que as estruturas apresentam deformações assimétricas relativamente ao plano médio longitudinal do banco.

Conforme planeado na fase de preparação dos ensaios é ainda possível confirmar através destas imagens que o banco da direita foi ensaiado na posição avançado e que o banco da esquerda foi ensaiado na posição recuado. Note-se que o banco posicionado à direita é aquele que está posicionado mais à frente na plataforma no sentido dos carregamentos de tração.

Refere-se que a máquina de ensaios realizou simultaneamente os carregamentos de tração nos dois bancos (direito e esquerdo) e que os ensaios foram filmados e gravados em ficheiros de vídeo. Considera-se que a gravação em vídeo dos ensaios é sobretudo vantajosa quando existe necessidade de analisar o comportamento estrutural dos conjuntos/componentes ensaiados, devido por exemplo a colapso ou deformações acima do limite admissível. A sincronização dos tempos reais de vídeo e dos tempos registados digitalmente no gráfico das curvas relativas às forças dos carregamentos de tração permite correlacionar a evolução do comportamento mecânico das estruturas com os valores das forças atingidas durante o período do ensaio. Para uma análise mais aprofundada e com o *software* adequado, é ainda possível rever em modo lento a visualização dos ensaios. Lembra-se que de acordo com o regulamento ECE – R14, o tempo relativo à duração dos carregamentos aplicados nos ensaios de tração deve ser mantido por um período mínimo de 0,2 s, ou seja, torna-se evidente o interesse de analisar determinado momento ou instante do ensaio através da redução da velocidade de reprodução do vídeo.

Resumidamente, estes registos de vídeo, para além de permitirem uma análise qualitativa e quantitativa do fenómeno estrutural ocorrido em qualquer instante do ensaio, permitem também observar várias vezes o mesmo fenómeno e fornecer importantes indicações sobre a configuração ideal de determinado componente de forma a absorver satisfatoriamente o esforço a que está sujeito.



(a) Deformação máxima com banco na posição recuado. (b) Deformação máxima com banco na posição avançado.

Figura 3-60 – Deformações máximas das estruturas após ensaios [54].

Nas imagens da Figura 3-60, extraídas dos registos de vídeo dos ensaios de homologação, pode-se observar que as deformações máximas sofridas pelas estruturas ocorreram na parte posterior das bases rotativas junto às corrediças, verificando-se que qualitativamente a deformação é significativamente maior no ensaio com o banco na posição recuado (Figura 3-60 (a)). Refere-se que o relatório de homologação não apresenta os valores dos deslocamentos sofridos pelas estruturas. No entanto, foi solicitado a este laboratório o reenvio para a empresa de todo o material ensaiado para posterior análise e estudos comparativos. A análise comparativa entre os resultados destas deformações e as deformações verificadas nas simulações numéricas dos cenários 1 e 2, e no ensaio real realizado na empresa, permite concluir que os resultados são muito similares em termos qualitativos. Nestas imagens, destaca-se ainda a eficácia das duas ancoragens “grampos”, aplicadas na parte posterior, nomeadamente, a capacidade destas resistirem aos esforços combinados a que foram solicitadas. Os valores dos deslocamentos máximos correspondentes aos ensaios com os bancos na posição recuado e avançado (cenários 1 e 2) são respetivamente, 38 e 23,5 mm. Estes valores foram medidos digitalmente com base em imagens extraídas dos registos de vídeo realizados na vista de trás dos ensaios.

Posteriormente aos ensaios de homologação efetuados no laboratório, TÜV-Alemanha, procedeu-se na empresa à medição dos deslocamentos finais verificados nas zonas mais deformadas das bases rotativas, indicadas na Figura 3-60. Os valores dos deslocamentos finais correspondentes aos ensaios com os bancos na posição recuado e avançado são respetivamente, 31 e 13 mm, e foram obtidos com base na medição real efetuada nas estruturas.

Na Tabela 3-6 apresenta-se um resumo dos resultados dos deslocamentos obtidos nas simulações numéricas e nos ensaios reais efetuados na empresa e no laboratório de homologação. Esta tabela tem como objetivo complementar a análise qualitativa efetuada anteriormente às deformações e permitir uma análise comparativa dos deslocamentos em termos quantitativos da totalidade dos resultados obtidos nos ensaios de homologação, nos ensaios efetuados na empresa e nas simulações numéricas, tendo em conta os modelos otimizado e não otimizado, e ainda, as posições extremas do banco relativamente à base rotativa.

Analisando primeiramente os resultados dos deslocamentos máximos na direção Z, verifica-se que no cenário 1 (banco recuado), os valores destes deslocamentos nos ensaios reais são significativamente superiores aos valores das simulações numéricas. Por outro lado, no cenário 2 (banco avançado), verifica-se que os deslocamentos máximos na direção Z, são muito aproximados. Com base nestes resultados, pode-se concluir que, experimentalmente, também se confirma que em termos de deformações o cenário 1 é mais crítico que o cenário 2, tal como se tinha verificado na análise numérica efetuada anteriormente.

