

Luis Norberto Miranda Torres

Estudo e Fabrico de Estrutura de Veículo Automóvel em Compósito

Dissertação apresentada para a obtenção
do grau de Doutor em Engenharia Mecânica
pela Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia do Porto

Universidade do Porto

2016

À minha Namorada e Companheira
Aos meus Pais, Irmão e Sobrinhos
Aos meus Avós, Paternos e Maternos
Aos meus Padrinhos
Aos meus Amigos
À Vida

RESUMO

O efeito de escala da utilização do transporte individual, que permite maior comodidade e liberdade, tem vindo a dificultar a mobilidade das pessoas, principalmente nos centros urbanos, onde se verificam cada vez mais problemas ambientais decorrentes das emissões dos veículos. Se atendermos a estudos que apontam para uma tendência contínua no aumento da concentração populacional nos grandes centros urbanos, este problema deve preocupar a sociedade em geral, no sentido de aumentar a consciência para o problema para se adotarem comportamentos de mobilidade mais eficientes. Por outro lado, é um tema que deve merecer cada vez mais atenção dos governos, para estudarem medidas que contribuam para o desenvolvimento de redes de transportes públicos que melhorem a mobilidade no futuro. Deve ainda ser considerada pela comunidade científica e pela indústria dos transportes como uma oportunidade para se desenvolverem meios de transporte mais eficientes, incluindo novas formas de mobilidade, novas tipologias de veículos, novos sistemas de propulsão, novos materiais, infraestruturas, entre outros.

Tendo sido este contexto a motivar o desenvolvimento deste trabalho, foram caracterizados os aspetos mais relevantes no contexto dos transportes e da mobilidade, da indústria automóvel, especificamente os materiais utilizados atualmente no fabrico de veículos. Estudou-se a aplicação de materiais compósitos, reforçados com fibra de vidro, num componente estrutural que pudesse ser compatível com a de um veículo citadino compacto. Optou-se pela fibra de vidro como fibra de reforço dos compósitos, devido fundamentalmente ao seu preço reduzido, mas também para perceber se ela é compatível com este tipo de aplicação.

Estudaram-se algumas estruturas em material compósito, do tipo sandwich, que foram fabricadas e caracterizadas através de ensaios. Selecionou-se uma das estruturas para o fabrico do componente estrutural.

Definiram-se as características de referenciais (peso e a rigidez estática em torção e em flexão) para a estrutura em compósito, a partir de um veículo anteriormente desenvolvido. Simulou-se e produziu-se uma estrutura tubular, igual à do veículo de referência, que foi posteriormente submetida a ensaios. Com base nessas características, desenvolveu-se uma estrutura inferior do habitáculo, em material compósito, compatível com a do veículo de referência, que pudesse ser utilizado num veículo citadino compacto. Para isso, a estrutura foi desenhada e otimizada geometricamente, através de simulação numérica por elementos finitos, sendo posteriormente fabricada, em material compósito do tipo sandwich, com núcleo em ninho de abelha de polipropileno e peles reforçadas com fibra de vidro, e submetida a ensaios. No final foram tiradas conclusões, a partir dos resultados obtidos por ensaios e por simulação para as duas estruturas.

Palavras-chave: Materiais compósitos, estruturas sandwich, veículos leves, fibra de vidro, mobilidade sustentável.

ABSTRACT

The scale effect of the use of individual transport, which allows for greater comfort and freedom, has been hindering the mobility of people, particularly in urban centers, where are more and more environmental problems resulting from vehicle emissions. If we consider the studies that point to a continuing trend in the increase of population concentration in large cities, this problem should concern society in general, in order to raise awareness for the problem to adopt more efficient mobility behavior. On the other hand, it is an issue that deserves increasing attention from governments, to study measures to contribute for the development of public transport networks to improve the mobility in the future. It should also be considered by the scientific community and the transport industry as well, as an opportunity to develop more efficient means of transport, including new forms of mobility, new types of vehicles, new propulsion systems, new materials, infrastructures, and others.

Having this context to motivate the development of this work, were characterized the most relevant aspects in the context of transport and mobility, the automotive industry, specifically the materials currently used in vehicle manufacturing. It was studied the application of composite materials, reinforced with glass fiber, in a structural component that could be compatible with a compact city vehicle. The option by glass fiber as a composite reinforcement was mainly due to its low price, but also to see if it is compatible with this type of application.

Were studied some sandwich structures, which were manufactured and characterized by testing, and then was selected one of those composite structures for manufacturing the structural component.

Were defined the main references characteristics (weight and static stiffness in torsion and in bending) to the composite structure, from a previously developed vehicle. A tubular structure equal to the reference vehicle was simulated, produced and subsequently tested. Based on these characteristics, the bottom of the main structure was developed in composite material, being compatible with the reference vehicle, which could be used in a compact city vehicle. For this, the structure was designed and geometrically optimized by numerical simulation by finite elements, and subsequently manufactured with sandwich structures, with polypropylene honeycomb core and skins reinforced with fiberglass. After that the structure was tested.

In the end, were made conclusions from the comparison of the results obtained by simulation and by the tests for the two structures.

Keywords: Composites, sandwich structures, light vehicles, fiberglass, sustainable mobility.

RESUMÉ

L'effet d'échelle de l'utilisation du transport individuel, ce qui permet un plus grand confort et la liberté, a été entravé la mobilité des personnes, en particulier dans les centres urbains, où il y a des problèmes de plus en plus l'environnement résultant des émissions des véhicules. Si l'on considère les études qui indiquent une tendance continue à l'augmentation de la concentration de la population dans les grandes villes, ce problème devrait concerner la société en général, afin de sensibiliser au problème à adopter un comportement de mobilité plus efficace. D'autre part, il est une question qui mérite une attention croissante des gouvernements, pour étudier des mesures visant à contribuer au développement des réseaux de transports en commun pour améliorer la mobilité dans le futur. Il devrait également être examinée par la communauté scientifique et l'industrie du transport comme une occasion de développer des moyens de transport plus efficaces, y compris de nouvelles formes de mobilité, de nouveaux types de véhicules, de nouveaux systèmes de propulsion, de nouveaux matériaux, des infrastructures, entre autres.

Ayant ce contexte pour motiver le développement de ce travail ont été caractérisés les aspects les plus pertinents dans le contexte du transport et de la mobilité, l'industrie automobile, en particulier les matériaux actuellement utilisés dans la fabrication de véhicules. Il a étudié l'application des matériaux composites renforcés par des fibres de verre, un élément structurel qui peut être compatible avec un véhicule urbain compact. Nous avons opté pour la fibre de verre pour renforcer les composites, principalement en raison de son faible prix, mais aussi de voir si elle est compatible avec ce type d'application. Ils ont étudié des structures composites, de type sandwich, qui ont été fabriqués et caractérisé par des essais. Nous avons choisi l'une des composites pour la fabrication du composant structurel.

Les caractéristiques de référence pour la structure composite (poids et la rigidité statique en torsion et en flexion) ont été définies à partir d'un véhicule précédemment développé. Il a été simulé et il est produit une structure tubulaire, correspondant au véhicule de référence, qui a ensuite été soumis à des essais. Sur la base de ces caractéristiques, il a développé une structure inférieure de la cabine, en matériau composite, compatible avec le véhicule de référence, ce qui pourrait être utilisé dans une voiture de ville compacte. Pour cela, la structure a été conçue et optimisée géométriquement par simulation numérique par éléments finis, et par la suite fabriquée en matériau composite du type sandwich en nid d'abeille en polypropylène renforcé et des peaux en fibre de verre, et on le soumet à des tests. A la fin des conclusions ont été tirées à partir des résultats obtenus par le test et de simulation pour les deux structures.

Mots-clés: Composites matériaux, structures sandwichs, véhicules légers, fibre de verre, mobilité durable.

AGRADECIMENTOS

Quero prestar o meu agradecimento a todos aqueles que direta ou indiretamente me apoiaram na realização deste trabalho, nomeadamente:

- ao Prof. Doutor António Torres Marques, por ter aceite o convite para ser orientador desta tese, bem como pelo seu trabalho de orientação, apoio e disponibilidade que me dedicou.
- ao Prof. Doutor João Francisco Silva, por ter aceite o convite para ser coorientador desta tese, bem como pelo seu trabalho de orientação, apoio e pela incansável disponibilidade que me dedicou.
- à Prof. Doutora Olga Paiva, pelo apoio e motivação que me deu, tendo tido um papel importante na minha decisão relativamente ao início do doutoramento.
- ao Eng.º Cláudio Dias, pela colaboração no desenvolvimento da *Barchetta* 00, veículo que serviu de referência para este trabalho.
- ao Sr. Joaquim Soares, por todo o seu apoio e ajuda no fabrico das estruturas tubulares.
- ao Prof. Doutor Rui Campilho, pela disponibilidade e ajuda na utilização do programa Abaqus® e nas simulações iniciais.
- Ao Prof. Doutor Vytautas Bučinskas, da Universidade Técnica *Gediminas*, Vilnius, Lituânia, pelo apoio disponibilizado na primeira abordagem à simulação da estrutura de referência.
- ao Eng.º Rui Fazenda, pelo apoio dado na aquisição de matérias-primas para fabrico da estrutura tubular.
- ao Eng.º Mário Rui Alvim, pelo importante apoio que me deu durante todo o processo de fabrico da estrutura em compósito.
- ao Eng.º Tomé Ribeiro, pela ajuda durante a realização de alguns ensaios de flexão.
- à Alto Perfis Pultrudidos, por me ter disponibilizado um espaço e meios de trabalho para o fabrico da estrutura em compósito, e aos seus colaboradores que me apoiaram no fabrico da estrutura em compósito, em particular o Eng.º Rui Lourenço, o Sr. Paulo Cunha, o Sr. Paulo Lopes, o Sr. Domingos e o Sr. Emanuel Eusébio.
- aos colegas em geral, pelo apoio e motivação ao longo destes anos.
- ao ISEP e à FEUP pelo acolhimento desta tese de doutoramento.

Quero ainda agradecer de forma especial à minha namorada e companheira, à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão, por todo o apoio, motivação, carinho e confiança que me dispensaram ao longo deste trabalho.

ÍNDICE

Resumo	v
Abstract	vii
Résumé	ix
Agradecimentos	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xix
Índice de Tabelas	xxv
Notação	xxix
Abreviaturas	xxx
CAPÍTULO I	1
1. Introdução	1
1.1. Objetivos do Trabalho	2
CAPÍTULO II	3
2. Estado do Conhecimento	3
2.1. Dados Gerais Sobre a Evolução da Demografia	3
2.2. Panorama Global da Mobilidade na Europa	4
2.2.1. Caracterização da Mobilidade na Europa	5
2.2.2. Caracterização Modal dos Transportes	6
2.2.2.1. Volume de Passageiros por Modo de Transporte	9
2.2.2.2. Taxas de Ocupação Média nos Transportes	10
2.3. Visão Global do Sector dos Transportes	11
2.4. Evolução das Infraestruturas dos Transportes	14
2.4.1. Projetos de Redes de Transportes na Europa	15
2.5. Principais Impactes Associados à Utilização de Transportes	16
2.5.1. Socioeconómicos	16
2.5.2. Ambientais	20
2.6. Mobilidade Sustentável	25
2.6.1. Utilização de Veículos de Acordo com as Suas Características	26
2.6.2. Novos Conceitos de Veículos Citadinos	27
2.6.3. Desenvolvimento de Tecnologias e Veículos Mais Eficientes	31
2.6.3.1. Aumento da Eficiência das Tecnologias de Propulsão	33
2.6.3.2. Tecnologias de Informação e Veículos Autónomos	34
2.6.3.3. Redução do Peso dos Veículos	37
2.6.3.3.1. Incorporação de Materiais Leves	38
2.6.3.3.2. Otimização Estrutural	41
2.6.3.3.2.1. Projeto Ultra Light Steel Auto Body (ULSAB)	42
2.6.3.3.2.2. Projeto Ultra Light Steel Auto Closures (ULSAC)	45
2.6.3.3.2.3. Projeto Ultra Light Steel Auto Suspension (ULSAS)	45

2.6.3.3.2.4.	Projeto Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts (ULSAB-AVC) ..	45
2.6.3.3.2.5.	Projeto Technology for Carbon fibre reinforced modular Automotive Body Structures (TECABS).....	46
2.6.3.4.	Redução do Impacte Ambiental ao Longo do Ciclo de Vida	47
2.6.4.	Desafios Para o Futuro da Indústria Automóvel	48
2.7.	Materiais e Tecnologias de Processamento na Indústria Automóvel	51
2.7.1.	Aços.....	55
2.7.1.1.	Propriedades.....	56
2.7.1.2.	Processos de Transformação	57
2.7.1.3.	Aplicações Típicas	57
2.7.2.	Alumínio	58
2.7.2.1.	Propriedades.....	60
2.7.2.2.	Processos de Transformação	62
2.7.2.3.	Aplicações Típicas	62
2.7.3.	Magnésio.....	64
2.7.3.1.	Propriedades.....	65
2.7.3.2.	Processos de Transformação	67
2.7.3.3.	Aplicações Típicas	67
2.7.4.	Titânio.....	69
2.7.4.1.	Propriedades.....	69
2.7.4.2.	Processos de Transformação	70
2.7.4.3.	Aplicações Típicas	71
2.7.5.	Polímeros	71
2.7.5.1.	Propriedades.....	73
2.7.5.2.	Processos de Transformação	73
2.7.5.3.	Aplicações Típicas	73
2.7.6.	Compósitos.....	74
2.7.6.1.	Propriedades.....	76
2.7.6.1.1.	Fibras.....	76
2.7.6.1.2.	Matrizes	79
2.7.6.1.3.	Semi-produtos	80
2.7.6.1.4.	Compósitos Reforçados com Fibras	81
2.7.6.2.	Processos de Transformação	83
2.7.6.2.1.	Moldação Manual	84
2.7.6.2.2.	Moldação por Projeção.....	84
2.7.6.2.3.	Empilhamento Manual de Pré-impregnados.....	85
2.7.6.2.4.	Moldação por Compressão	86
2.7.6.2.5.	Moldação por Injeção	86
2.7.6.2.6.	Resin Tranfer Moulding (RTM e HPRTM).....	87
2.7.6.2.7.	Strutural Reation Injection Moulding (SRIM).....	88
2.7.6.2.8.	Reinforced Reation Injection Moulding (RRIM)	88
2.7.6.2.9.	Moldação Assistida a Vácuo	88

2.7.6.2.10.	Moldação em Autoclave	89
2.7.6.2.11.	Moldação por Infusão	90
2.7.6.2.12.	Pultrusão	90
2.7.6.3.	Aplicações Típicas	91
CAPÍTULO III		99
3.	Estudo e Fabrico da Estrutura do Veículo de Referência	99
3.1.	Introdução	99
3.2.	Caracterização do Veículo de Referência.....	101
3.2.1.	Descrição da Estrutura Tubular	104
3.2.2.	Modelação CAD 3D da Estrutura de Referência	106
3.2.3.	Fabrico da Estrutura de Referência	106
3.2.3.1.	Fabrico de Gabari de Soldadura.....	107
3.2.3.2.	Corte de Tubos por Laser.....	107
3.2.3.3.	Soldadura da Estrutura	108
3.2.4.	Ensaio da Estrutura de Referência	110
3.2.4.1.	Pesagem	111
3.2.4.2.	Ensaio de Torção.....	111
3.2.4.3.	Ensaio de Flexão	113
3.2.5.	Simulação da Estrutura de Referência	114
3.2.5.1.	Simulação do Peso	115
3.2.5.2.	Simulação de Torção	115
3.2.5.3.	Simulação de Flexão	117
3.2.6.	Definição dos Valores de Referência e Valores Objetivo	118
CAPÍTULO IV		119
4.	Desenvolvimento da Estrutura em Compósito.....	119
4.1.	Introdução	119
4.2.	Estudo e Caracterização de Estruturas Sandwich.....	120
4.2.1.	Fabrico de Placas em Compósito do Tipo Sandwich.....	120
4.2.1.1.	Propriedades dos Materiais	120
4.2.1.2.	Moldação das Placas Sandwich	122
4.2.1.3.	Preparação de Provetes para Ensaio.....	123
4.2.1.4.	Ensaio das Estruturas Sandwich Fabricadas.....	123
4.2.1.4.1.	Ensaio de Calcinação	124
4.2.1.4.2.	Ensaio de Dureza.....	125
4.2.1.4.3.	Ensaio de Flexão	125
4.2.1.4.4.	Ensaio de Compressão	128
4.3.	Simulação da Estrutura em Compósito	131
4.3.1.	Requisitos Estruturais para a Estrutura em Compósito	133
4.3.2.	Propriedades dos Materiais a Utilizar na Simulação	134
4.3.2.1.	Pesagem	134

4.3.2.2.	Ensaio de Flexão em 3 Pontos.....	135
4.3.2.3.	Determinação Analítica do Módulo de Elasticidade das Peles	136
4.3.2.4.	Modelo de Simulação.....	139
4.3.2.5.	Estudo de Convergência.....	141
4.3.3.	Simulação da Estrutura em Compósito Por Elementos Finitos	142
4.3.3.1.	Simulação de Torção.....	143
4.3.3.2.	Simulação de Flexão	144
4.3.3.3.	Iterações geométricas do Processo de Simulação por Elementos Finitos	146
4.3.3.3.1.	Iteração 1- Estrutura E2.I2.....	146
4.3.3.3.2.	Iteração 2- Estrutura E2.I3.....	147
4.3.3.4.	Resumo dos Resultados da Primeira Fase de Simulação	148
4.3.3.5.	Otimização Estrutural.....	149
4.4.	Fabrico da Estrutura em Compósito	151
4.4.1.	Fabrico do Molde	152
4.4.2.	Corte e Preparação das Placas para o Fabrico da Estrutura	154
4.4.3.	Moldação Manual da Estrutura E2.I3.2	155
4.5.	Ensaio da Estrutura em Compósito	160
4.5.1.	Pesagem da Estrutura em Compósito	160
4.5.2.	Rigidez à Torção	160
4.5.3.	Rigidez à Flexão	162
CAPÍTULO V.....		163
5.	Apresentação e Discussão de Resultados.....	163
5.1.	Estrutura do Veículo de Referência	163
5.1.1.	Resultados Obtidos no Fabrico da Estrutura.....	163
5.1.2.	Resultados Obtidos Através de Ensaio	164
5.1.2.1.	Peso.....	165
5.1.2.2.	Ensaio de Torção	165
5.1.2.3.	Ensaio de Flexão.....	166
5.1.3.	Resultados Obtidos por Simulação Numérica.....	166
5.1.3.1.	Peso.....	166
5.1.3.2.	Simulação de Torção.....	167
5.1.3.3.	Simulação de Flexão	168
5.1.4.	Resumo e Discussão dos Resultados	169
5.2.	Estruturas Sandwich Fabricadas.....	172
5.2.1.	Resultados dos Ensaio de Calcinação.....	173
5.2.2.	Resultados dos Ensaio de Dureza	173
5.2.3.	Resultados dos Ensaio de Flexão	173
5.2.3.1.	Ensaio de Flexão em 3 Pontos.....	173
5.2.3.2.	Ensaio de Flexão em 4 Pontos.....	177
5.2.4.	Resultados do Ensaio de Compressão.....	180

5.2.4.1. Resumo e Discussão dos Resultados	182
5.3. Estrutura de Veículo em Compósito.....	187
5.3.1. Resultados Obtidos por Simulação Numérica	187
5.3.1.1. Peso.....	188
5.3.1.2. Simulação de Torção	188
5.3.1.3. Simulação de Flexão	189
5.3.2. Resultados Obtidos no Fabrico da Estrutura	191
5.3.3. Resultados Obtidos Através de Ensaios.....	192
5.3.3.1. Peso.....	192
5.3.3.2. Ensaios de Torção.....	192
5.3.3.3. Ensaios de Flexão	192
5.3.4. Resumo e Discussão dos Resultados	193
5.4. Aplicação da Estrutura Desenvolvida.....	197
 CAPÍTULO VI.....	 199
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	199
6.1. Sugestão de Trabalhos Futuros	205
 REFERÊNCIAS.....	 213
 ANEXOS.....	 I.1
Anexo I - Resultados Experimentais.....	I.3
Anexo I-1 Ensaios De Calcinação.....	I.5
Anexo I-2 Ensaios De Dureza.....	I.9
Anexo I-3 Ensaios De Flexão Em 3 Pontos.....	I.15
Anexo I-4 Ensaios De Flexão Em 4 Pontos.....	I.29
Anexo I-5 Ensaios De Compressão.....	I.43
Anexo I-6 Resultados Experimentais Ensaios da Estrutura Tubular e da Estrutura E2.I3.2 em Compósito.....	I.55
Anexo II Resultados De Simulação Numérica.....	II.1
Anexo II-1 Simulação Por Elementos Finitos Das Estruturas Tubulares.....	II.3
Anexo II-2 Simulação Por Elementos Finitos Das Estruturas E2.....	II.7
Anexo III Fichas Técnicas Das Matérias-Primas Utilizadas.....	III.1
Anexo IV Desenhos Técnicos.....	IV.1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Dados estatísticos sobre a duração (a) e a distância (b), características das viagens em diferentes países europeus [adaptado de 5].	5
Figura 2.2 Comparação da evolução do transporte de passageiros e de mercadorias com a evolução do Produto Interno Bruto (PIB) nos 27 países da União Europeia, entre 1995 e 2006 [6].	6
Figura 2.3 Evolução do transporte de passageiros por tipo de transporte nos 27 países da União Europeia, medidos em passageiros por quilómetro, entre 1995 e 2006 [6].	7
Figura 2.4 Variação do crescimento médio anual do transporte de passageiros (a) e de mercadorias (b) por tipo de transporte nos 27 países da União Europeia, entre 1995 e 2006 [6].	7
Figura 2.5 Distribuição modal do transporte de passageiros (a) [%/passageiro x quilómetro] e de mercadorias (b) [%/tonelada x quilómetro], nos 27 países da EU, em 2006 [6].	8
Figura 2.6 Distância diária média percorrida por habitante, em diferentes meios de transportes terrestres, em países Europeus, no ano de 2006 (valores em km) [6].	9
Figura 2.7 Distribuição do volume médio de passageiros x quilómetro pelos diferentes modos de transporte em países europeus e em Portugal, 2007 [5].	10
Figura 2.8 Evolução das taxas de ocupação no transporte de passageiros [8].	10
Figura 2.9 Número de veículos de passageiros por 1 000 habitantes, EU-27, USA e Japão, entre 1990 e 2006 [6].	11
Figura 2.10 Taxa de crescimento médio anual dos diferentes tipos de transporte nos últimos anos na Europa nos últimos anos.	14
Figura 2.11 Evolução do preço médio da gasolina sem chumbo e do gasóleo e do rácio entre o preço médio do gasóleo e da gasolina sem chumbo, na UE-12, entre 1991 e 2008 (valores em €/1000 litros) [6].	17
Figura 2.12 Consumo de energia final nos transportes, indústria, habitações, serviços e agricultura, na EU-27, entre 1990 e 2006 (valores em milhões de TEP) [6].	17
Figura 2.13 Consumo de energia final pelos principais sectores na EU-27 em 2006 (valores em % de TEP) [6].	18
Figura 2.14 Consumo de energia final para os transportes rodoviários, ferroviários, fluviais e aéreos na EU-27, entre 1990 e 2006 (valores em milhões de TEP) [6].	18
Figura 2.15 Consumo de energia no sector dos transportes por tipo de combustível, em 2006 na EU-27 (% de TEP) [6].	19
Figura 2.16 Número de veículos e população global [adaptado de 12].	20
Figura 2.17 Taxas de Emissões de GEE por diferentes sectores na EU-27, em 2006 [6].	21
Figura 2.18: Emissões totais de Gases com efeito de estufa provenientes do sector dos transportes e dos transportes rodoviários, na EU-27, entre 1990 e 2006 (valores milhões Ton. CO2 Equivalente e %) [6].	21
Figura 2.19 Emissões de Gases com Efeito de Estufa por modo de transporte em 2006 (valores % de CO2 equivalente) [6].	22
Figura 2.20 Previsões para as vendas globais de automóveis de passageiros até ao ano 2020 nos diferentes segmentos (em milhões de unidades) [19].	26
Figura 2.21 Protótipo PUMA [20].	27
Figura 2.22 Imagem do City Car projectado pelo MIT [22].	28
Figura 2.23 Automóvel cidadão Pininfarina® EV Nido [23].	28
Figura 2.24 Vista exterior (a) e interior (b) do automóvel cidadão da Peugeot® BB1 [24].	29
Figura 2.25 Lotus® Urban Concept [25].	29
Figura 2.26 Veículo micro cidadão MPV T27 [26].	29
Figura 2.27 Automóvel micro cidadão da marca Renault® modelo Twizi Z.E. [27].	30
Figura 2.28 Segway® PT i2 Commuter [28].	30
Figura 2.29 Bicicleta elétrica desdobrável da marca Volkswagen® [29].	31
Figura 2.30 Protótipo de veículo de carga todo-o-terreno de baixo custo, Global Trust Vehicle OXTM [30].	31
Figura 2.31 Parâmetros que influenciam o consumo e o nível de emissões de CO2 (a) e a respetiva influência dos parâmetros mais importantes (b).	32
Figura 2.32 Relação entre o peso e o nível de emissão de CO2 para veículos com diferentes tecnologias de propulsão [34].	32
Figura 2.33 Previsão até 2035 sobre a evolução das tecnologias de propulsão emergentes. [35].	33
Figura 2.34 Tecnologias de propulsão automóvel utilizadas em 2007 versus previsão para 2020 [19].	33

Figura 2.35 Venda de veículos elétricos no mundo por mês entre 2014 e 2016 [37].	34
Figura 2.36 Sistemas de comunicação entre veículos e entre veículos e infraestrutura [18].	34
Figura 2.37 Níveis de emissões de veículos em função da sua velocidade média [12].	35
Figura 2.38 Previsão sobre desenvolvimento e utilização dos veículos autónomos [Adaptados de 40]	36
Figura 2.39 Distribuição do peso dos componentes de um automóvel no seu peso total (a) [adaptado de 41], e distribuição do peso dos diferentes materiais tipicamente utilizados no seu fabrico (b) [adaptado de 42].	37
Figura 2.40 Fatores a considerar para a redução do peso de estruturas de automóveis [adaptado de 43].	38
Figura 2.41 Fatores que justificam o desenvolvimento de materiais avançados leves com vista à redução do peso dos veículos [41].	38
Figura 2.42 Relação custo / benefício de redução de peso conseguida com a aplicação de materiais alternativos [41].	40
Figura 2.43 Comparação de peso de diferentes componentes de automóveis fabricados com diferentes materiais. [44].	41
Figura 2.44 Evolução dos tipos de estruturas de automóveis [41].	41
Figura 2.45 Modelação em computador da estrutura ULSAB (a) e simulação do comportamento em caso de colisão, através de elementos finitos (b).	42
Figura 2.46 Estrutura construída na Fase 2 do projeto ULSAB [46].	42
Figura 2.47 Configurações dos ensaios de torção (a) e de flexão (b) para determinação da respetiva rigidez e ensaios de vibrações (c) [47].	43
Figura 2.48 Resultados obtidos no ensaio de torção (a) e de flexão (b) [47].	44
Figura 2.49 Dois dos modelos desenvolvidos no projeto ULSAB-AVC [51].	45
Figura 2.50 Plataformas dos dois modelos ULAB-AVC [51].	46
Figura 2.51 Componentes da plataforma TECABS fabricada em materiais compósitos [53].	47
Figura 2.52 Total de emissão de CO2 Equivalente ao longo do ciclo de vida de um automóvel [54].	48
Figura 2.53 Emissões de CO2 típicas na obtenção dos materiais e no fabrico automóveis (kg CO2 eq/kg de material).	48
Figura 2.54 Visão global da evolução dos materiais de engenharia [57].	51
Figura 2.55 Diagramas de custo de materiais por unidade de peso (a) e diagrama de custo de produtos por unidade de peso (b) [57].	52
Figura 2.56 Evolução da utilização dos materiais na indústria automóvel ao longo das últimas décadas [12].	53
Figura 2.57 Evolução da incorporação de diferentes materiais no fabrico de automóveis de passageiros [12].	54
Figura 2.58 Aços utilizados na indústria automóvel ao longo dos últimos 30 anos [31].	55
Figura 2.59 Gráfico de resistência à tração vs alongamento total para diferentes aços. [60].	56
Figura 2.60 Diferentes aços utilizados na construção de estruturas de automóveis [42].	58
Figura 2.61 Classificação das ligas de alumínio [58].	59
Figura 2.62 Placa de Alumínio Alporas® [62].	61
Figura 2.63 Potencial de aplicações de estruturas sandwich de Alporas®/Alumínio em veículos [41].	61
Figura 2.64 Processos de fabrico de diferentes componentes em alumínio utilizados nos modelos XK e XJ da Jaguar® [64, 65].	62
Figura 2.65 Estrutura ASF (Audi® Space Frame), utilizada nos modelos A8 (a) e A2 (b).	63
Figura 2.66 Utilização de alumínio na estrutura do Mercedes-Benz® SLS AMG 2011.	63
Figura 2.67 Pistão de um motor de magnésio reforçado como fibras de carbono [67].	66
Figura 2.68 Exemplos de componentes de automóveis fabricados em ligas de magnésio [67].	68
Figura 2.69 Polímeros ASA utilizados no fabrico dos painéis da carroçaria do Quattroruote SUMMA® [72].	74
Figura 2.70 Comparação entre a resistência mecânica específica de alguns metais estruturais e FRP's.	75
Figura 2.71 Família de materiais compósitos termoplásticos para a indústria automóvel [74].	76
Figura 2.72 Classificação das fibras derivadas de plantas [76].	78
Figura 2.73 Curvas de tensão-deformação obtidas em ensaios de flexão para diferentes compósitos reforçados com fibras naturais, de acordo com DIN EN 63 [76].	83
Figura 2.74 Tecido de GFRP (a); empilhamento de camadas unidireccionais sobre diferentes orientações (b).	84
Figura 2.75 Representação esquemática do processo de moldação manual.	84

Figura 2.76 Representação esquemática do processo de moldação por projeção.	85
Figura 2.77 Esquema de processamento por moldação por compressão.	86
Figura 2.78 Representação esquemática do processo de moldação por transferência de resina (RTM).	87
Figura 2.79 Representação esquemática do processo de cura em saco de vácuo.	89
Figura 2.80 Autoclave de grandes dimensões para cura de componentes em FRP.	89
Figura 2.81 Representação esquemática do processo de infusão por filme de resina.	90
Figura 2.82 Esquema do processo de pultrusão.	91
Figura 2.83 Componentes de automóveis fabricados em materiais compósitos [81].	91
Figura 2.84 Evolução do consumo de CFRP desde 1996 no fabrico de automóveis desportivos e de superdesportivos [41].	92
Figura 2.85 Aplicação de materiais compósitos na indústria automóvel Indiana [41].	92
Figura 2.86 Componentes de carroçaria automóvel fabricados em CFRP por RTM [41].	92
Figura 2.87 Estrutura de um tablier do modelo C-Max da Ford® fabricado em material compósito (LFT) [74].	93
Figura 2.88 Compósitos GFRP utilizados no fabrico da estrutura dos bancos da frente do novo Opel® Insignia OPC desenvolvidos pela Opel® e pela Recaro® [82].	93
Figura 2.89 Estrutura monocoque integral em CFRP do super-desportivo McLaren® MP4-12C [83].	94
Figura 2.90 Porsche® Carrera® GT e a respetiva estrutura em CFRP.	94
Figura 2.91 Estrutura do modelo i3 da BMW®.	95
Figura 2.92 Possíveis aplicações de materiais compósitos LFT em automóveis [74].	95
Figura 2.93 Aplicação de fibras de plantas no modelo E (W210) da Mercedes-Benz® [76].	96
Figura 2.94 Paineis interior de revestimento de portas de automóveis em biocompósito de fibras naturais.	96
Figura 2.95 Protótipo 1/X da Toyota®, construído com aplicação de plásticos derivados de algas marinhas [86].	97
Figura 2.96 Volkswagen® XL1.	97
Figura 3.1 Esboço de veículos de nicho: a) bi-lugar convertível, b) bi-lugar aberto c) cidadão compacto de dois lugares.	100
Figura 3.2 Veículo de referência [87]	100
Figura 3.3 Estrutura tubular do veículo de referência	102
Figura 3.4 Percentagem do peso de cada componente no peso do veículo de referência.	104
Figura 3.5 Elementos de reforço em aço DIN 25CrMo4.	104
Figura 3.6 Isolamento do habitáculo com chapas de alumínio.	105
Figura 3.7 Modelação CAD 3D da estrutura de referência (Solidworks®).	106
Figura 3.8 Modelação CAD 3D do gabari de soldadura da estrutura de referência. (a) Gabari completo, (b) Estrutura posicionada no gabari (Solidworks®).	107
Figura 3.9 Sequência de “pingagem” das subestruturas horizontais.	109
Figura 3.10 Sequência de “pingagem” dos arcos de segurança.	109
Figura 3.11 Sequência de ligação de todas as subestruturas.	110
Figura 3.12 Fotografia do fabrico da estrutura durante o processo de soldadura sobre o gabari.	110
Figura 3.13 Condições do ensaio de torção para determinação da rigidez torsional da estrutura de referência.	111
Figura 3.14 Detalhe do apoio do ponto B com restrição de deslocamentos nas direções X e Y.	113
Figura 3.15 Condições do ensaio de flexão para determinação da rigidez à flexão da estrutura de referência.	113
Figura 3.16 Modelação CAD 3D das estruturas tubulares de referência (Solidworks®).	114
Figura 3.17 Condições de simulação de torção das estruturas de referência.	115
Figura 3.18 Modelos tridimensionais da estrutura de referência: a) modelação CAD 3D (Solidworks®), b) modelo de linhas usado no programa de simulação (Abaqus®).	116
Figura 3.19 Atribuição das seções, materiais e sistemas de eixos da secção de cada elemento da estrutura no modelo FEM (Abaqus®).	117
Figura 3.20 Condições de simulação de flexão efetuadas às estruturas de referência.	118
Figura 4.1 Sequência de moldação no fabrico de uma placa sandwich com 3 camadas de reforço.	122
Figura 4.2 Corte de provetes a partir das placas sandwich fabricadas.	123

Figura 4.3 Balança para pesagem dos cadinhos (esquerda) e mufla para aquecimento dos cadinhos (direita)	124
Figura 4.4 Durómetro de Barcol para medição da dureza superficial das peles das estruturas fabricadas	125
Figura 4.5 Dimensões a respeitar para os provetes do tipo sandwich	126
Figura 4.6 Esquema do ensaio de flexão em três pontos	127
Figura 4.7 Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos	127
Figura 4.8 Esquema do ensaio de compressão	129
Figura 4.9 Esboços de estruturas em compósito comum a diferentes tipos de veículos	131
Figura 4.10 Esboço da estrutura híbrida compósito/metal para um veículo bi-lugar aberto	132
Figura 4.11 Perspetiva do modelo inicial para estudo da estrutura central em compósito, E2, (Solidworks®)	133
Figura 4.12 Ensaio de flexão em 3 pontos a uma sandwich de PP/FV, de acordo com a norma ASTM C393-00	135
Figura 4.13 Representação da secção da viga em compósito	137
Figura 4.14 Condições-fronteira impostas à viga em sandwich PP/FV para simulação de flexão em 3 pontos	140
Figura 4.15 Desvio percentual entre os valores das flechas, obtidos por simulação de flexão em 3 pontos da sandwich PP/FV para diferentes dimensões da malha, em relação ao valor da flecha determinado analiticamente	141
Figura 4.16 Resultado da simulação de flexão em 3 pontos da viga em sandwich PP/FV (ABAQUS®)	141
Figura 4.17 Modelo de cascas para simulação da estrutura E2.I1 (Abaqus®)	143
Figura 4.18 Condições-fronteira impostas à estrutura E2.I1 para simulação de torção	143
Figura 4.19 Resultado da simulação de torção da estrutura E2.I1 (ampliação 20x)	144
Figura 4.20 Condições-fronteira impostas à estrutura E2.I1 na simulação de flexão	145
Figura 4.21 Resultado da simulação à flexão da estrutura E2.I1 (ampliação dos deslocamentos de 1000 vezes)	145
Figura 4.22 Condições-fronteira aplicadas ao modelo de casca da estrutura E2.I2 para simulação de torção (a) e flexão (b)	146
Figura 4.23 Condições-fronteira aplicadas ao modelo de casca da estrutura E2.I3 para simulação de torção (a) e de flexão (b)	148
Figura 4.24 Identificação dos painéis da estrutura E2.I3	149
Figura 4.25 Perspetivas da estrutura E2.I3.2 otimizada	150
Figura 4.26 Imagem virtual do molde com a estrutura E2.I3.2 no interior (Solidworks®)	152
Figura 4.27 Fase final da construção do molde em madeira MDF	152
Figura 4.28 Fixação das placas do molde	153
Figura 4.29 Molde com revestimento interior de gel coat	153
Figura 4.30 Corte das placas de ninho de abelha de PP	154
Figura 4.31 Pré-montagem para confirmação dos cortes das placas de ninho de abelha de PP	154
Figura 4.32 Moldação da face interior de três painéis da estrutura	155
Figura 4.33 Colocação das fibras de reforço (manta e tecido) sobre o molde	156
Figura 4.34 Moldação das peles exteriores com projeção de resina	156
Figura 4.35 Sequência de colocação do núcleo dos painéis verticais no interior do molde	157
Figura 4.36 Pressão sobre as faces interiores do núcleo dos painéis no início da cura	157
Figura 4.37 Moldação das peles dos topos dos painéis sandwich	157
Figura 4.38 Posicionamento do núcleo dos painéis interiores	158
Figura 4.39 Moldação da segunda pele interior da estrutura	158
Figura 4.40 Acessório desenvolvido para fixação da estrutura na mesa de ensaio	159
Figura 4.41 Inserção de um acessório mecânico para fixação da estrutura à mesa de ensaio	159
Figura 4.42 Aspeto final da estrutura E2.I3.2 após acabamento da superfície com top coat	160
Figura 4.43 Esquema do ensaio de torção realizado na estrutura E2.I3.2 fabricada em compósito	161
Figura 4.44 Medição do deslocamento no ponto D durante o ensaio de torção da estrutura E2.I3.2	161
Figura 4.45 Esquema do ensaio de flexão realizado à estrutura fabricada em compósito E2.I3.2	162
Figura 5.1 Fabrico da estrutura tubular de referência: a) processo original b) com gabari de soldadura	164

Figura 5.2 Deslocamento do ponto D verificado na simulação da estrutura à torção (T1) (ampliação 20x).	167
Figura 5.3 Deslocamento do ponto F verificado na simulação da estrutura à flexão (F1) (ampliação 1000x).	168
Figura 5.4 Resultados percentuais em relação aos resultados dos ensaios efetuados à estrutura fabricada.	169
Figura 5.5 Valores da rigidez estática em torção das estruturas tubulares, obtidos por simulação e por ensaios.	171
Figura 5.6 Valores da rigidez estática em flexão das estruturas tubulares, obtidos por simulação e ensaios.	171
Figura 5.7 Montagem para ensaio de flexão.	174
Figura 5.8 Curvas força-deslocamento do ensaio de flexão de 3 pontos dos provetes extraídos da placa 1, para deslocamentos medidos com comparador.	175
Figura 5.9 Curvas força-deslocamento do ensaio de flexão de 3 pontos dos provetes extraídos da placa 1.	176
Figura 5.10 Posicionamento do provete P1.Fx4P.P1, para a realização do ensaio de flexão de 4 pontos.	177
Figura 5.11 Curvas força-deslocamento do ensaio de flexão de 4 pontos dos provetes extraídos da placa 1, para deslocamentos medidos com comparador.	178
Figura 5.12 Ensaio de flexão em 4 pontos do provete P1.Fx4P.P3.	179
Figura 5.13 Curvas força-deslocamento do ensaio de flexão de 4 pontos dos provetes extraídos da placa 1.	179
Figura 5.14 Estado final do provete P1.Comp.P5 após o ensaio de compressão.	181
Figura 5.15 Curvas força versus deslocamento, provenientes dos ensaios de compressão aos provetes da placa 1.	181
Figura 5.16 Zona linear do gráfico força-deslocamento compilado a partir dos dados provenientes do ensaio de compressão ao provete P1.Comp.P5.	182
Figura 5.17 Comparação dos resultados da tensão de flexão das peles instalada, obtidos a partir dos ensaios de flexão em 3 e 4 pontos.	183
Figura 5.18 Comparação dos resultados da tensão de corte do núcleo, obtidos a partir dos ensaios de flexão em 3 e em 4 pontos.	184
Figura 5.19 Rotura no ensaio de flexão em 3 pontos de um provete da sandwich utilizada no fabrico da estrutura E2.I3.2.	187
Figura 5.20 Modelação CAD 3D das estruturas em compósito E2.I1, E2.I2 e E2.I3 (Solidworks®).	188
Figura 5.21 Estrutura E2.I3.2 fabricada em compósito.	191
Figura 5.22 Percentagens dos resultados em relação aos valores objetivo definidos.	193
Figura 5.23 Excesso de resina na laminação da pele do lado interior da estrutura.	194
Figura 5.24 Inserto mecânico para estruturas sandwich [101]	195
Figura 5.25 Resultados da rigidez estática em flexão corrigidos.	197
Figura 5.26 Comparação das características da estrutura E2.I3.2 com as estruturas de referência utilizada.	197
Figura 5.27 Compatibilidade geométrica entre a estrutura E2.I3.2 fabricada e um veículo bi-lugar aberto.	198
Figura 5.28 Esboço de um veículo citadino compacto leve e de baixo custo.	198

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Dados estatísticos sobre a demografia nas áreas urbanas e rurais da União Europeia [2].	4
Tabela 2.2 Características da mobilidade de passageiros nos países indicados entre 1999 e 2001 [adaptado de 5].	5
Tabela 2.3 Evolução do número de automóveis de passageiros na Europa, entre 1990 e 2006 (valores em milhares) [Adaptado de 6].	12
Tabela 2.4 Evolução do número de autocarros e camionetas de passageiros na Europa, entre 1990 e 2006 (valores em milhares) [Adaptado de 6].	12
Tabela 2.5 Evolução do número motociclo de duas rodas na Europa, entre 1995 e 2006 (valores em milhares) [adaptado de 6].	12
Tabela 2.6 Evolução do número de veículos rodoviários de mercadorias na Europa, entre 1990 e 2006 (valores em milhares) [Adaptado de 6].	13
Tabela 2.7 Evolução do número composições ferroviárias de mercadorias (vagões de carga) na Europa, entre 1990 e 2005, (valores em milhares) [adaptado de 6].	14
Tabela 2.8 Principais redes de transportes da EU-27 entre 1990 e 2005 (km) [adaptado de 9].	15
Tabela 2.9 Extensão das redes de transportes transeuropeias (TEN-T), com dados de 2003, 2008 e previsões para 2020 (km) [adaptado de 6].	16
Tabela 2.10 Consumo de energia final por tipo combustível e modo de transporte, EU-27, 2006 (milhares de TEP e %) [6].	20
Tabela 2.11 Objetivos de redução de peso dos principais construtores Japoneses [41].	39
Tabela 2.12 Potenciais aplicações de materiais em diferentes componentes de automóveis na Índia [41].	39
Tabela 2.13 Redução de peso esperado com a substituição do aço por alumínio em alguns componentes de automóveis [41].	40
Tabela 2.14 Resultados obtidos na fase 2 do projeto ULSAB [48].	44
Tabela 2.15 Valores objetivo para a estrutura em compósito no âmbito do projeto TECABS [53].	47
Tabela 2.16 Propriedades típicas de aços utilizados na indústria automóvel [60].	57
Tabela 2.17 Séries de alumínios utilizados na indústria automóvel e suas características [60].	59
Tabela 2.18 Propriedades típicas de ligas de alumínio de uso corrente na indústria automóvel [31].	60
Tabela 2.19 Propriedades típicas do Alporas® [63].	61
Tabela 2.20 Composição e propriedades mecânicas típicas de ligas de Magnésio de uso corrente na indústria automóvel [adaptado de 31].	65
Tabela 2.21 Propriedades mecânicas de ligas de Magnésio recentemente desenvolvidas [adaptado de 65].	65
Tabela 2.22 Comparação das propriedades de compósitos de magnésio reforçado com fibras e a liga KS1275 (AlSi12CuMgNi) [67].	66
Tabela 2.23 Aplicações de ligas de magnésio em componentes de automóveis (a). Peso de alguns dos componentes em ligas de magnésios (b) [66].	68
Tabela 2.24 Propriedades de algumas ligas de titânio usadas na indústria automóvel [69].	70
Tabela 2.25 Propriedades do titânio comercial Timetal 45A e 50A [69].	70
Tabela 2.26 Componentes de automóveis fabricados em titânio e suas ligas [33].	71
Tabela 2.27 Propriedades mecânicas típicas dos termoplásticos mais representativos [58].	73
Tabela 2.28 Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro [75].	76
Tabela 2.29 Propriedades de alguns tipos de fibras de carbono [75].	77
Tabela 2.30 Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas [75].	77
Tabela 2.31 Propriedades de alguns tipos de fibra de boro [75].	78
Tabela 2.32 Propriedades de fibras naturais utilizadas como reforços em compósitos [77].	79
Tabela 2.33 Propriedades típicas de matrizes termoplásticas [75].	79
Tabela 2.34 Propriedades típicas de matrizes termoendurecíveis [75].	79
Tabela 2.35 Propriedades típicas de alguns pré-impregnados de fibras contínuas comerciais [70].	81
Tabela 2.36 Propriedades típicas de alguns tipos de FRP's e metais [78, 79].	82
Tabela 2.37 Propriedades típicas de compósitos LFRT e SFRT [70].	82

Tabela 2.38 Comparação das propriedades mecânicas de compósitos de carbono/PEEK e carbono/epóxico [70].	83
Tabela 3.1 Peso dos componentes e peso total do veículo de referência.	103
Tabela 3.2 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados na estrutura de referência [88]	105
Tabela 3.3 Resumo dos valores de peso das estruturas, estimados a partir da modelação CAD 3D.	115
Tabela 3.4 Secção e material dos diferentes componentes da estrutura tubular de referência.	116
Tabela 3.5 Resumo das propriedades da estrutura de referência e valores objetivo para a estrutura em compósito.	118
Tabela 4.1 Identificação dos materiais das placas <i>sandwich</i> fabricadas.	120
Tabela 4.2 Propriedades de resinas utilizadas como matriz das <i>sandwich</i> [91, 92].	121
Tabela 4.3 Propriedades típicas da fibra de vidro [70].	121
Tabela 4.4 Propriedades dos núcleos das <i>sandwich</i> [93, 94, 95, 96].	121
Tabela 4.5 Normas utilizados nos ensaios realizados às estruturas fabricadas em compósito.	123
Tabela 4.6 Valores objetivo relativos aos requisitos estruturais da estrutura a desenvolver em compósito.	133
Tabela 4.7 Dimensões das vigas <i>sandwich</i> de PP/FV submetidas a ensaios de flexão em 3 pontos.	134
Tabela 4.8 Peso e provetes extraídos da placa <i>sandwich</i> fabricada em compósito de PP/FV.	135
Tabela 4.9 Flecha verificada nos provetes em compósito do tipo <i>sandwich</i> PP/FV submetidos a ensaios de flexão em 3 pontos, para uma força de 100N.	135
Tabela 4.10 Propriedades das matérias-primas das peles da placa <i>sandwich</i> PP/FV.	138
Tabela 4.11 Espessuras das peles da <i>sandwich</i> de PP/FV, determinadas analiticamente.	138
Tabela 4.12 Módulo de elasticidade estimado das peles da placa <i>sandwich</i> .	139
Tabela 4.13 Propriedades das <i>sandwich</i> de PP/FV submetidas a ensaios de flexão em 3 pontos [96].	140
Tabela 4.14 Resultados da flecha máxima das vigas submetidas à flexão em 3 pontos.	142
Tabela 4.15 Resultados da simulação de torção da estrutura E2.I1.	144
Tabela 4.16 Resultado da simulação de flexão da estrutura E2.I1.	145
Tabela 4.17 Comparação dos valores das propriedades mecânicas da estrutura E2.I1 com os valores objetivo	146
Tabela 4.18 Resultados da simulação de torção da estrutura E2.I2.	147
Tabela 4.19 Resultado da simulação de flexão da estrutura E2.I2.	147
Tabela 4.20 Resultados da simulação de torção da estrutura E2.I3.	148
Tabela 4.21 Resultado da simulação de flexão da estrutura E2.I3.	148
Tabela 4.22 Resumo dos resultados determinados a partir das simulações das estruturas em compósito, realizadas por elementos finitos.	149
Tabela 4.23 Combinações de espessuras das placas <i>sandwich</i> utilizada na otimização da estrutura E2.I3.	150
Tabela 4.24 Propriedades dos reforços de fibra de vidro utilizada no fabrico da estrutura E2.I3.2 [99, 100].	151
Tabela 4.25 Propriedades do núcleo de ninho de abelha de PP, utilizado no fabrico da estrutura E2.I3.2 [93].	151
Tabela 5.1 Resumo do custo de fabrico da estrutura tubular de referência (Estrutura 1).	164
Tabela 5.2 Resultados dos ensaios de torção realizados à estrutura tubular de referência.	165
Tabela 5.3 Resultados dos ensaios de flexão realizados à estrutura tubular de referência.	166
Tabela 5.4 Resumo do peso estimado das estruturas de tubulares.	167
Tabela 5.5 Resultados das simulações de torção das estruturas tubulares de referência.	168
Tabela 5.6 Resultados das simulações de flexão da estrutura tubular de referência.	168
Tabela 5.7 Resumo dos resultados experimentais e resultados de simulação das estruturas tubulares.	169
Tabela 5.8 Resumo das propriedades da estrutura de referência (estrutura 3) e valores objetivo para a estrutura em compósito.	172
Tabela 5.9 Resultados da pesagem do ensaio de calcinação de provetes extraídos da Placa 1.	173
Tabela 5.10 Dimensões dos provetes de flexão em 3 pontos, extraídos da Placa 1.	174
Tabela 5.11 Valores força vs deslocamento registados nos ensaios de flexão em 3 pontos, para os provetes da Placa 1.	175
Tabela 5.12 Resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos aos provetes extraídos da Placa 1.	176
Tabela 5.13 Dimensões dos provetes de flexão em 4 pontos, extraídos da Placa 1.	177

Tabela 5.14 Valores da força vs deslocamento registados nos ensaios de flexão em 4 pontos, para os provetes extraídos da Placa 1.	178
Tabela 5.15 Resultados dos ensaios de flexão em 4 pontos aos provetes extraídos da Placa 1.	180
Tabela 5.16 Rigidez à flexão e do módulo de elasticidade transversal do núcleo da palca 1.	180
Tabela 5.17 Dimensões dos provetes extraídos da Placa 1, submetidos a ensaio de compressão.	181
Tabela 5.18 Resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão dos provetes extraídos da Placa 1.	182
Tabela 5.19 Resumo dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados aos provetes em compósito.	183
Tabela 5.20 Principais critérios para a seleção dos materiais compósitos.	185
Tabela 5.21 Resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos realizados à <i>sandwich</i> de PP/FV utilizada no fabrico da estrutura em compósito.	187
Tabela 5.22 Pesos das estruturas em compósito, estimados através da modelação CAD 3D.	188
Tabela 5.23 Resultados da simulação de torção das estruturas em compósito estudadas.	189
Tabela 5.24 Resultado da simulação de flexão da estrutura E2.I1, E2.I2 e E2.I3.	189
Tabela 5.25 Resumo dos resultados obtidos a partir das simulações das estruturas em compósito, realizadas por elementos finitos.	190
Tabela 5.26 Resultados de rigidez estimados por simulação em função da alteração da espessura diferentes painéis da estrutura E2.I3.	190
Tabela 5.27 Resumo do custo de fabrico da estrutura em compósito.	191
Tabela 5.28 Resultados experimentais do ensaio de torção - Estrutura E2.I3.2.	192
Tabela 5.29 Resultados experimentais do ensaio de flexão - Estrutura E2.I3.2.	192
Tabela 5.30 Resumo dos resultados experimentais versus resultados de simulação para a estrutura em compósito E2.I3.2.	193
Tabela 5.31 Módulo de elasticidade das peles da <i>sandwich</i> usada no fabrico da estrutura E2.I3.2,	196
Tabela 5.32 Comparação dos valores de rigidez estática em flexão da estrutura E2.I3.2, simulação e ensaios.	196

NOTAÇÃO

A	Área da secção, (mm^2)
b	Largura do provete (mm)
c	Espessura do núcleo, (mm)
CE_Z	Distância horizontal entre o ponto C e o ponto E, (m)
d	Espessura total da <i>sandwich</i> , (mm)
D	Rigidez à flexão, ($\text{N}\cdot\text{mm}^2$)
E	Módulo de elasticidade, (GPa)
E_f	Módulo de elasticidade das peles, (GPa)
E_m	Módulo de elasticidade da camada de manta de fibra de vidro e resina poliéster insaturado, (GPa)
E_p	Módulo de elasticidade da resina, (GPa)
E_t	Módulo de elasticidade da camada de tecido de fibra de vidro e resina poliéster insaturado, (GPa)
F	Força aplicada no Ponto F no ensaio de flexão, (N)
G	Módulo de Corte (GPa)
G_C	Módulo de corte núcleo, (GPa)
G_f	Gramagem das fibras, (kg/m^2)
h	Altura do provete, (mm)
k_b	Coefficiente de deflexão devido à flexão
k_F	Rigidez estática em flexão, (N/mm)
k_s	Coefficiente de deflexão devido ao efeito do corte
k_T	Rigidez estática em torção, ($\text{N}\cdot\text{m}^\circ$)
L	Comprimento total do provete, (mm)
L_1	Distância entre apoios no ensaio de flexão em 3 pontos, (mm)
L_2	Distância entre apoios no ensaio de flexão em 4 pontos, (mm)
m_1	Massa do cadinho, (g)
m_2	Massa inicial do cadinho e fibras antes do ensaio de calcinação, (g)
m_3	Massa final do cadinho e fibras após ensaio de calcinação, (g)
M_T	Momento torsor, (N.m)
n	Expoente de encruamento (equação de Hollomon). Influência do tamanho do grão na ductilidade.
P	Carga aplicada, (N)
P_1	Carga P_1 aplicada no ensaio de três pontos, (N)
P_2	Carga P_2 aplicada no ensaio de quatro pontos, (N)
r	Fator de conformabilidade (Coefficiente de Lankfort)
$Rp0,2$	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, (MPa)
S	($S=\Delta P/\Delta u$) declive da parte inicial da curva de força-deslocamento, (N/mm)
ΔP	Varição da força entre dois pontos da zona linear da curva força-deslocamento (N)
Δu	Varição do deslocamento entre dois pontos da zona linear da curva força-deslocamento (mm)
t	Espessura das peles do provete (mm)
T	Força aplicada no Ponto E no ensaio de torção, (N)
t_c	Espessura do Núcleo, (mm)
Y_F	Teor de fibras

t	Espessura total da sandwich (mm)
t_f	Espessura das peles (mm)
t_m	Espessura da camada de manta de fibra de vidro e resina poliéster insaturado, (GPa)
t_t	Espessura da camada de tecido de fibra de vidro e resina poliéster insaturado, (GPa)
w	Carga distribuída (N/mm)
w_f	Fração mássica das fibras
w_p	Fração mássica da resina
x	Deslocamento, (mm)
y	Força, (N)
Y_F	Deslocamento vertical no ponto F, da estrutura submetida a ensaio de flexão, (m)
y_{max}	Deflexão máxima do provete submetido a ensaio de flexão, (mm)
Y_T	Deslocamento vertical no ponto D, da estrutura submetida ensaio de torção, (m)
γ	Peso específico, (kg/m ³)
Δ_1	Deflexão correspondente à carga P_1 , no domínio elástico do ensaio de flexão em 3 pontos, (mm)
Δ_2	Deflexão correspondente à carga P_2 , no domínio elástico do ensaio de flexão em 4 pontos, (mm)
η	Fator de orientação das fibras
θ	Ângulo de torção, (grau °)
ν	Coefficiente de Poisson
ν_f	Fração volúmica de fibras
ρ	Densidade, (kg/dm ³)
ρ_f	Massa específica das fibras, (kg/m ³)
ρ_p	Massa específica da resina, (kg/m ³)
σ	Tensão normal, (MPa)
σ_{rot}	Tensão de rotura, (MPa)
τ	Tensão de Corte do núcleo, (MPa)

ABREVIATURAS

<i>ABS</i>	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
<i>AHSS</i>	Advanced High Strength steel
<i>ATC</i>	Advanced Thermoplastic Composites
<i>BEV</i>	Battery Electric Vehicle
<i>BH</i>	Bake Hardenable
<i>BH</i>	Bake Hardenable
<i>BMC</i>	Bulk Molding Compound
<i>CAE</i>	Computer Aided Engineering
<i>CAFE</i>	Corporate Average Fuel Economy
<i>Calc</i>	Ensaio de calcinação
<i>CD</i>	Charge Depleting
<i>CFRP</i>	Carbon-Fibre Reinforced Plastic
<i>CFRT</i>	Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>COHb</i>	Carboxi-hemoglobina
<i>Comp</i>	Ensaio de compressão
<i>CP</i>	Complex Phase
<i>CS</i>	Charge Sustaining
<i>CV</i>	Conventional Vehicle
<i>DBar</i>	Ensaio de dureza Barcol
<i>DMC</i>	Dough Molding Compound
<i>DP</i>	Dual Phase
<i>EDV</i>	Electric-Drive Vehicle
<i>EU</i>	União Europeia
<i>EuroNCAP</i>	European New Car Assessment Programme
<i>FB</i>	Ferrite Bainite
<i>FCV</i>	Fuel Cell Vehicle
<i>FEM</i>	Finite Element Method
<i>FMVSS</i>	Federal Motor Vehicle Safety Standard
<i>FV</i>	Fibra de vidro
<i>Fx3P</i>	Ensaio de Flexão em 3 pontos
<i>Fx4P</i>	Ensaio de Flexão em 4 pontos
<i>GEE</i>	Gases com efeito de estufa
<i>GFRP</i>	Glass-Fibre Reinforced Plastic
<i>GMT</i>	Glass Mat Thermoplastics
<i>HC</i>	Hidrocarbonetos
<i>HEV</i>	Hybrid Electric Vehicle
<i>HSLA</i>	High Strength Low Alloy

<i>HT</i>	Heat Treatable
<i>ICE</i>	Internal Combustion Engine
<i>IF</i>	Interstitial Free
<i>ITS</i>	Intelligent Transport Systems
<i>IWN</i>	Inland Water Navegation
<i>LFRT</i>	Long Fibre Reinforced Thermoplastic
<i>LIP</i>	Light Induced Plasticity
<i>MAG</i>	Metal Ative Gas
<i>MIG</i>	Metal Inert Gas
<i>Mild</i>	Mild steel
<i>MIT</i>	Massachusetts Institute of Technology
<i>MnB</i>	Boron
<i>MS</i>	Martensitic
<i>MSLA</i>	Medium Strength Low Alloy
<i>NCAP</i>	New Car Assesment Vehicle
<i>NMT</i>	Natutal Mat Tetmoplastc
<i>NO₂</i>	Dióxido de azoto
<i>NO_x</i>	Óxidos de azoto
<i>PA</i>	Pliamida (Nylon)
<i>PAN</i>	Poliacrilonitrilo
<i>PE</i>	Polietileno
<i>PHEV</i>	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
<i>PIB</i>	Produto interno bruto
<i>PP</i>	Polipropileno
<i>PU</i>	Poliuretano
<i>PUMA</i>	Personal Urban Mobility & Accessibility
<i>PVC</i>	Policloreto de Vinilo
<i>PVEV</i>	PhotoVoltaic Electric Vehicle
<i>PX</i>	Identificação do número da Placa <i>Sandwich</i> produzida
<i>PY</i>	Identificação do provete extraído da placa PX
<i>RRIM</i>	Reinforced Reation Injection Moulding
<i>RTM</i>	Resin Tranfer Moulding
<i>SF</i>	Stretch Flange
<i>SFRT</i>	Short Fibre Reinforced Thermoplastic
<i>SMC</i>	Sheet Molding Cotnpound
<i>SRIM</i>	Strutural Reation Injection Moulding
<i>SUV</i>	Sport Utility Vehicle
<i>TECABS</i>	Technology for Carbon fibre reinforced modular Automotive Body Structures
<i>TEP</i>	Tonelada equivalente de petróleo
<i>TF</i>	Teor de fibras
<i>TMC</i>	Thick Molding Compound
<i>TRIP</i>	Transformed Induced Plasticity

<i>TTW</i>	Tank-To-Wheel
<i>ULCC</i>	Ultra Low Cost Car
<i>ULSAB</i>	Ultra Light Steel Auto Body
<i>ULSAB-AVC</i>	Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts
<i>ULSAC</i>	Ultra Light Steel Auto Closures
<i>ULSAS</i>	Projeto Ultra Light Steel Auto Suspension
<i>V2V</i>	Vehicle-to-Vehicle communication
<i>XPS</i>	Poliestireno Extrudido

CAPÍTULO I

1. Introdução

Este trabalho de doutoramento visa fundamentalmente estudar a aplicação de materiais leves no fabrico de estruturas que possam ser utilizadas em veículos, principalmente em veículos citadinos. O trabalho divide-se em duas partes principais.

A primeira, consiste numa pesquisa bibliográfica com o objetivo de, por um lado, identificar o estado do conhecimento sobre a mobilidade, o seu impacto nos transportes, no sector energético e no ambiente, bem como dos desafios para o futuro. Por outro lado, pretende-se conhecer a evolução e as tendências do mercado automóvel, e conhecer o que a indústria automóvel tem vindo a desenvolver, no domínio dos materiais e das tecnologias, para responder aos atuais desafios da mobilidade.

Relativamente à mobilidade, procurou-se fazer esta pesquisa partindo de um panorama geral dos transportes até à identificação das necessidades de mobilidade dos cidadãos europeus. Na perspetiva dos materiais e das tecnologias, procurou-se tirar a grande fotografia relativamente ao que a indústria tem vindo a desenvolver nos últimos anos, procurando identificar novas oportunidades para responder aos desafios que se adivinham no futuro, estabelecendo as principais linhas de orientação para a segunda fase do trabalho.

A segunda parte do trabalho, consiste fundamentalmente no estudo de estruturas *sandwich* que possam ser consideradas no fabrico de veículos citadinos compactos, leves, ajustados à mobilidade urbana no futuro e de baixo custo. Para isso, desenvolveu-se uma estrutura em materiais compósitos, do tipo *sandwich*, com o objetivo de avaliar a sua compatibilidade com este tipo de veículos.

Os requisitos para essa estrutura foram determinados a partir do estudo da estrutura de um veículo de referência já desenvolvido.

Primeiro, foram fabricadas e caracterizadas as principais propriedades mecânicas de estruturas *sandwich* com núcleos de ninho de abelha de polipropileno (PP), espumas de policloreto de vinilo (PVC) e poliuretano (PU) e poliestireno expandido (XPS). Uma vez que se pretende obter uma estrutura de baixo custo, optou-se por utilizar fibra de vidro como matéria-prima para o fabrico dos compósitos, por ser um material com uma boa relação desempenho/custo, e por ser de fácil manuseamento.

Depois de fabricadas, as estruturas em compósito foram submetidas a ensaios para determinação das suas propriedades mecânicas. A partir desses resultados procedeu-se à seleção de um dos compósitos a

utilizar no desenvolvimento da estrutura, que foi inicialmente desenhada em CAD 3D e estudada estruturalmente, através de simulação numérica.

Com base nos resultados desse estudo estrutural, procedeu-se ao seu fabrico e a ensaios para avaliação das suas propriedades mecânicas. No final foram apresentados e discutidos os resultados que permitiram tirar as conclusões de todo o estudo efetuado.

1.1. Objetivos do Trabalho

Com o estudo e a pesquisa inicial procura-se identificar os principais problemas associados à mobilidade, as principais características e necessidades de utilização dos transportes por parte dos cidadãos, procurando oportunidades para novos desenvolvimentos que possam contribuir no futuro para a sua melhoria e sustentabilidade. Por outro lado, procura-se identificar o estado do conhecimento no que respeita aos materiais e tecnologias de fabrico de estruturas automóveis.

Para além da pesquisa, pretende-se desenvolver uma estrutura em compósito, que seja leve e compatível com um veículo automóvel citadino compacto, ajustado aos novos desafios da mobilidade urbana, cujo processo permita o fabrico de pequenas séries com um custo controlado.

Com este estudo procura-se aumentar o conhecimento sobre a utilização de materiais leves e das respetivas tecnologias de processamento no fabrico de estruturas de veículos compactos leves, que possam conduzir ao desenvolvimento de novas soluções para este tipo de veículos, com meios e com custos controlados, que sejam industrialmente viáveis.

CAPÍTULO II

2. Estado do Conhecimento

2.1. Dados Gerais Sobre a Evolução da Demografia

O progresso e o desenvolvimento determinam todo o processo de ordenamento e organização espacial das grandes áreas metropolitanas, sobretudo dos centros urbanos. A complexidade deste tema atinge os mais diversos sectores como: a economia, a saúde pública, o ambiente, a segurança e aspetos de carácter social.

De acordo com [1], a centralização das principais atividades económicas nos centros urbanos teve uma consequência direta no desenvolvimento das grandes cidades nas últimas décadas. Isso fez com que a área geográfica das cidades se fosse construindo em torno destas, ou seja, com a deslocação dos centros habitacionais para as zonas periféricas, resultado do elevado custo de aquisição e do espaço residencial limitado no centro urbano. Este facto levou ao aumento dos fluxos de movimentos pendulares quotidianos para os centros urbanos, quer pelo crescente aumento do parque automóvel, pela mudança nos transportes públicos, pela insuficiência das vias rodoviárias, quer pela mudança de hábitos e motivações, bem como pela reorganização dos espaços nas cidades, pelo mercado de trabalho, entre outros fatores. Um dos aspetos que não pode ser ignorado é o facto de que o sector dos transportes e a indústria automóvel têm uma influência importante na forma como as sociedades de hoje se desenvolvem, tendo o automóvel, no contexto atual da mobilidade, um papel determinante. Inicialmente, o automóvel era visto como um bem de luxo, hoje está banalizado e acessível às várias classes sociais. Este facto é determinante na mudança de atitude, sobretudo porque se têm desenvolvido comportamentos que não dispensam o seu uso no dia-a-dia, por conferir um grau de autonomia e liberdade como não acontecia no passado. Tem havido uma mudança cultural, em que os conceitos de conforto, liberdade, autonomia, rapidez, comodidade e até mesmo de estatuto se enraizaram de tal forma, que a posse de um veículo constitui um imperativo categórico.

O efeito de escala da utilização do transporte individual tem vindo a provocar um efeito contrário, pelo que a mobilidade dos passageiros, principalmente nos centros urbanos, já não goza plenamente dos conceitos referidos no parágrafo anterior, uma vez que muitas cidades estão no limite da capacidade de ocupação e circulação de veículos que se verifica nos dias de hoje. Para além deste facto, tem havido um aumento da pressão sobre o meio ambiente, que não deve ser encarado no futuro como tem sido até aqui.

Segundo [2], a população urbana deverá chegar aos 390,8 milhões de cidadãos nos 27 países da União

Europeia (UE-27) em 2030, ou seja 79,8% da população total da Europa, nos 27 Estados-Membros, como resultado da tendência de migração das populações das zonas rurais para as cidades (Tabela 2.1). O desenvolvimento demográfico tem uma influência direta na mobilidade.

Tabela 2.1 Dados estatísticos sobre a demografia nas áreas urbanas e rurais da União Europeia [2].

Ano	2005			2030		
	População Urbana (Milhares)	População Rural (Milhares)	População Total (Milhares)	População Urbana (Milhares)	População Rural (Milhares)	População Total (Milhares)
EU - 25	341.875	117.510	459.385	373.741	90.485	464.226
% do Total	74,4%	25,6%	100,0%	80,5%	19,5%	100,0%
EU - 27	358.933	129.889	488.822	390.775	98.978	489.754
% do Total	73,4%	26,6%	100,0%	79,8%	20,2%	100,0%

De acordo com as previsões o número total da população na UE 27 em 2030 será semelhante ao total da população em 2005, acrescido de uma taxa de crescimento média anual de cerca de 0,01%, enquanto que a população urbana vai crescer em média cerca de 0,34% por ano, no mesmo período.

2.2. Panorama Global da Mobilidade na Europa

A mobilidade tem vindo a evoluir significativamente nos últimos anos, fruto das necessidades específicas que vão surgindo com a evolução social. No princípio do século XX surgiu a era do automóvel, que tem revolucionado os padrões de desenvolvimento social, influenciando o aumento da dispersão urbana, bem como a degradação da sua sustentabilidade. Esta tendência é um facto incontestável nos dias de hoje e por isso deve ser contrariada, através da combinação de soluções tecnológicas, que permitam aumentar a eficiência dos veículos e das infraestruturas, com políticas de acessibilidade mais adequadas, redes de transportes mais eficientes e iniciativas individuais, com vista à escolha e à utilização mais racional dos veículos.

De acordo com [3], o rápido desenvolvimento urbano a nível mundial traduz-se numa movimentação crescente de passageiros e de mercadorias nas áreas urbanas. Estes movimentos tendem a ser cada vez mais longos, em termos de distâncias percorridas mas a velocidades superiores, o que permite manter o tempo médio de duração de viagem nos últimos cem anos em 1,2 horas por dia. Segundo [4], em 2015 cerca de 40% da população mundial viverá em cidades com mais de um milhão de habitantes. A velocidade de circulação nestas cidades será reduzida e as viagens durarão na totalidade três horas por dia.

2.2.1. Caracterização da Mobilidade na Europa

Para a caracterização da mobilidade apresentam-se dados que, apesar de não serem os mais atuais, permitem caracterizar as necessidades das pessoas relativamente às deslocações diárias, nomeadamente o número médio de viagens, a distância média percorrida e o tempo médio despendido por viagem. Na Tabela 2.2 apresentam-se indicadores médios, que apesar de corresponderem a um curto período de tempo, caracterizam as viagens das pessoas em alguns países, entre 1999 e 2001.

Tabela 2.2 Características da mobilidade de passageiros nos países indicados entre 1999 e 2001 [adaptado de 5].

País	N.º médio de viagens/pessoa/dia	Distância média por viagem (km)/pessoa/dia	Duração média por viagem (min.)/pessoa/dia
Bélgica	3,0	-	-
Dinamarca	3,0	37,3	-
Alemanha	3,3	36,9	80,0
Estónia	-	37,3	-
Espanha	1,8	-	44,4
França	2,9	35,3	58,2
Holanda	3,1	31,9	59,9
Áustria	3,0	28,1	68,8
Finlândia	2,9	41,8	70,7
Suécia	2,7	44,1	62,6
Reino Unido	2,9	31,8	63,3
Suíça	3,6	37,1	84,5
Noruega	3,3	37,9	68,2

- Dados indisponíveis

Segundo [5], estes são os três principais indicadores para medir a mobilidade dos passageiros. Para a maioria dos países com dados disponíveis, os resultados são homogéneos, sendo que em média cada passageiro viaja 3 vezes por dia, percorrendo uma distância entre 30 e 40 km, durante cerca de, aproximadamente, uma hora. As viagens são efetuadas com finalidades diferentes, como se pode observar através dos gráficos da Figura 2.1.

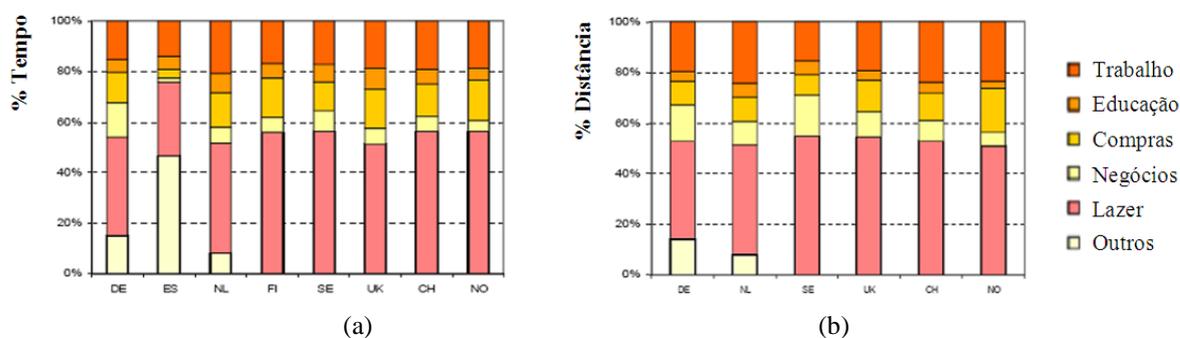


Figura 2.1 Dados estatísticos sobre a duração (a) e a distância (b), características das viagens em diferentes países europeus [adaptado de 5].

O gráfico (a) da Figura 2.1 mostra que as pessoas viajam mais para fins de lazer do que por qualquer outra razão, sendo que na maioria dos países com dados disponíveis, as viagens de lazer representam mais de 40% do tempo gasto nas viagens. Seguem-se as viagens para o trabalho e as viagens destinadas a atividades de compras. O gráfico (b) da Figura 2.1 mostra que as pessoas viajam longas distâncias para fins de lazer, enquanto os trajetos mais curtos são feitos para o trabalho, negócios, compras e/ou para fins de educação. Uma vez mais, as viagens de lazer representam mais de 40% da distância percorrida, seguidas pelas viagens para o trabalho.

2.2.2. Caracterização Modal dos Transportes

Neste subcapítulo apresentam-se alguns dados que, numa perspetiva geral, mostram a evolução do transporte de passageiros e de mercadorias, em comparação com o Produto Interno Bruto (PIB), nos 27 países da União Europeia, entre 1995 e 2006, tal como se pode observar através do gráfico da Figura 2.2. Esta comparação tem como referência os preços do ano de 1995, e apesar de não incluir dados mais recentes, permite perceber a evolução dos transportes e a sua relação com o crescimento do PIB.

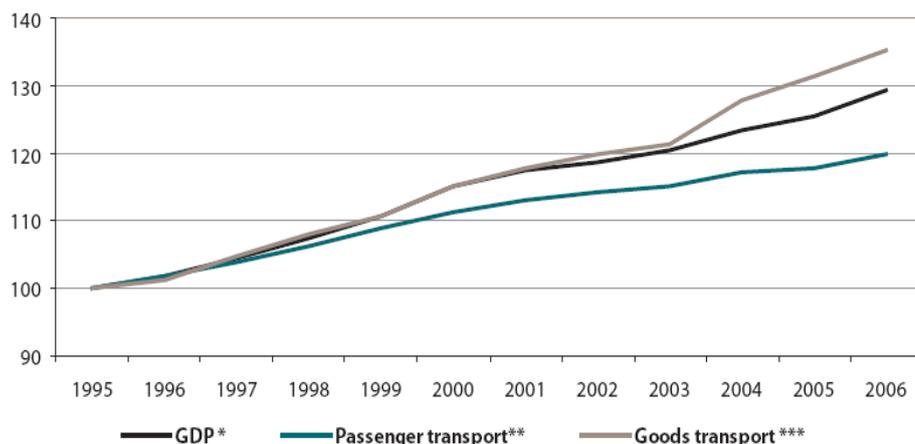


Figura 2.2 Comparação da evolução do transporte de passageiros e de mercadorias com a evolução do Produto Interno Bruto (PIB) nos 27 países da União Europeia, entre 1995 e 2006 [6].

A curva referente à evolução do transporte de passageiros abrange os veículos de passageiros, motocicletas, autocarros urbanos e interurbanos, elétricos e metros, comboios, transporte marítimo e aéreo entre países da União Europeia. A curva referente à evolução do transporte de mercadorias, abrange o transporte rodoviário, ferroviário, marítimo, aéreo e através de oleodutos entre países da União Europeia.

Pela análise do gráfico constata-se que o Produto Interno Bruto (PIB), tendo como referência o ano de 1995, cresceu anualmente a uma média de 2,4% no período entre 1995 e 2006, enquanto que o transporte de mercadorias, em tonelada por quilómetro, cresceu 2,8% ao ano e o transporte de

passageiros, em passageiros por quilómetro, cresceu a uma taxa média anual de 1,7%.

Segundo [6], esta tendência deve-se às mudanças na estrutura e localização das indústrias transformadoras, aos métodos de produção, aos canais de distribuição, cada vez mais influenciados pela procura do tipo *just-in-time*, às crescentes exigências de mobilidade de pessoal no sector de serviços e ao aumento do uso do automóvel particular.

Através dos gráficos da Figura 2.3 e da Figura 2.4 pode fazer-se uma observação mais detalhada sobre a evolução do transporte de passageiros nos diferentes modos de transporte, considerando o mesmo período (entre 1995 e 2006), a mesma área geográfica (EU-27), e tendo como referência o ano de 1995 como referência. Os dados referentes ao transporte aéreo e marítimo correspondem a uma estimativa provisória.

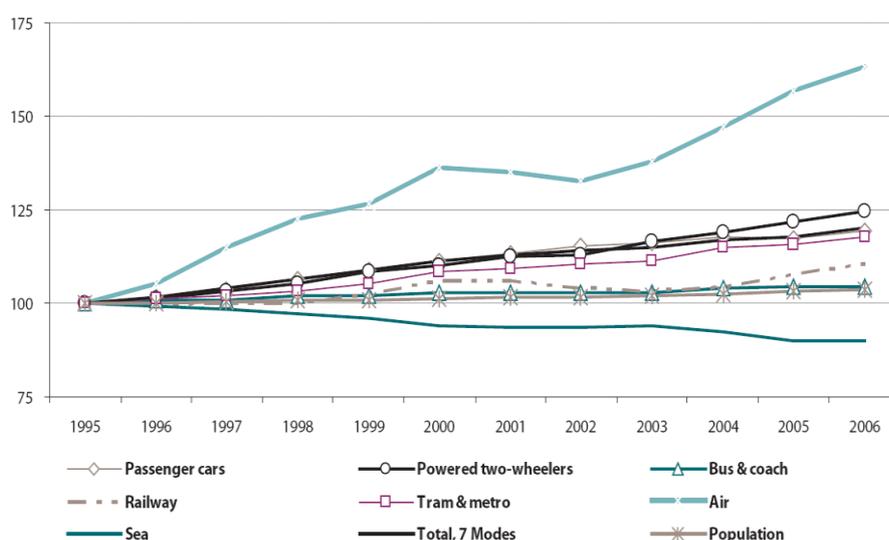


Figura 2.3 Evolução do transporte de passageiros por tipo de transporte nos 27 países da União Europeia, medidos em passageiros por quilómetro, entre 1995 e 2006 [6].

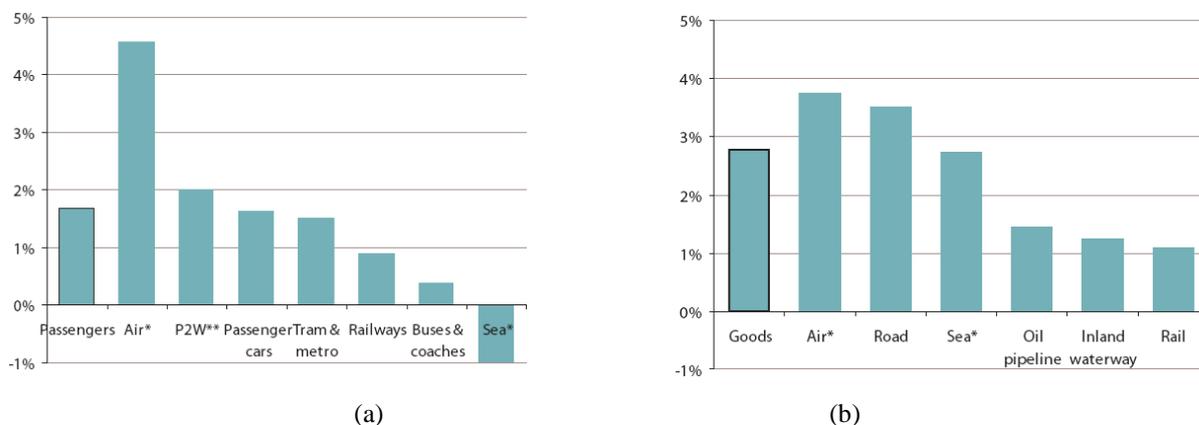


Figura 2.4 Variação do crescimento médio anual do transporte de passageiros (a) e de mercadorias (b) por tipo de transporte nos 27 países da União Europeia, entre 1995 e 2006 [6]

Em termos globais a mobilidade dos passageiros, na região dos 27 países da União Europeia, teve um crescimento médio anual de 1,6%, aproximadamente, como se pode constatar pela curva correspondente ao total dos sete modos de transporte. O transporte aéreo de passageiros apresenta a maior taxa de crescimento médio anual, 4,6%, que segundo o estudo foi influenciado pela crescente procura de voos de baixo custo, no contexto das transportadoras aéreas. O crescimento médio anual do transporte rodoviário foi de cerca de 2%, para os motociclos de duas rodas, 1,6% para os automóveis de passageiros, enquanto que o transporte em autocarros se manteve praticamente ao mesmo nível de 1995. O transporte através de elétrico e de metro cresceu em média 1,5% ao ano, aproximadamente, enquanto que o transporte ferroviário aumentou cerca de 1%. Finalmente, o transporte marítimo apresentou neste período uma redução média anual de cerca de 1%.

Na Figura 2.5 pode-se observar as distribuições modais no transporte em 2006, quer para o transporte de passageiros, quer para o transporte de mercadorias.

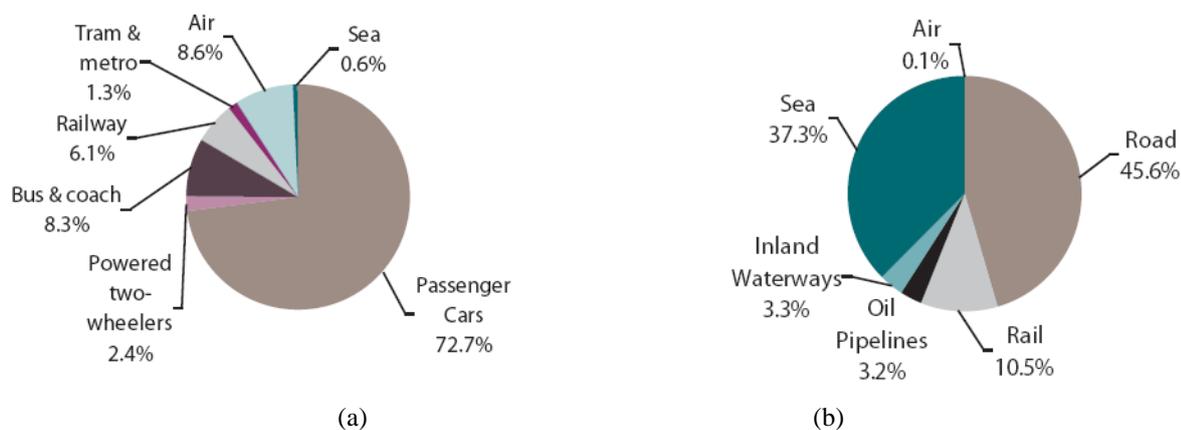


Figura 2.5 Distribuição modal do transporte de passageiros (a) [%/passageiro x quilómetro] e de mercadorias (b) [%/tonelada x quilómetro], nos 27 países da EU, em 2006 [6].

Fazendo uma interpretação destes dados no enquadramento do tema deste trabalho, importa destacar que o transporte de passageiros tem sido efetuado maioritariamente em automóveis de passageiros, com uma taxa de cerca de 72,5% do total do transporte de passageiros. Para além do que, mais de 80% do transporte de passageiros tem sido efetuado em transportes rodoviários, em automóveis de passageiros, motociclos de duas rodas e em autocarros. No caso do transporte de mercadorias, cerca de 46% do total do transporte foi efetuado por estrada.

Um dado particularmente importante neste estudo inicial é a distância diária média percorrida por passageiro nos diferentes meios de transporte, que se pode observar através do gráfico da Figura 2.6, no qual estão compilados os valores médios registados em 2006 nos 27 países da União Europeia.

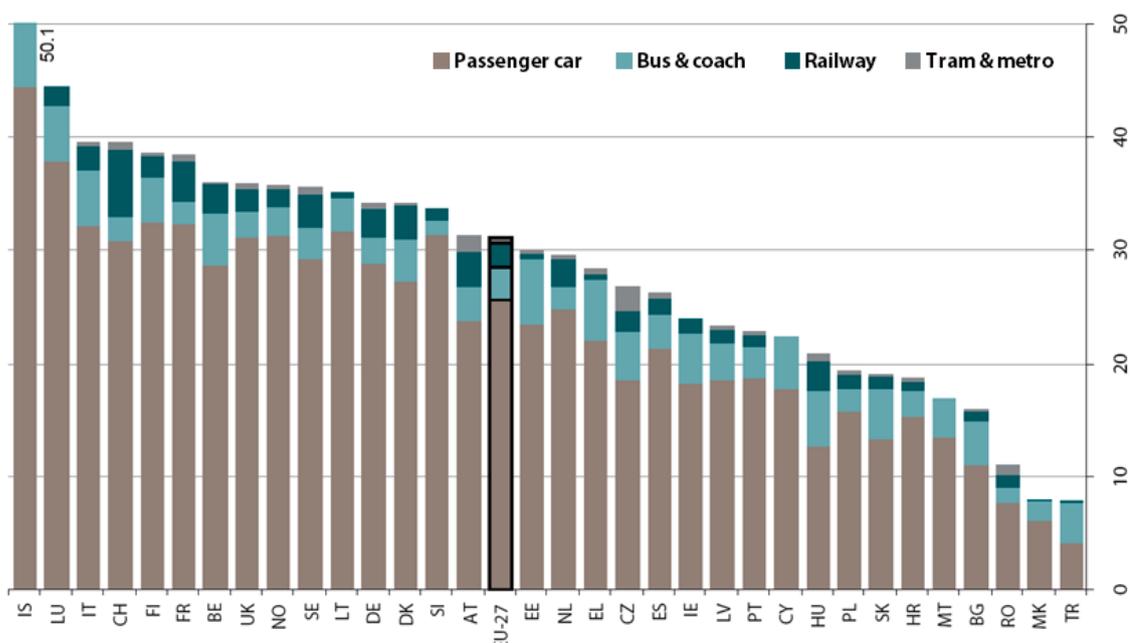


Figura 2.6 Distância diária média percorrida por habitante, em diferentes meios de transportes terrestres, em países Europeus, no ano de 2006 (valores em km) [6].

De facto, estes dados mostram uma grande dispersão entre os vários países apresentados, no entanto o valor médio da distância média diária percorrida pelos passageiros nos 27 países da União Europeia, foi de cerca de 25 km, em automóveis de passageiros, cerca de 2,5 km em autocarros e camionetas, aproximadamente 2,5 km, em comboios, e menos de 1 km em metropolitanos.

Estes dados não contemplam o transporte de passageiros em motocicletas nem em bicicletas. Em Portugal os valores foram de aproximadamente 18 km, em automóveis de passageiros, aproximadamente 2,5 km em autocarros e camionetas, cerca de 1 km em comboios, e menos de 1 km em metropolitanos.

2.2.2.1. Volume de Passageiros por Modo de Transporte

Segundo [5], em termos médios, e considerando alguns países europeus com dados disponíveis sobre o volume de passageiros nos diferentes modos de transporte. O gráfico da Figura 2.7, elaborado a partir dos valores médios do volume de passageiros nos diferentes modos de transporte referidos no estudo, permite observar que o transporte de passageiros é feito principalmente em automóveis ligeiros, sendo o valor médio superior a 60%, em autocarros (16%), comboio (8%) e avião (8%).

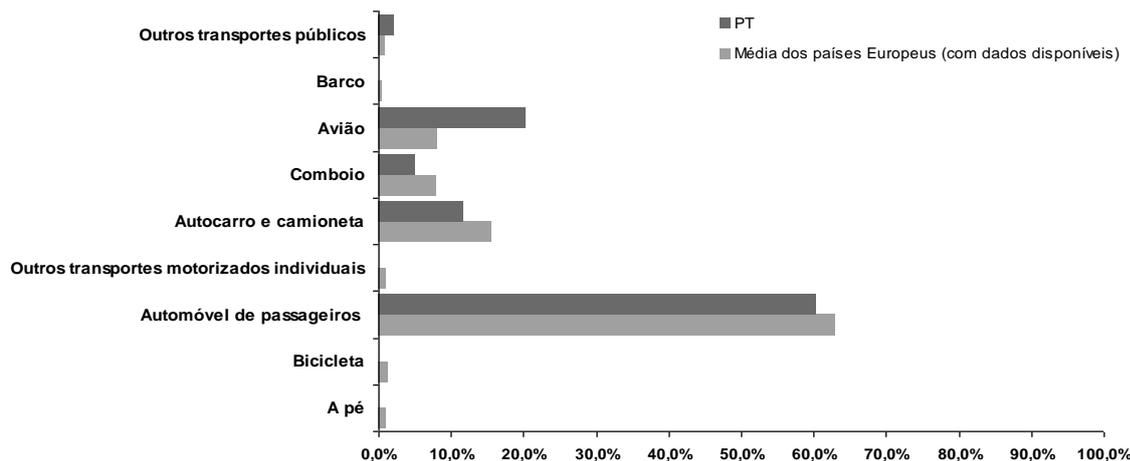


Figura 2.7 Distribuição do volume médio de passageiros x quilómetro pelos diferentes modos de transporte em países europeus e em Portugal, 2007 [5].

Em Portugal os valores apresentam a mesma tendência, exceto no caso do transporte aéreo cuja utilização é superior a 20%. Por outro lado, na Suíça e na Holanda a utilização de modos de transporte não motorizado, principalmente a bicicleta, chega quase aos 7% e 10%, respetivamente.

Segundo [7], o uso generalizado de automóveis e suas alternativas tem vindo a ser cada vez mais uma realidade, sendo que 81% dos cidadãos da UE têm um automóvel no seu agregado familiar. Relativamente ao principal modo de transporte utilizado pelos cidadãos, o estudo refere que 51% das pessoas utiliza o automóvel, 21% o transporte público, 15% das pessoas faz as suas deslocações a pé, 9% de bicicleta e 2% em motociclos.

2.2.2.2. Taxas de Ocupação Média nos Transportes

Outro dado importante que interessa destacar é a taxa de ocupação nos diferentes tipos de transporte, cuja evolução em alguns países pode ser observada através do gráfico da Figura 2.8.

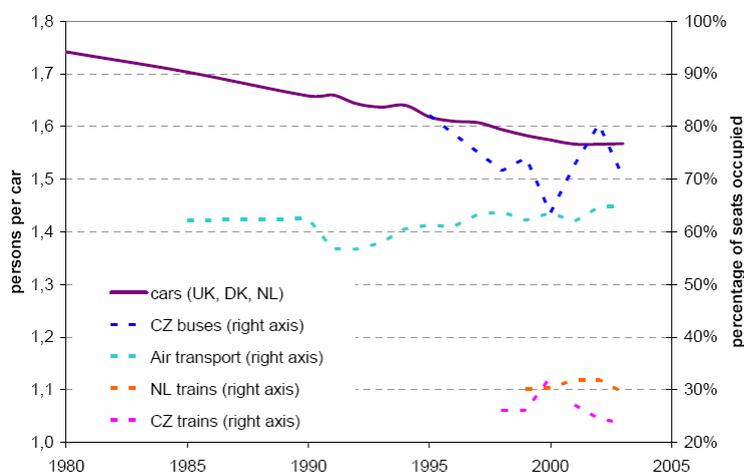


Figura 2.8 Evolução das taxas de ocupação no transporte de passageiros [8].

Apesar dos dados se referirem apenas a alguns países europeus, no entanto pode-se constatar que a taxa média de ocupação dos automóveis de passageiros é inferior a dois e tem diminuído de forma contínua nos últimos 25 anos. Esta tendência poderá ser aplicada a países como Portugal, em que o recurso ao transporte individual, nomeadamente ao automóvel tem vindo a aumentar em deslocações individuais. Este é de facto um aspeto muito importante que se considerar no contexto do estudo de soluções de melhoria da eficiência dos sistemas de transportes de passageiros.

2.3. Visão Global do Sector dos Transportes

Neste subcapítulo será analisado o crescimento global dos veículos de passageiros nos últimos anos, bem como o crescimento dos diferentes meios de transporte na Europa, mais detalhadamente.

Em 2006 existiam 466 automóveis de passageiros para 1 000 habitantes na UE-27 (Figura 2.9), o que significa que existia quase um automóvel por cada dois habitantes. O número de veículos por mil habitantes, na UE-27, em 2005, foi de 459, valor inferior aos 782 registado nos Estado Unidos da América (EUA), mas significativamente superior ao do Japão (335). Os dados para os EUA consideram não apenas veículos de passageiros, mas também as pick-up, camionetas e utilitários desportivos que são frequentemente utilizados para o transporte privado. Na UE-27, esses veículos podem ser considerados como veículos comerciais. Como apenas alguns Estados-Membros classificam *van* e *pick-up* como veículos de passageiros, isso pode tornar a comparação difícil entre os Estados-Membros.

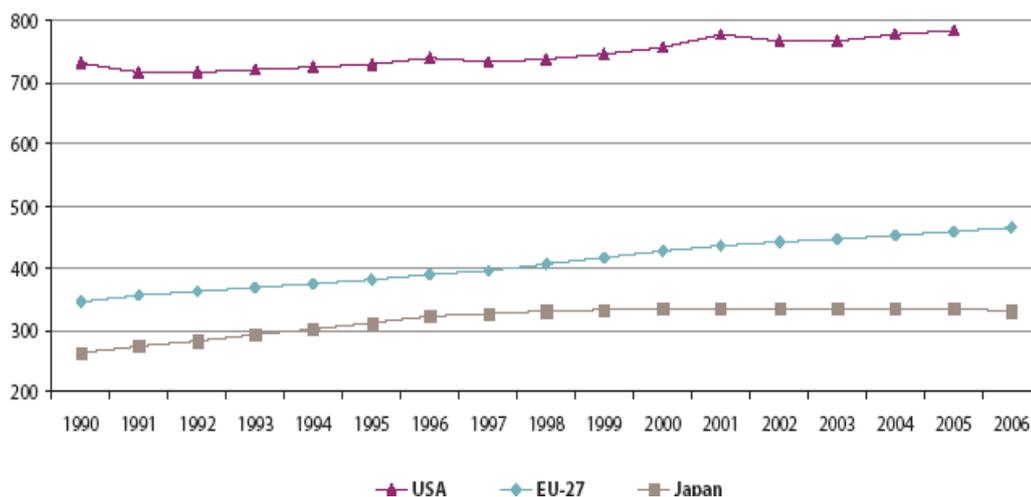


Figura 2.9 Número de veículos de passageiros por 1 000 habitantes, EU-27, USA e Japão, entre 1990 e 2006 [6].

De 1990 a 2005, o número de automóveis por 1 000 habitantes na UE-27 cresceu a uma taxa média anual de 1,9%, superior à taxa de crescimento verificada no Japão (1,6%) e nos EUA (0,4%). Salienta-se que no Japão a taxa de motorização, se manteve constante após o ano 2000.