Analisando o cenário 1 e os deslocamentos finais na direção Z que resultaram da deformação permanente após os carregamentos, verifica-se que os valores obtidos

nos ensaios reais são muito aproximados. Entende-se por ensaios reais aqueles que foram realizados fisicamente nos laboratórios de homologação e da empresa. Assim, considerando admissível a comparação no cenário 1 (banco recuado) entre o ensaio real de homologação (modelo otimizado) e o ensaio real realizado na empresa (não otimizado), verifica-se que os valores dos deslocamentos finais na direção Z são respetivamente, 31 e 32 mm.

Teoricamente, a abordagem considerada anteriormente na análise comparativa dos deslocamentos máximos e finais seria incorreta, porque na verdade a comparação foi efetuada entre modelos em estados de otimização diferentes (otimizado e não otimizado). Contudo, considerou-se neste caso irrelevante a distinção entre otimizado e não otimizado, porque verificou-se que os valores dos deslocamentos máximos em Z, obtidos nas simulações numéricas, são praticamente idênticos nos modelos otimizado e não otimizado para o mesmo cenário.

Tabela 3-6 – Totalidade dos resultados das simulações numéricas e ensaios reais.

Designação	Tipo de ensaio	Posição do banco	Deslocamento máx. em Z (mm)	Deslocamento final em Z (mm)
Modelo não otimizado	Simulação numérica	Recuado (cenário 1)	31,42	---
Modelo não otimizado	Simulação numérica	Avançado (cenário 2)	22,25	---
Modelo não otimizado	Ensaio real (empresa)	Recuado (cenário 1)	41,00	32
Modelo otimizado	Simulação numérica	Recuado (cenário 1)	31,61	---
Modelo otimizado	Ensaio real (homologação)	Recuado (cenário 1)	38,00	31
Modelo otimizado	Ensaio real (homologação)	Avançado (cenário 2)	23,50	13

Neste estudo, com vista a quantificar o erro das análises numéricas relativamente aos ensaios reais, determinaram-se os desvios dos deslocamentos máximos verificados nos cenários 1 e 2. De seguida, apresentam-se os desvios relativos aos deslocamentos dos cenários 1 e 2, calculados entre o modelo numérico e o valor do ensaio de homologação, a saber:

- Desvio relativo ao deslocamento máximo em Z (cenário 1),

$$\text{Desvio 1} = \frac{38,00 - 31,42}{38,00} \times 100 = 17\%$$

- Desvio relativo ao deslocamento máximo em Z (cenário 2),

$$\text{Desvio 2} = \frac{23,50 - 22,25}{23,50} \times 100 = 5,3\%$$

No cenário 1, verificou-se que o valor do desvio do deslocamento máximo em Z, calculado tendo em conta os valores teórico (simulação numérica) e experimental (ensaios reais) é bastante significativo (17%). No cenário 2, verificou-se que este desvio é significativamente menor (5,3%). É importante salientar mais uma vez que a estratégia adotada no projeto para validar o modelo numérico foi avaliar o comportamento da estrutura em termos de deslocamentos, e não de tensões, e que são admitidas deformações permanentes após a aplicação das cargas, desde que estas não sejam suscetíveis de causar ferimentos nos ocupantes. Conforme referido ao longo do estudo, não foi possível comparar os deslocamentos finais obtidos na experimentação com os deslocamentos das simulações numéricas, dado que os deslocamentos obtidos nas simulações são deslocamentos máximos das deformações e não deslocamentos finais.

Seguidamente, apresentam-se os gráficos extraídos do relatório dos resultados dos ensaios de homologação [58], relativos à evolução dos carregamentos dos dispositivos de tração dos ensaios efetuados nas posições recuado e avançado do banco.

No gráfico da Figura 3-61 estão representados os 3 carregamentos relativos à evolução das forças durante o ensaio do banco na posição recuado. A evolução da força na zona dorsal está representada pela linha a vermelho (superior), a evolução da força na zona ventral está representada pela linha a azul (superior) e a evolução da força relativa à componente peso do banco (inferior) está representada pela linha a preto (inferior).