Apesar dos esforços para promover a popularidade de outros modos de transporte, nomeadamente em áreas congestionadas, o automóvel continua a ser o meio de transporte por excelência. Permite que as pessoas viagem quando e como querem, com uma crescente independência, o que tem vindo a resultar num aumento do número de automóveis de passageiros.

O número de automóveis na UE-27 cresceu de 1990 a 2006, em uma média anual taxa de 2,4%. O número dos outros tipos de veículos também cresceu, nomeadamente os veículos de transporte de mercadorias, 3,1% ao ano, os veículos de duas rodas aumentaram, entre 1995 e 2006, 2,7%, e o número de os autocarros aumentou com uma média anual de cerca de 0,7%.

A Tabela 2.3 mostra a evolução do número de veículos de passageiros matriculados na UE-27 e na EU-15, entre 1990 e 2006. Em 2006 registaram-se cerca de 230 milhões de automóveis passageiros matriculados, tendo resultado de um crescimento médio anual de 2,4% desde 1990. Em Portugal o crescimento médio anual foi de 6,0% [6]

Tabela 2.3 Evolução do número de automóveis de passageiros na Europa, entre 1990 e 2006 (valores em milhares) [Adaptado de 6].

	1990	1995	2000	2005	2006	Taxa de crescimento médio anual
EU-27	158.210	182.232	202.567	225.632	229.931	2,4%
EU-15	143.203	162.020	180.212	195.020	198.240	2,1%

Tabela 2.4 Evolução do número de autocarros e camionetas de passageiros na Europa, entre 1990 e 2006 (valores em milhares) [Adaptado de 6]

	1990	1995	2000	2005	2006	Taxa de crescimento médio anual
EU-27	708,9	752,5	786,2	799,0	798,4	0,7%
EU-15	450,3	483,3	532,8	557,2	564,9	1,4%

O número de veículos de duas rodas registados (Tabela 2.5) inclui motos e, na sua maior parte, ciclomotores, ascenderam a pelo menos 30,9 milhões na UE-27 em 2006, o que equivale a 13,5% do número de automóveis ligeiros de passageiros no mesmo ano.

Tabela 2.5 Evolução do número motociclo de duas rodas na Europa, entre 1995 e 2006 (valores em milhares) [adaptado de 6]

	1990	1995	2000	2005	2006	Taxa de crescimento médio anual
EU-27	-	20.088	-	29.990	30.926	2,7%
EU-15	-	17.112	20.751	27.752	28.680	3,3%

Na UE-27, o número total de veículos de duas rodas cresceu a uma taxa média anual estimada de 2,7% entre 1995 e 2006. A taxa de crescimento estimada no mesmo período foi maior no caso de a UE-15, 3,3%. Com base em dados comparáveis disponíveis para 20 Estados-Membros, a maior taxa média de crescimento anual do número de veículos de duas rodas pode ser medido na Estónia (8,7%), Espanha (7,9%), Dinamarca (7,5%) e Portugal (6,1%). É interessante notar que os cinco Estados-Membros em que os números caíram foram os novos Estados-Membros: República Checa, Polónia, Chipre, Malta e Roménia.

Os italianos são claramente os que mais utilizam este meio de transporte e, em 2006, com 10 milhões de veículos de duas rodas, a Itália contribuiu com um terço (33,1%) da UE-27 da frota total, seguido pela Alemanha (19,0%), Espanha (14,2%) e França (8,1%).

O transporte rodoviário de mercadorias aumentou, o que influenciou o aumento do número de veículos de mercadorias na UE-27. Os dados do Eurostat revelam um aumento médio anual de cerca de 3% no número de veículos de mercadorias entre 1990-2006 (Tabela 2.6). Cerca de 60% deste aumento foi devido ao crescimento da frota de cerca de 2 milhões de unidades em Espanha, 1,6 milhões na Itália e cerca de 1 milhão na Polónia e no Reino Unido.

Com base nos dados disponíveis, os Estados-Membros com maior crescimento médio anual do número de veículos rodoviários de 1990-2006 foram o Luxemburgo (6,5%), Eslovénia (5,3%), Irlanda (5,1%), Roménia (4,8%) e Espanha (4,7%). A República Checa (7,6%), Letónia e Polónia (ambos 5,3%) também apresentaram altas taxas de crescimento, entre 1995 e 2006.

Em 2006 três quartos da frota de veículos de transporte rodoviário de mercadorias da UE-27, era constituída por frotas dos seguintes países: França (17%), Espanha (16%), Itália (13%), Reino Unido (11%), Alemanha (9%) e Polónia (7%).

Tabela 2.6 Evolução do número de veículos rodoviários de mercadorias na Europa, entre 1990 e 2006 (valores em milhares) [Adaptado de 6].

	1990	1995	2000	2005	2006	Taxa de crescimento médio anual
EU-27	19.859	22.812	27.395	31.439	32.249	3,1%
EU-15	17.536	19.849	23.552	26.715	27.379	2,8%

O transporte de mercadorias e o modo como ele é feito constitui informação relevante, na medida em que tem implicações diretas ao nível da ocupação das redes rodoviárias. Este ponto em particular assume uma importância de relevo, uma vez que a segurança é cada vez mais um critério no desenvolvimento dos veículos, que por sua vez tem influência directa na seleção de materiais. Na Tabela 2.7 pode ver-se a evolução do número de veículos ferroviários de transporte de mercadorias (vagões de carga).

Tabela 2.7 Evolução do número composições ferroviárias de mercadorias (vagões de carga) na Europa, entre 1990 e 2005, (valores em milhares) [adaptado de 6].

	1990	2000	2003	2005	2006	Taxa de crescimento médio anual
EU-27	1 455,4	910,6	797,3	740,5	-	- 4,4%
EU-25	825,4	-	-	422,7	-	- 4,4%

A interpretação dos dados deve ser feita tendo em atenção os dados referidos no gráfico da figura 2.3, que refletem uma taxa de crescimento do transporte ferroviário de mercadorias de cerca de 1% entre 1990 e 2006. O facto de que o número de composições ferroviárias de transporte de mercadorias ter decrescido, pode significar uma renovação das frotas mais antigas por frotas mais modernas e mais eficientes do ponto de vista da capacidade de carga. Como tal esta redução não indica uma diminuição da importância deste tipo de transporte, no entanto.

A Figura 2.10 resume os valores apresentados nas tabelas anteriores, permitindo comparar mais facilmente a taxa de crescimento média anual dos diferentes tipos de veículos na Europa, entre 1990 e 2006. No caso dos vagões de mercadorias, os dados são válidos para o período entre 1990 e 2005.

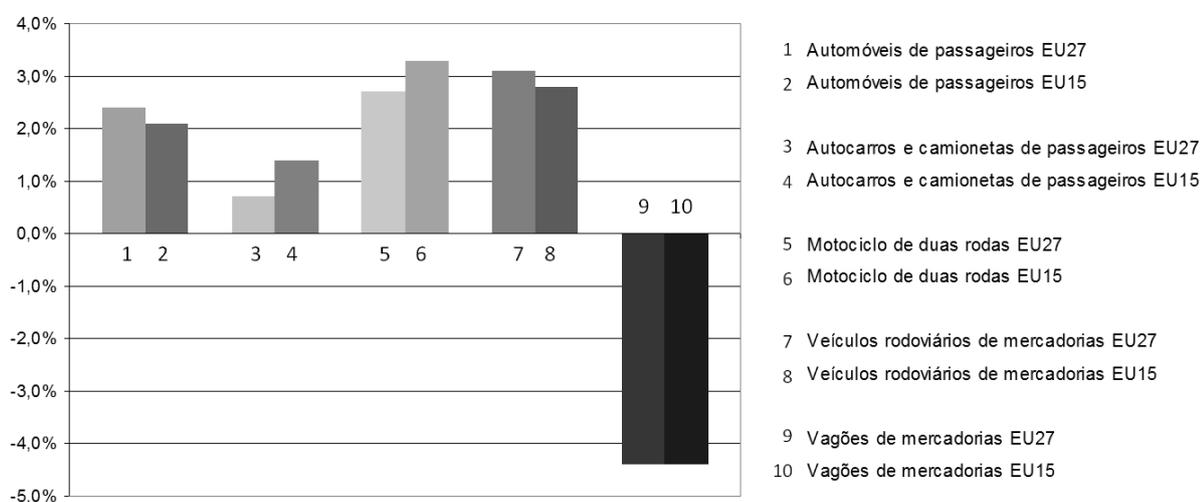


Figura 2.10 Taxa de crescimento médio anual dos diferentes tipos de transporte nos últimos anos na Europa nos últimos anos.

2.4. Evolução das Infraestruturas dos Transportes

A União Europeia tem uma das redes de transportes mais densas do mundo, com rodovias, ferrovias e vias navegáveis interiores. No caso das redes ferroviárias e rodoviárias, por exemplo, a União Europeia apresenta mais densidade por 1 000 km² do que os Estados Unidos, e não muito menos do que o Japão. Esta densidade reflete uma série de fatores, incluindo naturalmente a densidade

populacional. Nos sucessivos alargamentos da União Europeia foram acrescentadas novas infraestruturas à rede de transportes, principalmente para os países do leste da Europa.

Segundo [9], em 2005, a rede de transporte da UE-27 apresentava um valor estimado de cerca de 4,5 milhões de quilómetros, compreendendo as vias rodoviárias, ferroviárias, oleodutos e vias navegáveis interiores (Tabela 2.8). A rede rodoviária, incluindo as autoestradas, representava cerca de 93% do total das infraestruturas de transporte, a rede ferroviária cerca de 5%, sendo os restantes 2%, aproximadamente, para as vias navegáveis interiores e oleodutos.

De referir que o desenvolvimento das infraestruturas de transporte teve um crescimento global estimado, entre 1990 e 2005, de cerca de 3%. Deste desenvolvimento destaca-se o crescimento da infraestrutura rodoviária, especialmente das estradas, que aumentaram cerca de 47%. Paradoxalmente este crescimento da rede rodoviária foi acompanhado de uma diminuição da rede ferroviária, da qual cerca de 6% das linhas foram retiradas de serviço.

Tabela 2.8 Principais redes de transportes da EU-27 entre 1990 e 2005 (km) [adaptado de 9].

Infraestruturas	1990	2005	Crescimento médio anual entre 1990-2005
Estradas	4.051.756	4.164.433	3%
Autoestradas	41.885	61.565	47%
Caminhos-de-ferro	234.602	219.550	- 6%
<i>Pipelines</i>	29.672	33.479	13%
Vias Marítimas/Fluviais	39.952	40.986	3%
Total	4.397.867	4.520.013	3%

2.4.1. Projetos de Redes de Transportes na Europa

De acordo com um estudo elaborado em 2004 para a Comissão Europeia [10], a conclusão dos 30 eixos que formam a "espinha dorsal" da rede de transportes transeuropeia permitirá uma redução substancial do congestionamento rodoviário e ferroviário, o que terá um impacto significativo na redução do tempo de viagem para passageiros e mercadorias.

Na Tabela 2.9 pode ver-se a evolução prevista para as principais redes transeuropeias até 2020, de acordo com os dados de um estudo da DG Energy and Transport, publicados no relatório de 2009 pelo Eurostat [6].

Tabela 2.9 Extensão das redes de transportes transeuropeias (TEN-T), com dados de 2003, 2008 e previsões para 2020 (km) [adaptado de 6].

Redes de Transporte	2003	Abril 2008 *	2020 *
Ferroviária	83.300	95.140	116.975
Rodoviária	74.500	76.842	80.708
Marítima	14.100	15.881	17.763

* Dados estimados segundo: DG-Tren "TEN-T, Implementation of the Priority Projects, Progress Report", May 2008.

2.5. Principais Impactes Associados à Utilização de Transportes

A constante evolução das necessidades de transporte de pessoas e mercadorias é um fator importante no desenvolvimento dos sistemas de transporte. Este parece ser um facto que não merece qualquer contestação, no entanto, os sistemas de transporte nem sempre são os mais adequados face às necessidades, devido à maior dificuldade em caracterizar algumas das suas variáveis, nomeadamente as que se relacionam com o transporte individual.

A desarticulação que existe entre a oferta e a procura de sistemas de transporte tem vindo a ter um impacto que é cada vez mais severo para as sociedades, justificando uma reflexão profunda no sentido de se promover a sustentabilidade da mobilidade.

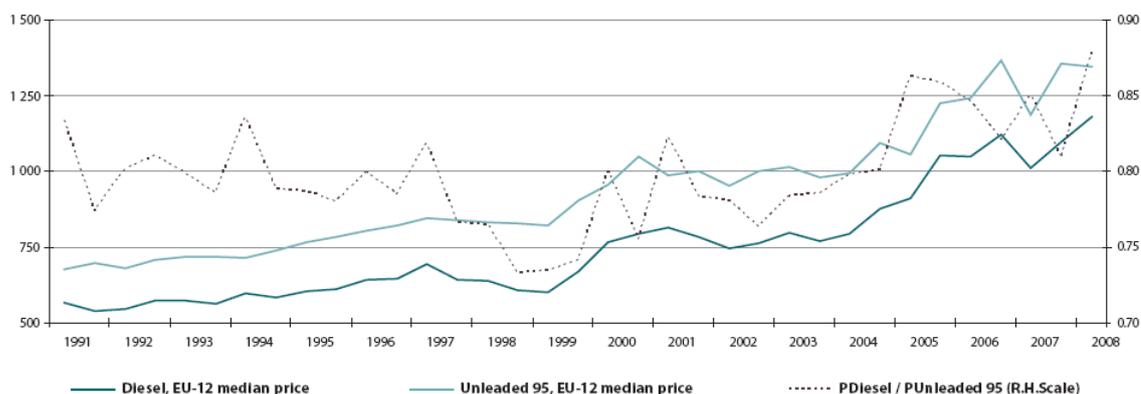
Embora não seja objetivo deste trabalho o estudo de soluções para os problemas associados à mobilidade, entende-se que é importante estabelecer uma perspetiva global sobre o tema, que permita um enquadramento mais lógico e útil para os desenvolvimentos deste trabalho.

2.5.1. Socioeconómicos

Estão associados à mobilidade os custos inerentes à utilização dos meios de transporte e das infraestruturas. Um dos maiores, ou senão mesmo o maior impacto resultante da mobilidade que a sociedade reconhece é de facto o impacto económico, porque é aquele que se consegue “medir” no dia-a-dia, através do preço a pagar pelos bens ou serviços. O custo dos combustíveis é uma variável económica que influencia diretamente a capacidade de compra das pessoas, influenciando também o seu comportamento na escolha e compra de determinados bens. Em Portugal, por exemplo, a procura de veículos *Diesel* tem vindo a aumentar significativamente nos últimos anos em detrimento dos veículos a gasolina, devido ao facto do preço do gasóleo ser significativamente mais baixo do que o da gasolina. Segundo [6], o preço médio de um litro de gasóleo representava, no início de 1991, 83,4% do preço médio de um litro de gasolina sem chumbo. No final de 1998 esse valor desceu para 73,3%, subindo para 87,9% no início de 2008. Por outro lado, a procura dos veículos *Diesel* aumentou devido

ao facto destes serem mais eficientes, e como tal apresentarem um consumo de combustível mais baixo.

Na Figura 2.11 pode-se observar a evolução do preço médio da gasolina sem chumbo e do gasóleo (escala da esquerda) e o rácio entre o preço médio do gasóleo e da gasolina sem chumbo (escala da direita), na UE-12, entre 1991 e 2008.

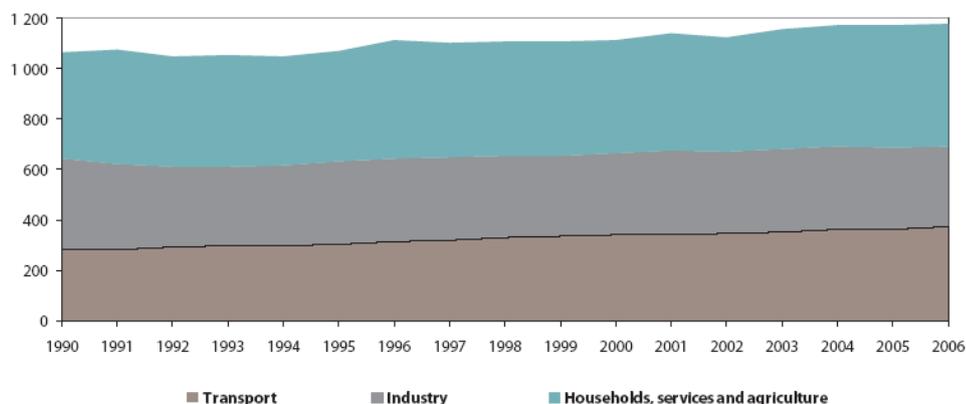


Source: Eurostat (Energy)

Figura 2.11 Evolução do preço médio da gasolina sem chumbo e do gasóleo e do rácio entre o preço médio do gasóleo e da gasolina sem chumbo, na UE-12, entre 1991 e 2008 (valores em €/1000 litros) [6].

Na UE-12 o preço médio da gasolina e do gasóleo tem vindo a subir desde 1999. Apesar do custo do gasóleo ser inferior ao da gasolina, em termos médios, não se pode concluir que o custo total associado à utilização destes veículos seja inferior ao dos veículos a gasolina.

O consumo de energia no sector dos transportes tem vindo a crescer a uma taxa média anual de 1,8% entre 1990 e 2006, enquanto o consumo de energia na indústria foi reduzido (Figura 2.12). Em 1990 o consumo de energia final no sector dos transportes foi de 26,3% do consumo de energia final total na UE-27. Este valor tem vindo a aumentar, atingido em 2006 os 370,4 milhões de TEP (tonelada equivalente de petróleo), ou seja 31,5% (Figura 2.13).



Source: Eurostat (Energy)

Figura 2.12 Consumo de energia final nos transportes, indústria, habitações, serviços e agricultura, na EU-27, entre 1990 e 2006 (valores em milhões de TEP) [6].

O sector dos transportes foi responsável por 82,9% dos 108,6 milhões de TEP de aumento do consumo final total de energia entre 1990 e 2006, ou seja cerca de 90 milhões de TEP. O crescimento das frotas de veículos de passageiros e mercadorias, e o forte aumento da prestação de serviços de transportes aéreos foram os principais responsáveis pelo aumento do consumo de energia no sector dos transportes, dos quais cerca de 75% correspondem aos transportes rodoviários, e cerca de 25% aos transportes aéreos.

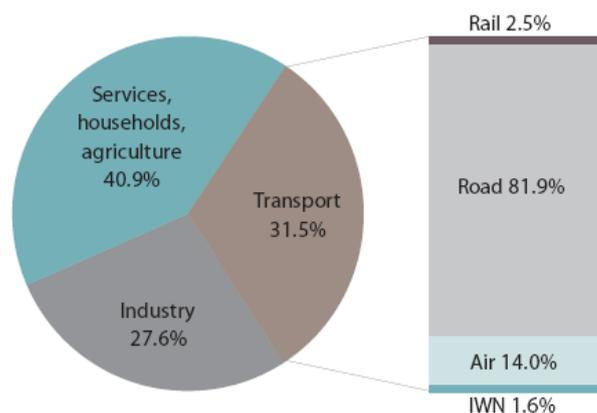


Figura 2.13 Consumo de energia final pelos principais sectores na EU-27 em 2006 (valores em % de TEP) [6].

De todos os modos de transporte, o transporte rodoviário é o que consome mais energia na UE-27, de acordo o gráfico da Figura 2.14.

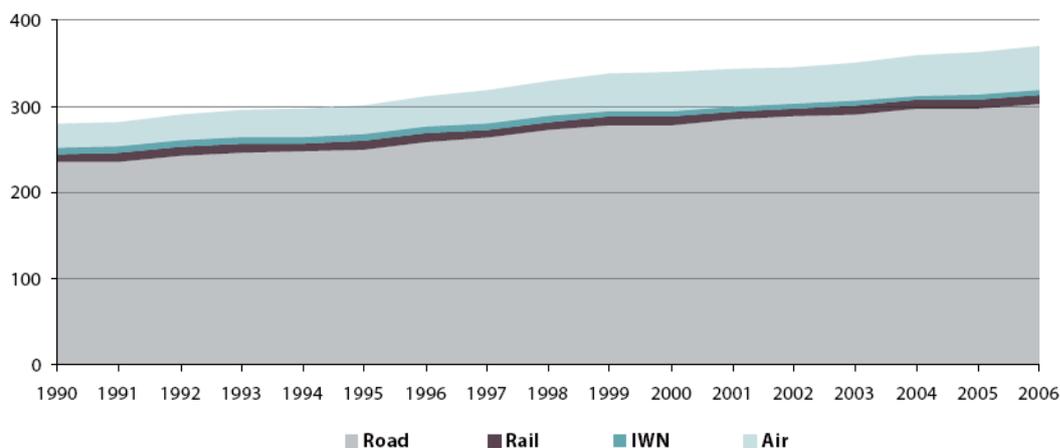


Figura 2.14 Consumo de energia final para os transportes rodoviários, ferroviários, fluviais e aéreos na EU-27, entre 1990 e 2006 (valores em milhões de TEP) [6].

De acordo com [11], a utilização de automóveis particulares foi responsável por 55,9% do consumo total de energia no transporte rodoviário em 2005, enquanto que os veículos pesados consumiram 39,4%.

O transporte ferroviário foi responsável por 2,5% do consumo de energia final consumida nos transportes em 2006, e 3,4% em 1990. O transporte fluvial era o meio de transporte que menos energia

consumida em 2006 (5,9 milhões de TEP), cerca de 1,6% do consumo total de energia no sector dos transportes.

O consumo de energia final dos transportes aéreos aumentou durante o período entre 1990 e 2006, exceto entre 2000 e 2002. O consumo subiu de 29,1 milhões de TEP em 1990 para 51,9 milhões de TEP em 2006, o que significa que este modo de transporte registou a maior taxa de crescimento médio anual entre os quatro modos de transporte referidos, de 3,7%. A quota do transporte aéreo no consumo final de energia passou de 10,4% em 1990 para 14,0% em 2006.

Vários são os tipos de combustíveis que são consumidos no sector dos transportes. As quantidades do consumo final total de energia em 2006, expressa em mil TEP, são apresentados na Tabela 2.10, bem como a quota deste sector no consumo total de energia final por cada tipo de combustível e por modo de transporte. Em 2006, os produtos petrolíferos tiveram um consumo de 96,7% do total do consumo de energia nos transportes (Figura 2.15), sendo altamente procurados pelo transporte rodoviário e aéreo, devido à energia que produzem, bem como à maior facilidade de serem transportados para os pontos de abastecimento.

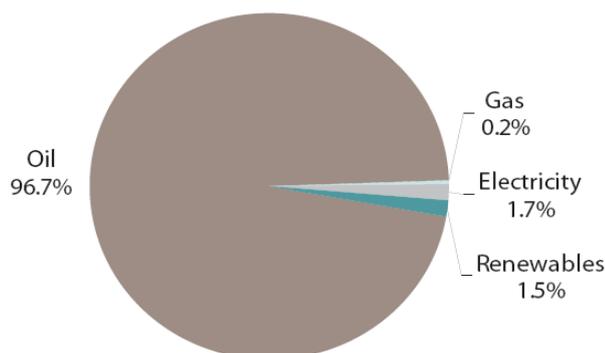


Figura 2.15 Consumo de energia no sector dos transportes por tipo de combustível, em 2006 na EU-27 (% de TEP) [6].

O sector transportes foi responsável por 72% do total do consumo final de produtos derivados de petróleo, na UE-27 em 2006, em comparação com os 62% em 1990. De 1990 a 2006, 93% do aumento da energia final consumida no sector dos transportes foi devido ao aumento do consumo de produtos derivados de petróleo. O consumo final de derivados de petróleo pelo transporte rodoviário cresceu a anualmente 1,5%, entre 1990 e 2006, enquanto que o consumo no transporte aéreo cresceu em média 3,7% ao ano. No transporte rodoviário o consumo final de produtos derivados do petróleo cresceu de 53% em 1990 para 60% em 2006, enquanto que o consumo no transporte aéreo cresceu de 7% par 10%, respetivamente.

Tabela 2.10 Consumo de energia final por tipo combustível e modo de transporte, EU-27, 2006 (milhares de TEP e %) [6].

Sector de Consumo	Total	Petróleo	Gas	Eletricidade	Renováveis e outras	Combustíveis sólidos	Térmica
Consumo Energético Final	1 176 120	496 681	278 701	241 912	62 054	55 479	41 293
Indústria (%)	27	10	37	41	29	77	28
Famílias/Serviços (%)	41	18	62	57	62	27	72
Transportes (%)	31	72	0,2	3	9	0	
dos quais: Rodoviário (%)	82	83	100		100		
Ferroviário (%)	2	1		100			
Marítimo/Fluvial (IWN) (%)	2	2					
Aéreo (%)	14	14					

2.5.2. Ambientais

A Figura 2.16 mostra o aumento do número global de veículos nos últimos 50 anos, bem como as previsões até 2025.

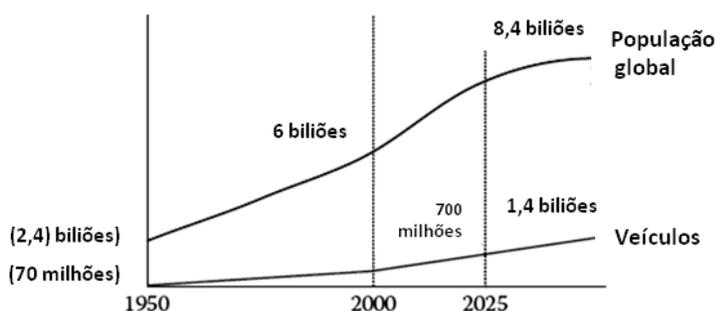


Figura 2.16 Número de veículos e população global [adaptado de 12].

Em 1950, existiam cerca de 70 milhões de veículos na estrada, para uma população mundial de 2,4 bilhões de pessoas. Em 2000, o número de veículos aumentou para 700 milhões, enquanto que a população mundial aumentou para 6 bilhões. Ou seja, um aumento de dez vezes no caso dos veículos para um aumento de duas vezes e meias para a população, entre 1950 e 2000. Segundo as previsões indicadas no gráfico da figura anterior, estima-se que o número de veículos em 2025 atinja os 1,4 bilhões, ou seja o dobro do que em 2000. Este significativo aumento no número de veículos, tem implicado um aumento contínuo do consumo de petróleo, e consequentemente da emissão de poluentes [12].

Em 2006, os transportes foram responsáveis pela segunda maior taxa de emissões totais de Gases com Efeito de Estufa (GEE), a seguir à indústria do sector das energias, de acordo com o gráfico da Figura 2.17 (a). Tendo sido o único sector onde não se verificou redução das emissões entre 1990 e 2006, de acordo com a taxa média de crescimento das emissões por sector, apresentadas no gráfico da Figura

2.17 (b).

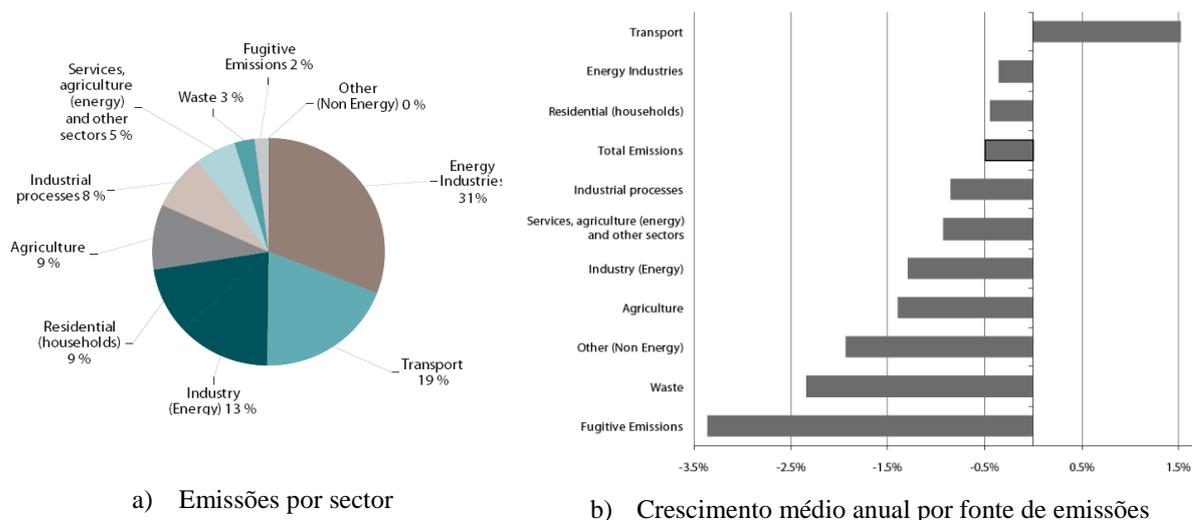


Figura 2.17 Taxas de Emissões de GEE por diferentes sectores na EU-27, em 2006 [6].

A Figura 2.18 mostra a importante contribuição dos transportes rodoviários no que toca às emissões de gases com efeito de estufa no sector dos transportes, bem como o seu crescimento entre 1990 e 2002, apesar de ter estabilizado nos cerca de 93% na segunda metade da década de 1990. O que pode ser atribuído ao crescimento progressivo do número de veículos conjugado com a diminuição do nível de emissões de gases poluentes, quer dos veículos mais recentes, quer os de outros modos de transporte. A partir de 2002, a sua contribuição tem vindo a diminuir gradualmente devido ao aumento da quota do transporte aéreo [6].

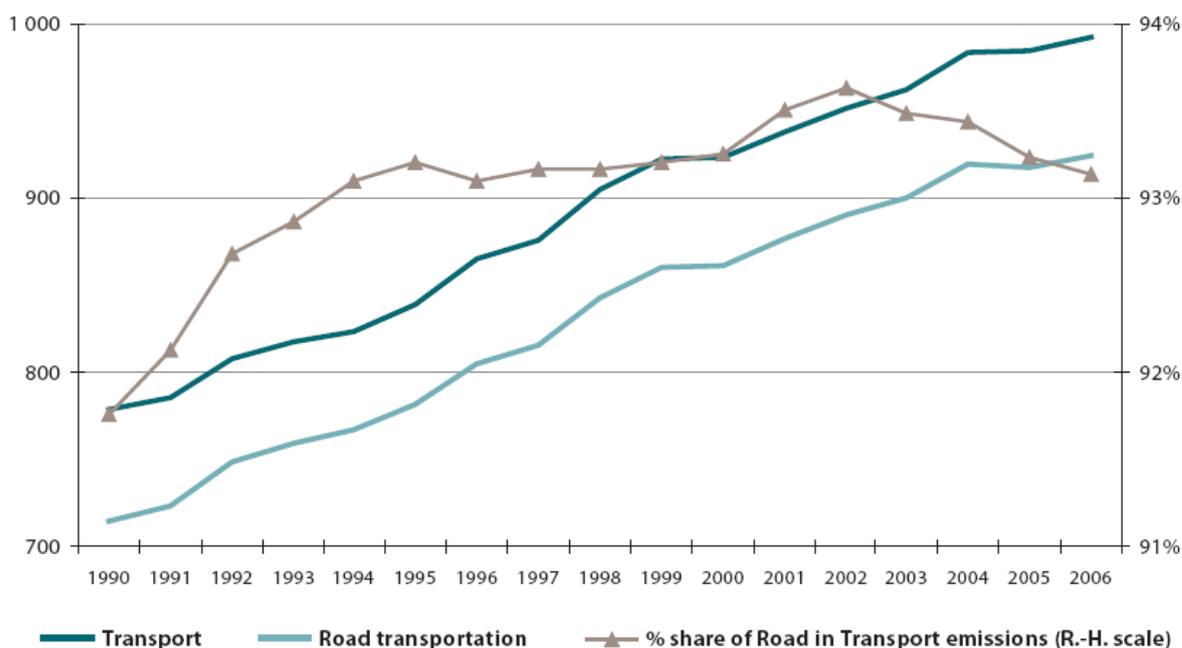


Figura 2.18: Emissões totais de Gases com efeito de estufa provenientes do sector dos transportes e dos transportes rodoviários, na EU-27, entre 1990 e 2006 (valores milhões Ton. CO₂ Equivalente e %) [6].

O transporte rodoviário foi responsável por 93,1% das emissões de gases com efeito estufa do sector dos transportes em 2006 (Figura 2.19) e 18,0% das emissões totais de emissões de gases de efeito estufa na UE-27 em 2006 contra 12,8% em 1990 [6].

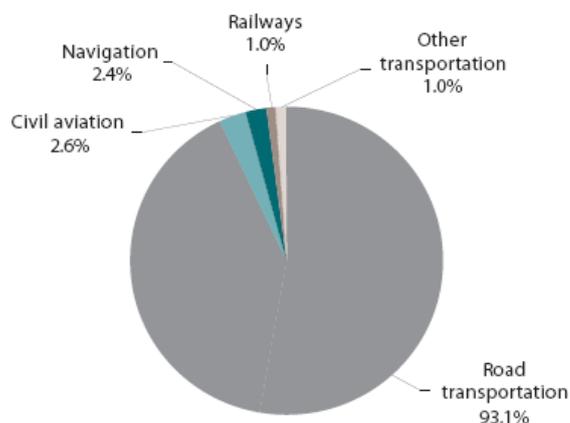


Figura 2.19 Emissões de Gases com Efeito de Estufa por modo de transporte em 2006 (valores % de CO₂ equivalente) [6].

Para além da emissão deste tipo de gases o transporte rodoviário é também uma das principais fontes de emissões, que são prejudiciais à saúde humana, especialmente em áreas urbanas.

Segundo [13], para um determinado tipo de combustível, as emissões de CO₂ resultantes da sua queima são diretamente proporcionais à quantidade de combustível consumido. Em comparação com as reduções das emissões de poluentes tóxicos, tem havido menos progresso na redução de CO₂ dos automóveis, dado que, por um lado as motorizações são cada vez mais eficientes, mas por outro, o peso médio dos veículos tem aumentado devido aos equipamentos adicionais para atender aos requisitos de segurança e conforto, que são cada vez mais exigentes.

Os outros poluentes resultantes da queima da gasolina, gasóleo e outros combustíveis alternativos são principalmente de monóxido de carbono, óxidos de nitrogénio, hidrocarbonetos não queimados e partículas finas. Os três primeiros são gases e são invisíveis. As partículas finas são geralmente invisíveis, embora em determinadas condições de funcionamento, sejam visíveis. Ao contrário do dióxido de carbono, as emissões desses poluentes não estão diretamente ligadas ao consumo de combustível, dependendo mais da tecnologia do veículo e do seu estado de conservação.

O Regulamento (CE) N.º 443/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009, estabelece metas obrigatórias para reduzir as emissões de CO₂ dos automóveis novos, sendo o seu objetivo de criar incentivos para que a indústria automóvel invista em novas tecnologias, e promover ativamente a eco inovação, em particular, o desenvolvimento de tecnologias de propulsão inovadoras, que são fonte de emissões significativamente inferiores às dos automóveis de passageiros tradicionais.

Um dos custos associados à mobilidade tem que ver precisamente com os efeitos da contaminação

provocada pelas emissões gasosas dos motores que equipam a maior parte dos transportes, cujo efeito dos principais elementos é:

- CO - Monóxido de Carbono é um gás inodoro, incolor e insípido, mas altamente tóxico, que resulta da combustão incompleta de combustíveis sólidos (por exemplo lenha e carvão), líquidos (por exemplo petróleo e gasóleo) ou gasosos (por exemplo gás natural, propano ou butano). Os efeitos do monóxido de carbono na saúde humana são consequência da sua capacidade de se combinar irreversivelmente com a hemoglobina, dando lugar à formação da carboxi-hemoglobina (COHb). O transporte de oxigénio pelo sangue, desde os pulmões até aos tecidos fica desta forma comprometido devido à ocupação do centro ativo da hemoglobina pelo CO, composto que possui uma afinidade com a hemoglobina 210 vezes superior à do oxigénio. A toxicidade deste gás varia segundo o tempo de exposição e a concentração inalada, podendo existir casos de intoxicação aguda e crónica, assim como outros em que a morte ocorre de forma fulminante [14].
- NO_x - Óxidos de Azoto reagem na atmosfera para formar dióxido de azoto (NO₂), que pode ter efeitos adversos na saúde, particularmente entre as pessoas com doenças respiratórias. Altos níveis de exposição podem provocar problemas respiratórios, enquanto a exposição a longo prazo pode afetar a função pulmonar. Os óxidos de azoto também contribuem para a formação de smog, chuva ácida, podendo danificar a vegetação, contribuir para a formação de ozono ao nível do solo e reagir na atmosfera, formando partículas finas (partículas secundárias) [13].
- CO₂ - Dióxido de Carbono, não é prejudicial para os seres vivos, produz indiretamente danos no ambiente, porquanto provoca o chamado “efeito de estufa”, responsável segundo os especialistas pelo aumento da temperatura terrestre. Este gás tem a particularidade de deixar passar as radiações solares que aquecem a superfície terrestre, mas impede a radiação térmica (raios infravermelhos) refletidos pelo solo e pelos oceanos para o espaço. O dióxido de carbono atua assim um pouco como o vidro de uma “estufa” que mantém o calor na parte baixa da atmosfera. [15].
- Partículas - partículas finas podem ter um efeito adverso sobre a saúde humana, especialmente entre aqueles com doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes [13].
- HC - Hidrocarbonetos, contribuem para a formação de ozono ao nível do solo levando ao risco de danos no sistema respiratório humano. Além disso, alguns tipos de HC são cancerígenos [13]. A perigosidade dos hidrocarbonetos não queimados depende da sua composição nos gases de escape:
 - Os saturados (parafinas) são inodoros e provocam irritação das mucosas;
 - Os não saturados (óleofinos, acetilenos) são considerados os responsáveis pela formação do chamado “smog-fotoquímico”, visto que, sob a ação dos raios solares e em presença de óxidos de azoto, aqueles reagem produzindo os oxidantes;
 - Os aromáticos (benzenos, toluenos, etilbenzenos, xilenos, benzopirenos, benzo antracenos,

fenantracenos) emanam um odor característico, sendo substâncias tóxicas e, em parte, cancerígenas;

- Os aldeídos (formaldeídos) têm um odor penetrante e, mesmo em baixas concentrações, produzem irritações no nariz e nos olhos.

Um grupo dos referidos hidrocarbonetos é composto por verdadeiros inqueimados, isto é, não queimados (parafinas, óleo finos, benzenos). Uma segunda parte é constituída por produtos de uma combustão incompleta (aldeídos, cetônicos, etilenos e os hidrocarbonetos polinucleares aromáticos). [15].

2.6. Mobilidade Sustentável

Mobilidade sustentável é a capacidade de atender às necessidades de mover livremente, obter acesso, comunicação, comércio e estabelecer relações sem sacrificar outros valores fundamentais humanos ou ecológicos, hoje ou no futuro [16]

Nos últimos anos a mobilidade individual tem vindo a aumentar com a melhoria do padrão de vida das pessoas, este comportamento, comum nas sociedades modernas, tende a agravar as condições ambientais, de segurança rodoviária, bem como a aumentar as exigências energéticas. Se esta tendência não se inverter, estará em causa a sustentabilidade da mobilidade. Será por isso importante proceder a alterações dos modelos de mobilidade, para diminuir a pressão sobre as condições ambientais, energéticas e da mobilidade, particularmente nas cidades [17].

A atual recessão económica, o aumento do custo das matérias-primas e energia, a necessidade de atender às necessidades sociais de um sistema eficiente de transporte multimodal, e a política de fazer pleno uso das infraestruturas existentes antes da sua expansão pode ser justificada, constituem desafios para o sector dos transportes, em particular para a indústria automóvel. Por conseguinte, a mobilidade e os transportes têm de ser geridos de forma a garantir a acessibilidade de uma forma economicamente eficiente, e de modo que os benefícios do transporte para a sociedade, não comprometam o meio ambiente, a saúde e a segurança das pessoas, hoje e amanhã [18].

À escala internacional é importante estabelecer redes de transporte internacional, nomeadamente para o transporte de mercadorias, privilegiando a utilização das redes ferroviárias, fluviais e marítimas, considerando que, para o transporte de mercadorias de longa distância, os comboios e os barcos são mais eficientes.

À escala nacional e local é importante estabelecer redes de transportes públicos mais eficientes, com mais interfaces, mais flexíveis e confortáveis para os utilizadores. No que diz respeito ao transporte de mercadorias em áreas urbanas, os veículos comerciais e camiões continuarão a desempenhar um papel importante, no entanto este tipo de transporte deverá ser igualmente otimizado.

Atendendo à mobilidade urbana, o desafio consiste em criar um sistema eficiente harmonizado, conjugando todos os modos de transporte na forma mais conveniente, garantindo a sustentabilidade através do fornecimento de transporte a preços acessíveis e com custo significativamente mais baixo para o ambiente.

O transporte individual tem um peso muito significativo na mobilidade urbana, como tal deverá ser otimizado, quer por parte dos construtores dos veículos, através do desenvolvimento de veículos mais eficientes, com tecnologias que utilizem energias sustentáveis, quer por parte dos seus utilizadores, que deverão alterar os seus comportamentos no que respeita à utilização dos meios de transporte.

Por outro lado a utilização das infraestruturas deverá ser otimizada, estabelecendo faixas dedicadas à

circulação de veículos mais eficientes ou em condições de lotação favoráveis, zonas de carga e descarga de mercadorias, paragens de autocarros, microterminais intermodais de passageiros e de mercadorias.

Para aumentar a sustentabilidade da mobilidade é importante conjugar fatores económicos, sociais, e tecnológicos, tal como por exemplo a escolha do veículo com as características adequadas à sua utilização, novas formas de mobilidade, novas tecnologias que permitam aumentar a eficiência dos veículos.

2.6.1. Utilização de Veículos de acordo com as Suas Características

A escolha e utilização de veículos devem estar mais de acordo com as necessidades dos seus utilizadores. Apesar de ser um aspeto que passa pela liberdade de cada utilizador, devem ser promovidas e articuladas políticas que fomentem este princípio, procurando diminuir por exemplo a utilização de veículos de grandes dimensões e mais pesados para transportar uma pessoa ou duas pessoas no interior das cidades. Uma das formas de combater esta prática é através da imposição de taxas à entrada das grandes cidades, para veículos com lotação inferior a um determinado número de passageiros, tal como acontece em algumas cidades na Europa, como por exemplo em Londres.

Os automóveis de passageiros oferecem na esmagadora maioria uma lotação para 5 passageiros, no entanto existem veículos de passageiros de série com lotação entre 2 e 7 lugares, distribuídos por vários segmentos, que em termos comerciais, atualmente, se podem classificar como: citadinos, utilitários, pequenos familiares, familiares médios, grandes familiares, automóveis de luxo, desportivos, descapotáveis, todo-o-terreno, SUV e monovolumes. Na Figura 2.20 pode-se observar a evolução das vendas dos diferentes segmentos de veículos desde 2003, bem como uma previsão até 2020.

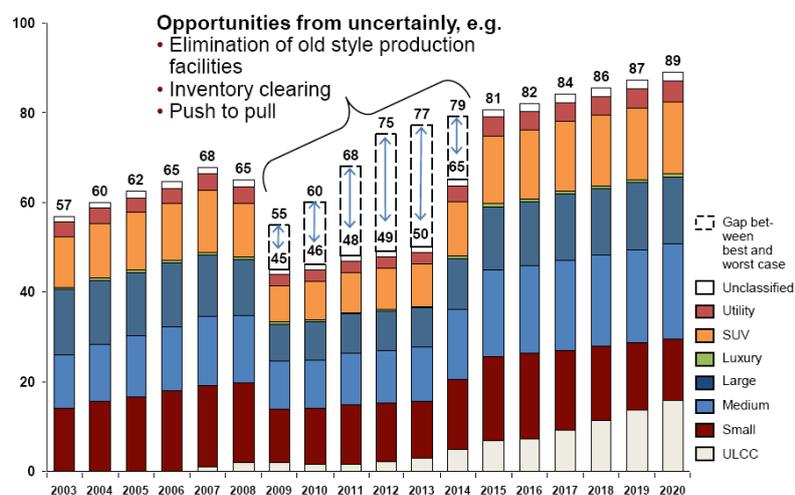


Figura 2.20 Previsões para as vendas globais de automóveis de passageiros até ao ano 2020 nos diferentes segmentos (em milhões de unidades) [19].

Do gráfico anterior destaca-se o aparecimento de um novo segmento de veículos de pequenas dimensões, designado por ULCC (Ultra Low Cost Car), e o crescimento acentuado das respetivas vendas nos anos seguintes. Os restantes segmentos manter-se-ão na linha do que tem vindo a ser até aqui, apesar de se prever um aumento da procura dos veículos médios.

De acordo com a conjuntura atual e previsível para os próximos anos, e também com as condições de mobilidade urbana, faz sentido que este tipo de veículos venha a ser do tipo citadino. Alguns fabricantes, conscientes da necessidade de oferecer novas motorizações que preencham simultaneamente os seguintes requisitos: zero emissões, dimensão reduzida para favorecer o estacionamento em meio urbano, privilegiar a mobilidade individual e percorrer distâncias relativamente curtas, têm desenvolvido novos conceitos de veículos, que se apresentam em seguida.

2.6.2. Novos Conceitos de Veículos Citadinos

Vários fabricantes de automóveis estão a desenvolver novos conceitos de mobilidade, baseados no transporte individual. De facto, existe uma tendência para o reaparecimento do segmento dos micro-automóveis, como já aconteceu no passado, com os automóveis BMW[®] Isetta, Peel[®] P50, Sado[®] 550, entre outros, de acordo com as tendências de mercado referidas no gráfico anterior. De seguida são apresentados muito sucintamente projetos e conceitos de alguns dos fabricantes de automóveis:

a) PUMA (*Personal Urban Mobility & Accessibility*)

Este é um micro veículo elétrico de dois lugares (Figura 2.21), que funciona a partir do equilíbrio do condutor, combinando a estabilidade dinâmica com a gestão inteligente da bateria, através de vários sensores. Este veículo foi desenvolvido em parceria pela GM (General Motors[®]) e pela Segway[®], empresa que se dedica ao fabrico de um novo meio de transporte de duas rodas inventado por Dean Kamen em 2001.



Figura 2.21 Protótipo PUMA [20].

b) *City Car - MIT Media Lab*

O Grupo *Smart Cities* (Figura 2.22) desenvolveu um novo conceito de veículo elétrico, sem partes mecânicas entre o motor e as rodas, tem um *design* muito flexível e a particularidade rodar a sua estrutura para permitir a diminuição do seu comprimento. Este projeto visa aumentar a sustentabilidade do transporte nas cidades, tendo sido concebido pelo *MIT Media Lab* e patrocinado pela GM[®] [21].



Figura 2.22 Imagem do City Car projectado pelo MIT [22].

c) *Pininfarina[®] EV NIDO*

O EV Nido (Figura 2.23) é um automóvel citadino de 2 lugares, que se apresenta como uma solução da Pininfarina[®] para responder aos novos desafios de mobilidade individual sustentável. Os pontos alvos deste projeto são: o sistema propulsão híbrido ou elétrico, a utilização de materiais alternativos mais leves e recicláveis, a segurança activa e passiva e sistemas de comunicação inteligente.



Figura 2.23 Automóvel citadino Pininfarina[®] EV Nido [23].

d) *Peugeot BBI*

Este automóvel citadino da Peugeot apresenta dimensões exteriores muito reduzidas e capacidade para transportar quatro passageiros. (Figura 2.24).



Figura 2.24 Vista exterior (a) e interior (b) do automóvel cidadão da Peugeot® BB1 [24].

e) Lotus® Urban Concept

A Lotus® apresentou um conceito para um micro veículo cidadão, com uma estrutura híbrida muito simples, que combina elementos tubulares, perfis e placas, em material leve, de forma a reduzir o peso e os custos de produção, como se pode observar pela Figura 2.25.

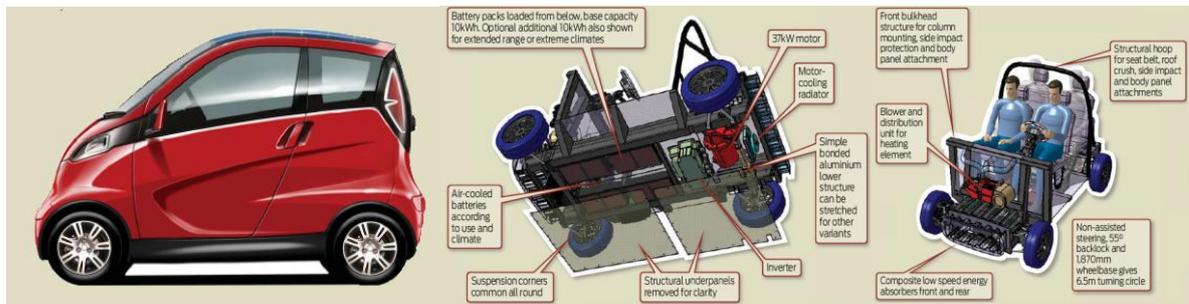


Figura 2.25 Lotus® Urban Concept [25].

f) MPV T25 e MPV T27

O MPV T 27, apresentado na Figura 2.26 (a) mede aproximadamente 2,5 metros de comprimento e 1,3 m de largura, e pesa cerca de 600 kg. Este veículo deriva de numa plataforma comum a outros modelo deste fabricante, e utiliza materiais avançados. Na Figura 2.26 (b) pode-se observar a relação entre a área de estacionamento necessária para este tipo de veículo em comparação com a área de estacionamento convencional.

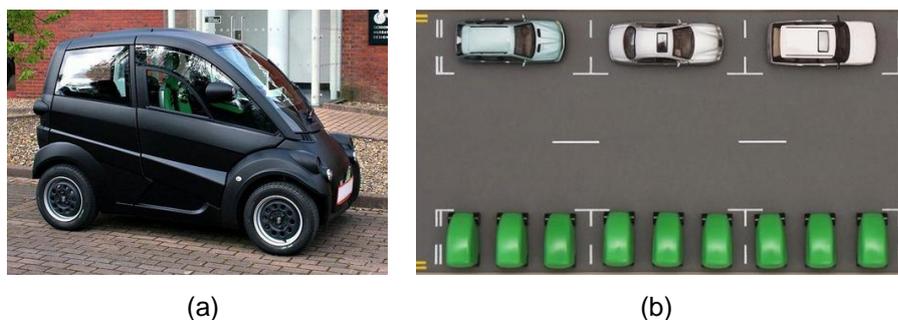


Figura 2.26 Veículo micro cidadão MPV T27 [26].

g) *Renault® Twizy Z.E*

Este veículo (Figura 2.27) de apenas um lugar foi desenvolvido pela Renault® para deslocações em cidade. As suas dimensões são muito reduzidas, tem propulsão elétrica, e é construído a partir de materiais leves.



Figura 2.27 Automóvel micro cidadão da marca Renault® modelo Twizy Z.E. [27].

h) *Outros conceitos*

Numa dimensão mais pequena, e para deslocações de menor distância, por exemplo dentro das cidades, têm vindo a ser desenvolvidos veículos alternativos, como por exemplo os Segway® e bicicletas elétricas. O Segway® PT i2 Commuter (Figura 2.28) é um veículo de duas rodas concebido para satisfazer a mobilidade individual, nomeadamente para uma utilização quotidiana em áreas limitadas, como por exemplo: centros urbanos, em recintos de empresas, centros comerciais, etc. Trata-se de um veículo elétrico com um sistema de direção do tipo giroscópio. Em termos de performances, este veículo consegue deslocar-se a uma velocidade máxima 20 km/h e tem uma autonomia até 38 km.



Figura 2.28 Segway® PT i2 Commuter [28].

Para além dos novos conceitos e veículos, existem ainda as bicicletas elétricas, cuja oferta tem vindo a aumentar nos últimos anos, de que é exemplo a bicicleta urbana da marca de automóveis Volkswagen®. Trata-se de uma bicicleta elétrica “desdobrável” cujo desenho permite a sua arrumação no tradicional lugar do pneu sobresselente dos seus modelos, o que permite que possa ser utilizada como extensor de mobilidade para o interior das cidades (Figura 2.29).



Figura 2.29 Bicicleta elétrica desdobrável da marca Volkswagen® [29].

i) *Veículo de carga todo-o-terreno de baixo custo*, Global Trust Vehicle OX

A empresa de Gordon Murray® desenvolveu um protótipo de um veículo de carga todo-o-terreno, com capacidade de carga de 1900 kg, a partir painéis de contraplacado. Este projeto foi desenvolvido para países subdesenvolvidos, onde as necessidades de mobilidade não são supridas devido à falta de capacidade financeira para aquisição de veículos. Este veículo é fabricado em materiais leve, com um arquitetura simples e com custos de produção reduzidos. Outra particularidade do veículo é a de que pode ser transportado desmontado, em contentores marítimos o que permite baixar o custo final do veículo.



Figura 2.30 Protótipo de veículo de carga todo-o-terreno de baixo custo, Global Trust Vehicle OX™ [30].

2.6.3. Desenvolvimento de Tecnologias e Veículos Mais Eficientes

O desenvolvimento de um veículo é um processo multidisciplinar complexo, que envolve várias áreas de conhecimento, que devem ser interligadas para que se cumpram requisitos para o produto final, nomeadamente requisitos de segurança, de eficiência, ambientais, para além dos requisitos financeiros e dos requisitos ligados com o mercado, nomeadamente os que se relacionam com os argumentos de venda do produto, como o *design* e as suas características técnicas, entre outros.

O aumento da segurança dos veículos tem sido, e deverá ser um dos pilares de desenvolvimento dos construtores. Ao contrário do que acontecia no passado, atualmente os requisitos de segurança têm prioridade relativamente aos demais, assumindo nos dias de hoje um valor importante que é desde logo assumido pelas marcas como um argumento de venda, através dos resultados dos testes de colisão no âmbito de programas, como por exemplo o NCAP (*New Car Assessment Vehicle*).

A eficiência de um veículo em termos de consumos e emissões depende de vários parâmetros,

parâmetros esses, que devem ser conjugados com o objetivo de estabelecer um bom compromisso na perspectiva do seu ciclo de vida. A Figura 2.31 ilustra os principais parâmetros que influenciam o consumo e o nível de emissões de CO₂ (a) [31, 32], e a respectiva influência dos parâmetros mais importantes (b) [adaptado 33].

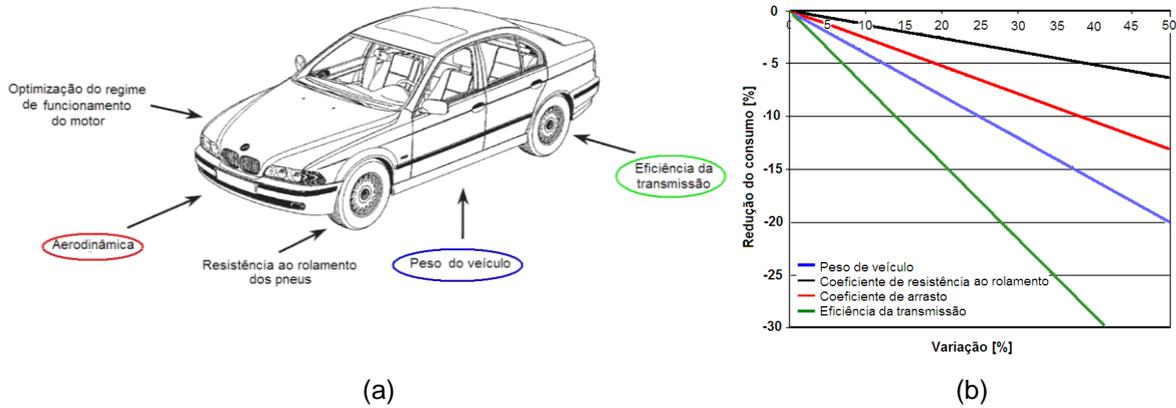


Figura 2.31 Parâmetros que influenciam o consumo e o nível de emissões de CO₂ (a) e a respectiva influência dos parâmetros mais importantes (b).

No gráfico da Figura 2.32 pode ver-se a influência do peso na emissão de CO₂ em veículos com diferentes tecnologias de propulsão [34]. Para além de se verificar que quanto mais baixo é o peso dos veículos menor é, tipicamente, o seu nível de emissões de CO₂, também se verifica a importância dos motores elétricos que aumenta a eficiência dos veículos, permitindo diminuir o nível de emissões, em especial nos veículo híbridos carregável (PHEV) e nos veículos elétricos (BEV e FCEV).

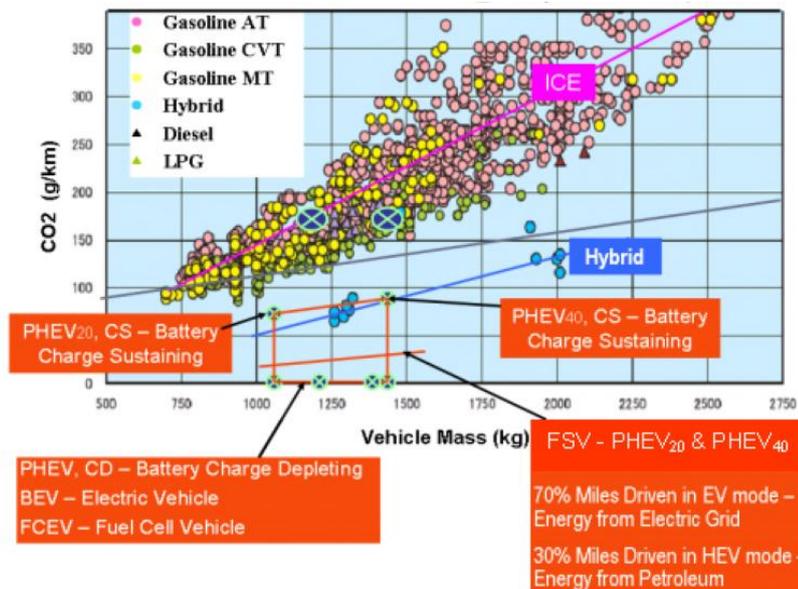


Figura 2.32 Relação entre o peso e o nível de emissão de CO₂ para veículos com diferentes tecnologias de propulsão [34].

2.6.3.1. Aumento da Eficiência das Tecnologias de Propulsão

Muito se tem escrito sobre os sistemas de propulsão do futuro. Nos últimos dois anos a discussão centrou-se um pouco mais nos veículos elétricos. De facto este tema não é simplesmente técnico, pois envolve outras variáveis que condicionam o caminho a seguir.

No entanto, segundo o estudo [35], as tecnologias de propulsão alternativas predominantes até 2035 serão, principalmente, baseadas nos motores de combustão interna, particularmente motores a gasolina com turbocompressor, híbridos gasolina/elétrico e *Diesel*/elétrico, e motores alimentados a gás natural, conforme se pode observar pelo gráfico da Figura 2.33.

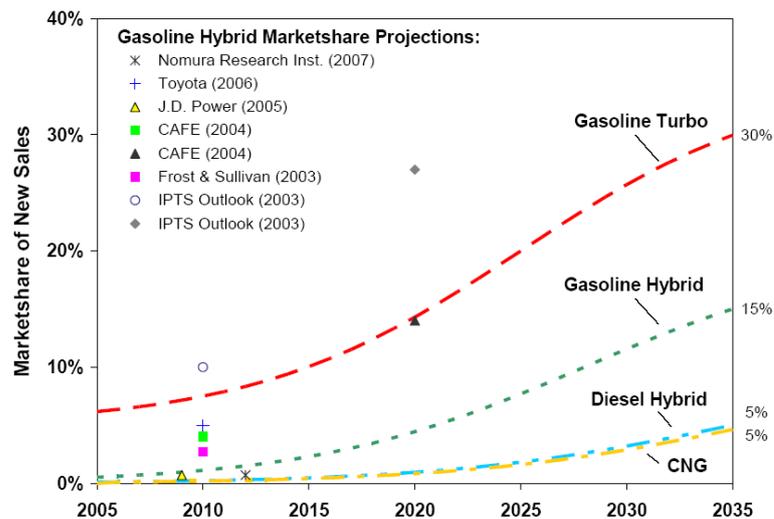


Figura 2.33 Previsão ate 2035 sobre a evolução das tecnologias de propulsão emergentes. [35].

Segundo [19], os motores de combustão interna predominarão em 2020, apesar de não ser possível a sua comparação com os dados do estudo anterior (Figura 2.34).

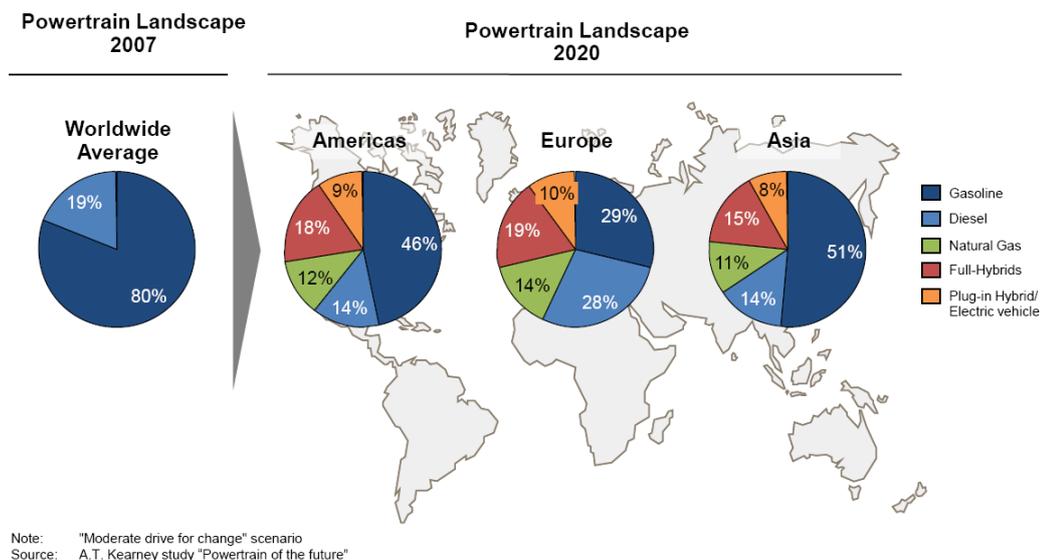


Figura 2.34 Tecnologias de propulsão automóvel utilizadas em 2007 versus previsão para 2020 [19].

Segundo estas previsões, a introdução do veículo elétrico será lenta até 2020, isto porque existem limitações que não permitem que este tipo de tecnologia seja ainda uma alternativa viável, principalmente pelos custos e pelo seu desempenho em termos de autonomia.

No entanto, de acordo com o Gabinete para a Mobilidade Elétrica de Portugal (GMEP), os veículos elétricos serão no futuro a solução para a redução significativa dos custos de mobilidade [36].

Na Figura 2.35 pode ver-se a evolução da venda de veículos elétricos no mundo [37] entre 2014 e 2016, onde se nota um crescimento significativo entre as vendas de 2016 comparando com as vendas nos períodos homólogos de 2014.

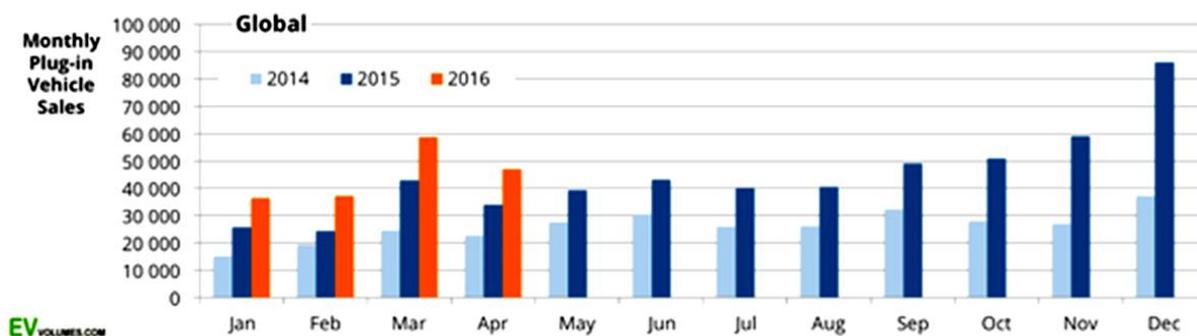


Figura 2.35 Venda de veículos elétricos no mundo por mês entre 2014 e 2016 [37].

2.6.3.2. Tecnologias de Informação e Veículos Autónomos

OS sistemas de comunicação constituem uma ferramenta com relevância na otimização do tráfego urbano e interurbano. A indústria automóvel está a participar ativamente no desenvolvimento de soluções inteligentes mobilidade urbana multimodal e sistemas de transportes do futuro, das quais são exemplo o sistema ITS - *Intelligent Transport Systems*, baseado em sistemas de comunicação entre veículos e entre os veículos e as infraestruturas (Figura 2.36), que têm como objetivo otimizar o fluxo de tráfego, facilitar o acesso às cidades e, conseqüentemente reduzir as emissões de CO₂.

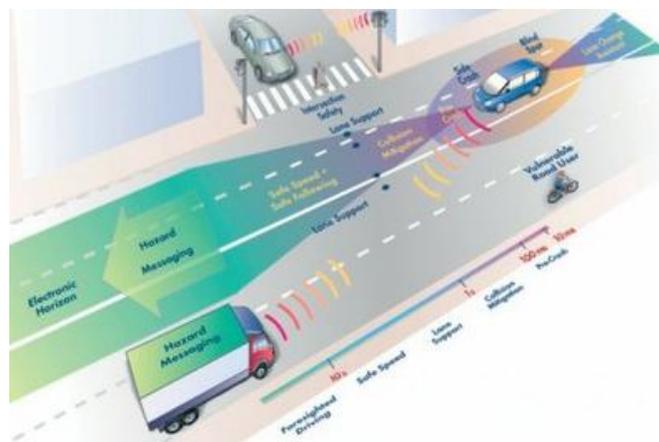


Figura 2.36 Sistemas de comunicação entre veículos e entre veículos e infraestrutura [18].

A evolução dos sistemas de comunicação utilizados pelos automóveis poderá e deverá contribuir para a eficiência do tráfego rodoviário com impactos na redução do nível das emissões. Por exemplo, se em condições de tráfego automóvel, o aumento da velocidade média de circulação de 10 para 20 km/h, através da utilização de um sistema de transporte inteligente, permite reduzir os níveis das emissões de NOx e CO₂, de acordo com os gráficos da Figura 2.37. Além disso, o número de acidentes de trânsito também poderá ser reduzido, através da utilização de sistemas de controlo adaptativo da velocidade de cruzeiro, juntamente com sistemas de transporte inteligente. [12].

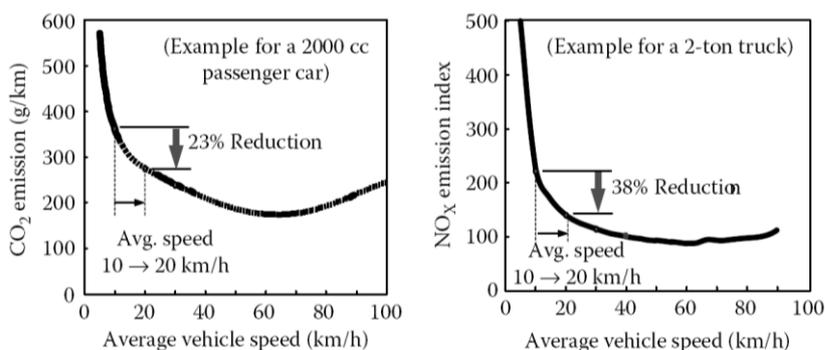


Figura 2.37 Níveis de emissões de veículos em função da sua velocidade média [12].

Outra forma de aumentar a eficiência dos veículos e dos sistemas de transporte, consiste na introdução dos veículos autónomos, cujo tema está na ordem do dia e como tal a dissertação sobre ele é quase inevitável. O que hoje conhecemos sobre as tecnologias de apoio à condução nos automóveis serão, num futuro que parece cada vez mais próximo, substituídos por sistemas tecnológicos de condução 100% autónomos.

Atualmente, já existem veículos ligados à internet e veículos autónomos, nos quais o condutor assume um papel secundário. Mas não é apenas o conceito de condução que muda, também o *design* dos veículos do futuro deve ser muito diferente do atual.

Se por um lado são as metas ambientais que pressionam os construtores a produzir veículos mais eficientes, apostando em energias alternativas, por outro os objetivos a cumprir ao nível da segurança e da otimização das cidades e recursos reforçam a importância de um automóvel autónomo.

A primeira geração de veículos totalmente autónomos encontra-se neste momento em desenvolvimento pelos fabricantes de automóveis e pelos engenheiros de sistemas, com o objetivo geral da sua introdução em 2030.

Antes de se chegar à condução autónoma, os construtores e empresas de tecnologia estão a desenvolver e a melhorar os sistemas de apoio à condução, como por exemplo os sistemas de estacionamento automático através do *smartphone* que a Bosch® está a desenvolver. O sistema utiliza sensores colocados no pavimento que indicam se um lugar está ocupado ou não. Esta informação é transmitida em tempo real para um mapa que pode ser acedido via internet, o que permite ao condutor

escolher um lugar para estacionar [38].

A comunicação entre veículos, designada por *vehicle-to-vehicle communication* (V2V), permitirá por exemplo que um veículo que não pare num semáforo vermelho possa informar os veículos que circulem próximo desse cruzamento para que os sistemas destes veículos possam agir de forma a evitar um acidente.

A integração das tecnologias, incluindo a motorização elétrica transformará completamente os padrões da mobilidade tal como são conhecidas atualmente, permitindo que os passageiros possam deslocar-se em veículos controlados por sistemas autónomos que dispensam a intervenção do condutor. Atualmente já existem tecnologias com diferentes níveis de autonomia, que podem ser classificados em [39].

Nível 1 – Veículo com funções autónomas específicas: Veículo com sistemas automáticos de auxílio à condução com funções específicas como controlo de velocidade de cruzeiro, sistema de manutenção na faixa de rodagem e sistema de estacionamento automático, mas sempre com a participação e o controlo do condutor.

Nível 2 - Veículo com funções autónomas combinadas: Veículo com sistemas automáticos de controlo integrado de funções como o controlo de velocidade adaptativo, correção da direção para manter o veículo centrado na faixa de rodagem. O condutor é responsável pela condução do veículo, podendo intervir sobre estas funções em qualquer uma destas funções, desativando o sistema de controlo autónomo do veículo.

Nível 3 – Veículo com condução autónoma limitada: O veículo pode assumir a condução autónoma em determinadas condições definidas pelo condutor, monitorizando continuamente as condições de segurança. O condutor pode alterar as condições, sendo neste caso devolvida a condução ao condutor.

Nível 4 - Veículo com condução autónoma total: Os veículos podem executar todas as funções de condução e monitorizar as condições de estrada durante a totalidade do percurso, com ou sem ocupantes no interior do veículo.



Figura 2.38 Previsão sobre desenvolvimento e utilização dos veículos autónomos [Adaptados de 40]

Os veículos autónomos parecem apresentar de facto vantagens relativamente à eficiência dos sistemas

de transporte, segundo [40] estima-se que sua utilização se difunda a partir do ano 2020 (Figura 2.38) permitindo reduzir significativamente o espaço para estacionamento dos veículos, bem como reduzir até 90% o número de acidentes. No entanto, tal como acontece com os sistemas ligados à internet, exigirão medidas de segurança no sentido de minimizar, entre outros, os riscos de ataque informático, que podem ser explorados por ações terroristas.

2.6.3.3. Redução do Peso dos Veículos

Os materiais são um dos domínios que está em pleno desenvolvimento na indústria automóvel, sendo cada vez mais importante diminuir os efeitos nefastos para o meio ambiente provocados no seu fabrico, utilização e reciclagem. Por este motivo justifica-se o desenvolvimento de novos materiais cujas características se ajustem melhor a requisitos ambientais.

Na Figura 2.39 pode-se observar um diagrama com principais componentes de um automóvel actual, e uma distribuição dos materiais utilizados, em termos de peso, na qual se pode constatar que a estrutura e a suspensão representam mais de 50% do peso do automóvel. Quer a estrutura, quer os componentes principais da suspensão são normalmente em aço ou em alumínio.

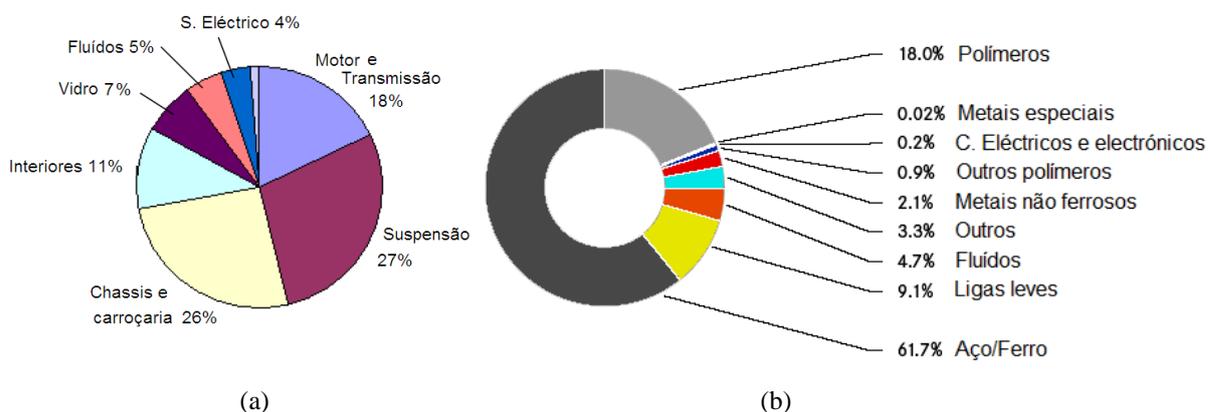


Figura 2.39 Distribuição do peso dos componentes de um automóvel no seu peso total (a) [adaptado de 41], e distribuição do peso dos diferentes materiais tipicamente utilizados no seu fabrico (b) [adaptado de 42].

Atualmente os construtores de automóveis procuram diminuir o peso dos seus modelos combinando diferentes abordagens, tal como por exemplo se pode observar pelo diagrama apresentado na Figura 2.40, que estabelece, segundo [43], um conjunto de alternativas que incluem materiais leves, otimização estrutural e otimização de processos de fabrico, que podem ser conjugadas entre si no sentido de reduzir o peso dos veículos.



Figura 2.40 Fatores a considerar para a redução do peso de estruturas de automóveis [adaptado de 43].

2.6.3.3.1. Incorporação de Materiais Leves

A redução de peso por via da incorporação de materiais mais leves é de forma geral um desafio para os engenheiros, no entanto é um desafio mais complexo uma vez que envolve diretamente questões de segurança, nomeadamente no que respeita ao desempenho estrutural dos veículos em caso de colisão. Na Figura 2.41 estão apresentados alguns fatores que constituem oportunidades para a redução do peso dos veículos, através da utilização de materiais avançados e mais leves.

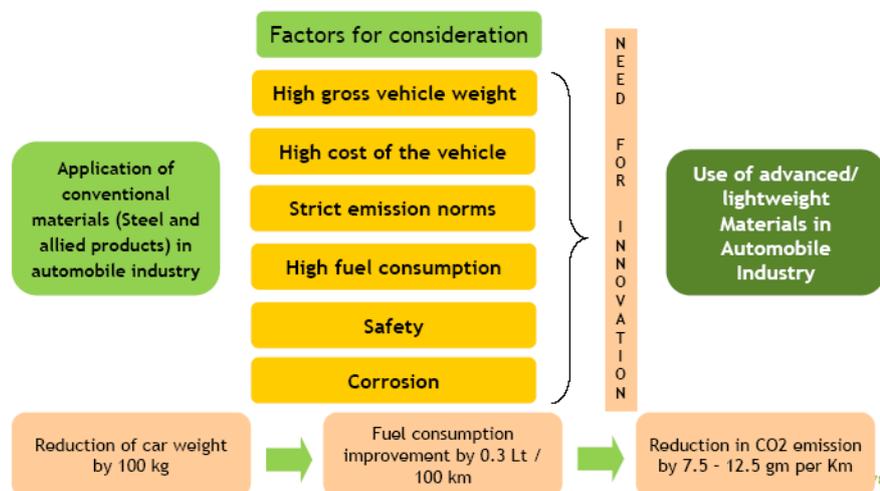


Figura 2.41 Fatores que justificam o desenvolvimento de materiais avançados leves com vista à redução do peso dos veículos [41].

A título de exemplo apresentam-se de seguida alguns exemplos provenientes da indústria automóvel, relativamente à redução de peso através da aplicação de materiais mais leves. Na Tabela 2.11 podem ler-se objetivos de redução de peso dos principais construtores Japoneses, definidos nos últimos anos para os modelos atuais, no sentido de aumentar a sua eficiência e, conseqüentemente reduzir o nível de emissões de CO₂.

Tabela 2.11 Objetivos de redução de peso dos principais construtores Japoneses [41].

Marca	Redução de peso	Objetivo
Toyota	10%	Aumento da eficiência em 3% em 2011
Nissan	15%	Aumento da eficiência em 10% até 2015
Mitsubishi	Entre 70 e 100 kg	-
Mazda	100 kg em relação aos modelos anteriores	Aumento da eficiência em 30% até 2015

Para além destes construtores Japoneses, os construtores Chineses pretendem reduzir em média entre 8 e 10% o peso dos seus automóveis, através da utilização de aços de elevada resistência e de alumínio. [41]. Atualmente as ligas de aço são usadas em diferentes componentes de automóveis na Índia, embora se preveja a sua substituição no futuro por materiais compósitos, alumínio e ligas de magnésio, de acordo com a Tabela 2.12.

Tabela 2.12 Potenciais aplicações de materiais em diferentes componentes de automóveis na Índia [41].

Área de aplicação	Componente	Materiais utilizados atualmente	Materiais leves que podem ser utilizados no futuro
Estrutura de carroçaria	Painéis exteriores	Chapas de aço com espessuras entre 0,8 mm to 3,0 mm	Aços de elevada resistência com espessura reduzida
	Suportes	Chapas de aço de várias espessuras entre 3,15 mm a 12 mm	Chapas de aço de espessura reduzida com desenho otimizado
	Outros painéis sujeitos a corrosão	Chapas de aço galvanizado com espessura de 1,0 mm	Chapas de aço galvanizado / Plásticos
	Chassis Reforços	Chapas e tubos de aço Cantoneiras em aço com secções em Z, em C e com ângulos variados	Aço e materiais compósitos Cantoneiras em aço de espessura reduzida
Motor e seus componentes	Bloco, cabeça e coletores do motor	Ligas de alumínio, ferro fundido cinzento, ligas ferrosas, ferro branco	Ligas de alumínio de baixo custo com desenho otimizado
	Cambota e árvore de excêntricos	Aço forjado e outros tipos de ligas de aço	Ligas de alumínio e de magnésio
	Bielas	Aço, alumínio	Alumínio, titânio
	Pistões	Aço, alumínio, e bronze	Aço, alumínio, e bronze
	Cárter	Ferro fundido, alumínio, magnésio e ligas	Alumínio, magnésio e ligas
Válvulas	Materiais cerâmicos, aços, superligas e ligas de titânio	Materiais cerâmicos, aços, superligas e ligas de titânio	
Transmissão e seus componentes	Carcaça da caixa de velocidades e diferencial	Alumínio, aço	Alumínio
	Embraiagem	Aço inox, ferro, cobre, bronze, latão	Aço inox, ferro, cobre, bronze, latão
	Rodas dentadas	Ligas de ferro fundido, cobre, ligas de latão	Ligas de ferro fundido, cobre, ligas de latão
Rodas	Jantes	Aço, ligas de alumínio	Ligas de alumínio e de magnésio de baixo custo
Outros componentes	Painel de instrumentos, consolas	Plásticos reforçados, plásticos	Plásticos reforçados, plásticos

O alumínio, apesar de ser um material convencional, embora mais caro do que o aço, permite reduções de peso significativas relativamente, como se pode ver através dos dados compilados na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 Redução de peso esperada com a substituição do aço por alumínio em alguns componentes de automóveis [41].

Componente	Aço (kg)	Alumínio (kg)	Redução de peso (%)
Pilar central	9.5	7	25
Travessa frontal	19	13	30
Placa de chão	40	24	40
Painel de fecho	20	14	30
Perfil lateral do tejadilho	4	3	25
Pilar frontal	9.5	7	25
Tejadilho	12	6	50
Total	114	74	35

É evidente que a aplicação de materiais mais leves na indústria automóvel envolve custos muito relevantes inerentes ao desenvolvimento de tecnologias e materiais, tal como se pode observar pelo gráfico da Figura 2.42, que permite fazer uma comparação do custo/benefício, em termos de redução de peso, através da utilização de diferentes materiais em diferentes componentes de automóveis.

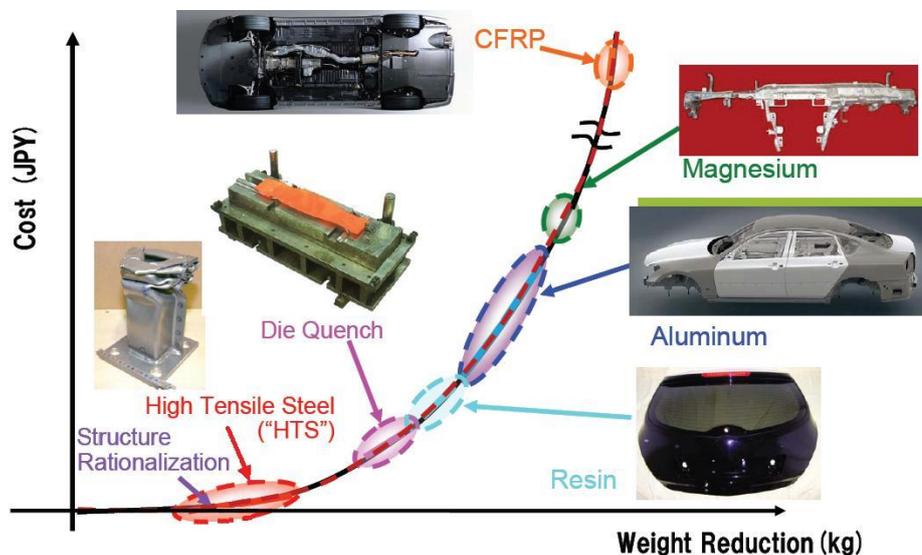


Figura 2.42 Relação custo / benefício de redução de peso conseguida com a aplicação de materiais alternativos [41].

Através da Figura 2.43 pode-se comparar o peso de diferentes componentes de automóveis fabricados com diferentes materiais.

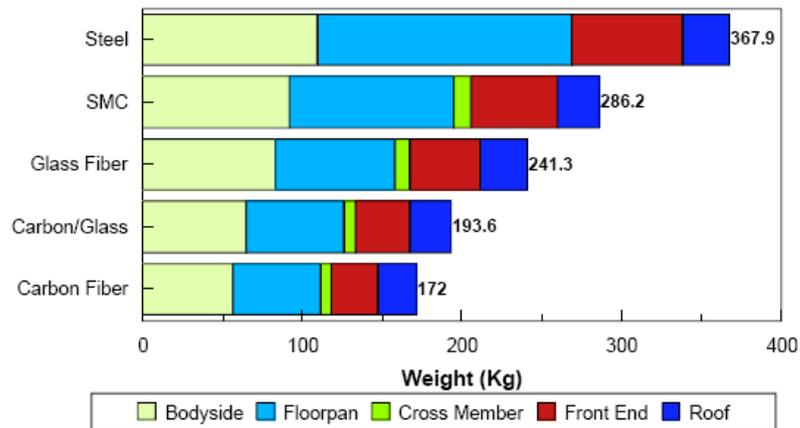


Figura 2.43 Comparação de peso de diferentes componentes de automóveis fabricados com diferentes materiais. [44].

2.6.3.3.2. Otimização Estrutural

Tal como já referido, para além da utilização de materiais leves a redução de peso pode ser alcançada através da otimização dos diferentes componentes dos veículos, nomeadamente dos componentes mais pesados, como por exemplo a estrutura. A Figura 2.44 dá uma perspetiva da evolução no que respeita à otimização de estruturas de automóveis, através da conjugação da aplicação de diferentes materiais nos tipos de estruturas mais comuns (monobloco e a space frame).

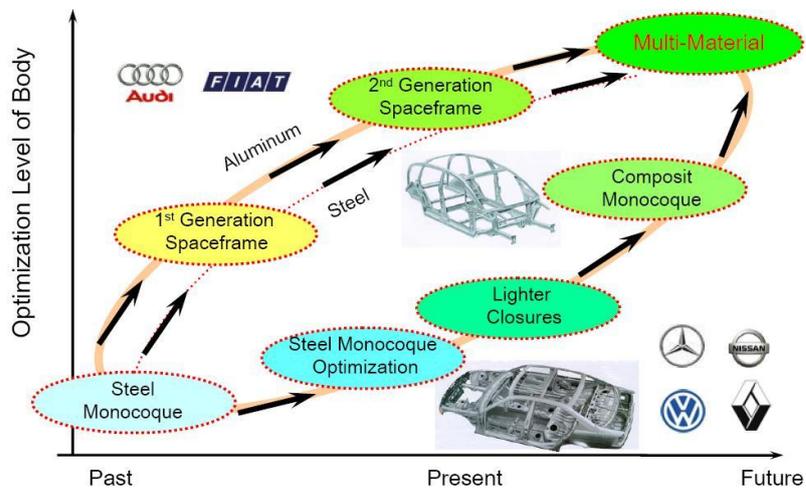


Figura 2.44 Evolução dos tipos de estruturas de automóveis [41].

De uma forma geral os construtores de veículos procuram otimizar as estruturas dos seus produtos evoluindo de projeto em projeto, integrando permanentemente novas soluções e metodologias com vista a aumentar a segurança e a eficiência dos veículos, bem como a reduzir custos. De seguida são apresentados alguns projetos de otimização de estruturas.

2.6.3.3.2.1. Projeto Ultra Light Steel Auto Body (ULSAB)

O projeto ULSAB foi uma iniciativa de um consórcio constituído por um grupo de 35 produtores de aço de 18 países, tendo como objetivos principais melhorar o desempenho estrutural e baixar o peso de automóveis. Este projeto foi desenvolvido nas seguintes fases:

Fase 1 Estudo do modelo através de ferramentas CAE (*Computer Aided Engineering*);

Fase 2 Validação dos resultados da fase 1 (construção e ensaios da estrutura projetada);

Fase 3 Estudo de viabilidade do veículo.

Segundo [45], a primeira fase, iniciada em 1994, consistiu no estudo conceptual do veículo, através de ferramentas CAE (Figura 2.45) de acordo com os seguintes requisitos de segurança:

- Colisão frontal com *offset* de 50% a uma velocidade de 50 km/h;
- Colisão frontal a 35 mph (NCAP - FMVSS 208);
- Impacto lateral a 50 km/h (95/27 EG, com barreira deformável);
- Colisão traseira a 35 mph (FMVSS 301);
- Impacto no tejadilho (FMNNS 216).



Figura 2.45 Modelação em computador da estrutura ULSAB (a) e simulação do comportamento em caso de colisão, através de elementos finitos (b).

A segunda fase, concluída em 1998, consistiu na validação dos resultados obtidos por simulação através de ensaios experimentais. Na conceção da estrutura ULSAB (Figura 2.46) foram utilizados os materiais e processos de fabrico descritos a seguir.



Figura 2.46 Estrutura construída na Fase 2 do projeto ULSAB [46].

Neste projeto foram utilizados os seguintes materiais:

- Aços de elevada resistência com tensões de cedência entre os 210 e os 800 MPa, com espessuras entre os 0,65 mm e 2,0 mm;
- *Sandwich* de aço/termoplástico, com peles 0,14 mm de espessura, em aço com tensões de cedência de 140 MPa, no caso de componentes com secção tubular, e 210 MPa, no caso de painéis, e, com núcleo em polipropileno com 0,65 mm de espessura. Os componentes feitos com este tipo de material apresentam uma redução de peso superior a 50% relativamente a componentes de dimensões e características funcionais similares, fabricados apenas em aço.

Os processos de fabrico utilizados foram os seguintes:

- Estampagem;
- *Hydroforming* para fabricar os perfis laterais do tejadilho;
- Soldadura por pontos, na maioria dos componentes, soldadura laser nos tubos obtidos por *hydroforming*, soldadura MAG, apenas em algumas zonas de difícil acesso pelos processos de soldadura por pontos e laser, e colagem dos painéis *sandwich*.

A validação dos resultados obtidos por simulação foi feita na segunda fase do projeto, através de ensaios de torção e de flexão para determinação da respetiva rigidez, em torção e em flexão, e ensaios de vibrações para determinar os modos de vibração da estrutura (Figura 2.47).

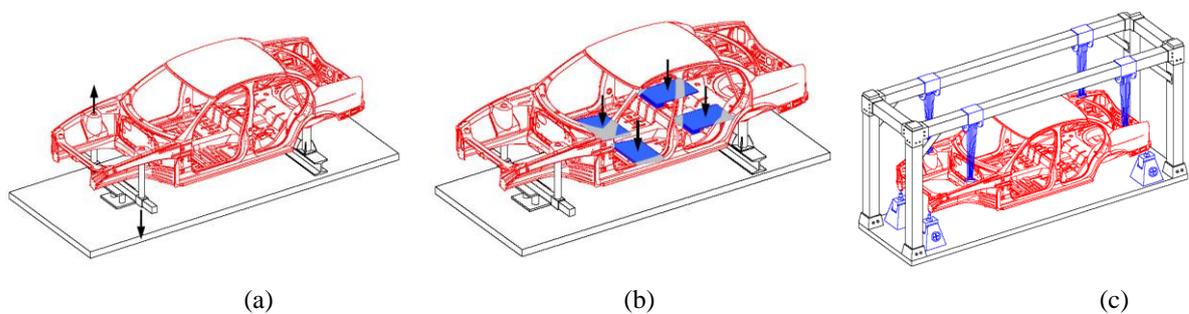
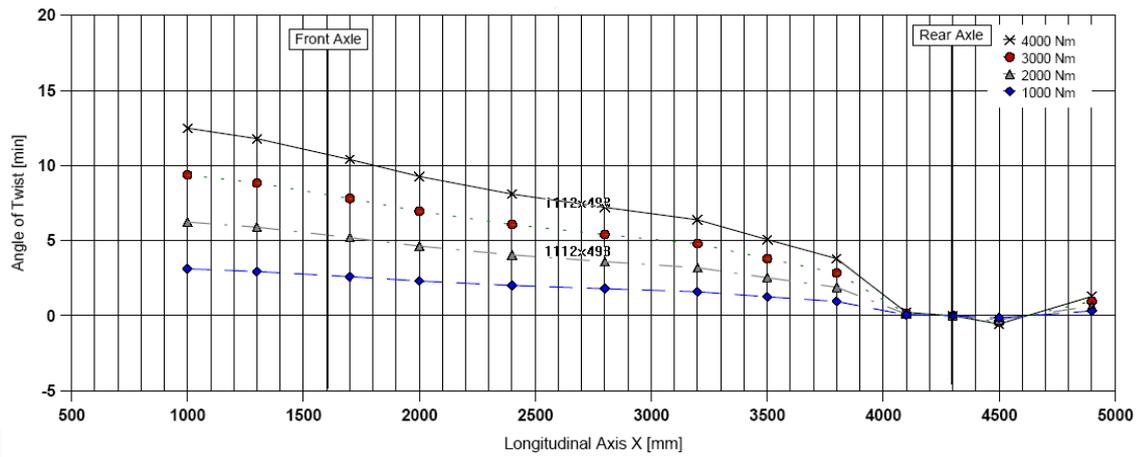
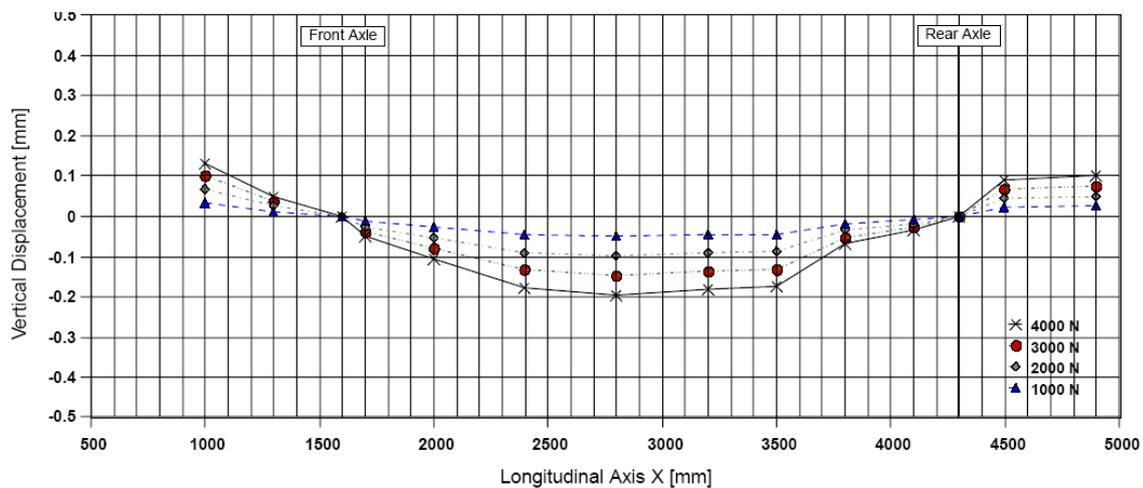


Figura 2.47 Configurações dos ensaios de torção (a) e de flexão (b) para determinação da respetiva rigidez e ensaios de vibrações (c) [47]

Deste projeto resultou uma estrutura com um peso de apenas 203 kg, 25% inferior à média aferida na fase de conceção do estudo. Na Figura 2.48 pode-se observar os resultados obtidos nos ensaios de torção (a) e flexão (b).



(a)



(b)

Figura 2.48 Resultados obtidos no ensaio de torção (a) e de flexão (b) [47].

O resultado dos ensaios estáticos de torção e flexão foram superiores aos valores de referência em 80% e 52%, respectivamente, e em 58% em relação ao seu modo natural de frequência (Tabela 2.14).

Tabela 2.14 Resultados obtidos na fase 2 do projeto ULSAB [48].

Propriedades	Valores de referência para o futuro	Valores médios de Benchmark	Objetivos	Resultados ULSAB
Peso * (kg)	250	271	≤ 200	203
Rigidez estática em torção (N.m ^o)	13000	11531	≥ 13000	20800
Rigidez estática em flexão (N/mm)	12200	11902	≥ 12200	181000
Modo de frequência natural (Hz)	40	38	≥ 40	60

* Todos os resultados foram obtidos a partir da estrutura com vidros, exceto o peso.

2.6.3.3.2.2. Projeto Ultra Light Steel Auto Closures (ULSAC)

O Projeto ULSAC foi desenvolvido com o objetivo de demonstrar a possibilidade de redução de peso na produção de painéis exteriores de carroçaria de automóveis, em aço, particularmente, em portas, *capot* e portas de bagageira. Os resultados referem uma redução do peso em cerca de 42% em relação ao peso médio de portas, atendendo aos requisitos de desempenho estrutural e de segurança. Por outro lado as conclusões do estudo referem que estes componentes podem ser fabricado a custos acessíveis [49].