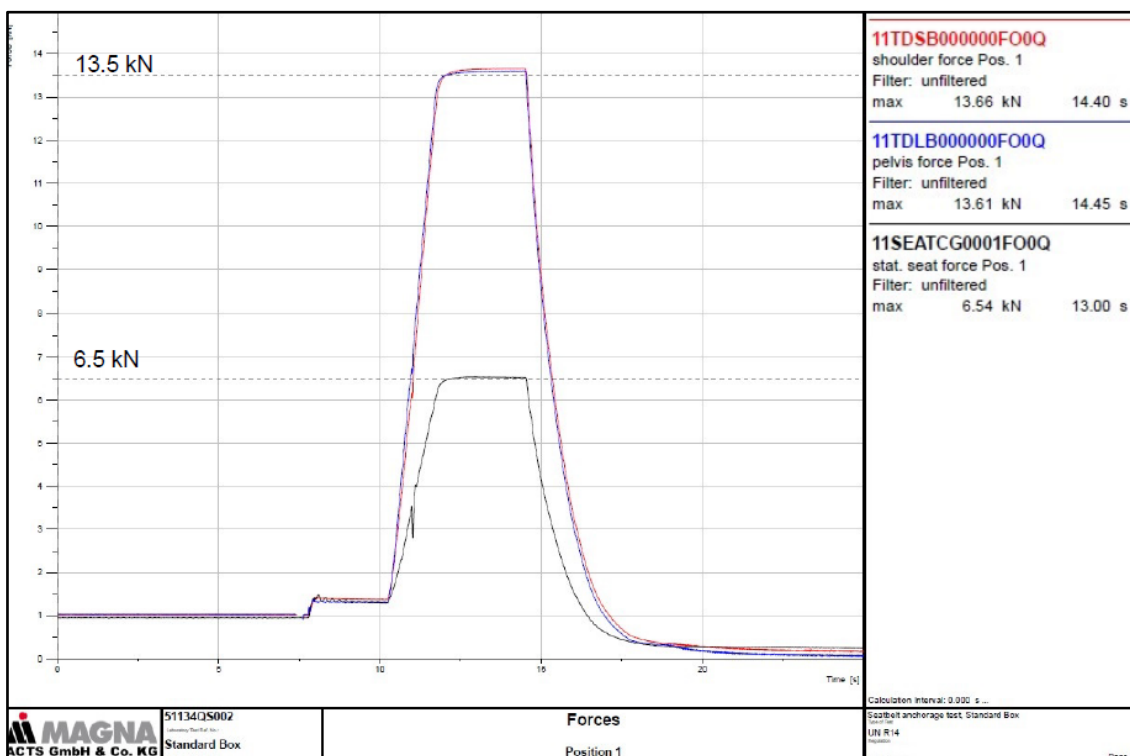


Figura 3-61 – Gráfico do ensaio de homologação – banco na posição recuada [58].

No gráfico da Figura 3-62 estão representados os 3 carregamentos, relativos à evolução das forças durante o ensaio do banco na posição avançado. A evolução da força na zona dorsal está representada pela linha a vermelho (superior), a evolução da força na zona ventral está representada pela linha a azul (superior) e a evolução da força relativa à componente peso do banco (inferior) está representada pela linha a preto (inferior). Nestes gráficos, pode-se observar que todas as forças ultrapassam ligeiramente os valores requeridos para os ensaios, assim como o tempo de manutenção das forças é muito superior ao tempo de manutenção requerido de 0,2 segundos.

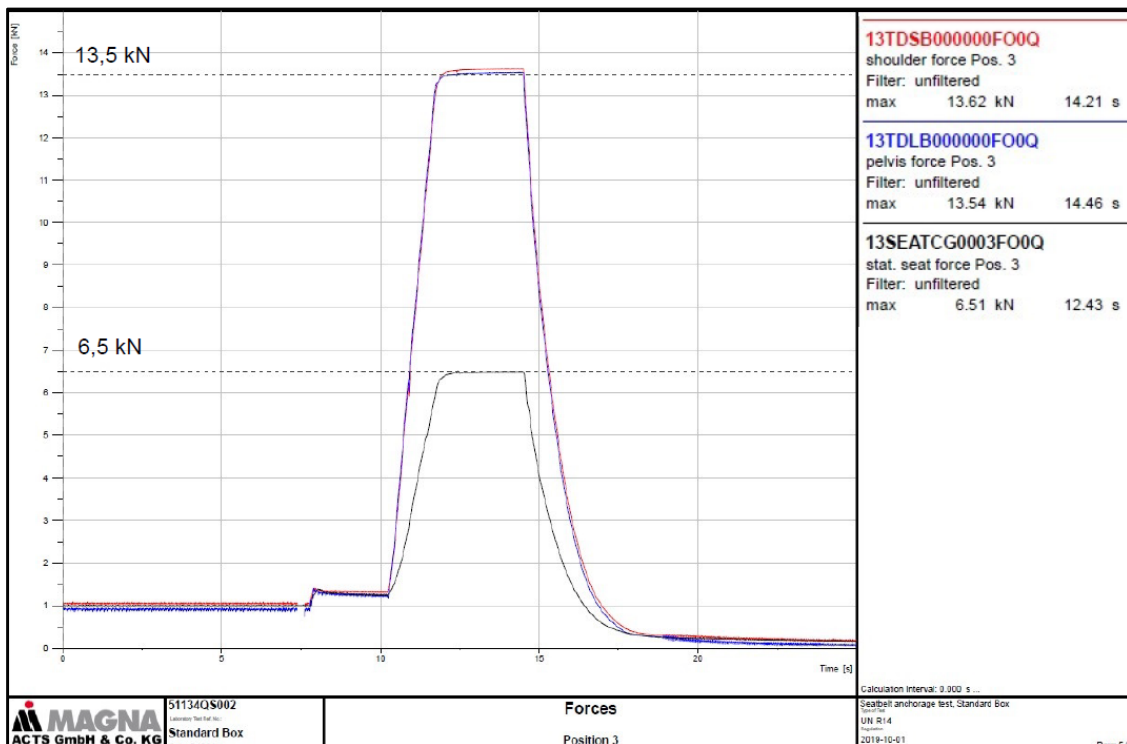


Figura 3-62 – Gráfico do ensaio de homologação – banco na posição avançado [58].

Para complementar a informação contida nos gráficos apresenta-se na Tabela 3-7, um resumo extraído do relatório de homologação [54], relativo aos valores previstos pelo regulamento e aos resultados obtidos nos ensaios de tração. Neste quadro, pode-se verificar que todos os valores requeridos pelo regulamento foram aprovados nos ensaios.

Tabela 3-7 – Resumo dos resultados dos ensaios de tração realizados no laboratório de homologação.

Designação	Valor requerido pelo ECE - R14	Valor na posição recuado	Valor na posição avançado	Resultado
Força na zona dorsal	13,5	13,66	13,62	Aprovado
Força na zona ventral	13,5	13,61	13,54	Aprovado
Força relativa ao peso	6,49	6,54	6,51	Aprovado
Tempo de manutenção das forças	0,2	13	12,4	Aprovado

Na avaliação final dos resultados sobre os ensaios de tração, o relatório de homologação refere que os bancos e respetivas bases rotativas passaram os requisitos da UN-R 14-08 e que, após os ensaios, não foram detetadas fissuras ou deformações que possam causar ferimentos aos ocupantes.

Para terminar a análise, considerou-se que os resultados experimentais dos ensaios de homologação permitiram validar o modelo otimizado, assim como os ensaios reais realizados na empresa. No entanto, pelas razões referidas anteriormente, refere-se que o valor do desvio do deslocamento máximo na direção Z, calculado entre o modelo teórico e o experimental, é significativo em termos relativos, mas não condicionante na aprovação do modelo otimizado. O ensaio de homologação é na verdade aquele que encerra o ciclo de todo o desenvolvimento do produto e que permite a entrada deste no mercado muito concorrencial da indústria automóvel. Para isso, foi necessário atender a regulamentação estabelecida na diretiva 76/115/CEE (ECE – R14), e submeter o produto a esforços bastante elevados, ou seja, carregamentos de tração na ordem de 1350 daN e 2000 daN, aplicados no cinto de segurança de 3 pontos.



# CONCLUSÕES

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Proposta de trabalhos futuros



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

Antes de se apresentar as principais conclusões, considera-se importante salientar o contributo do capítulo 2 no projeto realizado. O estudo bibliográfico incidu sobre o estado do conhecimento na área do projeto e a conjuntura atual da indústria automóvel. Este capítulo, que antecede o capítulo do desenvolvimento do projeto foi um investimento na procura do conhecimento que envolve a integração de várias disciplinas em áreas distintas e indissociáveis que estão bem patentes no setor desta indústria, tais como: a economia do setor, a qualidade e as suas ferramentas, a certificação, o projeto (*design* & desenvolvimento), a regulamentação, a ergonomia, a homologação e o MEF usado na otimização de produtos.

O contributo do conhecimento proporcionado pelo estado da arte é indubitavelmente importante no sucesso do projeto de um novo produto. Na prática, isto significa criar um produto que atenda as exigências explícitas e implícitas do cliente, assim como promover a redução do número de iterações do ciclo iterativo do projeto, ou seja, as atividades básicas do projeto: planear, conceber, construir, testar, otimizar e produzir. Se consideramos que o segredo de um bom projeto consiste em garantir que as incertezas sejam minimizadas, então este capítulo terá uma grande quota de responsabilidade no sucesso do produto. Seguidamente, apresentam-se as principais considerações e conclusões do trabalho desenvolvido neste projeto, que foi apresentado no capítulo 3.

Neste projeto, a utilização de ferramentas computacionais possibilitou não só modelar e otimizar o produto, mas permitiu também através de simulações numéricas por elementos finitos, analisar o comportamento estrutural do sistema base rotativa. Como ferramenta auxiliar do projeto foi utilizado o *software Stress Analysis* da Autodesk Inventor, que permitiu prever o comportamento da estrutura metálica quando esta foi solicitada de acordo com os carregamentos definidos na diretiva 76/115/CEE e no Regulamento ECE- R14. Este comportamento foi conseguido após a definição dos carregamentos e das condições fronteira do modelo numérico.