2.6.3.3.2.3. Projeto Ultra Light Steel Auto Suspension (ULSAS)

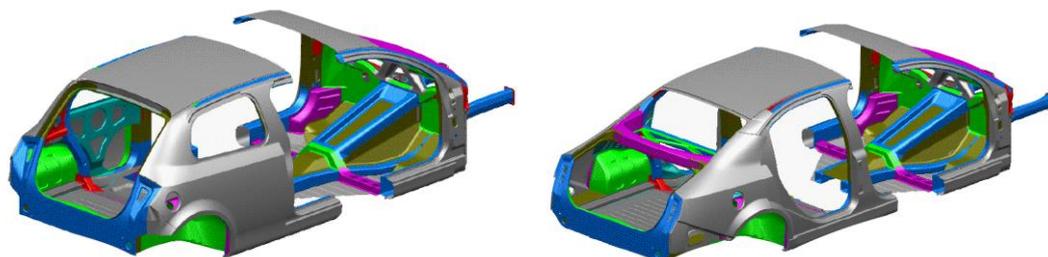
O Projeto ULSAS foi desenvolvido com o objetivo de demonstrar a possibilidade de produção de suspensões mais leves para automóveis. De acordo com os resultados deste projeto, os cinco conceitos de *design* de suspensão ULSAS, permitem reduções de peso até 34% em relação aos sistemas convencionais em aço, e até 30% em relação aos sistemas em alumínio, com desempenho igual ou ainda melhor [50].

2.6.3.3.2.4. Projeto Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts (ULSAB-AVC)

O projeto USAB-AVC cujo objetivo foi desenvolver uma filosofia de projeto alternativa, no desenvolvimento de diferentes modelos de automóveis, procurando reduzir custos comparativamente com abordagens anteriores, otimizando os seguintes requisitos:

- Comportamento ao impacto;
- Peso;
- Desempenho estrutural;
- Design com plataforma comum.

Na Figura 2.49 estão ilustradas as estruturas dos modelos desenvolvidos neste projeto, de 3 e 4 portas.



a) Automóvel de 3 portas (C-Class)

b) Automóvel de 4 portas (PINGV-class)

Figura 2.49 Dois dos modelos desenvolvidos no projeto ULSAB-AVC [51].

Na Figura 2.50 é possível constatar que os chassis dos modelos da figura anterior apresentam elementos comuns. Este tipo de filosofia de projeto permite uma redução dos custos de projeto, de produção e de montagem.

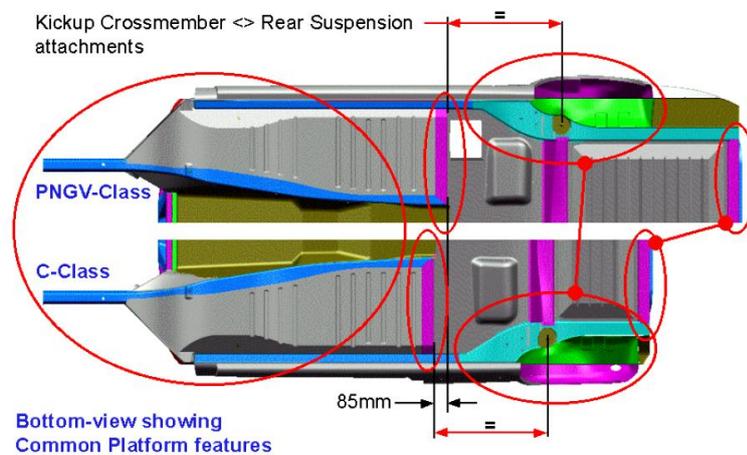


Figura 2.50 Plataformas dos dois modelos ULAB-AVC [51].

2.6.3.3.2.5. Projeto Technology for Carbon fibre reinforced modular Automotive Body Structures (TECABS)

O projeto TECABS [52], é um projeto Europeu, iniciado em 2004, sobre aplicação de materiais compósitos avançados em automóveis, e tem como objetivo validar metodologias de concepção modular para o fabrico de estruturas mais leves, com menos componentes, mas com desempenho similar às estruturas fabricadas em aço.

Desenvolvimento de tecnologias e métodos que permitam o fabrico de uma estrutura automóvel em compósito (BIW) com uma capacidade de produção de 50 unidades por dia e uma redução de 50% do peso com base no uso tecidos de fibra de carbono, usando a moldação por RTM.

Neste projeto foram utilizadas ferramentas de simulação para prever o desempenho em termos de resistência e rigidez e o comportamento ao impacto de um componente acabado ou de uma estrutura, incluindo também módulos de análise do ciclo de vida associados às ferramentas de concepção.

O *design* das estruturas é centrado na redução de peso, na montagem e nos custos. Os materiais utilizados são estruturas compósitas tipo *sandwich* e laminados com fibras de carbono, que são posicionados no interior de um molde e processadas por RTM (Figura 2.51). Para reduzir os custos de produção são utilizadas pré-formas comuns em espumas que permitem diminuir o tempo de fabrico dos componentes.

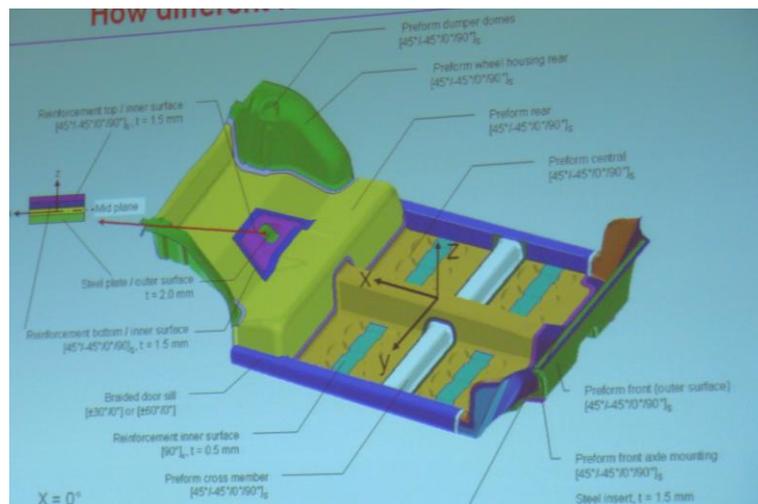


Figura 2.51 Componentes da plataforma TECABS fabricada em materiais compósitos [53].

Na Tabela 2.15 podem ler-se os valores objetivo para a estrutura automóvel desenvolvida em compósito no âmbito projeto TECABS. Dos valores apresentados destaca-se o objetivo em termos de redução de peso e do número de componentes em 50% e 30%, respetivamente, para a mesma rigidez.

Tabela 2.15 Valores objetivo para a estrutura em compósito no âmbito do projeto TECABS [53].

Propriedade	Unidades	Estrutura em aço (BIW)	Objetivo
Peso	kg	203	102
Número de componentes	-	200	60
Rigidez dinâmica em flexão	Hz	40	40
Rigidez dinâmica em torção	Hz	43	43

2.6.3.4. Redução do Impacte Ambiental ao Longo do Ciclo de Vida

A seleção de materiais deve procurar atender ao ciclo de vida do veículo, contemplando as diferentes fases, de produção das matérias-primas, de produção do veículo, da sua utilização e da respetiva reciclagem. É importante de facto que o desenvolvimento de novos materiais contribua para aliviar as pressões sobre o ambiente, no entanto, é preciso ter em consideração o custo, que é um dos fatores determinantes e condicionantes neste processo.

Na Figura 2.52 pode-se observar genericamente a emissão de CO₂ nas três fases do ciclo de vida de um automóvel, o fabrico, a utilização e a reciclagem.

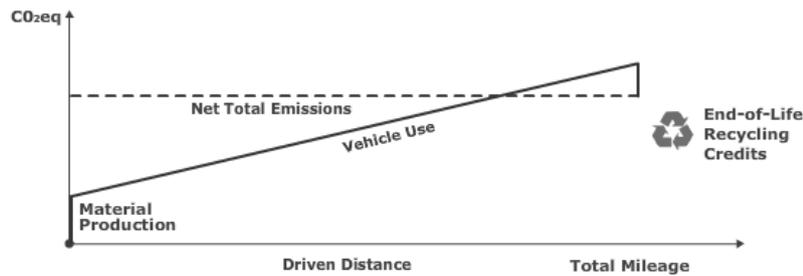


Figura 2.52 Total de emissão de CO₂ Equivalente ao longo do ciclo de vida de um automóvel [54].

Atualmente, os materiais tradicionais, principalmente o aço, apresentam vantagens relativamente aos restantes materiais utilizados na produção de um automóvel, quer em termos tecnológicos, ambientais e de custo. No entanto, ao longo da vida útil do automóvel essa vantagem tende a inverter-se, nomeadamente, quando comparado com materiais substancialmente mais leves. Na Figura 2.53 pode-se observar os níveis médios de emissão de CO₂ na fase de produção de matérias-primas, e na fase de produção de componentes para automóveis, nesta só são referidos os materiais metálicos, aços e alumínio [54].

Material	Current Average GHG Emissions Primary Production
Steel	2.3 – 2.7
AHSS	2.3 – 2.7
Aluminium	13.9 – 15.5
Magnesium (electrolysis)	18 – 24.8
Magnesium (pigeon)	40 – 45
Carbon FRP	21 – 23

Material	Current Average GHG Emissions Secondary Production
Steel	0.7 – 1.0
AHSS	0.7 – 1.0
aluminium	1.4 – 2.0

Figura 2.53 Emissões de CO₂ típicas na obtenção dos materiais e no fabrico automóveis (kg CO₂ eq/kg de material).

2.6.4. Desafios Para o Futuro da Indústria Automóvel

Segundo [55], os veículos do futuro deverão ser confortáveis, leves, não poluentes, silenciosos, seguros, com longo ciclo de vida, recicláveis, elétricos com baixos custos de manutenção e com sistemas de navegação que permitam a poupança de energia. Os desafios para a indústria automóvel são, a substituição de veículos movidos por motores de combustão interna por veículos motorizados, por exemplo, com motores elétricos muito eficientes, a construção de veículos leves com menores necessidades de energia, o desenvolvimento de sistemas de iluminação e de ar condicionado mais eficientes, desenvolvimento de equipamentos de navegação que permitam a redução do consumo de

energia e mais sistemas de armazenamento de energia.

Nos últimos vinte anos as dimensões, o peso e as performances dos automóveis, de uma maneira geral, têm vindo a aumentar. Isto porque os fabricantes procuram satisfazer em primeiro lugar requisitos impostos pelo mercado, nomeadamente, de conforto, de segurança, de inovação tecnológica e de imagem. Mais recentemente os fabricantes têm vindo a aumentar a eficiência dos seus automóveis, por um lado para cumprir com requisitos ambientais, e por outro, pela influência do mercado que vai manifestando algumas preocupações económicas e ambientais.

Segundo [21], apesar das convulsões que o sector automóvel está a atravessar, existem duas tendências dos veículos automóveis que se irão consolidar: 1) os veículos do futuro serão cada vez mais de menor dimensão; 2) o consumo de combustíveis será cada vez menor. A redução da dimensão dos veículos exige mais flexibilidade no design, aerodinâmica e segurança. A utilização de novos materiais, mais leves, é um desafio, uma vez que tem que obedecer à regulamentação em torno da reutilização e reciclagem dos materiais e ter em consideração as condições de desempenho do veículo, em caso de acidente.

Segundo [12], no século XXI, os automóveis devem ser concebidos e projetados para estar em harmonia com as pessoas e a natureza. Desde a segunda metade da década de 1990, as grandes prioridades da indústria automóvel tem sido o desenvolvimento da segurança e de tecnologias mais amigas do ambiente. Em consonância com esta evolução, o conceito de convivência harmoniosa, que é um equilíbrio entre os seres humanos, a natureza e veículos, deverá aumentar de importância na produção de veículos no século XXI. Os campos importantes para a realização desta harmonização são o ambiente, segurança e os sistemas de transporte inteligentes.

No que respeita ao mercado, as necessidades dos clientes são cada vez mais diversificadas, e mudam a um ritmo cada vez mais rápido. Os fabricantes de automóveis têm que ser cada vez mais flexíveis para serem competitivos num sector de forte concorrência, no qual têm que responder às necessidades e tendências do mercado e às exigências normativas. Para tal é cada vez mais importante incorporar materiais com custos inferiores, adquiridos numa rede de fornecedores a nível mundial, utilizar plataformas comuns a vários modelos, para aumentar a eficiência do investimento e reduzir os custos de desenvolvimento, e recorrer ao *outsourcing* para aumentar a velocidade de desenvolvimento.

No que respeita ao ambiente, a sua proteção passa em boa parte pela redução das emissões de escape, utilizando energias provenientes de fontes renováveis, pela redução do consumo de combustível e pela reciclagem, entre outros. A redução de peso dos veículos é um dos caminhos para melhorar a economia de combustível, porque o peso do veículo é responsável por cerca de 30% do consumo de combustível. Aplicação de aços de alta resistência e ligas de alumínio nos componentes estruturais, bem como plásticos em painéis da carroçaria contribui para a redução do peso do veículo. Além disso, a aplicação de materiais de maior resistência a componentes do motor e do sistema de transmissão

contribui para reduzir o tamanho e o peso [12].

Relativamente à segurança, a sinistralidade automóvel é uma das causas que vitima muitas pessoas no mundo inteiro. Os construtores têm dedicado muitos recursos no aumento da segurança dos veículos, no entanto continua e continuará a ser uma das áreas a desenvolver no futuro, envolvendo cada vez mais tecnologias multidisciplinares. Neste domínio os desafios passam pela conjugação dos sistemas de segurança ativos e passivos, conjugados com sistemas avançados de informação, comunicação e visão inteligente. Os acidentes de trânsito são analisados e reproduzidos com o objetivo de desenvolver novos sistemas de segurança, como por exemplo o sistema automático de travagem, para reduzir a velocidade de colisão, bem como com o sistema de paragem de emergência [12].

Segundo [56], as orientações para a evolução da indústria automóvel centram-se no nível de concorrência, nomeadamente das economias emergentes; no ciclo de vida dos produtos; em questões ambientais e de sustentabilidade e nos valores e aceitação do público. Para responder a estes desafios, a colaboração entre empresas nas vertentes de investigação e desenvolvimento, bem como na produção, é de grande importância a competitividade global da indústria automóvel europeia, cujo desenvolvimento pode ser dividido em quatro áreas principais:

1) Fabrico robusto e flexível

Os sistemas de produção no futuro terão necessidade de ser flexíveis e reconfiguráveis, mesmo com um *mix* de produtos mais complexos e fragmentados, graças aos equipamentos cada vez mais inteligentes e autónomos e às interfaces *standard*.

2) Integração da cadeia de abastecimento

A cadeia de abastecimento é de extrema importância quando se trata de fornecimento de soluções eficientes de produção. Existem várias questões que terão que ser otimizadas, como o fluxo de informação e desenvolvimento de sistemas de rastreamento mais eficazes.

3) Produção Eco e Sócio Sustentável

A Produção de veículos deve ser sustentada por uma tendência para a diminuição do consumo de energia e eficiência dos recursos nos processos de produção e reciclagem.

4) Engenharia de produção virtual

A quarta área assenta no uso de ferramentas virtuais, tanto para apoiar a engenharia de produção, mas também para proporcionar uma forte ligação entre a fase de desenvolvimento de produtos e a fase de produção. Em termos de visão estratégica a pesquisa centra-se em conceitos inovadores e em tecnologias de produção capazes de permitir a reutilização eficiente. Outro vetor centra-se nos novos materiais e em novas tecnologias de processamento que permitam a produção de veículos mais leves, com melhor desempenho, maior qualidade e com novas funcionalidades, mantendo ou reduzindo o custo e investimento.

2.7. Materiais e Tecnologias de Processamento na Indústria Automóvel

O progresso técnico e a gestão ambiental não são objetivos incompatíveis, mas desde o início da revolução industrial, a aceleração do desenvolvimento industrial tem sobrecarregado o meio ambiente, com consequências locais e globais que não podem ser ignorados.

Há uma pressão crescente para reduzir e reverter este impacto ambiental. Isso requer processos que sejam menos tóxicos e produtos que sejam mais leves, que consumam menos energia e mais fáceis de reciclar, e isto deve ser alcançado sem comprometer a qualidade do produto. As novas tecnologias devem (e podem) ser desenvolvidas, para permitir um aumento da produção com menor impacto sobre o meio ambiente. A preocupação com o meio ambiente deve estar presente na fase de projeto, tendo em vista o ciclo de vida do produto, que inclui o fabrico, distribuição, utilização e a reciclagem. [57].

A gama de materiais disponíveis no mercado tem vindo a expandir-se rapidamente, estabelecendo um universo de possibilidades tão alargada quanto desconhecida por muitos. Segundo [56], o design inovador, muitas vezes, significa a exploração imaginativa das propriedades oferecidas pelos materiais, novos ou melhorados. O número de materiais de engenharia é muito vasto, pelo que o projetista deve seleccionar, a partir de uma gama muito vasta, o material mais adequado à sua aplicação, o que, sem orientação, pode ser uma tarefa muito difícil, levando muitas vezes, ou na maior parte delas, à tentação de escolher o material que é "tradicional" para as aplicações similares. Na Figura 2.54 pode-se observar a evolução dos materiais de engenharia com o tempo, bem como a sua importância relativa, num gráfico em que a escala de tempo não é linear. A variação da importância relativa é muito mais rápida hoje do que em qualquer outra época da história.

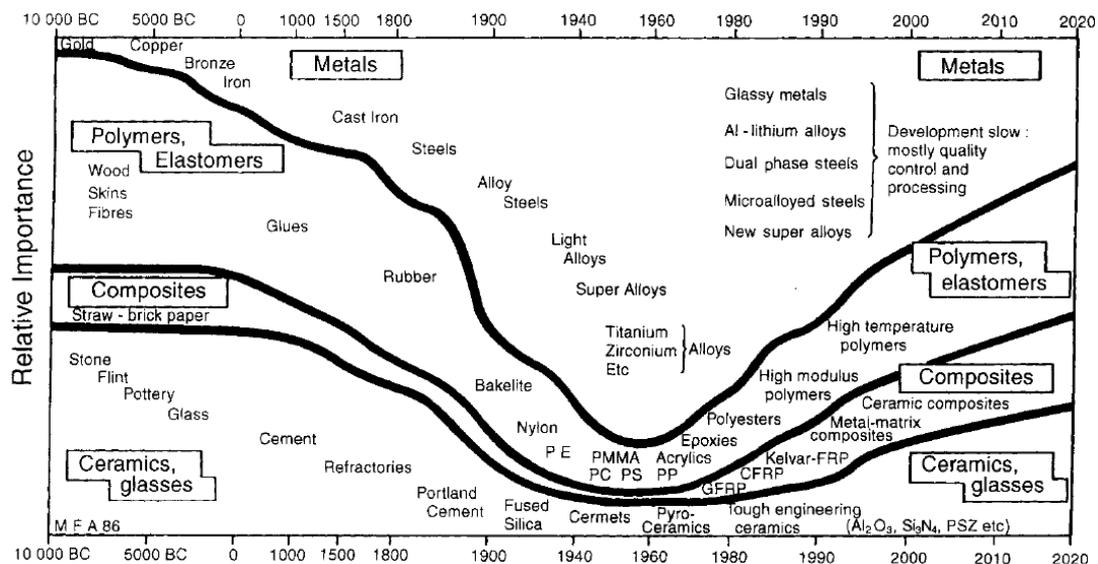


Figura 2.54 Visão global da evolução dos materiais de engenharia [57].

O preço de mercado de um produto tem diversas contribuições. Um deles é o custo dos materiais de que o produto é feito, mas há também o custo do seu desenvolvimento, de fabrico, de comercialização, o valor percebido associado ao produto, e naturalmente a oferta e a procura.

Quando o custo dos materiais representa uma grande parte do valor de mercado do produto final, os fabricantes procuram otimizar a compra dos materiais para aumentarem o retorno da sua atividade. Quando, pelo contrário, o custo dos materiais representa uma pequena parte do valor de mercado do seu produto, os fabricantes procuram materiais que possam melhorar o desempenho do produto, sendo o seu custo uma preocupação de segundo plano.

Na Figura 2.55 pode-se ver a relação do custo por kg entre diferentes materiais e entre diferentes produtos.

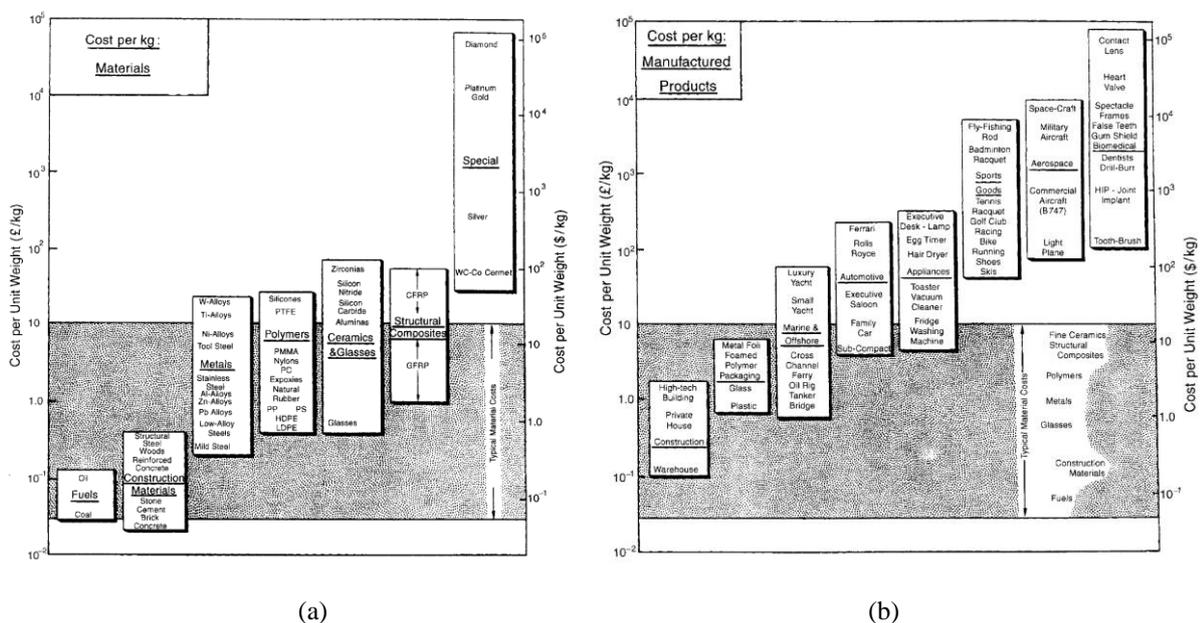


Figura 2.55 Diagramas de custo de materiais por unidade de peso (a) e diagrama de custo de produtos por unidade de peso (b) [57].

Segundo [12], na década de 1950 foram desenvolvidos aços com boa conformabilidade, seguindo-se o desenvolvimento de chapas de aço inoxidável na década de 1960.

Nestas décadas, as tecnologias de produção em massa foram desenvolvidos por causa do aumento da procura de veículos. Nas décadas de 1970 e 1980, os fabricantes procuraram baixar o consumo de combustível por causa das duas crises do petróleo, baixando o peso dos veículos através da utilização de chapas de aço de alta resistência de menor espessura.

Na década de 1990, as questões ambientais e de segurança tornaram-se preocupações primárias na indústria automóvel, o que motivou os fabricantes a otimizar o peso dos veículos, com a utilização de ligas de alumínio em vários painéis de carroçaria.

Nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidos materiais para motores, sistemas de transmissão, componentes de suspensão e componentes estruturais para melhorar a durabilidade e reduzir o peso. Esses materiais são principalmente chapas de aço de alta resistência e ligas de alumínio. As ligas de magnésio têm vindo a ser cada vez mais aplicadas em componentes do sistema de direção. Os materiais compósitos com reforço de fibra de carbono começaram a ser utilizados em veios de transmissão.

A Figura 2.56 mostra a utilização de materiais na indústria automóvel ao longo dos anos em função das condições sociais e das exigências do mercado.

	1940	1960	1970	1980	1990
Social conditions Market trends	Localization, reliability	High speed, mass production	Emissions, safety, noise	Energy savings	High performance
Body	Deep drawing steel Galvanized steel FRP-roof panel	Reinforced glass Laminated glass	Anti-corrosion steel Urethane bumper PP bumper	HSS Plastic headlamp Al outer panel	2-layer galvanized steel sheet Plastic fuel tank Super olefin elastomer bumper High lubrication coated steel sheet UV blocking glass
Engine	Ductile iron crankshaft Al cylinder head Al piston FRP head cover	Oxidation catalysis 3-way catalyst O ₂ sensor Sintered alloy valve seat High Si DCI exhaust manifold	Micro-alloyed steel crankshaft Sinter-forged con'rod Al cylinder block Dumper steel oil pan Plastic air cleaner case	NO _x storage reduction catalyst Metal honeycomb catalyst Free cutting steel crankshaft Mg head cover Plastic intake manifold Stainless steel exhaust manifold Laser clad valve seat Ceramic turbocharger Plastic cylinderhead cover	
Chassis	Al differential gear case HSS suspension member Induction hardened knuckle arm	Al wheel Al steering gear housing	Micro-alloyed beam, knuckle, arm Mg steering bracket Al forged upper arm Non-asbestos brake pad		
Drive-train	Al transmission case Pb added free cutting steel gear	S added free cutting steel gear	Non-asbestos clutch facing Non-asbestos A/T lining	Mg transmission case Anti-slip lining Composite drive shaft	

Figura 2.56 Evolução da utilização dos materiais na indústria automóvel ao longo das últimas décadas [12].

A proporção dos materiais utilizados em veículo de passageiros, típica para o mercado japonês é ilustrada na Figura 2.57. O aço representa a maior proporção, embora a sua percentagem tem vindo a diminuir ao longo dos últimos 25 anos. No entanto, o volume de chapas de aço de alta qualidade, tais como aços de alta resistência com excelente resistência ao choque, e chapas de aço revestidas com proteção anti corrosão tem sido crescente.

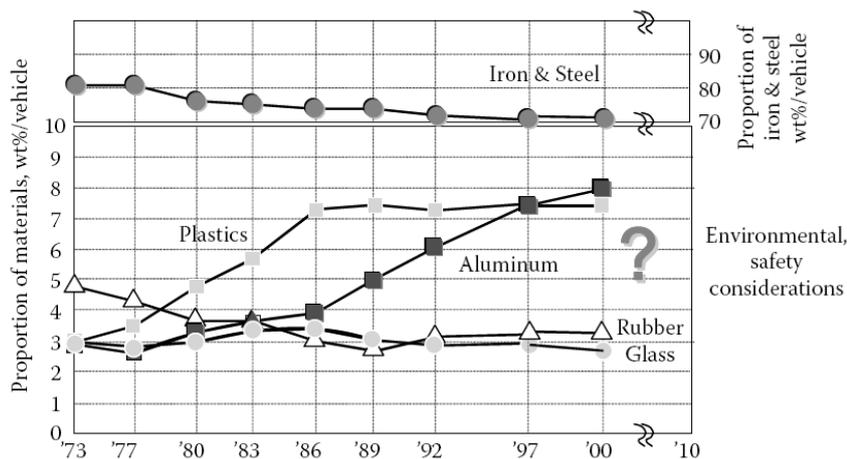


Figura 2.57 Evolução da incorporação de diferentes materiais no fabrico de automóveis de passageiros [12].

O aço deverá manter-se em primeiro lugar por algum tempo. Por outro lado, o uso de ligas de alumínio para fazer blocos de cilindros, rodas e outros componentes tem vindo a aumentar rapidamente devido à procura de veículos mais leves. As chapas de alumínio têm vindo a ser nos últimos anos cada vez mais aplicadas em painéis exteriores de carroçarias.

Em termos estruturais a aplicação do alumínio e do magnésio tem vindo a aumentar, e têm sido reconhecidos como alternativas mais leves, embora mais caras. Apesar da utilização dos plásticos também constituir uma alternativa para reduzir o peso dos veículos, e em simultâneo, permitir maior liberdade de design dos componentes exteriores, ainda assim, apresentam algumas limitações, cuja resolução constitui um desafio para os próximos anos.

Segundo [31], a espessura do aço utilizado em painéis exteriores da carroçaria tem vindo a ser reduzida ao longo dos anos, de 0,9 mm na década de 1930, para 0,75 mm em 2003.

Foi durante a década de 1980 que mais influências significativas começaram a surgir, a começar com a utilização crescente de aços zincados, para reduzir os problemas de corrosão existentes nos automóveis construídos até essa altura. Durante este período, outras influências foram surgindo, originando regulamentos e normas, por exemplo de segurança, com vista à proteção dos ocupantes e dos peões. A primeira legislação foi criada nos EUA, limitando o consumo de combustível em parte como resultado da crise do petróleo de 1973 e também para pacificar um “lobby” antipoluição crescente, o que resultou na regulamentação designada por CAFE (*Corporate Average Fuel Economy*). Regulamentação, que impunha metas específicas de consumos, que todas as organizações de comércio de automóveis nos EUA tinham que cumprir. [31].

Os fabricantes foram otimizando o desenvolvimento dos veículos, através de estruturas mais complexas, utilizando materiais com melhor desempenho, normalmente aços, como se pode observar pela Figura 2.58.

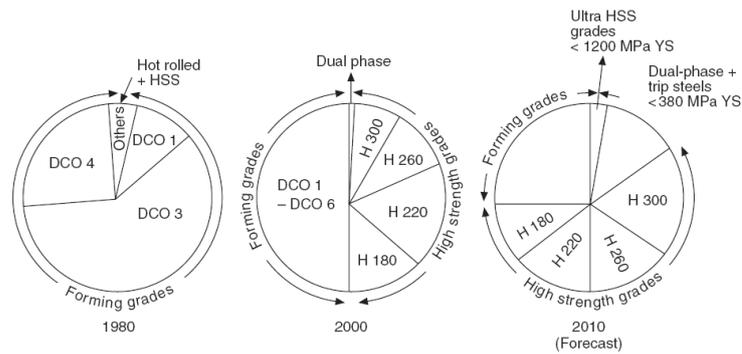


Figura 2.58 Aços utilizados na indústria automóvel ao longo dos últimos 30 anos [31].

Os fabricantes procuram desenvolver os seus veículos de passageiros, de mercadorias, de transporte público ou privado, com melhor desempenho, mas mais leves. De facto, o peso é um fator importante a ter em consideração em termos de desempenho de um veículo, nomeadamente em termos do seu desempenho ambiental, tal como já foi referido anteriormente.

Neste ponto serão descritos de uma forma muito sucinta os materiais, as suas propriedades e as respetivas tecnologias de processamento utilizadas na indústria automóvel, em particular no fabrico de carroçarias de automóveis de passageiros. Serão também ilustrados exemplos de aplicação e aspetos relacionados com a reciclagem.

2.7.1. Aços

Apesar da procura de materiais alternativos, o aço e suas ligas continuam a ser os materiais mais utilizados no fabrico de estruturas automóveis, apresentando como principais vantagens: baixo custo; facilidade de conformação; facilidade de ligação; facilidade de reciclagem; boa capacidade de absorção de energia.

Apesar das vantagens referidas, apresenta algumas desvantagens, em particular: peso superior ao de outros materiais; fraca resistência à corrosão, se não revestidos.

Actualmente a gama de aços utilizados na indústria automóvel abrange várias classes, com valores de tensão de cedência compreendidos entre os 140 MPa e os 1200 MPa.

Segundo [58], os aços mais utilizados atualmente na indústria automóvel são designados de acordo com os seguintes tipos básicos: Mild (*Mild steel*); BH (*Bake Hardenable*); IF (*Interstitial Free*); DP (*Dual Phase*); CP (*Complex Phase*); SF (*Stretch Flange*); FB (*Ferrite Bainite*); HT (*Heat Treatable*); MSLA (*Medium Strength Low Alloy*); HSLA (*High Strength Low Alloy*); TRIP (*Transformed Induced Plasticity*); MS (*Martensitic*); MnB (*Boron*); LIP (*Light Induced Plasticity*)

Os construtores de automóveis têm vindo a procurar diminuir o peso dos seus modelos, através de

geometrias estruturais mais complexas, que permitem a utilização de chapas a aço com espessuras mais reduzidas, logo mais leves.

Segundo [59], a seleção de um material, aço ou alumínio, para uma aplicação específica estrutural ou não, é regida por oito parâmetros fundamentais: Fator de forma, que se refere ao grau de otimização de forma parcial; valor da tensão de cedência do material; valor de resistência à tração do material; valor do módulo de *Young*; coeficiente de *Poisson*, densidade do material; custos, do material, de desenvolvimento e de produção e parâmetros de produtividade (conformabilidade, soldabilidade, manuseamento).

2.7.1.1. Propriedades

Os dois tipos de aços mais usados no fabrico de estruturas de automóveis são os de média resistência e baixa liga (MSLA) e os de alta resistência e baixa liga (HSLA). Estes aços apresentam valores de tensão de cedência entre os 180 MPa e os 300 MPa, e, entre 250 MPa e os 500 MPa, respetivamente. Neste caso o aumento da resistência é conseguido através da adição de pequenas quantidades de titânio ou nióbio durante a sua produção.

Os aços bifásicos (DP) apresentam valores de tensão de cedência entre os 500 MPa e os 1000 MPa.

Os aços de plasticidade induzida por transformação (TRIP) apresentam valores de tensão de cedência entre 500 os MPa e os 800 MPa. A resistência aumenta por encruamento induzido durante o processo de conformação.

Os aços de fase complexa (CP), tem uma microestrutura multifásica com fases mais duras do que a austenítica, o que lhe confere limites de resistência entre os 800 MPa e os 1200 MPa.

Na Figura 2.59 pode-se observar o gráfico de resistência à tração/alongamento total para os diferentes aços, atrás referidos.

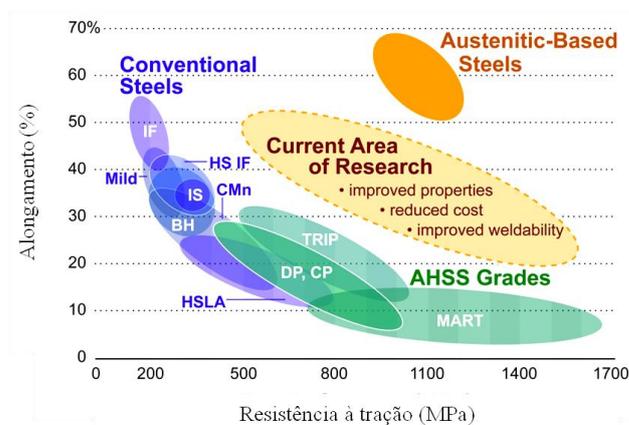


Figura 2.59 Gráfico de resistência à tração vs alongamento total para diferentes aços. [60].

Na Tabela 2.16 estão compiladas algumas propriedades de alguns exemplos de aços utilizados na indústria automóvel.

Tabela 2.16 Propriedades típicas de aços utilizados na indústria automóvel [60].

Designação do Aço	Tensão de Cedência	Tensão de Ruptura	Deformação Total
	(σ_{ced})	(σ_{rot})	(%)
HSLA	350	450	23-27
DP 300/500	300	500	30-34
DP 350/600	350	600	24-30
TRIP 450/800	450	800	26-32
DP 500/800	500	800	14-20
CP 700/800	700	800	10-15
DP 700/1000	700	1000	12-17
MS 1250/1520	1250	1520	4-6

2.7.1.2. Processos de Transformação

Os aços são utilizados na generalidade dos componentes de veículos que são obtidos por diversos processos de transformação, desde processos de fundição, para o fabrico de blocos de motores, forjagem, para fabrico de pistões, componentes estes que podem ser finalizados por processos de maquinagem. Outro tipo de componentes como por exemplo carroçarias ou componentes estruturais, podem ser fabricados através de processos de estampagem e ligados por processos de soldadura. Os componentes em aço de alta resistência (*Advanced High Strength steel*, AHSS) podem ser ainda estampados pelo processo *hydroforming*, em chapas ou perfis, no qual que o material é comprimido contra o molde por água sob pressão [61].

2.7.1.3. Aplicações Típicas

Tal como já foi referido, a aplicação dos materiais, neste caso em particular dos aços, obedece a critérios específicos, o que justifica uma utilização de diferentes materiais no fabrico dos automóveis. Dado que os requisitos de segurança são particularmente importantes, refira-se a utilização de aços de alta resistência em zonas de colisão, como por exemplo, na plataforma, nas longarinas, nos pilares A e B e para-choques, porque apresentam boa capacidade de absorção de energia.

Na Figura 2.60 ilustram-se dois exemplos de estruturas de automóveis constituídas por vários aços, de acordo com os requisitos referidos.

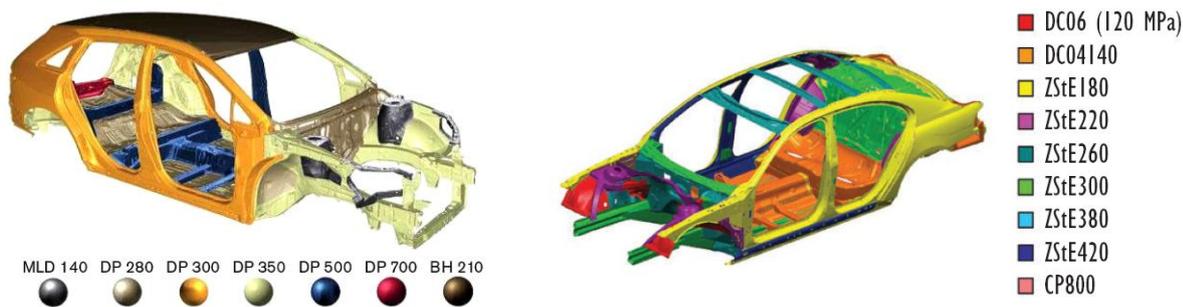


Figura 2.60 Diferentes aços utilizados na construção de estruturas de automóveis [42].

2.7.2. Alumínio

Antes da Segunda Guerra Mundial o alumínio foi utilizado em veículos, principalmente em painéis de carroçaria. Desde essa altura a sua utilização tem vindo a ser alargada a outros componentes, como por exemplo, jantes, componentes de motores, estruturas de suspensão, e, inclusivamente, chassis de automóveis.

O alumínio tem uma densidade que é cerca de um terço da densidade do aço, aproximadamente, pelo que a sua utilização na indústria automóvel é interessante, no entanto o seu módulo de elasticidade é apenas de 69 GPa, sendo consideravelmente menor que o do aço, que é de 210 GPa. Isso obriga a aumentar a espessura dos componentes para compensar a rigidez.

Atualmente existem várias ligas de alumínio, cujos valores de resistência à tração variam entre os 340 MPa e os 620 MPa [58]. Em termos de aplicação na indústria automóvel, o alumínio apresenta as seguintes vantagens: baixa densidade, facilidade de manuseamento, excelente resistência à corrosão e potencial para atingir uma resistência mecânica similar à de alguns aços. No entanto, tem algumas desvantagens, tais como, preço mais elevado; menor resistência mecânica; maior dificuldade de ligação por métodos de soldadura, em relação ao aço.

As ligas de alumínio são obtidas por adição de elementos de liga específicos ao alumínio durante a sua fusão, principalmente o cobre, manganês, silício, magnésio e zinco, e são classificadas de acordo com:

- 1) Lingotes de alumínio adequados para fundição;
- 2) Chapas, barras, tubos e perfis extrudidos, para conformação (Figura 2.61).

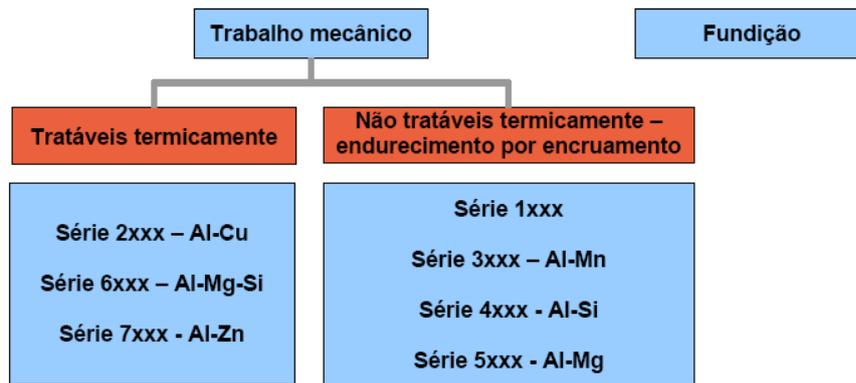


Figura 2.61 Classificação das ligas de alumínio [58].

Além disso, os materiais fundidos e forjados podem ser subdivididos de acordo com o método pelo qual as suas propriedades mecânicas são melhoradas em:

- a) As ligas não tratáveis termicamente, cujo endurecimento é feito por encruamento pelo trabalho a frio, podem ser fornecidas como fabricadas (F), recozidas (O) ou endurecidas por deformação a frio (H1, H2, H3);
- b) Ligas tratáveis termicamente, podem ser fornecidas como fabricadas (F) ou recozidas (O), ou, dependendo da liga, e função do tratamento térmico (T3, T4, T5, T6, T8).

Na Tabela 2.17 resumem-se as séries de alumínio e as respectivas características.

Tabela 2.17 Séries de alumínios utilizados na indústria automóvel e suas características [60].

Série	Constituição	Características
Série 1xxx	Alumínio comercialmente puro ($\geq 99\%$)	Excelente resistência à corrosão e condutividade térmica.
Série 2xxx	Alumínio com adição de cobre (Al-Cu)	Menor resistência à corrosão, possibilidade incremento de tensão limite de elasticidade por tratamentos térmicos.
Série 3xxx	Alumínio com adição de manganês (Al-Mn)	Mantém a sensibilidade positiva à velocidade de deformação, o limite de adição de Mn é de 1.5%;
Série 4xxx	Alumínio com adição de silício (Al-Si)	A adição de Si até 12% baixa o ponto de fusão.
Série 5xxx	Alumínio com adição de magnésio (Al-Mg)	Apresentam excelente resistência à corrosão em ambientes marítimos e excelente soldabilidade.
Série 6xxx	Alumínio com adição de magnésio e silício (Al-Mg-Si):	Apresentam boa conformabilidade, boa resistência à corrosão e média resistência mecânica média.
Série 7xxx	Alumínio com adição de zinco (Al-Zn)	São as ligas com a maior resistência, cuja utilização principal é a indústria aeronáutica.
Série 8xxx	Alumínio com adição de outros elementos.	—

2.7.2.1. Propriedades

Segundo [31], as ligas de alumínio da série 5xxx são usadas no fabrico de painéis de carroçaria devido ao custo relativamente baixo e à sua boa conformabilidade.

Apesar de terem um custo mais elevado as ligas da série 6xxx (6016, em particular), têm sido usadas pela maioria dos fabricantes de automóveis, porque oferecem uma combinação de características favoráveis, tais como maior taxa de alongamento, resistência à indentação (*dent*) e superfície consistente. O que permite obter uma qualidade de acabamento similar à dos painéis exteriores construídos em aço.

No sentido de baixar custos, alguns projetos atuais, apresentam painéis internos em ligas da série 5xxx e painéis exteriores com ligas da série 6xxx.

A indústria tem vindo a desenvolver outras ligas de alumínio, das quais se resumem na Tabela 2.18 as propriedades de algumas das desenvolvidas mais recentemente.

Tabela 2.18 Propriedades típicas de ligas de alumínio de uso corrente na indústria automóvel [31].

Liga AA DIN	Tratamento	σ_{rot} (MPa)	$\sigma_{p0,2}$ (MPa)	Deformação na rotura (%)	<i>r</i> (valor médio)	<i>n</i> 5% (valor médio)
AA6016 AlMg0.4Si1.2	T4	210	105	26	0,61	0,30
AA6111 AlMg0.7Si0.9Cu0.7	T4	290	160	25	0,55	0,28
AA6009 AlMg0.5Si0.8CuMn	T4	250	130	24	0,64	0,29
AA5251 AlMg2Mn0.3	H22	190	120	18		
AA5754 AlMg3	O/H11	215	110	23	0,70	0,35
AA5182 AlMg5Mn	O/H11	270	140	24	0,80	0,33
AA6022 AlMg0.6Si1.3	T4	270	150	26	0,60	0,26
AA6181A AlMg0.8Si0.9	T4	230	125	24	0,65	0,28
AA5022 AlMg4.5Cu	O/H11	275	135	28	0,70	0,34
AA5023 AlMg5.5Cu	O/H11	285	130	29	0,70	0,36
Pe-600	O/H11	270	140	29	0,72	0,34

r - Fator de conformabilidade (Coeficiente de Lankfort). Relação entre a deformação na direção da largura e da espessura.
n - Expoente de encruamento (equação de Hollomon). Influência do tamanho do grão na ductilidade.

Os painéis da carroçaria de automóveis, como por exemplo os das portas, são constituídos por uma estrutura dupla, com painel externo e painel interno. Para os painéis exteriores, são utilizados os

materiais com resistência mais elevada. Para os painéis interiores, são utilizados materiais mais fáceis de conformar, para permitir o fabrico de formas mais complexas [12].

Existe no mercado uma espuma de alumínio poroso, designada por Alporas® (Figura 2.62), com uma densidade entre 0,2 e 0,3 g/cm³. Na Tabela 2.19 são apresentadas algumas das suas propriedades.



Figura 2.62 Placa de Alumínio Alporas® [62].

Tabela 2.19 Propriedades típicas do Alporas® [63].

Propriedades	Unidades	Valor
Peso específico (médio)	g/cm ³	0,25
Módulo de <i>Young</i>	GPa	0,7
Módulo de corte	GPa	0,3
Tensão de corte	MPa	1,2
Tensão de rotura	MPa	2,5
Resistência à compressão	MPa	1,5
Tensão limite de proporcionalidade (Rp 0,2)	MPa	1,5
Resistência à flexão	MPa	2,8
Coefficiente de expansão térmica	10 ⁻⁶ /K	21-23
Coefficiente de <i>Poisson</i>	-	0,33
Absorção de energia específica (40% compressão)	kJ/kg	5,5

Segundo [41], este material poderá ser utilizado em vários componentes de automóveis, como ilustrado na Figura 2.63, como material do núcleo de estruturas *sandwich*, que podem ter as camadas exteriores (peles) em alumínio, cobre, titânio, ou outro material.

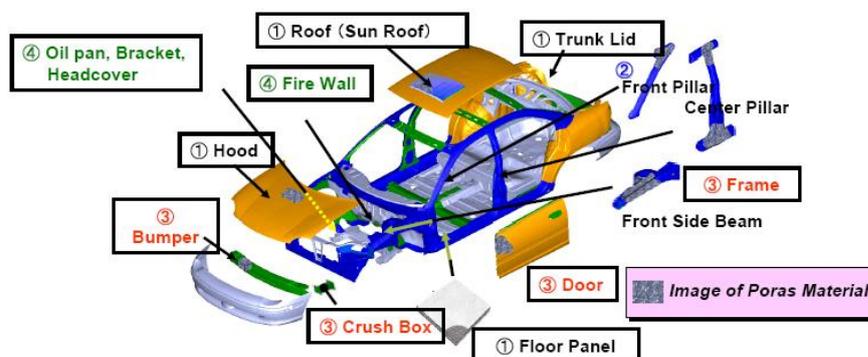


Figura 2.63 Potencial de aplicações de estruturas *sandwich* de Alporas®/Alumínio em veículos [41].

A aplicação deste tipo de material permite reduzir o peso dos veículos, reduzir as dimensões dos componentes dos pilares, o que permite melhorar a visibilidade e o aproveitamento de espaço, aumentar a capacidade de absorção de energia em caso de impacto e melhorar o isolamento acústico.

2.7.2.2. Processos de Transformação

O fabrico de componentes para carroçarias de automóveis é feito através dos seguintes processos:

- a) Processos de fundição: fundição injetada; e fundição em areia;
- b) Processos de conformação: hidro conformação (*hydroforming*); conformação a quente (*hotforming*); estampagem; extrusão e corte.
- c) Processos de ligação: soldadura (MIG, e por pontos); rebitagem; aparafusamento e colagem (adesivos estruturais).

A Figura 2.64 mostra os processos de fabrico dos diferentes componentes de alumínio utilizados nos modelos XK e XJ da Jaguar.

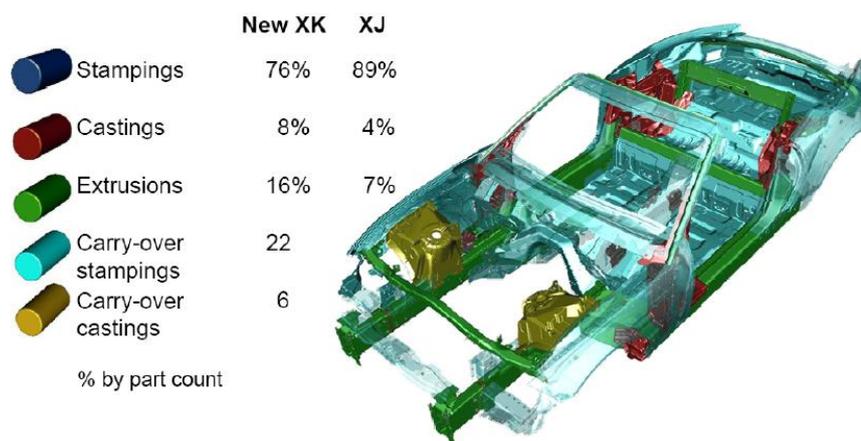


Figura 2.64 Processos de fabrico de diferentes componentes em alumínio utilizados nos modelos XK e XJ da Jaguar® [64, 65].

2.7.2.3. Aplicações Típicas

O alumínio tem vindo a tornar-se uma alternativa ao aço, principalmente, em aplicações como painéis de carroçaria, componentes de suspensão, componentes do motor e componentes estruturais.

A utilização de componentes de carroçaria em alumínio, como painéis exteriores, permitiu por exemplo à BMW® reduzir cerca de 20 kg no peso do atual modelo da serie 5 da BMW®, face à utilização de painéis de aço. Outro exemplo de relevo é a estrutura de alumínio *Space Frame ASF* da marca Audi®, usada nos modelos A2 e A8 (Figura 2.65). Esta estrutura utiliza perfis de alumínio

extrudido e componentes de alumínio vazado. Este tipo de construção permitiu uma redução significativa do peso da estrutura em cerca de 40% em relação a uma estrutura tradicional em aço.

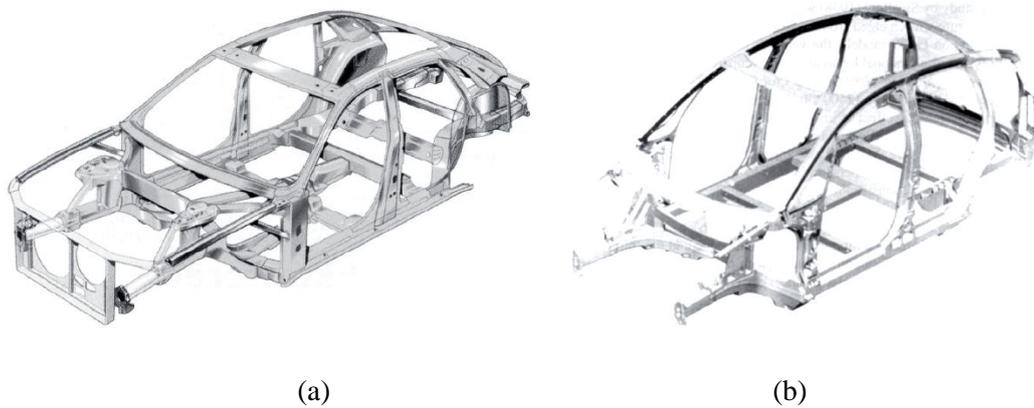


Figura 2.65 Estrutura ASF (Audi® Space Frame), utilizada nos modelos A8 (a) e A2 (b).

Na Figura 2.66 pode-se observar a utilização das ligas de alumínio num dos últimos modelos desportivos da Mercedes-Benz®, o modelo desportivo SLS AMG, versão para 2011, cujo peso da estrutura é de 241 kg.

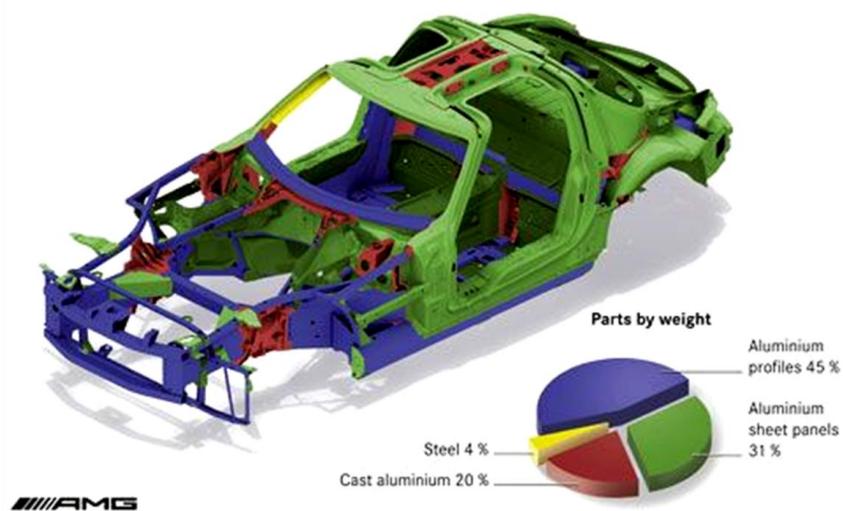


Figura 2.66 Utilização de alumínio na estrutura do Mercedes-Benz® SLS AMG 2011.

2.7.3. Magnésio

O magnésio é o mais leve de todos os metais de engenharia, com um peso específico de apenas $1,74 \text{ g/cm}^3$, é 35 % mais leve que o alumínio e mais de 75% do que o aço.

É produzido através da eletrólise de cloreto de magnésio da água do mar, ou através da redução metal térmica de óxido de magnésio com silicone. Cada metro cúbico de água do mar contém cerca de 1,3 kg de magnésio.

A temperatura de fusão e de ebulição são de 650°C e 1100°C , respetivamente. O valor de resistência mecânica varia entre 100 MPa e 120 MPa, podendo aumentar para valores entre 150 e os 190 MPa, através de processos de deformação plástica, nomeadamente por laminagem. O módulo de Elasticidade é baixo (47 GPa), pelo que normalmente se usa sob a forma de liga, sendo as mais comuns as ligas de Mg-Al-Zn, Mg-Zr-Zn, e Mg-Th-Zr, que são suscetíveis de tratamento térmico. O magnésio é um material frágil, admitindo deformações plásticas apenas a quente.

As ligas de magnésio mais comuns são baseadas na adição de alumínio, manganês e zinco. A designação das ligas de magnésio inclui letras e números, de acordo com o seguinte:

- As primeiras duas letras da designação indicam os principais elementos de liga (A para o alumínio, E para o elemento de terras raras, H para o tório, K para o zircónio, M para o manganês, S para o silício, W para o ítrio, Z de zinco);
- Os dois números seguintes indicam as percentagens desses elementos de liga.

O Magnésio é um dos materiais cuja aplicação tem vindo a aumentar na indústria automóvel, com as seguintes principais vantagens: densidade muito baixa; possibilidade de ser utilizada em componentes com espessura reduzida; possibilidade de integrar os componentes fundidos; apresenta uma excelente maquinabilidade. No entanto, existem algumas limitações, tais como o facto ser viável principalmente em fundidos, uma vez que as chapas de magnésio extrudido não estão facilmente disponíveis e têm um custo elevado para volumes médios e altos.

Este material forma uma película superficial de hidróxido de magnésio que protege as camadas subjacentes, quando exposto ao ar húmido. Não pode ser vazado para moldações de areia verde, já que reage com a humidade presente na areia, pelo que se torna necessária a adição de inibidores desta reação, tais como o ácido bórico, ácido sulfúrico ou outros.

Em relação aos tratamentos térmicos, podem ocorrer alguns problemas, tais como a queima do magnésio a partir da superfície, a existência de pó de cor cinzento/preto na superfície ou ainda a existência de vazios, tanto superficiais como interiores, os quais podem contribuir para o colapso estrutural das peças.

2.7.3.1. Propriedades

A Tabela 2.20 e Tabela 2.21 resumem as propriedades mecânicas típicas das ligas de magnésio utilizadas na indústria automóvel.

Tabela 2.20 Composição e propriedades mecânicas típicas de ligas de Magnésio de uso corrente na indústria automóvel [adaptado de 31].

	Unidades	AZ91	AM60	AM50
Composição química				
Al	%	9	6	5
Zn	%	0,7		
Mn	%	0,2	0,3	0,3
Propriedades Mecânicas Típicas				
Tensão de rotura	MPa	240	225	210
Tensão limite de proporcionalidade (Rp 0,2)	MPa	160	130	125
Deformação na rotura	%	3	8	10

A liga de fundição em areia AZ91C já foi largamente substituída pela liga AZ91E pelo seu alto grau de pureza, que apresenta uma taxa de corrosão de cerca de 100 vezes superior em ensaios de corrosão acelerada através de ensaios de névoa salina [31].

Tabela 2.21 Propriedades mecânicas de ligas de Magnésio recentemente desenvolvidas [adaptado de 65].

Propriedades	Unidades	AZ91	AE42	ACM522	MRI153M	MRI230D	AJ6x
Tensão de rotura	MPa	260	240	200	250	235	240
Tensão de cedência	MPa	160	135	158	170	180	143
Deformação na rotura	%	6	12	4	6	5	7
Tensão de rotura (150 °C)	MPa	160	160	175	190	205	166
Tensão de cedência (150 °C)	MPa	105	100	138	135	150	116
Deformação na rotura (150 °C)	%	18	22	-	7	16	27
Tensão de cedência (em compressão)	MPa	160	115	-	170	180	-
Tensão de cedência (em compressão a 150 °C)	MPa	105	85	-	135	150	-
Resistência ao impacto	J	8	12	-	8	6	-
Resistência à fadiga	MPa	100	80	-	120	110	-
Taxa de corrosão	mg/cm ² dia	0,11	0,12	-	0,09	0,10	0,11

Para além das ligas de magnésio existem compósitos de magnésio reforçado com fibras (Figura 2.67) curtas e longas que permitem as seguintes vantagens: aumento da resistência; aumento do limite de

elasticidade; aumento do módulo de elasticidade; aumento da resistência térmica; melhoria da resistência à fluência e redução do coeficiente de expansão térmica.

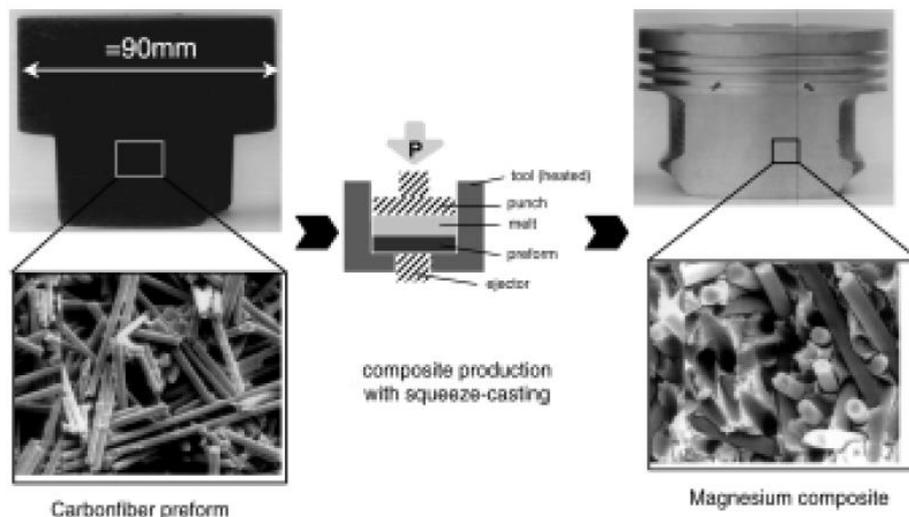


Figura 2.67 Pistão de um motor de magnésio reforçado como fibras de carbono [67].

Os reforços, principalmente as fibras, absorvem toda a carga aplicada ao material. A Tabela 2.22 apresenta uma comparação das propriedades entre compósitos de magnésio reforçado com fibras e a liga KS1275 (AlSi12CuMgNi) com tratamento térmico.

Tabela 2.22 Comparação das propriedades entre compósitos de magnésio reforçado com fibras e a liga KS1275 (AlSi12CuMgNi) [67].

Propriedades	Unidades	KSI275 AlSi12CuMgNi c/ tratamento térmico	20 % Vol. Fibra Carbono + AS41	20 % Vol. Fibra Carbono + AZ91Cal
Peso específico	g/cm ³	2,7	1,8	1,9
Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%	MPa	275-335	149-160	200-240
Tensão de rotura	MPa	295-360	175-196	225-260
Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% (250 °C)	MPa	90-120	85-91	101-115
Tensão de rotura (250 °C)	MPa	110-165	95-102	112-122
Deformação na rotura	%	1~3	~0,5	~0,5
Tensão de flexão (200 °C)	MPa	85	50	60
Módulo de elasticidade	GPa	79,5	55-66	55-60
Condutividade térmica	W/mK	155	n.d	~140
Coefficiente de expansão térmica	10 ⁻⁶ K ⁻¹	20	19,7-19,3	19-19,8
Taxa de fluência	10 ⁻⁹ S ⁻¹	n.d	1,3-2,9	13

Segundo [67], a aplicação de magnésio reforçado com fibra só pode ser realizado com um método de produção eficiente em termos de custos e com boa reprodutibilidade das propriedades do material.

Portanto, podem ser identificadas como áreas de pesquisa para o avanço dos compostos de magnésio:

1. O trabalho de desenvolvimento no domínio de pré-formas, com o objetivo de limitar o pós-processamento e permitir a produção em série. Outro objetivo é melhorar ainda mais a homogeneidade da distribuição de fibras para obter propriedades uniformes e reproduzíveis;
2. Desenvolver as tecnologias de processamento para a produção de componentes;
3. Desenvolvimento de métodos de fabrico para uma produção em série de compostos de magnésio, principalmente na produção por fundição.

2.7.3.2. Processos de Transformação

A ampla gama de componentes em magnésio é produzida principalmente por processos de fundição. Os processos de fundição devem ser eficientes quanto possível, no sentido de se reduzirem os custos de produção, através da otimização dos processos enchimento e alimentação do molde, o que pode ser conseguido através da utilização de ferramentas CAE.

O fabrico de componentes para componentes automóveis é feito principalmente através dos seguintes processos:

- Processos de Fundição: *die-casting*, *squeeze-casting* e *thixocasting*.
- Processos de conformação: estampagem; forjagem e extrusão.
- Processos de Ligação: soldadura (MIG e TIG); rebitagem; aparafusamento e colagem.

2.7.3.3. Aplicações Típicas

A redução do custo de produção, a variabilidade no processo de fundição, bem como a resolução de alguns problemas de corrosão e de fixação ajudará a aumentar as aplicações do magnésio. No entanto, serão necessários desenvolver novos produtos com base em novos processos de fabrico como a extrusão, a forjagem, a estampagem a conformação plástica, bem como novos processos de montagem, como a soldadura, a colagem, a rebitagem, para o desenvolvimento de materiais híbridos.

Atualmente, as ligas de magnésio são muito utilizadas na indústria automóvel, tal como se pode verificar através da Tabela 2.23.

Tabela 2.23 Aplicações de ligas de magnésio em componentes de automóveis (a). Peso de alguns dos componentes em ligas de magnésios (b) [66].

Aplicação*	Liga de Magnésio	Aplicação*	Liga de Magnésio	Aplicação	Peso
Tampa de Airbag	AZ91	Painel frontal (Front end)	AM50/60	Pilar A	6-8
Carcaça de suporte de airbag	AM60	Tampa do depósito de combustível	AM60	Retentor do airbag	0,2-0,4
Apoio de braço	AM60	Suporte do depósito de combustível	AM60	Apoio de braço	0,6-0,8
Defletor	AZ91	Caixa dos fusíveis	AM50	Pilar B	6-8
Casquilho de lâmpada	AZ91	Estrutura do GPS	AZ91	Pilar C	7-9
Capota de descapotáveis	AM50	Estrutura da consola central	AM50	Caixa de circuitos eletrónicos	0,4-0,8
Estrutura da capota de descapotáveis	AM50	Alavanca do travão de mão	AM50	Suportes de motor	0,4-0,8
Consola central	AM60	Estrutura interior da porta	AM50	Apoios de motor	1,2-1,4
Componentes de compressores	AZ91	Estrutura interior do puxador de porta	AZ91	Estrutura de retrovisores	0,5-0,6
Flange de diferencial	AZ91	Colector de admissão	AZ91	Painel frontal (Front end)	3-5
Alojamento do mecanismo da porta	AZ91	Suporte do painel (IP Crossbeam)	AM50/60	Alavanca do travão de mão	0,6-1
Caixa de circuito eletrónicos	AM50	Estrutura de fechadura	AZ91	Estrutura interior da porta	10-14
Blocos de motor	AJ62	Estrutura do retrovisor	AZ91	Coletor de admissão	1,5-3
Suportes de motor	AZ91	Carter		Suporte do painel (IP Crossbeam)	3-5
Apoios de motor	AE44	Alojamento da bomba de óleo	AZ91	Estrutura de fechadura	0,4-0,5
Flanges para motores	AZ91	Suporte de pedal	AM60	Carter	0,7-1
Carcaça de ventoinha de refrigeração	AZ91	Estrutura do rádio	AZ91	Suporte de pedal	0,5-0,7
Descanso de pé	AM50	Componentes do banco traseiro	AM60	Painel da tampa da bagageira	8-10

* Componentes que incluem ligas de Magnésio

Na Figura 2.68 pode-se observar alguns exemplos de aplicação das ligas de magnésio em componentes de automóveis, tais como: carcaça de caixa de velocidade da Volkswagen® produzida na liga AZ91D (a), que permite uma redução de peso, diminuição de vibrações e maior rigidez; a estrutura de um volante (b), suporte da coluna de direção da Audi/Zitzmann (liga AZ91D) (c); estruturas de bancos da Alfa Romeo® (d), em liga AM60, que permite melhores propriedades de deformação/ductilidade e redução de peso; e tampa da bagageira do Volkswagen® Lupo (Mössner AG) (e), que apresenta uma área de 1350x800 mm, espessura média da chapa de 1.6 mm, e um peso de apenas 2,7 kg.

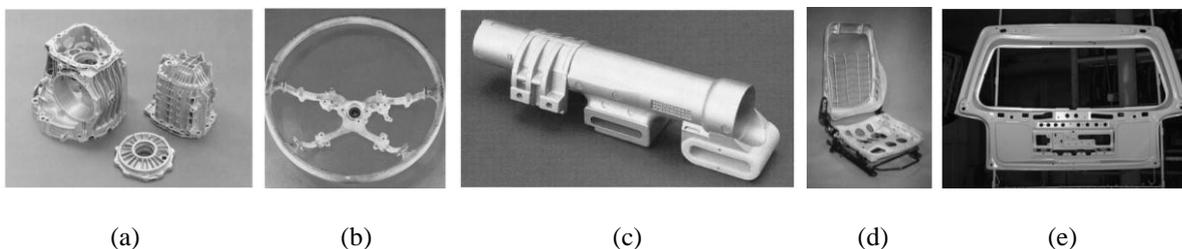


Figura 2.68 Exemplos de componentes de automóveis fabricados em ligas de magnésio [67].

Segundo [68], foi desenvolvida uma carroçaria pela Daimler Chrysler Corporation®, a partir de materiais leves entre os quais, ligas de magnésio, cujo peso é cerca de 49% inferior ao de uma carroçaria similar tradicional BIW (*Body In White*) em aço.

2.7.4. Titânio

Os benefícios de desempenho do titânio em aplicações automóbéis foram estabelecidos e amplamente divulgados durante muitos anos. No entanto, a sua utilização tem sido mais frequente em automóbéis de competição e alguns modelos superdesportivos, devido ao seu custo elevado. Cada vez mais, a indústria do titânio tem tentado cumprir metas estabelecidas pela indústria automóvel, focando a sua atenção nas seguintes áreas: desenvolvimento de ligas de menor custo; exploração de métodos de fabrico de baixo custo e tratamentos para aumentar a resistência ao desgaste.

As aplicações do titânio e das suas ligas na indústria automóvel justificam-se pelas propriedades, em particular, pela alta resistência, baixa densidade, e resistência à corrosão, sendo a sua principal aplicação em molas de suspensão. No entanto, o titânio também é aplicado em componentes de motor, como válvulas, molas de válvulas e bielas, sistema de escape e jantes [69].

Segundo [33], os maiores problemas técnicos associados à utilização do titânio em automóbéis resultam da resistência ao desgaste e das dificuldades de maquinagem. No entanto, esses problemas técnicos podem ser ultrapassados com a utilização de revestimentos e utilização de subprodutos concebidos de forma a diminuir as operações de maquinagem, bem como a escolha adequada dos respectivos parâmetros. O grande problema é que o custo de titânio é substancialmente maior do que os materiais concorrentes, como o aço e o alumínio.

Para os fabricantes de automóbéis, o *design* e o desempenho continuam a ser fatores chave para as vendas. No entanto têm vindo a aumentar as pressões relativamente ao ambiente e à segurança, quer através da legislação específica, quer através do mercado. Estas pressões têm forçado os fabricantes a procurar novas soluções de *design* e materiais. O aumento do custo do combustível tem vindo também a acelerar esse processo, justificando o desenvolvimento de produtos com um ciclo de vida mais favorável. É neste contexto que a aplicação de materiais como o titânio se pode desenvolver.

Apesar das suas limitações, o titânio apresenta as seguintes vantagens: ótima relação Resistência/Peso e elevada resistência à corrosão. No entanto, o seu custo não é baixo, pelo que só é utilizado quando as propriedades que apresenta se tornam suficientemente vantajosas.

2.7.4.1. Propriedades

O tipo de titânio menos resistente que é comercializado, apresenta uma elevada pureza, sendo utilizado particularmente quando se pretende elevada conformabilidade e ductilidade. As impurezas tendem a incrementar a dureza e a resistência mecânica do titânio. Outros tipos de titânio apresentam um compromisso entre uma resistência mecânica moderada e uma excelente resistência à corrosão.

Em geral, as ligas Al-Ti podem ver incrementada a sua resistência mecânica através de tratamentos

térmicos ou tratamentos mecânicos a frio. O alumínio produz um forte efeito endurecedor quando em solução sólida no titânio. O estanho quando adicionado em pequenas porções pode promover um aumento adicional da resistência mecânica sem perda significativa da ductilidade, pelo que é geralmente usada a composição típica Ti + 5%Al + 2.5%Sn.

A Tabela 2.24 e a Tabela 2.25 resumem as principais propriedades de algumas ligas de titânio e do titânio comercial puro.

Tabela 2.24 Propriedades de algumas ligas de titânio usadas na indústria automóvel [69].

Propriedades	Unidades	Ti-6Al-4V Bar STA	Timetal 10- 2-3	Timetal LCB
Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%	MPa	1100	1200	1350
Tensão de rotura	MPa	1185	1275	1420
Deformação na rotura	%	13	9	10
Redução da área (estricção)	%	24	21	35
Peso específico	g/cm ³	4,43	4,64	4,79
Módulo de elasticidade	MPa	112	106	110
Limite de resistência à Fadiga carregamento normal (kt=1)	MPa	895	950	1000
Limite de resistência à Fadiga carregamento com entalhe (kt=3)	MPa	240	290	330

Tabela 2.25 Propriedades do titânio comercial Timetal 45A e 50A [69].

Propriedades	Unidades	45A	50A (ASTM 2)
Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%	MPa	200	275
Tensão de rotura	MPa	290	345
Deformação na rotura	%	23	20
Redução da área (estricção)	%	40	35
Dureza	Hv	140-170	160-200
Módulo de elasticidade à tração	GPa	103	103
Módulo de rigidez	GPa	45	45
Peso específico	g/cm ³	4,51	4,51
Expansão térmica	10 ⁻⁶ °C	8,9	8,9
Condutividade térmica	W.m ⁻¹ .°C	21,6	21,6
Calor específico	J.kg ⁻¹ .°C	519	519

2.7.4.2. Processos de Transformação

O titânio comercialmente puro é conformado a frio, as chapas e tubos podem ser moldados facilmente à temperatura ambiente utilizando técnicas e equipamentos adequados para o aço. No entanto, segundo [69], há que ter atenção a alguns fatores para garantir uma produção livre de problemas:

- O módulo de elasticidade do titânio é cerca de metade do que o do aço. Isso significa que o titânio pode recuperar mais após a conformação, pelo deve ser feita a compensação com uma ligeira sobre conformação.

- Como o titânio tende a sofrer desgaste contra as ferramentas não lubrificadas, torna-se necessário proceder à limpeza e lubrificação das ferramentas.

O fabrico de componentes em titânio é feito através dos seguintes processos [69]: fundição, estampagem; laminagem, extrusão; forjagem e processos de ligação: soldadura laser, por resistência e por arco elétrico (TIG e MIG); rebitagem; aparafusamento e colagem com adesivos estruturais.

2.7.4.3. Aplicações Típicas

A Tabela 2.26 e as figuras a seguir apresentadas ilustram de forma resumida as aplicações típicas do titânio em componentes de automóveis, de acordo com [33].

Tabela 2.26 Componentes de automóveis fabricados em titânio e suas ligas [33].

Ano	Componente	Material	Fabricante	Modelo
1992	Bielas	Ti-3Al-2V	Honda	Acura NSX
1994	Bielas	Ti-6Al-4V	Ferrari	Todos os modelos de 12 cilindros
1996	Parafusos de rodas	Ti-6Al-4V	Porsche	Modelos com opção desportiva
1998	Pinos guia maxilas de travões	Ti grade 2	Daimler	Mercedes Classe S
1998	Arruelas de vedação	Ti grade 1s	Volkswagen	Todos os modelos
1998	Manípulo seletor de velocidades	Ti grade 1	Honda	S2000 Roadster
1999	Bielas	Ti-6Al-4V	Porsche	GT3
1999	Válvulas	Ti-6Al-4V & PM-Ti	Toyota	Altezza (motor de 6 cilindros)
1999	Turbina do turbo	Ti-6Al-4V	Daimler	Camiões Diesel
2000	Molas de suspensão	Timetal LCB	Volkswagen	Lupo FSI
2000	Parafusos de rodas	Ti-6Al-4V	BMW	Modelos com acessórios M-Technik
2000	Retentor da mola das válvulas	Ligas de Ti-β	Mitsubishi	Motores 1.8 cc de 4 cilindros
2000	Turbina	γ-TiAl	Mitsubishi	Lancer
2001	Sistema de escape	Ti grade 2	GM	Corvette Z06
2001	Parafusos de rodas	Ti-6Al-4V	Volkswagen	Modelos GTI
2002	Válvulas	Ti-6Al-4V & PM-Ti	Nissan	Infiniti Q45
2003	Molas de suspensão	Timetal LCB	Ferrari	360 Stradale

2.7.5. Polímeros

A incorporação de plásticos nos automóveis tem vindo a aumentar e continuarão seguramente no futuro. Muita da energia consumida por um automóvel ao longo do seu ciclo de vida é usada para criar movimento, sendo o peso, um dos fatores que têm diretamente influência no consumo de energia e consequentemente nas respetivas emissões.

Os polímeros desempenham um papel importante na redução de peso dos automóveis, pelo que o desenvolvimento de novos materiais leves e as tecnologias de processamento podem contribuir para novos conceitos de veículos, mais eficientes. Os polímeros utilizados em componentes de automóveis

podem ser divididos em termoplásticos, termoendurecíveis e elastômeros.

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais materiais diferentes que, quando combinados apresentam melhores propriedades face aos seus componentes individualmente. Nos automóveis são utilizados tipicamente plásticos reforçados por fibras. As suas principais vantagens são a resistência e rigidez específicas, baixo peso, resistência à corrosão, propriedades térmicas e dimensionais [31].

Segundo [31], os plásticos e os compósitos utilizados na indústria automóvel devem apresentar como principais requisitos de engenharia as seguintes características: resistência mecânica, particularmente, resistência à tração, à flexão, ao corte e ao impacto; resistência térmica, principalmente em termos de expansão ou contração devido à ampla gama de temperaturas a que podem estar sujeitos, o que tem implicações de funcionamento importantes, como acontece por exemplo nas zonas de fixação dos componentes. Por outro lado devem manter o seu aspeto ao longo do ciclo de vida do automóvel, e, resistência química a solventes e outros produtos de limpeza, bem como aos raios UV.

Os termoplásticos podem ser divididos em dois tipos, amorfos e semi-cristalinos. Nos termoplásticos amorfos as moléculas não têm orientação preferencial, como é o caso do policarbonato (PC) e o Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS). Estes termoplásticos apresentam as seguintes vantagens: relativamente estáveis dimensionalmente; menor índice de contração após processamento relativamente aos termoplásticos cristalinos; potencial para a aplicação de espumas estruturais [31].

Como desvantagens apresentam as seguintes características: baixa resistência ao desgaste por abrasão e ao impacto repetido, baixa resistência à fadiga e processamento mais lento relativamente aos termoplásticos cristalinos.

Nos termoplásticos semi-cristalinos, poliamida (PA), polipropileno (PP) e polietileno (PE), entre outros, as macromoléculas apresentam algumas zonas com uma estrutura cristalina. Estes termoplásticos apresentam algumas vantagens como: boa resistência à fadiga; boa resistência ao desgaste; propriedades a altas temperaturas melhoradas pelo reforço com fibra. Mas também algumas desvantagens, nomeadamente: maior índice de contração após processamento; a união por adesivos é mais difícil; maior fluência do que os termoplásticos amorfos [31].

A utilização dos plásticos termoendurecíveis na indústria automóvel está a diminuir e a tendência é para continuar a diminuir. Estes plásticos apresentam algumas vantagens, tais como: baixa sensibilidade à temperatura, boa estabilidade dimensional e maior dureza do que os termoplásticos. Como desvantagens, apresentam baixa resistência à fratura; dificuldades na reciclagem e limitação na qualidade das superfícies [31].

2.7.5.1. Propriedades

Tradicionalmente, a poliamida é um dos termoplásticos mais utilizados em compósitos apesar do seu preço ser mais elevado que o do PP. Isto deve-se, sobretudo, à sua aplicação em peças injetadas para um mercado de tão grande consumo, como é o da indústria automóvel. Trata-se de uma das indústrias pioneiras na aplicação dos termoplásticos reforçados com fibras curtas. Como na altura a extrusão era, quase exclusivamente, o único método de produção de termoplásticos reforçados, as peças finais apresentavam fibras de reforço com um comprimento muito pequeno, o que se tornou decisivo para a maior utilização das poliamidas neste mercado [70]. Na Tabela 2.27 resumem-se as propriedades mecânicas dos termoplásticos mais representativos.

Tabela 2.27 Propriedades mecânicas típicas dos termoplásticos mais representativos [58].

Propriedades	Módulos de Elasticidade (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Deformação na rotura (%)
Poliétileno de baixa densidade (PEBD)	120-140	7-13	9-10	300-700
Poliétileno de alta densidade (PEAD)	550-1050	20-30	20-25	300-800
Polipropileno (PP)	900-1400	32-35	35	20-300
Polipropileno reforçado com FV (PP/FV)	>1500	34-54	40-60	5-20
Policloreto de Vinilo flexível (PVC)	3500-4800	10-25	7-12	200-450
Policloreto de Vinilo rígido (PVC)	2000-2800	40	90	60
Poliestireno (PS)	2400-4200	35-62	90-110	1-3
Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)	1380-3400	17-58	17-85	10-140
Polimetil-metacrilato (Perspex)	2700-3500	55-75	80-130	2-3
Politetrafluoretileno (PTFE)	350-620	15-35	10-15	200-400
Poliamida (PA11)	1250-1300	52-54	55-56	180-400
Poliamida reforçada com Fibra de vidro (PA6/FV)	7800-8000	170-172	200-210	3-4

2.7.5.2. Processos de Transformação

Existem várias tecnologias de processamento de materiais plásticos para aplicações na indústria automóvel, dos quais se destacam os processos de injeção, extrusão, moldação por sopro, moldação por compressão [31].

2.7.5.3. Aplicações Típicas

Os polímeros são amplamente utilizados no fabrico de componentes de automóveis, pelo que apenas se apresentam de seguida alguns exemplos de aplicações mais recentes ou mais relevantes. Os polímeros de acrilonitrilo-estireno-acrilato, designados por ASA, são utilizados no fabrico de componentes para automóveis. A sua aplicação em painéis de carroçaria (Figura 2.69) tem vindo a surgir como alternativa à chapa de aço, apresentando vantagens no que toca à resistência à corrosão,

diminuição de peso. Este copolímero tem excelentes propriedades mecânicas e boa capacidade de moldação. Relativamente ao ABS, copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno, apresenta algumas vantagens, nomeadamente maior resistência aos raios ultravioleta, maior resistência ao impacto, maior resistência química e dureza mais elevada [71].



Figura 2.69 Polímeros ASA utilizados no fabrico dos painéis da carroçaria do Quattroruote SUMMA® [72].

O poliuretano (PU) atualmente é utilizado sob a forma de espuma flexível em vários componentes de automóveis, como por exemplo em assentos, braços de apoio, apoios de cabeça, elementos para absorção de som e de energia [73].

2.7.6. Compósitos

Designam-se por “compósitos” os materiais constituídos por fases distintas, das quais pelo menos duas se caracterizam por terem, geralmente, propriedades mecânicas muito diferentes. O “reforço” é a fase que se caracteriza por possuir maior rigidez, dureza e resistência mecânica, sendo a outra designada por “matriz”. Sendo praticamente todos os reforços atualmente usados sob forma de fibras (de vidro, carbono, aramida), a matriz tem a finalidade de garantir uma adequada transmissão e repartição dos esforços aplicados pelo reforço [70].

Os materiais mais usados como matriz são de natureza polimérica, tanto de tipo termoplástico como termoendurecível. Os termoplásticos caracterizam-se, nomeadamente, por se poderem fundir, reprocessar e apresentarem viscosidades mais elevadas. Os termoendurecíveis, pelo contrário, não fundem e apresentam viscosidades mais baixas antes da polimerização [70].

Os materiais plásticos reforçados com fibras FRP (*Fibre-Reinforced Plastics*) incluem os seguintes tipos:

- Plástico Reforçado a Fibras de Vidro, GFRP (*Glass-Fibre Reinforced Plastic*);
- Plástico Reforçado a Fibras de Carbono, CFRP (*Carbon-Fibre Reinforced Plastic*);
- Compósitos reforçados a fibras de aramida (Kevlar®).

Estes materiais são tipicamente usados em aplicações que necessitam de elevados índices de resistência e rigidez específicas, permitindo assim reduzir o peso dos respectivos componentes e por conseguinte, das estruturas onde eles são incorporados, mantendo a resistência e rigidez necessárias para suportar as solicitações impostas. A Figura 2.70 compara a resistência mecânica específica de alguns metais estruturais com a de materiais compósitos reforçados a fibras. A sigla TF significa teor de fibras, que representa a percentagem de volume de fibras no material. No caso dos GFRP's (D, E e F) é possível igualar a resistência específica de metais estruturais de alta resistência a um custo de matéria-prima e fabricação muito inferior.

A seleção destes materiais, em substituição de materiais como o aço ou o alumínio, depende do balanço entre, o custo, o desempenho e a importância das suas vantagens competitivas.



Figura 2.70 Comparação entre a resistência mecânica específica de alguns metais estruturais e FRP's.

A aplicação destes materiais na indústria automóvel está em permanente desenvolvimento, uma vez que apresentam as seguintes vantagens: excelentes propriedades mecânicas, particularmente, de resistência e rigidez específicas; baixo peso; excelente resistência à corrosão. No entanto, a sua aplicação tem sido ainda limitada principalmente devido às cadências de produção, aos custos elevados e às tecnologias de processamento pouco desenvolvidas, logo pouco competitivas.

Segundo [70], os termoplásticos reforçados com fibras curtas ou compósitos de fibras curtas, SFRT (*Short Fibre Reinforced Thermoplastic*) continuam a ocupar grande parte do mercado. No entanto, a intensificação da procura de termoplásticos reforçados com fibras longas, LFRT (*Long Fibre Reinforced Thermoplastic*), por setores de mercado de grande consumo, tem contribuído para a elevada taxa de crescimento deste materiais, de que é exemplo a forte cota de mercado que os GMT's (*Glass Mat reinforced Thermoplastics*) e os LFT's (*Long Fibre Thermoplastics*) têm atualmente no sector automóvel. Embora em muito menor escala, a aplicação de compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas, CFRT (*Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic*) e de compósitos termoplásticos reforçados com fibras longas, LFRT (*Long Fibre Reinforced Thermoplastic*) também

têm estado em pleno crescimento em mercados avançados, como o setor aeronáutico.

Os compósitos de matriz termoplástica têm particular interesse para a indústria automóvel uma vez que apresentam vantagens em termos ambientais, relativamente aos compósitos de matriz termoendurecível. Na Figura 2.71 está apresentado um esquema que permite perceber quais os tipos de materiais compósitos termoplásticos considerados atualmente na indústria automóvel.



Figura 2.71 Família de materiais compósitos termoplásticos para a indústria automóvel [74].

2.7.6.1. Propriedades

2.7.6.1.1. Fibras

No que respeita aos reforços, os mais comuns são as fibras de vidro, fibras de carbono, aramídicas, de boro, entre outras fibras naturais recentemente utilizadas ou ainda em estudo para futuras utilizações.

As fibras de vidro são o reforço mais utilizado nos materiais compósitos. São essencialmente constituídas por silício, ao qual se associam diferentes óxidos que facilitam a fusão do vidro de forma a permitir a sua passagem pelas fieiras onde se fabricam os filamentos. Entre as suas características mais importantes salienta-se a excelente aderência fibra/matriz, boas propriedades dielétricas e uma interessante relação “desempenho mecânico/custo” [70]. Na Tabela 2.28 resumem-se as propriedades de alguns tipos de fibras de vidro.

Tabela 2.28 Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro [75].

Propriedades	Unidades	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Peso específico	g/cm ³	2,6	2,49	2,55
Módulo de elasticidade	GPa	73,0	85,5	86,0
Tensão de rotura	MPa	3400	4580	4400
Deformação na rotura	%	4,4	5,5	5,2
Coefficiente de expansão térmica	10 ⁻⁶ /°C	5,0	2,9	4,0

As fibras de carbono são muito menos usadas que as de vidro. Embora sejam bastante mais rígidas (três a sete vezes mais) são também muito mais caras (cerca de dez a quinze vezes mais), pelo que são

geralmente apenas utilizadas em componentes estruturais exigindo módulo muito elevado associado com baixo peso (elevado módulo específico). As fibras de carbono mais utilizadas fabricam-se a partir de fibras precursoras de poliacrilonitrilo (PAN) ou de resíduos da destilação do petróleo convenientemente tratados (Pitch). As fibras PAN apresentam, normalmente, uma boa resistência mecânica e elevada adesão “fibra/matriz”, enquanto que as fibras pitch exibem um módulo mais elevado [70]. Na Tabela 2.29 resumem-se as propriedades de alguns tipos de fibras de carbono.

Tabela 2.29 Propriedades de alguns tipos de fibras de carbono [75].

Propriedades	Unidades	PAN	Alcatrão "Pitch"	"Ravon Fibers"
Peso específico	g/cm ³	1,8	2,0	1,7
Módulo de elasticidade	GPa	200-400	300-700	415-680
Tensão de rotura	MPa	2480-5600	1900-2200	2070-2760
Deformação na rotura	%	4,4	1-1,15	0,5-0,6
Coefficiente de expansão térmica	10 ⁻⁶ /°C	-0,7 a -0,5	-1,6 a -0,9	-

As fibras aramídicas são menos empregues que as fibras de vidro e de carbono. Trata-se de fibras poliméricas, onde as cadeias aromáticas poliamida que as constituem se apresentam fortemente orientadas por terem sido sujeitas, simultaneamente, a tratamentos térmicos e de estiramento. Apresentando elevada resistência específica à tração, ao impacto e à abrasão são sobretudo utilizadas em pequenos “nichos” de mercado dedicados ao fabrico de peças especialmente exigentes do ponto de vista destas propriedades, como sejam, por exemplo, os capacetes ou outros componentes à prova de bala. A sua baixa resistência à compressão e à exposição aos raios ultravioletas, a dificuldade com que podem ser maquinadas, a fraca aderência às matrizes poliméricas (especialmente, no caso das termoplásticas) e, sobretudo, o seu elevado preço, têm limitado significativamente a sua aplicação. Na Tabela 2.30 resumem-se as propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas.

Tabela 2.30 Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas [75].

Propriedades	Unidades	Kevlar® 29	Kevlar® 49	Twaron®
Peso específico	g/cm ³	1,44	1,5	1,44
Módulo de elasticidade	GPa	60,0	129	60,0
Tensão de rotura	MPa	3000	3000	2600
Deformação na rotura	%	3,6	1,9	3
Coefficiente de expansão térmica	10 ⁻⁶ /°C	-2,0	-2,0	-

Outro tipo de fibras, são as fibras de boro, que apresentam um módulo de elasticidade cinco vezes superior ao das fibras de vidro, mas são mais pesadas. Estas fibras utilizam-se na forma de fitas pré-impregnadas em resina de epóxico, fenólica ou poliimida. Pelo seu elevado custo, estas fibras

aplicam-se sobretudo na indústria aeronáutica. Na Tabela 2.31 resumem-se as propriedades de alguns tipos de fibras de boro.

Tabela 2.31 Propriedades de alguns tipos de fibra de boro [75].

Propriedades	Unidades	100 μm	140 μm	200 μm
Peso específico	g/cm^3	2,61	2,5	2,39
Módulo de elasticidade	GPa	400,0	400	400
Tensão de rotura	MPa	3450	3450	3450
Deformação na rotura	%	0,7-0,9	0,7-0,9	0,7-0,9
Coefficiente de expansão térmica	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	4,9	4,9	4,9

Para além das fibras referidas atrás, existem fibras naturais, cada vez mais relevantes no desenvolvimento de compósitos para a indústria automóvel.

Existem, no entanto, outras formas de reforço, muito utilizadas no fabrico de componentes ou estruturas de automóveis, nomeadamente os tecidos 2D, 3D, malhas (*Knited Fabrics*), entrançados (*Braids*) e pré-formas.

Segundo [76], os compósitos com fibras naturais estão ainda numa fase inicial do seu desenvolvimento, embora os aspetos ecológicos do uso de fibras naturais foram a razão inicial para a sua aplicação em produtos industriais. O trabalho futuro vai enfatizar as propriedades específicas e as vantagens tecnológicas destas fibras. O cultivo de fibras, especialmente para fins técnicos, o desenvolvimento contínuo dos métodos de preparação de fibras, e novos métodos de processamento vão permitir melhorar ainda mais as suas propriedades. A Figura 2.72 mostra as principais categorias de fibras celulósicas. É de salientar que as fibras de linho, juta, sisal, coco, são as mais comuns e têm um preço relativamente baixo, no entanto, na Europa, a fibra de planta comercialmente mais importante ainda é o linho.

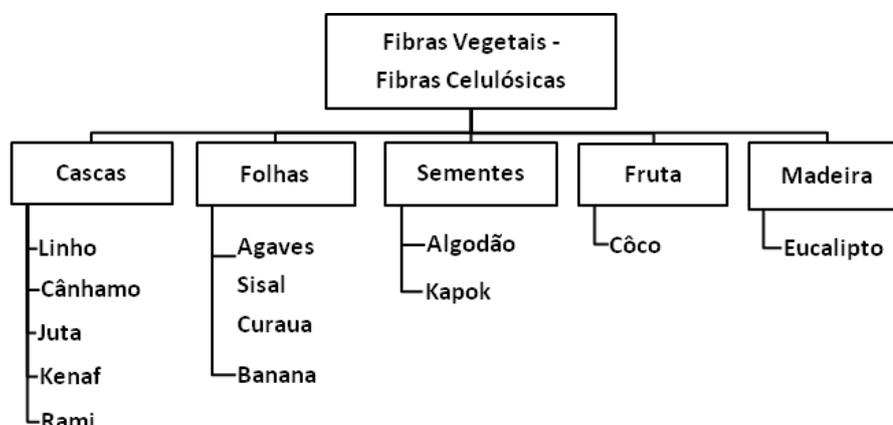


Figura 2.72 Classificação das fibras derivadas de plantas [76]

Na Tabela 2.32 apresentam-se propriedades mecânicas de algumas fibras naturais e de fibras convencionalmente utilizadas como reforços em compósitos.

Tabela 2.32 Propriedades de fibras naturais utilizadas como reforços em compósitos [77].

Fibra	Peso específico (g/cm ³)	Deformação na rotura (%)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Rami	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Linho	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Sisal	1,5	2,0-2,5	551-635	9,4-22
Fibra de côco	1,2	3	175	4,0-6,0
Curauá	1,4	4,2	890-4200	50,4

2.7.6.1.2. Matrizes

Tal como já foi referido anteriormente, existem matrizes termoendurecíveis e termoplásticas, cujas propriedades típicas se apresentam de seguida na através da Tabela 2.33 e na Tabela 2.34.

Tabela 2.33 Propriedades típicas de matrizes termoplásticas [75].

Polímero	Tipo	Tg (°C)	Tm (°C)	HDT (°C)		E (GPa)		Tensão de rotura (MPa)		Deformação na rotura (%)	
				NR	R	NR	R	NR	R	NR	R
PC	A	150		132	149	2,4	9,0	65	131	125	2,5
PP	C	-10	165	53	151	1,4	5,9	34	83	400	2,3
PA66	C	50	265	90	252	2,9	9,0	83	172	200	4,0
PSU	A	190		175	185	2,5		70	120	3	1,5
PEI	A	220		204	210		9,0		200		
PI	A	280		270	275						
PPS	C	130	280	137	265	3,3	11,0	74	130	110	1,0
PEEK	C	310	310	148	286		9,0	98	190		

A amorfo; C semicristalino, R reforçado com 30% em peso de fibra curta de vidro; NR não reforçado

Tabela 2.34 Propriedades típicas de matrizes termoendurecíveis [75].

Resina	HDT (°C)	E (GPa)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação na rotura (%)
Poliéster ortoftálica	66	3,6	55	2,0
Poliéster isoftálica	93	4,1	65	2,5
Fenólica	250	2,0	32	1,8
Viniléster	102	3,5	82	6,0
Epóxida	110	4,1	125	5,0

2.7.6.1.3. *Semi-produtos*

Para além das fibras e das matrizes, existem no mercado semi-produtos de dois tipos: os compostos de moldação e os pré-impregnados. Estes semi-produtos são pré-combinações de fibras e matriz que são posteriormente processados para a obtenção da peça no compósito final.

Os compostos de moldação são produzidos a partir de fibras curtas ou longas impregnadas com resina. Geralmente são utilizados para a moldação por injeção ou moldação por compressão. Existem vários tipos disponíveis, com resinas de base termoendurecível ou termoplástica, sendo os mais comuns designados por SMC (*Sheet Molding Compound*), TMC (*Thick Molding Compound*), DMC (*Dough Molding Compound*) ou BMC (*Bulk Molding Compound*) e GMT (*Glass Mat Thermoplastic*), respetivamente.

SMC - A designação SMC refere-se a um composto constituído por fibras e resina (poliéster insaturado ou viniléster) envolvidas por folhas de polietileno, estando disponíveis com espessuras até 6 mm. Utilizam-se para produção de componentes em que se exige uma elevada cadência de produção e uma resistência mecânica moderada. Os SMC apresentam tipicamente 30 % de fibras em peso. Há também SMC especiais, com elevada resistência mecânica e elevada resistência ao impacto, pelo que são designados por "High Impact SMC" ou, simplesmente, HMC. Considerando a forma da fibra utilizada, existem três tipos de SMC disponíveis no mercado: SMC-R, com fibras curtas dispersas aleatoriamente, SMC-CR, composto formado por fibras contínuas unidirecionais e fibras curtas dispostas aleatoriamente, e XMC, que consiste numa mistura de fibras curtas dispostas aleatoriamente e fibras contínuas dispostas numa configuração em "X". A utilização deste composto é viável para volumes de produção médios, com bom acabamento superficial e boa precisão dimensional. No entanto, a redução de peso dos componentes fabricados não é tão significativa como com termoplásticos.