No entanto, considera-se importante referir que, para rentabilizar a utilização destas ferramentas de análise pelo MEF é necessário ter em atenção os seguintes aspetos:

- Nas análises numéricas do modelo é sempre importante analisar os resultados apresentados com algum sentido crítico, ou seja, deve-se fazer não só uma análise quantitativa, nas também uma análise qualitativa;

- Após uma simulação numérica do modelo é importante analisar as zonas dos componentes que estão sujeitas a maiores tensões, de maneira a permitir alterar a conceção ou parâmetros do modelo para aliviar as concentrações de tensões;
- As análises pelo MEF de um modelo numérico com montagens complexas implicam inevitavelmente tempos de pré-processamento e de processamento elevados. Outro problema associado a tipo de análises é quando as montagens do modelo apresentam resultados muito elevados de tensões, tornando mais complicado o processo de análise. Para ultrapassar este problema, deve-se preferencialmente analisar os componentes mais críticos de forma a obter-se resultados mais objetivos e tempos de processamento mais rápidos;
- Para simplificar a análise MEF de modelos complexos é conveniente dividir o modelo em partes, ou seja, escolher os componentes que apresentam uma maior concentração de tensões. A adoção desta estratégia permite normalmente obter resultados mais objetivos e com menores amplitudes dos parâmetros analisados;
- Em zonas do modelo de análise mais complexa, nomeadamente em zonas onde são aplicados maiores esforços é importante definir localmente uma malha de elementos finitos composta por elementos mais pequenos de forma a permitir uma análise com maior precisão dos resultados.

Com base na diretiva 76/115/CEE e o Regulamento ECE- R14, admitiu-se para a validação da estrutura a deformação permanente após a aplicação das cargas. Dado que o *software* utilizado apenas permite análises numéricas do comportamento elástico dos materiais, foi considerada a possibilidade de se realizar futuramente uma simulação que permita uma análise elastoplástica com um comportamento não-linear do material, sendo espectável a obtenção de deslocamentos maiores e tensões mais baixas.

Na fase de análise do modelo verificou-se que, após vários refinamentos de malha, nem sempre foi possível eliminar ou minimizar com sucesso os picos de tensão em zonas ou pontos singulares. Por outro lado, verificou-se que na generalidade dos componentes, os resultados dos deslocamentos eram admissíveis para a estratégia adotada para validar o modelo, ou seja, usar o critério de validação com base na verificação das deformações/deslocamentos e não das tensões.

Relativamente à experimentação efetuada neste trabalho, verificou-se que os resultados obtidos nos ensaios de tração realizados internamente pela empresa permitiram conferir fiabilidade ao modelo numérico simulado pelo MEF, ou seja, minimizar as incertezas da sua validação antes de se proceder à fase de otimização do projeto.

A redução do peso da estrutura metálica foi obtida na fase de otimização do modelo, principalmente através das alterações efetuadas na topologia dos componentes que foram menos solicitados aos carregamentos de tração, da redução de espessuras de

componentes e da alteração do material, aumentando-se a tensão de limite elástico. O modelo otimizado possibilitou uma redução de 5,8 % da massa inicial e uma redução de 8,2 % relativamente à massa máxima admissível definida no caderno de encargos.

Considera-se importante referir que a otimização do modelo é um processo de projeto iterativo e que a solução otimizada de um determinado componente da estrutura pode garantir o critério de validação do modelo. No entanto, se a otimização for efetuada em vários componentes da estrutura a combinação dos diversos componentes otimizados pode em conjunto não verificar as restrições impostas ao modelo modificado.

Na análise comparativa efetuada entre os cenários 1 e 2, respetivamente banco na posição recuado e banco na posição avançado, foi possível concluir que em termos de deslocamentos, o cenário 1 foi considerado o mais crítico ou condicionante na validação do modelo.

Relativamente aos deslocamentos finais na direção Z que resultaram da deformação permanente após os carregamentos realizados no cenário 1 (banco recuado), verificou-se que os valores obtidos nos ensaios experimentais são muito aproximados. Considerando a comparação entre o ensaio real de homologação (modelo otimizado) e o ensaio real realizado na empresa (não otimizado), verifica-se que os valores dos deslocamentos finais na direção Z são respetivamente, 31 e 32 mm.

A quantificação do erro das análises numéricas relativamente aos ensaios reais foi efetuada através do cálculo dos desvios dos deslocamentos máximos verificados nos cenários 1 e 2. No cenário 1, verificou-se que o valor do desvio do deslocamento máximo em Z é bastante significativo (17%), enquanto no cenário 2 se verificou que este desvio é significativamente menor (5,3%). Por outro lado, salienta-se que a estratégia adotada no projeto para validar o modelo numérico foi avaliar o comportamento da estrutura em termos de deslocamentos, e não de tensões, e que são admitidas deformações permanentes após a aplicação das cargas, desde que estas não sejam suscetíveis de colocar em causa a segurança dos ocupantes.