TMC - Distinguem-se dos compostos SMC porque apresentam espessuras que podem ir até 50 mm. Com este tipo de composto de moldação evita-se a necessidade de utilizar várias camadas de SMC para produzir peças moldadas mais espessas. Devido à sua espessura, é reduzida a possibilidade de empilhamento. Nos compostos TMC, as fibras cortadas estão aleatoriamente distribuídas de uma forma tridimensional.

DMC - Os compostos DMC, também designados por BMC (*Bulk Molding Compound*), referem-se a uma mistura pastosa de uma resina de poliéster insaturado ou viniléster com fibras curtas. A percentagem de fibras é de 15 a 20 %, tendo comprimentos entre 6 e 12 mm. Devido à menor quantidade de fibras e aos menores comprimentos destas, a resistência mecânica é inferior à dos compostos SMC.

GMT - Estes materiais oferecem algumas vantagens relativamente aos compósitos de matriz termoendurecível, nomeadamente porque podem ser reprocessados. Genericamente, estes compósitos

podem apresentar-se nas seguintes formas pré-preparadas: GMT (*Glass Mat Thermoplastic*) e ATC (*Advanced Thermoplastic Composites*). Em princípio, as formulações GMT podem utilizar qualquer tipo de matriz termoplástica, embora 95% das aplicações comerciais sejam à base de polipropileno. O reforço é constituído por fibras curtas de vidro tipo E. A temperatura de utilização destes não excede os 110°C. O seu domínio de utilização é fundamentalmente a indústria automóvel, apesar das limitações em termos de acabamento, o que significa que a sua aplicação é limitada a aplicações interiores. Por outro lado permite ciclos de processamento mais rápidos do que os compostos SMC.

Os pré-impregnados constituem misturas de fibra e resina para posterior consolidação, geralmente através da moldação em autoclave e prensagem a quente. São semi-produtos de custo elevado para aplicações de grande exigência, como é o caso da indústria aeronáutica. Existem pré-impregnados de base termoendurecível e pré-impregnados de base termoplástica.

Os maiores benefícios no uso de pré-impregnados de base termoplástica são a sua capacidade de reciclagem, o reduzido tempo de processamento, elevada tenacidade e resistência ao impacto. [75].

Embora tenham vindo apenas a ser estudados recentemente, no mercado já existe uma interessante variedade de pré-impregnados de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas (CFRT). Na Tabela 2.35 apresentam-se as propriedades genéricas de alguns CFRT's disponíveis comercialmente.

Tabela 2.35 Propriedades típicas de alguns pré-impregnados de fibras contínuas comerciais [70].

Propriedade	Unidade	PP	PP	Poliamida 6	Poliamida 6	PEEK	PEEK
		vidro E	carbono	vidro E	carbono	vidro S2	carbono
Volume de fibras	%	48	50	51	51	53	53
Peso de polímero	%	28	34	30	38	32	40
Peso específico	g/cm ³	1,68	1,34	1,83	1,45	1,94	1,56
Temperatura de processamento	°C	190-230		250-280		370-390	

2.7.6.1.4. *Compósitos Reforçados com Fibras*

As propriedades dos FRP's de fibras longas são bastante influenciadas pela escolha do tipo de reforço, da matriz e especialmente da forma como estes dois constituintes são combinados, do teor de fibras, comprimento e orientação das fibras, espessura do laminado e presença de agentes promotores de adesão fibras/resina.

As fibras de vidro oferecem uma resistência razoável a um custo reduzido, enquanto as fibras de carbono apresentam o melhor desempenho em termos de resistência e rigidez, combinados a uma densidade reduzida.

As fibras de Kevlar[®] têm alta resistência e baixa densidade, são resistentes ao fogo e invisíveis a ondas

de rádio no seu estado natural (ao contrário das fibras de carbono). O polímero mais utilizado como matriz é o poliéster insaturado, que permite obter uma resistência razoável do compósito a um custo moderado. No entanto, as superiores propriedades mecânicas da resina epóxida ou a sua capacidade de suportar temperaturas mais elevadas podem levar à sua seleção, embora o custo seja muito superior.

De uma maneira geral, o aumento do comprimento das fibras leva a um aumento da eficiência do reforço para suportar as solicitações impostas. No entanto, é mais económico fabricar FRP's de fibras curtas.

A Tabela 2.36 mostra algumas propriedades mecânicas relevantes de três tipos de FRP's atuais (na forma de camada unidireccional), comparando com um aço de alta resistência e uma liga de alumínio usados em estruturas aeronáuticas. A rigidez e resistência específicas (E/ρ e σ_f/ρ , respetivamente) permitem aferir do desempenho de um material relativamente ao seu peso.

Tabela 2.36 Propriedades típicas de alguns tipos de FRP's e metais [78, 79].

Material	Densidade ρ (kg/dm ³)	Módulo E (GPa)	Resistência σ_f (MPa)	Tenacidade K_{IC} (MPa \sqrt{m})	E/ρ	σ_f/ρ
CFRP, 58% TF, unidireccional, matriz de epóxido	1,5	189	1050	32-45	126	700
GFRP, 50% TF, unidireccional, matriz de poliéster	2,0	48	1240	42-60	24	620
Kevlar [®] -epoxy, 60% TF, unidireccional	1,4	76	1240	-	54	886
Aço de alta resistência	7,8	207	1000	100	27	128
Liga de alumínio	2,8	71	500	28	25	179

A Tabela 2.37 permite comparar o desempenho mecânico de compósitos obtidos a partir de pré-impregnados SFRT e LFRT, e constatar que o compósito LFRT apresenta propriedades mecânicas muito superiores às do SFRT.

Tabela 2.37 Propriedades típicas de compósitos LFRT e SFRT [70].

Material (Polipropileno reforçado com fibras de vidro)	Processo	Resistência à flexão (MPa)	Módulo à flexão (GPa)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo à tracção (GPa)	Comprimento das fibras após transformação (mm)
Pré-impregnado SFRT	Injeção	-	5,5	77	4,1	0,4
Pré-impregnado LFRT (fibras c/ 12 mm de comprimento)	Injeção	165	7,0	100	7,2	4,0
Pré-impregnado LFRT (fibras c/ 25 mm de comprimento)	Compressão	137	4,8	98	4,8	22

Os CRFT podem-se classificar, de acordo com a flexibilidade que apresentam, em duas grandes categorias: i) pré-impregnados flexíveis ou com impregnação parcial, caracterizados por não apresentarem as fibras totalmente impregnadas, e ii) pré-impregnados semirrígidos ou com

impregnação total, de menor flexibilidade, que se apresentam com o reforço completamente impregnado. Na Tabela 2.38 comparam-se as propriedades de compósitos de carbono/PEEK e carbono/epóxico.

Tabela 2.38 Comparação das propriedades mecânicas de compósitos de carbono/PEEK e carbono/epóxico [70].

Propriedade	Unidade	Carbono PEEK	Carbono Epóxico
Fracão volúmica de fibras	%	62	62
Resistência à tração	GPa	2,44	1,86
Resistência à flexão	GPa	1,50	1,66
Módulo à flexão	GPa	131	131
Resistência à compressão	GPa	1,0	1,30
G_{Ic}	Jm^{-2}	3230	260
Resistência ao corte*	MPa	117	110

* Valores obtidos com ensaios SBT-“Short Beam Test”.

As propriedades de compósitos de fibras naturais dependem muito do tipo de fibra, do tipo da matriz e da combinação fibra-matriz com o processo de fabrico. O gráfico da Figura 2.73 mostra alguns resultados obtidos em ensaios de flexão para diferentes plásticos reforçados com fibras naturais.

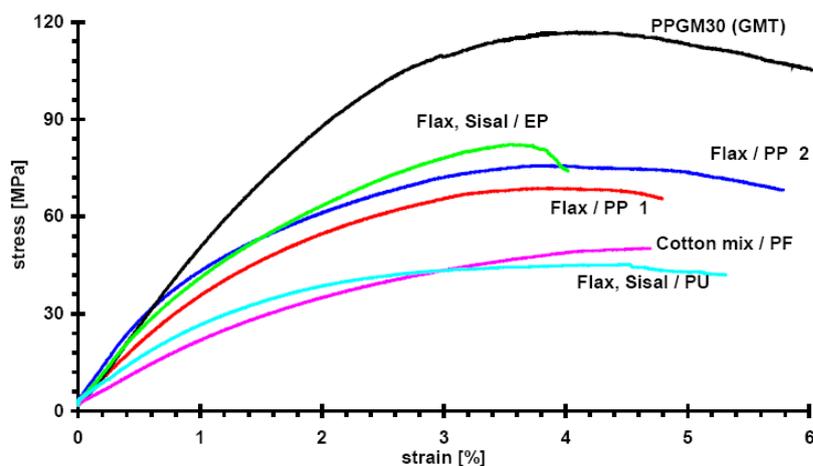


Figura 2.73 Curvas de tensão-deformação obtidas em ensaios de flexão para diferentes compósitos reforçados com fibras naturais, de acordo com DIN EN 63 [76].

2.7.6.2. Processos de Transformação

O fabrico de componentes em FRP envolve, geralmente, a utilização de um molde (técnica em molde fechado ou aberto) no qual são dispostas as fibras sob a forma de tecidos/mantas (Figura 2.74) ou pré-impregnados de fibras longas e resina não curada. O fabrico em molde fechado envolve a colocação prévia do reforço no molde, seguido de injeção da resina por pressão, ou vácuo, para um volume fechado e posterior cura a uma temperatura elevada, resultando num componente com orientação das fibras paralela às superfícies do molde. Em molde aberto, o fabrico é realizado por espalhamento

manual da resina sobre o reforço de fibras longas (tecido) ou conjuntamente com fibras curtas, ou empilhamento de pré-impregnado fornecido em rolos ou fita.

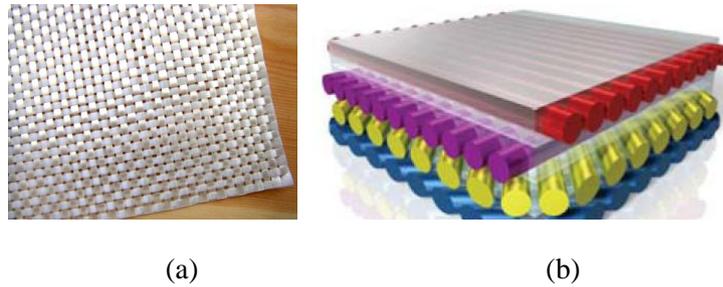


Figura 2.74 Tecido de GFRP (a); empilhamento de camadas unidirecionais sobre diferentes orientações (b)

2.7.6.2.1. *Moldação Manual*

A resina é impregnada manualmente nas fibras de reforço, que se podem apresentar sob a forma de tecido, malha ou manta pré-agregada de fibras, por um rolo ou pincel de espalhamento (Figura 2.75) O conjunto é deixado a curar sob condições atmosféricas de pressão e temperatura. É um processo de vasta utilização em aplicações de baixa responsabilidade, fácil e de baixo-custo, e permite um teor e comprimento de fibras superiores ao método anteriormente de moldação por projeção. No entanto, este método requer a mistura prévia da resina com o catalisador, a qualidade final é muito dependente do operador, as resinas devem ter baixa viscosidade para permitirem o espalhamento e impregnação manual, o que compromete as suas características, e é suscetível de criar vazios no caso de compósitos com elevado índice de teor de fibras (TF).

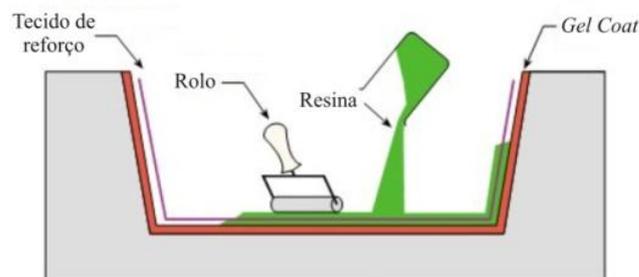


Figura 2.75 Representação esquemática do processo de moldação manual.

2.7.6.2.2. *Moldação por Projeção*

As fibras, cortadas no interior do pulverizador, são misturadas com um fluxo de resina e pulverizadas contra o molde a alta pressão (Figura 2.76). A mistura depositada no molde é tipicamente curada sob condições atmosféricas de pressão e temperatura. O *gel coat*, que consiste numa película de polímero (normalmente epóxico ou poliéster não saturado), é, posteriormente, depositado no estado líquido para melhorar o acabamento superficial do componente. É um método de custo reduzido que apresenta algumas desvantagens, como impossibilidade de obtenção de um índice elevado de teores de fibras, a

limitação a fibras curtas, produção de componentes com baixa resistência, sendo que está limitado à utilização de resinas passíveis de serem pulverizadas, reduzindo a escolha em termos de características mecânicas e térmicas. Este processo pode ser aplicado no fabrico de painéis exteriores.

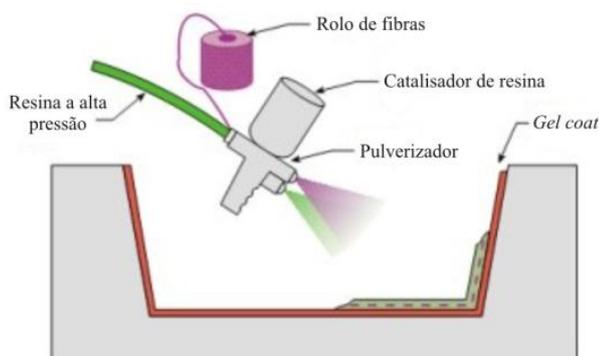


Figura 2.76 Representação esquemática do processo de moldação por projeção.

2.7.6.2.3. Empilhamento Manual de Pré-impregnados

As fibras ou tecidos, são impregnadas com resina no final do seu fabrico pelo fornecedor, resultando num rolo de pré-impregnado em que a resina (tipicamente um epóxido) já se encontra formulada com os agentes de cura adequados, conseguindo manter-se não curada durante várias semanas ou mesmo meses se conservada a baixa temperatura.

Os pré-impregnados são geralmente fornecidos como camadas unidirecionais ou tecido com as fibras cruzadas a 90°, com espessura entre os 0,125 e 0,250 mm. Esta forma de matéria-prima é ideal para a produção de laminados finos que são usados extensivamente em estruturas de fuselagem de aviões e em chassis de automóveis superdesportivos, entre outras aplicações.

O laminado é fabricado pelo corte e empilhamento manualmente sobre um molde que tem a forma da peça a produzir. Após empilhamento até à espessura desejada, a resina do laminado é curada com pressão e temperatura elevada por processos descritos posteriormente, como saco de vácuo e/ou autoclave. Este processo apresenta várias vantagens, nomeadamente, o controlo da proporção entre resina/catalisador e índice de teores de fibras, especificada pelo processo de fabrico do pré-impregnado; a possibilidade de optimização da resina em termos de características mecânicas ou térmicas, uma vez que é possível utilizar resinas de viscosidade superior, a possibilidade de escolha de sequências de empilhamento complexas, e a facilidade de automatização. Apesar destas vantagens, tem como inconvenientes, o custo elevado do pré-impregnado e a necessidade de aquecimento posterior para cura da resina (tipicamente usado com resinas termoendurecíveis). Este processo é aplicado principalmente no fabrico de estruturas *monocoque*, de superdesportivos e dos Fórmula 1.

2.7.6.2.4. *Moldação por Compressão*

A moldação por compressão (Figura 2.77) pode ser feita a frio ou a quente, dependendo da necessidade de pré aquecimento dos moldes utilizados. Com este processo é possível fabricar peças para a indústria automóvel, nomeadamente componentes de carroçarias [75].

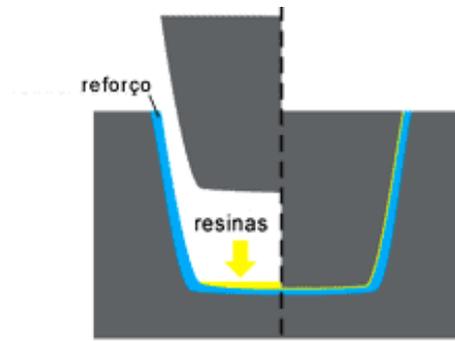


Figura 2.77 Esquema de processamento por moldação por compressão.

A compressão a quente é um processo similar ao da compressão a frio. Porém, os moldes são pré aquecidos a temperaturas entre os 80° e 170 °C, e as pressões utilizadas podem variar entre 0,5 e 15 MPa, o que obriga à utilização de moldes resistentes. O ciclo de produção depende da temperatura, complexidade e peso do componente. Os ciclos de processamento são mais rápidos que os da compressão a frio o que permite uma cadência de produção mais elevada. As peças fabricadas por este processo podem ser mais complexas e com melhores propriedades mecânicas. O processo de compressão a quente permite a moldação do tipo SMC, BMC e GMT. O composto de moldação é colocado no interior do molde metálico, pré-aquecido até 140 °C. Por compressão, o composto flui dentro do molde, preenche a cavidade de moldação expulsando o ar acumulado. O componente fica pronto após um ciclo de cura, sujeito a pressão, entre 1 e 4 minutos, dependendo da temperatura e da espessura. Este processo é utilizado no fabrico de painéis, pisos, e outros componentes de automóveis.

2.7.6.2.5. *Moldação por Injeção*

A moldação por injeção é o processo utilizado há mais tempo, sendo ainda o mais usado para fabricar compósitos de fibras curtas e muito utilizado na produção de grandes séries de peças. O ciclo de injeção divide-se em várias fases, iniciando com o fecho do molde, seguindo-se a injeção, a pressurização, a plasticização, o arrefecimento e finalmente a extração.

Neste processo as pressões de injeção variam entre os 300 e os 1500 MPa, pelo que os moldes são normalmente em aços tratados para suportarem as condições de injeção. Este processo permite grandes cadências de produção.

Existem processos de produção de compósitos por injeção a baixa pressão e por transferência de

resina, como é o caso do RTM, SRIM e RRIM. Nestes processos de injeção a baixa pressão são utilizadas resinas de baixa viscosidade que permitem usar reforços de fibras contínuas, com grandes vantagens ao nível as propriedades mecânicas.

Para além da evolução dos materiais e dos processos, os equipamentos também têm evoluído. Segundo [12], foram desenvolvidos novos parafusos de mistura para máquinas de injeção no sentido de inibir a quebra das fibras de vidro, reduzindo a força de corte sobre as fibras de vidro. As propriedades mecânicas das peças injetadas resultantes são muito superiores às das peças moldadas por injeção em máquinas convencionais e equivalentes às das peças moldadas por compressão.

2.7.6.2.6. *Resin Tranfer Moulding (RTM e HPRTM)*

Inicialmente as camadas de tecido de reforço são empilhadas num molde e unidas por um ligante, podendo ser também pré-moldadas para a forma do molde para facilitar o processo de colocação no molde (Figura 2.78). O molde é fechado pelo sub-molde superior, manualmente ou através de uma prensa, sendo posteriormente injetada a resina entre as duas metades do molde. Também pode ser aplicado vácuo na extremidade do molde, do lado oposto ao da entrada da resina, para facilitar o seu escoamento através do tecido de reforço, técnica conhecida como moldação por transferência de resina assistida por vácuo, designada por VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*). Após o espalhamento da resina por toda a cavidade do molde, os seus orifícios são tapados para a cura do componente, à temperatura ambiente ou a alta temperatura. Com este processo, que permite automatização e alta eficiência produtiva, é possível obter laminados com alto índice de TF e praticamente sem vazios. No entanto, é um processo limitado a componentes de pequena dimensão, de custos elevados, devido ao custo inicial do molde e do equipamento de pressurização. Este processo permite o fabrico de vários componentes de automóveis.

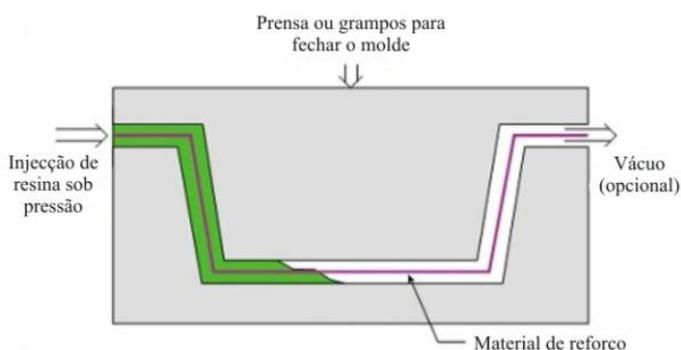


Figura 2.78 Representação esquemática do processo de moldação por transferência de resina (RTM).

Existe o processo RTM de alta pressão, designado por HPRTM, que permite o fabrico de componentes de alto desempenho extremamente leves. Em relação ao processamento "clássico" RTM, a tecnologia HPRTM permite aumentar o grau de automatização e diminuir o tempo específico do ciclo de

processamento, sendo relevante na produção de grandes séries, como por exemplo no fabrico dos painéis de carroçaria do BMW® i8. No processo RTM são típicas pressões de serviço entre 10 e 20 bar e ciclos de processamento entre 30 e 60 minutos. No processo HPRTM as pressões podem variar entre 30 e 120 bar (no interior do molde), com ciclos de processamento inferiores a 10 minutos.

2.7.6.2.7. *Structural Reation Injection Moulding (SRIM)*

Este processo utiliza um sistema de resina de baixa viscosidade, com dois componentes (isocianato e polioliol), os quais são combinados e misturados juntos. De seguida são injetados na cavidade do molde que contém o reforço, que geralmente é de fibras contínuas. A cura da resina cura rapidamente na cavidade do molde. Este processo permite fabricar componentes para automóveis, de grandes dimensões, leves e com boa resistência ao choque, e em ciclos de tempo inferiores aos do RTM [75].

2.7.6.2.8. *Reinforced Reation Injection Moulding (RRIM)*

Este processo é similar ao processo R-RIM, permitindo fabricar peças com características semelhantes, no entanto o reforço é adicionado aos componentes da resina antes de se misturarem, fora do molde, e só depois é que a combinação da resina reforçada é injetada na cavidade do molde, onde a resina reage rapidamente, permitindo uma cura rápida do componente [75].

2.7.6.2.9. *Moldação Assistida a Vácuo*

É uma extensão do método de moldação manual, à exceção da pressão que é aplicada ao laminado para melhorar a sua consolidação, bem como a remoção de vazios. Após empilhamento manual das camadas de pré-impregnado sobre um molde plano ou com a forma específica do componente a fabricar, o laminado é selado dentro de uma membrana flexível (tipicamente de silicone) e sujeito a vácuo e temperatura elevada para cura da resina (Figura 2.79). O *peel-ply* é uma película de tecido de poliamida (de aplicação opcional) colocado entre o laminado e a película desmoldante para dar um acabamento com elevada rugosidade, propício à posterior ligação adesiva com outros componentes. Este processo permite um índice de TF superior aos métodos anteriores com menor índice de bolhas de ar, embora o vácuo parcial criado pelo saco de vácuo (pressão sempre inferior a 1 atmosfera ou 1 kg/cm²) não garanta um componente completamente isento de bolhas de ar. A purga de resina em excesso é também facilitada pela pressão aplicada e utilização de uma película de absorção, e é ainda um processo limpo sem emissão de voláteis.

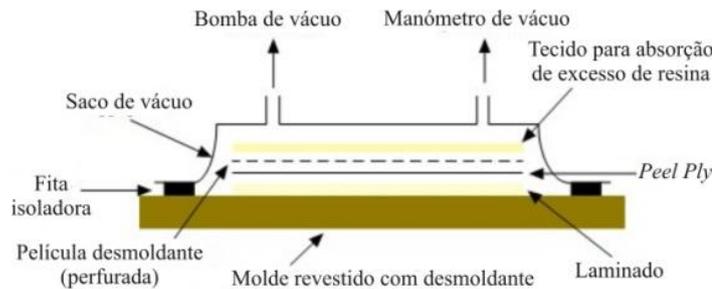


Figura 2.79 Representação esquemática do processo de cura em saco de vácuo.

Este processo tem custos acrescidos pelo facto de exigir consumíveis descartáveis e mão-de-obra especializada para o empilhamento e processamento com o saco de vácuo. O processamento apresenta dificuldades em garantir o índice de TF desejado, cujo resultado depende largamente do operador.

2.7.6.2.10. *Moldação em Autoclave*

Este processo de cura é muito utilizado para componentes previamente moldados manualmente ou por processo automatizado em que é necessária uma elevada qualidade do produto em termos de dimensões e não existência de vazios no seu interior. O autoclave permite aplicar ao componente uma pressão uniforme, muito superior à proporcionada pelo saco de vácuo, ao mesmo tempo que aplica a temperatura necessária para a cura da resina. Normalmente, o componente é colocado no interior do autoclave (Figura 2.80) dentro de um saco de vácuo, para obter o máximo efeito e contenção de voláteis. Este processo é utilizado na cura de componentes para aplicações de alta responsabilidade e elevada resistência mecânica após empilhamento manual ou automatizado, permitindo maior controlo dimensional, uniformização da espessura, consolidação e qualidade final superiores. No entanto, envolve custos elevados, quer pelo equipamento, quer pelos materiais processados, consumíveis e mão-de-obra.



Figura 2.80 Autoclave de grandes dimensões para cura de componentes em FRP.

2.7.6.2.11. *Moldação por Infusão*

Neste processo (Figura 2.81) os tecidos de reforço são empilhados num molde alternadamente com películas de resina semissólida. O molde é fechado através de um saco de vácuo para remoção de bolhas de ar, aplicação de pressão e aspiração da resina. Posteriormente, o conjunto é sujeito a um ciclo de temperatura, durante o qual se dá a completa impregnação dos tecidos de reforço com a resina, e, posteriormente a cura do componente. Esta técnica possibilita o fabrico de componentes com elevado índice de TF e reduzido índice de vazios pois a resina apenas necessita de se movimentar segundo a espessura do componente; permite também a utilização de resinas de elevadas propriedades mecânicas, e permite ainda uma cura mais eficaz devido às temperaturas elevadas que podem ser aplicadas ao molde. Este processo apresenta as mesmas vantagens relativamente a outros processos que utilizam pré-impregnados, com um custo mais reduzido. Em alguns casos não há necessidade da utilização de um autoclave, embora a utilização do saco de vácuo seja sempre necessária. Esta técnica é utilizada na indústria automóvel para o fabrico de componentes estruturais com formas complexas.

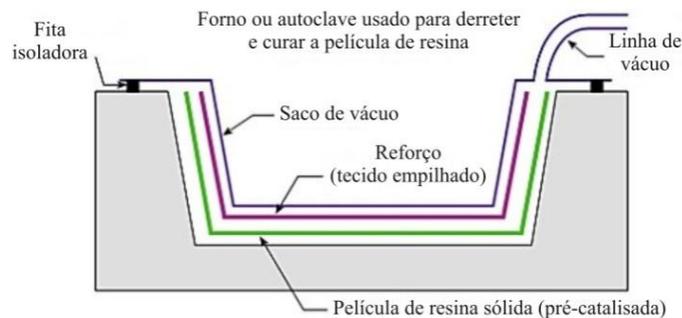


Figura 2.81 Representação esquemática do processo de infusão por filme de resina.

2.7.6.2.12. *Pultrusão*

Este processo permite o fabrico de componentes de secção constante que são tracionados à saída de uma matriz metálica com a forma do componente. As fibras e o tecido são previamente molhados num banho de resina não curada antes de passar através da matriz metálica, que é aquecida para garantir a cura rápida e gradual do componente, desde a sua entrada até à saída (Figura 2.82). A matriz permite um controlo preciso da quantidade de resina a incorporar no componente. O perfil pultrudido sai do molde já rígido, sendo depois cortado com o comprimento requerido.

Este é um processo de fabrico rápido, flexível e económico na produção de perfis, no entanto não é adequado para pequenas séries, devido ao desperdício de material no arranque do processo, e implica um investimento inicial elevado. Apesar de não ser um processo tipicamente utilizado na indústria automóvel, poderá ser interessante considerá-lo no futuro.

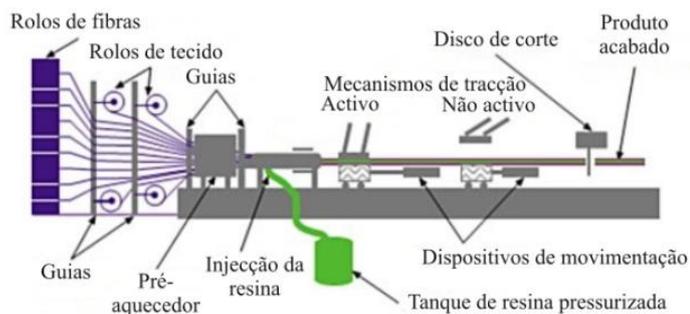


Figura 2.82 Esquema do processo de pultrusão.

As principais tecnologias utilizadas para a produção de compósitos reforçados com fibras naturais são: moldação manual por projeção, moldação por compressão SMC e BMC, injeção S-RIM, injeção RTM, pultrusão e enrolamento filamentar [80].

2.7.6.3. Aplicações Típicas

A aplicação dos materiais compósitos em geral na indústria automóvel tem vindo a generalizar-se nos últimos anos, devido às suas vantagens, tal como se pode observar pelo exemplo da Figura 2.83, que ilustra o domínio de aplicações que atualmente se estende por todas as marcas e modelos de automóveis existentes no mercado.

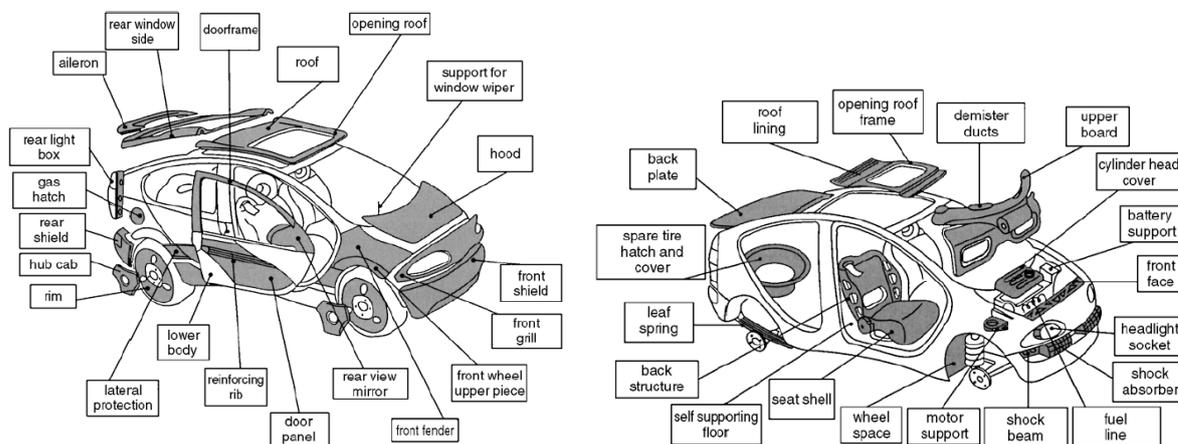


Figura 2.83 Componentes de automóveis fabricados em materiais compósitos [81].

Na Figura 2.84 pode-se observar a evolução do consumo de materiais compósitos reforçados com fibras de carbono, no fabrico de automóveis desportivos e super desportivos.

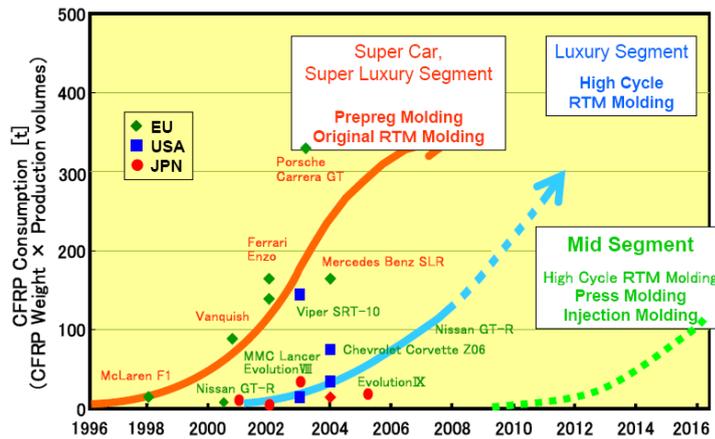


Figura 2.84 Evolução do consumo de CFRP desde 1996 no fabrico de automóveis desportivos e de superdesportivos [41].

A utilização de compósitos em geral na indústria automóvel indiana tem vindo a aumentar significativamente nos últimos anos, de acordo com o gráfico da Figura 2.85.

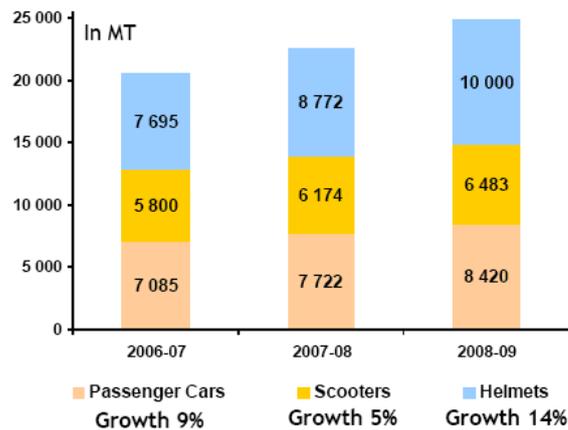


Figura 2.85 Aplicação de materiais compósitos na indústria automóvel Indiana [41].

Na Figura 2.86 pode-se observar uma plataforma de chão de um automóvel e um painel interior de uma porta, fabricados em CFRP por moldação por injeção, com um ciclo de 2,5 minutos e uma cura de 5 minutos.

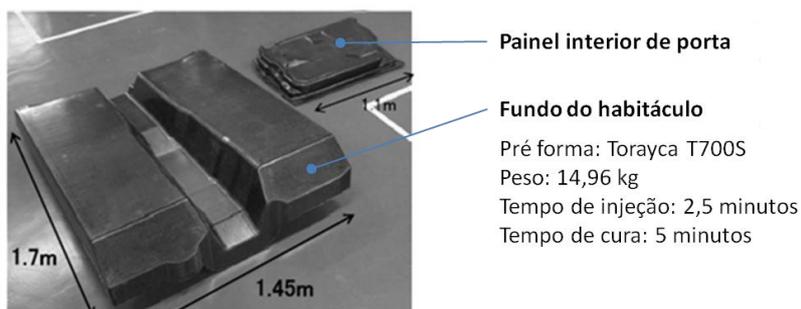


Figura 2.86 Componentes de carroçaria automóvel fabricados em CFRP por RTM [41].

A Figura 2.87 apresenta a estrutura de um tablier fabricado em compósito de matriz termoplástica (PP), com reforço de fibra de vidro longas.



Figura 2.87 Estrutura de um tablier do modelo C-Max da Ford[®] fabricado em material compósito (LFT) [74].

Os bancos desportivos da frente do novo Opel Insignia OPC[®] desenvolvidos pela Opel e pela Recaro[®] foram fabricados com duas poliamidas especiais (BASF Ultramid[®]) e uma espuma de PP expandido (Neopolen[®]). A estrutura do encosto foi fabricada em plástico reforçado com fibras de vidro em substituição do aço (Figura 2.88).



Figura 2.88 Compósitos GFRP utilizados no fabrico da estrutura dos bancos da frente do novo Opel[®] Insignia OPC desenvolvidos pela Opel[®] e pela Recaro[®] [82].

Os materiais compósitos podem apresentar-se sob a forma de uma estrutura *sandwich*. Este tipo de estrutura permite obter estruturas de elevada resistência e rigidez, pelo que é muito utilizada em automóveis de competição, nomeadamente na fórmula 1, e em automóveis de série superdesportivos.

A utilização deste tipo de estruturas em CFRP pode trazer uma redução de peso dos componentes até 75-80% em comparação com o aço, 30-40% comparado com o alumínio e 50% comparado com GFRP de fibras curtas.

Atualmente, vários modelos de automóveis desportivos usam compósitos de CFRP para redução de peso. O McLaren[®] F1 foi o primeiro automóvel de produção em série com estrutura *monocoque*

integral e painéis exteriores em CFRP, resultando num peso total de 1140 kg. O modelo de 2011, MP4-12C tem uma estrutura *monocoque* integralmente fabricada em CFRP (Figura 2.89).



Figura 2.89 Estrutura monocoque integral em CFRP do super-desportivo McLaren[®] MP4-12C [83].

O chassis do Porsche[®] Carrera[®] GT, ilustrado na Figura 2.90 (a), é composto principalmente de materiais compósitos, que ajudam a melhorar a segurança e o desempenho dinâmico e a diminuir o peso do veículo, sendo de apenas 1380 kg.



(a)

(b)

Figura 2.90 Porsche[®] Carrera[®] GT e a respetiva estrutura em CFRP.

A sua estrutura do tipo monocoque, apresentada na Figura 2.90 (b), é fabricada em compósito do tipo *sandwich*, com peles em CFRP/epoxido e núcleo em ninho de abelha. O fabrico da estrutura é feito por moldação manual e saco de vácuo e cura em autoclave. Em comparação com um chassis similar fabricado em aço, este chassis é cerca de duas vezes mais resistente e cinco vezes mais leve. A estrutura traseira que suporta o motor e a caixa de velocidades, é parte integrante do chassis, pesa apenas 45 kg. [84].

A BMW[®] desenvolveu um automóvel elétrico citadino que utiliza uma estrutura híbrida de CFRP /alumínio. Este conceito permite uma redução significativa de peso, uma vez que grande parte da estrutura é em compósito, como se pode observar pela Figura 2.91.



Figura 2.91 Estrutura do modelo i3 da BMW®.

Os fabricantes de automóveis procuram aumentar a incorporação de termoplásticos, em substituição de outros materiais. Segundo [74], existem novas oportunidades para a utilização de compósitos LFT, de acordo com a Figura 2.92

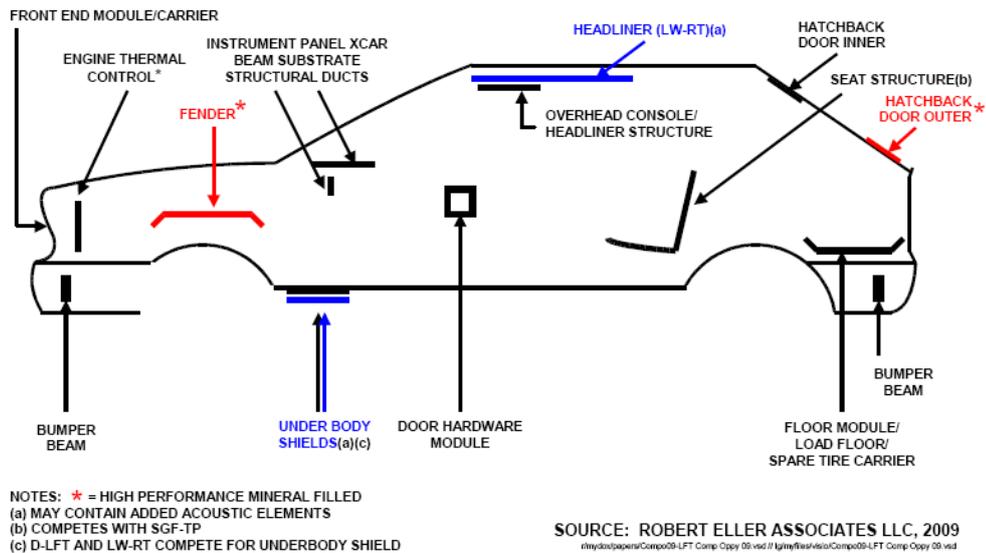


Figura 2.92 Possíveis aplicações de materiais compósitos LFT em automóveis [74].

As fibras naturais são materiais que têm vindo a ser estudados e aplicados em componentes de automóveis, como por exemplo a cortiça, aplicada em painéis interiores de portas, volantes, manípulos de comando da caixa de velocidades.

Segundo [85], estes materiais apresentam um bom comportamento térmico, que permite vantagens em termos de conforto. Atualmente, as fibras naturais são usadas no interior de automóveis, como por exemplo em painéis de interiores para o isolamento térmico e acústico. Estes materiais isolantes são obtidos principalmente à base de fibras de algodão reciclado, a partir de matérias têxteis, com teores

de fibra relativamente alta (mais de 80% em peso). Outro campo de aplicação bem estabelecida é o uso de fibras de coco com látex natural para os assentos.

Os materiais de fibra de madeira, anteriormente utilizados nos painéis das portas, foram substituídos por materiais reforçados com fibras vegetais, permitindo uma redução de peso de cerca de 20% [76]. Para além da redução de peso, permitiram um aumento da resistência ao impacto, importante para a proteção dos passageiros em caso de acidente. Na Figura 2.93 pode ver-se a aplicação de fibras naturais em diferentes componentes de automóveis.

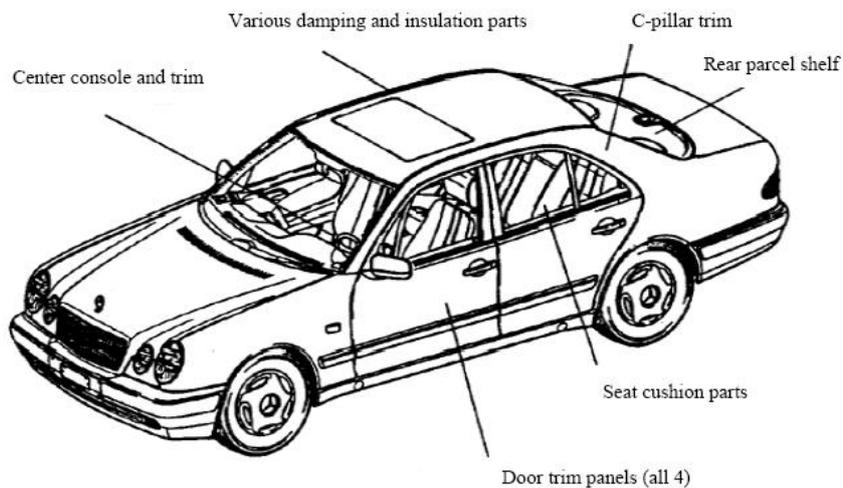


Figura 2.93 Aplicação de fibras de plantas no modelo E (W210) da Mercedes-Benz® [76].

Na Figura 2.94 (a) pode observar-se um painel interior de revestimento de porta de um automóvel em bio compósito de fibras curtas de cânhamo/polietileno fabricado por moldação por projeção.

Na Figura 2.94 (b) pode ver-se um painel interior da porta para do modelo Série 7 da BMW®, fabricado por moldação por compressão utilizando *prepreg* de fibras naturais e um copolímero acrílico BASF® [82].



Figura 2.94 Paineis interior de revestimento de portas de automóveis em biocompósito de fibras naturais.

A Toyota® construiu um protótipo, designado por 1/X (Figura 2.95) que pesa apenas 420 kg, e no qual foram usados plásticos derivados de algas marinhas. Segundo [86], a utilização de bioplásticos é cada vez mais comum e tende a generalizar-se na indústria automóvel.



Figura 2.95 Protótipo 1/X da Toyota®, construído com aplicação de plásticos derivados de algas marinhas [86].

O bio-PET é outro material que incorpora matérias-primas derivadas da cana-de-açúcar. O material foi desenvolvido pela Toyota® e Toyota Tusho Corporation®, sendo aplicado em volantes, tapetes e outras aplicações interiores.

O Protótipo da Volkswagen®, modelo CCO, com motor de 300 cm³, é um bom exemplo da combinação de materiais leves, incluindo alumínio, magnésio, titânio e compósitos de matriz polimérica, pesa apenas 290 kg e apresenta um consumo de combustível de 1 l/100 km [33]. A partir deste projeto a VW® desenvolveu outros modelos como o XL1 (Figura 2.96).



Figura 2.96 Volkswagen® XL1.

CAPÍTULO III

3. Estudo e Fabrico da Estrutura do Veículo de Referência

3.1. Introdução

Tal como foi explanado no capítulo anterior, as necessidades de mobilidade colocarão novos e cada vez maiores desafios à sociedade, particularmente nos sectores dos transportes e energético, com grande impacto no ambiente, em particular devido à mobilidade urbana, pelo efeito da crescente densidade de população nos grandes centros urbanos. Daqui resultam naturalmente novas oportunidades para o setor dos transportes e desafios que se espera virem a exigir soluções alternativas, possivelmente a médio e longo prazo, mais adaptadas às necessidades das sociedades no futuro, e muito mais eficientes das que atualmente.

Independentemente do tipo de transporte, individual ou coletivo, e da sua capacidade, faz todo o sentido que o seu peso seja o mais baixo possível, sendo este um dos fatores chave para o estudo que aqui se propõe fazer. Segundo [33] o peso dos veículos é um dos fatores mais importantes na sua eficiência. De acordo com [41], a redução de peso dos veículos tem como consequência direta a diminuição do consumo e das emissões de poluentes, sendo que aquele estudo estima que por cada 100 kg de redução de peso, em média, o consumo diminui cerca de 0,3 l/100 km e as emissões de CO₂ diminuem entre 7,5 e 12,5 g/km.

Este trabalho enquadra-se precisamente no contexto do parágrafo anterior, visando estudar a aplicação de materiais leves em estruturas automóveis, em particular materiais compósitos reforçados com fibra de vidro, que apresenta um bom compromisso entre desempenho e o custo.

Tendo em conta a importância da redução de peso dos veículos, os novos desafios para a mobilidade urbana no futuro e os custos de fabrico de componentes, tal como foi descrito no capítulo anterior, optou-se por estudar um componente estrutural que pudesse ser adaptado a diferentes tipos de veículos, a exemplo dos veículos ilustrados nos esboços apresentados na Figura 3.1, com particular interesse a veículos citadinos compactos.

Esta opção visa, fundamentalmente, encontrar caminhos possíveis para o desenvolvimento de estruturas automóveis mais leves e de baixo custo, nomeadamente para séries pequenas com baixo grau de automatização.

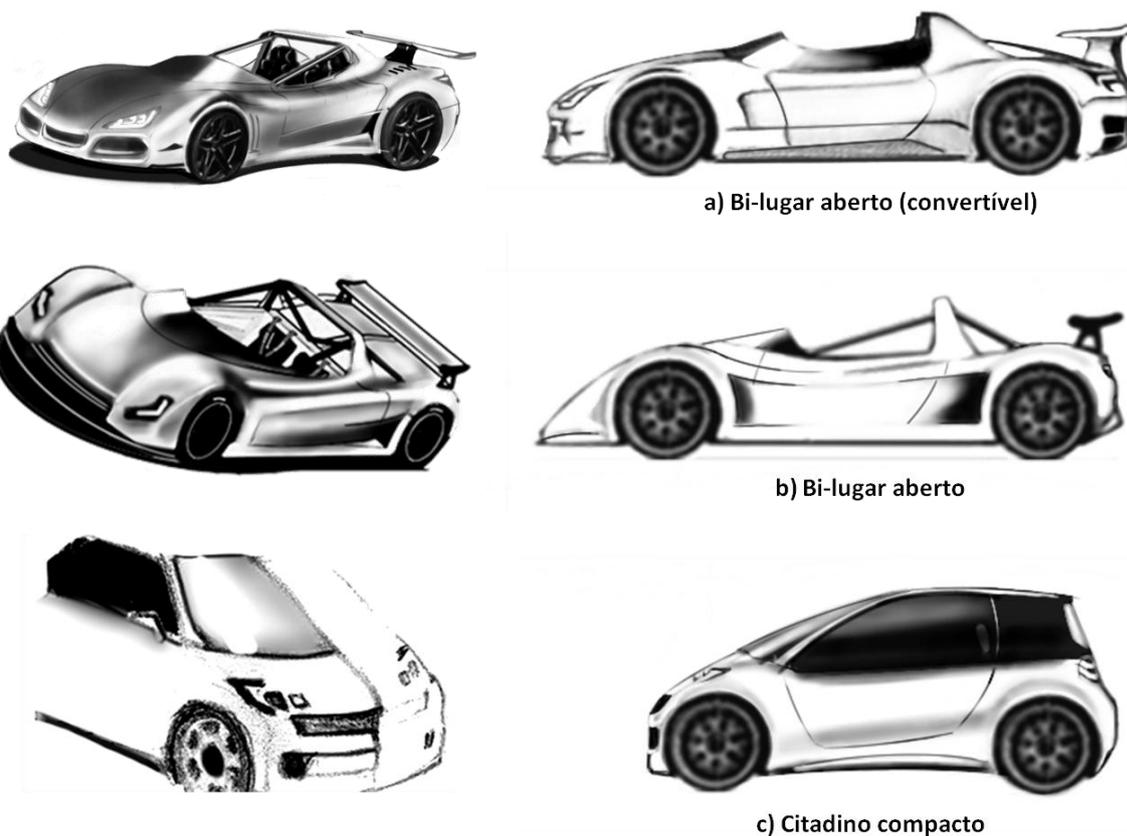


Figura 3.1 Esboço de veículos de nicho: a) bi-lugar convertível, b) bi-lugar aberto c) citadino compacto de dois lugares.

Para definição dos requisitos da estrutura a desenvolver, optou-se por utilizar um veículo de referência, a partir do qual fosse possível avaliar as suas principais características estruturais, nomeadamente no que respeita à rigidez e ao peso. Como tal, utilizou-se um veículo já desenvolvido, ilustrado na Figura 3.2, que se caracteriza por ser um bi-lugar aberto, e por utilizar uma estrutura tubular em aço, cujos detalhes se apresentam de seguida (ver desenhos no anexo IV).



Figura 3.2 Veículo de referência [87]

Esta opção assenta em dois fatores fundamentais. O primeiro, prende-se com a simplicidade da sua estrutura, fator que associado à disponibilidade do veículo e ao elevado grau de conhecimento, permite realizar mais facilmente a sua caracterização. O segundo fator, prende-se com o facto desta estrutura ser totalmente compatível com a dos veículos apresentados na Figura 3.1 a) e b). Por outro lado, a zona do habitáculo é compatível geometricamente com a de um veículo citadino compacto.

Para a caracterização estrutural do veículo de referência procedeu-se ao desenho e ao fabrico de uma réplica da sua estrutura, que se submeteu posteriormente a ensaios para determinação do peso e da rigidez estática em torção e em flexão. Estas características foram estimadas paralelamente através de simulação numérica por elementos finitos, sendo o modelo de simulação validado através dos resultados dos ensaios.

Depois de estudado e caracterizado o veículo de referência, foram estudadas algumas combinações de materiais compósitos do tipo *sandwich* com peles reforçadas com fibra de vidro, no sentido de identificar materiais com características que permitam obter uma estrutura em compósito adaptável à tipologia de veículos ilustrados na Figura 3.1, com desempenho compatível com o da estrutura de referência.

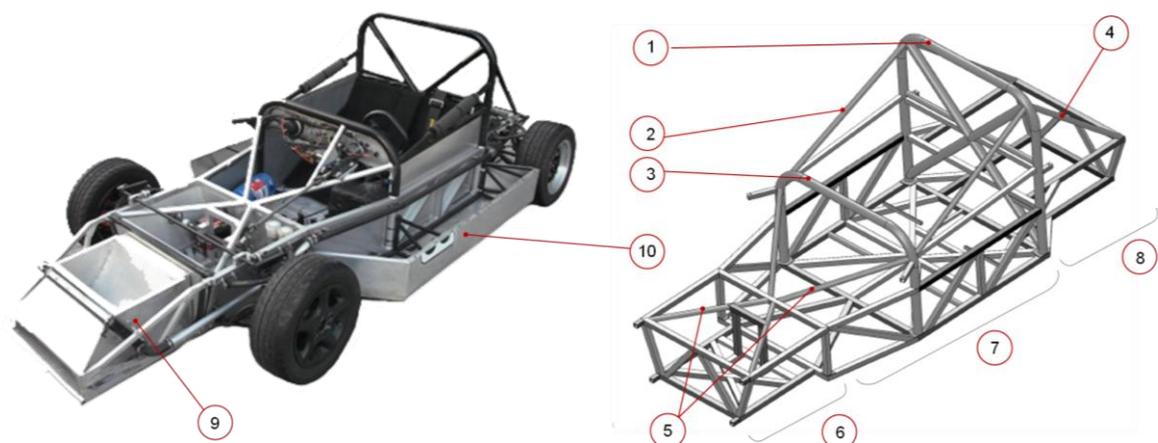
Após o estudo e a caracterização dos materiais, procedeu-se ao desenho de uma nova estrutura em compósito, designada por E2, descrita no subcapítulo 4.3.3. A partir deste desenho inicial, procedeu-se a um estudo de simulação através de elementos finitos, com vista à sua otimização.

Depois do estudo de otimização procedeu-se à construção da estrutura E2 e a ensaios para validação dos resultados obtidos pela simulação.

No final, procedeu-se à discussão dos resultados, às conclusões finais, bem como à apresentação de algumas sugestões para trabalhos futuros.

3.2. Caracterização do Veículo de Referência

O veículo de referência é veículo bi-lugar aberto com uma estrutura tubular e carroçaria em plástico reforçado com fibra de vidro. Por questões de segurança o habitáculo é reforçado na zona central e dispõe de zonas de absorção de energia, na parte frontal, posterior e laterais. Na Figura 3.3 pode ver-se uma perspetiva do veículo de referência, sem a carroçaria, bem como a respetiva estrutura tubular.



LEGENDA:

- | | | |
|---|--------------------------------|--|
| 1 Arco principal | 5 Reforço estrutural dianteiro | 9 Crash box frontal |
| 2 Reforço estrutural e proteção da cabeça | 6 Berço frontal | 10 Zona de absorção de impacto lateral |
| 3 Arco frontal | 7 Habitáculo | |
| 4 Reforço estrutural traseiro | 8 Berço traseiro | |

Figura 3.3 Estrutura tubular do veículo de referência

Este veículo dispõe de um motor em posição central, de quatro cilindros em linha de 999 c.c com 75 cv de potência. A transmissão é feita através de uma caixa de cinco velocidades com tração traseira. A suspensão tem uma configuração de triângulos sobrepostos nas quatro rodas, com molas e amortecedores do tipo *coil-over*. A geometria de direção e suspensão permite a regulação de *camber*, *caster*, convergência e altura nas quatro rodas. O sistema de travagem é constituído por travões de disco nas quatro rodas.

Tratando-se de um veículo desenvolvido para competição o seu peso é de apenas 505 kg, uma vez que não dispõe de revestimentos interiores, equipamento de conforto (sistema áudio, climatização e outros), nem de segurança ativa (sistema de travagem com anti bloqueio de rodas, airbag e outros). Na tabela 3.1. resumem-se os pesos de todos os componentes do veículo de referência.

Este veículo foi submetido a um programa de testes em pista, durante o qual foi possível validar o seu funcionamento em termos gerais, incluindo aspetos relacionados com a ergonomia a integridade do conjunto, em condições normais e severas de utilização, os aspetos relacionados com as características de rigidez da estrutura, apresentando um comportamento dinâmico muito equilibrado em todas as situações, em reta, em curva, nas travagens e em aceleração.

Tabela 3.1 Peso dos componentes e peso total do veículo de referência.

Componente	Qt.	Material	Peso/Un. (kg)	Peso (kg)
Estrutura tubular	1	Aço DIN 25CrMo4 / DIN ST-37	80,0	80,0
Motor completo	1	Vários	70,0	70,0
Carroçaria	1	Fibra de vidro	60,0	60,0
Roda (jante e pneu)	4	Vários	14,0	56,0
Caixa de velocidades e diferencial	1	Vários	35,0	35,0
Manga de eixo	4	Ferro fundido	6,0	24,0
Flanco Lateral	2	Aço / Alumínio	10,0	20,0
Conjunto mola/amortecedor	4	Vários	4,0	16,0
Disco de travão, pinça e Calço	4	Vários	4,0	16,0
Triângulo de suspensão inferior	4	Aço	3,0	12,0
Painéis de habitáculo e fundo plano	1	Alumínio	10,0	10,0
Estrutura frontal	1	Vários	10,0	10,0
Triângulo de suspensão superior	4	Aço	2,5	10,0
Caixa de direção completa	1	Vários	10,0	10,0
Estrutura traseira	1	Aço de construção	8,0	8,0
Coletor e tubo escape	1	Aço	8,0	8,0
Acessórios e outros componentes	1	Vários	8,0	8,0
Cadeira	1	Alumínio	7,0	7,0
Transmissão direita	1	Aço	7,0	7,0
Instalação elétrica	1	Vários	7,0	7,0
Depósito de combustível	1	Aço	6,0	6,0
Extintor	1	Vários	5,5	5,5
Radiador	1	Vários	5,0	5,0
Coluna de direção completa	1	Aço	5,0	5,0
Transmissão esquerda	1	Aço	4,0	4,0
Bateria	1	Vários	3,0	3,0
Pedaleira e conjunto de bombas	1	Vários	2,0	2,0
Volante	1	Vários	0,5	0,5
Peso Total				505

Na Figura 3.4 pode ver-se a percentagem do peso de cada componente no peso do veículo de referência.

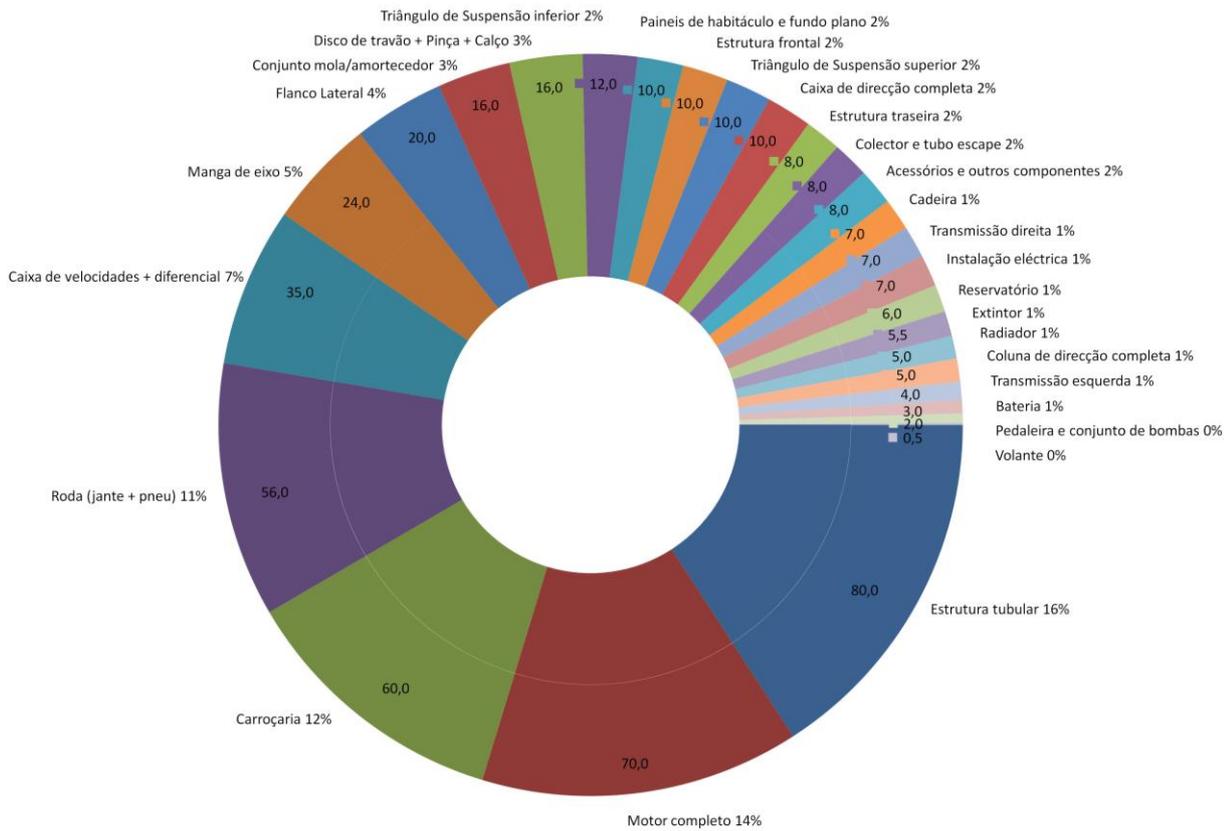


Figura 3.4 Percentagem do peso de cada componente no peso do veículo de referência.

3.2.1. Descrição da Estrutura Tubular

A estrutura do veículo de referência é do tipo tubular, em aço, construída em construção soldada, através de do processo de soldadura MIG e TIG, combinando perfis tubulares, com especificação DIN St37, com perfis tubulares, em aço ligado de elevada resistência, com designação DIN 25CrMo4, de acordo com a Figura 3.5. Esta estrutura foi desenvolvida de acordo com normalização FIA.

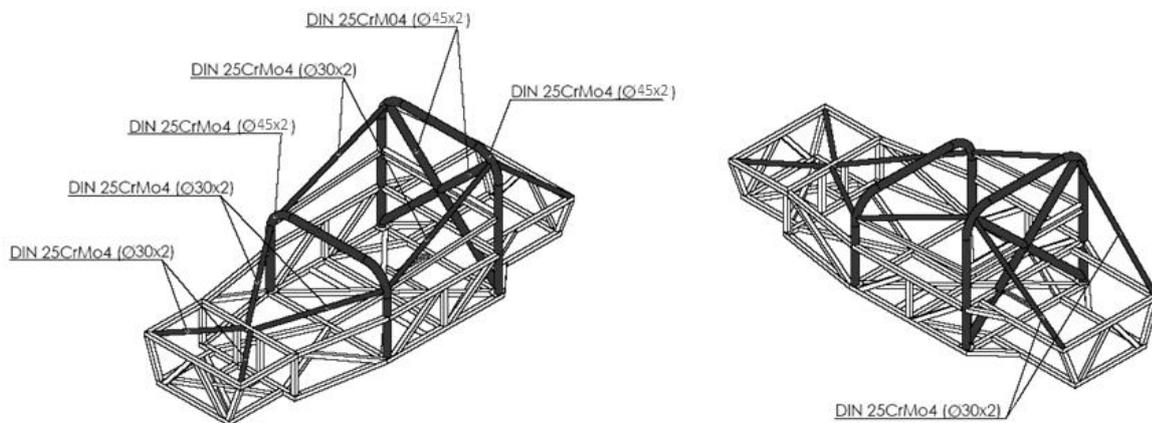


Figura 3.5 Elementos de reforço em aço DIN 25CrMo4.

Os elementos tubulares em aço de elevada resistência são aplicados na zona do habitáculo, de acordo com a regulamentação aplicável a este tipo de veículo, especificamente nos arcos de segurança frontal, traseiro e nos elementos de ligações entre estes e os berços frontal e traseiro, formando uma célula de sobrevivência, para aumentar a proteção dos passageiros.

Na Tabela 3.2 resumem-se as principais propriedades dos materiais utilizados na estrutura de referência.

Tabela 3.2 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados na estrutura de referência [88]

Propriedades	Unidades	DIN 25CrMo4*	DIN St37
Peso específico, ρ	Kg/dm ³		7,86
Módulo de elasticidade	GPa		203
Coefficiente de Poisson			0,30
Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%	MPa	634	240
Tensão de rotura	MPa	749	370
Deformação na rotura	%	18,5	23

*Certificado apresentado no Anexo III

Por questões de segurança, de acordo com a regulamentação imposta pela FIA, o habitáculo é isolado com chapas de alumínio rebitadas à estrutura para proteção dos passageiros contra objetos projetados a partir do exterior (Figura 3.6). Contudo, estas chapas aumentam o peso da estrutura em cerca de 10 kg, aproximadamente.

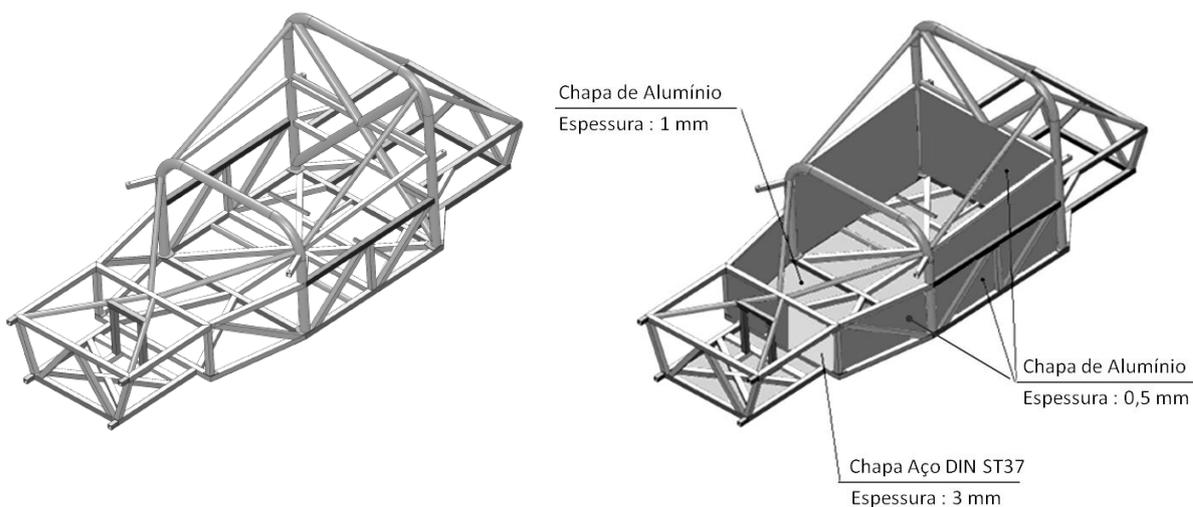


Figura 3.6 Isolamento do habitáculo com chapas de alumínio.

Para além do reforço da estrutura na zona do habitáculo existem zonas de absorção de energia, na

frente, na traseira e de ambos os lados laterais, para proteção dos ocupantes no caso de ocorrerem impactos. Uma vez que este trabalho visa estudar a estrutura principal do veículo, e mais especificamente o habitáculo, tais componentes não serão aqui estudados, centrando-se a descrição na estrutura de referência.

3.2.2. Modelação CAD 3D da Estrutura de Referência

Inicialmente procedeu-se à modelação CAD 3D (Figura 3.7) da estrutura de referência para posterior estudo de caracterização estrutural. Relativamente à estrutura do veículo de referência foram introduzidas algumas alterações para correção e melhoria de alguns pontos críticos, com especial destaque para o aumento em 10 mm no comprimento do habitáculo.

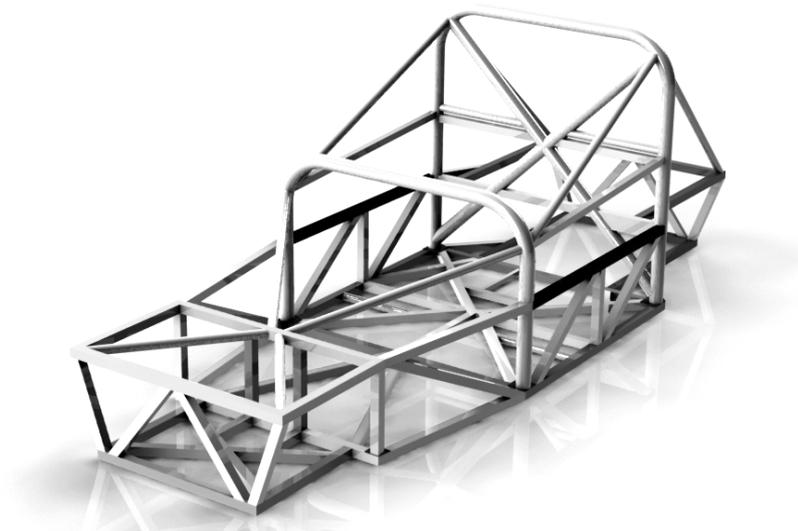


Figura 3.7 Modelação CAD 3D da estrutura de referência (Solidworks®).

No sentido de se fabricar uma réplica da estrutura de referência modelada, foram realizados os respetivos desenhos para fabrico, que se apresentam no Anexo IV.

3.2.3. Fabrico da Estrutura de Referência

A estrutura foi fabricada por construção soldada tendo sido utilizado um *gabari* que foi especificamente projetado para o efeito, com o objetivo de diminuir significativamente o tempo de fabrico bem como aumentar a qualidade dimensional e geométrica da estrutura, face ao fabrico da estrutura original. Os meios utilizados no fabrico da estrutura original eram menos precisos, sendo mais difícil de evitar ligeiros empenos da estrutura durante a soldadura.

3.2.3.1. Fabrico de Gabari de Soldadura

Para o fabrico da estrutura foi desenvolvido um *gabari* constituído por uma placa de aço montada sobre uma estrutura rígida e nivelada, para minimizar defeitos dimensionais e geométricos na estrutura a fabricar. A placa de aço tem 8 mm de espessura e dispõe de rasgos distribuídos na sua superfície, nos quais são colocadas pequenas chapas (batentes guia) que permitem o correto posicionamento dos tubos inferiores da estrutura. Para além destes batentes guia, o *gabari* foi desenvolvido com 10 esquadros de posicionamento dos vários componentes superiores da estrutura, de forma a cumprir a geometria e todas as dimensões da estrutura.

Todos os componentes do *gabari* foram cortados a laser numa máquina CNC de corte laser TruLaser 5030, com laser de CO₂, a uma velocidade de corte de 30 m/min., a partir das respetivas modelações feitas em CAD (Figura 3.8). Os desenhos do *gabari* podem ser consultados no Anexo IV.

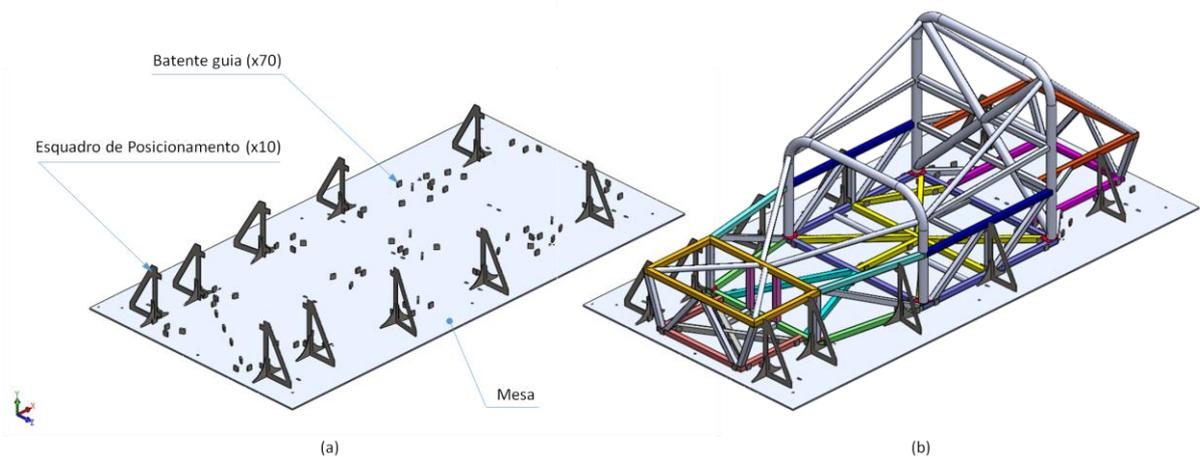


Figura 3.8 Modelação CAD 3D do *gabari* de soldadura da estrutura de referência. (a) *Gabari* completo, (b) Estrutura posicionada no *gabari* (Solidworks®).

Este processo de corte apresenta uma tolerância dimensional de acordo com a norma ISO 2768, normalmente aplicável ao processamento por arranque de avara.

3.2.3.2. Corte de Tubos por Laser

Os tubos a utilizar no fabrico da estrutura foram cortados por laser num equipamento TruLaser Tube 7000. A partir da modelação CAD 3D da estrutura, foram exportados os desenhos CAD de todos os tubos e convertidos num formato CAM compatível com o programa CNC da máquina de corte laser. Optou-se por este tipo de corte com elevada precisão, uma vez que permite não só uma redução substancial do tempo de corte, relativamente ao processo convencional manual, mas também uma redução do tempo no processo de soldadura acompanhada de uma diminuição da quantidade de metal de adição nos cordões. A redução da quantidade de metal de adição tem impacto na redução do peso

da estrutura, bem como na redução das tensões internas que se desenvolvem durante o processo.

3.2.3.3. Soldadura da Estrutura

A estrutura tubular foi fabricada por construção soldada através do processo soldadura TIG (*Tungsten Inert Gás*), e nas zonas de mais difícil acesso pelo processo MIG (*Metal Inert Gás*), tendo-se tido alguns cuidados no sentido de se obter uma soldadura sem pontos de maior fragilidade nos cordões sem excesso de material de adição. Na prática nem sempre esses cuidados são considerados, embora sejam importantes uma vez que influenciam as propriedades mecânicas da estrutura.

Antes de realizar a soldadura, deve proceder-se (se necessário) à limpeza das zonas a soldar para evitar defeitos que podem ser induzidos pela presença de óxidos ou gordura nas zonas a soldar. Esses defeitos podem influenciar negativamente a resistência da soldadura e por conseguinte da estrutura. A preparação e limpeza das superfícies oxidadas pode ser efetuada recorrendo a uma escova de arame, friccionando ao longo das superfícies a ligar, até que a superfície aparente estar completamente liberta dos óxidos. Esta operação requer um controlo visual através da avaliação da cor da superfície. Para a limpeza de gorduras podem ser utilizados produtos tais como o tetracloreto de carbono, o tricloreto de etileno e detergentes alcalinos como o fosfato trisódico ou o silicato de sódio. No entanto, depois da limpeza é necessário remover das superfícies estes produtos químicos para evitar o ataque ao metal de adição e conseqüentemente à ligação. Para isso a zona a soldar deve ser limpa com água quente e seca em corrente de ar quente.

Depois da preparação dos tubos cortados a laser, procedeu-se à sua colocação no *gabari*, respeitando a posição de cada um, através do código gravado em cada tubo correspondente à sua numeração no desenho de conjunto apresentado no Anexo IV.

Durante o processo de soldadura existe a tendência para os materiais dilatarem com a temperatura elevada a que são expostos. Como o aquecimento é maior na zona da junta, a dilatação das peças não é uniforme, produzindo-se assim uma deformação localizada que tende a afastar, sobrepor ou encurvar as peças a soldar. Estas deformações têm sempre como origem as tensões desenvolvidas durante o processo de soldadura devido ao gradiente de temperatura [89].

O processo de soldadura divide-se numa sequência de seis passos distintos, sendo muito importante que antes de se proceder a qualquer soldadura completa, se posicionem corretamente os tubos através de alguns “pingos” de soldadura.

Primeiro, procedeu-se ao posicionamento dos tubos horizontais do plano inferior da estrutura, entre os batentes guia do *gabari*. De seguida efetuou-se a união dos tubos por “pingagem” de forma a garantir uma ligação suficientemente resistente, embora sem efetuar a soldadura final. Depois de concluída a “pingagem”, retirou-se esta primeira subestrutura e repetiu-se o procedimento para

fabricar as duas subestruturas horizontais superiores, tal como se pode observar pela Figura 3.9.

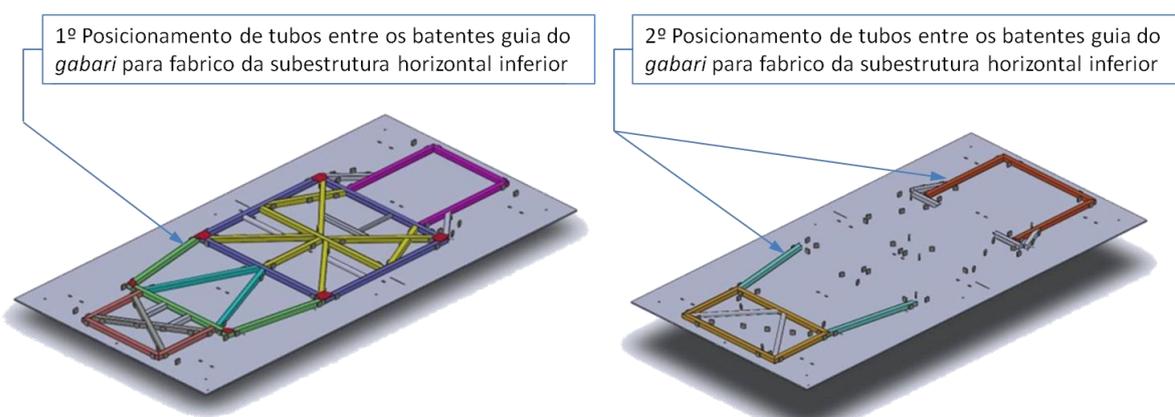


Figura 3.9 Sequência de “pingagem” das subestruturas horizontais.

Após a pingagem dos tubos das subestruturas horizontais superiores, colocou-se no gabari a primeira subestrutura horizontal à qual foram pingados, primeiro o arco traseiro e depois o arco frontal (Figura 3.10).

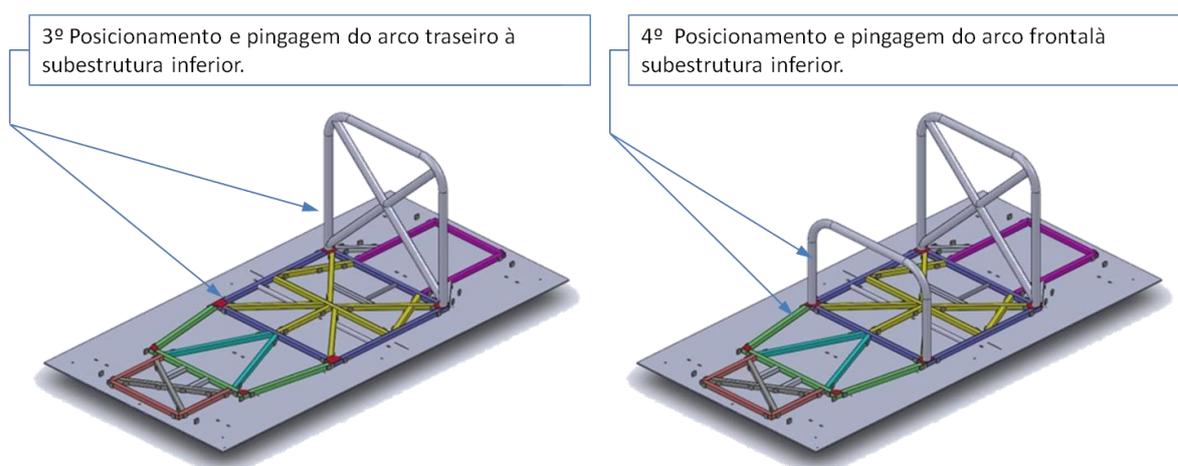


Figura 3.10 Sequência de “pingagem” dos arcos de segurança.

Os dois arcos, em tubo de aço com especificação DIN 25CrMo4, foram previamente dobrados numa máquina de curvar tubo. O arco traseiro foi ainda reforçado com dois tubos em diagonais cruzadas, simetricamente.

Antes de se proceder à soldadura final dos arcos posicionaram-se e pingaram-se as duas subestruturas horizontais superiores e os tubos verticais, recorrendo aos esquadros do gabari. Depois foram pingados os restantes tubos verticais e inclinados da estrutura (Figura 3.11).

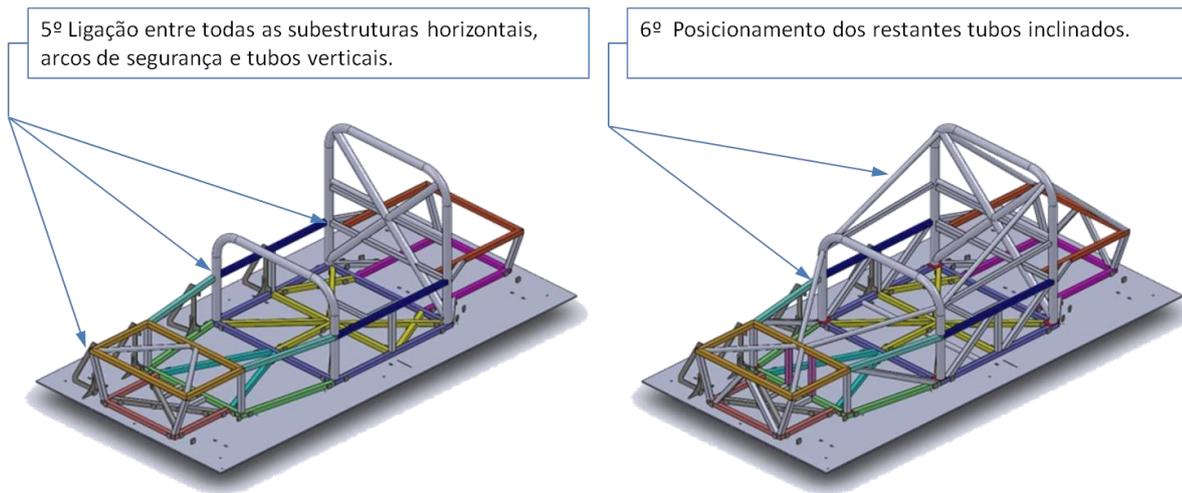


Figura 3.11 Sequência de ligação de todas as subestruturas.

Depois de posicionados todos os elementos, procedeu-se à soldadura final da estrutura (Figura 3.12), soldando simetricamente relativamente ao plano médio da estrutura, por forma a evitar desalinhamentos, empenos e tensões dissemelhantes nos diferentes tubos.



Figura 3.12 Fotografia do fabrico da estrutura durante o processo de soldadura sobre o *gabri*.

3.2.4. Ensaios da Estrutura de Referência

Após o fabrico da estrutura de referência, procedeu-se a ensaios para avaliação do peso e da rigidez estática, em torção e em flexão. Estas são, tipicamente, características de *benchmark*, uma vez que o peso, tem influência direta na eficiência do veículo, e a rigidez, no comportamento dinâmico. Para além da segurança, estas são as características estruturais que os fabricantes procuram otimizar [47].

Os ensaios foram efetuados à estrutura completa, bem como à parte da estrutura que limita o habitáculo, nas condições descritas de seguida.

3.2.4.1. Pesagem

A estrutura fabricada foi pesada numa balança industrial, tendo-se registado o valor de 80,6 kg. No entanto, tal como referido no subcapítulo 3.2.1, a estrutura do veículo é revestida com chapas de alumínio para isolamento do habitáculo, cujo peso é de aproximadamente 10 kg, pelo que se considera o peso total da estrutura de 90,6 kg.

3.2.4.2. Ensaio de Torção

A caracterização da rigidez torsional, devido às cargas verticais assimétricas a que um veículo está sujeito, deve ser feita através dos pontos de ligação da estrutura ao solo, ou seja, nos pontos de ligação dos amortecedores. Apesar de não serem as condições reais a que uma estrutura deste tipo está sujeita, entendeu-se submeter a estrutura de referência fabricada aos ensaios de acordo com as condições ilustradas na Figura 3.13, uma vez que o objetivo é, tal como já referido, determinar valores de referência para posterior comparação com os resultados de uma estrutura que se pretende desenvolver em compósito, sujeita às mesmas solicitações. Esta opção justifica-se pela facilidade do ensaio e dos custos associados, uma vez que é feito sem os pontos de ligação dos amortecedores.

Os ensaios de torção foram efetuados de acordo com as condições representadas esquematicamente na Figura 3.13, sendo a carga T_1 , correspondente ao ensaio da estrutura completa (Estrutura 1), e a carga T_2 , correspondente à carga no ensaio da estrutura que limita o habitáculo (Estrutura 2).

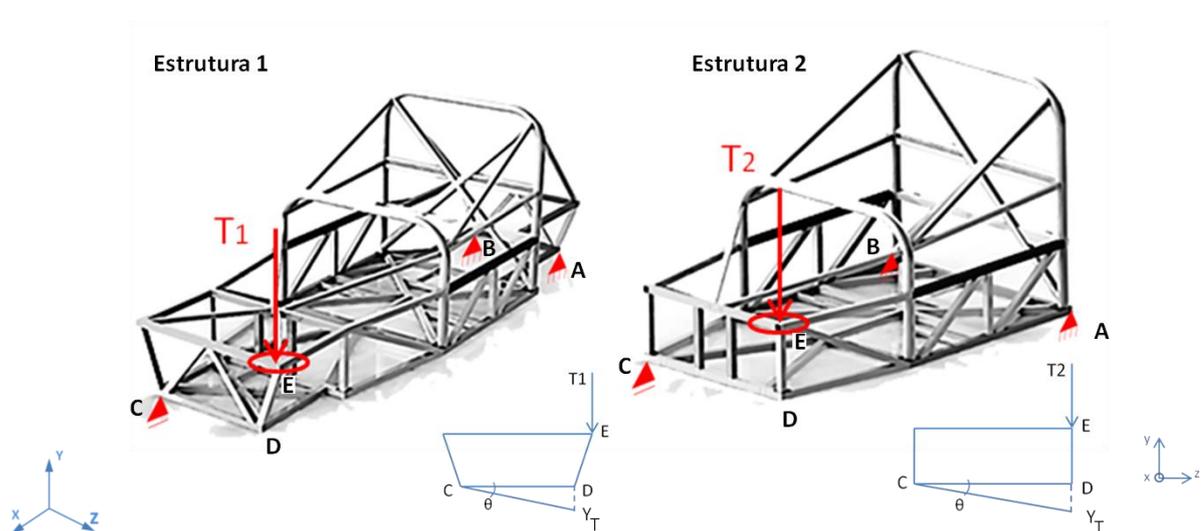


Figura 3.13 Condições do ensaio de torção para determinação da rigidez torsional da estrutura de referência.

O ensaio de torção foi realizado com uma carga T , aplicada no ponto E, e com as seguintes condições-fronteira impostas aos pontos A, B, C, D e E, identificados na Figura 3.13, relativamente aos respetivos graus de liberdade:

- Ponto A - restrição de deslocamentos nas direções X, Y e Z;
- Ponto B - restrição de deslocamentos nas direções X, e Y;
- Ponto C - restrição de deslocamentos na direção Y; e
- Ponto D - livre, sem restrição de deslocamentos.

Após aplicação da carga, procedeu-se à medição do deslocamento Y_1 , no ponto D, através de um comparador. A rigidez torsional K_T foi determinada pela seguinte expressão:

$$k_T = \frac{M_T}{\theta} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde,

M_T Momento torsor (N.m); e

θ Ângulo de torção (grau °).

sendo o momento torsor no ponto C, determinado pela expressão:

$$M_T = T \times CE_Z \quad (\text{Eq. 3.2})$$

e o angulo de torção θ , determinado a partir do valor do deslocamento vertical Y_T do ponto D, devido ao esforço de torção, através da equação:

$$\theta = \arctg\left(\frac{Y_T}{CE_Z}\right) \times 360 / 2\pi \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde,

T Carga aplicada no Ponto E (N);

Y_T Deslocamento vertical no ponto D (m); e

CE_Z Distância horizontal entre o ponto C e o ponto E (m).

Inicialmente foram realizados alguns ensaios para verificar se os meios disponíveis eram minimamente adequados, bem como proceder aos ajustes necessários.

Durante o primeiro ensaio de torção, designado por “Ensaio Tubular_T1”, verificou-se que a carga aplicada (90 kg) produziu um deslocamento significativo no ponto D, excedendo o curso do fuso do comparador, o que impossibilitava a medição correta. Durante a realização do ensaio T_2 , verificou-se que a alavanca utilizada para aplicação da carga fletiu ligeiramente, o que impediu uma leitura correta do braço do momento torsor, influenciando assim o resultado da rigidez torsional. Verificou-se, também, um problema no apoio traseiro direito, uma vez que este impedia deslocamentos transversais, na direção do eixo Z, conferindo assim maior rigidez à estrutura.

Após estes ensaios prévios para teste e verificação das condições, procedeu-se aos ensaios de torção do habitáculo, de acordo com as condições ilustradas na Figura 3.13 para a Estrutura 2.

Optou-se por utilizar uma carga mais baixa (75 kg) e uma alavanca mais rígida, em perfil I, em substituição do tubo de secção circular, para evitar a sua deformação e consequente influência nos resultados do ensaio. Para além destas alterações procedeu-se à correção do apoio traseiro direito, de forma a impedir os deslocamentos na direções X e Y, permitindo-os na direção Z (Figura 3.14).



Figura 3.14 Detalhe do apoio do ponto B com restrição de deslocamentos nas direções X e Y.

3.2.4.3. Ensaios de Flexão

A rigidez estática em flexão das estruturas 1 e 2 foi determinada a partir de ensaios de flexão realizados à estrutura fabricada. No ensaio foi aplicada uma carga vertical de 750 N, no centro da base pelo lado interior do habitáculo (ponto F), de acordo com a representação esquemática apresentada na Figura 3.15.

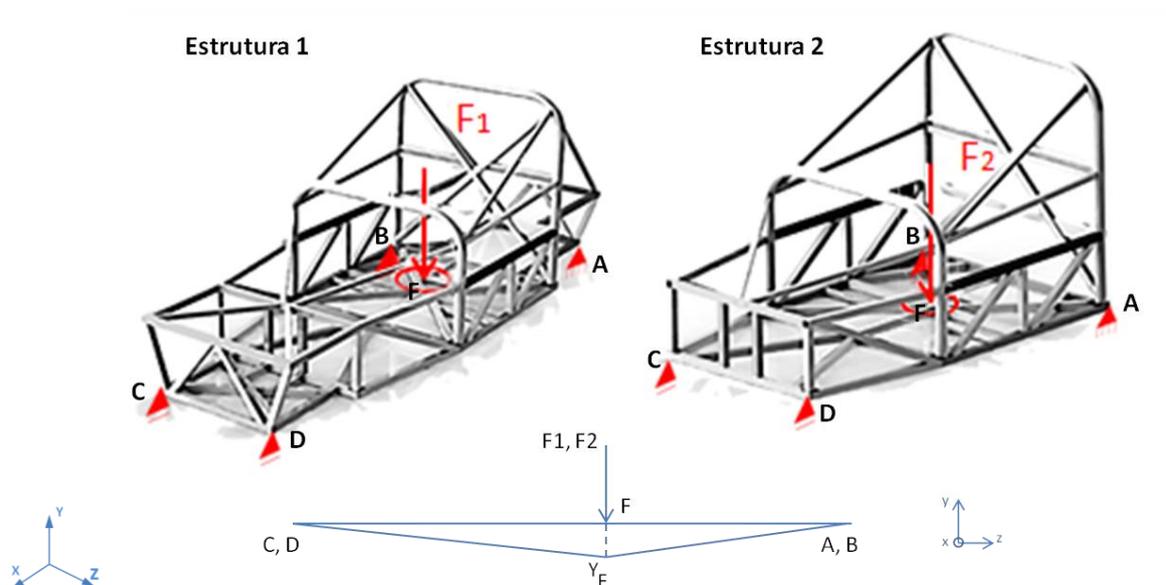


Figura 3.15 Condições do ensaio de flexão para determinação da rigidez à flexão da estrutura de referência.

Relativamente às condições-fronteira, foram impostas as seguintes restrições aos pontos A, B, C e D:

- Ponto A - restrição de deslocamentos nas direções X, Y e Z;
- Ponto B - restrição de deslocamentos na direção Y;
- Ponto C - restrição de deslocamentos na direção Y; e
- Ponto D - restrição de deslocamentos na direção Y.

Após aplicação da carga F no ponto F, procedeu-se à medição de deslocamento Y_F , utilizando-se um comparador, colocado na parte inferior da estrutura no alinhamento da aplicação da carga, e posteriormente á determinação da rigidez à flexão k_F pela seguinte expressão:

$$k_F = \frac{F}{Y_F} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

onde,

F Carga aplicada no Ponto F (N); e

Y_F Deslocamento vertical no ponto F (m).

3.2.5. Simulação da Estrutura de Referência

Neste subcapítulo é apresentado um estudo de simulação efetuado às estruturas de referência, com vista a definir valores objetivo para uma nova estrutura em material compósito. Para além das estruturas 1 e 2, optou-se por estudar mais duas estruturas correspondentes à zona que limita o habitáculo, uma vez que a estrutura que se pretende desenvolver corresponde à parte inferior que limita o habitáculo, sem arco traseiro. Com este estudo pretende-se estimar o peso e a rigidez, em torção e em flexão, para as 4 estruturas representadas na Figura 3.16.

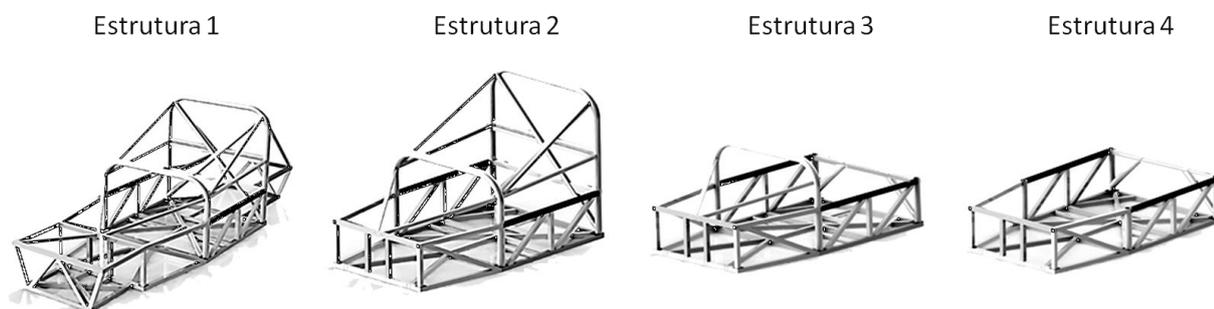


Figura 3.16 Modelação CAD 3D das estruturas tubulares de referência (Solidworks®).

3.2.5.1. Simulação do Peso

A partir da modelação CAD 3D estimou-se o peso das quatro estruturas apresentadas na Figura 3.16, cujos valores se resumem na Tabela 3.2. Esta estimativa resultou do cálculo computacional do peso da estrutura modelada através do programa Solidworks[®], após introdução do peso específico dos aços utilizados (Tabela 3.2).

Tabela 3.3 Resumo dos valores de peso das estruturas, estimados a partir da modelação CAD 3D.

Estrutura	Peso estimado CAD 3D (kg)
Estrutura 1	78,1
Estrutura 2	56,5
Estrutura 3	40,5
Estrutura 4	35,0

3.2.5.2. Simulação de Torção

Para além dos ensaios de torção realizados à estrutura de referência, foram efetuadas simulações de torção à estrutura completa e à subestrutura do habitáculo, nas condições definidas no parágrafo 3.2.4.2, designadas por T_1 e T_2 , respetivamente. Para além destas, estudou-se o comportamento à torção das estruturas 3 e 4, identificadas na Figura 3.17, nas condições de ensaio T_3 e T_4 .