Neste estudo, não foi possível comparar os resultados dos deslocamentos finais obtidos na experimentação com os deslocamentos obtidos nas simulações numéricas, porque as simulações numéricas apenas apresentam os deslocamentos máximos das deformações e não os deslocamentos finais.

Neste projeto, a possibilidade de validar o modelo através de ensaios reais realizados na empresa permitiu não só minimizar o risco de falha nos ensaios de homologação, mas também validar os resultados das simulações numéricas.

Após todo o trabalho prévio à homologação, e conforme esperado, o relatório de homologação do produto elaborado pela Magna, refere na avaliação final dos resultados dos ensaios de tração, que os bancos e respetivas bases rotativas passaram os requisitos da UN-R 14-08 e que após os ensaios, não foram detetadas fissuras ou deformações que possam causar ferimentos aos ocupantes.

Na análise deste estudo, considerou-se que os resultados experimentais dos ensaios de homologação permitiram validar o modelo otimizado, assim como os ensaios reais realizados na empresa. No entanto, verificou-se no cenário 1 (banco recuado) que o valor do desvio do deslocamento máximo na direção Z, calculado entre o modelo teórico e o experimental é significativo em termos relativos, mas não condicionante na aprovação do modelo otimizado.

Destaca-se ainda a importância do ensaio de homologação para a entrada do produto no mercado muito competitivo da indústria automóvel e para o encerramento de todo o ciclo de desenvolvimento do produto. Contudo, também é importante referir que para obter o certificado de homologação do produto (base rotativa) foi necessário atender à regulamentação estabelecida na diretiva 76/115/CEE (ECE – R14), e submeter o produto a esforços bastante elevados, ou seja, carregamentos de tração na ordem de 1350 daN e 2000 daN, aplicados no cinto de segurança de 3 pontos.

Por último, refere-se que ficou bem patente ao longo deste trabalho as vantagens das análises numéricas do modelo efetuadas através do MEF. No entanto, nunca é demais referir que numa análise estrutural, nenhum modelo numérico poderá ser considerado definitivamente válido enquanto não for submetido a ensaios experimentais que comprovem os resultados previstos nas simulações.

Assim, num projeto de engenharia é indubitavelmente importante saber combinar os métodos numéricos e os métodos experimentais, de forma a que se consiga obter um modelo virtual que se aproxime o mais possível do modelo real, e que permita reduzir o número de ensaios experimentais da estrutura.

## 4.2 Proposta de trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, apresentam-se de seguida algumas sugestões para estudos que se consideram interessantes e que se enquadram nos objetivos deste trabalho de projeto e otimização de um produto para a indústria automóvel:

- Simular pelo MEF o modelo numérico considerando as ligações dos cordões de soldadura com vista a poder validar o processo de soldadura;
- Comparar as simulações numéricas do modelo com ligações de soldadura com as análises numéricas sem as ligações de soldadura;
- Simular análises numéricas pelo MEF que permitam analisar um comportamento elastoplástico da estrutura e comparar os resultados com as análises efetuadas para comportamento elástico ou linear.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

[1] ACEA, European Automobile Manufacturers Association – “*The automobile industry Pocket Guide*”, 2019-20.

[2] Site da Statista, The Statistic Portal: ( [https:// www.statista.com / statistics](https://www.statista.com/statistics)),  
acedido em dezembro 2019.

[3] Santos, S., Dores, V., “*A Indústria Automóvel na Economia Portuguesa*” - Temas Económicos, Número 61, Ministério da Economia, Gabinete de Estratégia e Estudos, novembro 2018.

[4] Site do INE, Instituto Nacional de Estatística ( [https:// www.ine.pt](https://www.ine.pt)), novembro 2019.

[5] Site da AICEP, Agência para o Investimento e o Comércio Externo de Portugal, “*Indústria Automóvel e Componentes*”, in AICEP Portugal Global N.º 87, acessido em maio 2016.

[6] Site da ACAP, Associação do Comércio Automóvel Portugal, ([https:// www.acap.pt/pt/ home](https://www.acap.pt/pt/home)), acessido em dezembro 2019.

[7] Site da IATF, International Automotive Task Force ([www.iatfglobaloversight.org](http://www.iatfglobaloversight.org)),  
acedido em dezembro 2019.

[8] Chrysler Corporation, Ford Motor Company, and General Motors Corporation, *Advanced Product Quality Planning (APQP) And Control Plan, Reference Manual*, Second Edition, ISBN: 978-1-60534-137-8, July 2008.

[9] Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, *Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Reference Manual*, Fourth Edition, ISBN: 978-1-60534-136-1, June 2008.

[10] Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, and General Motors Corporation, *Measurement Systems Analysis (MSA), Reference Manual*, Fourth Edition, ISBN#: 978-1-60-534211-5, June 2010.

[11] Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company, and General Motors Corporation, *Statistical Process Control (SPC), Second Edition*, July 2005.

[12] FORD Design Institute, *Global 8D participants Guide*, Michigan, Ford Motors Company, 1996.

[13] Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, *Production Part Approval Process (PPAP), Fourth Edition*, March 2006.

[14] Site da APCER, Associação (<https://www.acap.pt/pt/home>), acessido em dezembro 2019.

- [15] APCER, *Guia do utilizador ISO 9001:2015*, dezembro 2015.
- [16] COTEC Portugal, *Guia de Boas Práticas de Gestão de Inovação*, Lisboa, 2010.
- [17] CEIA, *A Indústria Automóvel Portuguesa*, Explorar o Desafio dos Auto Interiores, Editor: CEIA, abril-2004, ISBN: 9789729534041, abril-2004.
- [18] IPQ, *NP 4456:2007, Gestão da Investigação, Desenvolvimento e Inovação (IDI), Terminologia e definições das atividades de IDI*, CT 169, IPQ, 2007.
- [19] Norma Portuguesa NP 4457 2007, *Gestão da Investigação, Desenvolvimento e Inovação (IDI) Requisitos do sistema de gestão da IDI*, 2007.
- [20] Norma Portuguesa, NP EN ISO 9001:2015, sistemas de Gestão da qualidade, requisitos.
- [21] Manual de Oslo, *Oslo Manual 2018 - 4th Edition* (<https://www.oecd.org/science/oslo-manual-2018-9789264304604-en.htm>), acedido em dezembro 2019.
- [22] Miguel, A., *Gestão Moderna de Projectos*, FCA, 2006.
- [23] Pereira, A., Ganhão, F. N., *A Gestão da Qualidade - como implementá-la na empresa*, Editorial Presença, 1992.
- [24] Completo, A., Melo, F. Q., *Introdução ao Projeto Mecânico*, Engebook, 2017.
- [25] PMI, *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide)*, Project Management Institute, 4th ed., Newton Square, PA, 2008.
- [26] Naidu, C. B.; Sadhana, P. - *Design and Analysis of Innovative Seating System for Safety Purpose in Automobiles*, International Journal of Innovative Research in Technology, IJIRT 143708 , Volume 3 Issue 1, ISSN: 2349-6002, June 2016.
- [27] Ashby, Michael F., *Materials selection in Mechanical Design*, 4th ed., Elsevier Ltd., 2011.
- [28] Conselho das Comunidades Europeias, *Diretiva do Conselho relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros respeitantes à receção dos veículos a motor e seus reboques (70/156/CEE)*, 1970, Jornal Oficial das Comunidades Europeias.
- [29] Conselho das Comunidades Europeias, *Diretiva do Conselho relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros respeitantes ao arranjo interior dos veículos a motor (partes interiores do habitáculo com exclusão do ou dos espelhos retrovisores interiores, disposição dos comandos, teto ou teto de abrir, encosto e parte traseira dos bancos) (74 / 60 / CEE)*, 1973, Jornal Oficial das Comunidades Europeias.
- [30] Conselho das Comunidades Europeias, *Diretiva do Conselho que altera a Diretiva 74/60/CEE do Conselho, relativa à aproximação das legislações dos Estados- -Membros respeitantes ao arranjo interior dos veículos a motor (partes interiores do habitáculo com exclusão do ou dos espelhos retrovisores interiores, disposição dos comandos, teto ou teto de abrir, encosto e parte traseira dos bancos) (2000/4/CE)*, 28 de Fevereiro de 2000, Jornal Oficial das Comunidades Europeias.

[31] Site da UNECE - The United Nations Economic Commission for Europe ([http://www.unece.org/trans/main/wp29/presentation\\_wp29.html](http://www.unece.org/trans/main/wp29/presentation_wp29.html)), acedido em dezembro 2019.

[32] Happian-Smith, J., *Modern Vehicle Design*, Elsevier Ltd., 2002.

[33] Site da IEA - International Ergonomics Association (<https://www.iea.cc/whats/index.html>), acedido em dezembro 2019.

[34] Bhise, Vivek D., *Ergonomics in the Automotive Design Process*, Taylor & Francis Group, LLC., 2012.

[35] SAE International, *SAE Technical Standard J286, Surface Vehicle Standard, Devices for use in defining and measuring vehicle seating accommodation*, 1995-07.

[36] SAE International, *SAE Technical Standard J287, Surface Vehicle Recommended, Driver hand control reach*, 1988-06.