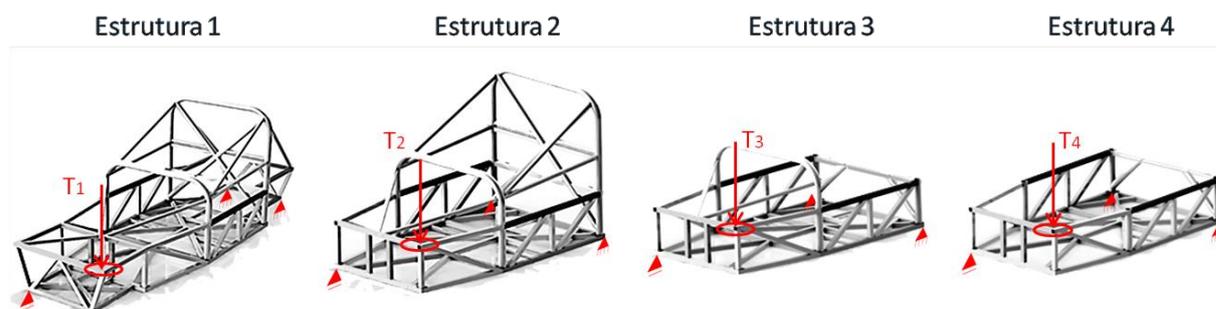


Figura 3.17 Condições de simulação de torção das estruturas de referência.

Para a realização da simulação numérica foi utilizado o programa Abaqus[®] que permitiu a importação da geometria tridimensional das linhas da estrutura de referência, anteriormente modelada no programa de CAD 3D (Figura 3.18).

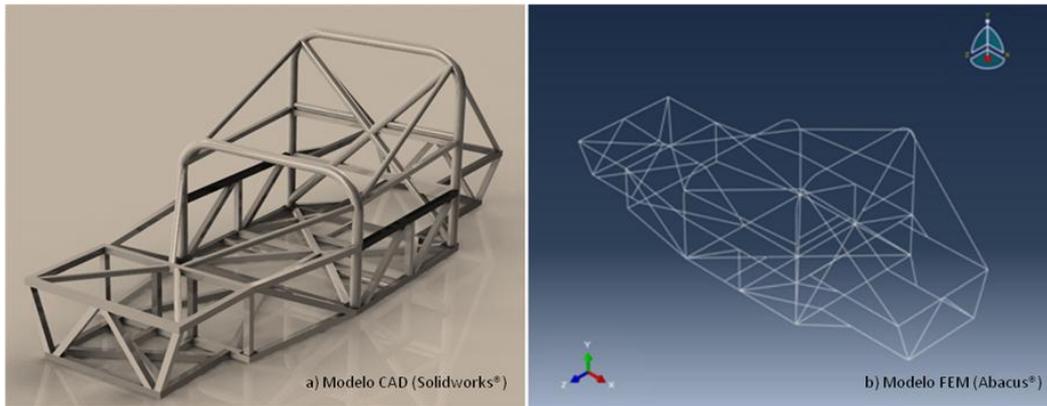


Figura 3.18 Modelos tridimensionais da estrutura de referência: a) modelação CAD 3D (Solidworks[®]), b) modelo de linhas usado no programa de simulação (Abaqus[®]).

Utilizou-se o modelo numérico pelo método de elementos finitos com elementos de viga, porque para estruturas esbeltas de secção constante, este tipo de elementos é o mais indicado, permitindo reduzir o esforço computacional e obter resultados fidedignos, segundo [90].

As simulações foram efetuadas no domínio elástico do material, sendo consideradas as propriedades mecânicas dos materiais, especificamente o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, de acordo com os valores já apresentados na Tabela 3.2.

Após importação da geometria em esboço tridimensional de linhas, a partir da modelação CAD 3D, foram introduzidos os materiais, as suas propriedades mecânicas e as secções dos elementos da estrutura, de acordo com a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Secção e material dos diferentes componentes da estrutura tubular de referência.

Secção	Material
Tubo Ø45x2	DIN 25CrMo4
Tubo Ø30x2	DIN 25CrMo4
Tubo Ø30x1,5	DIN St37
Tubo Ø20x1,5	DIN St37
Perfil quadrado 25x25x1,5	DIN St37
Perfil quadrado 30x30x1,5	DIN St37
Perfil quadrado 30x20x1,5	DIN St37

Após a inserção destes elementos, procedeu-se à atribuição do material e respetiva secção a cada um dos elementos da estrutura, e de seguida à referenciação do sistema de eixos da secção de cada elemento, tal como se pode observar pela Figura 3.19, a qual ilustra a atribuição do material e respetiva secção para os arcos da estrutura, traseiro e frontal, bem como a referenciação do sistema de eixos para todos os elementos da estrutura.

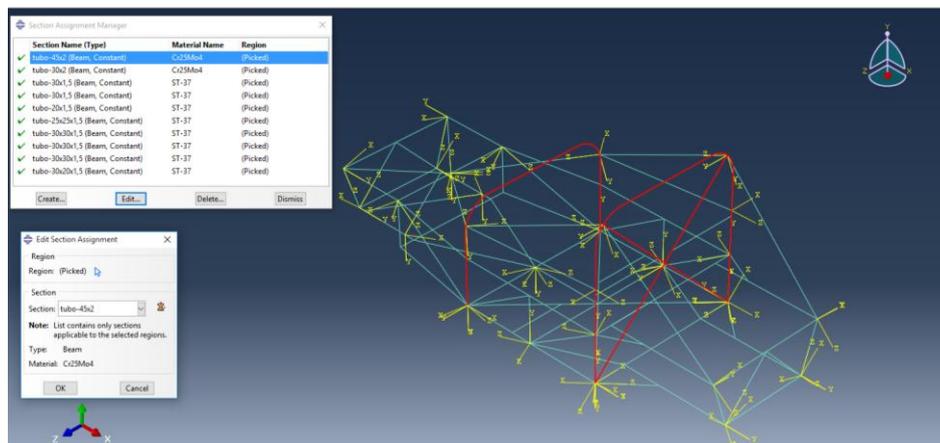


Figura 3.19 Atribuição das seções, materiais e sistemas de eixos da secção de cada elemento da estrutura no modelo FEM (Abaqus®).

Depois da referenciação de todos os elementos atrás descritos, procedeu-se à atribuição das condições fronteira aplicadas na forma de restrições aos graus de liberdade a cada nó, nos pontos de apoio e no ponto de aplicação da carga imposta, de acordo com as condições de ensaio definidas no parágrafo 3.2.4.2. Este procedimento repetiu-se para cada uma das estruturas tal como ilustrado na Figura 3.17.

Consideraram-se elementos de malha com 25 mm de comprimento tendo em conta as dimensões globais do modelo e dos respetivos elementos.

Foram utilizados elementos cúbicos de viga, designados pelo programa Abaqus® como B33, uma vez que, segundo [90], apresentam maior precisão de resultados comparativamente aos elementos de grau inferior, como sejam os elementos lineares ou os quadráticos.

A partir dos resultados obtidos nas simulações efetuadas (Figura 5.2) nas condições fronteira T1 e T2, T3 e T4 atrás definidas, procedeu-se à determinação do ângulo de torção e da rigidez torsional através das equações 3.1 a 3.3, cujos resultados se resumem Tabela 5.5, apresentada no subcapítulo 5.1.3.2.

3.2.5.3. Simulação de Flexão

Tal como foi efetuado no caso da torção também se procedeu à simulação em flexão das estruturas 1 e 2, nas mesmas condições definidas no parágrafo 3.2.4.3, designadas por F_1 e F_2 . Para além destas, foram efetuadas também simulações às estruturas 3 e 4, nas condições identificadas na Figura 3.20, designadas por F_3 e F_4 .

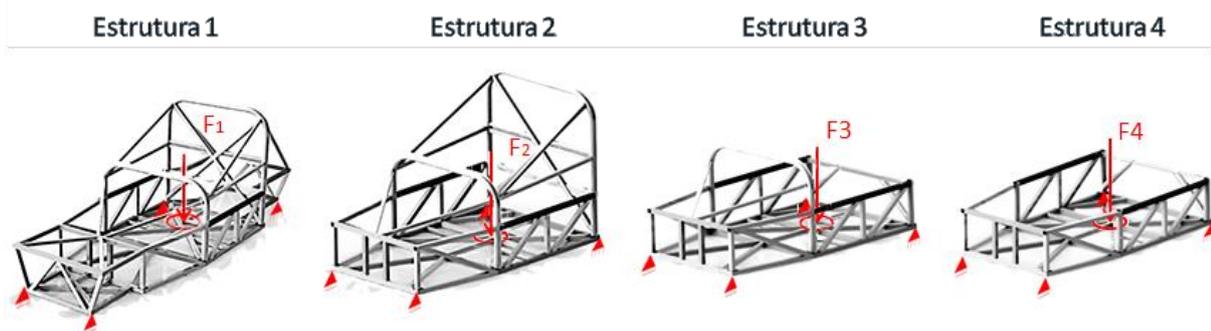


Figura 3.20 Condições de simulação de flexão efetuadas às estruturas de referência.

O modelo de simulação utilizado foi adaptado do modelo de simulação da torção, alterando apenas as condições fronteira, relativamente aos apoios da estrutura e à carga imposta, de acordo com as condições definidas atrás para os ensaios de flexão.

A partir dos valores dos deslocamentos obtidos nas simulações efetuadas, procedeu-se à determinação da rigidez estática em flexão, de acordo com a equação 3.4, cujos resultados se resumem na Tabela 5.6, apresentada no subcapítulo 5.1.3.3.

3.2.6. Definição dos Valores de Referência e Valores Objetivo

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios e nas simulações efetuadas, e com as opções tomadas após discussão desses resultados, apresentados no Capítulo V, resumem-se na Tabela 3.5 os valores de referência e os valores objetivo que serão considerados no desenvolvimento da estrutura em compósito.

Tabela 3.5 Resumo das propriedades da estrutura de referência e valores objetivo para a estrutura em compósito.

Propriedade	Unidades	Valores de referência	Valores Objetivo
Peso	kg	52	≤ 45 (redução 10%)
Rigidez estática em torção	Nm ^o	1319	≥ 1319
Rigidez estática em flexão	N/mm	765	≥ 765

CAPÍTULO IV

4. Desenvolvimento da Estrutura em Compósito

4.1. Introdução

A necessidade de aumento da eficiência dos produtos é transversal a todas as indústrias e tem vindo a influenciar o desenvolvimento de soluções, nomeadamente no que respeita aos materiais. Esta tendência tem particular relevo na indústria automóvel, que procura fabricar veículos mais leves, sem prejuízo das restantes características de *benchmark*. Isso tem levado ao aumento da necessidade de elementos estruturais de baixo peso, com elevada resistência e rigidez, nas mais diversas aplicações, e tem contribuído para o aumento da utilização de materiais compósitos, onde se podem incluir as estruturas *sandwich*. Estas estruturas têm sido largamente utilizadas em diferentes indústrias como por exemplo a aeronáutica, construção naval e construção de diversas estruturas de engenharia civil.

O aço, e mais recentemente o alumínio são os materiais mais utilizados no fabrico de estruturas automóveis de grande série. No entanto, os materiais compósitos têm vindo a ser aplicados, especialmente quando há requisitos de elevada rigidez e baixo peso. Nestes casos, os compósitos de carbono são um boa opção, no entanto estas soluções apresentam um custo elevado.

Neste trabalho procurou-se estudar soluções que apresentassem um bom compromisso entre a rigidez específica, o peso e o custo. Como tal, foram excluídas as fibras de carbono, que seria interessante estudar, porque apresentam elevada rigidez, mas têm um custo elevado quando comparado por exemplo com as fibras de vidro, sendo estas significativamente mais baratas por quilograma do que as de carbono (em alguns casos, cerca de cem vezes).

Por outro lado, considerando um laminado isotrópico fabricado com fibras de vidro e resina poliéster insaturado, por moldação manual, verifica-se que o módulo de elasticidade poderá ser cerca de 20 vezes inferior ao do aço. Em termos específicos essa diferença diminui bastante, mas mesmo assim o aço ainda apresenta resultados cerca de 7 vezes superiores. Portanto, optou-se por estudar compósitos do tipo *sandwich*, uma vez que este tipo de estruturas permite ultrapassar esta limitação e até mesmo inverter esta desvantagem face ao aço, pelo facto de se conseguirem obter geometrias complexas, aumentando a sua inércia sem aumentar significativamente o peso, como forma de melhorar o compromisso entre a rigidez e o peso.

Assim, optou-se por estudar diferentes estruturas *sandwich*, fabricadas por moldação manual, uma vez que se trata de uma técnica mais acessível. As estruturas foram posteriormente submetidas a ensaios

para caracterização das suas propriedades mecânicas. Com base nas propriedades mecânicas das *sandwich* fabricadas e em critérios de seleção apresentados no subcapítulo 5.2.4.1, selecionou-se uma das estruturas para utilizar no desenvolvimento de uma estrutura em compósito.

4.2. Estudo e Caracterização de Estruturas Sandwich

O trabalho experimental descrito neste capítulo consistiu no estudo de materiais compósitos reforçados com fibra de vidro, com o objetivo de encontrar materiais que possam ser utilizados no fabrico de componentes estruturais de veículos, como por exemplo numa estrutura similar à que se pretende desenvolver.

4.2.1. Fabrico de Placas em Compósito do Tipo Sandwich

Tal como foi referido atrás, optou-se por estudar estruturas em compósito do tipo *sandwich*, tendo sido obtidas a partir de várias combinações entre diferentes materiais para o núcleo com diferentes combinações de peles, de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Identificação dos materiais das placas *sandwich* fabricadas.

Placas	Núcleo		Matriz	Pele	
	Material	Espessura (mm)		Reforço	Espessura (mm)
Placa 1	PP (Ninho Abelha c/ favo de 8 mm)	10	Resina Poliéster insaturado	Tecido FV 300 / Tecido FV 300 / Manta FV 300	
Placa 2	PP (Ninho Abelha c/ favo de 8 mm)	12	Resina Poliéster insaturado	2 x Tecido FV 800 / 2 x Manta FV 200 / 2 x Tecido 800	
Placa 3	PS (Extrudido)	13	Resina Epóxida	Tecido FV 300 / Manta FV 200 / Tecido FV 300	
Placa 4	PS (Extrudido)	15	Resina Epóxida	Tecido FV 300 / Manta FV 350	
Placa 5	PVC (Espuma)	6	Resina Poliéster insaturado	Tecido 300 / Tecido FV 300	
Placa 6	PVC (Espuma)	6	Resina Poliéster insaturado	Tecido FV 300 / Manta FV 350	
Placa 7	PU (Espuma)	10	Resina Poliéster insaturado	Tecido FV 450 (0°/90°) / Tecido FV 450 (45°/-45°) / Tecido FV 450 (0°/90°)	
Placa 8	PU (Espuma)	15	Resina Poliéster insaturado	Manta FV 350 / Manta FV 350	

4.2.1.1. Propriedades dos Materiais

Para matriz das peles das estruturas *sandwich* fabricadas foram utilizadas resinas de poliéster insaturado ortoftálica Palatal P69 da DSM e resina de epóxido Sicomin SR1500 com endurecedor SD 2505, cujas propriedades estão compiladas na Tabela 4.2. No caso das estruturas com núcleo de poliestireno, independentemente de outro fator, utilizou-se epóxido visto que o poliéster dissolve o

poliestireno.

Tabela 4.2 Propriedades de resinas utilizadas como matriz das *sandwich* [91, 92].

Propriedades	Unidades	Resina Poliéster	Resina Epóxico
		(DSM Palatal P69)	(Sicomín SR1500)
Peso específico, γ	kg/m ³	1100	1130
Módulo de <i>Young</i> , E	GPa	3,8	2,9
Tensão de Ruptura, σ	MPa	75	68
Preço indicativo	€/kg	3	12

Na Tabela 4.3 resumem-se propriedades típicas das fibras de vidro, tendo sido utilizadas sob a forma de mantas de filamentos aleatórios com gramagens de 200, 300 e 350 (g/m²), tecidos equilibrados (0°/90°), com gramagens 300, 450 e 800 (g/m²), e ainda tecido biaxial (0°/90°, 45°/-45°), com gramagem de 450 g/m².

Tabela 4.3 Propriedades típicas da fibra de vidro [70].

Propriedades	Unidades	Fibra de Vidro
Peso específico, γ	kg/m ³	2560
Módulo de <i>Young</i> , E	GPa	70
Tensão de Ruptura, σ	GPa	1,3

Foram utilizados núcleos em ninho de abelha de polipropileno (PP), em poliestireno extrudido (PS), espuma de policloreto de vinilo (PVC) e espuma de poliuretano (PU), cujas propriedades típicas mais relevantes se encontram na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Propriedades dos núcleos das *sandwich* [93, 94, 95, 96].

Propriedades	Unidades	PP	PS	PVC	PU
		NIDAPLAST 8	BASF STYRODUR	AIREX BALTEK C70.75	
Tipo		Ninho de abelha	Extrudido	Espuma	Espuma
Peso específico, γ	Kg/m ³	65	25-45	80	40
Módulo de <i>Young</i> , E (em compressão)	MPa	40	6,5	104	4,2
Módulo de Corte, τ	MPa	9	-	30	-
Tensão de Ruptura, σ	MPa	0,8 (em tração)	0,15-0,7 (em compressão)	2	0,38 (em compressão)
Preço/m ³ (indicativo) *		1	0,37	2,2	0,4

*Considerou-se o preço do PP como valor unitário de referência, tendo sido calculados os valores para o PS, PVC e PU, a partir do preço de cada um a dividir pelo preço do PP. Os preços foram obtidos por consulta de fornecedores em Julho de 2016.

4.2.1.2. Moldação das Placas Sandwich

O processo de moldação iniciou-se com o corte dos materiais que compõem a estrutura, designadamente o núcleo e peles de reforço. Depois de cortados estes materiais com as dimensões pretendidas para cada placa, procedeu-se à preparação e limpeza das superfícies das placas molde a utilizar em cada moldação. Depois de limpas foi aplicado um desmoldante para facilitar a extração das placas do molde no final do processo de fabrico. Utilizou-se como desmoldante álcool polivinílico em duas aplicações em cada placa.

Após o corte dos materiais estimaram-se as quantidades de resina a utilizar na moldação de cada placa, função da massa de fibras utilizadas, tendo sido necessário proceder à pesagem das fibras, para a determinação da massa de resina.

Conhecida a massa de resina, determinou-se a massa de acelerador (0,4% de octoato cobalto) e a de catalisador (2% de peróxido de metil-etil-cetona), que permitisse o fabrico das placas num tempo útil de cerca de 45 minutos. É importante referir que a mistura destes três elementos, resina, acelerador e catalisador, deve ser realizada pela seguinte ordem: em primeiro lugar, deve juntar-se à resina o acelerador, que tem como função de aumentar a atividade de reação e só depois deve juntar-se o catalisador, uma vez que é o catalisador que vai dar início à reação. Desta forma, consegue-se maximizar o intervalo de tempo antes de iniciar a moldação.

Após concluída a preparação atrás descrita iniciou-se o fabrico das estruturas com a colocação dos materiais, de acordo com a estrutura *sandwich* pretendida, sobre a placa molde inferior (Figura 4.1), desde a camada exterior de uma das peles até à camada exterior da pele oposta, intercalados por uma camada de resina. É importante garantir uma boa impregnação das fibras de reforço com a resina.

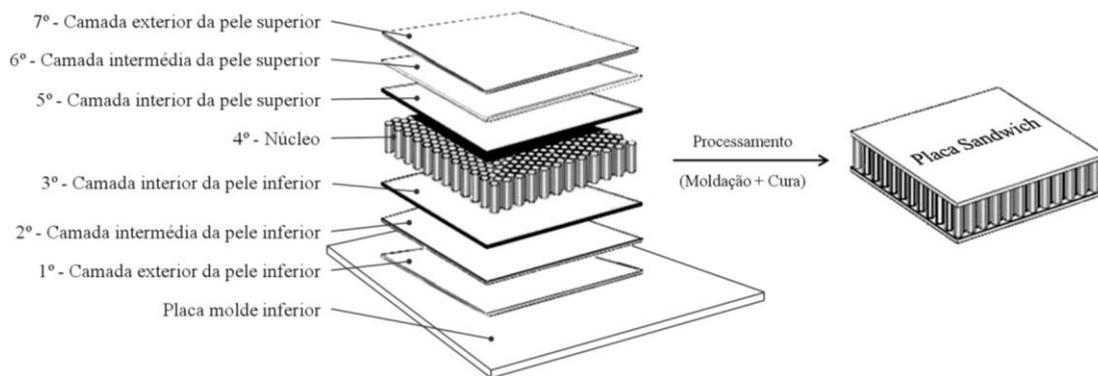


Figura 4.1 Sequência de moldação no fabrico de uma placa *sandwich* com 3 camadas de reforço.

No final do empilhamento das camadas colocou-se uma placa molde superior antes que a estrutura inicie o processo de cura. Após o período de cura procedeu-se à extração das estruturas de entre as placas molde.

Optou-se por este processo de fabrico em que as peles são fabricadas e coladas ao núcleo no mesmo

processamento por ser mais rápido e simples, relativamente ao fabrico das peles e posterior colagem destas ao núcleo, utilizando-se um filme adesivo.

4.2.1.3. Preparação de Provetes para Ensaio

A preparação dos provetes foi feita de acordo com a norma ASTM C393, que estabelece as dimensões com que os provetes devem ser cortados a partir das placas. O corte foi realizado recorrendo a uma serra de disco num equipamento de corte (Figura 4.2).

Sendo este um processo manual, foi necessário proceder à traçagem de linhas referentes às dimensões dos provetes, na superfície das placas. O corte requer um cuidado adequado de forma a evitar desvios relativamente às linhas traçadas na superfície das placas. Os desvios que ocorram serão tidos em consideração posteriormente na medição dos provetes e na determinação dos resultados dos respetivos ensaios.



Figura 4.2 Corte de provetes a partir das placas *sandwich* fabricadas.

4.2.1.4. Ensaios das Estruturas Sandwich Fabricadas

Para caracterizar o desempenho mecânico dos compósitos fabricados, submeteram-se os provetes aos ensaios indicados na Tabela 4.5, de acordo com as normas indicadas.

Tabela 4.5 Normas utilizados nos ensaios realizados às estruturas fabricadas em compósito.

Ensaio	Norma
Calcinação	ISO 1772 –“Textile-glass-reinforced plastics - Prepregs, moulding compounds and laminates - Determination of the textile-glass and mineral-filler content - Calcination methods”
Dureza	ASTM D2583 – “Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a BarcolImpressor”
Flexão em 3 pontos (estruturas sandwich)	ASTM C393-00 - “Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions”
Flexão em 4 pontos (estruturas <i>sandwich</i>)	ASTM C393-00 - “Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions”
Compressão de núcleos	ASTM C365-03 –“Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores”

4.2.1.4.1. Ensaios de Calcinação

Para determinação da fração mássica de fibras das placas *sandwich* fabricadas foram realizados ensaios de calcinação de acordo com a norma NP 2216 / ISO 1172, tendo sido utilizados dois provetes por ensaio, de acordo com o procedimento abaixo descrito.

Para a preparação dos provetes, provenientes das peles das estruturas fabricadas, é necessário descolar o núcleo da respetiva pele. Antes de serem cortados os provetes para o ensaio deve remover-se qualquer resíduo de material do núcleo recorrendo a uma lixa. Depois de limpa a superfície interior da pele, cortam-se os provetes, que devem ter dimensões adequadas à colocação nos cadinhos e cuja massa deve ser entre 2 e 10 g.

Depois de extraídos os provetes, secaram-se cadinhos e os provetes numa mufla a 50 °C, até que duas pesagens sucessivas, com diferença temporal de 30 minutos, não diferissem mais do que 1 mg. Utilizou-se uma balança com precisão de 0,01 mg, com a qual se pesou cada um dos cadinhos, designando-se a respetiva massa inicial por m_1 (Figura 4.3).



Figura 4.3 Balança para pesagem dos cadinhos (esquerda) e mufla para aquecimento dos cadinhos (direita).

Depois de secos os cadinhos e os provetes, cada provete foi colocado no interior de um cadinho, e pesados todos os conjuntos cadinho e provete, sendo a massa de cada conjunto designada por m_2 .

De seguida aqueceu-se lentamente o conjunto provete e cadinho até 600 °C numa mufla, até que toda a matéria orgânica tivesse desaparecido e restasse apenas um resíduo e as fibras. Após arrefecimento num exsicador, até à temperatura ambiente, pesou-se o cadinho com as fibras.

Designando a massa obtida para o cadinho com as fibras por m_3 , a fração mássica de fibras, w_f , foi calculada através da expressão:

$$w_f = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

4.2.1.4.2. *Ensaio de Dureza*

Sendo a dureza uma propriedade das resinas é importante avaliar a cura das peles das estruturas fabricadas, utilizando-se para isso a escala de dureza Barcol. Para essa avaliação procedeu-se à medição da dureza, segundo a norma ASTM D2583, através de um durómetro de Barcol (Figura 4.4), que mede a resistência que a resina oferece à penetração de uma agulha padrão comprimida contra a superfície com uma força padronizada. Quanto maior a resistência à penetração maior é a dureza e o grau de cura. Apesar de ser um indicador grosseiro, é muito utilizado pela facilidade de execução e interpretação, no entanto deve ter-se em atenção a espessura da camada de resina e os teores de fibras, uma vez que para espessuras muito finas e altos teores de fibras os valores da medição obtidos podem ser inconsistentes.



Figura 4.4 Durómetro de Barcol para medição da dureza superficial das peles das estruturas fabricadas.

Durante o processo de cura são formadas ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas da resina. Quanto maior for a quantidade de ligações cruzadas, reticulações, maior será a dureza. Desta forma, pode fazer-se a comparação da dureza antes e após a cura para avaliar, simplificadamente, o grau de cura das resinas usadas, sem prejuízo de uma avaliação mais profunda que esta propriedade exige.

Antes da medição, deve proceder-se à identificação das faces do provete que vão ser sujeitas ao ensaio, para depois se proceder à leitura de dureza Barcol em diferentes pontos em cada face da placa. Os resultados devem ser determinados através do cálculo da média dos valores obtidos nos ensaios.

Apesar da facilidade de realização deste ensaio, é necessário ter o cuidado de garantir que o durómetro fica paralelo ao plano de trabalho, com a ponta de aço perpendicular ao provete durante a medição.

4.2.1.4.3. *Ensaio de Flexão*

Em geral, o ensaio de flexão é uma ferramenta muito útil na determinação de algumas propriedades mecânicas como, por exemplo, a tensão de rutura à flexão, deformação na rutura e o módulo de elasticidade à flexão de um determinado material. No caso de estruturas *sandwich*, estes ensaios permitem determinar a resistência ao corte do núcleo, a resistência das peles, o módulo de corte do

núcleo e a rigidez em flexão da estrutura *sandwich*.

Foram realizados ensaios de flexão em três pontos e em quatro pontos, de acordo com a norma ASTM C393-00, conforme o procedimento experimental descrito de seguida.

Foram cortados provetes das estruturas produzidas e submetidos a ensaios de flexão em três e quatro pontos, de acordo com a norma, para determinação da resistência ao corte do núcleo e da resistência em flexão das peles.

Os provetes devem ter secção transversal retangular. A largura (b) deve ser superior a duas vezes a espessura total do provete (d), superior a três vezes a espessura do núcleo (c), não devendo ser superior a metade do comprimento entre apoios (L_1). O comprimento deve ser igual ao comprimento entre apoios mais 50 mm, ou mais o valor correspondente a metade da espessura da sanduíche, consoante o maior valor (Figura 4.5), devendo ser superior a vinte vezes a espessura total do provete.

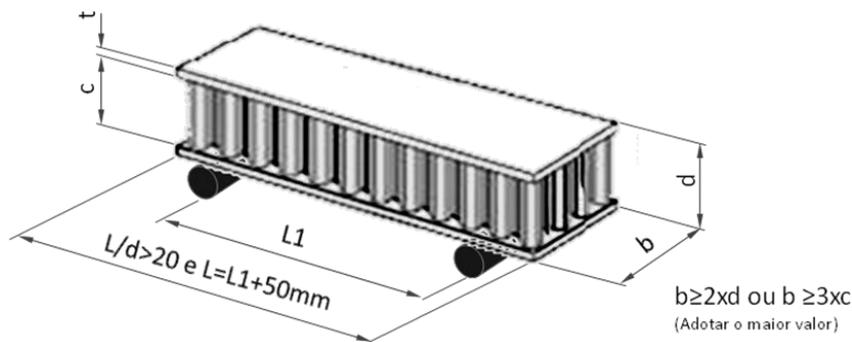


Figura 4.5 Dimensões a respeitar para os provetes do tipo *sandwich*.

onde,

L Comprimento total do provete (mm);

d Espessura total da *sandwich* (mm);

c Espessura do núcleo (mm);

t Espessura das peles, (mm); e

b Largura do provete (mm);

Nos ensaios de flexão de três e quatro pontos, os provetes devem ser posicionados no equipamento de ensaios de acordo com a Figura 4.6 e Figura 4.7, respetivamente, sendo a distância entre apoios determinada pela expressão:

$$L_1 = L - 50 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

onde,

L_1 Distância entre apoios no ensaio de flexão em 3 pontos (mm); e

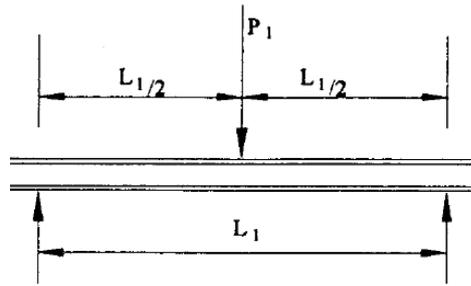


Figura 4.6 Esquema do ensaio de flexão em três pontos.

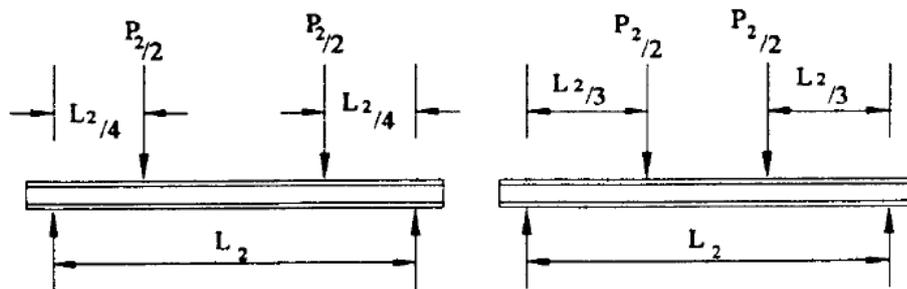


Figura 4.7 Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos.

A tensão de corte do núcleo pode ser determinada, a partir do ensaio de três pontos, pela expressão:

$$\tau = \frac{P_1}{(d + c) \cdot b} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

e a partir do ensaio de quatro pontos, pela expressão:

$$\tau = \frac{P_2 / 2}{(d + c) \cdot b} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde,

τ Tensão de corte do núcleo (MPa);

P_1 Carga máxima aplicada no ensaio de três pontos (N); e

P_2 Carga máxima aplicada no ensaio de quatro pontos (N);

As tensões normais geradas no ensaio de três pontos variam ao longo da espessura e são suportadas sobretudo pelas peles, sendo de compressão na sua face superior e de tração na inferior, podendo o seu valor ser calculado pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{P_1 \times L_1}{2 \cdot t \cdot (d + c) \cdot b} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde,

σ Tensão normal (MPa); e

t Espessura das peles do provete (mm).

No ensaio de flexão em quatro pontos, a estimativa para a tensão de flexão das peles pode ser calculada através da equação:

$$\sigma = \frac{P_2 \times L_2}{4 \cdot t \cdot (d + c) \cdot b} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

A rigidez da estrutura à flexão (D) pode ser estimada através da expressão:

$$D = \frac{P_1 \cdot L_1^3 \cdot [1 - (11 \cdot L_2^2 / 8 \cdot L_1^2)]}{48 \cdot \Delta_1 \cdot [1 - (2 \cdot P_1 \cdot L_1 \cdot \Delta_2 / P_2 \cdot L_2 \cdot \Delta_1)]} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

onde,

D Rigidez à flexão (N.mm²);

Δ_1 Deflexão correspondente à carga P_1 , determinada no domínio elástico no ensaio de flexão em 3 pontos (mm);

L_2 Distância entre apoios no ensaio de flexão em 4 pontos (mm); e

Δ_2 Deflexão correspondente à carga P_2 , determinada no domínio elástico no ensaio de flexão em 4 pontos (mm).

O módulo de corte do núcleo (G) pode ser determinado a partir da expressão seguinte, sem recorrer à determinação do módulo de elasticidade das peles, usando os valores de deflexão verificados no ensaio, apenas no domínio elástico:

$$G = \frac{P_1 \cdot L_1 \cdot c \cdot [8 \cdot L_1^2 / 11 \cdot L_2^2 - 1]}{\Delta_1 \cdot b \cdot (d + c)^2 \cdot [(16 \cdot P_1 \cdot L_1^3 \cdot \Delta_2 / 11 \cdot P_2 \cdot L_2^3 \cdot \Delta_1) - 1]} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Os ensaios de flexão em três e quatro pontos realizaram-se à temperatura ambiente numa máquina de ensaios universal, utilizando uma célula de carga de 5 kN e uma velocidade de deflexão de 5 mm/min.

4.2.1.4.4. Ensaio de Compressão

Para avaliação do comportamento das estruturas fabricadas quando solicitadas a esforços de compressão, procedeu-se a ensaios de compressão dos núcleos das estruturas *sandwich*, num equipamento de ensaios universal Shimadzu (Figura 4.8), de acordo com a norma ASTM C365-03.

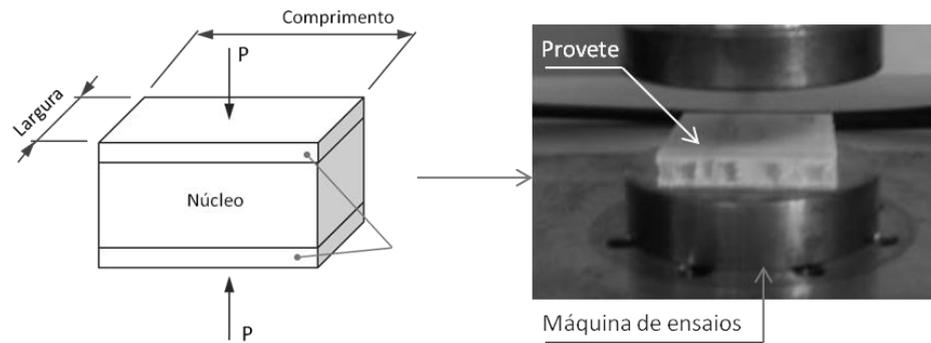


Figura 4.8 Esquema do ensaio de compressão.

Os provetes devem ter secção quadrada ou circular e a área não deve ser superior a 10000 mm² e inferior às seguintes áreas mínimas, de acordo com o tipo de núcleo:

- Para núcleos contínuos, tais como madeira balsa e espumas, a área mínima transversal é de 625 mm²;
- Para núcleos de células abertas, como ninho de abelha, cuja dimensão das células é inferior a 6 mm, a área mínima transversal é de 2500 mm², e de 5800 mm², no caso de células com dimensão igual ou superior a 6 mm.

Para evitar locais de esmagamento nas extremidades de alguns núcleos de ninho de abelha, as extremidades podem ser mergulhadas numa fina camada de resina ou revestimentos finos colados ao núcleo. No caso de se reforçarem as extremidades dos provetes, o ensaio é designado por ensaio de compressão estabilizado.

Como procedimento, deve ter-se em atenção a colocação dos provetes de modo a que a carga de compressão seja uniformemente distribuída pela superfície dos provetes. Aplicar a carga a uma velocidade constante, de modo que a carga máxima ocorra entre os 3 e os 6 minutos de ensaio. Segundo a recomendação da norma o deslocamento da célula de carga deve ter uma velocidade de 0,50 mm/min.

As curvas de carga-deformação permitem determinar o módulo de elasticidade do núcleo em compressão, o limite de elasticidade e a resistência à compressão. No caso de núcleos que continuam a comprimir e não têm carga máxima definida, a resistência à compressão deve ser calculada com a carga correspondente a 2% de deformação.

A resistência à compressão do núcleo (σ), é determinada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

onde,

P Carga máxima (N); e

A Área da secção (mm^2).

O módulo de compressão do núcleo é determinado pela expressão:

$$E = \frac{S \cdot c}{A} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

onde,

E Módulo de compressão (MPa);

S ($S = \Delta P / \Delta u$) declive da parte inicial da curva de força-deslocamento (N/mm);

u Deslocamento (mm); e

c Espessura do núcleo (mm).

4.3. Simulação da Estrutura em Compósito

Uma das motivações deste estudo prende-se com o apontar de pistas para o futuro do sistema de transportes, em particular do transporte individual, que se espera vir a impor naturalmente novos conceitos de mobilidade, veículos mais eficientes do ponto de vista energético, mais económicos e mais ecológicos, mas também mais eficientes do ponto de vista da sua utilização em ambiente urbano. Certamente que a procura por soluções construtivas mais leves e configurações mais compactas, serão fatores a considerar no desenvolvimento dos automóveis das próximas gerações, não esquecendo naturalmente o preço, que é um dos fatores que condiciona o mercado [19]

É neste contexto que se optou por estudar a aplicação de materiais compósitos, do tipo *sandwich* com núcleo leve e peles reforçadas com fibras de vidro, em estruturas automóveis, pretendendo-se que sejam leves e de custo controlado.

Assim, após a caracterização da estrutura de referência e estudo de materiais compósitos do tipo *sandwich*, procedeu-se ao estudo de uma nova estrutura, compatível com a do veículo de referência, procurando manter a mesma rigidez e diminuir o peso. Para isso, optou-se por estudar a parte inferior da estrutura do habitáculo em compósito do tipo *sandwich*.

Numa primeira fase, procedeu-se ao estudo geométrico da nova estrutura de forma a garantir a compatibilidade com o veículo de referência, numa abordagem de compromisso geométrico para que esta nova estrutura pudesse ser facilmente adaptável a um veículo compacto de uso citadino e de baixo custo, de acordo com os esboços ilustrados na Figura 4.9.

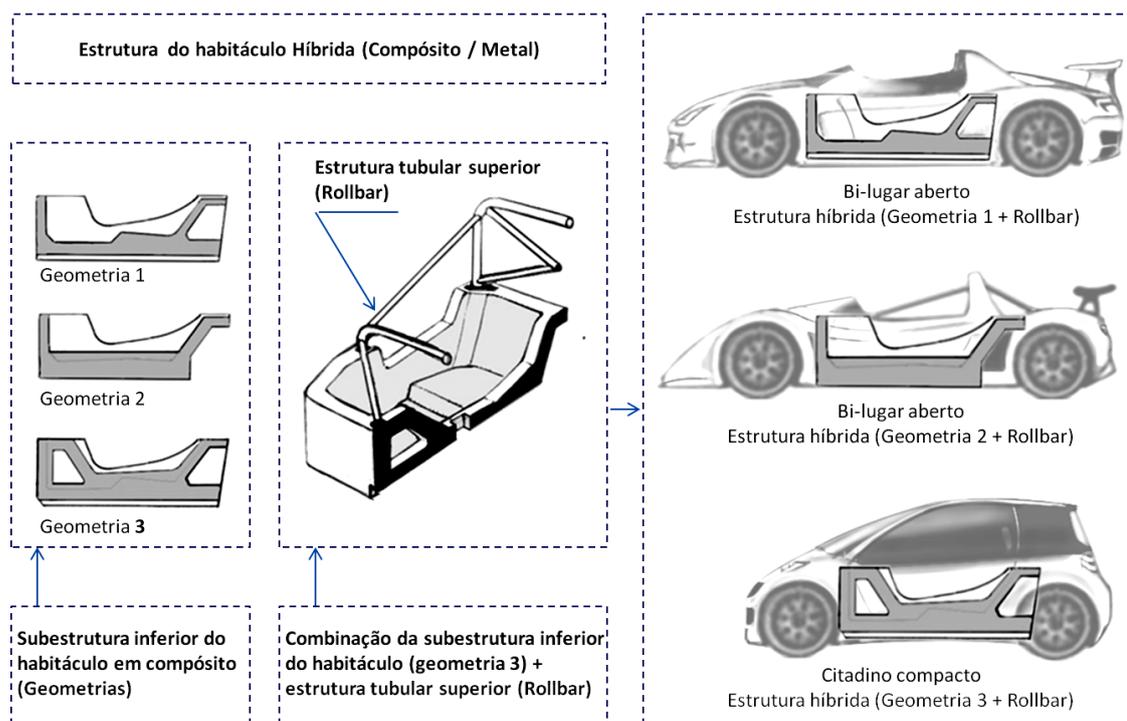


Figura 4.9 Esboços de estruturas em compósito comum a diferentes tipos de veículos.

A estrutura a desenvolver corresponde à subestrutura inferior do habitáculo, que pode ser combinada com subestruturas metálicas, especificamente uma subestrutura tubular na parte superior, um berço frontal e um berço traseiro, originando uma estrutura híbrida compósito/metal. A configuração dessas subestruturas permite obter configurações do veículo diferentes, tal como se pode observar pela Figura 4.10, que ilustra a combinação da subestrutura do habitáculo com as restantes subestruturas metálicas, cuja configuração se adapta a um veículo bi-lugar aberto, similar ao veículo de referência utilizado neste estudo.

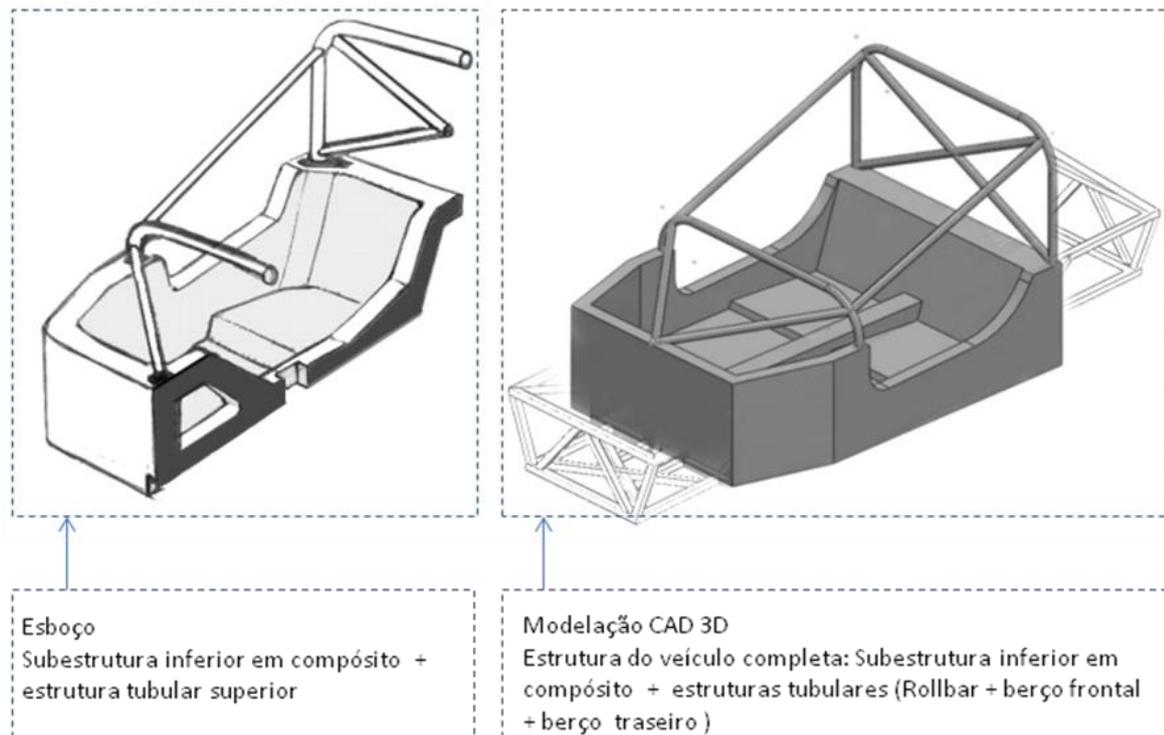


Figura 4.10 Esboço da estrutura híbrida compósito/metal para um veículo bi-lugar aberto.

Iniciou-se o estudo definindo a forma inicial da estrutura a desenvolver, designada por E2, optando-se por uma geometria simples com formas regulares planas com dimensões compatíveis com as da estrutura do habitáculo do veículo de referência atrás descrita, conforme se pode observar na Figura 4.11. Para que a estrutura pudesse ser compatível com um veículo citadino, foram considerados recortes nas zonas laterais correspondentes aos recortes de porta.

De acordo com os resultados e opções tomadas na discussão de resultados (subcapítulo 5.2.4.1), optou-se por fabricar a estrutura em *sandwich*, com núcleo em ninho de abelha de polipropileno, com 50 mm de espessura, e peles em poliéster insaturado reforçadas com fibra de vidro, de acordo com a descrição feita a seguir.

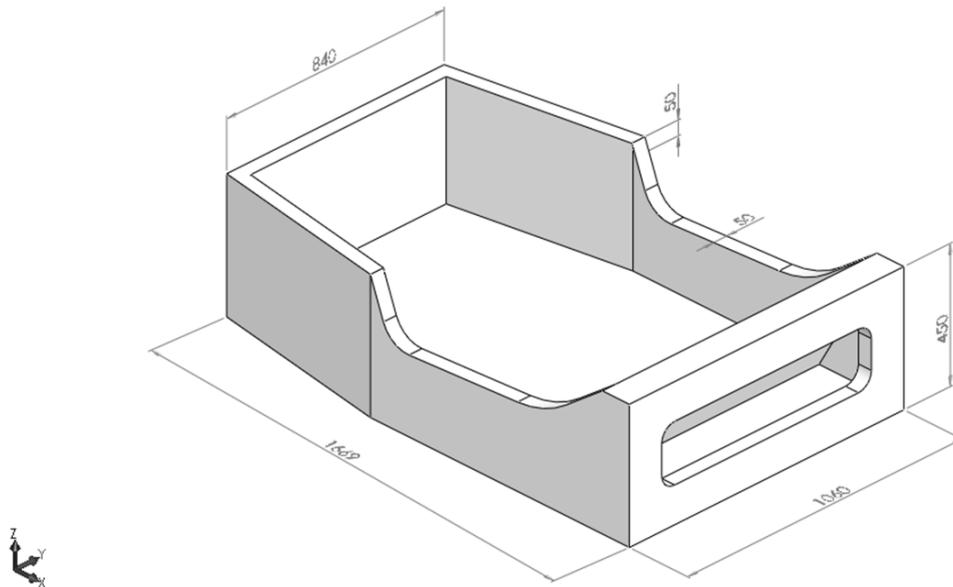


Figura 4.11 Perspetiva do modelo inicial para estudo da estrutura central em compósito, E2, (Solidworks®).

A partir desta geometria procedeu-se a um estudo de caracterização e otimização estrutural, estimando o peso e a rigidez estática, em torção e em flexão, da estrutura em compósito E2. O estudo de otimização estrutural foi efetuado através de simulação numérica pelo método de elementos finitos, tendo como referencial o peso e a rigidez da estrutura tubular do veículo de referência, apresentados no subcapítulo 5.1. Após este estudo, procedeu-se ao fabrico da estrutura e a ensaios para validação das simulações realizadas.

4.3.1. Requisitos Estruturais para a Estrutura em Compósito

Para este estudo foram considerados os valores objetivo compilados na Tabela 4.6 provenientes dos resultados obtidos na caracterização estrutural do veículo de referência apresentados no Capítulo V.

Relativamente ao peso, considera-se 45 kg valor como objetivo, correspondendo a uma redução de 10% relativa ao valor de referência de 52 kg, estimado através da modelação CAD 3D da estrutura 3.

Tabela 4.6 Valores objetivo relativos aos requisitos estruturais da estrutura a desenvolver em compósito.

Propriedade	Unidades	Valores Objetivo
Peso	kg	≤ 45
Rigidez estática em torção, k_T	Nm/°	≥ 1319
Rigidez estática em flexão, k_F	N/mm	≥ 765

4.3.2. Propriedades dos Materiais a Utilizar na Simulação

Após a modelação da estrutura em compósito E2, iniciou-se o estudo de otimização estrutural utilizando como auxílio o método de elementos finitos através do programa Abaqus[®], simulando a estrutura em condições de torção e em condições de flexão.

Antes da realização das simulações efetuou-se um estudo preliminar para definir os valores das propriedades dos materiais a utilizar no modelo de simulação e o tipo de elementos finitos a utilizar. A validação do modelo foi feita comparando os resultados da flecha de uma viga submetida a flexão em 3 pontos, obtidos por simulação, com resultados teóricos e resultados obtidos através de ensaios realizados em provetes extraídos de uma placa *sandwich*, idêntica às placas utilizadas no fabrico da estrutura em compósito de PP/FV (com núcleo em ninho de abelha de polipropileno e peles reforçadas com fibra de vidro), fabricada para o efeito.

A placa foi fabricada por moldação manual, tendo sido utilizado um molde plano de um dos lados. As peles foram produzidas com resina de poliéster insaturado ortoftálica, com empilhamento do reforço constituído por uma camada em tecido complexo de manta de 300 g/m² e tecido bidirecional (0/90°) de 500 g/m², e uma camada de manta 450 g/m². Após o fabrico e cura da placa, foram cortados 5 provetes com as dimensões que se apresentam na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Dimensões das vigas *sandwich* de PP/FV submetidas a ensaios de flexão em 3 pontos.

Dimensões	Unidades	Provete				
		P9.Fx3P.P1	P9.Fx3P.P2	P9.Fx3P.P3	P9.Fx3P.P4	P9.Fx3P.P5
Comprimento, L	mm	1202	1202	1201	1201	1200
Largura, b	mm	150,0	149,5	150,0	149,5	150,0
Espessura, d	mm	54,8	54,2	54,1	54,8	54,7
Espessura das Peles, t _f	mm	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Espessura do Núcleo, t _c	mm	50	50	50	50	50

4.3.2.1. Pesagem

Procedeu-se à determinação do peso específico da *sandwich* a utilizar, através da pesagem de provetes, no sentido de se poder estimar o peso das estruturas em compósito, a partir da modelação CAD 3D.

Os 5 provetes foram pesados para caracterização do peso específico da estrutura *sandwich* PP/FV. Na Tabela 4.8 são apresentados os valores do peso dos 5 provetes, bem como o valor médio do peso específico da placa *sandwich* de PP/FV.

Tabela 4.8 Peso e provetes extraídos da placa *sandwich* fabricada em compósito de PP/FV.

Provete	Peso (g)	Peso Específico (kg/dm³)
P9.Fx3P.P1	2043,0	0,2
P9.Fx3P.P2	1981,0	0,2
P9.Fx3P.P3	2426,0	0,2
P9.Fx3P.P4	2401,0	0,2
P9.Fx3P.P5	2349,0	0,2
Média		0,2
Desvio Padrão		0,002

4.3.2.2. Ensaio de Flexão em 3 Pontos

Efetuar-se ensaios de flexão em 3 pontos com o objetivo de validar o modelo de simulação. Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 4.2.1.4.3, tendo sido utilizada uma distância entre apoios de 1100 mm (Figura 4.12).



Figura 4.12 Ensaio de flexão em 3 pontos a uma *sandwich* de PP/FV, de acordo com a norma ASTM C393-00.

Na Tabela 4.9 pode ler-se o valor da flecha em cada um dos cinco provetes, verificada na zona elástica do ensaio, correspondente a uma força de 100 N. Na Tabela I-3.2 do Anexo I-3, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 4.9 Flecha verificada nos provetes em compósito do tipo *sandwich* PP/FV submetidos a ensaios de flexão em 3 pontos, para uma força de 100N.

Provete	y_{\max} (mm)
P9.Fx3P.P1	1,392
P9.Fx3P.P2	1,583
P9.Fx3P.P3	1,128
P9.Fx3P.P4	1,122
P9.Fx3P.P5	1,123
Média	1,27
Desvio Padrão	0,21

4.3.2.3. Determinação Analítica do Módulo de Elasticidade das Peles

Para além da medição da flecha em cada um dos ensaios, procedeu-se ao cálculo teórico do seu valor, sendo que a flecha máxima (y_{\max}) de uma viga submetida a flexão em 3 pontos pode ser calculada através de equação:

$$y_{\max} = \frac{K_b \times P \times L_1^3}{D} + \frac{K_s \times P \times L_1}{S} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Em que:

y_{\max} Deflexão devido à flexão, (mm);

k_b Coeficiente de deflexão devido à flexão;

k_s Coeficiente de deflexão devido ao efeito do corte;

P Carga aplicada, (N);

L_1 Distância entre apoios nos ensaios de flexão em 3 pontos, (mm);

D Rigidez à flexão ($\text{N}\cdot\text{mm}^2$); e

S Rigidez ao corte (N),

De acordo com [97] considerou-se o coeficiente de deflexão devido à flexão k_b de 1/48 e o coeficiente de deflexão devido ao efeito do corte, de 1/4. A rigidez à flexão da placa, D , é determinada pela equação:

$$D = \frac{E_f \times t_f \times b \times h^2}{2} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Em que:

E_f Módulo de elasticidade das peles (GPa); e

t_f Espessura das peles (mm).

A rigidez ao corte, S , é determinada pela seguinte equação $S = b \times h \times G_c$ (Eq. 4.13:

$$S = b \times h \times G_c \quad (\text{Eq. 4.13})$$

sendo:

$$h = c + t_f \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Em que:

G_c Módulo de corte núcleo (GPa); e,

c Espessura do núcleo (mm).

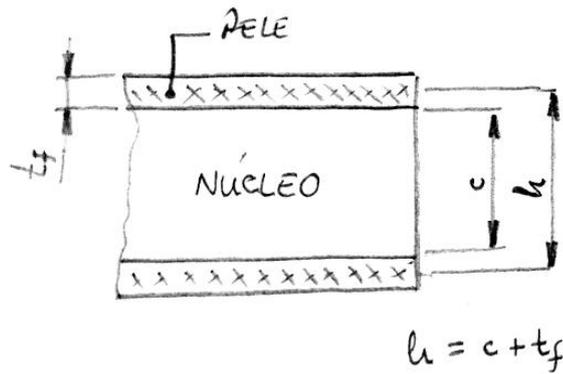


Figura 4.13 Representação da secção da viga em compósito.

Para uma carga aplicada de 100 N, a flecha máxima, determinada de acordo com a equação 4.11, é de 1,06 mm. Depois de determinada a flecha, através dos ensaios e do cálculo teórico, procedeu-se à sua determinação através de simulação por elementos finitos.

Para a simulação optou-se por estimar o módulo de elasticidade teórico das peles do compósito, determinando-se a espessura (t) das camadas de manta e tecido de que são constituídas, de acordo a seguinte expressão:

$$t = G_f \times \left[\frac{1}{\rho_f} + \frac{(1 - w_f)}{(\rho_p \times w_f)} \right] \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Em que:

G_f Gramagem das fibras, (kg/m^2);

ρ_f Massa específica das fibras, (kg/m^3);

ρ_p Massa específica da resina, (kg/m^3);

w_f Fração mássica das fibras;

w_p Fração mássica da resina;

Para o cálculo foram utilizadas as propriedades da manta, do tecido e da resina utilizados na moldação das peles da placa sandwich fabricada (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 Propriedades das matérias-primas das peles da placa *sandwich* PP/FV.

Propriedade	Unidades	Valor
Gramagem da manta de fibra de vidro, G_f	g/m ²	300
Gramagem do tecido complexo (manta + tecido), G_f	g/m ²	450+500
Fração mássica de fibras (moldação manual com manta), w_f	-	0,3
Fração mássica de fibras (moldação manual com tecido), w_f	-	0,55
Massa específica da fibra de vidro, ρ_f	Kg/m ³	2560
Massa específica da resina de poliéster, ρ_p	Kg/m ³	1100
Módulo de elasticidade da fibra de vidro, E_f	GPa	70
Módulo de elasticidade da resina de poliéster, E_p	GPa	3,8
η_t	-	0,5
η_m	-	0,375

Na Tabela 4.11 pode ler-se o valor das espessuras das camadas das peles, bem como o valor da espessura total das peles da *sandwich*, determinadas de acordo com a equação 4.15.

Tabela 4.11 Espessuras das peles da *sandwich* de PP/FV, determinadas analiticamente.

Propriedade	Unidades	Valor
Espessura das camadas de manta, t_m	mm	1,9
Espessura da camada de tecido, t_t	mm	0,6
Espessura de acabamento (<i>top coat</i>), t_r	mm	0,2
Espessura total das peles da <i>sandwich</i>, t	Kg/m³	2,7

Salienta-se que uma das peles foi revestida com *top coat*, que serve de acabamento à superfície exterior, tal como acontecerá com a estrutura a fabricar. Assim, considera-se a espessura total da pele da *sandwich* de 2,7 mm.

Determinou-se o módulo de elasticidade para a camada de manta e para a camada de tecido que constituem as peles, de acordo com a expressão da lei das misturas:

$$E = \eta \times E_f v_f + E_p (1 - v_f) \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Em que:

E Módulo de elasticidade, (GPa);

E_f Módulo de elasticidade das fibras, (GPa);

E_p Módulo de elasticidade da resina, (GPa);

η Fator de orientação das fibras; e

v_f Fração volúmica de fibras;

sendo a fração volúmica das fibras calculada pela expressão:

$$V_f = \frac{w_f / \rho_f}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{(1 + w_f)}{\rho_p}} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

O módulo de elasticidade das peles foi determinado a partir do módulo das camadas calculado, e da proporção das respetivas espessuras relativamente à espessura das peles, de acordo com a expressão:

$$E = E_m \times \frac{t_m}{t} + E_t \times \frac{t_t}{t} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

em que:

E_m Módulo de elasticidade da camada de manta de fibra de vidro e resina poliéster insaturado, (GPa);

E_t Módulo de elasticidade da camada de tecido de fibra de vidro e resina poliéster insaturado, (GPa);

t_m Espessura da camada de manta de fibra de vidro e resina poliéster, (GPa);

t_t Espessura da camada de tecido de fibra de vidro e resina poliéster, (GPa); e

t Espessura total da sandwich (mm).

Na Tabela 4.12 apresentam-se os resultados dos módulos de elasticidade das camadas de tecido e de manta, bem como o módulo de elasticidade das peles, estimados analiticamente.

Tabela 4.12 Módulo de elasticidade estimado das peles da placa *sandwich*.

Propriedade	Unidades	Valor
Módulo de elasticidade da camada de tecido, E_t	MPa	14500
Módulo de elasticidade das camadas de manta, E_m	MPa	7300
Módulo de elasticidade das peles da <i>sandwich</i> , E	MPa	8100

4.3.2.4. Modelo de Simulação

No programa de simulação Abaqus[®], desenhou-se a viga através de um modelo de casca, por se tratar de uma viga de espessura constante. Depois fez-se a referenciação dos materiais que constituem a *sandwich* e a atribuição da sua secção com propriedades de compósito. Por simplificação definiram-se propriedades isotrópicas para as peles e para o núcleo (Tabela 4.13) de acordo com as indicações do fabricante do núcleo de ninho de abelha de PP e com a estimativa do módulo de elasticidade das peles apresentada.

Tabela 4.13 Propriedades das *sandwich* de PP/FV submetidas a ensaios de flexão em 3 pontos [96].

Propriedade	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidade das peles, E	MPa	8100
Módulo de Elasticidade do Núcleo, E_c (em compressão) *	MPa	40
Módulo de Corte do Núcleo, G_c	MPa	9
Coefficiente de Poisson das peles, ν_f^{**}	-	0,3
Coefficiente de Poisson do núcleo, ν_c	-	0,3

*Considerou-se o valor do módulo de elasticidade no núcleo como sendo o do módulo de elasticidade em compressão, indicado pelo fabricante.

**Considerou-se um valor típico de acordo com [98]

Definiram-se as condições-fronteira, aplicando as condições impostas nos ensaios, nomeadamente as seguintes restrições aos graus de liberdade, impostas aos pontos de apoio:

- Apoio 1 (do lado direito) - restrição de deslocamentos nas direções X, Y e Z; e
- Apoio 2 (do lado esquerdo) - restrição de deslocamentos na direção Y

Aplicou-se uma carga concentrada de 100 N no ponto médio da viga (Figura 4.14).

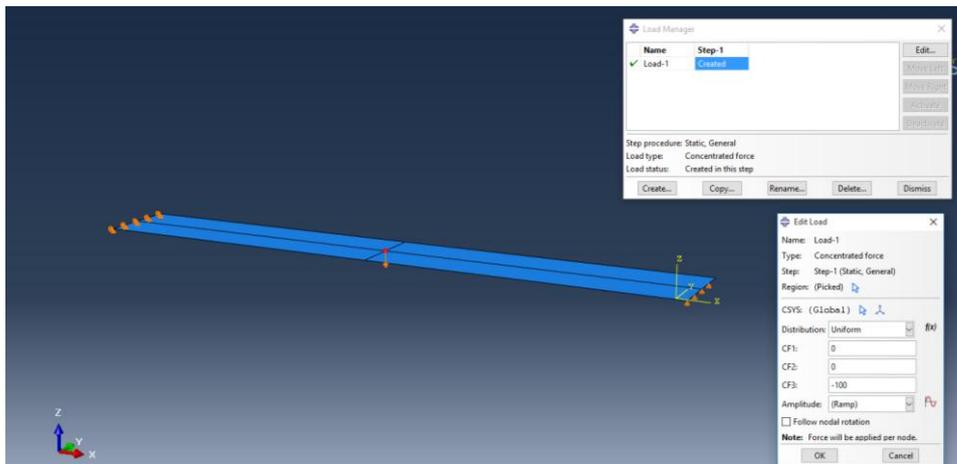


Figura 4.14 Condições-fronteira impostas à viga em *sandwich* PP/FV para simulação de flexão em 3 pontos.

Foram utilizados elementos de casca com quatro nós de integração reduzida, designados pelo programa Abaqus® como S4R, uma vez que, segundo [90], reduzem o esforço computacional relativamente aos modelos tridimensionais, sem prejudicar os resultados.

No final procedeu-se à simulação da flecha e a um estudo de convergência de seguida apresentado, tendo em consideração os valores obtidos pelo cálculo teórico e através dos ensaios.

4.3.2.5. Estudo de Convergência

Após tratamento dos dados obtidos nos ensaios de flexão em 3 pontos e através do cálculo analítico da flecha máxima, procedeu-se à simulação das vigas nas mesmas condições, procurando encontrar convergência entre os resultados da simulação e os resultados obtidos analiticamente e nos ensaios, alterando iterativamente o tipo de elemento e o tamanho da malha. Fez-se um estudo de convergência para escolher o tamanho da malha, verificou-se que os valores convergem para o valor determinado analiticamente. Considerando um erro até 10% como aceitável, optou-se por utilizar um tamanho de malha de 15 mm, que permite realizar simulações com tempos de computação aceitáveis para este fim (Figura 4.15).

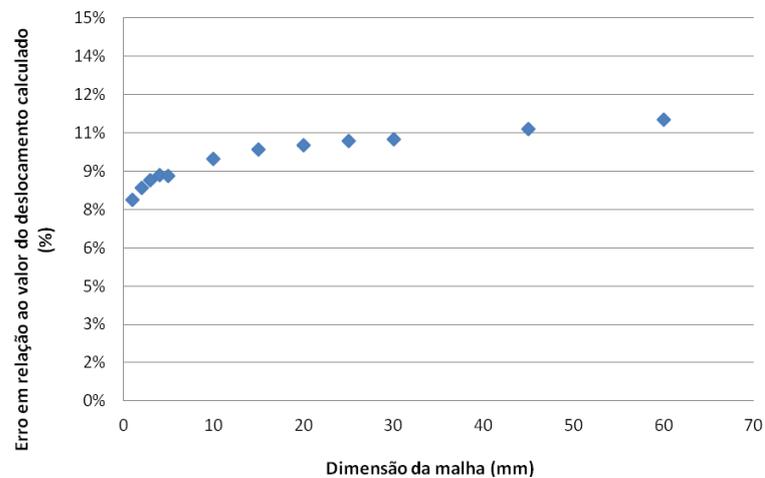


Figura 4.15 Desvio percentual entre os valores das flechas, obtidos por simulação de flexão em 3 pontos da *sandwich* PP/FV para diferentes dimensões da malha, em relação ao valor da flecha determinado analiticamente.

Tendo em conta o objetivo das simulações da estrutura em compósito, optou-se por definir a malha com 15 mm, uma vez que apresenta um bom compromisso entre os resultados da simulação e o tempo computacional. Assim, procedeu-se ao cálculo computacional da flecha obtida a meio da viga (Figura 4.16).

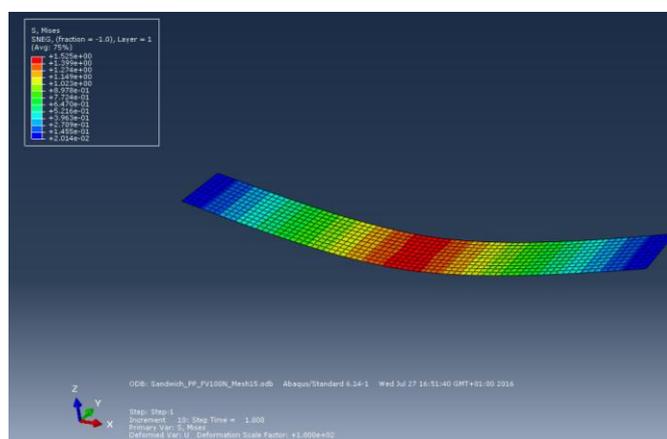


Figura 4.16 Resultado da simulação de flexão em 3 pontos da viga em *sandwich* PP/FV (ABAQUS®).

O resultado da simulação apresenta boa convergência em relação ao valor teórico, analiticamente determinado, tal como se pode constatar pela Tabela 4.14, na qual também se pode ler o valor obtido através da média dos 5 ensaios realizados aos provetes fabricados para este estudo de convergência.

Tabela 4.14 Resultados da flecha máxima das vigas submetidas à flexão em 3 pontos.

	Resultado		
	Analítico	Ensaio	Simulação
Flecha Máxima, Y_{\max} (mm)	1,06	1,27	0,96

De acordo com os valores obtidos, verifica-se existir boa convergência entre o resultado da simulação e o resultado analítico. Existindo uma diferença de cerca de 10% entre os valores de simulação e teórico, enquanto que essa diferença é de cerca de 20% entre o valor obtido através dos ensaios e o valor teórico e de 30% entre o valor obtido por simulação e através dos ensaios.

4.3.3. Simulação da Estrutura em Compósito Por Elementos Finitos

Uma vez que um dos objetivos deste estudo é o de procurar uma solução que possa ser aplicada a veículos citadinos compactos, que possam configurar novas soluções de mobilidade urbana, entendeu-se estudar apenas a estrutura central inferior, procurando uma geometria simples que possa servir de plataforma para diferentes tipos de veículos, nomeadamente veículos com tipologia similar às tipologias apresentadas na Figura 4.9.

A derivação para as diferentes tipologias pode ser conseguida através da combinação entre a estrutura do habitáculo e um *rollbar* superior, um berço frontal e um berço traseiro, com configurações ajustadas ao tipo de veículo, tal como se pode observar pela Figura 4.10, que ilustra uma estrutura híbrida de um veículo bi-lugar aberto, similar ao veículo que foi utilizado como referência neste estudo.

Após análise e validação do método de elementos finitos a utilizar, optou-se por utilizar o modelo de cascas, uma vez que se trata de uma estrutura constituída por chapas finas de espessura constante, a partir de um modelo de superfícies, correspondente ao plano médio da geometria da estrutura modelada em Solidworks®. Foi utilizado um modelo de cascas com propriedades de compósito, considerando propriedades elásticas para as peles e para o núcleo, como aproximação do comportamento ortotrópico do material, nomeadamente o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

Após importação da geometria a partir da modelação CAD 3D, foram introduzidos os materiais e as suas propriedades mecânicas identificadas na Tabela 4.13. Para a primeira simulação, designou-se a

estrutura E2 por E2.I1, composta por painéis em material compósito do tipo *sandwich*, com núcleo em de ninho de abelha de PP reforçado com fibra de vidro, com espessura de 50 mm, de acordo com a Figura 4.17.

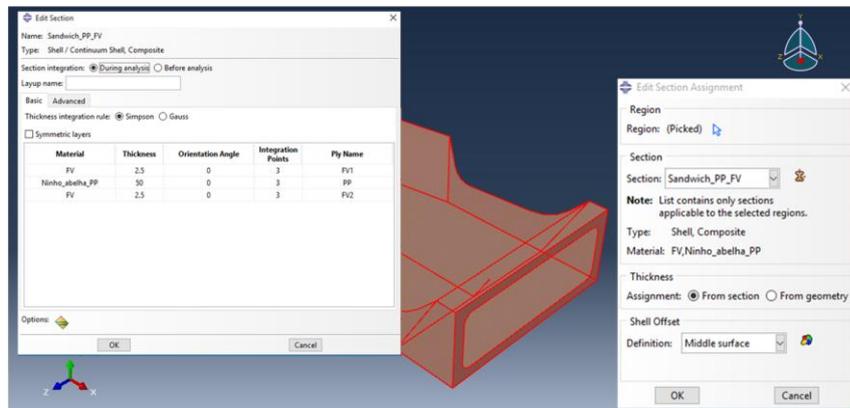


Figura 4.17 Modelo de cascas para simulação da estrutura E2.I1 (Abaqus®).

4.3.3.1. Simulação de Torção

Depois da referenciação dos materiais e atribuição das secções dos elementos que constituem a estrutura, procedeu-se à simulação torsional, aplicando as mesmas condições fronteira impostas à estrutura de referência, nomeadamente as seguintes restrições aos graus de liberdade, impostas aos nós A, B, C e D:

- Nó A - restrição de deslocamentos nas direções X, Y e Z;
- Nó B - restrição de deslocamentos nas direções X, e Y;
- Nó C - restrição de deslocamentos na direção Y; e
- Nó D - livre, sem restrição de deslocamentos nas direções.

Após aplicação da carga T, procedeu-se à medição do deslocamento Y_T , no nó D, de acordo com a Figura 4.18.

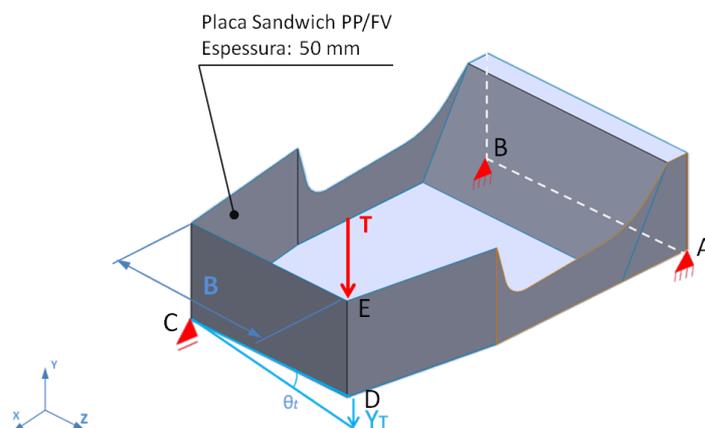


Figura 4.18 Condições-fronteira impostas à estrutura E2.I1 para simulação de torção.

Foram utilizados elementos de casca com quatro nós de integração reduzida, designados pelo programa Abaqus® como S4R, uma vez que, segundo [90], reduzem o esforço computacional relativamente aos modelos tridimensionais, sem prejudicar os resultados.

Considerou-se uma malha com 15 mm de comprimento dos elementos finitos tendo em conta o estudo de convergência apresentado no subcapítulo 4.3.2.5. Após definido o modelo de simulação, procedeu-se ao cálculo computacional do deslocamento obtido do nó D (Figura 4.19), a partir do qual se procedeu à determinação do angulo de torção e da rigidez torsional através das equações 3.1 a 3.3 (subcapítulo 3.2.4.2), cujos resultados se resumem na Tabela 4.15.

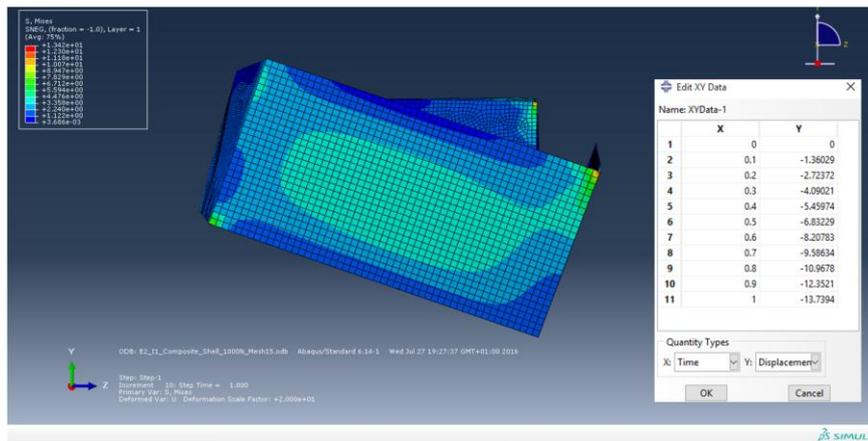


Figura 4.19 Resultado da simulação de torção da estrutura E2.I1 (ampliação 20x).

Tabela 4.15 Resultados da simulação de torção da estrutura E2.I1.

Designação Estrutura	Carga Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento Ponto D	Angulo Torção	Rigidez estática em Torção
	F (N)	CE _Z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	K _T (N.m/°)
E2.I1_T	1000	0,79	790	13,73	1,00	793

4.3.3.2. Simulação de Flexão

A simulação à flexão foi feita a partir do mesmo modelo de elementos finitos usado na simulação à torção, no qual se aplicou as mesmas condições fronteira do ensaio de flexão impostas à estrutura de referência, nomeadamente as restrições aos graus de liberdade, impostas aos nós A, B, C e D:

- Nó A - restrição de deslocamentos nas direções X, Y e Z;
- Nó B - restrição de deslocamentos nas direções Y;
- Nó C - restrição de deslocamentos na direção Y; e
- Nó D - restrição de deslocamentos na direção Y.

Após aplicação da carga no ponto F, procedeu-se à medição do deslocamento Y_F , nesse ponto, de acordo com a Figura 4.20.

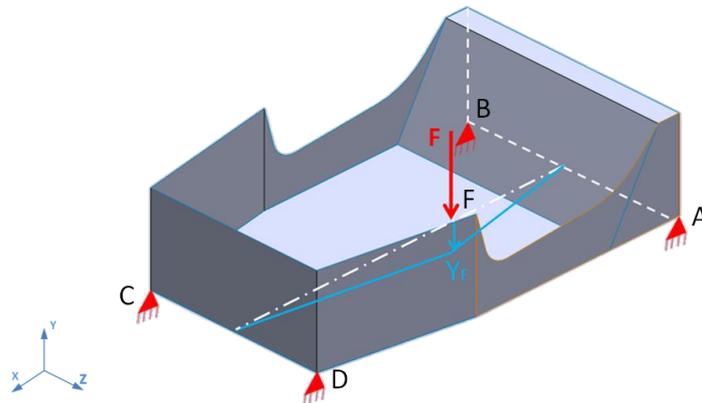


Figura 4.20 Condições-fronteira impostas à estrutura E2.I1 na simulação de flexão.

A partir do valor de deslocamento obtido na simulação (Figura 4.21), procedeu-se à determinação da rigidez à flexão, de acordo com a equação 3.4 (subcapítulo 3.2.4.3), cujos resultados se resumem na Tabela 4.16.

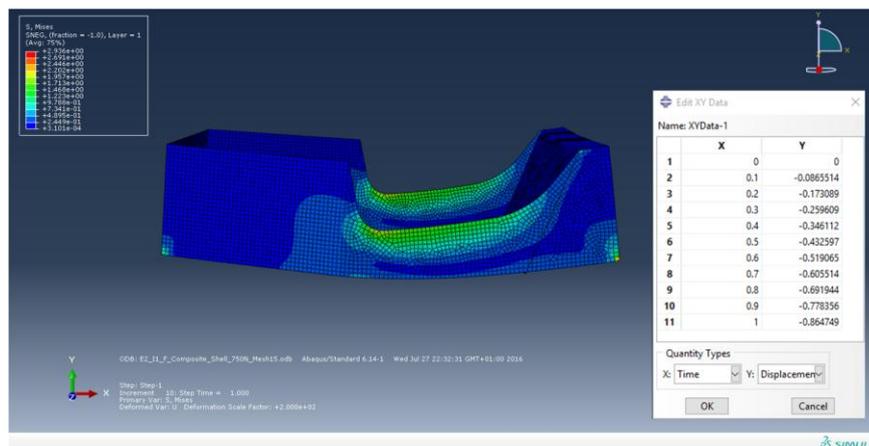


Figura 4.21 Resultado da simulação à flexão da estrutura E2.I1 (ampliação dos deslocamentos de 1000 vezes).

Tabela 4.16 Resultado da simulação de flexão da estrutura E2.I1.

Designação Estrutura	Carga Aplicada	Deslocamento do Ponto F	Rigidez estática em Flexão
	F (N)	Y_F (mm)	K_F (N/mm)
E2.I1_F	750	0,86	867

De acordo com a Tabela 4.17 apenas a rigidez à torção não cumpre com as especificações assumidas, pelo que se optou por fazer algumas iterações geométricas à estrutura inicial E2.I1, no sentido de se

procurar aumentar a sua rigidez torsional sem aumentar significativamente o peso da estrutura.

Tabela 4.17 Comparação dos valores das propriedades mecânicas da estrutura E2.I1 com os valores objetivo

Propriedade	Unidades	Objetivo	E2.I1
Peso	kg	≤ 45	38,6
Rigidez estática em torção	Nm/°	≥ 1319	793
Rigidez estática em flexão	N/mm	≥ 765	867

4.3.3.3. Iterações geométricas do Processo de Simulação por Elementos Finitos

Para melhorar o desempenho da estrutura optou-se por, em primeiro lugar, alterar a geometria até que o valor da rigidez torsional se aproximasse do valor objetivo. Numa segunda fase procedeu-se ao estudo de otimização através da variação da espessura das placas da estrutura.

4.3.3.3.1. Iteração 1- Estrutura E2.I2

Como primeira iteração geométrica optou-se por adicionar à estrutura E2.I1 um pequeno reforço longitudinal a meio do habitáculo, através de uma placa *sandwich* com uma espessura de 30 mm, colocada verticalmente, de acordo com a Figura 4.22.

Apesar de esta alteração não contribuir muito para o aumento da rigidez à flexão do que à torção, permite fazer uma separação entre os dois lugares do habitáculo.

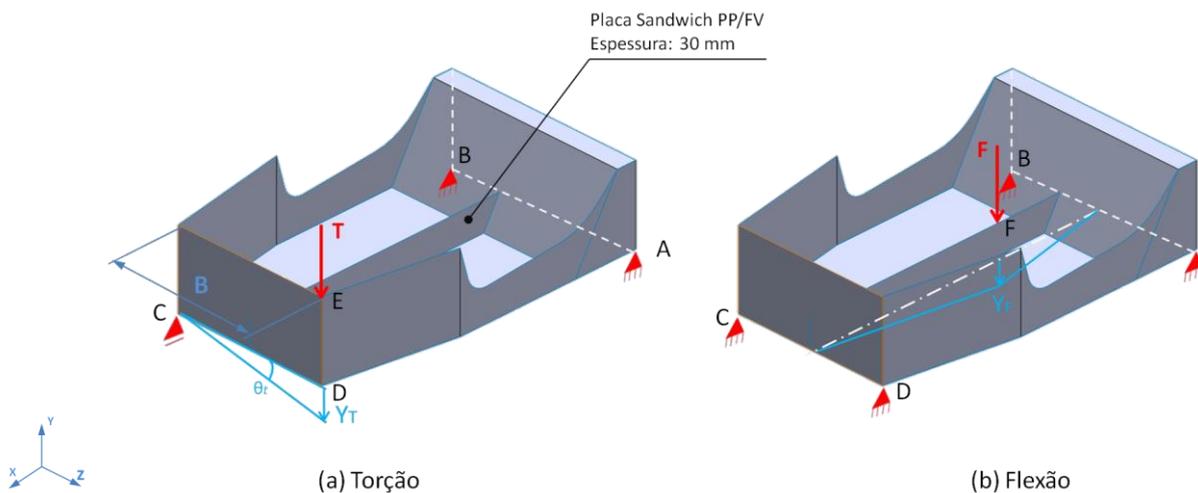


Figura 4.22 Condições-fronteira aplicadas ao modelo de casca da estrutura E2.I2 para simulação de torção (a) e flexão (b).

Na Tabela 4.18 pode ler-se o valor da rigidez torsional determinada a partir do resultado obtido através

da simulação de torção efetuada à estrutura E2.I2.

Tabela 4.18 Resultados da simulação de torção da estrutura E2.I2.

Designação Estrutura	Carga Aplicada F (N)	Braço CE _Z (m)	Momento Torsor M _T (N.m)	Deslocamento do ponto D Y _t (mm)	Angulo Torção θ (°)	Rigidez estática em Torção K _T (N.m/°)
E2.I2_T	1000	0,79	790	13,26	0,96	822

Na Tabela 4.19 podem ler-se o valor da rigidez à flexão, determinada a partir do resultado obtido através da simulação de flexão da estrutura E2.I2.

Tabela 4.19 Resultado da simulação de flexão da estrutura E2.I2.

Designação Estrutura	Carga Aplicada F (N)	Deslocamento do ponto F Y _f (mm)	Rigidez estática em Flexão K _F (N/mm)
E2.I2_F	750	0,47	1594

De acordo com os valores obtidos, verifica-se que a rigidez torsional é ainda inferior à pretendida. Por outro lado, a introdução do reforço longitudinal aumentou o momento de inércia da secção em relação ao plano longitudinal médio, que permitiu aumentar significativamente a rigidez à flexão, tal como era de esperar.

Tendo em conta o efeito que esta alteração produziu e o valor a rigidez torsional, optou-se por continuar o processo iterativo à geometria, originando uma nova estrutura, designada por E2.I3.

4.3.3.3.2. Iteração 2- Estrutura E2.I3

Esta alteração consistiu em fechar a parte superior da secção frontal com uma placa horizontal com 20 mm de espessura, e prolongar a placa central na parte da frente, dando-lhe continuidade até ao topo da estrutura, como se pode observar pela Figura 4.23.

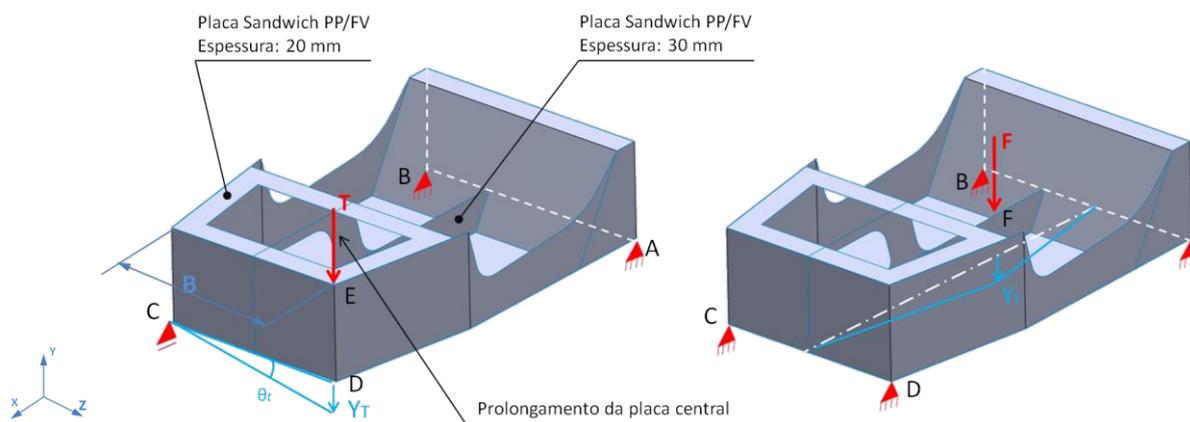


Figura 4.23 Condições-fronteira aplicadas ao modelo de casca da estrutura E2.I3 para simulação de torção (a) e de flexão (b).

Na Tabela 4.20 Tabela 4.18 pode ler-se o valor da rigidez torsional determinada a partir do resultado obtido na simulação de torção da estrutura E2.I3.

Tabela 4.20 Resultados da simulação de torção da estrutura E2.I3.

Designação Estrutura	Carga Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento Ponto D	Angulo Torção	Rigidez estática em Torção
	F (N)	CE _Z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	K _T (N.m/°)
Sim_E2.I3_T	1000	0,79	790	8,63	0,63	1262

Na Tabela 4.21 podem ler-se o valor da rigidez à flexão, determinada a partir do resultado obtido na simulação de flexão da estrutura E2.I3.

Tabela 4.21 Resultado da simulação de flexão da estrutura E2.I3.

Designação Estrutura	Carga Aplicada	Deslocamento do ponto F	Rigidez estática em Flexão
	F (N)	Y _F (mm)	K _F (N/mm)
Sim_E2.I3_F	750	0,46	1625

4.3.3.4. Resumo dos Resultados da Primeira Fase de Simulação

Na Tabela 4.22 encontram-se resumidos os resultados determinados a partir dos valores obtidos nas simulações efetuadas na primeira fase, correspondentes às estruturas designadas por E2.I1, E2.I2 e E2.I3.

Tabela 4.22 Resumo dos resultados determinados a partir das simulações das estruturas em compósito, realizadas por elementos finitos.

Item	Unidades	Objectivo	E2.I1	E2.I2	E2.I3
Peso	kg	≤ 45	38,6	40,6	44,6
Rigidez estática em torção	Nm ^o	≥ 1319	793	822	1262
Rigidez estática em flexão	N/mm	≥ 765	867	1594	1625

4.3.3.5. Otimização Estrutural

Depois da primeira fase de simulações na qual se procurava encontrar uma geometria que apresentasse valores de rigidez, à torção e à flexão, próximos dos valores objetivo, procedeu-se a um estudo iterativo com vista a estimar a rigidez da estrutura, variando a espessura das diferentes placas da estrutura E2.I3 (Figura 4.24), no sentido de se encontrar o melhor compromisso entre o peso e a rigidez.

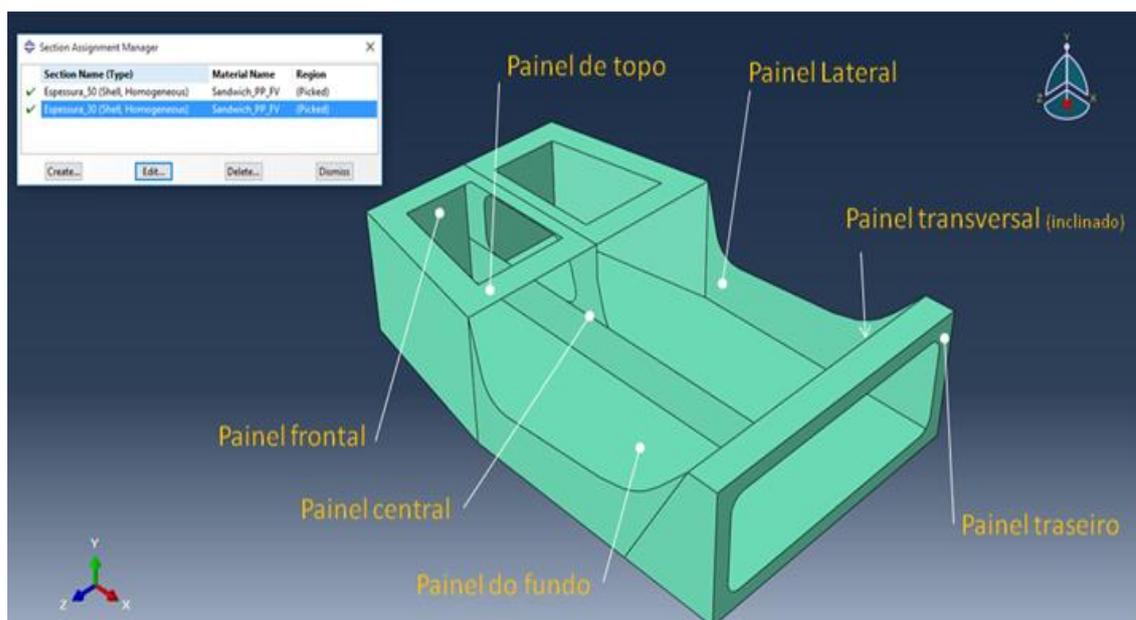


Figura 4.24 Identificação dos painéis da estrutura E2.I3.

Na Tabela 4.23, podem ler-se as diferentes combinações de espessuras das placas *sandwich* da estrutura E2.I3, que foram estudadas nesta segunda fase de simulações, nas condições das simulações efetuadas anteriormente.

Tabela 4.23 Combinações de espessuras das placas *sandwich* utilizada na otimização da estrutura E2.I3.

Painel	Espessura do núcleo dos painéis em compósito tipo <i>sandwich</i> (mm)							
	E2.I3	E2.I3.1	E2.I3.2	E2.I3.3	E2.I3.4	E2.I3.5	E2.I3.6	E2.I3.7
Painel do fundo	50	50	50	50	50	60	50	60
Painel frontal	50	50	50	50	50	50	60	40
Painel traseiro	50	50	50	50	50	50	60	40
Painel lateral	50	50	50	50	60	60	50	40
Painel central	30	30	50	30	30	30	30	40
Painel de topo	20	30	50	50	50	50	50	40
Painel transversal	50	50	50	50	50	50	50	40
Rigidez estática em torção (N.m/°)	1262	1287	1388	1325	1377	1558	1346	1411
Rigidez estática em flexão (N/mm)	1625	1628	1653	1633	1650	1783	1636	1745

Face aos resultados obtidos por simulação, apresentados e discutidos no subcapítulo 5.3, optou-se por fabricar a estrutura com a geometria E2.I3.2 (Figura 4.25), que corresponde à primeira geometria a ultrapassar os valores objetivo e, por outro lado, por uma questão de custo de fabrico, uma vez que só é necessário adquirir um painel de ninho de abelha de PP com 50 mm de espessura, bem como simplificação do processamento.

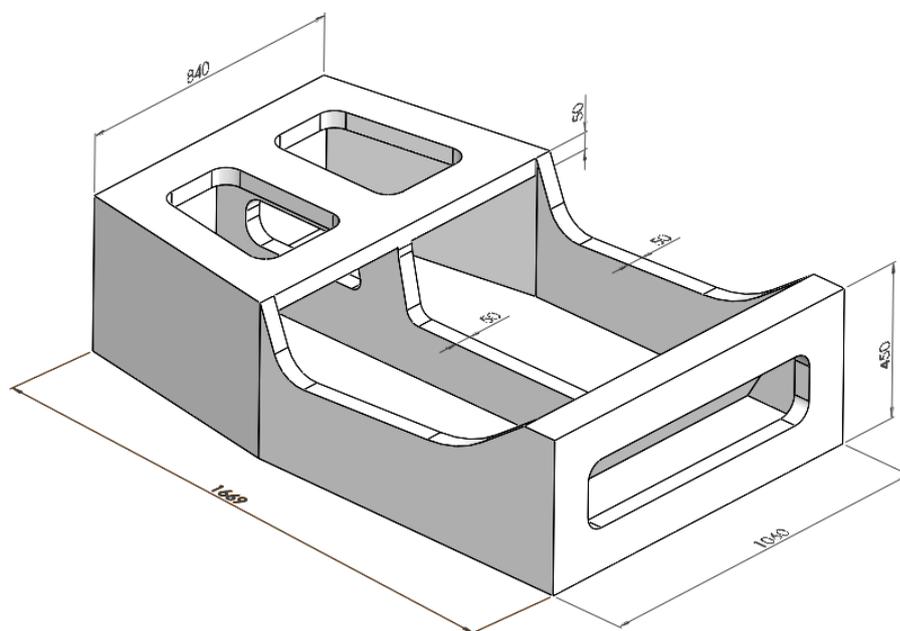


Figura 4.25 Perspetivas da estrutura E2.I3.2 otimizada.

4.4. Fabrico da Estrutura em Compósito

De acordo com os resultados obtidos na simulação numérica por elementos finitos da estrutura em compósito, apresentados no subcapítulo 4.3.3.5, optou-se por fabricar a estrutura designada por E2.I3.2 (Figura 4.25), podendo o seu desenho ser consultado no Anexo IV.

De seguida apresentam-se as propriedades das matérias-primas utilizadas para o fabrico da estrutura em compósito.

Para o fabrico das peles, optou-se por utilizar a resina de poliéster insaturado, com a designação Palatal P69 da DSM, por ter um preço baixo, excelentes propriedades mecânicas, boa resistência ao impacto e por ser adequada para aplicações em automóveis. As suas propriedades encontram-se resumidas na Tabela 4.2, estando a ficha técnica apresentada no Anexo III. Na Tabela 4.24 apresentam-se os valores das propriedades físicas e mecânicas da manta e do tecido de fibra de vidro, utilizados no reforço dos painéis *sandwich* da estrutura, cuja ficha técnica se pode ver no Anexo III.

Tabela 4.24 Propriedades dos reforços de fibra de vidro utilizada no fabrico da estrutura E2.I3.2 [99, 100].

Propriedade	Unidades	Manta FV	Tecido FV /Manta FV (Proqui Complex 500/450)
Orientação das Fibras		Aleatória-	Tecido equilibrado (0°/90°)/ Aleatória
Gramagem	(g/m ²)	300	500 / 450
Módulo de Young, E	(GPa)		70
Tensão de Ruptura, σ	(GPa)		1,3

Na Tabela 4.25 estão resumidas as propriedades do ninho de abelha em polipropileno, designado por Nidaplast 8[®], utilizado como núcleo dos painéis *sandwich* da estrutura, cuja ficha técnica se pode ver no Anexo III.

Tabela 4.25 Propriedades do núcleo de ninho de abelha de PP, utilizado no fabrico da estrutura E2.I3.2 [93].

Propriedade	Unidades	Ninho de Abelha de PP
Espessura	mm	50
Dimensão dos alvéolos	mm	8
Peso específico	kg/m ³	65
Gramagem do tecido superficial	g/m ²	45
Módulo de Elasticidade	MPa	40
Coefficiente Poisson	-	0,3
Resistência à compressão	MPa	1,2
Módulo à compressão	MPa	40
Resistência à tração	MPa	0,8
Resistência ao corte	MPa	0,4
Módulo ao corte	MPa	9

A estrutura foi fabricada por moldação manual, pelo que foi necessário desenvolver um molde específico com a geometria exterior da estrutura, ilustrado na Figura 4.26, cujo desenho pode ser consultado no Anexo IV.

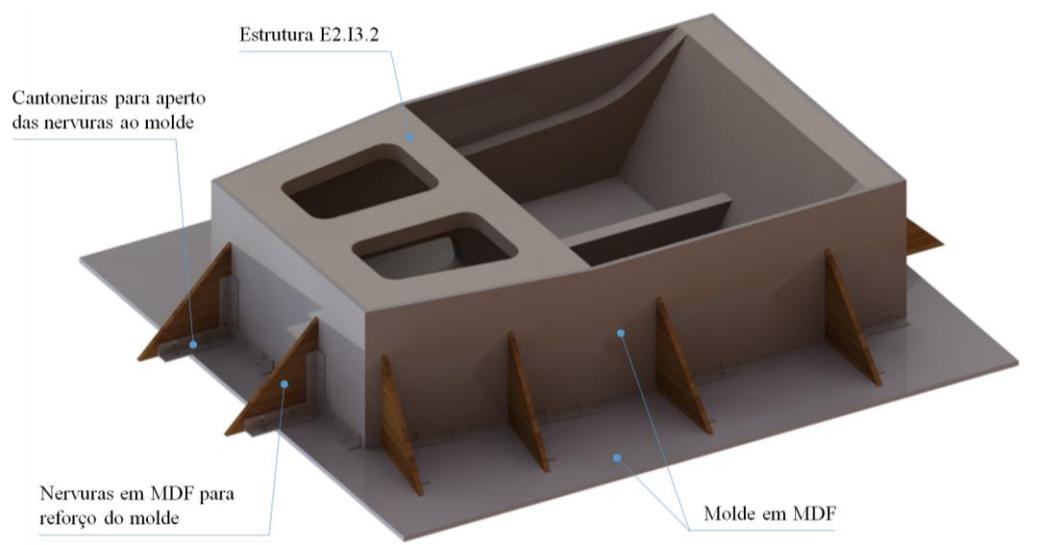


Figura 4.26 Imagem virtual do molde com a estrutura E2.I3.2 no interior (Solidworks®).