[37] SAE International, *SAE Technical Standard J1100, Motor Vehicle Dimensions*, 1984-06.

[38] Site da VCA-UK, Vehicle Certification Agency, (<https://www.vehicle-certification-agency.gov.uk/>), acedido em dezembro 2019.

[39] Conselho das Comunidades Europeias, *Diretiva do Conselho que estabelece um quadro para a homologação dos veículos a motor e seus reboques, e dos sistemas, componentes e unidades técnicas destinados a serem utilizados nesses veículos (2007/46/CE)*, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 2007.

[40] Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), *Regulamento nº 14, Disposições uniformes referentes à homologação de veículos no que se refere a fixações dos cintos de segurança e sistemas de fixação Isofix e pontos de fixação dos tirantes superiores Isofix*, agosto de 2010.

[41] Conselho das Comunidades Europeias, *Diretiva do Conselho relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros respeitantes às fixações dos cintos de segurança dos veículos a motor (76/115/CEE)*, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 18 de dezembro de 1975.

[42] Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), *Regulamento nº 16, I. Cintos de segurança, sistemas de retenção, sistemas de retenção para crianças e sistemas Isofix de retenção para crianças destinados aos ocupantes de veículos a motor; II. Veículos equipados com cintos de segurança, avisador de cinto de segurança, sistemas de retenção, sistemas de retenção para crianças e sistemas Isofix de retenção para crianças*, 23 de junho de 2011.

[43] Conselho das Comunidades Europeias, *Diretiva do Conselho relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros respeitantes aos cintos de segurança e aos sistemas de retenção dos veículos a motor (77/541/EEC)*, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 28 de junho de 1977.

- [44] Comissão Económica para a Europa das Nações Unidas (UNECE), *Regulamento nº 17, Prescrições uniformes relativas à homologação de veículos no que se refere aos bancos, suas fixações e apoios de cabeça*, 22 de julho de 2009.
- [45] Conselho das Comunidades Europeias, *Diretiva do Conselho relativa à aproximação das legislações dos Estados-membros respeitantes ao arranjo interior dos veículos a motor (resistência dos bancos e da sua fixação) (74/408/EEC)*, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 22 de Julho de 1974.
- [46] Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), *Regulamento nº 21, Prescrições uniformes relativas à homologação de veículos no que respeita ao seu arranjo interior*, 31 de janeiro de 2003.
- [47] Site da IWW-Trier, Ingenieurbüro Walter & Weißgerber (<https://www.iww-trier.de>), acedido em dezembro 2019.
- [48] Campilho, Raul D. S. G., *Método de Elementos Finitos, Ferramentas para Análise Estrutural*, Editora, Publindústria, novembro 2012.
- [49] Azevedo, Álvaro F. M., *Método dos Elementos Finitos*, FEUP, <http://www.fe.up.pt/~alvaro>, 1ª Edição, abril 2003.
- [50] da Silva, Lucas F. M., Gomes, J. F., *Introdução à Resistência dos Materiais*, Publindústria, 2010.
- [51] Bosch, Robert, *Manual de Tecnologia Automotiva*, Editora, BLUCHER, 2005.
- [52] Site da ESI Group, (<https://www.esi-group.com>), acedido em novembro 2019.
- [53] Liu, C., Song, X. and Wang, J. - *Simulation Analysis of Car Front Collision Based on LS-DYNA and Hyper Works*. Journal of Transportation Technologies, 4, 337-342. doi: 10.4236/jtts.2014.44030, 2014.
- [54] Yuce, C., Karpat, F., Yavuz, N., Sendeniz, G. - *A Case Study: Designing for Sustainability and Reliability in an Automotive Seat Structure*. Article in Sustainability Journal, Volume 6, pages 4608-4631, DOI: 10.3390/su6074608, July 2014.
- [55] Salim, H.; Yadav, Sanjay ; Shinde, Dhananjay ; Deshpande, Gaurav) - *Importance of Federal Motor Vehicle Safety Standards 207/210 in Occupant Safe - A Case Study*, Procedia Engineering. 64, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.09.188, December 2013.
- [56] Peicheng, S.; Zengwei, X. - *Analysis of Seat Belt Anchorage Strength for Vehicles*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 301. 012127. 10.1088/1757-899X/301/1/012127, 2018.
- [57] Site da AGUTI, (<https://www.aguti.com/automotive>), acedido em dezembro 2019.
- [58] Magna - Test report 51134QS002, *Seatbelt anchorage test according to UN-R 14-08, VW T5 Swivelseat / Standard box*, Germany, 2019.

# **ANEXOS**



## 6 ANEXOS

6.1 **ANEXO 1** – Desenhos dos sistemas e subsistemas e de definição

6.2 **ANEXO 2** – Desenhos dos layouts dos ensaios ECE -R14

6.3 **ANEXO 3** – Desenhos de montagem do banco e base rotativa no veículo