4.4.1. Fabrico do Molde

O molde foi construído com placas MDF laminadas de um dos lados, sendo o lado laminado voltado para o interior do molde, de forma a garantir a geometria exterior da estrutura com um bom acabamento superficial, como se pode observar pela Figura 4.27, onde se ilustra a parte final da montagem.

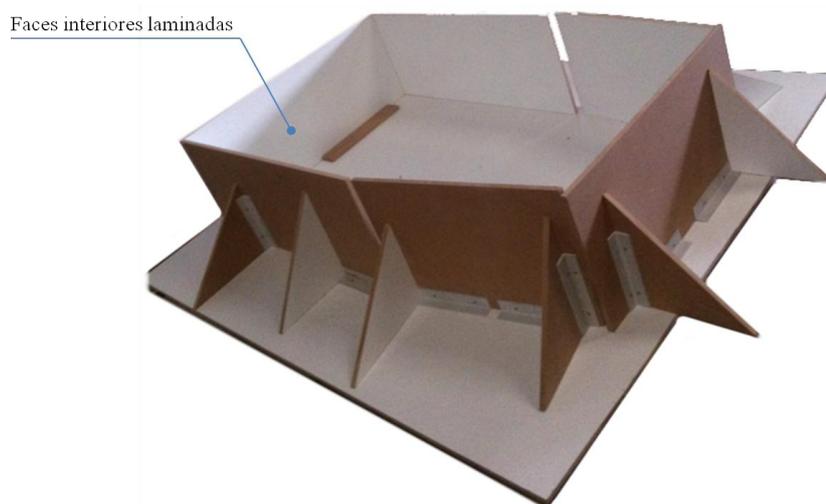


Figura 4.27 Fase final da construção do molde em madeira MDF.

Foi escolhido o MDF por ser um material versátil, de relativo baixo custo e muito fácil de trabalhar.

Para garantir a resistência do molde ao longo do processo de cura, durante o qual é necessário exercer pressão sobre as placas da estrutura contras as placas do molde, reforçou-se a fixação das placas verticais do molde com nervuras exteriores aparafusadas à base através de cantoneiras, (ver Figura 4.28, pormenor A). Para além destes reforços exteriores as placas verticais foram aparafusadas entre si, tal como se pode observar pela Figura 4.28, pormenor B.

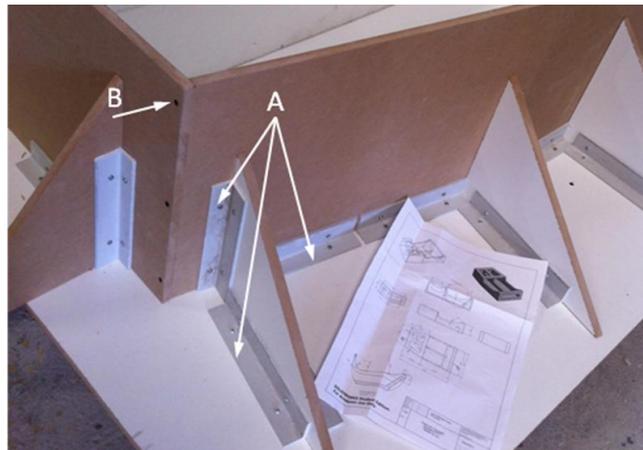


Figura 4.28 Fixação das placas do molde.

Após a montagem, procedeu-se ao isolamento das frinchas existentes entre as placas do molde com fita-cola, para evitar a saída da resina durante o processo de moldação. Depois do isolamento das frinchas e limpeza do molde, procedeu-se à aplicação de *gel coat* para permitir melhor acabamento final da estrutura (Figura 4.29).



Figura 4.29 Molde com revestimento interior de *gel coat*.

4.4.2. Corte e Preparação das Placas para o Fabrico da Estrutura

Para o núcleo das placas em compósito do tipo *sandwich*, utilizou-se uma placa de dimensões 2500x1200x50 (mm), em ninho de abelha de polipropileno com alvéolos de 8 mm, com designação comercial Nidaplast® 8. Todas as placas de ninho de abelha foram cortadas com uma serra vertical, uma vez que permite garantir o corte de placas de grandes dimensões quer na direção vertical quer na horizontal (Figura 4.30). Para além destes houve necessidade de fazer alguns cortes com ângulo em algumas das placas da seção da frente efetuados com uma serra de disco.

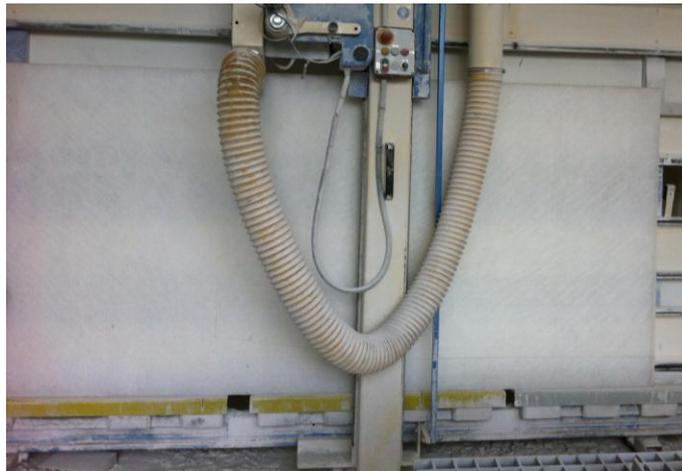


Figura 4.30 Corte das placas de ninho de abelha de PP.

Após o corte, procedeu-se à pré-montagem de todas as placas da estrutura no interior do molde para verificação das suas dimensões, bem como das folgas necessárias entre placas, no sentido de garantir as dimensões e a geometria final da estrutura (Figura 4.31).



Figura 4.31 Pré-montagem para confirmação dos cortes das placas de ninho de abelha de PP.

4.4.3. Moldação Manual da Estrutura E2.I3.2

A estrutura em compósito E2.I3.2 foi fabricada pelo processo de moldação manual. As peles foram produzidas com resina de poliéster ortoftálica, de uso geral, com empilhamento do reforço constituído por uma camada em tecido complexo de manta de 450 g/m² e tecido bidirecional (0/90°) de 500 g/m², e uma camada de manta 300 g/m².

A moldação poderia ser assistida a vácuo, mas para tal haveria que ter em atenção a pressão exercida sobre as placas de ninho de abelha, uma vez que existe o risco destas não resistirem à compressão exercida pelo saco de vácuo contra o molde. Para além desta limitação existe ainda a possibilidade de haver maior quantidade de resina a passar para o interior do ninho de abelha através do filme da superfície da placa por ação da pressão exercida pelo saco de vácuo. No entanto, esta possibilidade permitiria aumentar a cadência de fabrico.

Outra possibilidade é a de fazer primeiro a moldação das peles por infusão e depois fazer a sua colagem às placas de ninho de abelha. Este procedimento permite diminuir a quantidade de resina, eliminando o seu excesso, mas apresenta limitações. A primeira prende-se com o tempo de execução, pois implica fazer a moldação das peles exteriores no interior do molde, a moldação das peles interiores em molde plano, o corte das peles interiores, a colagem das peles exteriores ao núcleo, a colagem das peles interiores ao núcleo e posteriormente a ligação entres as peles interiores e exteriores, com resina e fibra, para dar continuidades às peles.

Tendo em conta estas considerações, optou-se por fazer a moldação manual diretamente no molde.

Antes de iniciar o processo de moldação da estrutura no molde, laminaram-se previamente, em molde plano, uma das faces em três placas (Figura 4.32), cuja laminagem era difícil devido ao difícil acesso.

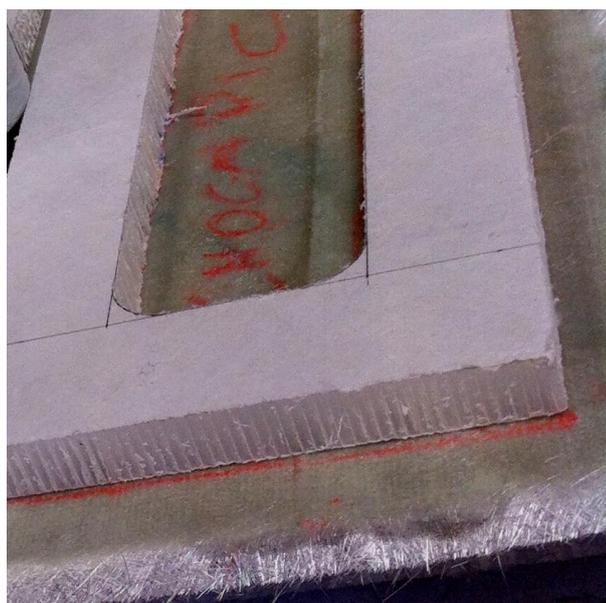


Figura 4.32 Moldação da face interior de três painéis da estrutura.

Na Figura 4.33 pode observar-se a colocação das fibras de reforço antes da moldação da camada exterior da estrutura no molde.

As fibras de reforço foram cortadas de forma a deixar um excesso de reforço de fibra nas paredes verticais para permitir o fecho dos topos do painel *sandwich*, com vista a dar continuidade às fibras, melhorando assim o desempenho da estrutura.



Figura 4.33 Colocação das fibras de reforço (manta e tecido) sobre o molde.

Optou-se por fazer a moldação da pele exterior de uma só vez, pelo que se utilizou o equipamento de projeção de resina, que permite fazer a impregnação das fibras mais rapidamente (Figura 4.34).



Figura 4.34 Moldação das peles exteriores com projeção de resina.

Antes da cura desta pele colocaram-se os painéis de ninho de abelha de PP, na sequência ilustrada na Figura 4.35, para permitir uma boa ligação entre o painel e o laminado.



Figura 4.35 Sequência de colocação do núcleo dos painéis verticais no interior do molde.

De forma a garantir a boa impregnação na interface painel/laminado, aplicou-se pressão distribuída pelas superfícies dos painéis, através de placas rígidas que foram comprimidas aplicando varões obtidos por pultrusão, que devido ao seu comportamento elástico permitem criar pressão nas placas, como se pode observar pela Figura 4.36.



Figura 4.36 Pressão sobre as faces interiores do núcleo dos painéis no início da cura.

Depois da colocação das placas verticais, procedeu-se à moldação dos seus tops com o reforço que havia ficado em excesso aquando da laminação da pele exterior (Figura 4.37).



Figura 4.37 Moldação das peles dos tops dos painéis *sandwich*.

Depois de curada a pele exterior, procedeu-se à laminação da primeira camada do fundo e colocação das placas interiores da estrutura, nomeadamente o painel inclinado para suporte de costas, e o reforço central (Figura 4.38), permitindo a colagem destes painéis ao laminado.

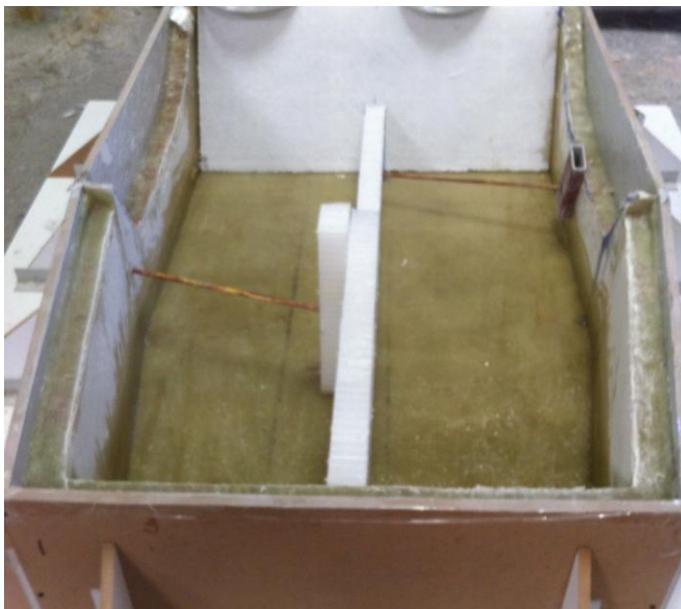


Figura 4.38 Posicionamento do núcleo dos painéis interiores.

De seguida procedeu-se à laminação das peles interiores aplicando a segunda camada do reforço do fundo. Optou-se por fazer a laminação de forma contínua, como se pode observar pela Figura 4.39, no sentido de melhorar a homogeneidade do laminado e dar continuidade ao reforço.



Figura 4.39 Moldação da segunda pele interior da estrutura.

Finalmente, procedeu-se à colocação do painel superior da secção frontal, o qual foi colado à estrutura na fase final da laminação da pele interior, ainda com a resina por curar nos topos da secção frontal, através de pressão distribuída na superfície da placa.

Para submeter a estrutura a ensaios de torção foi necessário conceber três acessórios de fixação da estrutura à mesa de ensaio. Os acessórios foram feitos com três chapas de aço e três tubos de secção quadrada, também em aço, ambos com 4 mm de espessura (Figura 4.40). A sua geometria permite, por

um lado, boa adaptação à estrutura, e por outro, restringir os graus de liberdade nos três planos ortogonais, de acordo com as restrições impostas na simulação.

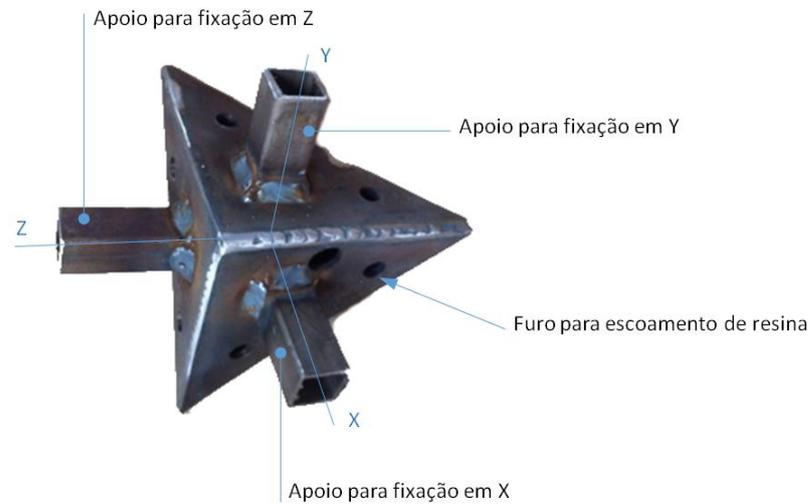


Figura 4.40 Acessório desenvolvido para fixação da estrutura na mesa de ensaio.

Os acessórios foram fixados à estrutura por laminação, com duas camadas de reforço em manta de 450 g/m², impregnadas com a mesma resina que foi utilizada nas peles da estrutura, como se pode observar pela Figura 4.41.



Figura 4.41 Inserção de um acessório mecânico para fixação da estrutura à mesa de ensaio.

Na Figura 4.42 pode observar-se a diferença da qualidade do acabamento da superfície exterior comparativamente com a interior, que se deve ao facto da pele exterior ter sido moldada diretamente no molde contra a superfície laminada das placas MDF.

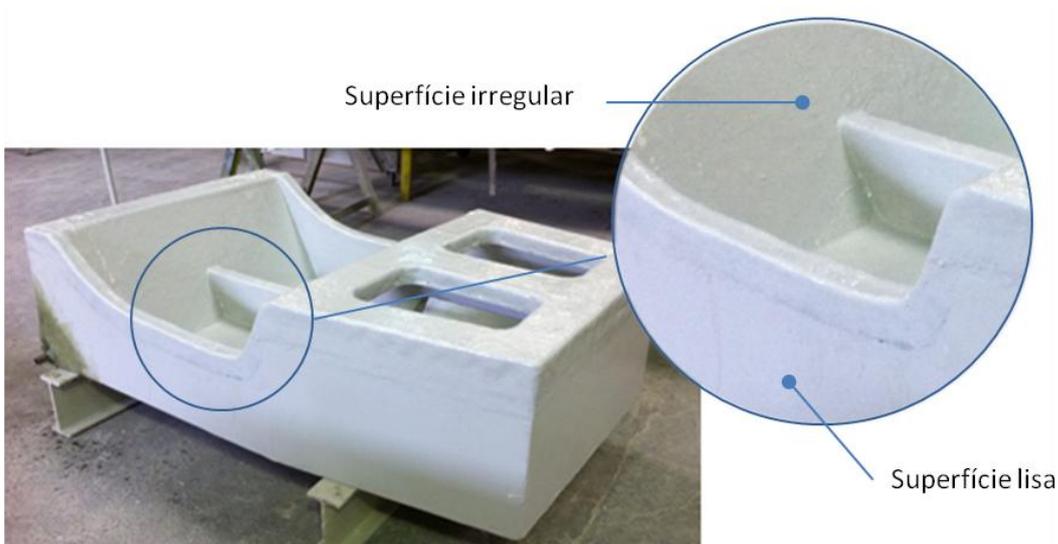


Figura 4.42 Aspecto final da estrutura E2.I3.2 após acabamento da superfície com *top coat*.

4.5. Ensaios da Estrutura em Compósito

Após o fabrico da estrutura E2.I3.2 procedeu-se a ensaios para caracterização do peso, rigidez à torção e rigidez à flexão. Estes ensaios foram efetuados em ambiente industrial, recorrendo por isso aos meios aí disponíveis, e a procedimentos de ensaio o mais próximos possível das condições de simulação.

4.5.1. Pesagem da Estrutura em Compósito

Após a moldação da estrutura e antes do revestimento da superfície com *top coat*, procedeu-se à sua pesagem numa balança industrial, tendo-se registado um peso de 55,1 kg.

4.5.2. Rigidez à Torção

O ensaio de torção da estrutura E2.I3.2 foi realizado após a cura da resina de poliéster insaturado utilizada, em condições o mais aproximadamente possível das condições utilizadas na simulação, apesar de existirem algumas diferenças, nomeadamente nos apoios da estrutura (Figura 4.43).

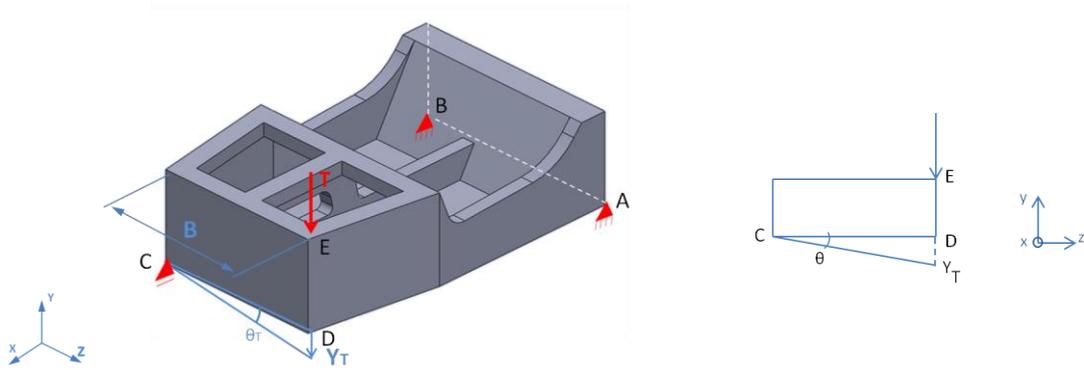


Figura 4.43 Esquema do ensaio de torção realizado na estrutura E2.I3.2 fabricada em compósito.

Foi aplicada uma carga T no ponto E , com as seguintes condições de fronteira impostas aos pontos A , B , C , D e E , relativamente aos respetivos graus de liberdade:

- Ponto A - restrição de deslocamentos nas direções X , Y e Z ;
- Ponto B - restrição de deslocamentos nas direções X , e Y ;
- Ponto C - restrição de deslocamentos na direção Y ; e
- Ponto D - livre, sem restrição.

Após aplicação da carga, procedeu-se à medição da deformada Y_T , no ponto D , através de um comparador (Figura 4.44), posteriormente à determinação da rigidez em torção K_T pela equação 3.1, apresentada no subcapítulo 3.2.4.2.

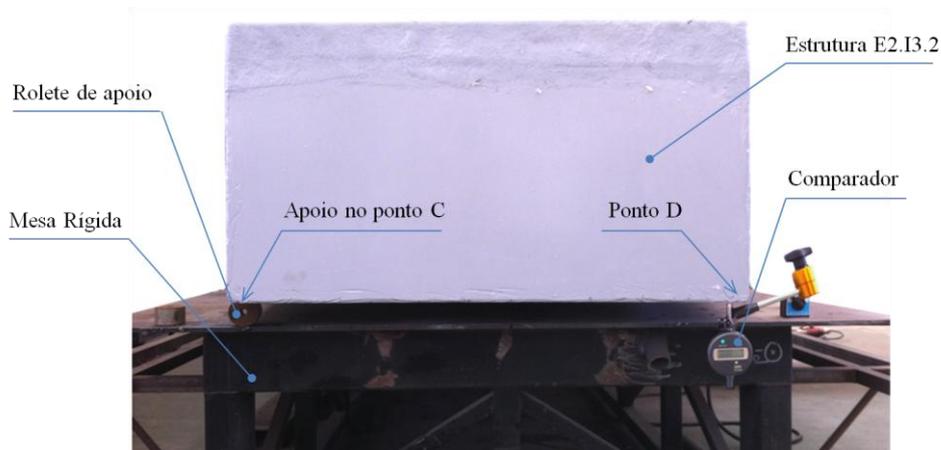


Figura 4.44 Medição do deslocamento no ponto D durante o ensaio de torção da estrutura E2.I3.2.

4.5.3. Rigidez à Flexão

Para avaliação da rigidez estática em flexão da estrutura, procedeu-se a ensaios nas mesmas condições que foram impostas nas simulações de flexão, aplicando-se uma carga $F(N)$ no ponto central da estrutura F , no interior do habitáculo, de acordo com a Figura 4.45.

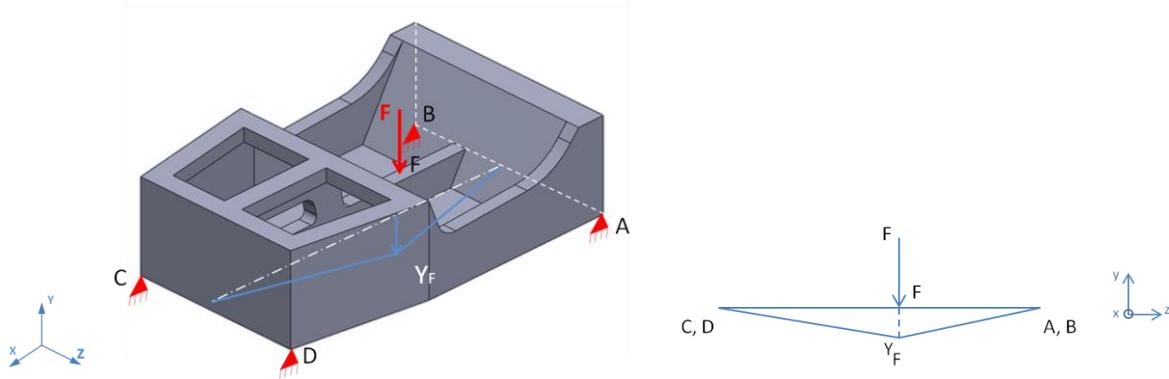


Figura 4.45 Esquema do ensaio de flexão realizado à estrutura fabricada em compósito E2.I3.2.

O apoio da estrutura foi feito de forma a impor as seguintes restrições aos pontos A, B, C e D:

- Ponto A - restrição de deslocamentos nas direções X, Y e Z;
- Ponto B - restrição de deslocamentos na direção Y;
- Ponto C - restrição de deslocamentos na direção Y; e
- Ponto D - restrição de deslocamentos na direção Y.

Após aplicação da carga F no ponto F , procedeu-se à medição da deformada Y_F , através de um comparador, colocado na parte inferior da estrutura no alinhamento da aplicação da carga, e posteriormente à determinação da rigidez em flexão K_F pela equação 3.4, apresentada no subcapítulo 3.2.4.3.

CAPÍTULO V

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados finais de todo o estudo, em três subcapítulos, destacando os resultados referentes ao estudo da estrutura do veículo de referência, dos materiais compósitos fabricados e da estrutura fabricada em compósito.

5.1. Estrutura do Veículo de Referência

Optou-se por focar este trabalho em veículos similares aos modelos ilustrados na Figura 3.1, utilizando como referência o veículo apresentado na Figura 3.2, uma vez que se pretende dar continuidade ao desenvolvimento de novas versões deste modelo, e iniciar o estudo sobre veículos citadinos compactos de baixo custo, que possam satisfazer necessidades de mobilidade urbana, em mercados de nicho.

O veículo de referência, desenvolvido de acordo com a regulamentação da FIA, nomeadamente em relação às condições de segurança, apresenta características dinâmicas equilibradas. Apesar de ser um veículo destinado a provas de velocidade em circuito, as suas características podem ser utilizadas como referência quer para veículos deste tipo, quer para veículos compactos para utilização no dia-a-dia, sujeitos a condições de carga menos severas, principalmente cargas verticais assimétricas, que ocorrem ao curvar e em condições em que as rodas fiquem desniveladas, cargas verticais, que ocorrem com a sustentação dos órgãos mecânicos e dos ocupantes, bem como cargas horizontais, que ocorrem em condições de aceleração, travagem e ao curvar.

Este veículo foi submetido a um programa de testes de curto prazo, no qual foi possível validar as suas características, pelo que se justifica a sua utilização como veículo de referência neste trabalho.

5.1.1. Resultados Obtidos no Fabrico da Estrutura

No fabrico da estrutura tubular de referência, optou-se por cortar a laser os tubos para a estrutura e desenvolver um *gabari* para o processo de soldadura. Estas opções permitiram melhorar a qualidade da estrutura tubular fabricada relativamente à estrutura original do veículo de referência, nomeadamente em termos dimensionais e geométricos. O facto de os tubos terem sido cortados a laser, permitiu diminuir as folgas entre tubos, diminuindo assim a quantidade de material de adição necessário depositar nos cordões de soldadura, o que permitiu reduzir o peso da estrutura e melhorar o

seu desempenho estrutural. Na Figura 5.1 pode observar-se a diferença entre o método utilizado anteriormente no fabrico da estrutura do veículo de referência original, e o que foi utilizado neste trabalho. A introdução do gabari de soldadura desenvolvido neste trabalho, permitiu reduzir significativamente o tempo de fabrico, tornando desta forma o processo mais adequado para uma eventual industrialização, pois permite aumentar a cadência de fabrico e reduzir os custos de produção, relativamente ao anterior.

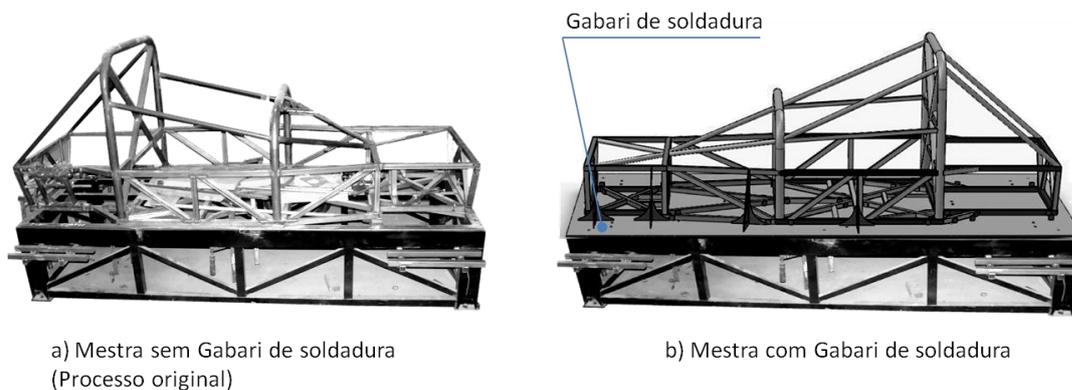


Figura 5.1 Fabrico da estrutura tubular de referência: a) processo original b) com gabari de soldadura.

Na Tabela 5.1 resume-se o custo total de fabrico da estrutura tubular de referência, designada por Estrutura 1.

Tabela 5.1 Resumo do custo de fabrico da estrutura tubular de referência (Estrutura 1).

	Custo (€)
Gabari	250
Matéria-prima (tubos em aço ST-37/25CrMo4)	888
Fio para soldadura (metal de adição)	14
Gás (Argon)	30
Outros consumíveis	20
Energia	20
Mão-de-obra (48h)	1320
Custo total	2542

5.1.2. Resultados Obtidos Através de Ensaios

A estrutura de referência foi submetida a ensaios para determinação do peso e da rigidez estática, em torção e em flexão. Os ensaios foram efetuados de acordo com as condições definidas no subcapítulo 3.2.4. A estrutura designada por estrutura 1, correspondente à estrutura tubular completa do veículo de referência, foi submetida a ensaios para determinação do peso e da rigidez estática, em torção e em

flexão. Para determinar valores para a zona do habitáculo (estrutura 2), optou-se por submeter a zona central da estrutura fabricada a ensaios de torção e de flexão.

5.1.2.1. Peso

O peso da estrutura tubular de referência (Estrutura 1) foi obtido por pesagem da estrutura fabricada numa balança industrial, tendo sido registado o valor de 80,6 kg. Uma vez que o habitáculo deve ser isolado para proteção dos ocupantes da projeção de objetos, optou-se por considerar o peso das chapas de alumínio, de aproximadamente 10 kg (Figura 3.6), o que eleva o peso total da estrutura 1 para os 90,6 kg. O peso das restantes estruturas foi estimado apenas através da modelação CAD 3D, pelo que os respetivos valores se apresentam mais à frente.

5.1.2.2. Ensaios de Torção

Apesar das condições de ensaio utilizadas neste trabalho não serem as condições reais a que uma estrutura deste tipo está sujeita, nem as condições normalmente usadas para homologação da rigidez torsional de um veículo, optou-se por utilizar as condições de ensaio de acordo com as condições ilustradas na Figura 3.13, apresentada no subcapítulo 3.2.4.2, uma vez que o objetivo é, tal como já referido, determinar valores de referência para posterior comparação com uma nova estrutura em compósito sujeita às mesmas solicitações de ensaio. Esta opção justifica-se pela simplificação do ensaio, uma vez que este é feito sem os pontos de ligação dos amortecedores, procedimento que permite diminuir os custos associados.

A determinação da rigidez estática em torção da estrutura de referência (Estrutura 1) e da estrutura que limita o habitáculo (Estrutura 2), foi feita através das equações 3.1 a 3.3, a partir dos resultados dos respetivos ensaios de torção, que foram efetuados de acordo com as condições definidas no parágrafo 3.2.4.2 do Capítulo III. Na Tabela 5.2 apresentam-se os resultados da rigidez estática em torção das estruturas tubulares 1 e 2, obtidos a partir dos ensaios de torção efetuados.

Tabela 5.2 Resultados dos ensaios de torção realizados à estrutura tubular de referência.

	Carga Eq. Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento Ponto D	Angulo Torção	Rigidez estática em Torção
Designação do Ensaio	T (N)	CE_Z (m)	M_T (N.m)	Y_T (mm)	θ (°)	K_T (N.m/°)
Ensaio_Tubular_T ₁	2403	0,695	1703	7,92	0,76	2251
Ensaio_Tubular_T ₂	2245	0,790	1774	3,90	0,28	6271

5.1.2.3. Ensaios de Flexão

A determinação da rigidez estática em flexão da estrutura de referência completa (Estrutura 1) e da estrutura do habitáculo (Estrutura 2), foi feita através da equação 3.4, a partir dos resultados dos respetivos ensaios de flexão, efetuados de acordo com as condições definidas no parágrafo 3.2.4.3 do Capítulo III. Na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados da rigidez estática em flexão das estruturas tubulares 1 e 2, obtidos a partir dos ensaios de flexão efetuados.

Tabela 5.3 Resultados dos ensaios de flexão realizados à estrutura tubular de referência.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Deslocamento do Ponto F	Rigidez estática em Flexão
	F (N)	Y_F (mm)	k_F (N/mm)
Ensaio_Tubular_F ₁	779	1,01	771
Ensaio_Tubular_F ₂	779	0,94	829

Verifica-se que a estrutura 2 apresenta maior rigidez torsional e em flexão, como seria de esperar, sendo a rigidez torsional bastante superior, uma vez que esta corresponde à zona da estrutura mais reforçada. Tendo em conta a necessidade de se definirem valores de referência para uma estrutura compatível com a parte inferior do habitáculo, e por isso mais aligeirada do que as estruturas 1 e 2, foi necessário recorrer a resultados estimados por simulação, que se apresentam a seguir.

5.1.3. Resultados Obtidos por Simulação Numérica

Neste subcapítulo são apresentados valores estimados do peso e da rigidez das 4 estruturas tubulares, sendo que as estruturas 3 e 4 derivam da estrutura 1, tendo sido estudadas apenas por simulação. Foi utilizado o programa de simulação numérica por elementos finitos Abaqus[®] para simular o comportamento das estruturas submetidas a esforços de torção e de flexão, no sentido de se determinar a respetiva rigidez, a partir dos resultados das simulações realizadas de acordo com as condições definidas no subcapítulo 3.2.5. O peso das estruturas foi estimado a partir da modelação CAD 3D, através do programa Solidworks[®].

5.1.3.1. Peso

O peso das estruturas foi estimado através da modelação CAD 3D, ao qual se somou o peso dos respetivos cordões de soldadura e o peso das chapas de alumínio para isolamento do habitáculo (10 kg). De acordo com o exposto, procedeu-se à determinação do peso de todas as estruturas, que se apresenta na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Resumo do peso estimado das estruturas de tubulares.

Estrutura	Modelação CAD 3D (kg)	Peso estimado		Total (kg)
		Cordões de soldadura (kg)	Chapas de isolamento (kg)	
Estrutura 1	78,1	2,1	10	90,2
Estrutura 2	56,5	1,4	10	67,9
Estrutura 3	40,5	1,0	10	51,5
Estrutura 4	35,0	0,9	10	45,9

O peso dos cordões de soldadura foi determinado tendo em conta a diferença de 2,5 kg verificada entre o valor da pesagem da estrutura 1 e o peso estimado através da modelação CAD 3D. Essa diferença corresponde em grande parte ao peso do material de adição nos 176 cordões de soldadura, uma vez que estes não foram considerados na modelação CAD. O peso dos cordões de soldadura para as restantes estruturas foi estimado através do cálculo do volume total dos cordões de cada estrutura e do respetivo peso específico.

5.1.3.2. Simulação de Torção

Procedeu-se à simulação das 4 estruturas nas condições fronteira T_1 e T_2 , T_3 e T_4 , definidas no parágrafo 3.2.5.2 do Capítulo III. A partir dos valores dos deslocamentos obtidos nas simulações efetuadas (Figura 5.2), determinou-se o ângulo de torção e a rigidez torsional de cada uma das estruturas, através das equações 3.1 a 3.3, apresentadas no parágrafo 3.2.4.2 do Capítulo III, cujos resultados se resumem Tabela 5.5.

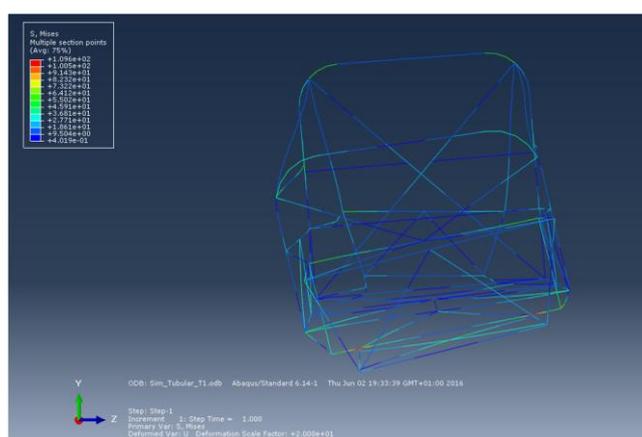


Figura 5.2 Deslocamento do ponto D verificado na simulação da estrutura à torção (T_1) (ampliação 20x).

Tabela 5.5 Resultados das simulações de torção das estruturas tubulares de referência.

Designação do Ensaio	Carga Eq. Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento Ponto D	Angulo Torção	Rigidez estática em Torção
	T (N)	CE _Z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	k _T (N.m/°)
Sim_Ensaio_Tubular_T ₁	2450	0,695	1703	7,02	0,67	2540
Sim_Ensaio_Tubular_T ₂	1033	0,790	816	1,84	0,13	6118
Sim_Ensaio_Tubular_T ₃	1033	0,790	816	8,53	0,62	1319
Sim_Ensaio_Tubular_T ₄	1033	0,790	816	8,54	0,62	1317

5.1.3.3. Simulação de Flexão

Tal como na simulação de torção, procedeu-se à simulação das 4 estruturas nas condições fronteira F₁ e F₂, F₃ e F₄, definidas no parágrafo 3.2.5.3 do Capítulo III. A partir dos valores dos deslocamentos obtidos nas simulações efetuadas (Figura 5.3) determinou-se a rigidez torsional de cada uma das estruturas, através da equação 3.4, apresentada no parágrafo 3.2.4.3 do Capítulo III, cujos resultados se resumem Tabela 5.6.

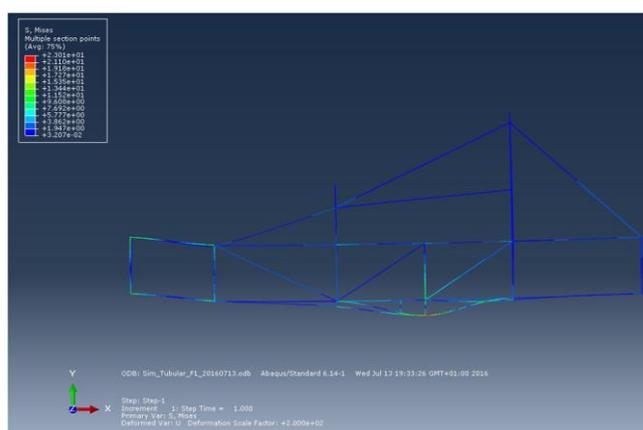


Figura 5.3 Deslocamento do ponto F verificado na simulação da estrutura à flexão (F₁) (ampliação 1000x).

Tabela 5.6 Resultados das simulações de flexão da estrutura tubular de referência.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Deslocamento Ponto F	Rigidez estática em Flexão
	F (N)	Y _F (mm)	k _F (N/mm)
Sim_Ensaio_Tubular F1	779	0,57	1367
Sim_Ensaio_Tubular F2	779	0,43	1811
Sim_Ensaio_Tubular F3	750	0,50	1500
Sim_Ensaio_Tubular F4	750	0,51	1471

5.1.4. Resumo e Discussão dos Resultados

Neste parágrafo apresentam-se os resultados das propriedades mecânicas da estrutura de referência, obtidos de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 3, com vista à definição dos valores objetivo a considerar no estudo da nova estrutura que se pretende fabricar em compósito, descrita no capítulo IV. Na Tabela 5.7 apresentam-se os valores do peso, da rigidez estática em torção e em rigidez à flexão, obtidos através das simulações e dos ensaios realizados às estruturas 1 e 2, bem como os resultados correspondentes às estruturas 3 e 4 obtidos apenas por simulação.

Tabela 5.7 Resumo dos resultados experimentais e resultados de simulação das estruturas tubulares.

Estrutura	Peso (sem/com isolamento)		Rigidez estática Torção		Rigidez estática Flexão	
	Ensaio	CAD 3D (kg)	Ensaio	Simulação (N.m/°)	Ensaio	Simulação (N/mm)
 Estrutura 1	81/91	80/90	2251	2540	771	1367
 Estrutura 2	-	58/68	6271	6118	829	1811
 Estrutura 3	-	42/52	-	1319	-	1500
 Estrutura 4	-	36/46	-	1317	-	1471

Relativamente ao peso, optou-se por apresentar o peso da estrutura tubular com e sem as chapas em alumínio, usadas para o revestimento do habitáculo que deve ser isolado para proteção contra projeção de objetos, de acordo com as recomendações de segurança da FIA. Por outro lado, este isolamento torna a estrutura mais comparável com a estrutura em compósito (fechada). Com base nos resultados obtidos por simulação e através dos ensaios efetuados à estrutura fabricada, apresentados na Tabela 5.7, foram determinados resultados percentuais relativamente aos valores dos ensaios que se podem ler através do gráfico apresentado na Figura 5.4.

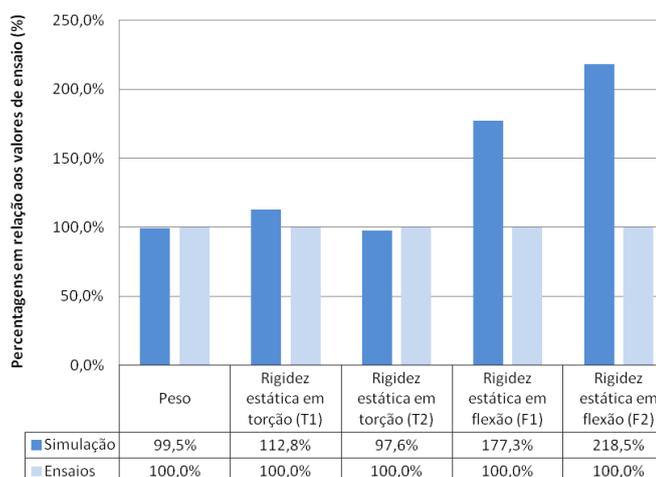


Figura 5.4 Resultados percentuais em relação aos resultados dos ensaios efetuados à estrutura fabricada.

Tal como se pode observar pela Tabela 5.7, o resultado obtido através da modelação CAD 3D é muito próximo do valor obtido da pesagem da estrutura tubular, apresentando uma diferença de apenas 0,5%.

Analisando os valores de rigidez obtidos através de ensaios e por simulação, verifica-se que existem diferenças, sendo estas mais elevadas no caso da flexão. Relativamente à rigidez estática em torção da estrutura 1, o valor obtido por simulação foi de 2540 Nm/º, sendo cerca de 12,8% superior ao valor obtido através do ensaio de torção (2251 Nmm/º).

No caso da estrutura 2 existe uma diferença inferior, tendo sido o valor obtido por simulação de 6118 Nm/º, cerca de 2,4% inferior aos 6271 Nmm/º obtidos através do ensaio de torção.

Relativamente à rigidez estática em flexão as diferenças são significativamente maiores. No caso da estrutura 1, o valor obtido por simulação (1367 N/mm) é cerca de 77% superior ao valor obtido através do ensaio de flexão (771 N/mm).

Na estrutura 2, a diferença de resultados é ainda maior, sendo que o valor obtido por simulação foi de 1811 N/mm, ou seja cerca de 118,5% superior ao valor obtido no ensaio (829 N/mm).

Estas diferenças poderão estar relacionadas com o refinamento da malha, diferenças nas condições fronteira, entre o ensaio e a simulação, e também com eventuais deficiências no fabrico da estrutura.

Para se poder concluir mais concretamente sobre estas diferenças seria necessário efetuar um estudo mais aprofundado em condições de ensaio mais adequadas, para que se pudesse controlar melhor as condições de fixação da estrutura à mesa de ensaio, bem como as condições de aplicação das cargas.

Tendo em conta a configuração geométrica das 4 estruturas estudadas, optou-se por utilizar a estrutura 3 como estrutura de referência, pelo facto de ter uma geometria mais próxima da estrutura do habitáculo que se pretende desenvolver e fabricar em compósito. Sendo esta idêntica à estrutura 4, no entanto, não inclui o arco traseiro, que por uma questão de simplificação se entendeu não incluir na nova estrutura. Tendo em conta esta opção, foram considerados como valores de referência os resultados obtidos por simulação da estrutura 3, que se discutem de seguida.

Relativamente ao peso, tendo em conta que os resultados obtidos através da modelação e da pesagem da estrutura 1 são muito próximos (Tabela 5.7), considera-se que os valores estimados através da modelação são fiáveis. Assim, considerou-se como valor de referência para o peso da estrutura a fabricar 52 kg. No entanto, como um dos objetivos do trabalho se prende com a redução do peso da estrutura mantendo as restantes propriedades estruturais (rigidez torsional e em flexão), optou-se por impor uma redução de peso na ordem dos 12,5%, estabelecendo como valor objetivo 45 kg.

Relativamente à rigidez estática em torção, tendo em conta a diferença de resultados obtidos por simulação e através dos ensaios verificada nas estruturas 1 e 2 (Figura 5.5), que em média é inferior a 10%, considera-se como valor de referência o resultado obtido por simulação da estrutura 3 (1319 N.m/º).

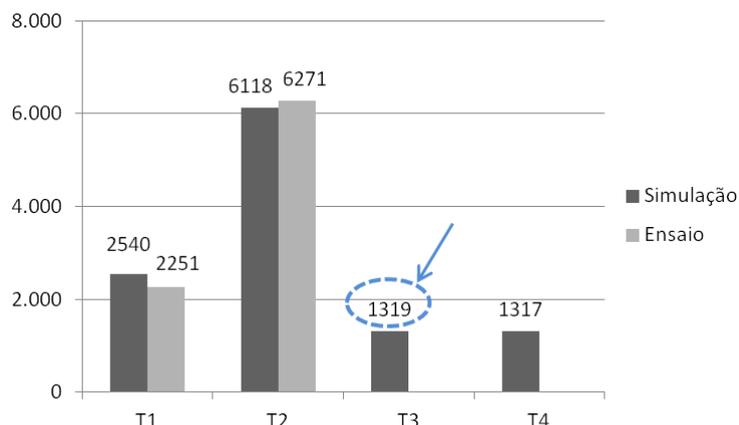


Figura 5.5 Valores da rigidez estática em torção das estruturas tubulares, obtidos por simulação e por ensaios.

Relativamente ao valor da rigidez estática em flexão, como os resultados obtidos por simulações e através dos ensaios apresentaram diferenças significativas, sendo os valores obtidos por simulação sempre superiores aos obtidos nos ensaios, optou-se por corrigir o resultado estimado por simulação, utilizando como referência os valores provenientes dos ensaios da estrutura 1 e 2.

O motivo pelo qual se entendeu fazer tal correção, prende-se com o facto do valor estimado não fazer sentido, uma vez que a rigidez estática em flexão da estrutura 3 não pode ser superior à da estrutura 2, para a qual o valor determinado a partir do ensaio de flexão efetuado foi de 829 N/mm.

Não existindo fisicamente a estrutura 3 para ser ensaiada, e uma vez que não se conseguiu validar o modelo de simulação em flexão, o que requeria um estudo com a utilização de meios de ensaio mais adequados, entendeu-se estimar um valor de rigidez que fosse inferior ao valor de simulação, na mesma proporção que se verificou entre os resultados experimentais e de simulação das estruturas 1 e 2 (ver condições F₁ e F₂ no gráfico da Figura 5.6), nas quais os resultados obtidos através dos ensaios são cerca de 56% e 45% dos resultados obtidos por simulação, respetivamente.

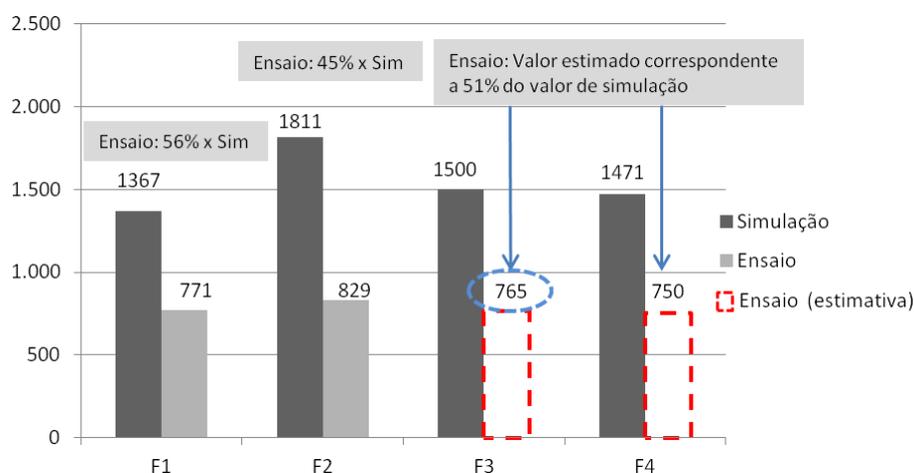


Figura 5.6 Valores da rigidez estática em flexão das estruturas tubulares, obtidos por simulação e ensaios.

Tendo em conta que a diferença média entre os resultados dos ensaios e de simulação de 51%, optou-

se por estimar um valor para a rigidez estática em flexão para a estrutura 3 de 765 N/mm, correspondendo este valor a 51% do valor obtido por simulação (1500 N/mm), tal como se pode observar pela Figura 5.6.

De acordo com a discussão de resultados aqui apresentada, resumem-se na os valores de referência e os valores objetivo a considerar no desenvolvimento da estrutura em compósito.

Tabela 5.8 Resumo das propriedades da estrutura de referência (estrutura 3) e valores objetivo para a estrutura em compósito.

Propriedade	Unidades	Valores de Referência	Valores Objetivo
Peso	kg	52	≤45
Rigidez estática em torção	Nm ^o	1319	≥ 1319
Rigidez estática em flexão	N/mm	765	≥ 765
Custo de fabrico estimado*	€	1370	<1370

*Custo estimado a partir do custo da estrutura fabricada (Estrutura 1).

5.2. Estruturas Sandwich Fabricadas

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados às estruturas *sandwich* fabricadas, para determinação das suas propriedades mecânicas. Com base nesses resultados e em critérios relacionados com a facilidade de processamento, facilidade de reciclagem e preço das matérias-primas, procedeu-se à seleção de uma das *sandwich* com vista ao fabrico de uma estrutura em compósito. Por questões de simplificação foi usada a seguinte codificação nos provetes ensaiados:

Codificação dos provetes: **PX.TEST.PY**

onde:

PX Identificação do número da Placa *Sandwich* produzida;

TEST Identificação do ensaio (Fx3P: Flexão 3 pontos; Fx4P: Flexão 4 pontos; Comp: compressão; Calc: Calcinação; DBar: Dureza Barcol); e

PY Identificação do provete extraído da placa PX.

Por uma questão de simplificação, apresentam-se de seguida somente os resultados correspondentes aos obtidos a partir dos provetes extraídos da placa 1. Para os restantes provetes foi utilizada a mesma abordagem, sendo apresentados e discutidos no final os respetivos resultados. No Anexo I são apresentados todos os resultados e gráficos, obtidos nos ensaios realizados a todos os provetes.

5.2.1. Resultados dos Ensaio de Calcinação

O ensaio de calcinação foi realizado de acordo o exposto no subcapítulo 0. A Tabela 5.9 resume os resultados das pesagens obtidas para os provetes extraídos da placa 1, submetidos ao ensaio de calcinação, bem como os teores de fibras, calculados através da equação 4.1.

Tabela 5.9 Resultados da pesagem do ensaio de calcinação de provetes extraídos da Placa 1.

Provete	Massa inicial do Cadinho m_1 (g)	Massa inicial do Cadinho e Provete m_2 (g)	Massa final do Cadinho e Fibras m_3 (g)	Fração Mássica de Fibras w_f (%)
P1.Calc.P1	24,432	26,205	25,004	32,3
P1.Calc.P2	25,115	26,653	25,732	40,1
Média				36,2
Desvio Padrão				5,5

Para a placa 1 o valor médio da fração mássica de fibras das peles da estrutura sandwich fabricada foi de 0,36. Os valores obtidos para as frações mássicas das restantes placas podem ser consultados na Tabela I-1, no Anexo I-1.

5.2.2. Resultados dos Ensaio de Dureza

Os resultados dos ensaios de Dureza Barcol foram determinados através da média dos valores obtidos nas várias leituras efetuadas na superfície de cada placa fabricada, tendo-se obtido o valor de 43,4 após a cura de 24 horas e de 52,0 após uma pós-cura, realizada colocando os provetes numa mufla a 60 °C durante quatro horas. Como seria de esperar a dureza das peles aumentou com a pós-cura, devido à finalização do processo de cura da resina. Na Tabela I-2 do Anexo I-2 apresentam-se os resultados da dureza Barcol obtidos para todos os provetes ensaiados.

5.2.3. Resultados dos Ensaio de Flexão

5.2.3.1. Ensaio de Flexão em 3 Pontos

Os provetes extraídos das placas sandwich fabricadas foram submetidos a ensaios de flexão em 3 pontos para determinação de algumas propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência das peles e a resistência ao corte do núcleo.

Os ensaios de flexão aos provetes extraídos das placas *sandwich* fabricadas foram realizados de acordo com a norma ASTM C393-00, e de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 4.2.1.4.3.

Na Tabela 5.10 podem ler-se as dimensões dos provetes extraídos da placa 1 para os ensaios de flexão em 3 pontos. As dimensões dos restantes provetes estão compiladas na Tabela I-3.1 do Anexo I-3.

Tabela 5.10 Dimensões dos provetes de flexão em 3 pontos, extraídos da Placa 1.

Provete	Dimensões	
	Espessura (mm)	Largura (mm)
P1.Fx3P.P1	13,1	25,6
P1.Fx3P.P2	13,3	26,8

Os ensaios de flexão foram realizados com uma velocidade de aplicação da carga de 5 mm/min, de modo a que a rotura ocorra entre 3 e 6 minutos. Os provetes foram centrados nos apoios da máquina de ensaios. No ensaio dos provetes da placa 1 a distância entre apoios foi de 240 mm (Figura 5.7).

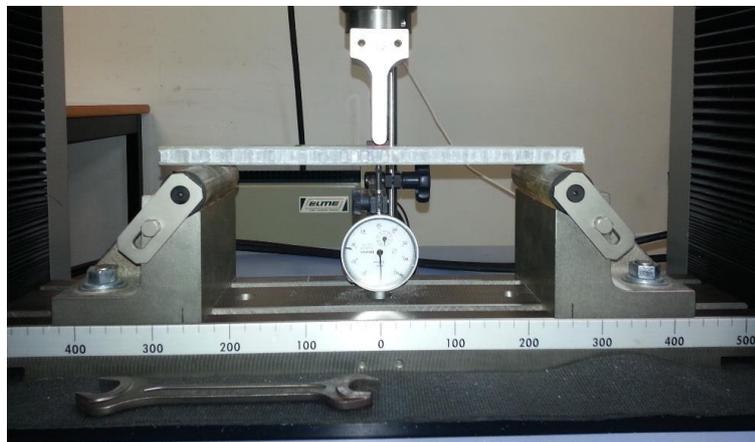


Figura 5.7 Montagem para ensaio de flexão.

Para evitar erros nos valores do deslocamento, devido à acomodação dos roletes em contacto o provete, foi utilizado um comparador colocado a meio vão, por baixo do provete.

Nos ensaios de flexão em 3 pontos foram registados valores da força exercida sobre os provetes, a cada milímetro de aumento da flecha medida através do comparador, tal como se pode observar pela Figura 2.39. Os valores registados nos provetes da Placa 1 estão compilados na Tabela 5.11, sendo os restantes apresentados na Tabela I-4.2 do Anexo I-4.

Tabela 5.11 Valores força vs deslocamento registados nos ensaios de flexão em 3 pontos, para os provetes extraídos da Placa 1.

Deslocamento (Medido com comparador) (mm)	P1.Fx3P.P1 Força (N)	P1.Fx3P.P2 Força (N)
1	47,9	41,1
2	94,0	84,2
3	134,9	124,2
4	169,9	158,9
5	198,8	188,1
6	223,1	212,2
7	244,1	232,2
8	261,6	248,9
9	275,9	262,6

O gráfico da Figura 5.8 mostra as curvas força vs deslocamento compiladas a partir dos valores de força, provenientes da máquina de ensaios de flexão, para cada incremento de deslocamento de 1 mm registados no comparador colocado por baixo dos provetes submetidos a ensaios de flexão em 3 pontos extraídos da placa 1.

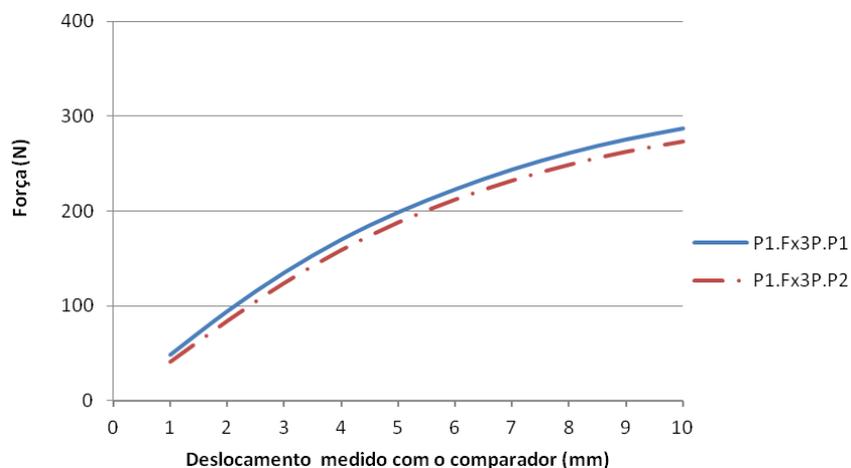


Figura 5.8 Curvas força-deslocamento do ensaio de flexão de 3 pontos dos provetes extraídos da placa 1, para deslocamentos medidos com comparador.

No gráfico da Figura 5.9 podem ver-se as curvas força vs deslocamento, compiladas a partir dos valores registados pela máquina de ensaios, durante todo o ensaio de flexão de 3 pontos dos provetes extraídos da placa 1.

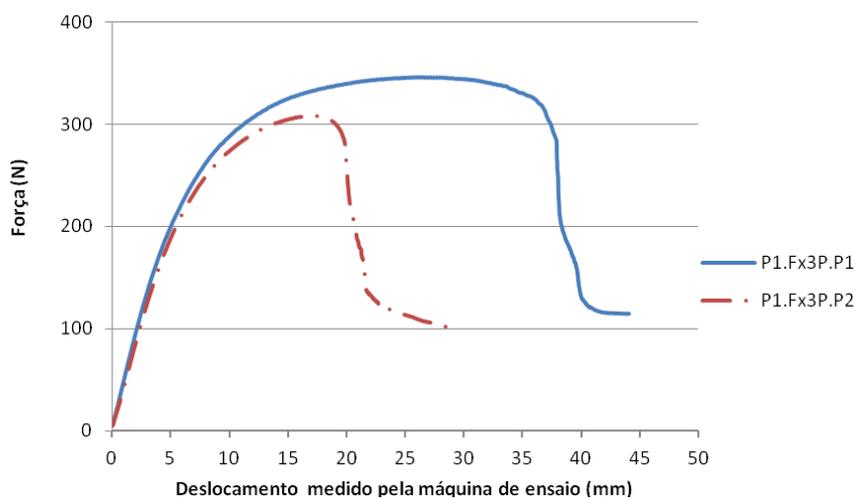


Figura 5.9 Curvas força-deslocamento do ensaio de flexão de 3 pontos dos provetes extraídos da placa 1.

A partir dos resultados de flexão em 3 pontos foram determinados os valores da tensão de corte no núcleo e da tensão de flexão para os dois provetes ensaiados, através das equações 4.3 e 4.5, respetivamente.

Após conveniente tratamento dos dados, obtiveram-se os resultados finais relativos à placa 1, que se apresentam na Tabela 5.12. Na Tabela I-3.2 do Anexo I-3 estão compilados os resultados dos ensaios de flexão de 3 pontos referentes a todos os provetes extraídos de todas as placas fabricadas.

Tabela 5.12 Resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos aos provetes extraídos da Placa 1.

Provete	Força Máxima (N)	Deslocamento para a Força Máxima (mm)	σ (MPa)	τ (MPa)
P1.Fx3P.P1	346	26,6	48	0,58
P1.Fx3P.P2	308	17,0	39	0,49
Média			44	0,54
Desvio Padrão			6,4	0,06

Foi identificado visualmente que nestes dois provetes a rotura ocorreu por descolamento das peles do núcleo, limitando assim a continuação do ensaio e consequentemente os valores da tensão de flexão e da tensão de corte do núcleo que seriam possíveis alcançar se as peles não tivessem descolado.

5.2.3.2. Ensaio de Flexão em 4 Pontos

Os provetes extraídos das placas sandwich fabricadas foram submetidos a ensaios de flexão em 4 pontos para determinação de algumas propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência das peles, a resistência ao corte do núcleo, a rigidez das estruturas sandwich e o módulo de corte do núcleo.

Os ensaios de flexão aos provetes extraídos das placas *sandwich* fabricadas foram realizados de acordo com a norma ASTM C393-00, e de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 4.2.1.4.3.

Na Tabela I-4.1 podem ler-se as dimensões dos provetes extraídos da placa 1 para os ensaios de flexão em 4 pontos. As dimensões dos restantes provetes estão compiladas na Tabela I-4.1 do Anexo I-4.

Tabela 5.13 Dimensões dos provetes de flexão em 4 pontos, extraídos da Placa 1.

Provete	Dimensões	
	Espessura (mm)	Largura (mm)
P1.Fx4P.P3	13,2	26,0
P1.Fx4P.P4	13,2	25,4

Foi utilizada uma distância entre roletes de aplicação da carga de 300 mm, correspondendo ao valor recomendado pela norma. Na Figura 5.10 pode ver-se um provete pronto para ser ensaiado.



Figura 5.10 Posicionamento do provete P1.Fx4P.P1, para a realização do ensaio de flexão de 4 pontos.

Tal como no ensaio de flexão em 3 pontos foram registados os valores da força exercida sobre os provetes, a cada milímetro de aumento da flecha medida através do comparador, sendo estes apresentados na Tabela 5.14. Os valores registados com os restantes provetes estão apresentados na Tabela I-4.2 do Anexo I-4.

Tabela 5.14 Valores da força vs deslocamento registados nos ensaios de flexão em 4 pontos, para os provetes extraídos da Placa 1.

Deslocamento (mm)	P1.Fx4P.P3 Força (N)	P1.Fx4P.P4 Força (N)
1	97,1	92,5
2	166,4	155,5
3	214,6	202,9
4	250,4	239,5
5	277,2	266,2
6	297,7	286,6
7	314,5	302,6
8	328,1	314,0
9	338,4	322,1

O gráfico da Figura 5.11 mostra as curvas força *versus* deslocamento, compiladas a partir dos ensaios de flexão de 4 pontos aos provetes extraídos da placa 1, no qual se podem ler os valores da força para cada incremento de deslocamento de 1 mm, registados no comparador colocado na parte inferior de cada provete.

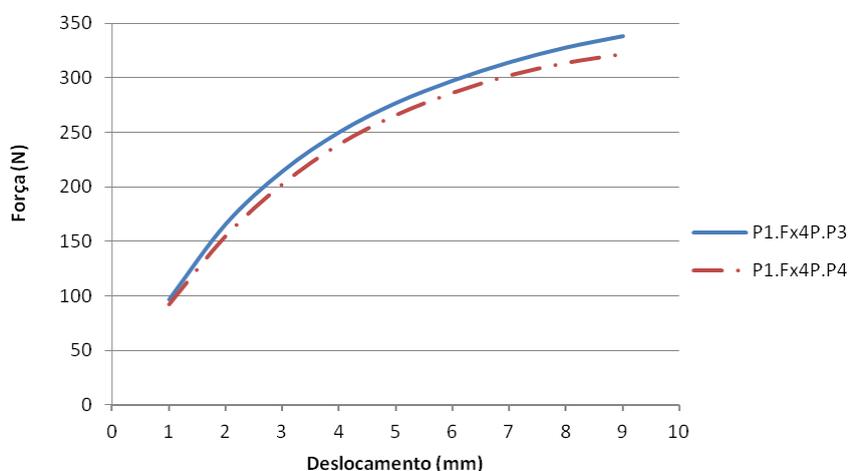


Figura 5.11 Curvas força-deslocamento do ensaio de flexão de 4 pontos dos provetes extraídos da placa 1, para deslocamentos medidos com comparador.

Tal como no ensaio de flexão de 3 pontos, a rotura do provete ocorreu por descolagem das peles do núcleo (Figura 5.12).

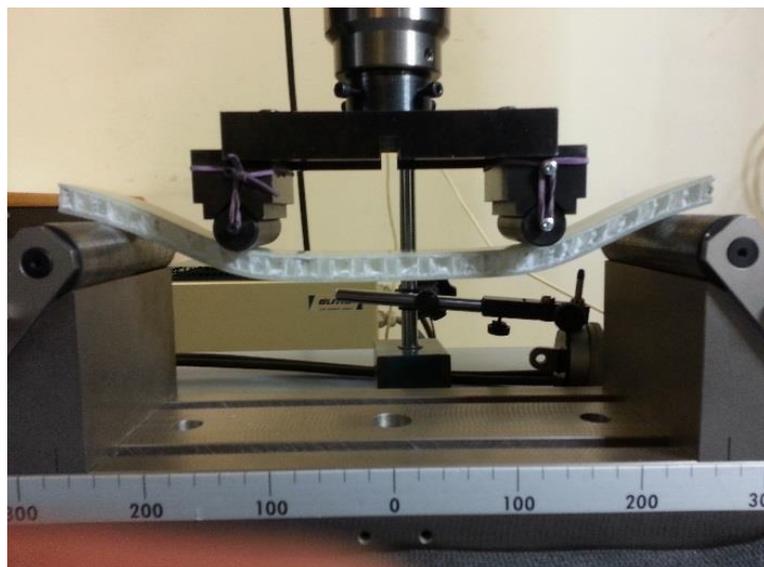


Figura 5.12 Ensaio de flexão em 4 pontos do provete P1.Fx4P.P3.

No gráfico da Figura 5.13 podem ver-se as curvas força *versus* deslocamento, compiladas a partir dos valores registados pela máquina de ensaios, durante todo o ensaio de flexão de 4 pontos dos provetes extraídos da placa 1.

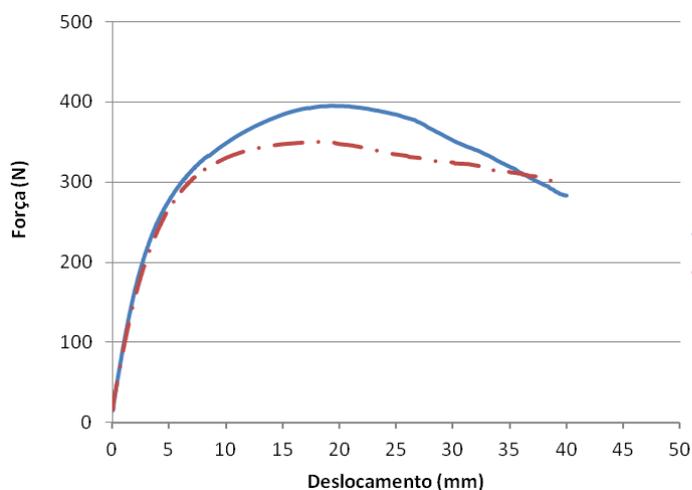


Figura 5.13 Curvas força-deslocamento do ensaio de flexão de 4 pontos dos provetes extraídos da placa 1.

Depois de tratados os dados dos ensaios de flexão em 4 pontos, foram determinados os valores da tensão de corte do núcleo e da resistência à flexão das peles para os dois provetes, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.15. Na Tabela I-4.3 do Anexo I-4 podem ser consultados os resultados dos ensaios de flexão de 4 pontos referentes a todos os provetes extraídos de todas as placas fabricadas.

Tabela 5.15 Resultados dos ensaios de flexão em 4 pontos aos provetes extraídos da Placa 1.

Provete	Força máxima (N)	Deslocamento para a força máxima (mm)	σ (MPa)	τ (MPa)
P1.Fx4P.P3	396	19,2	27	0,65
P1.Fx4P.P4	350	18,1	25	0,59
Média			26	0,62
Desvio Padrão			1,7	0,04

De acordo com a norma ASTM C393-00, é possível determinar a rigidez das estruturas *sandwich* fabricadas, à flexão (D), bem como determinar o módulo de corte do núcleo (G), sem que seja necessário determinar o módulo de elasticidade das peles (E). Para estes cálculos foram utilizados os valores dos deslocamentos, registados com o comparador, no domínio elástico de cada ensaio de flexão. A rigidez à flexão (D) e o módulo de elasticidade transversal do núcleo foram determinados a partir das equações 4.7 e 4.8, respetivamente. Os resultados relativos aos provetes da placa 1 estão compilados na Tabela 5.16. Os resultados relativos aos restantes provetes estão compilados na Tabela I-4.3 e na Tabela I-4.4 no Anexo I-4.

Tabela 5.16 Rigidez à flexão e do módulo de corte do núcleo da placa 1.

Provete	Rigidez à Flexão (D) (N.mm ²)/10 ⁶	Módulo de corte do núcleo (G) (MPa)
P1.Fx4P.P3	13,3	7,6
P1.Fx4P.P4	12,6	6,4
Média	12,9	7,0
Desvio Padrão	0,5	0,9

5.2.4. Resultados do Ensaio de Compressão

Foram realizados ensaios de compressão para determinar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do núcleo, de acordo com a norma ASTM C365-03, e o procedimento descrito no subcapítulo 4.2.1.4.4.

A velocidade de ensaio deve ser tal que a rutura ocorra entre 3 e 6 minutos, tendo sido de 0,35 mm/min no caso dos ensaios dos provetes extraídos da placa 1. As dimensões dos provetes estão compiladas na Tabela I-5.1 do Anexo I-5, tendo sido cortados de acordo com o definido pela norma. Na Tabela 5.17 resumem-se as dimensões dos provetes extraídos da placa 1.

Tabela 5.17 Dimensões dos provetes extraídos da Placa 1, submetidos a ensaio de compressão.

Provete	Dimensões		
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
P1.Comp.P5	67,0	65,2	10,0
P1.Comp.P6	66,0	67,0	10,0

Após os ensaios de compressão verificou-se a rotura do núcleo nos dois provetes (Figura 5.14).



Figura 5.14 Estado final do provete P1.Comp.P5 após o ensaio de compressão.

Após tratamento dos dados dos ensaios, procedeu-se à determinação dos resultados. No gráfico da Figura 5.15 podem ver-se as curvas força versus deslocamento, referentes aos provetes extraídos da placa 1.

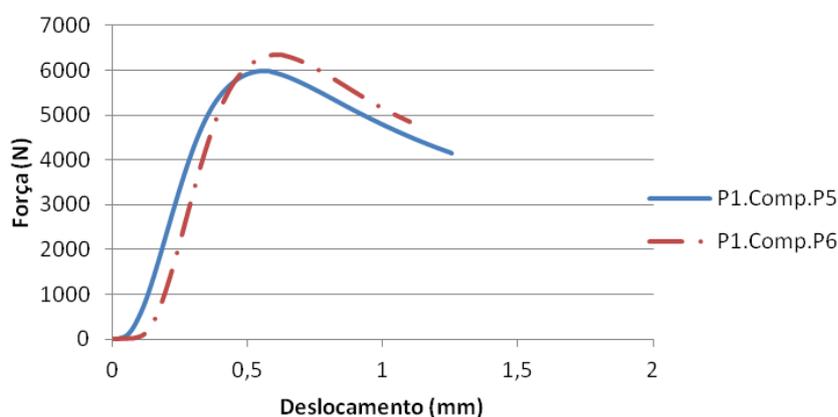


Figura 5.15 Curvas força versus deslocamento, provenientes dos ensaios de compressão aos provetes da placa 1.

De acordo com a norma ASTM C365-03, procedeu à determinação da resistência à compressão do núcleo, através da equação 4.9, e ao módulo de elasticidade à compressão do núcleo, através da equação 4.10.

Na Tabela 5.18 resumem-se os resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão a que foram submetidos os provetes extraídos da placa 1. Os resultados obtidos para os restantes provetes estão compilados na Tabela I-5.2 no Anexo I-5.

Tabela 5.18 Resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão dos provetes extraídos da Placa 1.

Provete	Força Max. (N)	Área (mm ²)	σ (MPa)	S ($\Delta P/\Delta u$) (N/mm)	E (MPa)
P1.Comp.P5	5981	4368	1,37	19943	46
P1.Comp.P6	6347	4422	1,44	21760	49
Média			1,40		47
Desvio Padrão			0,05		2,5

O valor de S foi determinado por aproximação, a partir do declive da zona linear da curva do gráfico força-deslocamento (Figura 5.16), através de uma reta dos mínimos quadrados que aproxima a curva naquela zona, com muito boa correlação (0,9997).

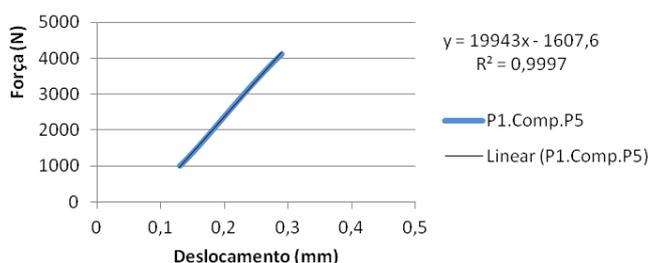


Figura 5.16 Zona linear do gráfico força-deslocamento compilado a partir dos dados provenientes do ensaio de compressão ao provete P1.Comp.P5.

A reta dos mínimos quadrados tem a expressão:

$$y = 19943x - 1607,6 \quad (\text{Eq. 5.1})$$

onde,

x Deslocamento (mm); e

y Força (N).

O valor do coeficiente de “x” na equação dos mínimos quadrados é a estimativa do valor de “S”, em N/mm.

5.2.4.1. Resumo e Discussão dos Resultados

Na Tabela 5.19. encontram-se resumidos os resultados experimentais de todos os ensaios realizados aos provetes extraídos das placas fabricadas em compósito.

Relativamente à rigidez das placas fabricadas (D), para além dos valores determinados a partir dos ensaios de flexão, em 3 e 4 pontos, de acordo com a norma ASTM C393-00, optou-se por estimar a rigidez através da equação 4.12, (subcapítulo 4.3.2.3), admitindo um módulo de elasticidade típico

para as peles em compósito de fibra de vidro e resina poliéster de 8000 MPa. Estes resultados estão compilados na coluna “Estimativa” da Tabela 5.19. Esta opção deve-se ao facto do método de cálculo definido pela norma ser muito sensível ao declive da reta força/deslocamento na zona linear do ensaio, obrigando a fazer algum tratamento de dados, o que torna o método pouco expedito.

Tabela 5.19 Resumo dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados aos provetes em compósito.

	Calcinação wf (%)	Flexão 3 Pontos		Flexão 4 Pontos					Compressão	
		σ (MPa)	τ (MPa)	σ (MPa)	τ (MPa)	D		G (N.mm ²)	σ (MPa)	E (MPa)
						Ensaio (N.mm ²)/10 ⁶	Estimativa (N.mm ²)/10 ⁶			
Placa 1	36,2	43,8	0,5	26,2	0,6	12,9	22,3	7,0	1,4	47,4
Placa 2	47,4	37,6	0,5	28,9	0,8	26,7	53,7	3,5	1,3	41,7
Placa 3	38,4	15,4	0,3	12,6	0,6	85,9	136,8	12,2	0,2	8,5
Placa 4	37,4	22,9	0,2	17,1	0,4	22,3	54,4	0,4	0,3	7,9
Placa 5	50,1	154,5	1,4	108,4	1,6	2,7	1,6	8,1	1,9	73,3
Placa 6	18,0	124,7	1,5	78,1	1,7	3,8	3	8,1	1,9	75,4
Placa 7	45,6	27,1	0,2	24,5	0,2	1,0	4,9	1,9	0,3	10,6
Placa 8	40,9	27,8	0,1	18,6	0,2	27,8	24,2	7,0	0,3	14,6

Verificou-se também existir diferenças significativas entre os resultados obtidos nos ensaios de flexão em 3 e em 4 pontos, no que diz respeito à tensão de flexão das peles (σ) e à tensão de corte do núcleo (τ), que são mais evidentes nas placas de PP/FV (Placas 1 e 2), e nas placas de PVC/FV (Placas 5 e 6), tal como se pode observar pela Figura 5.17 e pela Figura 5.18.

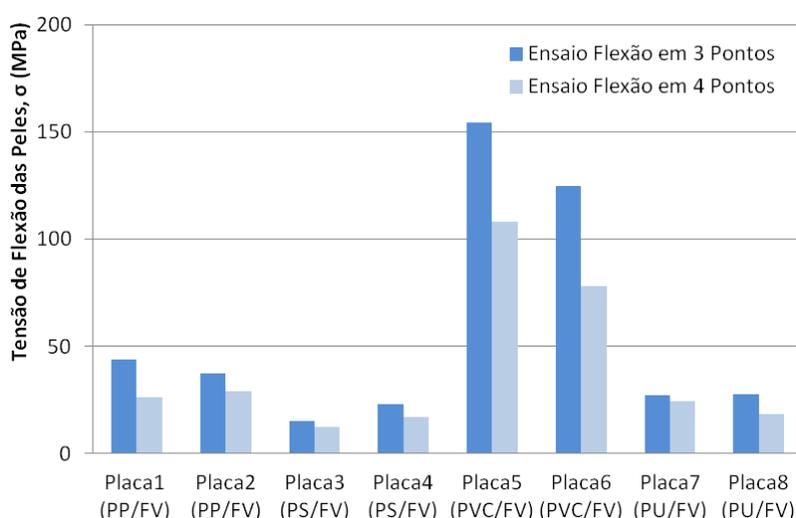


Figura 5.17 Comparação dos resultados da tensão de flexão das peles instalada, obtidos a partir dos ensaios de flexão em 3 e 4 pontos.

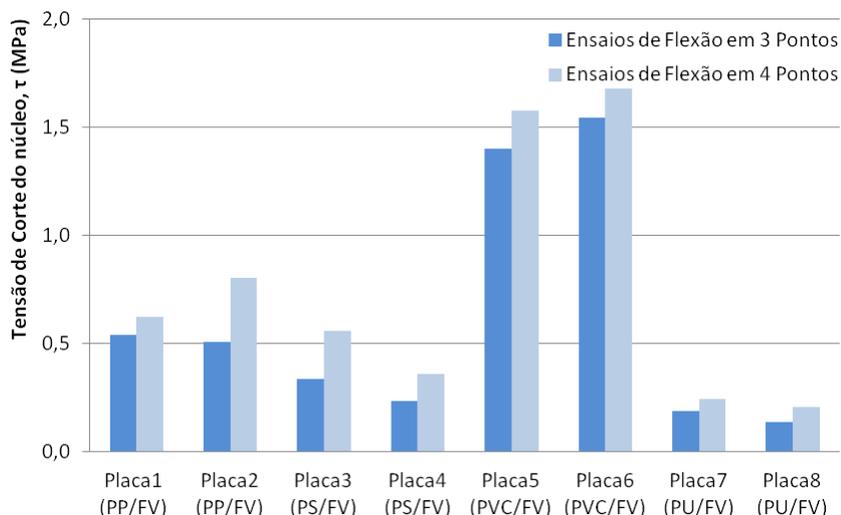


Figura 5.18 Comparação dos resultados da tensão de corte do núcleo, obtidos a partir dos ensaios de flexão em 3 e em 4 pontos.

Tendo em conta que o modo de rotura observado nos provetes foi por descolamento entre as peles e o núcleo, devido ao esforço de corte, e que para uma dada carga esse esforço é igual nos dois tipos de ensaios, é natural que se verifiquem valores de tensão de flexão superiores no ensaio de flexão em 3 pontos, já que o momento fletor máximo, para essa carga, é o dobro do verificado no ensaio de flexão em 4 pontos (Figura 5.17).

No gráfico da Figura 5.18, observam-se diferenças entre as tensões de corte do núcleo nos dois ensaios de flexão, no entanto seria de esperar valor mais próximo entre aqueles ensaios. Essas diferenças podem estar relacionadas com a qualidade da colagem entre o núcleo e as peles nos diferentes provetes.

Em nenhum dos ensaios houve rotura das peles dos provetes, tendo-se verificado pelos resultados da Tabela 5.19 que, à exceção dos provetes de PVC, a tensão instalada é substancialmente inferior a 80 MPa, valor mínimo que um compósito com peles fabricadas por moldação manual, apenas com manta de fibra de vidro, deve resistir (de acordo com a norma BS 4994).

A partir dos resultados apresentados compilou-se a Tabela 5.20 com os critérios para seleção dos materiais, baseados nas principais propriedades mecânicas e em indicadores relacionados com a facilidade de manuseamento/processamento, reciclagem e preço do núcleo das estruturas. No que respeita à tensão de flexão das peles e à tensão de corte do núcleo, considerou-se a média dos resultados obtidos nos ensaios de flexão em 3 e em 4 pontos.

Tabela 5.20 Principais critérios para a seleção dos materiais compósitos.

Placa	Ensaio de Flexão*		Ensaio de Flexão 4 Pontos		Ensaio de Compressão		Peso específico	Man / Proc.	Recic.	Preço / Preço do PP
	σ (MPa)	τ (MPa)	D (Nmm ²)/10 ⁶	G (N.mm ²)	σ (MPa)	E (MPa)	γ (kg/m ³)	(1)	(2)	(3)
Placa 1	35,0	0,6	12,9	7,0	1,4	47,4	65,0	+/+/-	+	1
Placa 2	33,2	0,7	26,7	3,5	1,3	41,7	65,0	+/+/-	+	1
Placa 3	14,0	0,4	85,9	12,2	0,2	8,5	35,0	+/+/-	+-	0,4
Placa 4	20,0	0,3	22,3	0,4	0,3	7,9	35,0	+/+/-	+	0,4
Placa 5	131,4	1,5	2,7	8,1	1,9	73,3	80,0	+/+/-	+	2,2
Placa 6	101,4	1,6	3,8	8,1	1,9	75,4	80,0	+/+/-	+	2,2
Placa 7	25,8	0,2	1,0	1,9	0,3	10,6	40,0	+/+/-	-	0,4
Placa 8	23,2	0,2	27,8	7,0	0,3	14,6	40,0	+/+/-	-	0,4

* Valores médios entre estes resultados obtidos nos ensaios de flexão em 3 e em 4 pontos.

(1) Facilidade de corte/Adaptação à forma do molde/ Aplicação de resina

(2) Reciclagem

(3) Preço indicativo a dividir pelo preço indicativo do PP

Crítérios: Fraco (-)/Médio (+-)/Bom(+)

Tendo em conta a espessuras das placas fabricadas, podem ser comparadas diretamente as de PP (Placas 1 e 2) com as de PU (Placas 7 e 8) e as de PS (Placas 3 e 4), tal como se pode observar pela Tabela 4.1.

Face aos resultados obtidos, resumidos na Tabela 5.20, considera-se que as estruturas com núcleo de PVC apresentam de um modo geral os melhores resultados, nomeadamente em relação à tensão de flexão das peles (σ) e à resistência ao corte do núcleo (τ). As estruturas que apresentam os resultados mais próximos destas são as de PP, sendo que as estruturas com núcleo de PU e com núcleo de PS apresentam os resultados mais baixos.

Uma vez que as equações para a determinação da rigidez à flexão das placas e do módulo de corte do núcleo se revelaram muito sensíveis ao declive da reta força/deslocamento na zona linear dos ensaios de flexão, optou-se, neste caso, por atribuir menos significado a estes resultados.

Tendo em conta o peso específico do núcleo, o ninho de abelha de PP (65 kg/m³) apresenta uma vantagem superior a 20% relativamente à espuma de PVC (80 kg/m³), o que permite obter placas mais leves, comparando placas constituídas por camadas de espessuras similares.

Relativamente à facilidade de processamento todos os núcleos são fáceis de cortar e permitem boa adaptação à geometria do molde, especialmente na moldação de superfícies planas. Relativamente ao processamento as espumas de PP, PVC e PU, apresentam boa compatibilidade com resinas de poliéster insaturado. No entanto, devido à sua porosidade, exigem alguns cuidados durante a moldação

para evitar excessos de resina. O núcleo de poliestireno expandido reage com resinas de poliéster insaturado, obrigando à utilização de resinas mais caras, como por exemplo as resinas de epóxico.

Do ponto de vista da reciclagem, os termoplásticos, em geral, colocam ainda dificuldades ao nível da sua separação, devido às múltiplas combinações de resinas utilizadas no fabrico dos diversos produtos. A reciclagem mais comum é a mecânica, através de processos de trituração, processo em que há conversão do resíduo plástico novamente em grânulos para serem usados no fabrico de outros produtos, compostos somente por um ou por diversos tipos de resina, podendo também ser depositados em aterros sanitários, ou utilizados em misturas betuminosas para melhorar as propriedades de pavimentos. Para além da reciclagem mecânica, podem ser reciclados quimicamente, através de compostos químicos para recuperar as resinas que compõem o resíduo plástico. No entanto, este processo exige uma separação dos resíduos a reciclar mais difícil, pelo que é menos utilizada. No caso das estruturas fabricadas neste trabalho, sendo estratificadas, com núcleos termoplásticos e peles constituídas por resina de poliéster insaturado e fibra de vidro, do ponto de vista da reciclagem não há grandes diferenças entre elas, com exceção do poliuretano utilizado como núcleo das placas 7 e 8, que sendo um termoendurecível, é mais difícil de reciclar.

No que respeita ao preço, os núcleos de poliestireno expandido e espuma de poliuretano são os mais baratos, sendo o núcleo de policloreto de vinilo o mais caro, com um preço por metro cúbico superior em mais do dobro relativamente ao de polipropileno.

Tendo em conta aos resultados obtidos e que em nenhum dos casos se verificou o colapso dos provetes por rotura do núcleo durante os ensaios, sabendo que o preço e o peso específico do núcleo são fatores muito relevantes para se alcançar os objetivos deste trabalho, optou-se por utilizar o ninho de abelha de PP, como núcleo das placas *sandwich*, com peles reforçadas por fibra de vidro, para o fabrico da estrutura em compósito.

Tendo em conta os resultados obtidos na simulação da estrutura em compósito, os valores objetivo definidos e o custo das matérias-primas, optou-se por utilizar um núcleo em ninho de abelha com 50 mm de espessura, no fabrico de todos os painéis da estrutura.

Procedeu-se a ensaios para caracterização das propriedades da *sandwich* a utilizar, de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 4.3.2, cujos resultados se apresentam no Anexo I-3, estando resumidos na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 Resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos realizados à *sandwich* de PP/FV utilizada no fabrico da estrutura em compósito.

Proвете	Tensão de Rotura, σ (MPa)	Tensão de Corte do núcleo, τ (MPa)
P9.Fx3P.P1	34,7	0,2
P9.Fx3P.P2	37,4	0,1
P9.Fx3P.P3	41,0	0,2
P9.Fx3P.P4	33,5	0,1
P9.Fx3P.P5	40,4	0,2
Media	37,4	0,2
Desvio Padrão	3,35	0,01

Relativamente aos provetes extraídos da placa *sandwich* usada no fabrico da estrutura em compósito, verifica-se que a tensão máxima instalada nas peles é inferior a 80 MPa,

Como se pode observar pela Figura 5.19, houve um descolamento da pele superior do núcleo, tendo sido este o modo de rotura observado nos ensaios de todos os provetes, incluindo os de PVC, apesar do valor da tensão instalada nas peles verificada.

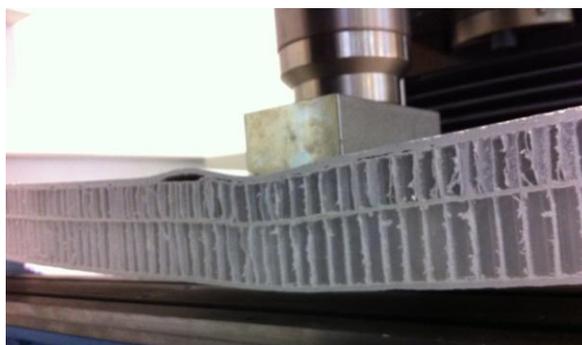


Figura 5.19 Rotura no ensaio de flexão em 3 pontos de um provete da *sandwich* utilizada no fabrico da estrutura E2.I3.2.

5.3. Estrutura de Veículo em Compósito

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos no estudo de simulação, no fabrico e nos ensaios da estrutura E2.I3.2, de acordo com a descrição apresentada no Capítulo IV.

5.3.1. Resultados Obtidos por Simulação Numérica

Para o desenvolvimento desta estrutura em compósito foram utilizados programas de modelação CAD 3D e de simulação numérica. Utilizou-se o Solidworks® para a fazer a modelação 3D da estrutura, bem

como estimar o seu peso. A modelação foi efetuada com o cuidado de garantir a compatibilidade geométrica com o veículo de referência. Foram modeladas 3 estruturas, designadas por E2.I1, E2.I2 e E2.I3 (Figura 5.21), de acordo com o apresentado no subcapítulo 4.3.3.3.

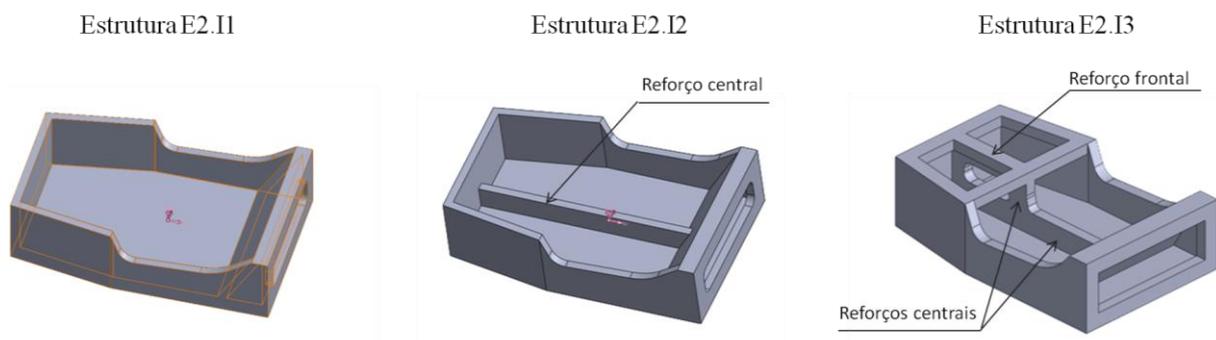


Figura 5.20 Modelação CAD 3D das estruturas em compósito E2.I1, E2.I2 e E2.I3 (Solidworks®).

Depois de modeladas, procedeu-se ao estudo do seu desempenho estrutural, através de simulação numérica, por elementos finitos, efetuada no programa Abaqus®, estimando a rigidez estática em torção e em flexão.

5.3.1.1. Peso

Na Tabela 5.4. resumem-se os pesos das estruturas em compósito apresentadas na Figura 5.20, estimados através da modelação CAD 3D. O peso foi estimado inserindo no modelador de sólidos (Solidworks®) o valor do peso específico da *sandwich* com núcleo em ninho de abelha de PP e peles em resina poliéster reforçadas com fibra de vidro ($0,23 \text{ kg/dm}^3$), determinado de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 4.3.2.1.

Tabela 5.22 Pesos das estruturas em compósito, estimados através da modelação CAD 3D.

Estrutura	Peso estimado Modelação CAD 3D (kg)
E2.I1	38,6
E2.I2	40,6
E2.I3	44,0

5.3.1.2. Simulação de Torção

Para estimar a rigidez estática em torção das estruturas apresentadas, procedeu-se a simulações de torção, de acordo com as condições fronteira definidas no parágrafo 4.3.3.1 do Capítulo IV, cujos resultados se apresentam na Tabela 5.23. Estes resultados foram obtidos tendo em conta os

deslocamentos obtidos nas simulações, para os quais se procedeu à determinação do ângulo de torção e da rigidez torsional através das equações 3.1 a 3.3, apresentadas no subcapítulo 3.2.4.2.

Tabela 5.23 Resultados da simulação de torção das estruturas em compósito estudadas.

Designação Estrutura	Carga Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento Ponto D	Ângulo Torção	Rigidez estática em Torção
	F (N)	CE _Z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	K _T (N.m/°)
E2.I1_T	1000	0,79	790	13,73	1,00	793
E2.I2_T	1000	0,79	790	13,26	0,96	822
E2.I3_T	1000	0,79	790	8,63	0,63	1262

Uma vez que o valor da rigidez torsional da estrutura em compósito, designada por E2.I1 é inferior ao valor objetivo, procedeu-se a iterações geométricas procurando melhorar o comportamento da estrutura até igualar ou ultrapassar o valor objetivo, tendo sido simuladas as estruturas E2.I2 e E2.I3, tal como descrito no subcapítulo 4.3.3.3.

5.3.1.3. Simulação de Flexão

Foram simuladas à flexão as estruturas em compósito apresentadas na Figura 5.20, de acordo com o procedimento definido no subcapítulo 4.3.3.2. A partir dos valores dos deslocamentos obtidos nas simulações (Figura 4.21), procedeu-se à determinação da rigidez estática em flexão, de acordo com a equação 3.4 (subcapítulo 3.2.4.3), cujos resultados se resumem na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 Resultado da simulação de flexão da estrutura E2.I1, E2.I2 e E2.I3.

Designação Estrutura	Carga Aplicada	Deslocamento do Ponto F	Rigidez estática em Flexão
	F (N)	Y _F (mm)	K _F (N/mm)
E2.I1_F	750	0,86	867
E2.I2_F	750	0,47	1594
E2.I3_F	750	0,46	1625

Na Tabela 5.25 encontram-se resumidos os resultados obtidos a partir dos valores estimados nas simulações efetuadas na primeira fase, correspondentes às estruturas designadas por E2.I1, E2.I2 e E2.I3, bem como os valores objetivo, inicialmente definidos a partir do estudo do veículo de referência.

Tabela 5.25 Resumo dos resultados obtidos a partir das simulações das estruturas em compósito, realizadas por elementos finitos.

Propriedades	Unidades	Objetivo	E2.I1	E2.I2	E2.I3
Peso	kg	≤ 45	38,6	40,6	44,6
Rigidez estática em torção	Nm/°	≥ 1319	793	822	1262
Rigidez estática em flexão	N/mm	≥ 765	867	1594	1625

No final do estudo da estrutura E2.I1 verificou-se que a rigidez à torção era inferior ao valor objetivo como se pode observar pela Tabela 5.25, pelo que se passou ao estudo da estrutura E2.I2, que é idêntica à anterior, mas à qual se adicionou reforço central.

Após simulação desta estrutura, verificou-se que a rigidez torsional era ainda inferior à pretendida, tendo a rigidez à flexão aumentado significativamente, como era de esperar, ultrapassando largamente o valor mínimo definido, devido à introdução do reforço longitudinal central. Este aumento deve-se ao aumentar do momento de inércia da secção do plano médio longitudinal.

No sentido de melhorar a rigidez à torção, optou-se por fechar a secção frontal da estrutura (E2.I3), que permitiu obter resultados próximos dos valores objetivo. A partir desta geometria, optou-se por fazer a sua otimização através de iterações geométricas, variando a espessura dos diferentes painéis, no sentido de se procurar aumentar a sua rigidez torsional sem aumentar significativamente o peso da estrutura. Na Tabela 5.26 evidenciam-se as iterações estudadas no estudo de otimização estrutural, indicando variação da espessura das placas da estrutura, bem como os respetivos taos resultados de rigidez obtidos.

Tabela 5.26 Resultados de rigidez estimados por simulação em função da alteração da espessura diferentes painéis da estrutura E2.I3.

Painel da Estrutura	Espessura do núcleo dos painéis em compósito tipo <i>sandwich</i> (mm)							
	E2.I3	E2.I3.1	E2.I3.2	E2.I3.3	E2.I3.4	E2.I3.5	E2.I3.6	E2.I3.7
Painel do fundo	50	50	50	50	50	↗60	↘50	↗60
Painel frontal	50	50	50	50	50	50	↗60	↘40
Painel traseiro	50	50	50	50	50	50	↗60	↘40
Painel lateral	50	50	50	50	↗60	60	↘50	↘40
Painel central	30	30	↗50	↘30	30	30	30	↗40
Painel de topo	20	↗30	↗50	50	50	50	50	↘40
Painel transversal	50	50	50	50	50	50	50	↘40
Rigidez estática em torção (N.m/°)	1262	↗1287	↗1388	↘1325	↗1377	↗1558	↘1346	↗1411
Rigidez estática em flexão (N/mm)	1625	↗1628	↗1653	↘1633	↗1650	↗1783	↘1636	↗1745

Pela análise dos resultados verifica-se a estrutura E2.I3.5 é a que apresenta valores de rigidez superior, no entanto, tal como foi referido no subcapítulo 4.3.3.5, optou-se pelo fabrico da estrutura E2.I3.2, por questões de custo, pelo facto de ser necessário apenas uma espessura de placa de ninho de abelha de PP.

5.3.2. Resultados Obtidos no Fabrico da Estrutura

Na Figura 5.21. apresenta-se a estrutura em compósito, designada por E2.I3.2, fabricada neste trabalho, cuja geometria resultou da modelação CAD 3D e do estudo de simulação numérica anteriormente apresentados.

De acordo com a opção tomada, foram utilizadas placas sandwich com núcleo em de ninho de abelha de PP, com 50 mm de espessura, e peles em resina poliéster reforçadas com fibra de vidro, de acordo com a opção tomada com base nos resultados da otimização estrutural apresentada na Tabela 5.26.



Figura 5.21 Estrutura E2.I3.2 fabricada em compósito.

Depois de fabricada, a estrutura foi submetida a ensaio para determinação do peso e da rigidez estática, em torção e em flexão, tendo-se obtidos os resultados que se apresentam a seguir. Na Tabela 5.27 resume-se o custo total de fabrico da estrutura em compósito.

Tabela 5.27 Resumo do custo de fabrico da estrutura em compósito.

	Custo (€)
Molde (MDF)	170
Núcleo (Ninho de abelha de PP)	246
Laminado (Poliéster insaturado/FV)	448
<i>Gel coat</i>	20
<i>Top coat</i>	20
Consumíveis	30
Mão-de-obra (28h)	175
Custo Total	1109

5.3.3. Resultados Obtidos Através de Ensaios

A estrutura E2.I3.2 fabricada em compósito foi submetida a ensaios para determinação do peso e da rigidez estática, em torção e em flexão. Os ensaios foram efetuados de acordo com as condições definidas no subcapítulo 3.2.4, tal como foi efetuado com a estrutura tubular de referência.

5.3.3.1. Peso

O peso foi obtido por pesagem da estrutura fabricada numa balança industrial, tendo sido registado o valor de 55 kg, sendo de salientar que este valor inclui o *top coat* que é um revestimento para acabamento da superfície.

5.3.3.2. Ensaio de Torção

A estrutura foi submetida a ensaio de torção para determinação da sua rigidez estática em torção, tendo estes sido efetuados de acordo com as condições definidas no parágrafo 4.5.2 do Capítulo IV. Os resultados estão resumidos na Tabela 5.28, tendo sido determinados a partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados, através das equações 3.1 a 3.3, apresentadas no subcapítulo 3.2.4.2.

Tabela 5.28 Resultados experimentais do ensaio de torção - Estrutura E2.I3.2.

Designação do Ensaio	Carga Eq. Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento Ponto D	Angulo Torção	Rigidez estática em Torção
	T (N)	CE _z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	K _T (N.m/°)
E2.I3.2_T	1021	0,815	832	8,61	0,61	1374

5.3.3.3. Ensaio de Flexão

A determinação da rigidez estática em flexão foi feita a partir dos resultados dos ensaios de flexão realizados de acordo com as condições definidas no parágrafo 4.3.3.2 do Capítulo IV, através da equação 3.4, apresentada no subcapítulo 3.2.4.3. Os resultados estão resumidos na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 Resultados experimentais do ensaio de flexão - Estrutura E2.I3.2.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Deslocamento Ponto F	Rigidez estática em Flexão
	F (N)	Y _F (mm)	K _F (N/mm)
Ensaio E2.3.2_F	779	0,91	858

5.3.4. Resumo e Discussão dos Resultados

Tendo em conta os resultados de rigidez e as espessuras das diferentes placas, pode-se concluir que o aumento da espessura do painel de fundo é o que mais influencia os resultados de rigidez, tal como se pode verificar comparando o aumento dos resultados de rigidez, obtidos nas geometrias E2.I3.5 e E2.I3.7, face aos resultados da geometria inicial E2.I3, com o aumento verificado nas restantes geometrias face à geometria inicial.

Comparando agora os resultados obtidos por simulação e através dos ensaios, resumem-se na Tabela 5.30 os valores do peso, rigidez estática, em torção e em flexão, obtidos através das simulações e dos ensaios realizados à estrutura em compósito E2.I3.2.

Tabela 5.30 Resumo dos resultados experimentais versus resultados de simulação para a estrutura em compósito E2.I3.2.

Item	Unidades	Valores de referência	Objetivo	Simulação	Ensaio
Peso	kg	52	≤ 45	44,6	55
Rigidez estática em torção	N.m ^o	1319	≥ 1319	1388	1374
Rigidez estática em flexão	N/mm	765	≥ 765	1653	858
Custo de fabrico	€	1370	≤ 1370	-	1109

Com base nos resultados obtidos, apresentados na Tabela 5.30, apresentam-se no gráfico da Figura 5.22 resultados percentuais relativamente aos valores objetivo definidos.

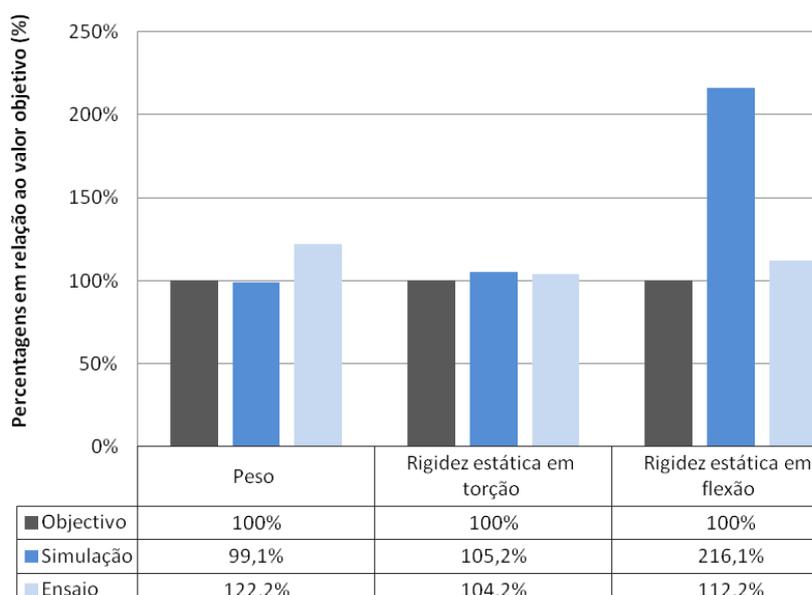


Figura 5.22 Percentagens dos resultados em relação aos valores objetivo definidos.

Relativamente ao peso, verifica-se a estrutura fabricada E2.I3.2 é 10,4 kg (mais 23,3%) mais pesada do que o peso estimado através da modelação CAD 3D, tendo mais 10 kg (mais 22,2%) relativamente ao objetivo definido e mais 3 kg (mais 5,8%) do que a estrutura em aço (estrutura 3), cujo peso foi estimado através da modelação CAD 3D.

Este resultado deve-se a uma impregnação excessiva de resina, durante o processo de moldação por projeção. Este método garante uma boa impregnação das fibras de reforço, mas a quantidade de resina que passa através do tecido da superfície exterior do núcleo para o interior dos favos do ninho de abelha é significativa, principalmente na moldação da pele interior da estrutura.

Uma forma de diminuir o excesso de resina é através da utilização de tecidos pré-impregnados, em vez da impregnação dos tecidos por moldação manual, tal como foi feita. No entanto, como o processamento dos pré-impregnados deve ser feito com uma temperatura de, no mínimo 60 °C (pré-impregnados de baixa temperatura), sob pressão, exercida através de um saco de vácuo, seria necessário utilizar um forno e um molde com maior resistência mecânica e à temperatura.

No caso do processo adotado, para diminuir o excesso de resina durante a moldação das peles, é necessário controlar a projeção da resina, espalhando-a bem e rapidamente sobre a superfície do núcleo, para evitar a sua absorção para o interior dos favos do ninho de abelha.

Por outro lado se a laminação das peles for feita separadamente e assistida por vácuo, é possível controlar o excesso de resina e dessa forma reduzir significativamente o peso da estrutura, nomeadamente da pele que fica voltada para o interior da estrutura, pois é desse lado que se verifica maior absorção de resina para o interior dos favos do ninho de abelha do núcleo (Figura 5.23), uma vez que a projeção de resina é feita diretamente sobre a superfície das placas de ninho de abelha. A pele que é laminada contra o molde, a moldação pode ser feita manualmente, de acordo com o que o foi descrito atrás, no entanto deve haver sempre controlo da quantidade da resina, que deve ser bem espalhada para que não fiquem excessos que possam ser absorvidos pelos favos do núcleo.



Figura 5.23 Excesso de resina na laminação da pele do lado interior da estrutura.

Face ao exposto e ao facto de que o valor obtido através da modelação CAD 3D foi estimado a partir do peso específico dos provetes extraídos da placa *sandwich* idêntica às placas usadas no fabrico da estrutura, admite-se que se a moldação for otimizada, o peso da estrutura possa convergir para os 44,6 kg, que corresponde ao valor estimado através da modelação CAD 3D.

Relativamente à rigidez estática em torção, verifica-se que a estrutura fabricada em compósito E2.I3.2 apresenta uma rigidez de 1374 N.m/º, determinada a partir do resultado do ensaio de torção, superior ao valor objetivo definido (1319 Nm/º), em cerca de 4,2 %. O valor obtido através do ensaio é inferior em cerca de 1%, relativamente ao valor estimado através da simulação numérica (1388 N.m/º).

Para a realização do ensaio de torção, a estrutura foi fixa à mesa de ensaio através dos acessórios fibrados nas extremidades, como se pode observar pela Figura 4.41. Estes acessórios parecem garantir uma ligação adequada, não se verificando, aparentemente, instabilidade (*buckling*) naquela zona de ligação durante os ensaios, principalmente no ensaio de torção. No entanto, para se avaliar corretamente se existe *buckling* seria necessário utilizar extensómetros naquela zona, o que obrigaria a um estudo mais detalhado, saindo fora do âmbito deste trabalho. Contudo, optou-se pelo fabrico e utilização destes acessórios por uma questão de custos, em vez de se utilizarem acessórios de ligação específicos para estruturas *sandwich*, tal como ilustrados na Figura 5.24.

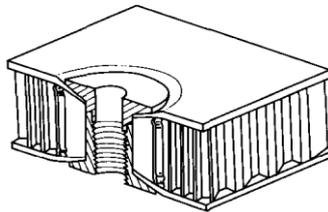


Figura 5.24 Inserto mecânico para estruturas *sandwich* [101]

Para fazer a ligação dos acessórios, houve o cuidado de se fazer a laminação dos acessórios à estrutura abrangendo uma zona alargada em torno dos mesmos, de forma a distribuir os esforços que ocorrem nos ensaios por uma área maior, procurando minimizar assim eventuais efeitos de tensão localizada.

Relativamente à rigidez estática em flexão, a estrutura fabricada apresenta uma rigidez superior (858 N/mm) à que foi definida como objetivo (765 N/mm), em cerca de 12%. No entanto apresenta um valor muito inferior ao estimado por simulação (1653 N/mm).

Uma das razões que pode justificar diferenças de resultados entre o ensaio e a simulação pode estar relacionada com as condições-fronteira, que por vezes são difíceis de controlar nos ensaios, nomeadamente quando os meios de ensaio não são os mais adequados, podendo por isso influenciar diferenças nos resultados. No entanto, neste caso não parece que eventuais diferenças possam justificar tal diferença nos resultados, uma vez que no ensaio de flexão a estrutura é simplesmente apoiada, não havendo grande influência deste tipo de apoio, ao contrário do que acontece por exemplo com um apoio duplo ou um encastramento, com os quais pode existir alguma dificuldade em manter

as condições exatamente iguais entre a simulação e o ensaio.

Outro fator que pode justificar esta diferença pode estar relacionado com uma eventual diferença entre o módulo de elasticidade das peles utilizado na simulação, estimado analiticamente de acordo com o subcapítulo 4.3.2.3, relativamente ao módulo real. Por esta razão, entendeu-se determinar o módulo das peles do compósito, através das equações 4.11 e 4.12, a partir dos valores da flecha obtidos experimentalmente nos ensaios de flexão em 3 pontos realizados aos provetes extraídos da *sandwich* fabricada (Tabela 4.9). Na Tabela 5.31 apresenta-se o módulo teórico das peles, anteriormente estimado (ver Tabela 4.12), bem como o seu valor, agora calculado a partir dos resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos efetuados aos 5 provetes, extraídos da placa *sandwich* idêntica às que foram utilizadas no fabrico da estrutura E2.I3.2.

Tabela 5.31 Módulo de elasticidade das peles da *sandwich* usada no fabrico da estrutura E2.I3.2,

Propriedade	Unidades	Teórico	Ensaio
Módulo das peles, E_f	GPa	8,1	4,5

Verifica-se que as peles apresentam um módulo de 4,5 GPa, ou seja, um valor muito inferior ao valor do módulo estimado que tinha sido considerado na simulação numérica. Essa diferença poderá estar relacionada com dois fatores. Por um lado, pode estar relacionado com eventuais deficiências no fabrico das peles que possam afetar as suas propriedades, diminuindo a resistência a esforços de corte na interface de ligação entre as peles e o núcleo, bem como o módulo de elasticidade. Este efeito é mais notório quanto maior for a carga de ensaio, na zona de comportamento elástico. Por outro lado, como se utilizou um *top coat* no fabrico das peles, as faces exteriores vão ficar com uma camada rica em resina (sem fibras). Nos esforços de flexão, as áreas mais afastadas da fibra neutra contribuem mais para a rigidez da estrutura que as mais próximas, o que no caso da *sandwich* fabricada faz certamente diminuir o valor do módulo de elasticidade real relativamente ao teoricamente previsto.

Esta diferença, justifica que a rigidez da estrutura seja na prática mais baixa do que aquela que foi estimada através da simulação. Tendo em conta este facto procedeu-se novamente à simulação de flexão da estrutura E2.I3.2, no sentido de estimar a sua rigidez estática em flexão.

Tabela 5.32 Comparação dos valores de rigidez estática em flexão da estrutura E2.I3.2, determinado por simulação e ensaios.

Propriedade	Unidades	Ensaio	Simulação	
			Módulo das peles E_f 4,5 GPa (Ensaio)	8,1 GPa (Teórico)
Rigidez estática em flexão	N/mm	858	1042	1653

Como se pode verificar pela Tabela 5.32, o valor da rigidez estática em flexão, estimado por simulação com o módulo das peles determinado a partir dos ensaios, é agora mais congruente com o resultado obtido através dos ensaios realizados, sendo o valor de simulação corrigido (1042 N/mm) superior ao valor do ensaio (858 N/mm), em cerca de 21 %, aproximadamente (Figura 5.25).

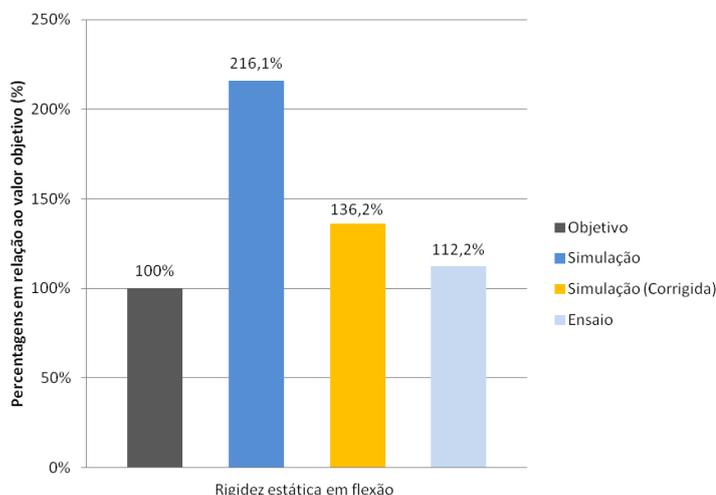


Figura 5.25 Resultados da rigidez estática em flexão corrigidos.

Para melhorar a convergência entre os resultados de simulação e dos ensaios seria necessário realizar um estudo mais focado, procedendo a novos ensaios com condições mais controladas, nomeadamente no que respeita à fixação das estruturas, bem como ao refinamentos da malha no modelo de simulação, validando-os através da comparação com esses resultados experimentais.

5.4. Aplicação da Estrutura Desenvolvida

Tendo sido desenvolvida a partir da estrutura do veículo de referência, nomeadamente das suas características estruturais e geométricas, tal como se pode observar pela Figura 5.26, a estrutura fabricada E2.I3.2 pode ser adaptada aos veículos apresentados na Figura 3.1, apresentada no Capítulo 3, devendo ser otimizada de acordo com os requisitos mais particulares de cada um.

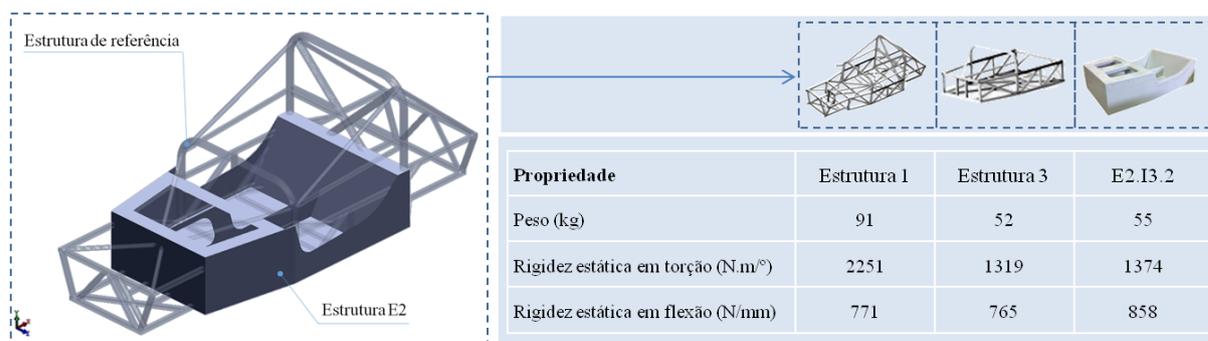


Figura 5.26 Comparação das características da estrutura E2.I3.2 com as estruturas de referência utilizada.

Na Figura 5.27 ilustra-se a compatibilidade geométrica entre a estrutura fabricada e um veículo bi-lugar aberto (Figura 3.1 b).

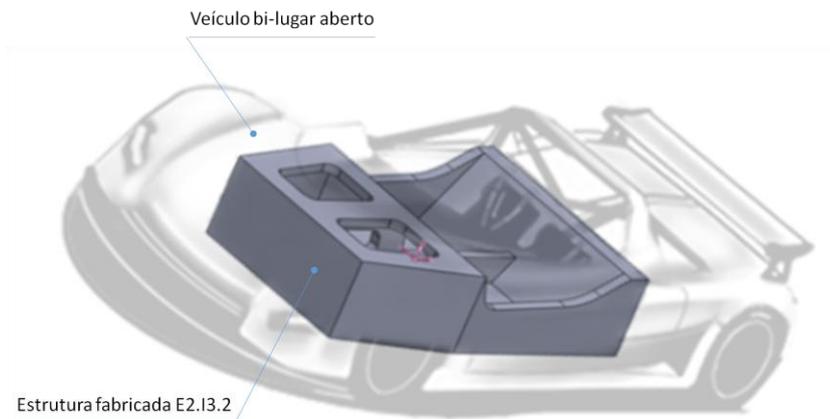


Figura 5.27 Compatibilidade geométrica entre a estrutura E2.I3.2 fabricada e um veículo bi-lugar aberto.

Sendo uma das motivações deste trabalho o estudo de materiais que possam ser utilizados em estruturas de veículo leves e de baixo custo e tendo em conta os resultados obtidos, sugere-se a aplicação da estrutura desenvolvida num veículo citadino leve e compacto, uma vez que esta apresenta características estruturais compatíveis, nomeadamente em termos geométricos e de rigidez.

Na Figura 5.28 apresenta-se o esboço de um veículo citadino compacto com uma estrutura híbrida, composta por uma parte em compósito, idêntica à que foi desenvolvida neste trabalho, combinada com estruturas tubulares, montadas na parte superior, na parte frontal e na parte traseira.

No Anexo IV, apresentam-se os desenhos da modelação deste veículo e respetiva estrutura baseada na estrutura desenvolvida em compósito neste trabalho.



Figura 5.28 Esboço de um veículo citadino compacto leve e de baixo custo.

CAPÍTULO VI

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este estudo divide-se em duas partes. A primeira incidiu sobre o estado-da-arte, com a qual se pretendeu caracterizar a mobilidade e o seu impacto nos transportes, no sector energético e no ambiente. Para além disso, pretendeu-se identificar novos desafios para o futuro da mobilidade sustentável, oportunidades para a indústria automóvel, em particular no domínio dos materiais e das tecnologias que possam dar um contributo para se encontrarem novas soluções para a mobilidade, com particular interesse no que toca ao fabrico de veículos mais leves e menos agressivos para o ambiente.

Na segunda parte estudou-se a aplicação de materiais leves no fabrico de uma estrutura compatível com um automóvel, com a qual se pretendeu perceber se a aplicação de materiais compósitos do tipo *sandwich* podem ser uma alternativa viável para estruturas de automóveis, nomeadamente de automóveis citadinos mais leves.

Relativamente à primeira parte, pode dizer-se que o desenvolvimento das sociedades leva por si só à alteração permanente das necessidades de mobilidade dos cidadãos, cujas soluções de oferta não têm sido adequadamente harmonizadas na maior parte dos países desenvolvidos, uma vez que se assiste cada vez mais ao agravamento das suas condições. De facto, as redes de transportes coletivos, as infraestruturas, o desenvolvimento das cidades e, fundamentalmente, os hábitos adquiridos pelos cidadãos, não se adaptaram às novas exigências das sociedades, revelando uma desarticulação que não favorece o eficiente funcionamento das redes de transportes.

Analisando um pouco mais de perto a eficiência dos veículos de passageiros por exemplo, constata-se que o peso dos veículos tem vindo a aumentar de uma forma generalizada. Esta tendência resulta, em parte, da utilização de soluções e equipamentos que visam o aumento da segurança e do conforto dos veículos. Por outro lado, assiste-se a uma escolha e utilização dos veículos de passageiros muito pouco eficiente.

Falta percorrer um longo caminho para a rotura com o atual paradigma de mobilidade, sendo visível que o novo paradigma assenta nos veículos elétricos e em veículos adaptáveis a vários tipos de combustíveis, acompanhando, naturalmente, a evolução do paradigma energético [21].

Não obstante todos os avanços tecnológicos é necessária uma alteração de mentalidades, pois a tecnologia não produzirá os efeitos desejados no sector dos transportes, se os seus utilizadores não a utilizarem de forma racional. Como tal, é necessário o envolvimento de todos, do poder político, da indústria, dos utilizadores, entre outros.

Do ponto de vista da indústria reveste-se de grande importância a dificuldade de dimensionamento de componentes para automóveis em materiais avançados, devido à natureza destes materiais. A complexidade de análise deste tipo de materiais leva à morosidade e dificuldade de todo o processo de dimensionamento, bem como à existência de variados critérios de dimensionamento, sem que haja uma uniformização de procedimentos, o que também conduz à falta de confiança para a escolha destes materiais.

Em face do estudo apresentado, bem como das pesquisas que foram efetuadas, conclui-se que:

- i. A mobilidade dos passageiros tem vindo a crescer nos últimos anos em todo o mundo. No entanto, as suas condições têm vindo a agravar-se significativamente nos últimos anos. Além do mais, prevê-se um aumento da população urbana no futuro, o que agravará ainda mais o problema.
- ii. O transporte de passageiros e de mercadorias na Europa é feito maioritariamente em veículos de passageiros e de mercadorias, respetivamente, partilhando as mesmas infraestruturas.
- iii. Em termos das principais necessidades de mobilidade na maioria dos países europeus, os dados disponíveis indicam que, em média cada passageiro viaja 3 vezes por dia, percorrendo uma distância entre 30 e 40 km, durante cerca de, aproximadamente, uma hora. As viagens são efetuadas com finalidades diferentes, no entanto, as principais deslocações são por motivos profissionais e de lazer, sendo as primeiras mais regulares.
- iv. A taxa de ocupação dos veículos de passageiros tem vindo a decrescer, sendo que em 2004, o valor médio era de aproximadamente 1,6 passageiros por veículo, o que significa que uma boa parte dos automóveis de passageiros transportam apenas o condutor.
- v. O transporte rodoviário é o principal responsável pelas emissões de gases com efeito estufa do sector dos transportes, sendo uma das principais fontes de emissão de gases poluentes, nas áreas urbanas, prejudiciais à saúde humana.
- vi. Apesar das convulsões que o sector automóvel está a atravessar, existem duas tendências em consolidação: o veículo será cada vez mais de menor dimensão e o consumo de combustíveis cada vez mais reduzido. No entanto, a afirmação de novos tipos de veículos depende de três incertezas: a aceitação pública, alteração dos padrões de comportamento e das orientações da política económica.
- vii. A indústria automóvel continuará a apostar na melhoria dos sistemas de segurança, na redução dos efeitos nocivos para o ambiente; haverá uma utilização cada vez maior das tecnologias de informação e de comunicação tanto no fabrico dos veículos como na gestão do tráfego.
- viii. Os veículos automóveis irão manter-se como meio de transporte privilegiado para o futuro embora, haja uma tendência para aumentar significativamente o congestionamento e as emissões

de gases com efeitos de estufa. A tecnologia e o *design* serão cada vez mais sofisticados.

No que diz respeito aos materiais utilizados pela indústria automóvel, em particular às exigências e às dificuldades tecnológicas, bem como aos novos desafios, conclui-se que:

- ix. A incorporação de polímeros e de materiais compósitos nos automóveis tem vindo a aumentar contribuindo para a redução do seu peso. No entanto, o seu nível de desenvolvimento ainda é inferior ao das tecnologias convencionais, nomeadamente no fabrico de componentes estruturais.
- x. Uma das limitações principais da utilização de componentes leves em plástico reforçado com fibras é o custo. Os processos de fabrico não são tipicamente dispendiosos e os processos que exigem molde também podem ser viáveis, especialmente para pequenas séries de fabrico, mas as matérias-primas encarecem os componentes no caso dos CFRP, o que limita a sua utilização a aplicações muito específicas. No entanto, a atenção dada a este tipo de materiais e tecnologias começa já a alterar este cenário.
- xi. Os materiais compósitos de matriz termoplástica, reforçados com fibras, para aplicação em componentes estruturais tem vindo a desenvolver-se nos últimos anos, devendo o seu desenvolvimento continuar no futuro, uma vez que estes apresentam vantagens ecológicas.

Pelo que foi referido atrás, parece evidente ser fundamental uma harmonização das redes de transportes, nomeadamente nas zonas urbanas, bem como uma mudança de atitude por partes dos cidadãos na sua utilização. Por outro lado, parece justificar-se o desenvolvimento de novas soluções de mobilidade, nomeadamente, de veículos mais pequenos, mais leves e mais eficientes, capazes de se adaptarem melhor à mobilidade nas cidades.

Apesar das limitações, existem tecnologias e materiais que devem ser otimizados e utilizados no fabrico de automóveis mais eficientes, ecológicos e mais baratos.

Relativamente à segunda parte, pretendeu-se caracterizar alguns materiais compósitos do tipo *sandwich*, bem como estudar uma estrutura leve, fabricada em material compósito, que pudesse servir de estrutura principal para um veículo cidadão compacto. Para a concretização desse estudo optou-se por utilizar como referência um veículo já desenvolvido, pelo que foi necessário fabricar e ensaiar uma réplica da sua estrutura, com o objetivo de determinar características de referência para o estudo da estrutura a fabricar em material compósito.

A seleção dos materiais compósitos a utilizar no fabrico da estrutura teve por base alguns critérios e as propriedades mecânicas de materiais, pelo que se optou por fabricar várias estruturas em compósito do tipo *sandwich*, com diferentes núcleos. Foram selecionados núcleos de ninho de abelha de PP, bem como espumas de PVC e PU e XPS. Para o fabrico das peles das estruturas em compósito, selecionou-se a fibra de vidro (reforço) como matéria-prima, por ser um material com uma boa relação desempenho/custo, e por ser de fácil manuseamento, e a resina de poliéster insaturado (matriz), por

apresentar excelentes propriedades mecânicas e um custo relativamente baixo.

Procedeu-se a ensaios das estruturas fabricadas para determinação das suas propriedades mecânicas. Selecionou-se o compósito a utilizar no estudo e fabrico da estrutura. Efetuou-se o desenho de uma estrutura compatível com a do veículo de referência, que foi posteriormente submetida a um estudo de simulação numérica para otimização estrutural. Finalmente, procedeu-se ao seu fabrico e a ensaios para verificação das suas propriedades mecânicas. No final compilaram-se os resultados e tiram-se as principais conclusões resultantes do estudo efetuado, que a seguir se apresentam separadamente por áreas de estudo.

Relativamente à modelação CAD efetuada em Solidworks®:

- xii. A modelação CAD 3D permitiu reduzir significativamente o tempo de fabrico da estrutura, uma vez que permitiu exportar (em formato STEP) os desenhos de todos os tubos da estrutura tubular para o processo de corte por laser, evitando assim processos de maquinagem para o corte dos tubos, com os respetivos ângulos e raios de concordância, que para além de equipamento e ferramentas necessárias, são processos demorado.
- xiii. Permitiu estimar o peso da estrutura tubular com erro inferior a 0,5%, o que constitui uma ferramenta muito boa neste tipo de estudo. Relativamente à estrutura em compósito, os resultados já não foram tão bons. No entanto, isso não se deve a erros provenientes da modelação CAD, mas sim a excesso de resina na moldação da estrutura, o que faz que o peso final seja superior ao estimado em CAD.
- xiv. Permite reduzir os tempos na fase de projeto, uma vez que permite fazer de uma forma fácil e rápida a exportação das geometrias para os programas de simulação numérica, facilitando a iteração CAD/CAE. As geometrias das estruturas E2, foram desenhadas em Solidworks® em formato de cascas e exportadas em formato STEP para o programa de simulação Abaqus®, no qual foram posteriormente sujeitas a tratamento e simuladas à torção e flexão.

Relativamente à simulação por elementos finitos efetuada no programa Abaqus®:

- xv. Para simulação da estrutura tubular de referência, foi utilizado um modelo de simulação com elementos cúbicos de viga, designados pelo programa Abaqus® como B33, uma vez que apresentam maior precisão de resultados comparativamente aos elementos de grau inferior, como sejam os elementos lineares ou os quadráticos. Os resultados das simulações de torção da estrutura, apresentam uma boa correlação com os resultados experimentais obtidos. No entanto, os resultados obtidos na simulação da flexão da estrutura tubular, apresentam desvios significativos face aos valores obtidos experimentalmente, necessitando por isso, de mais ensaios com outros meios, mais adequados, para se conseguir validar um modelo de simulação.
- xvi. Para simulação da estrutura em compósito, foi utilizado um modelo de cascas com elementos de

quatro nós de integração reduzida, designados pelo programa Abaqus® por S4R, com propriedades de compósito, considerando propriedades elásticas para as peles e para o núcleo, como aproximação do comportamento isotrópico do material. Os resultados apresentam desvios face aos resultados experimentais até aos dos 21%. No entanto, tal como no caso do modelo usado para simular a estrutura tubular, será necessário um estudo mais específico para refinar o modelo.

- xvii. O tamanho dos elementos de malha que se define para simulação tem relevância ao nível dos resultados, quer em termos de “precisão” dos resultados quer em termos do tempo de computação, sendo que estes variam na proporção inversa com o tamanho dos elementos da malha, pelo que é importante definir bem este parâmetro em função do grau de importância dos resultados.
- xviii. Tendo em conta a geometria da estrutura em compósito desenvolvida, e os resultados de simulação verificados no estudo da sua otimização, no qual se analisaram diferentes espessuras dos painéis, verificou-se que a espessura do painel inferior foi a iteração que mais contribuiu para a rigidez final da estrutura.

Relativamente ao fabrico da estrutura tubular:

- xix. O corte por laser dos tubos de aço para o fabrico da estrutura tubular permitiu aumentar a qualidade dimensional e geométrica da estrutura, porque é mais preciso do que os processo de corte tradicional, melhorando o seu desempenho estrutural.
- xx. O corte laser permitiu aumentar a qualidade da soldadura e o desempenho da estrutura, uma vez que o corte dos tubos é mais preciso, reduzindo a folga entre os tubos na zona do cordão de soldadura, permitindo assim obter cordões mais uniformes e com menor quantidade de material de adição, permitindo por sua vez melhorar as propriedades da estrutura.
- xxi. O corte laser permite reduzir os custos de produção final, uma vez que permite simplificar e diminuir o tempo das fases e dos processos de fabrico, nomeadamente no corte dos tubos, no seu posicionamento no *gabari* e na soldadura da estrutura.
- xxii. A utilização do *gabari* para soldadura da estrutura tubular fabricado, permitiu reduzir significativamente o tempo de posicionamento do tubos, comparativamente com o processo utilizado no fabrico da estrutura original do veículo de referência. Com este *gabari* é possível posicionar todos os tubos da estrutura, em aproximadamente 5 minutos, o que permite reduzir os custos de fabrico. Para além disso permite efetuar a soldadura de forma a evitar empenhos na estrutura, devido aos batentes guia que impedem deslocamentos dos tubos.
- xxiii. O processo de soldadura TIG permite obter cordões de soldadura mais finos. No entanto, requer mais habilidade do soldador e mais tempo de execução, o que encarece o produto final.

Relativamente ao fabrico da estrutura em compósito E2.I3.2:

- xxiv. A moldação da estrutura em compósito é um processo que deve ser otimizado no que respeita à deposição de resina, para se evitar excesso de resina na estrutura que em nada contribui para o seu desempenho, apenas faz aumentar o seu peso final;
- xxv. A utilização de acessórios de ligação nas estruturas em compósito deve ser controlada, nomeadamente se esses acessórios transmitirem esforço à estrutura, podendo provocar colapso na zona da ligação. Nesses casos devem ser usados acessórios para materiais compósitos do tipo *sandwich*;
- xxvi. É possível o fabrico de estruturas em compósito do tipo *sandwich* com núcleo em ninho de abelha e peles reforçadas com fibra de vidro, com características compatíveis com os requisitos para veículos citadinos, nomeadamente no que respeita ao peso e à rigidez torsional. No entanto, é um tema que deve ser desenvolvido.

Relativamente aos ensaios efetuados às placas *sandwich* e às estruturas:

- xxvii. A determinação da rigidez e do módulo de corte do núcleo das placas *sandwich* fabricadas, através dos ensaios de flexão em 3 e 4 pontos, requer bastante tratamento de dados, uma vez que a determinação dos resultados é muito sensível à zona selecionada para determinar o declive das curvas força/deslocamento. Por essa razão é um procedimento pouco expedito, e com resultados que podem estar influenciados pela zona inicial do gráfico escolhida para aproximar o declive.
- xxviii. Para a realização de ensaios de torção e de flexão a estruturas como a estrutura tubular e a estrutura em compósito E2.I3.2 ensaiadas neste estudo, é necessário a utilização de meios mais adequados, como por exemplo uma mesa de fixação, de preferência graduada e com dispositivos para aplicação de cargas, que permita efetuar ensaios em condições mais controladas, evitando assim a introdução de variáveis que possam distorcer os resultados experimentais.

Relativamente aos objetivos deste trabalho:

- xxix. Apesar do peso da estrutura fabricada em compósito ser superior ao valor objetivo definido, esse facto deve-se essencialmente ao excesso de resina projetada no processo de moldação. Se a projeção de resina for otimizada é possível reduzir o peso da estrutura para valores próximos ou até inferiores ao valor objetivo, permitindo fabricar estruturas com peso inferior ao de uma estrutura tubular em aço, com a mesma rigidez estática em torção e em flexão.
- xxx. É possível fabricar estruturas híbridas, compostas por uma estrutura central principal em compósito reforçado com fibra de vidro e estruturas tubulares, com características compatíveis com diferentes tipos de veículos, tal como inicialmente pensado, justificando assim o estudo e desenvolvimento de soluções deste tipo, principalmente para produção de pequenas séries.
- xxxi. É possível fabricar estruturas em compósito com um custo controlado, utilizando a moldação

manual e materiais de baixo custo, como a fibra de vidro e resina de poliéster insaturado. Esta tecnologia permite o fabrico de estruturas com custos que podem ser inferiores aos custos de fabrico de estruturas tubulares com características idênticas, nomeadamente na produção de pequenas séries, uma vez que o processo de soldadura é, tipicamente, mais lento e tem um custo de mão-de-obra associado mais elevado.

6.1. Sugestão de Trabalhos Futuros

Para eventual trabalho futuro, sugere-se que se venham a efetuar os seguintes estudos:

- I. Estudar o comportamento dinâmico da estrutura fabricada.
- II. Estudo de outras estruturas em compósito com o núcleo idêntico, em ninho de abelha de polipropileno (PP), mas com peles reforçadas com fibra de carbono (FC), comparando o desempenho/custo;
- III. Estudo de uma estrutura híbrida, composta por uma estrutura em compósito similar, em PP/FV ou PP/FC, combinada com uma estrutura tubular superior (*rollbar*), em aço e em carbono;
- IV. Estudo de uma estrutura tubular, composta por tubos de fibra de carbono/epóxico;
- V. Estudo de uma estrutura em *sandwich*, composta por um núcleo em espuma PU ou de PVC reforçado com perfis de alumínio, e peles reforçadas com fibras.
- VI. Estudo de ligações entre estruturas tubulares em aço e em compósito e painéis *sandwich*;
- VII. Estudo de ligações entre tubos em fibra de carbono;
- VIII. Estudo de soluções de ligação entre painéis *sandwich*, reforçados com fibras, e acessórios metálicos para fixação de painéis exteriores de carroçaria;
- IX. Aplicação de estrutura em Compósito a um Veículo Cidadino compacto, de acordo com as especificações identificadas nos desenhos no Anexo IV.

REFERÊNCIAS

- 1 Susana Costa Escária, *As Novas Exigências da Mobilidade Urbana e as Respostas Tecnológicas do Sector Automóvel*, 2009.
- 2 MVV Consulting: Tractebel Development Engineering, *Report on Urban Transport in Europe Prepared for the European Commission*, September 2007, pp. 6.
- 3 Jean-Paul R., Claude C., Brian S., *The Geography of Transport Systems*, ISBN: 978-0-415-48324-7, 2009.
- 4 Oliver Wyman, *2015 Car Innovation: A comprehensive Study on Innovation in the Automotive Industry*, 2007.
- 5 Luis Antonio de la Fuente Layos, *Eurostat, Transport 87*, 2007.
- 6 *Panorama of Transport, 2009 edition*, Eurostat, ISSN 1831-3280, 2009, pp. 7-28, 40-58, 102, 154-171.
- 7 *Attitudes on issues related to EU Transport Policy, Analytical report, Flash Eurobarometer 206b*, The Gallup Organization, 2007. Disponível em: http://ec.europa.eu/public_opinion/flash/fl_206b_en.pdf, consultado em Maio de 2010.
- 8 European Environment Agency, *TERM 2005/29 - Occupancy rates in passenger transport*, 2005.
- 9 *Panorama of Transport, 2007 edition*, Eurostat, ISBN 978-92-79-04618-6, 2007.
- 10 *TEN-STAC: Scenarios, traffic forecasts and analysis of corridors on the Trans-European Network, D6 Deliverables Part I & II*, 2004.
- 11 *European Energy and Transport - Trends to 2030 – Update 2007* Directorate-General for Energy and Transport, 2008.
- 12 Brian Cantor, Patrick Grant, Colin Johnston, *Automotive Engineering Lightweight, Functional, and Novel Materials*, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-7503-1001-7, 2008, pp. 1-14, 20, 22, 29.
- 13 *Vehicle Certification Agency*, May 2010, disponível em www.vca.gov.uk, consultado em Junho de 2010.
- 14 <http://www.gasmed.org/Inspeções/MonóxidoCarbono/tabid/94/language/en-US/Default.aspx>, consultado em Outubro de 2010.
- 15 José Dias Leite, *A Poluição e os Sistemas Anti-Poluição*, Apontamentos da disciplina Motores de Combustão Interna, ISEP, 2003.
- 16 <http://www.SustainableMobility.org>, consultado em Junho de 2010.
- 17 <http://drivingsustainability.com/sustainable-mobility>, consultado em Junho de 2010.
- 18 <http://www.eucar.be/mobility-and-transport>, consultado em Junho de 2010.
- 19 A.T. KEARNEY, INC, *Auto 2020 - Passenger Cars, Expert Perspective*, 2009, pp. 4, 5.
- 20 <http://www.segway.com/puma>, consultado em Julho de 2010
- 21 Susana Costa Escária, *O Sector Automóvel e as Novas Formas de Motorização*, daSphera, 2009, pp. 51.
- 22 <http://cities.media.mit.edu/projects/citycar.html>, consultado em Dezembro de 2010.
- 23 <http://www.pininfarina.com/index/storiaModelli/ultimi/Nido-EV.html>, consultado em Janeiro de 2011.

- 24 <http://www.peogeot.pt>, consultado em Janeiro de 2011.
- 25 Automotive Engineer, May 2009, pp. 24-29.
- 26 <http://www.gordonmurraydesign.com>, consultado em Janeiro de 2011.
- 27 <http://www.renault-ze.com/gama-z.e./twizy-1240.html>, consultado em Maio de 2010.
- 28 <http://www.segway.com>, consultado em Novembro de 2010
- 29 <http://www.psfk.com/2010/04/vw-debuts-a-car-compatible-folding-electric-bike.html>, consultado em Julho de 2010.
- 30 <http://www.gordonmurraydesign.com>, consultado em Setembro de 2016.
- 31 Geoff Davies, Materials for Automobile Bodies, ISBN 0 7506 5692 1, Elsevier Ltd., 2003, pp. 1-7,12, 26, 58, 89, 66, 90-96.
- 32 Ludke, B., 'Functional Design of a Lightweight Body-in-White. How to determine Body-in-White materials according to structural requirements'. VDI Berichte 1543 Symposium, Hamburg , 11,12 May 2000.
- 33 F.H. (Sam) Froes1, H. Friedrich, J. Kiese, and D. Bergoint, Titanium in the Family Automobile: The Cost Challenge, 2004.
- 34 Future Steel Vehicle Executive Summary, Phase I: Engineering study, WorlAutoSteel, 2008.
- 35 Frost & Sullivan, Clean Air for Europe 2004, Institute for Prospective Technological Studies, 2003.
- 36 Associação dos Fabricantes da Indústria Automóvel, <http://www.afia.pt/>, consultado em Novembro de 2009.
- 37 <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2016/07/os-atuais-modelos-de-carros-eletricos-e-o-potencial-de-insercao-brasil/29421>, consultado em Agosto de 2016.
- 38 Sara Piteira Mota, O futuro passa por carros autónomos, ligados à Internet e com inteligência virtual, publicado em 06 Abril de 2016 em: http://economico.sapo.pt/noticias/o-futuro-passa-por-carros-autonomos-ligados-a-internet-e-com-inteligencia-virtual_246530.html”, consultado em Setembro de 2016.
- 39 Todd Litman, Autonomous Vehicle Implementation Predictions, Implications for Transport Planning, Victoria Transport Policy Institute, 2016.
- 40 Pauline Canteneur, Autonomous Vehicles: Mass Adoption Predicted for 2050, publicado em 16 de Julho de 2015 em: http://www.atelier.net/en/trends/articles/autonomous-vehicles-mass-adoption-predicted-2050_436634, consultado em Setembro de 2016.
- 41 NCE Raufoss, Advanced light-weight materials within the weight materials, Appendix 2 - industry and research trends in Ásia, 2010.
- 42 Daimler Facts on Sustainability 2010, disponível em: <http://sustainability.daimler.com>, consultado em Agosto de 2010.
- 43 Hening Wallentowitz, Joerg Leyers and Dr. Thorsten Parr, Materials for Future Automotive Body Structures, Global Automotive Manufacturing and Technology, 2003.
- 44 Joel P. Clark, Future of Automotive Body Materials: Steel, Aluminum and Polymer Composites, Hoogovens Technology Day, Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <http://msl1.mit.edu/hoog3.pdf>, consultado em Dezembro de 2010.
- 45 <http://www.bluescopesteel.com.au/go/news/ultra-light-steel-auto-body-ulsab-project>, publicado em Dezembro de 2005, consultado em Julho de 2010.
- 46 <http://www.worldautosteel.org/Projects/ULSAB/ImageGallery.aspx>, consultado em Janeiro de 2011.

- 47 <http://www.worldautosteel.org/Projects/ULSAB/Programme-engineering-report.aspx>,
consultado em Janeiro de 2011.
- 48 Ultra Light Steel Auto Body, Phase 2 Findings, Version 1.0.2, Porsche Engineering Services,
Inc., March 1998.
- 49 <http://www.ulsac.org>, consultado em Novembro de 2010.
- 50 <http://www.ulsas.org>, consultado em Novembro de 2010.
- 51 ULSAB-AVC - Porsche Engineering Service, Inc. Engineering Report, Chapter 6, 2001.
- 52 http://ec.europa.eu/research/transport/news/article_1507_en.html, consultado em Novembro
de 2010.
- 53 Ragnar Larsson, Modeling resin flow, preform deformations and residual stresses in
composites manufacturing, Seminar on Composite Materials in Vehicles, SWEREA /
SICOMP, Chalmers, Gothenburg, Sweden, 8 th December, 2010.
- 54 <http://www.worldautosteel.org/LCA/lca.html>, consultado em Julho de 2010.
- 55 Gustav R. Grob, "Future Transportation with Smart Grids & Sustainable Energy, 6th
International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, ISBN: 978-1-4244-4345-1,
2009.
- 56 European Council for Automotive R&. Disponível em:
<http://www.eucar.be/organisation/manufacturing>, consultado em Setembro de 2010.
- 57 Michael F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Second Edition, Butterworth-
Heinemann, ISBN 0 7506 4357 9: 1999, pp. 3-7, 363-374.
- 58 A. Robinson, Andrew Livesey, Repair of Vehicle Bodies, ISBN 13: 978-0-75-066753-1,
2006, pp. 124, 149, 153, 158, 161.
- 59 United States Steel Corporation, 2005. Disponível em:
<http://xnet3.uss.com/auto/steelvsal/materialselection.htm>, consultado em Janeiro de 2011.
- 60 Advanced High Strength Steel, Application Guidelines 4-1, 2009. Disponível em:
<http://www.worldautosteel.org>, consultado em Setembro de 2010.
- 61 Future Steel Vehicle Executive Summary, Phase I: Engineering study, WorlAutoSteel , 2008.
- 62 <http://www.stylepark.com/en/alcarbon/alporas-ac-black-both-sided-ground>, consultado em
Maio de 2010.
- 63 <http://www.gleich.de>, consultado em Maio de 2010.
- 64 Schlott, S., Aus dem Flugzeugbau, Ultrafeste Leichtbautechnik, Automotive Materials, N. 1,
2004.
- 65 Paschek, L. Die Aluminium Karosserie des neuen Jaguar-Topmodells XJ, ATZ, 2003.
- 66 Edward Ghali, Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding,
performance, and testing, ISBN 978-0-471-71576-4, 2010, pp. 327.
- 67 K.U. Kainer (Ed.), Magnesium Alloys and their Applications, ISBN 3-527-30282-4, 2003, pp.
29-33, 184-195.
- 68 Magnesium Vision 2020: a North American Automotive Strategic Vision for Magnesium,
originated from a meeting of the United States Automotive Materials Partnership (USAMP)
Automotive Metals Division (AMD) at the office of the United States Council for Automotive
Research (USCAR) on December 7, 2004.
- 69 David Peacock, Materials World, Vol. 5 n.º. 10 , 1997, pp. 580-583.
- 70 J. F. Silva. Tese de Doutoramento, Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e
Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar”, 2005.

- 71 <http://shkumhosunny.en.made-in-china.com>, consultado em Junho de 2010.
- 72 <http://www.quattroruote.it/notizie/eventi/summa-di-tecnologia-lauto-di-quattroruote>, consultado em Janeiro de 2011
- 73 http://www.bayer-baysystems.com/BMS/BaySystems.nsf/id/01_LEV_EN_Foam-filling_of_cavities?open&ccm=400030040&l=05_NorthernEurope_EN, consultado em Junho de 2010.
- 74 Bob Eller, Automotive Thermoplastic Composites - Industry Structure and New Technologies Respond to a Global Recession, Robert Eller Association, LLC, SPE Automotive Composites Conference, Detroit, September 2009.
- 75 Marcelo F. Moura, Alfredo B. Morais e António G. Magalhães, Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Publindústria, 2005, pp. 2, 9-15, 21-30.
- 76 Thomas G. Schuh, Renewable Materials for Automotive Applications, Daimler-Chrysler AG, Stuttgart, Germany, 1997.
- 77 Vijay Kumar Thakur, Michael R. Kessler - Green Biorenewable Biocomposites: From Knowledge to Industrial Applications. CRC Press, 2016, ISBN 1482252678, 9781482252675.
- 78 Ashby MF, Jones DRH. Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design. Butterworth Heinemann, Oxford, United Kingdom, 1999.
- 79 Ashby M, Johnson K. Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design. Butterworth Heinemann, Oxford, United Kingdom, 2002.
- 80 Silva, Lucas Filipe Martins da, 1973- ; Alves, Fernando Jorge Lino; Marques, António Torres - Materiais de construção. Porto: Publindústria, cop. 2013. 442 p.. ISBN 978-989-723-049-3
- 81 Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai, Composite Materials Design and Applications, ISBN 1-58716-084-6, CRC Press LLC, 2003.
- 82 Reinforced Plastics March/April 2010 22 0034-3617/10, Elsevier Ltd, 2010.
- 83 http://www.ultimatecarpage.com/pic/4256/McLaren-MP4-12C_24.html, acesso em Janeiro de 2011.
- 84 Plastic hybrid materials found, American Chemistry Council. Disponível em: www.plastics-car.com, consultado em Novembro de 2009.
- 85 Luís Gil, “Cork Innovative Applications”, The V International Materials Symposium, Lisboa, Portugal, 5-8 Abril de 2009.
- 86 <http://www.wired.com/autopia/2009/02/toyota-makes-pl>, 2009, consultado em Outubro de 2010.
- 87 Barchetta 00, N.º Quadro K00-2011, Passaporte Técnico N.º 6035 da Federação Portuguesa de Automobilismo e Karting, emitido em 2015.
- 88 Especificação técnica DIN ST37, Portal Total Matéria: <http://http://www.totalmateria.com/>, consultado em Setembro de 2014.
- 89 Francisco J. G. Silva, Breve Abordagem aos Processos de Soldadura, Apontamentos da disciplina Processos de Soldadura I, 2011-2012, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- 90 Raul Campilho - Método de Elementos Finitos. Porto: Publindústria, 2012, ISBN: 9789897230288.
- 91 Guia de seleção de resinas da DSM, “Unsaturated Polyester Resins Selector Guide”, 2012, consultado em maio de 2016.
- 92 Especificação técnica, SICOMIN Technical Datasheet SR1500, 2014

- 93 Especificação técnica, Nidaplast 8, consultado em maio de 2016.
- 94 Especificação técnica, BASF Styrodur, consultado em maio de 2016.
- 95 Especificação técnica, AIREX Blatek, consultado em maio de 2016.
- 96 Emanoil Linul, Liviu Marsavina, Recent Advances in Composite Material for Wind Turbine Blades, ISBN 978-0-9889190-0-, 2013. PP171-192.
- 97 HexWeb Honeycomb sandwich design technology, Hexcel composites, Publication No. AGU 075b, 2000.
- 98 Ronald F. Gibson, Principles of composite material mechanics, McGraw-Hill, ISBN 0-07-113335-6, 1994, PP 48.
- 99 Especificação técnica, Owen Corning Product Information, OCV Reinforcements Chopped Strand Mat M113 300-130 1B, 2008. consultado em maio de 2016.
- 100 Especificação técnica Proqui Complex 500/450, Proquinsa, consultado em maio de 2016.
- 101 Catálogo técnico Fastner for Sandwich Structures Catalog, Shur-Lok, disponível em: http://www.shur-lok.com/salesapp/product_dls/Advance_Composites.pdf, consultado em agosto de 2016.

ANEXOS

ANEXO I

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

ANEXO I-1

ENSAIOS DE CALCINAÇÃO

Tabela I-1 Resultados experimentais dos ensaios de calcinação aos provetes extraídos das placas fabricadas.

Provete	Massa inicial Cadinho	Massa inicial Cadinho e Provete	Massa final Cadinho e Fibras	Fração Mássica de Fibras		
	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	w_f	Média	Desvio Padrão
P1.Calc.P1	24,432	26,205	25,004	0,32	0,36	0,06
P1.Calc.P2	25,115	26,653	25,732	0,40		
P2.Calc.P1	24,470	31,523	27,827	0,48	0,47	0,00
P2.Calc.P2	25,123	32,275	28,495	0,47		
P3.Calc.P1	24,470	28,332	26,019	0,40	0,38	0,02
P3.Calc.P2	25,123	29,201	26,622	0,37		
P4.Calc.P1	24,464	25,324	24,789	0,38	0,37	0,01
P4.Calc.P2	24,982	26,066	25,383	0,37		
P5.Calc.P1	24,463	25,498	24,962	0,48	0,50	0,03
P5.Calc.P2	24,981	25,911	25,464	0,52		
P6.Calc.P1	24,431	25,113	24,539	0,16	0,18	0,03
P6.Calc.P2	25,115	25,889	25,273	0,20		
P7.Calc.P1	24,463	25,631	25,002	0,46	0,46	0,46
P7.Calc.P2	24,981	26,226	25,540	0,45		
P8.Calc.P1	24,432	25,593	24,908	0,41	0,41	0,00
P8.Calc.P2	25,115	26,086	25,510	0,41		

ANEXO I-2

ENSAIOS DE DUREZA

Tabela I-2. Resultados experimentais dos ensaios de dureza Barcol aos provetes extraídos das placas fabricadas.

Provete	Dureza Barcol (%)	
	Sem Pós-Cura	Com Pós-Cura
P1.DBar.P1	40,0	Curada (43,0)
P1.DBar.P2	45,0	Curada (56,0)
P1.DBar.P3	53,0	Curada (56,0)
P1.DBar.P4	38,0	Curada (56,0)
P1.DBar.P5	45,0	Curada (47,0)
P1.DBar.P6	45,0	Curada (55,0)
P1.DBar.P7	29,0	Curada (54,0)
P1.DBar.P8	50,0	Curada (56,0)
P1.DBar.P9	40,0	Curada (49,0)
P1.DBar.P10	41,0	Curada (56,0)
Média	43,4	52,0
Desvio Padrão	7,3	5,6
P2.DBar.P1	43,0	Curada (44,0)
P2.DBar.P2	50,0	Curada (54,0)
P2.DBar.P3	33,0	Curada (55,0)
P2.DBar.P4	52,0	Curada (54,0)
P2.DBar.P5	59,0	Curada (60,0)
P2.DBar.P6	44,0	Curada (58,0)
P2.DBar.P7	48,0	Curada (49,0)
P2.DBar.P8	40,0	Curada (53,0)
P2.DBar.P9	41,0	Curada (48,0)
P2.DBar.P10	50,0	Curada (60,0)
Média	46,1	53,4
Desvio Padrão	7,3	5,5
P3.DBar.P3	43,0	Curada (50,0)
P3.DBar.P4	45,0	Curada (47,0)
P3.DBar.P5	30,0	Curada (44,0)
P3.DBar.P6	37,0	Curada (50,0)
P3.DBar.P7	36,0	Curada (45,0)
Média	39,6	45,8
Desvio Padrão	7,9	2,8

Tabela I-2. Resultados experimentais dos ensaios de dureza Barcol aos provetes extraídos das placas fabricadas. (cont.)

Provete	Dureza Barcol (%)	
	Sem Pós-Cura	Com Pós-Cura
P5.DBar.P1	52,0	Curada (53,0)
P5.DBar.P2	41,0	Curada (50,0)
P5.DBar.P3	40,0	Curada (44,0)
P5.DBar.P4	33,0	Curada (41,0)
P5.DBar.P5	36,0	Curada (48,0)
P5.DBar.P6	36,0	Curada (48,0)
P5.DBar.P7	40,0	Curada (50,0)
P5.DBar.P8	45,0	Curada (55,0)
P5.DBar.P9	30,0	Curada (48,0)
P5.DBar.P10	40,0	Curada (52,0)
Média	41,6	46,6
Desvio Padrão	7,8	5,7
P6.DBar.P1	38,0	Curada
P6.DBar.P2	41,0	Curada
P6.DBar.P3	36,0	Curada
P6.DBar.P4	38,0	Curada
P6.DBar.P5	46,0	Curada
P6.DBar.P6	39,0	Curada
P6.DBar.P7	50,0	Curada
P6.DBar.P8	46,0	Curada
P6.DBar.P9	48,0	Curada
P6.DBar.P10	32,0	Curada
Média	41,4	
Desvio Padrão	5,8	
P8.DBar.P1	34,0	Curada
P8.DBar.P2	33,0	Curada
P8.DBar.P3	32,0	Curada
P8.DBar.P4	36,0	Curada
Média	33,8	
Desvio Padrão	1,7	

Nota: Não foram apresentados valores para as placas 4 e 7, uma vez que quando foram sujeitas à medição da dureza já se encontravam totalmente curadas.

ANEXO I-3

ENSAIOS DE FLEXÃO EM 3 PONTOS

Tabela I-3.1 - Dimensões dos Provete extraídos das placas fabricadas, submetidos a ensaios de flexão em 3 pontos e respetiva velocidade de ensaio.

Provete	Dimensões							Velocidade Ensaio (mm/min)
	d (mm)	b (mm)	L ₁ (mm)	c (mm)	A (mm ²)	t (mm)	L (mm)	
P1.Fx3P.P1	13,1	25,6	260,0	10,0	336,6	1,6	300,0	5,0
P1.Fx3P.P2	13,3	26,8	260,0	10,0	356,2	1,6	300,0	5,0
P2.Fx3P.P1	16,2	36,6	320,0	12,0	593,4	2,1	370,0	5,0
P2.Fx3P.P2	16,4	34,2	320,0	12,0	561,4	2,2	370,0	5,0
P3.Fx3P.P1	20,0	38,4	320,0	13,0	768,6	3,5	370,0	5,0
P3.Fx3P.P2	19,9	40,2	320,0	13,0	801,2	3,5	3700,0	5,0
P4.Fx3P.P1	18,3	36,8	320,0	15,0	673,4	1,7	365,0	7,5
P4.Fx3P.P2	18,2	35,9	320,0	15,0	653,4	1,6	365,0	7,5
P5.Fx3P.P1	7,4	13,9	150,0	6,0	103,0	0,7	230,0	5,0
P5.Fx3P.P2	7,3	13,4	150,0	6,0	97,7	0,7	230,0	5,0
P6.Fx3P.P1	7,9	16,8	160,0	6,0	133,0	1,0	210,0	5,0
P6.Fx3P.P2	8,1	17,0	160,0	6,0	137,4	1,0	210,0	5,0
P7.Fx3P.P1	11,5	20,8	220,0	10,0	239,2	0,8	270,0	5,0
P7.Fx3P.P2	11,6	21,1	220,0	10,0	244,8	0,8	270,0	5,0
P8.Fx3P.P1	16,6	32,2	340,0	15,0	535,7	0,8	385,0	7,5
P8.Fx3P.P2	16,7	32,0	340,0	15,0	534,9	0,9	385,0	7,5
P9.Fx3P.P1	54,8	150,0	1100,0	50,0	8215,5	2,7	1202,0	5,0
P9.Fx3P.P2	54,2	149,5	1101,0	50,0	8095,4	2,7	1202,0	6,0
P9.Fx3P.P3	54,1	150,0	1102,0	50,0	8110,5	2,7	1201,0	7,0
P9.Fx3P.P4	54,8	149,5	1103,0	50,0	8194,1	2,7	1201,0	8,0
P9.Fx3P.P5	54,7	150,0	1104,0	50,0	8199,0	2,7	1200,0	9,0

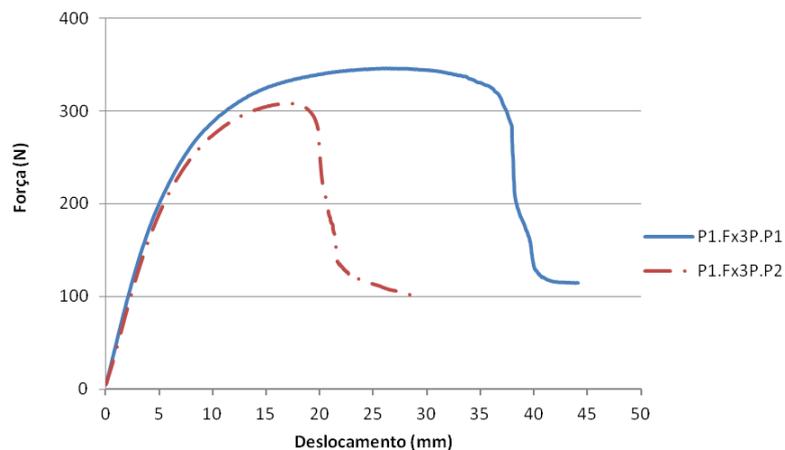


Figura I-3.1- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos aos provetes da Placa 1.

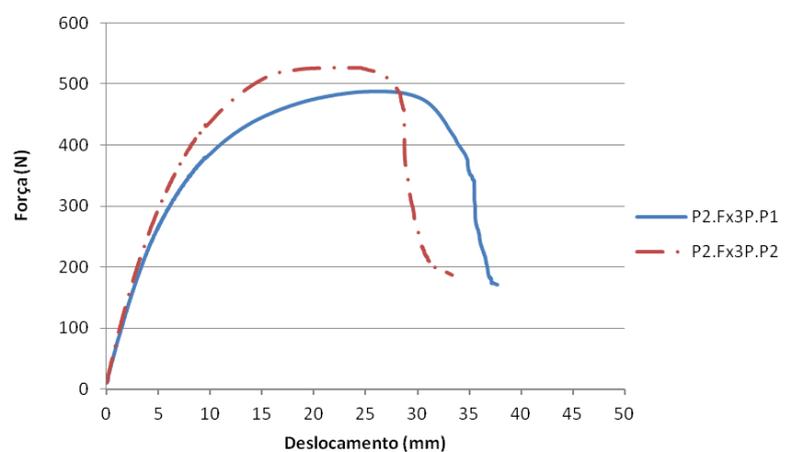


Figura I-3.2- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos aos provetes da Placa 2.

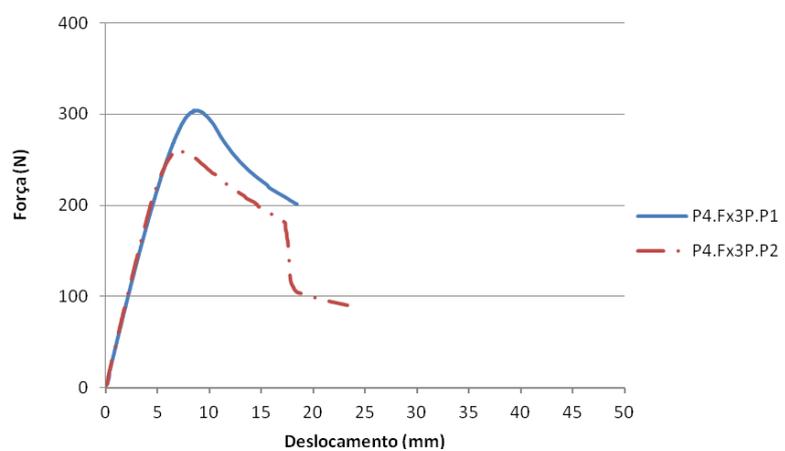


Figura I-3.4- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos aos provetes da Placa 4.

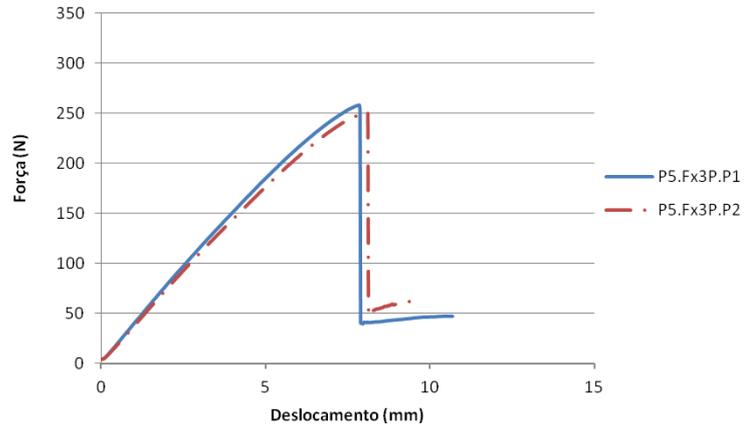


Figura I-3.5- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos aos provetes da Placa 5.

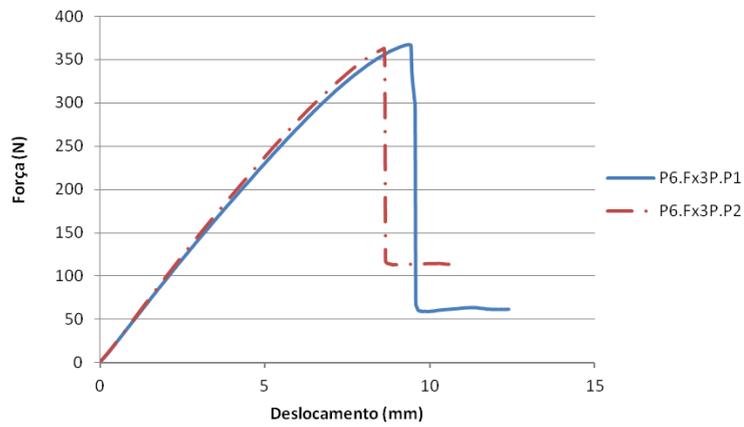


Figura I-3.6- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos aos provetes da Placa 6.

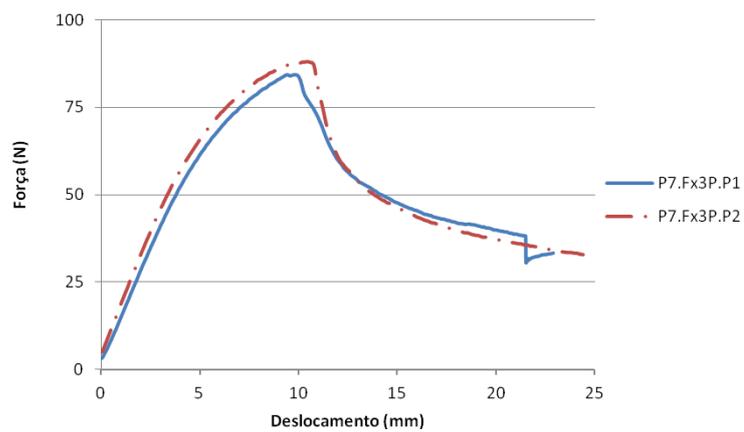


Figura I-3.7- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos aos provetes da Placa 7.

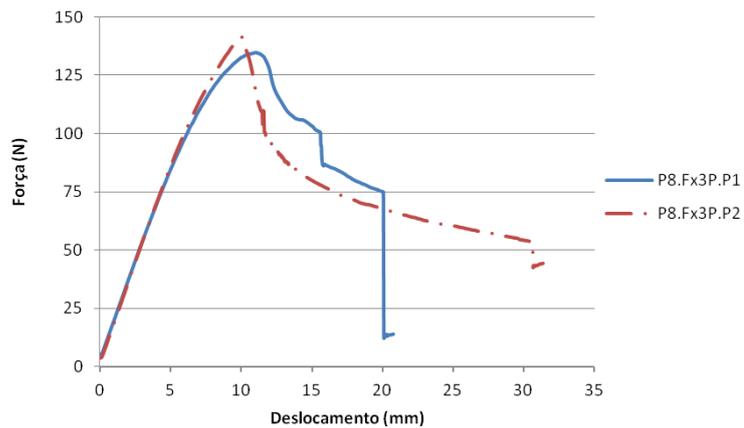


Figura I-3.8- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos aos provetes da Placa 8.

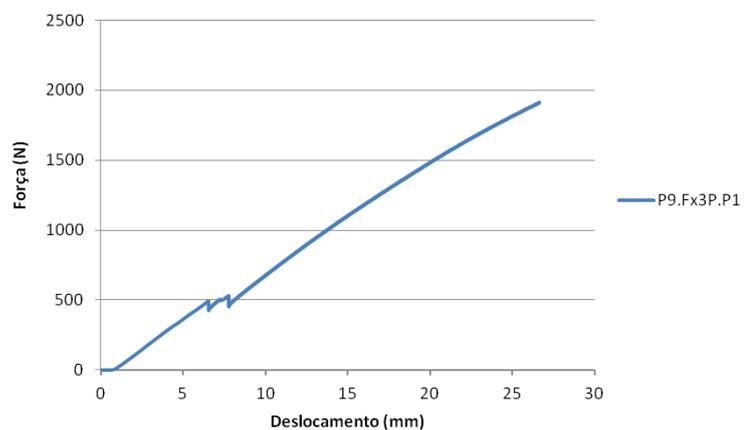


Figura I-3.9- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos ao provete 1 da Placa 9.

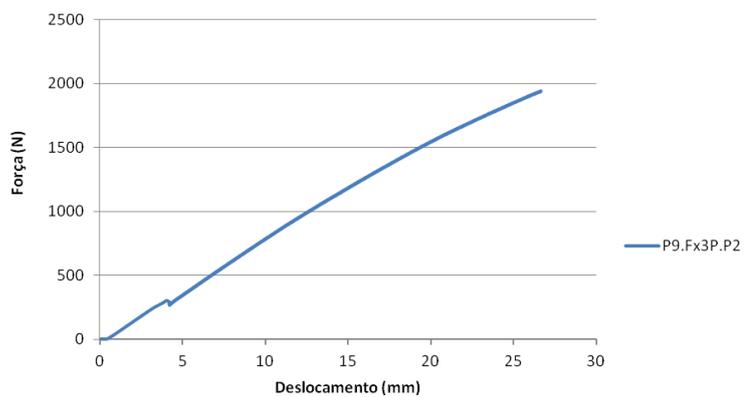


Figura I-3.10- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos ao provete 2 da Placa 9.

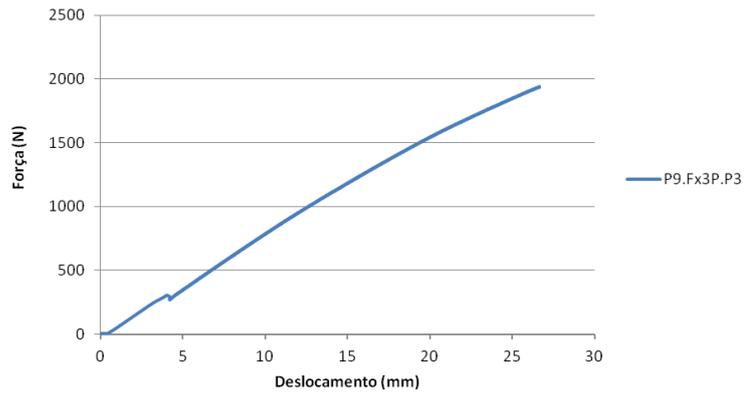


Figura I-3.11- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos ao provete 3 da Placa 9.

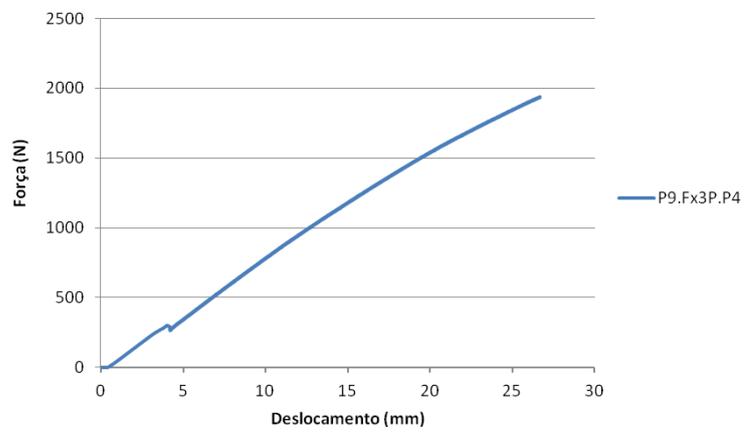


Figura I-3.12- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos ao provete 4 da Placa 9.

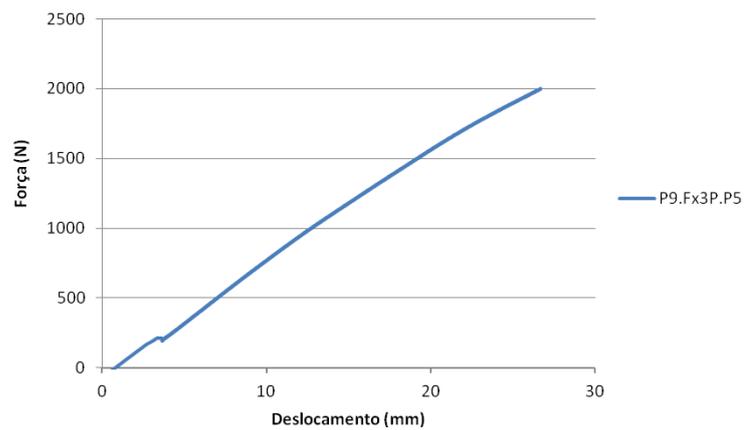


Figura I-3.13- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos ao provete 5 da Placa 9.

Tabela I-3.2 – Resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos realizados aos provetes extraídos das placas fabricadas em compósito.

Provete	P1 - Força	Δl -	σ	Média σ	Desvio	τ	Média τ	Desvio
	Máxima	Deslocamento	(MPa)	(MPa)	Padrão σ	(MPa)	(MPa)	Padrão τ
	(N)	para a Força						
		Máxima						
		(mm)						
P1.Fx3P.P1	345,9	26,6	48,3			0,6		
P1.Fx3P.P2	308,2	17,0	39,2	43,8	6,42	0,5	0,5	0,06
P2.Fx3P.P1	487,7	26,0	36,0			0,5		
P2.Fx3P.P2	526,6	22,2	39,2	37,6	2,25	0,5	0,5	0,05
P3.Fx3P.P1	409,1	-	14,7			0,3		
P3.Fx3P.P2	459,0	-	16,0	15,4	0,89	0,3	0,3	0,02
P4.Fx3P.P1	304,6	8,5	24,1			0,2		
P4.Fx3P.P2	259,7	7,2	21,8	22,9	1,64	0,2	0,2	0,02
P5.Fx3P.P1	258,4	7,9	148,4			1,4		
P5.Fx3P.P2	251,3	8,1	160,6	154,5	8,62	1,4	1,4	0,02
P6.Fx3P.P1	367,6	9,3	132,3			1,6		
P6.Fx3P.P2	362,9	8,6	117,1	124,7	10,81	1,5	1,5	0,04
P7.Fx3P.P1	84,4	9,5	27,7			0,2		
P7.Fx3P.P2	88,0	10,5	26,6	27,1	0,79	0,2	0,2	0,00
P8.Fx3P.P1	134,6	11,0	27,7			0,1		
P8.Fx3P.P2	141,4	10,0	27,8	27,8	0,09	0,1	0,1	0,01
P9.Fx3P.P1	2362,1	38,2	34,7			0,2		
P9.Fx3P.P2	2195,0	34,4	37,4			0,1		
P9.Fx3P.P3	2368,3	34,5	41,0	37,4	3,35	0,2	0,2	0,01
P9.Fx3P.P4	2294,7	33,4	33,5			0,1		
P9.Fx3P.P5	2689,7	44,8	40,4			0,2		

ANEXO I-4

ENSAIOS DE FLEXÃO EM 4 PONTOS

Tabela I-4.1 - Dimensões dos Provete extraídos das placas fabricadas, submetidos a ensaios de flexão em 4 pontos e respetiva velocidade de ensaio.

Provete	Dimensões							Velocidade Ensaio (mm/min)
	d (mm)	b (mm)	L ₂ (mm)	c (mm)	L _{2/2} (mm)	A (mm ²)	t (mm)	
P1.Fx4P.P3	13,2	26,0	270,0	10,0	135,0	344,4	1,6	5,0
P1.Fx4P.P4	13,2	25,4	270,0	10,0	135,0	335,7	1,6	5,0
P2.Fx4P.P3	16,1	33,3	300,0	12,0	150,0	536,6	2,1	5,0
P2.Fx4P.P4	16,2	31,7	300,0	12,0	150,0	514,0	2,1	5,0
P3.Fx4P.P3	19,4	40,5	300,0	13,0	150,0	786,9	3,2	5,0
P3.Fx4P.P4	20,0	36,1	300,0	13,0	150,0	720,3	3,5	5,0
P4.Fx4P.P3	17,8	35,2	270,0	15,0	135,0	626,6	1,4	5,0
P4.Fx4P.P4	17,9	35,5	270,0	15,0	135,0	635,5	1,5	5,0
P5.Fx4P.P3	7,3	13,5	180,0	6,0	90,0	98,4	0,7	5,0
P5.Fx4P.P4	7,3	13,6	180,0	6,0	90,0	99,8	0,7	5,0
P6.Fx4P.P3	7,9	15,0	180,0	6,0	90,0	118,3	0,9	5,0
P6.Fx4P.P4	8,0	17,2	180,0	6,0	90,0	137,6	1,0	5,0
P7.Fx4P.P3	11,0	22,0	200,0	10,0	100,0	242,0	0,5	5,0
P7.Fx4P.P4	11,0	22,0	200,0	10,0	100,0	242,0	0,5	5,0
P8.Fx4P.P3	16,6	31,0	270,0	15,0	135,0	514,0	0,8	5,0
P8.Fx4P.P4	16,5	33,5	270,0	15,0	135,0	551,1	0,7	5,0

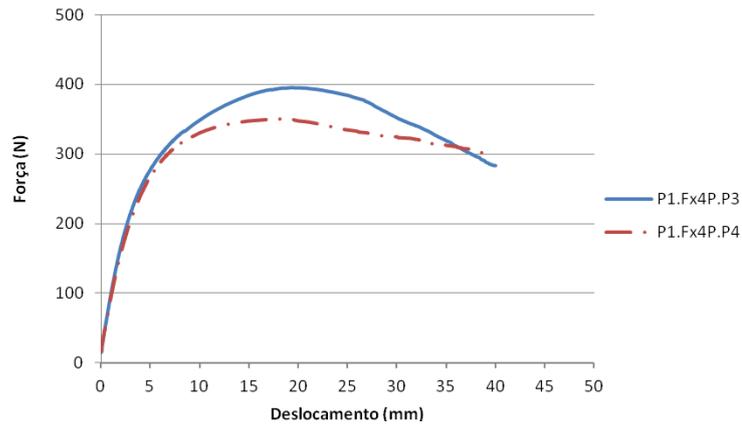


Figura I-4.1- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 4 pontos aos provetes da Placa 1.

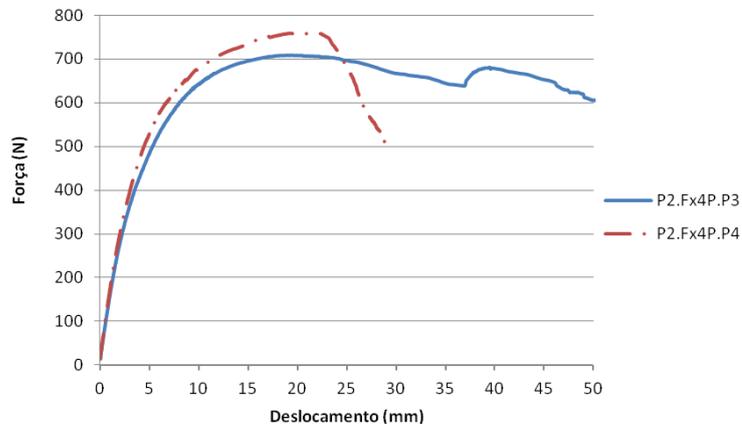


Figura I-4.2- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 4 pontos aos provetes da Placa 2.

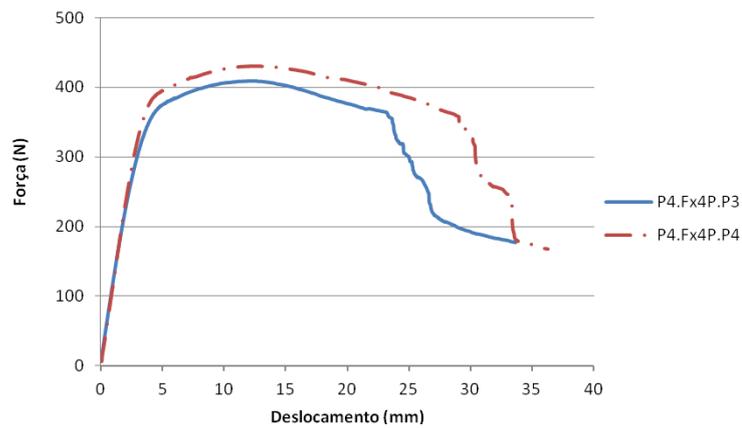


Figura I-4.4- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 4 pontos aos provetes da Placa 4.

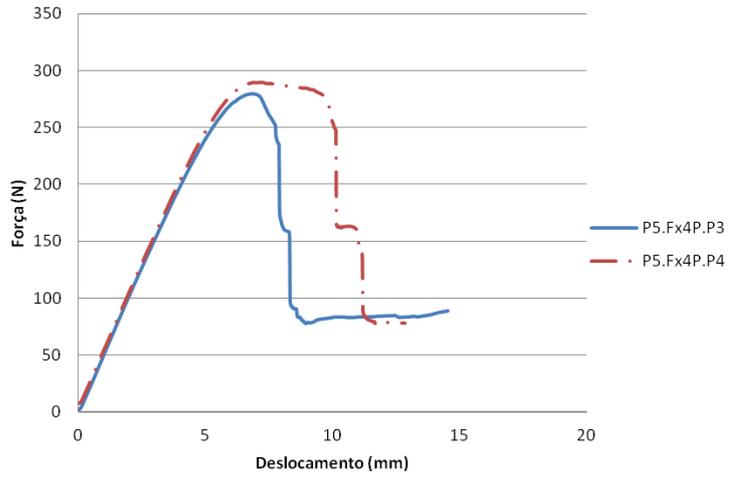


Figura I-4.5- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 4 pontos aos provetes da Placa 5.

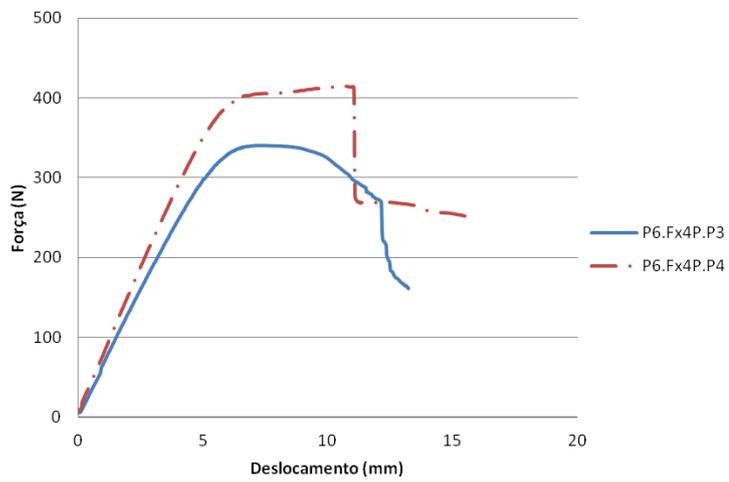


Figura I-4.6- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 4 pontos aos provetes da Placa 6.

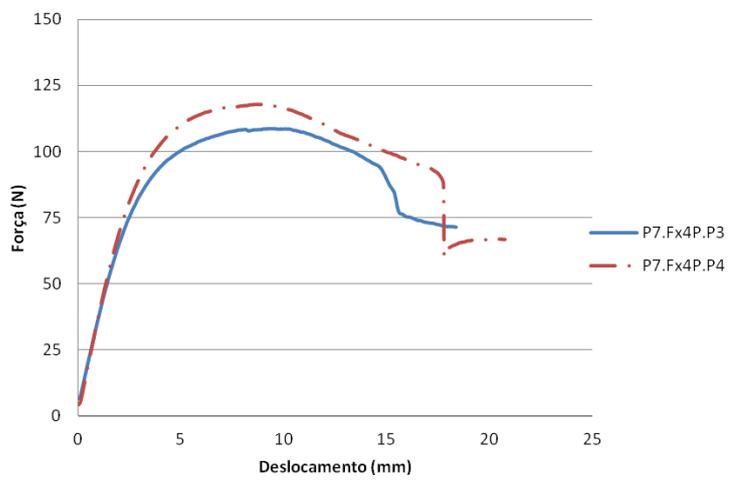


Figura I-4.7- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 4 pontos aos provetes da Placa 7.

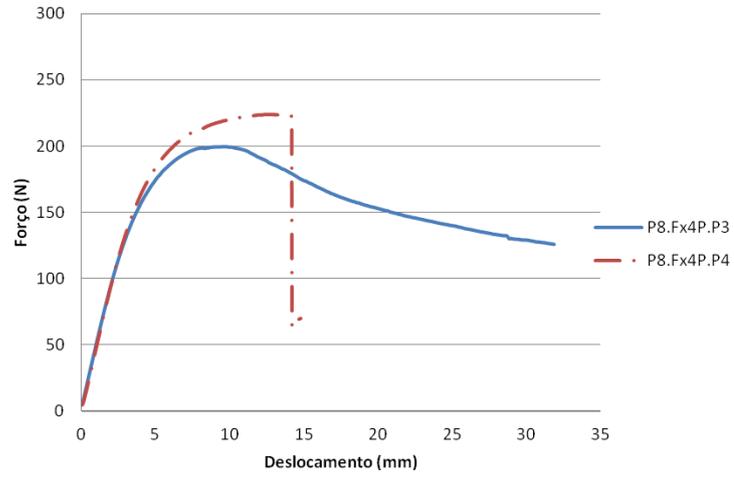


Figura I-4.8- Gráfico força x deslocamento do ensaio de flexão em 4 pontos aos provetes da Placa 8.

Tabela I-4.2 – Deflexão dos provetes extraídos das placas fabricadas nos ensaios de 3 pontos e nos ensaios de 4 pontos.

Ensaio de Flexão em 3 pontos				Ensaio de Flexão em 4 pontos			
Provete	L1	$\Delta 1$	P1	Provete	L2	$\Delta 2$	P2
	(mm)	(mm)	(N)		(mm)	(mm)	(N)
P1.Fx3P.P1	260,0	2,0	81,4	P1.Fx4P.P3	270,0	1,0	50,8
P1.Fx3P.P2	260,0	2,0	78,7	P1.Fx4P.P4	270,0	1,0	48,8
P2.Fx3P.P1	320,0	2,0	131,8	P2.Fx4P.P3	300,0	1,0	89,3
P2.Fx3P.P2	320,0	2,0	112,9	P2.Fx4P.P4	300,0	1,0	99,0
P3.Fx3P.P1	320,0	2,0	97,2	P3.Fx4P.P3	300,0	1,0	79,0
P3.Fx3P.P2	320,0	2,0	106,2	P3.Fx4P.P4	300,0	1,0	76,5
P4.Fx3P.P1	320,0	2,0	93,7	P4.Fx4P.P3	270,0	1,0	122,2
P4.Fx3P.P2	320,0	2,0	97,7	P4.Fx4P.P4	270,0	1,0	118,0
P5.Fx3P.P1	150,0	2,0	74,1	P5.Fx4P.P3	180,0	1,0	49,3
P5.Fx3P.P2	150,0	2,0	71,1	P5.Fx4P.P4	180,0	1,0	49,8
P6.Fx3P.P1	160,0	2,0	93,1	P6.Fx4P.P3	180,0	1,0	60,2
P6.Fx3P.P2	160,0	2,0	96,3	P6.Fx4P.P4	180,0	1,0	70,5
P7.Fx3P.P1	220,0	2,0	25,0	P7.Fx4P.P3	200,0	1,0	18,7
P7.Fx3P.P2	220,0	2,0	25,6	P7.Fx4P.P4	200,0	1,0	21,3
P8.Fx3P.P1	340,0	2,0	37,1	P8.Fx4P.P3	270,0	1,0	51,2
P8.Fx3P.P2	340,0	2,0	36,1	P8.Fx4P.P4	270,0	1,0	48,46

Tabela I-4.3 – Resultados dos ensaios de flexão em 4 pontos realizados aos provetes extraídos das placas fabricadas.

Provete	Força Máxima	Deslocamento para Força Máxima	σ	Média σ	Desvio Padrão σ	τ	Média τ	Desvio Padrão τ
	(N)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
P1.Fx4P.P3	395,68	19,21	27,35	26,18	1,66	0,65	0,62	0,04
P1.Fx4P.P4	349,65	18,10	25,00	28,89	1,98	0,59	0,80	0,06
P2.Fx4P.P3	708,33	19,50	27,49	12,57	1,22	0,76	0,56	0,02
P2.Fx4P.P4	758,93	19,23	30,29	17,14	0,05	0,85	0,36	0,01
P3.Fx4P.P3	756,60	0,00	13,44	17,18	0,05	0,58	0,37	0,01
P3.Fx4P.P4	647,00	0,00	11,71	17,14	0,05	0,54	0,36	0,01
P4.Fx4P.P3	409,54	12,43	17,10	17,14	0,05	0,35	0,36	0,01
P4.Fx4P.P4	430,93	12,50	17,18	17,14	0,05	0,37	0,36	0,01
P5.Fx4P.P3	279,65	6,85	107,99	108,36	0,52	1,56	1,58	0,02
P5.Fx4P.P4	289,50	7,12	108,72	108,36	0,52	1,59	1,58	0,02
P6.Fx4P.P3	340,88	7,23	78,70	78,07	0,89	1,64	1,68	0,06
P6.Fx4P.P4	414,42	10,37	77,45	78,07	0,89	1,72	1,68	0,06
P7.Fx4P.P3	108,53	9,25	23,49	24,49	1,41	0,23	0,24	0,01
P7.Fx4P.P4	117,75	8,87	25,49	24,49	1,41	0,25	0,24	0,01
P8.Fx4P.P3	199,35	9,46	17,40	18,59	1,69	0,20	0,21	0,01
P8.Fx4P.P4	223,94	12,79	19,79	18,59	1,69	0,21	0,21	0,01

Tabela I-4.4 – Resultados da rigidez (D) e do módulo de corte do núcleo (G), determinados a partir dos dos ensaios de flexão em 4 pontos realizados aos provetes extraídos das placas fabricadas em compósito.

Provete	Rigidez (D)			Módulo de corte do Núcleo (G)		
	Valor (N.mm ²)/10 ⁶	Média (N.mm ²)/10 ⁶	Desvio Padrão (N.mm ²)/10 ⁶	Valor (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
P1.Fx4P.P3	13,3	12,9	0,5	7,6	7,0	0,9
P1.Fx4P.P4	12,6	26,7	14,6	6,4	3,5	2,9
P2.Fx4P.P3	16,3	85,9	24,0	1,5	12,2	3,1
P2.Fx4P.P4	37,1	22,3	21,1	5,6	0,4	0,1
P3.Fx4P.P3	102,8	2,7	1,3	10,0	8,1	49,5
P3.Fx4P.P4	68,9	3,8	1,3	14,5	8,1	67,6
P4.Fx4P.P3	7,4	1,0	0,3	0,3	1,9	0,7
P4.Fx4P.P4	37,3	1,0	0,3	0,5	1,9	0,7
P5.Fx4P.P3	1,7	27,8	6,4	-26,9	7,0	2,6
P5.Fx4P.P4	3,6	27,8	6,4	43,2	7,0	2,6
P6.Fx4P.P3	2,9	27,8	6,4	-39,7	7,0	2,6
P6.Fx4P.P4	4,7	27,8	6,4	55,9	7,0	2,6
P7.Fx4P.P3	0,8	27,8	6,4	1,4	7,0	2,6
P7.Fx4P.P4	1,2	27,8	6,4	2,4	7,0	2,6
P8.Fx4P.P3	23,3	27,8	6,4	8,8	7,0	2,6
P8.Fx4P.P4	32,3	27,8	6,4	5,1	7,0	2,6

ANEXO I-5

ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Tabela I-5.1 - Dimensões dos Provete extraídos das placas fabricadas, submetidos a ensaios de compressão e respetiva velocidade de ensaio.

Provete	Dimensões				Velocidade Ensaio (mm/min)
	b (mm)	L (mm)	c (mm)	A (mm ²)	
P1.Comp.P5	67,0	65,2	10,0	4368,4	5,0
P1.Comp.P6	67,0	66,0	10,0	4422,0	5,0
P2.Comp.P5	66,6	66,5	10,9	4422,2	5,0
P2.Comp.P6	65,9	67,5	11,3	4444,9	5,0
P2.Comp.P7	67,5	66,2	11,4	4465,1	5,0
P3.Comp.P5	30,7	29,1	13,9	893,4	5,0
P3.Comp.P6	31,7	30,5	13,0	966,9	5,0
P3.Comp.P7	32,8	29,2	13,6	957,8	5,0
P4.Comp.P5	36,0	34,5	15,0	1242,0	7,5
P4.Comp.P6	33,0	36,5	15,0	1204,5	7,5
P4.Comp.P7	34,0	36,0	15,0	1224,0	7,5
P5.Comp.P5	28,7	29,3	6,0	839,5	5,0
P5.Comp.P6	29,5	27,8	6,0	818,6	5,0
P6.Comp.P5	32,6	28,6	6,0	932,4	5,0
P6.Comp.P6	32,2	31,8	6,0	1024,0	5,0
P7.Comp.P5	28,5	27,8	10,0	792,3	5,0
P7.Comp.P6	28,0	27,0	10,0	756,0	5,0
P7.Comp.P7	27,6	27,5	10,0	759,0	5,0
P8.Comp.P5	29,8	28,6	15,0	852,3	7,5
P8.Comp.P6	28,9	28,0	15,0	807,8	7,5
P8.Comp.P7	29,8	28,5	15,0	847,9	7,5
P8.Comp.P8	28,4	29,7	15,0	842,0	7,5

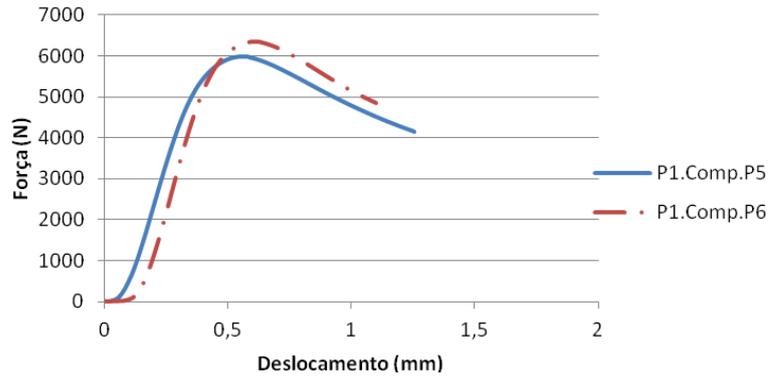


Figura I-5.1- Gráfico força x deslocamento do ensaio de compressão aos provetes da placa 1.

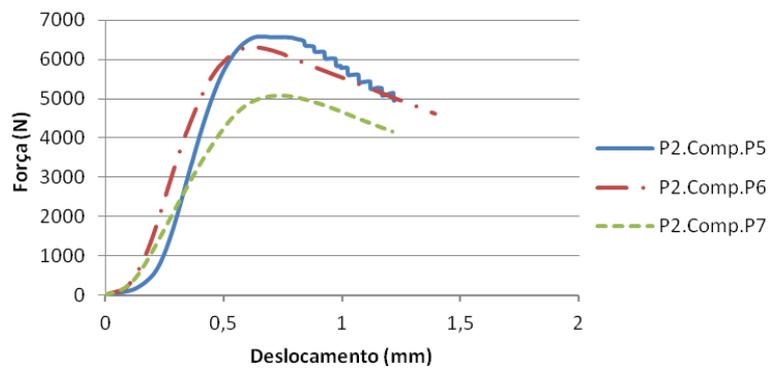


Figura I-5.2- Gráfico força x deslocamento do ensaio de compressão aos provetes da placa 2.

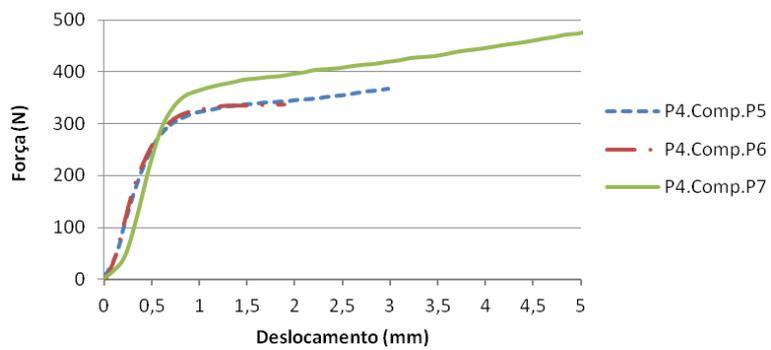


Figura I-5.4- Gráfico força x deslocamento do ensaio de compressão aos provetes da placa 4.

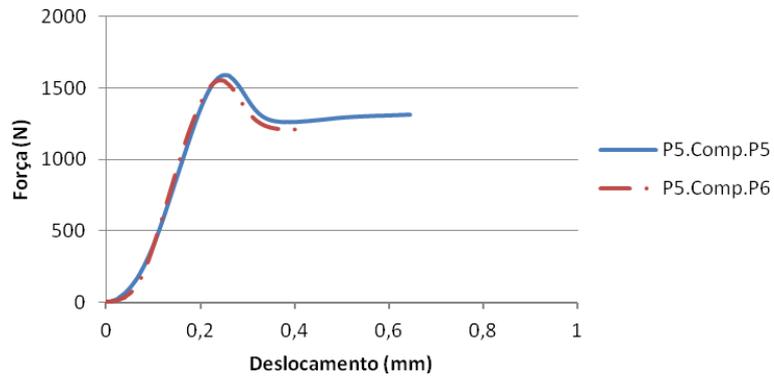


Figura I-5.5- Gráfico força x deslocamento do ensaio de compressão aos provetes da placa 5.

Figura I-5.6- Gráfico força x deslocamento do ensaio de compressão aos provetes da placa 6.

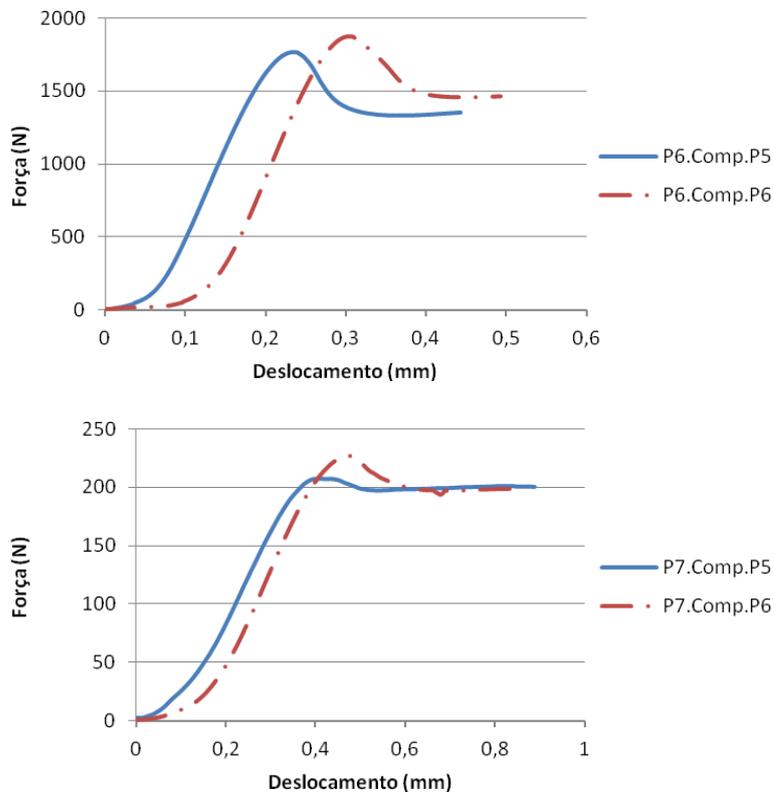


Figura I-5.7 - Gráfico força x deslocamento do ensaio de compressão aos provetes da placa 7.

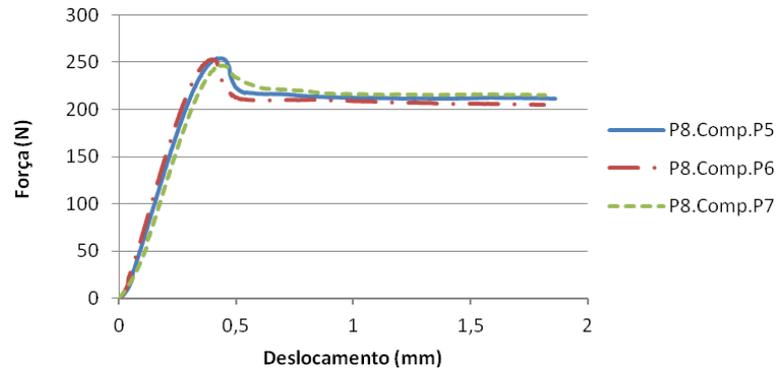


Figura I-5.8 - Gráfico força x deslocamento do ensaio de compressão aos provetes da placa 8.

Tabela I.5.2 – Resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão dos provetes extraídos da Placas fabricadas.

Provete	Força Max (N)	Área (mm)	σ			E			
			Valor (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	S ($\Delta P/\Delta u$) (N/mm)	Valor (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
P1.Comp.P5	5981,2	4368,4	1,4	1,4	0,05	19943,0	45,7	47,4	2,51
P1.Comp.P6	6346,9	4422,0	1,4			21760,0	49,2		
P2.Comp.P5	6575,1	4422,2	1,5			20515,0	50,4		
P2.Comp.P6	6310,9	4444,9	1,4	1,3	0,19	18758,0	47,5	41,7	12,70
P2.Comp.P7	5076,8	4465,1	1,1			10614,1	27,1		
P4.Comp.P5	367,2	1242,0	0,3	0,3	0,01	609,6	7,4	7,9	0,74
P4.Comp.P6	338,2	1204,5	0,3			674,8	8,4		
P5.Comp.P5	1588,4	839,5	1,9	1,9	0,00	9471,9	67,7	73,3	7,96
P5.Comp.P6	1553,9	818,6	1,9			10772,9	79,0		
P6.Comp.P5	1767,1	932,4	1,9	1,9	0,05	12342,0	79,4	75,4	5,75
P6.Comp.P6	1873,2	1024,0	1,8			12167,0	71,3		
P7.Comp.P5	207,7	792,3	0,3	0,3	0,03	780,8	9,9	10,6	1,00
P7.Comp.P6	227,2	756,0	0,3			852,3	11,3		
P8.Comp.P5	254,3	852,3	0,3			806,7	14,2		
P8.Comp.P6	253,0	807,8	0,3	0,3	0,01	845,5	15,7	14,6	0,97
P8.Comp.P7	246,2	847,9	0,3			784,4	13,9		

ANEXO I-6

**ENSAIOS DE TORÇÃO E DE FLEXÃO REALIZADOS À
ESTRUTURA TUBULAR E À ESTRUTURA EM COMPÓSITO E2.I3.2.**

Tabela I-6.1 Resultados experimentais do ensaio de torção da estrutura tubular de referência.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Alavanca	Carga Eq. Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento do ponto D	Angulo Torção	Rigidez Torção
	F (N)	(m)	T (N)	CE _Z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	k _T (N.m/°)
Ensaio_Tubular_T1	750	2,270	2403	0,695	1703	7,92	0,76	2251
Ensaio_Tubular_T2	750	2,365	2245	0,790	1774	3,90	0,28	6271

Tabela I-6.2 Resultados experimentais do ensaio de flexão da estrutura tubular de referência.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Deslocamento do ponto F	Rigidez Flexão
	F (N)	Y _F (mm)	K _F (N/mm)
Ensaio_Tubular_F1	779	1,01	771
Ensaio_Tubular_F2	779	0,94	829

Tabela I-6.3 Resultados experimentais do ensaio de torção da estrutura em compósito E2.I3.1.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Alavanca	Carga Eq. Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento do ponto D	Angulo Torção	Rigidez Torção
	F (N)	(m)	T (N)	CE _Z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	k _T (N.m/°)
Ensaio E2.I3.1_T1	416	2	1021	0,815	832	8,78	0,62	1348
Ensaio E2.I3.1_T2	416	2	1021	0,815	832	8,53	0,60	1387
Ensaio E2.I3.1_T3	416	2	1021	0,815	832	8,64	0,61	1370
Ensaio E2.I3.1_T4	416	2	1021	0,815	832	8,50	0,60	1392
Ensaio E2.I3.1_T5	416	2	1021	0,815	832	8,62	0,61	1373
Média								1374
Desvio Padrão								17,4

Tabela I-6.4 Resultados experimentais do ensaio de flexão da estrutura em compósito E2.I3.1.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Deslocamento do ponto F	Rigidez Flexão
	F (N)	Y _F (mm)	K _F (N/mm)
Ensaio E2.3.1_F1	779	0,91	856
Ensaio E2.3.1_F2	779	0,91	856
Ensaio E2.3.1_F3	779	0,91	856
Ensaio E2.3.1_F4	779	0,90	865
Ensaio E2.3.1_F5	779	0,91	856
Média			858
Desvio Padrão			4,3

ANEXO II

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

ANEXO II-1

SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DAS ESTRUTURAS TUBULARES

Tabela II-1.1 Resultados da simulação de torção por elementos finitos (ABAQUS®) - Estruturas tubulares.

Designação do Ensaio	Carga Eq. Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento do ponto D	Angulo Torção	Rigidez Torção
	T (N)	CE _Z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	K _T (N.m/°)
Sim_Ensaio_Tubular_T1	2450	0,695	1703	7,02	0,67	2540
Sim_Ensaio_Tubular_T2	1033	0,790	816	1,84	0,13	6118
Sim_Ensaio_Tubular_T3	1033	0,790	816	8,53	0,62	1319
Sim_Ensaio_Tubular_T4	1033	0,790	816	8,54	0,62	1317

Tabela II-1.2 Resultados da simulação de flexão por elementos finitos (ABAQUS®) – Estruturas tubulares.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Deslocamento do ponto F	Rigidez Flexão
	F (N)	Y _F (mm)	K _F (N/mm)
Sim_Ensaio_Tubular F1	779	0,57	1367
Sim_Ensaio_Tubular F2	779	0,43	1811
Sim_Ensaio_Tubular F3	750	0,50	1500
Sim_Ensaio_Tubular F4	750	0,51	1471

ANEXO II-2

SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DAS ESTRUTURAS E2

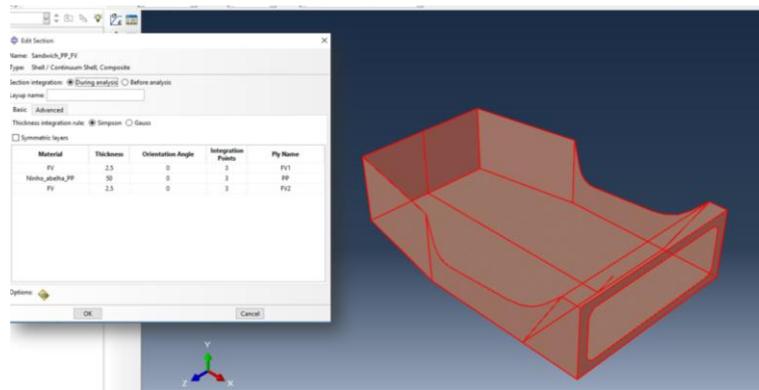


Figura II-2.1 Simulação FEM da Estrutura E2.I1 – Espessura do núcleo dos painéis de PP (50 mm).

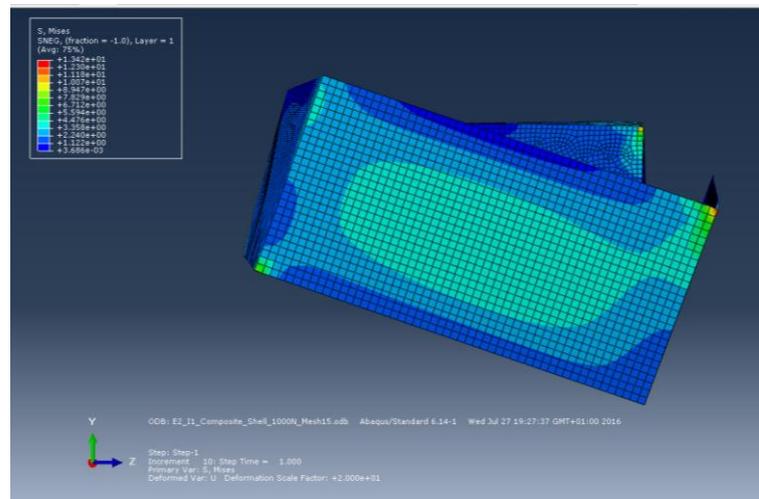


Figura II-2.2 Simulação FEM da Estrutura E2.I1 – Resultado da deformada para simulação de torção.

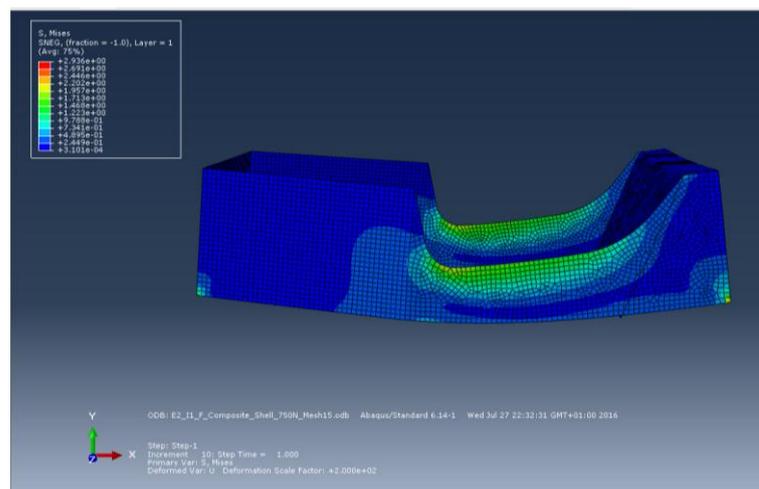


Figura II-2.3 Simulação FEM da Estrutura E2.I1 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

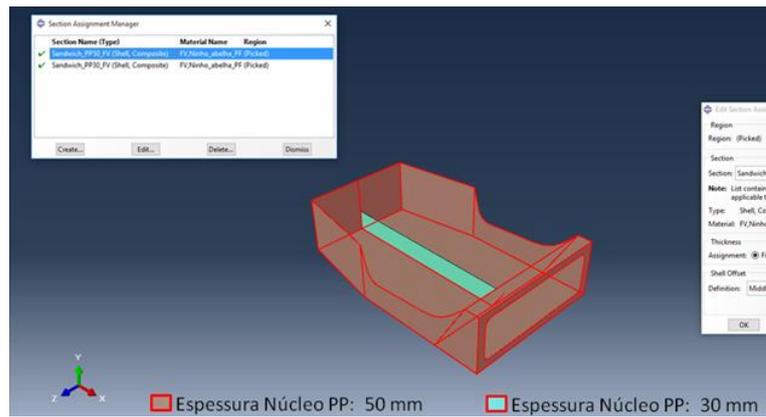


Figura II-2.4 Simulação FEM da Estrutura E2.I2 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.

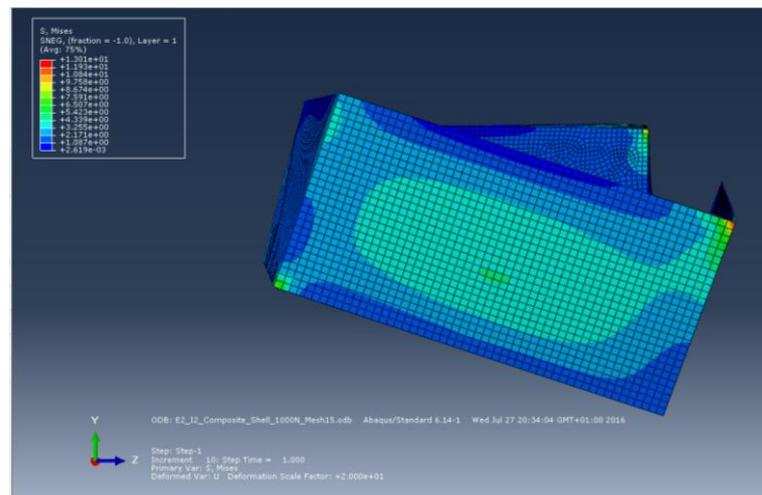


Figura II-2.5 Simulação FEM da Estrutura E2.I2 – Resultado da deformada para simulação de torção.

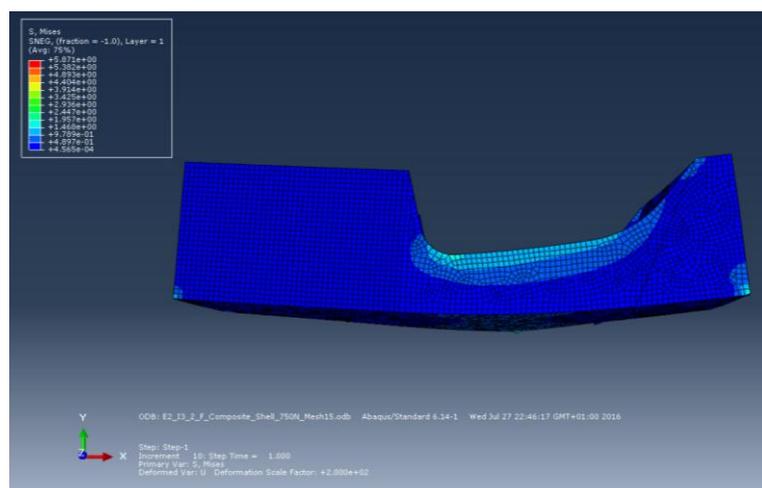


Figura II-2.6 Simulação FEM da Estrutura E2.I2 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

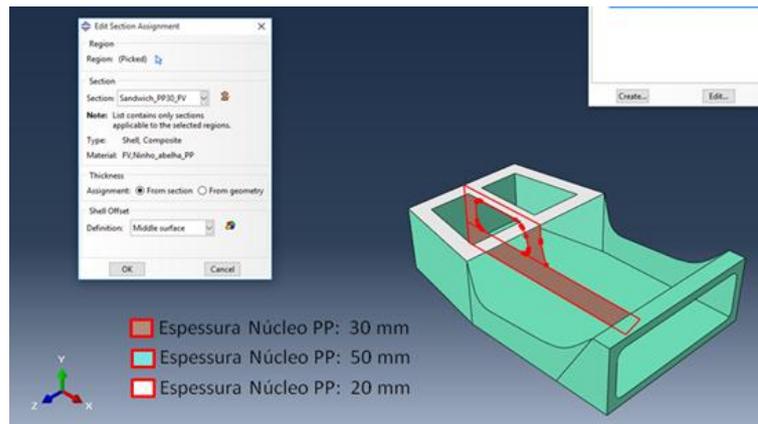


Figura II-2.7 Simulação FEM da Estrutura E2.I3 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.

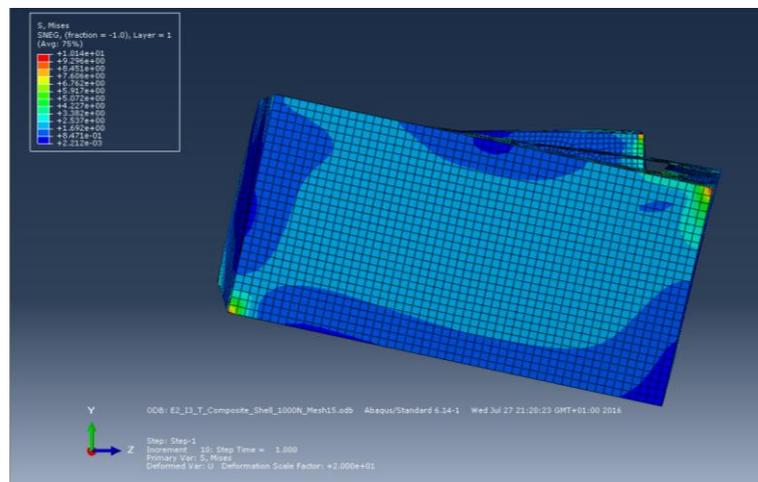


Figura II-2.8 Simulação FEM da Estrutura E2.I3 – Resultado da deformada para simulação de torção.

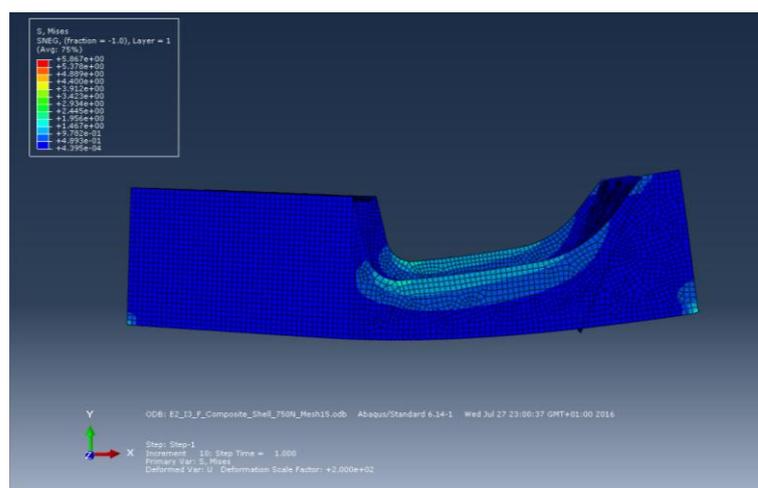


Figura II-2.9 Simulação FEM da Estrutura E2.I3 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

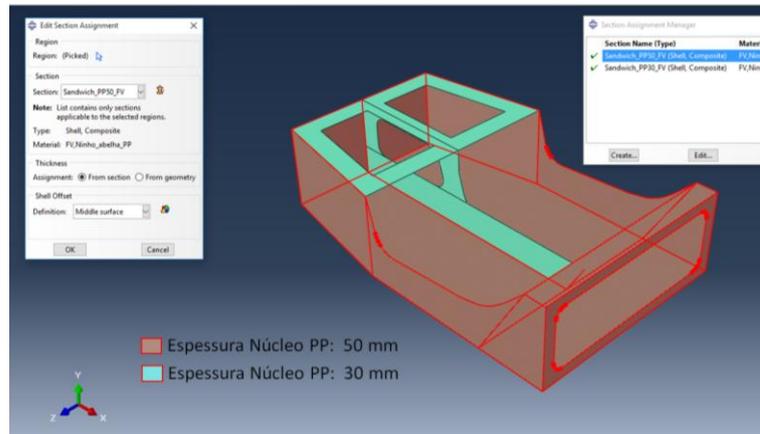
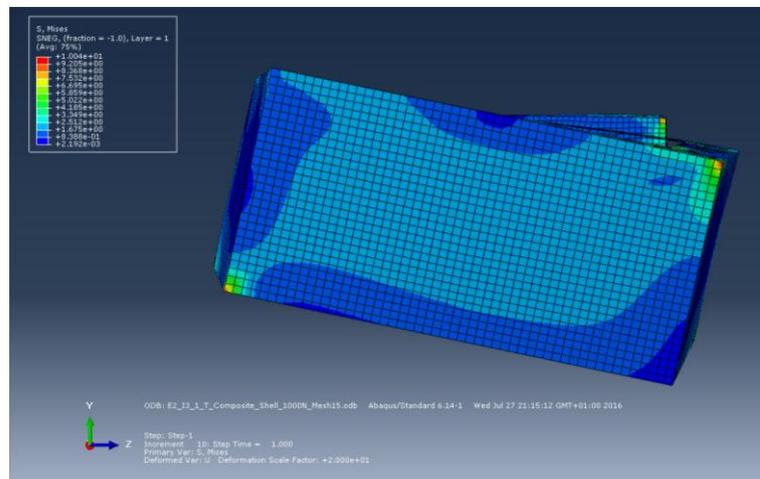


Figura II-2.10 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.1 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.



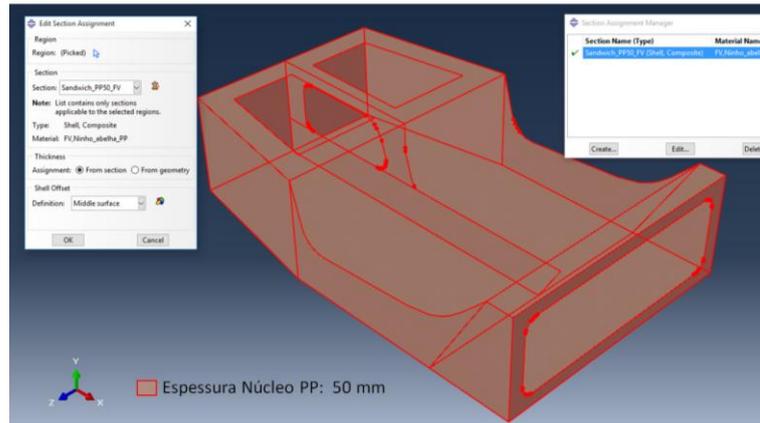


Figura II-2.13 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.2 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.

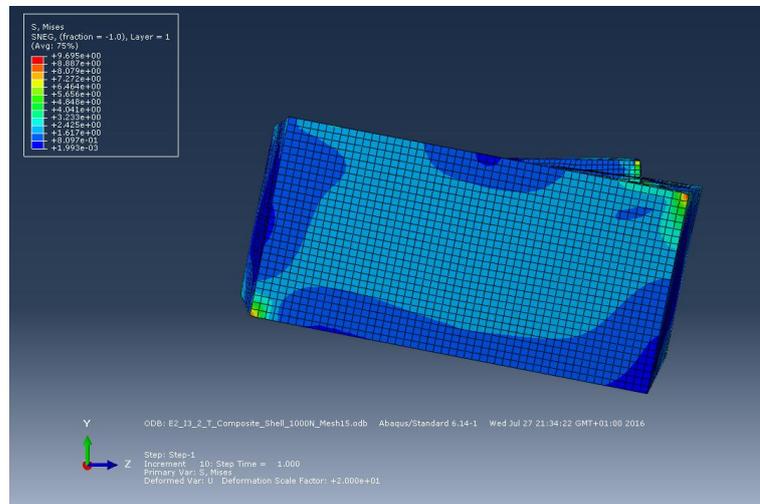


Figura II-2.14 Modelação FEM da Estrutura E2.I3.2 – Resultado da deformada para simulação de torção.

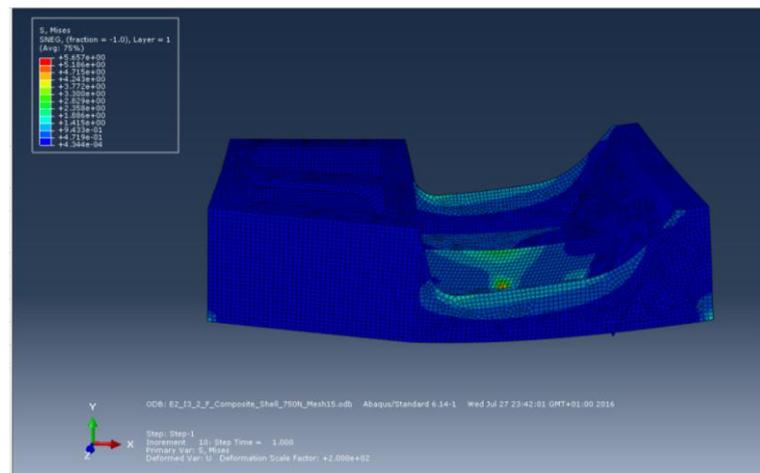


Figura II-2.15 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.2 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

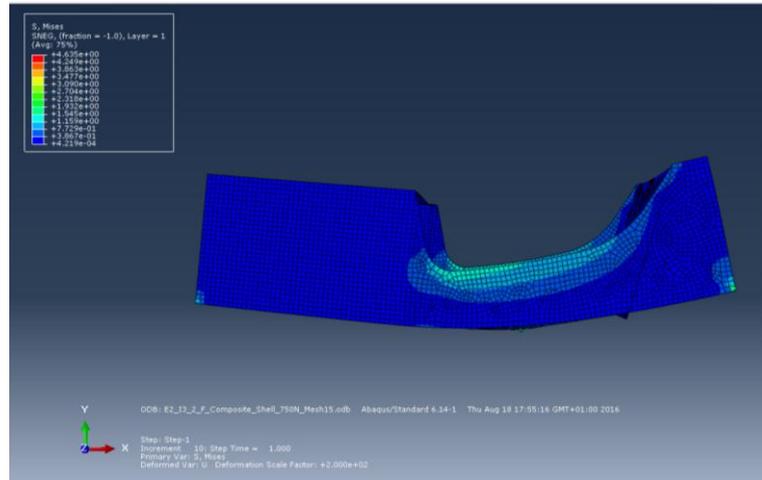


Figura II-2.15A Simulação FEM da Estrutura E2.I3.2A – Resultado da deformada para simulação de flexão de acordo com o valor do módulo de elasticidade das peles de 4,5 GPa (ver Tabela 5.32).

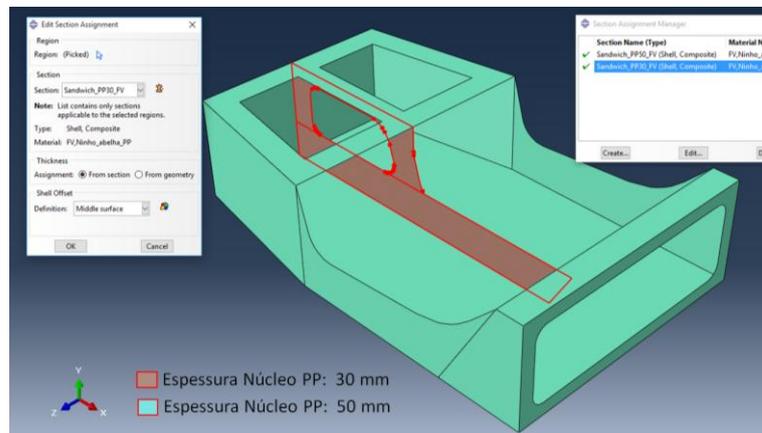


Figura II-2.16 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.3 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.

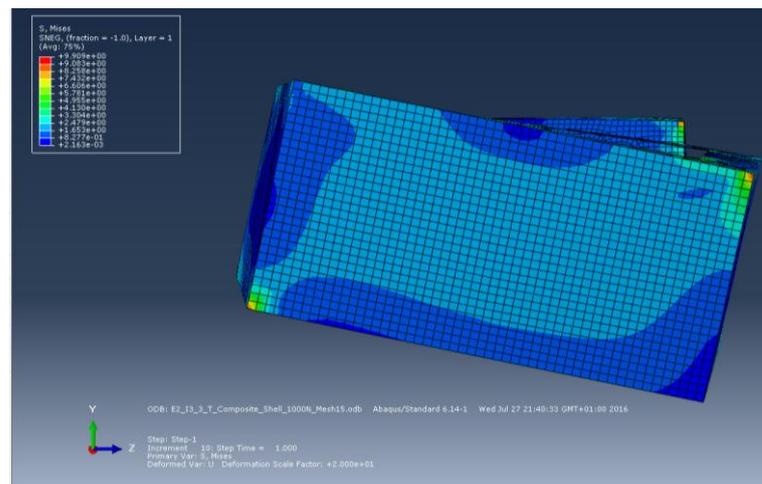


Figura II-2.17 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.3 – Resultado da deformada para simulação de torção.

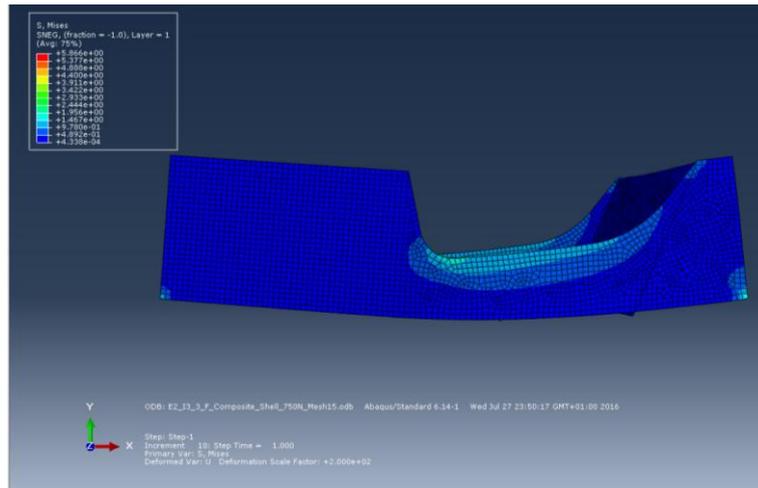


Figura II-2.18 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.3 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

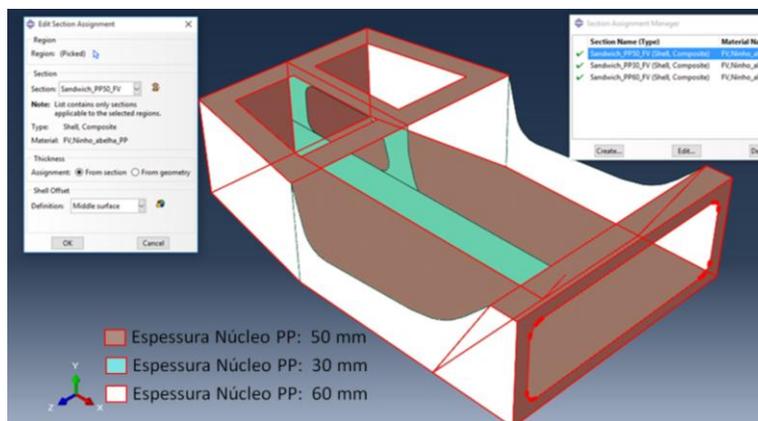


Figura II-2.19 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.4 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.

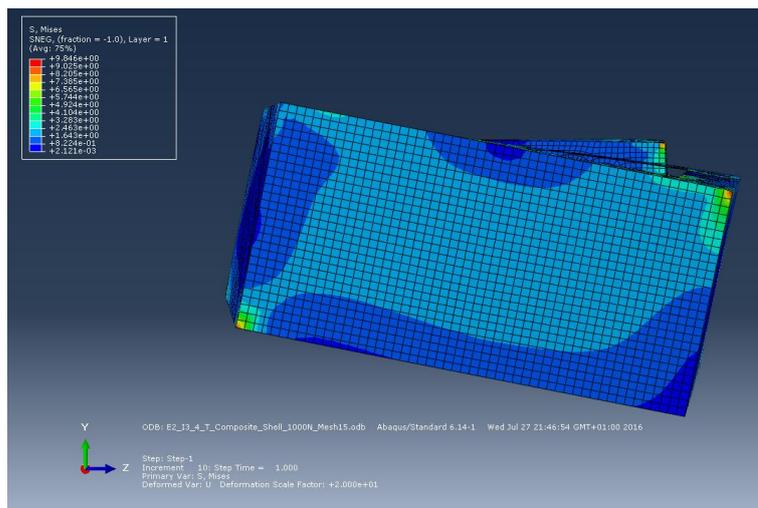


Figura II-2.20 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.4 – Resultado da deformada para simulação de torção.

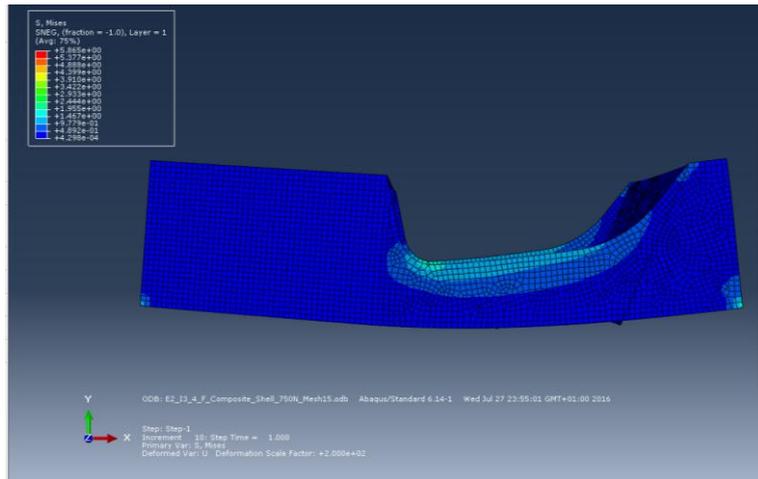


Figura II-2.21 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.4 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

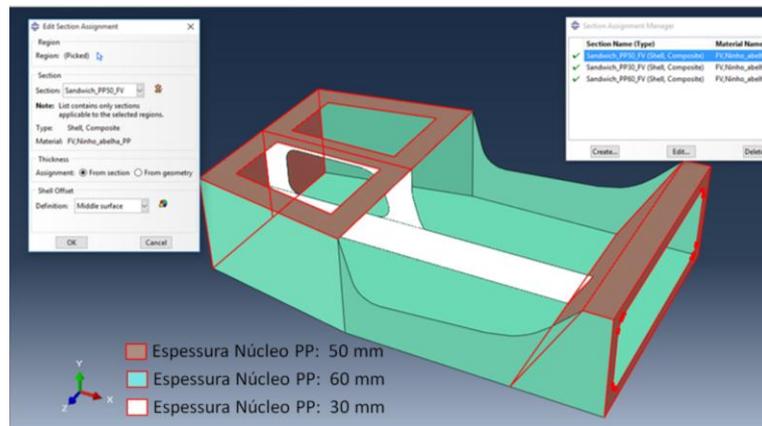


Figura II-2.22 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.5 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.

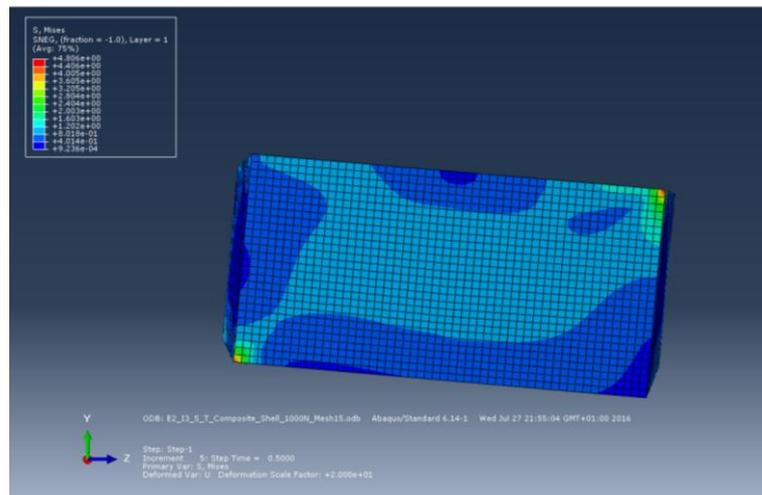


Figura II-2.23 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.5 – Resultado da deformada para simulação de torção.

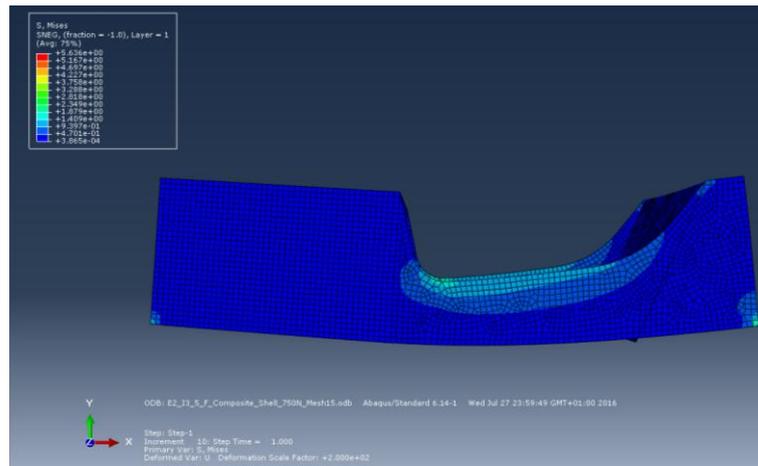


Figura II-2.24 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.5 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

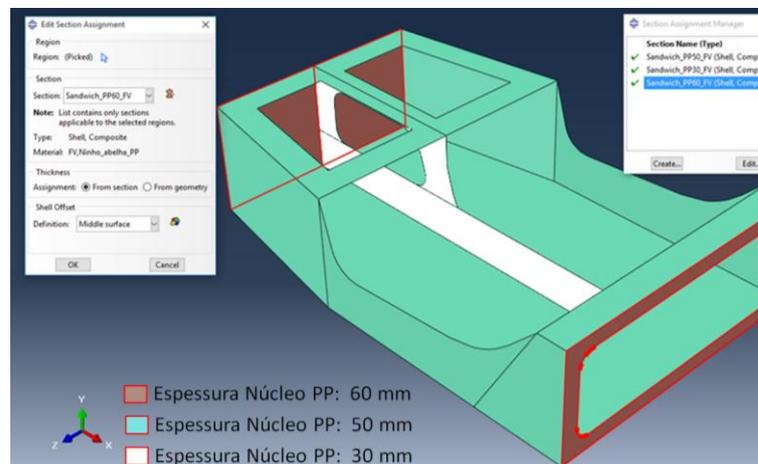


Figura II-2.25 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.6 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.

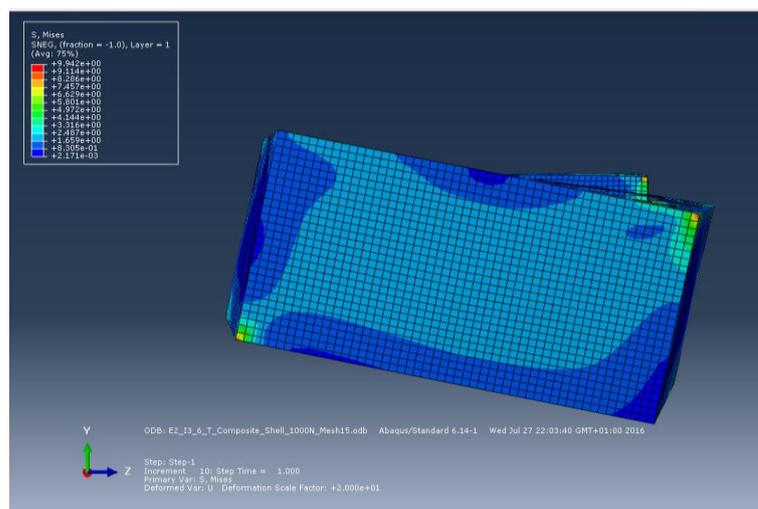


Figura II-2.26 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.6 – Resultado da deformada para simulação de torção.

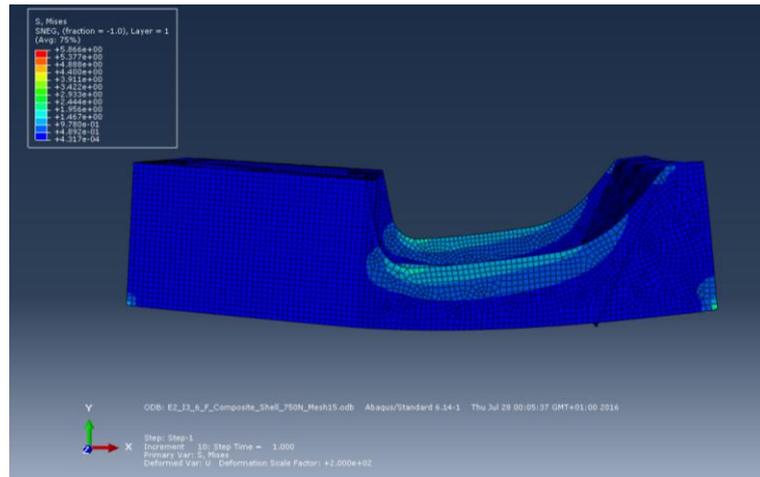


Figura II-2.27 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.6 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

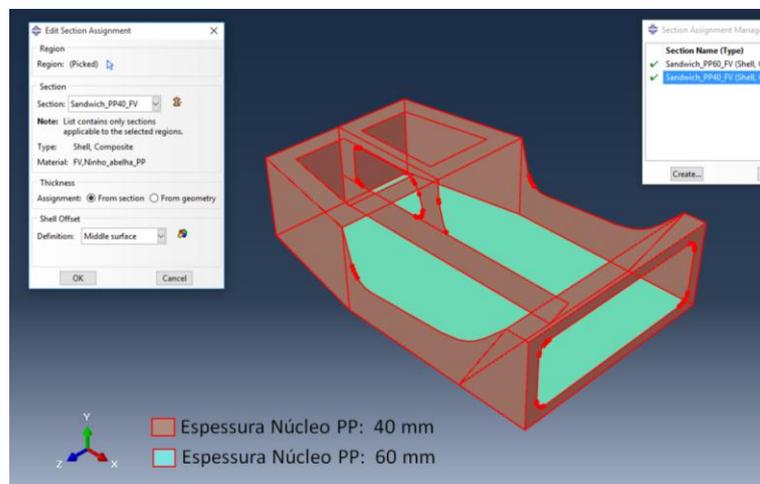


Figura II-2.28 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.7 – Espessuras do núcleo dos painéis de PP.

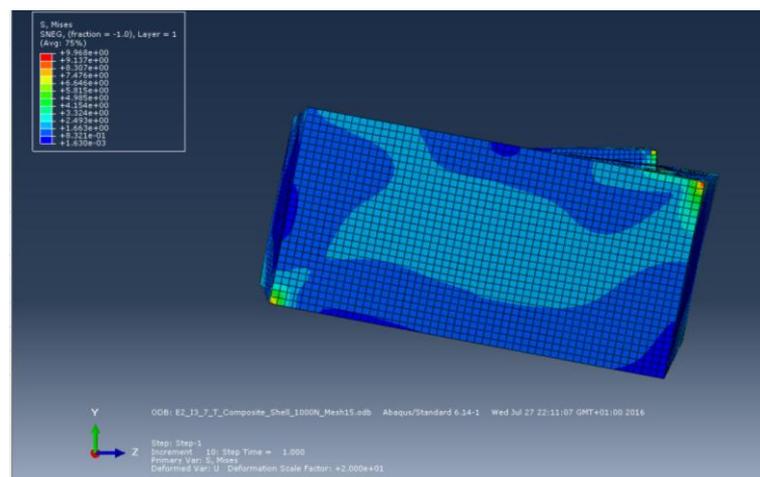


Figura II-2.29 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.7 – Resultado da deformada para simulação de torção.

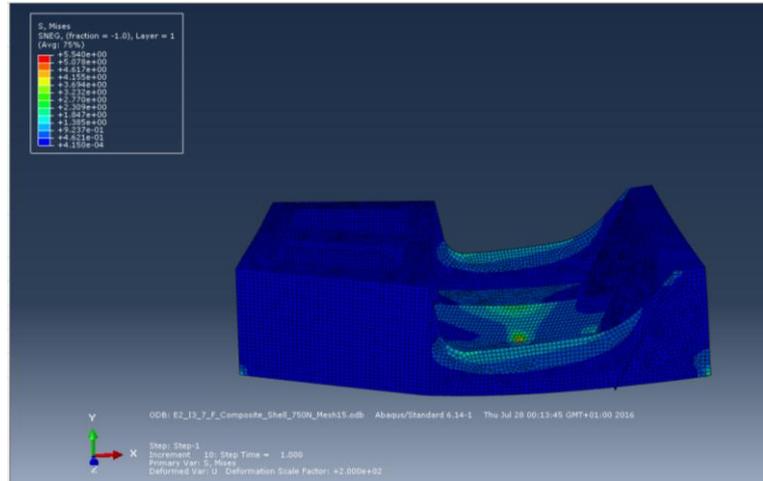


Figura II-2.30 Simulação FEM da Estrutura E2.I3.7 – Resultado da deformada para simulação de flexão.

Tabela II-2.1 Resultados da Simulação de torção por elementos finitos (ABAQUS®) – Estruturas em compósito E2.

Designação do Ensaio	Carga Eq. Aplicada	Braço	Momento Torsor	Deslocamento do ponto D	Angulo Torsão	Rigidez Torsão
	T (N)	CE _Z (m)	M _T (N.m)	Y _T (mm)	θ (°)	k _T (N.m/°)
Sim_E2.I1_T	1000	0,79	790	13,73	1,00	793
Sim_E2.I2_T	1000	0,79	790	13,26	0,96	822
Sim_E2.I3_T	1000	0,79	790	8,63	0,63	1262
Sim_E2.I3.1_T	1000	0,79	790	8,47	0,61	1287
Sim_E2.I3.2_T	1000	0,79	790	7,85	0,57	1388
Sim_E2.I3.3_T	1000	0,79	790	8,22	0,60	1325
Sim_E2.I3.4_T	1000	0,79	790	7,91	0,57	1377
Sim_E2.I3.5_T	1000	0,79	790	6,99	0,51	1558
Sim_E2.I3.6_T	1000	0,79	790	8,09	0,59	1346
Sim_E2.I3.7_T	1000	0,79	790	7,72	0,56	1411

Tabela II-2.2 Resultados da Simulação de flexão por elementos finitos (ABAQUS®) – Estruturas em compósito E2.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada	Deslocamento do ponto F	Rigidez Flexão
	F (N)	Y _F (mm)	k _F (N/mm)
Sim_E2.I1_F	750	0,86	867
Sim_E2.I2_F	750	0,47	1594
Sim_E2.I3_F	750	0,46	1625
Sim_E2.I3.1_F	750	0,46	1628
Sim_E2.I4.2_F	750	0,45	1653/1042*
Sim_E2.I5.3_F	750	0,46	1633
Sim_E2.I6.4_F	750	0,45	1650
Sim_E2.I7.5_F	750	0,42	1783
Sim_E2.I8.6_F	750	0,46	1636
Sim_E2.I9.7_F	750	0,43	1745

*Valor simulado com o módulo de elasticidade das peles determinado de acordo com o estudo efetuado na discussão dos resultados (ver Tabela 5.32)

ANEXO III

FICHAS TÉCNICAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NO FABRICO DA ESTRUTURA TUBULAR E DA ESTRUTURA EM COMPÓSITO

Certificado com as propriedades mecânicas do aço DIN 25CrMo4

Qualità acciaio
Steel grade
Nuance

25CrMo4

Norma
Specification
Norme

EN 10305/TE012/TR01

CARATTERISTICHE MECCANICHE								
MECHANICAL PROPERTIES - CARACTERISTIQUES MECANIQUES								
Pos / Item	Provetta Specimen Etalon		Snervamento Yield point Limite d'élasticité	Carico di Rottura Tensile strength Résistance a la traction		Allungamento Elongation Allignement	Durezza Hardness Dureté	
	Sezione (mm ²)	Lo (mm)	Rp (0,2) (N/mm ²)	Totale/Total (N)	Unitario/Unitary (N/mm ²)	(%)	HB	
A	178,43	75	634	133.615	749	18,50	Min. 0	Max 0
Prove di Allargatura Flaring test / essai d'évasement		 <p>Auftrag / Our ref. 6235210910915 Menge / QTY 6mm Kunde / Customer ISEP Bestellung / P.O. PADC 26013 Konformitätsbescheinigung / Declaration of conformity MW</p>					Note Note/Notes	
Prove di Bordatura Border test / test de bordure								
Prove di Schiaccio Flattening test / essai d'aplatissement								
Controllo correnti parassite Eddy currents test								
N° Colata Heat / Coulée 271828		ANALISI CHIMICA CHEMICAL ANALYSIS - ANALYSE CHIMIQUE						
C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)		
0,240	0,710	0,008	0,005	0,250	1,050	0,150		



M113

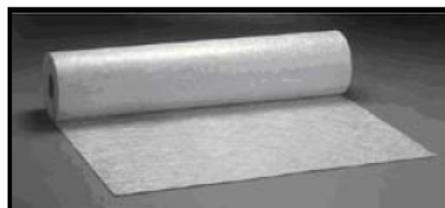
Chopped Strand Mat for Hand-Lay Up

PRODUCT DESCRIPTION

The M113 chopped strand mat is made with medium size strands of E-Glass, held together by a powder binder which is extremely soluble in styrene. The basic strand has a sizing system containing a silane coupling agent. This multi-purpose mat is used in numerous applications; this explains the extensive range of weights and widths available.

PRODUCT REFERENCE

Example : M113 300-130 1B
 M113 : OCV Reinforcements™ code for this chopped strand mat
 300 : roll weight (g/m²)
 130 : roll width (cm)
 1B : number of trimmed edges (zéro, one or two)



PRODUCT APPLICATION

- Good surface appearance
- Continuous laminating (translucent panels, exterior panels for truck trailers, sandwich panels, etc..)
- Anti-corrosion applications.

FEATURES AND PRODUCT BENEFITS

- Excellent compatibility with polyester resins, producing laminates with very high clarity (without any appearance of the strand pattern)
- Approved by Lloyd's Register.
- Very high smoothness of the laminate surface with no visible strands
- Approved by Det Norske Veritas
- Excellent compatibility with vinylester and epoxy resins.

TECHNICAL CHARACTERISTICS (nominal values)

Weight (g/m ²)	Loss on Ignition (%)	Moisture (Max value(%))
ISO 3374: 2000	ISO 1887: 1995	ISO 3344: 1997
100 ± 16%	10.5 ± 40%	0.2
150 ± 16%	8 ± 40%	
300 ± 16%	4.5 ± 40%	
450 ± 16%	3.5 ± 40%	
600 ± 16%	3.2 ± 40%	

VISUAL CHARACTERISTICS or POSSIBLE DEFECTS

- Unbound edges
- Holes (> 40mm) or tears
- Dirt spots (greater than 5 mm)
- Unopened strands
- Accumulation of fibers (>40mm)

Each 100 m² roll of chopped strand mat section may contain at most 6 of the defects listed above.

M113

Chopped Strand Mat for Hand-Lay Up

PRODUCT AVAILABILITY

All range of widths (between 10 and 320 cm) and weights are available. Most combinations of weights and widths can be supplied (may be subject to minimum order quantities, extended lead times and complementary widths).

Standard weight (g/m ²)	Standard width (cm)	Diameter (cm)	Length	Weight (kg)
300	130/125	40	220	86
450			150	88
600			110	86

A roll is considered to be complete if it measures more than 70% of the nominal length.

PACKAGING (standard ref.)

- Each roll is wound up on a cardboard tube (internal diameter 101 mm) and packaged in an individual cardboard box, 40 x 40 (L x W); the height is equal to the width of the mat.
- 9 standard rolls are packed vertically on a pallet, secured by shrink-wrap polythene. The pallet is wrapped with polyamide straps.

Mat width (cm)	Pallet dimensions L x W x H (cm)	Net pallet weight (kg)		
		300 g/ m2	450 g/m2	600 g/m2
130	120x120x147	702	738	702

Number of rolls per pallet = 9 vertical - Pallet height is equal to mat width + 17 cm

The pallet is wrapped with polyamide straps.

Special packaging: strips are packed in cardboard boxes of palletized according to the quantity.

LABELLING

Each pallet has two identification labels detailing the product reference, the net and gross weights in Kg, packaging and product code, identification code of the palletized unit, production date.

STORAGE

The M113 mat should be stored in its original packaging in a dry and cool place. Best conditions are at temperature from 10 to 35°C and humidity between 35 and 85 %. If you store the product at lower temperatures, please move the soon to be processed pallets to the production area 24 hours ahead of time; remove part of the protective cover of each roll to prevent condensation.

You can stock pallets one on one with a plywood plank in between the two.



OCV™ Reinforcements

OWENS CORNING
COMPOSITE MATERIALS, LLC
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GET.PINK™

www.owenscorning.com
www.ocvreinforcements.com

Contact:
ChoppedStrandMats.ocvamericas@owenscorning.com

OWENS CORNING
FIBERGLAS, SPRL.
166, CHAUSSEÉ DE LA HULPE
B-1170 BRUSSELS
BELGIUM
+32.2.674.82.99

Contact:
ChoppedStrandMats.ocvemea@owenscorning.com

Owens Corning
OCV Asia Pacific
Shanghai Regional Headquarters
2F Olive LVO Mansion 620 Hua Shan Road
SHANGHAI CHINA 200040
+86.21.62489922

Contact:
ChoppedStrandMats.ocvap@owenscorning.com

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law safety code or insurance regulation.

Owens Corning reserves the right to modify this document without prior notice. ©2008 Owens Corning



FICHA TÉCNICA

Página 1 de 1

1. PRODUCTO

PROQUI COMPLEX 500/450 LX 1250 MM

2. DEFINICIÓN

Constituido de un tejido de vidrio y de un Mat de hilos cortados E-Glass.

- Excelente deformabilidad.
- La falta de ligante le confiere una buena y rápida impregnación.
- Aumento del porcentaje de fibra de vidrio en el estratificado.
- Propiedades mecánicas superiores especialmente cuando son sometidos a fuerza (resistencia flexión, choques)
- Probado para anticorrosión.

Son principalmente utilizados para el moldeoado en contacto con resinas de poliéster, vinylester y epoxy.

3. PROPIEDADES

Peso Nominal (Tejido) (gr/m ²)	504 ± 8%
Peso Nominal (MAT) (gr/m ²)	450 ± 8%
Peso Total (gr/m ²)	966 ± 8%
Puntadas	12 ± 8%
Ancho (mm)	1250 ± 10
Pérdida por Ignición %	0,6 ~ 4,0
Contenido en Humedad %	≤ 0,2

4. ALMACENAJE

El producto debe almacenarse en su embalaje original en un lugar seco, fresco y resguardado de la lluvia, con una temperatura entre 5°C y 35°C y una humedad entre 35% y 65%.

Es recomendable almacenar el producto a temperatura ambiente al menos 24 horas antes de su uso para evitar condensación de humedad. Los pallets no deben ser apilados a más de dos alturas.

La información anterior refleja los valores típicos de productos PQIs, en base a nuestros datos de laboratorio. Sin embargo, no se garantiza su aplicabilidad al proceso del usuario ni asumimos ninguna responsabilidad que surja de su uso o actuación. PQI se reserva el derecho de modificar los datos y especificaciones anteriores sin previo aviso.



Product Data Sheet

Palatal P 69-02

Chemical/physical nature

Palatal P 69-02 is an unsaturated polyester resin based on orthophthalic acid and standard glycols, dissolved in styrene.
Palatal P 69-02 has a high reactivity and a medium viscosity.

Major applications

Palatal P 69-02 is suited for a wide range of applications. Mouldings made from this resin exhibit excellent mechanical properties, high resistance to heat deformation and high impact resistance. Palatal P 69-02 is particularly suitable for the production of tubes, profiles and tanks in plant construction and for boats and automotive bodies.

Approvals

Cured unreinforced Palatal P 69-02 conforms to type 1140 according to DIN 16946/2 and is classified in group 1B according to EN 13 121-1.

Product specifications upon delivery

Property	Range	Unit	TM
Appearance	clear	-	2265
Colour, Lico 200	0 - 100	APHA	2017
Viscosity	650 - 750	mPa.s	2013
Solids content, IR	65 - 68	%	2033
Cure time from 25 to 35 °C	12 - 17	Min	2625
Cure time from 25 °C to peak	22 - 28	Min	2625
Peak temperature	155 - 175	°C	2625

Remarks

Viscosity measurement: Z2/ 100 s⁻¹/ 23 °C
Reactivity determined with 1.5 g Butanox M 50 (AKZO-Nobel) and 0.5 g Accelerator-NL 49 P (AKZO-Nobel) added to 100 g resin.

Properties of the liquid resin (typical values)

Property	Value	Unit	TM
Density, 23 °C	appr. 1100	kg/m ³	2160
Refractive index	1.5255	-	2150
Flash point	appr. 33	°C	2800
Acid value, as such	20	mg KOH/g	2401
Stability, no init., dark, 25 °C	6	Mon	-

Typical values of cast unfilled resin

Property	Value	Unit	TM
Tensile strength	75	MPa	ISO 527-2
Mod. of elasticity in tension	3.8	GPa	ISO 527-2
Elongation at break	3.4	%	ISO 527-2
Flexural strength	120	MPa	ISO 178
Mod. of elasticity in bending	3.7	GPa	ISO 178
Elongation in flex	4.3	%	ISO 178
Impact res. - unnotched sp.	12	kJ/m ²	ISO 179
Heat deflection temp. (HDT)	90	°C	ISO 75-A
Glass transition temp. (Tg)	125	°C	DIN 53446

Curing conditions

Cured with 1 ml MEK-Peroxide (medium activity) and 0.4 ml Co-oct. solution (1% Co in styrene) added to 100 g resin.

Cured for 24 h at room temperature and post-cured 24 h at 80 °C.

Processing

Palatal P 69-02 does normally not exhibit tack-free cure. To ensure tack-free cure of surfaces exposed to air, suitable additives (e.g. a paraffin solution) should be added.

The final state of cure may be optimized by post-curing at elevated temperatures (e.g. 80 °C) for several hours.

Guidelines before use

The resin should be conditioned at a well defined, application dependant temperature (usually 15 °C minimum for a MEKP/Co cure).

Storage guidelines

The resin should be stored indoors in the original, unopened and undamaged packaging in a dry place at temperatures between 5 °C and 30 °C and the resin might change during storage. Shelf life is reduced at higher temperatures. The shelf life of styrene containing unsaturated polyesters will be significantly reduced when exposed to light. Store in dark and in 100% light tight containers only.

Material Safety

A Material Safety Data Sheet of this product is available on request.



Description

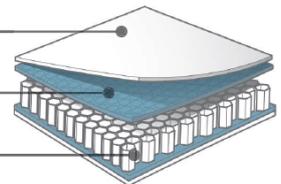


- ▶ Standard product in the range / *Produit standard de la gamme*
- ▶ Perfectly suitable for working up by hand lay-up lamination or spray lay-up / *Adapté à la mise en oeuvre par stratification au contact ou en projection*
- ▶ Non-woven = ideal surface to the resin impregnation by thermo-setting resins / *Non tissé en polyester = surface idéale pour l'imprégnation par des résines thermodurcissables*
- ▶ Plastic film behind the non-woven = waterproof cells and resin consumption limited / *Film plastique sous le non tissé = alvéoles étanches et consommation de résine faible*

non woven / non tissé

Plastic film 50 µm /
Film plastique

Polypropylene honeycomb /
Nid d'abeilles



Applications



- ▶ Nidaplast® 8 is used in many activity sectors: building, transport, boats, facilities... It brings many advantages to structures such as stiffness, lightweight and also shock resistance, water resistance, recyclability,...
- ▶ *Le Nidaplast® 8 est présent dans de nombreux secteurs d'activités: bâtiment, transport, nautisme, équipement... Il apporte aux structures ainsi réalisées de nombreux avantages: rigidité, légèreté mais également résistance aux chocs, insensibilité à l'eau, recyclabilité,...*

Technical data sheet / Fiche technique



Product characteristics / Caractéristiques produit

Dimensions	Truck / Camion : 1220 x 2500 mm / Container : 4 x 7 ft*	
Thickness / Epaisseur	de / from 5 mm à / to 90 mm**	
Cells size / Taille des alvéoles	8 mm	
Density without facing / Densité du nid d'abeille	65 kg/m ³	
Indicative surfacic mass / Masse surfacique indicative	10 mm: 0,8 kg/m ² / 15mm: 1,2 kg/m ² / 20mm: 1,5 kg/m ² / 28 mm: 2,0 kg/m ²	
Coating / Revêtement	nature	weight / grammage
Plastic film / Film plastique	PP	50 µm
Non woven / Non tissé	Polyester	45 g/m ²
Possible processes / Procédés de mise en oeuvre possible	Lamination, spray lay up, gluing / Stratification, projection simultanée, collage	

* Nominal tolerance Length / Tolérance nominale Longueur : +/- 5 mm - Nominal tolerance Width / Tolérance nominale Largeur : +/- 4 mm.
Other dimensions on demand / Autres dimensions sur demande

** Nominal tolerance thickness / Tolérance - épaisseur nominale : +/- 0,5 mm
For smaller nominal tolerance, call us / Pour des tolérances plus serrées, nous consulter





Technical data sheet / Fiche technique



Mechanical characteristics / Caractéristiques mécaniques*

Proprieties / Propriétés	Test method / Selon normes	nidaplast® 8
Compressive strength / Résistance en compression - 20°C	ISO 844	1,2 Mpa
Compressive modulus / Module de compression - 20°C	ISO 844	40 Mpa
Perpendicular tensile strength (at break) / Résistance en traction perpendiculaire (à la rupture) - 20°C	ASTM C297	0,8 Mpa
Shear strength / Résistance en cisaillement - 20°C	ISO 1922	0,4 Mpa
Shear modulus / Module de cisaillement - 20°C	ISO 1922	9 Mpa
Water resistance, % retention of shear strength / Résistance à l'eau, % de maintien de la résistance au cisaillement - 20°C	ASTM C393	~ 100%**
Heat resistance for honeycombs core th. 20 mm / Résistance thermique de l'âme nid d'abeilles ép. 20mm		R = 0,3 m ² .°C/W (soit λ = 0,067 W/(m.°C))
Heat resistance for honeycombs core th. 90 mm / Résistance thermique de l'âme nid d'abeilles ép. 90mm		R = 0,6 m ² .°C/W (soit λ = 0,14 W/(m.°C))
Behaviour with fire / Réaction au feu	Standard quality inflammable. Possibility of M1/F0 classification for finished sandwich panels, depending on the sandwich skin / Produit inflammable. Possibilité de classement M1/F0 du panneau sandwich fini, en fonction de la peau du sandwich	
Chemical properties / Résistance aux agents chimiques	Excellent resistance to water and most acids, bases and salt solutions / Excellente résistance à l'eau à la plupart des acides, bases et solutions de sels	
Resistance to U.V. rays / Résistance aux U.V.	The longevity for the core's storage is guaranteed by a anti U.V. - U.V. protection of the finished panel is ensured by the skins of the sandwich pane / La longévité au stockage de l'âme est garantie par un anti-UV - La protection aux U.V du produit fini est assurée par les peaux du panneau sandwich	

* : données moyennes pour une épaisseur de 20mm. Les caractéristiques varient avec l'épaisseur. Nous consulter pour plus d'informations / Data for a 20mm thickness. Characteristics vary with the thickness. Please call us for further information.

** compte tenu de la nature du produit, il est admis qu'il n'absorbe pas d'eau (ou qu'une très faible quantité d'eau) / It is assumed that the material does not absorb water (or just a very small quantity)

NOTA : Les valeurs indiquées dans cette fiche peuvent servir de guide à l'utilisation du produit et ne doivent être considérées ni comme des limites de spécification, ni comme des garanties. Par ailleurs, l'application, l'utilisation et/ou la transformation des produits échappent à nos possibilités de contrôle et, en conséquence, relèvent exclusivement du domaine de la responsabilité de l'utilisateur et/ou transformateur / The indicated directions can serve as a guide to use the product but cannot be considered as a guarantee of a good working up. Additionally application, utilization and/or transformation of the products escape our control possibilities. As a consequence, they exclusively remain the responsibility of the user and/or the transformer



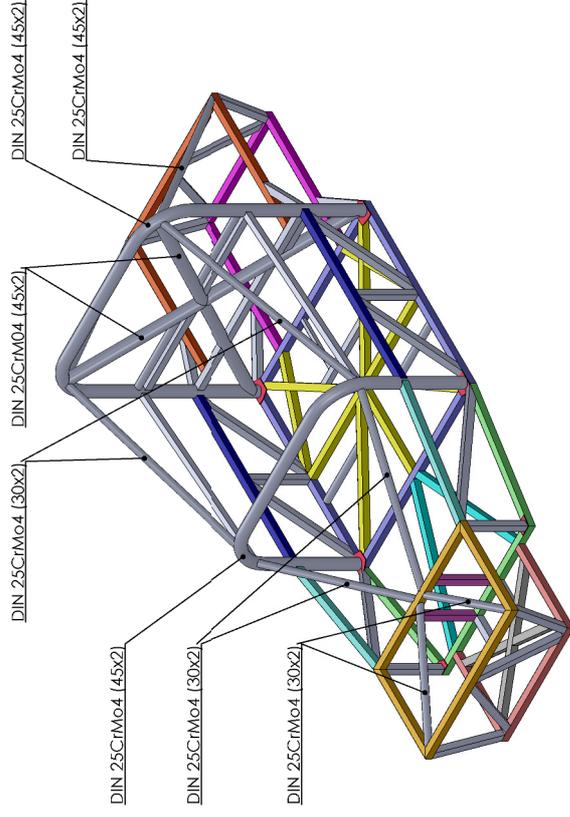
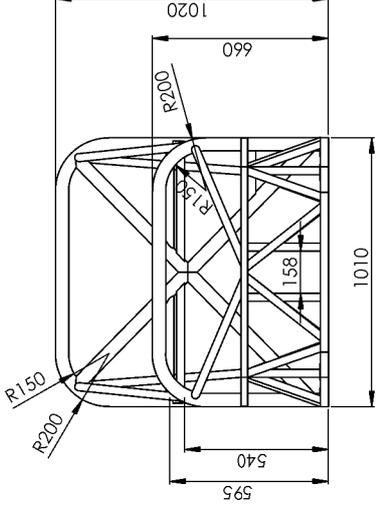
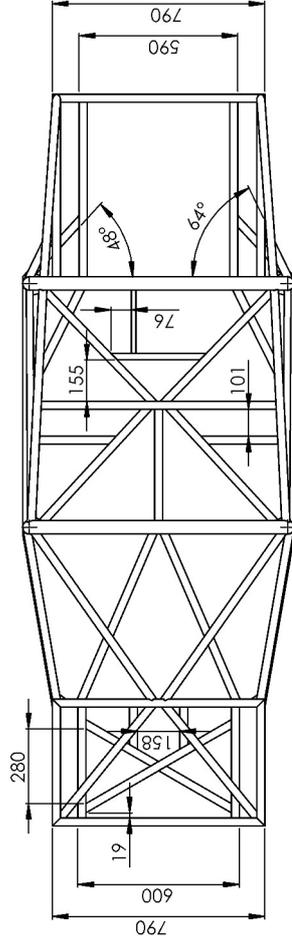
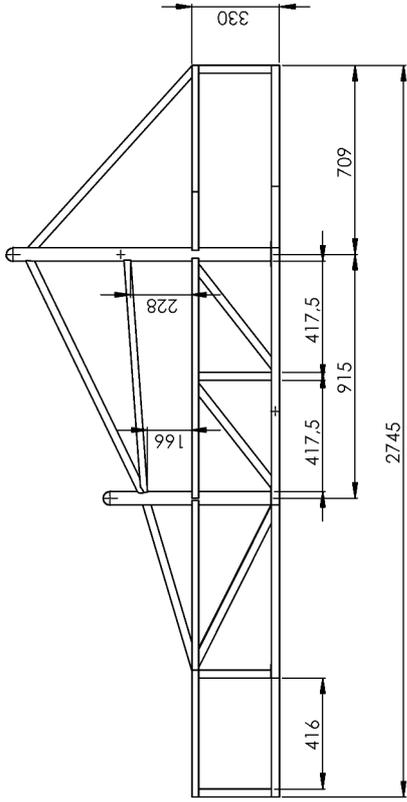
NIDAPLAST - Rue Paul Vaillant Couturier - F - 59224 THIANT - France - Tél.: +33 (0)3 27 44 72 00 - Fax.: +33 (0)3 27 44 88 02 - contact@nidaplast.com



FT Nidaplast 8 - v1 - 04/2014

ANEXO IV

DESENHOS TÉCNICOS



ANEXO IV.1
Desenho de Fabrico da Estrutura Tubular de Referência

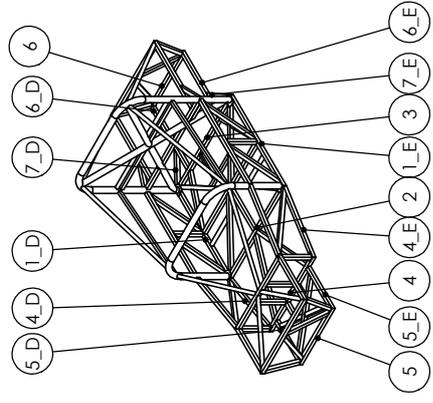
Tolerancias:
 ISO 13920 - BF

Material
 DIN-ST37
 DIN 25CrMo4 - Tubos assinalados

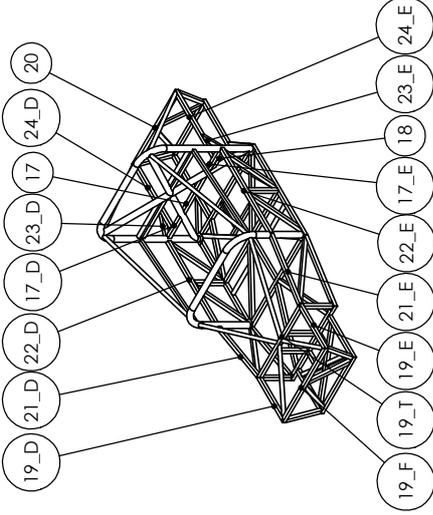
Observações:

Só estão representadas as cotas necessárias para o desenho da estrutura em composto
 Desenho fora de Escala

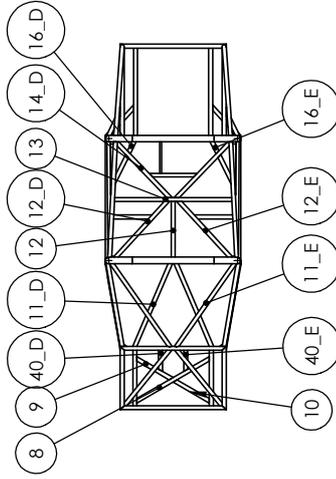
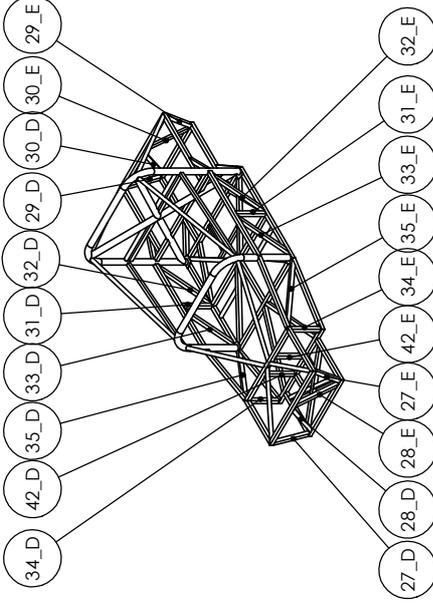
1. PLANO 0 (TUBOS HORIZONTAIS)



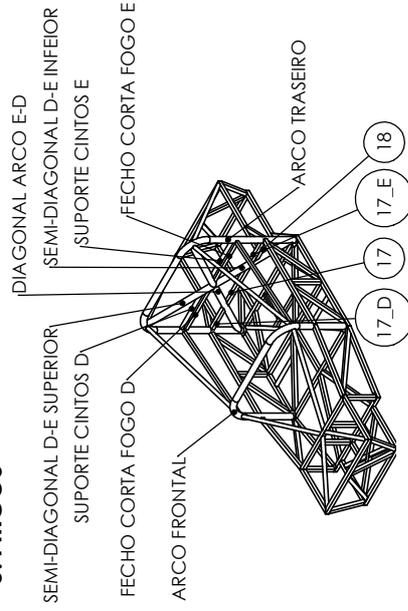
2. PLANO 1 (TUBOS HORIZONTAIS)



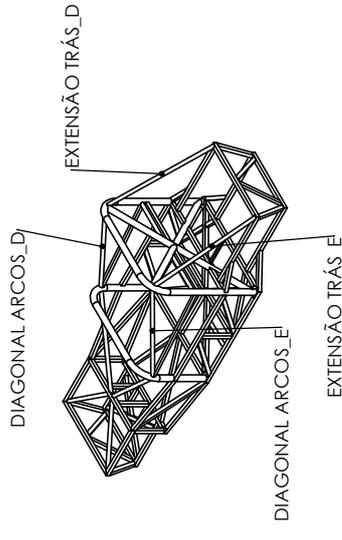
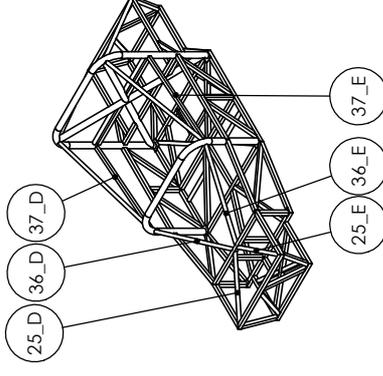
3. TUBOS VERTICAIS



5. ARCOS



4. DIAGONAIS



ANEXO IV.2

Desenho Estrutura Tubular de Referência

(Posicionamento dos Tubos no Gabarito de Soldadura)

Material

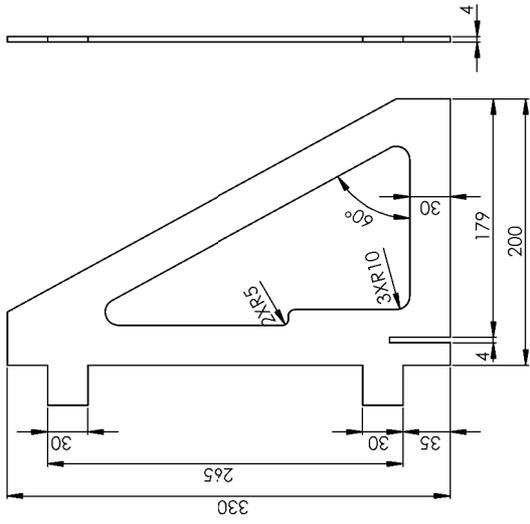
DIN-ST37

DIN 25CrMo4 - Tubos assinalados

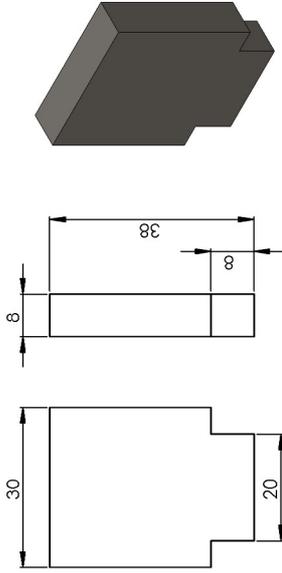
Observações:

Desenho fora de Escala

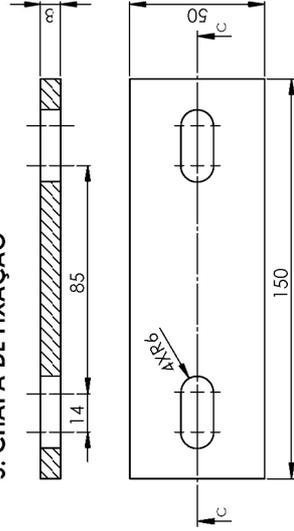
2. ESQUADRO DE POSICIONAMENTO



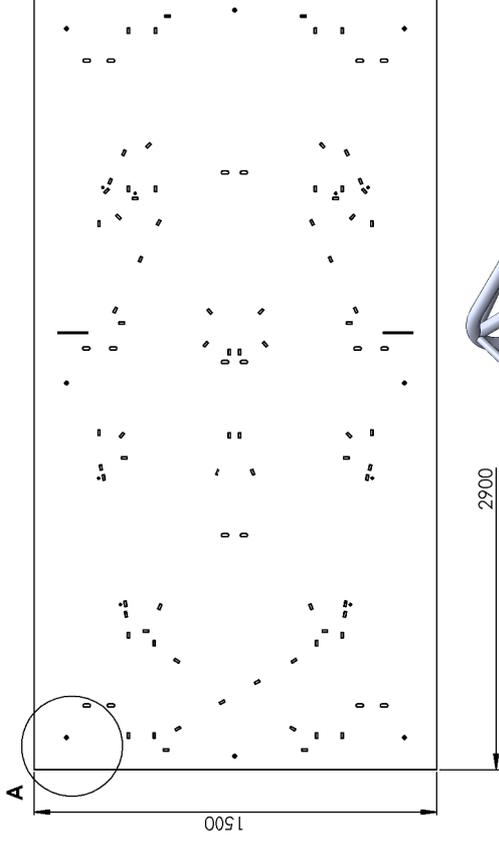
4. BATENTE GUIA



5. CHAPA DE FIXAÇÃO



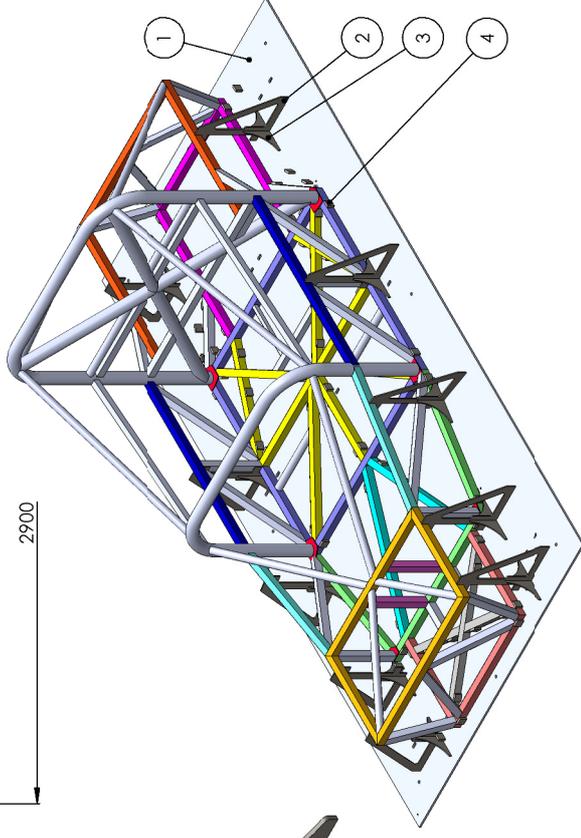
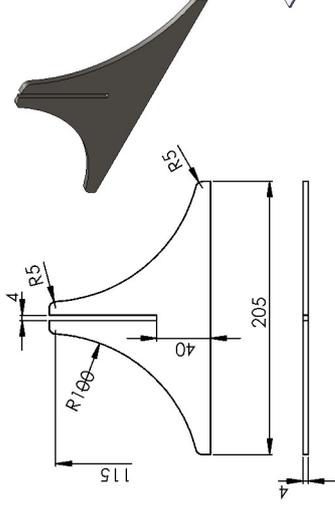
1. MESA DO GABARI CHAPA 8 mm



Rasgo para posicionamento aos batentes guia
Furo para fixação

(ESCALA 1:5)

3. BASE DE ESQUADRO



ANEXO IV.3

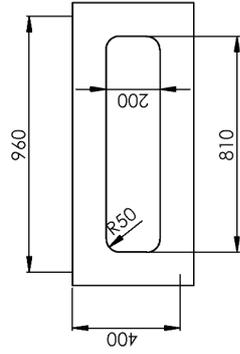
Desenhos dos Componentes do Gabari de Soldadura da Estrutura Tubular

Tolerâncias
ISO 2768-mK

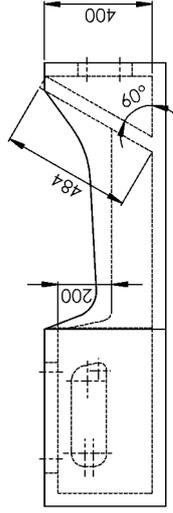
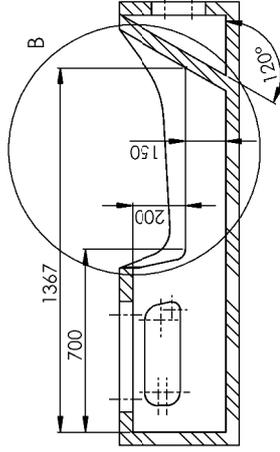
Material
DIN-ST37

Observações:
Desenho fora de Escala

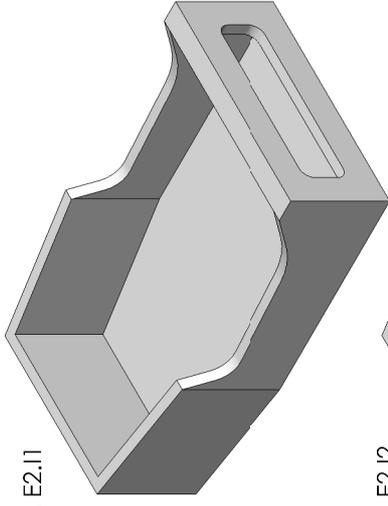
ESTRUTURA E2.I3.2



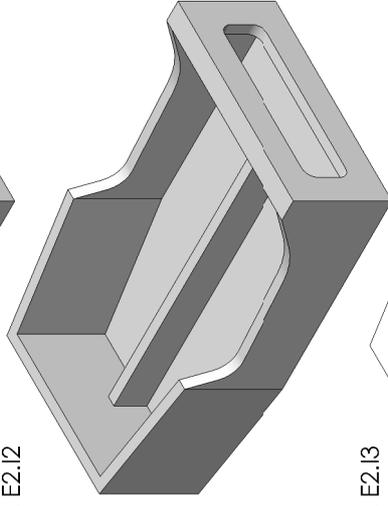
Corte N-N



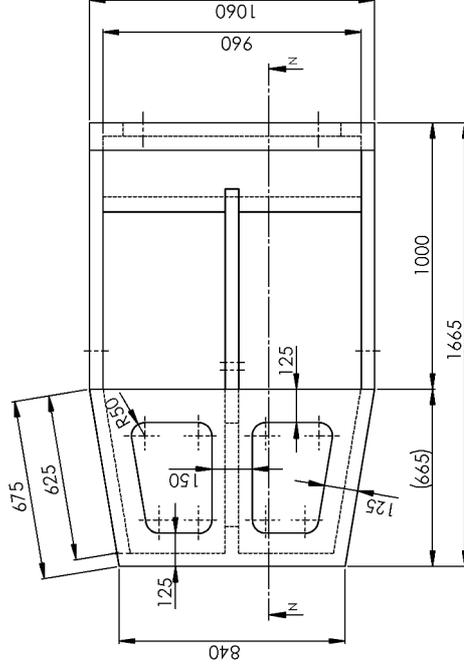
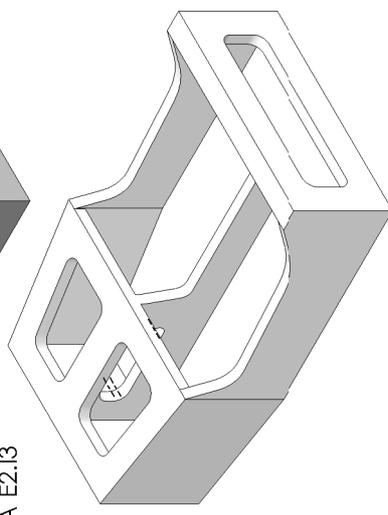
ESTRUTURA E2.I1



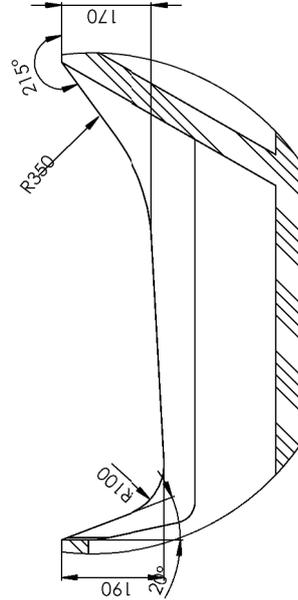
ESTRUTURA E2.I2



ESTRUTURA E2.I3



B (ESCALA 1 : 5



ANEXO IV.4
Desenho das Estruturas em Compósito E2.I1, E2.I2, E2.I3 e E2.I3.2

Material

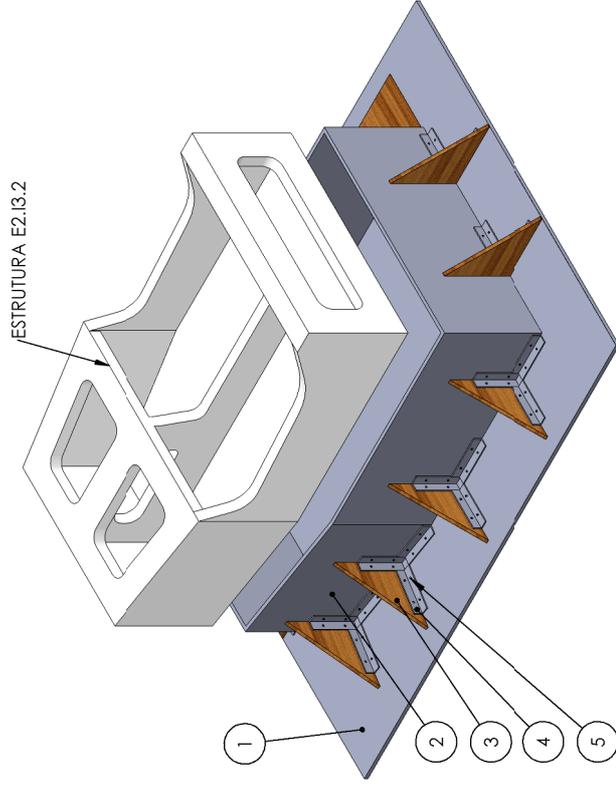
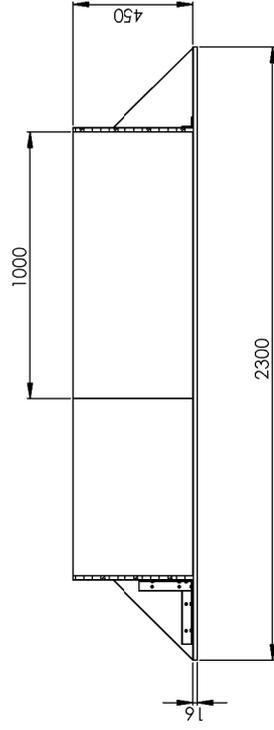
Sandwich PP/FV

Sandwich com núcleo em Ninho de Abelha de Polipropileno (e=50mm) e peles em resina de Poliéster Insaturado reforçadas com Fibra de Vidro

Observações:

Desenho fora de Escala

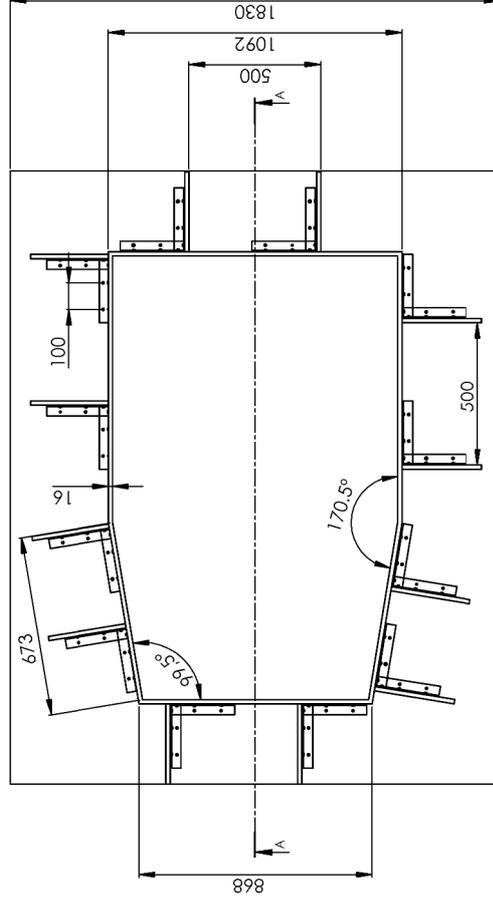
Corte A-A



MOLDE EM MDF (SUPERFÍCIE INTERIOR LAMINADA)

LEGENDA:

1. PLACA INFERIOR DO MOLDE (MDF 16 mm)
2. PLACA MOLDE (MDF 16 mm)
3. REFORÇOS EM MADEIRA
4. CANTONEIRAS EM PERFIL PULTRUDIDO
5. PARAFUSO CABEÇA DE EMBEBER M6X40 (ROSCA PARA MADEIRA)



ANEXO IV.5

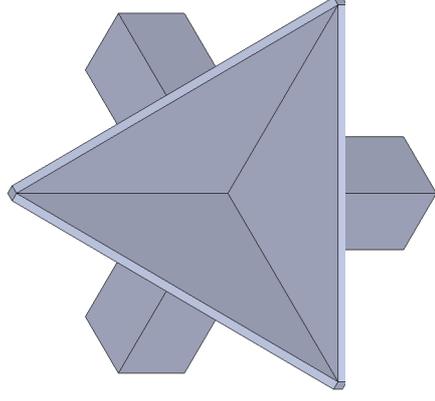
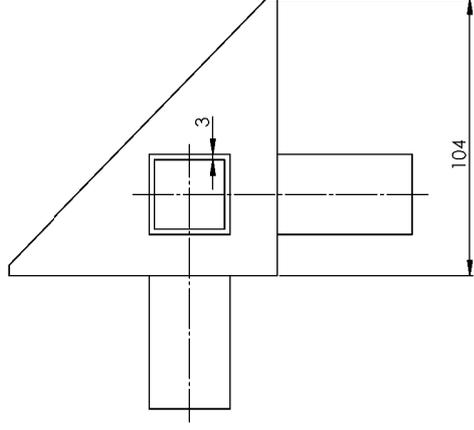
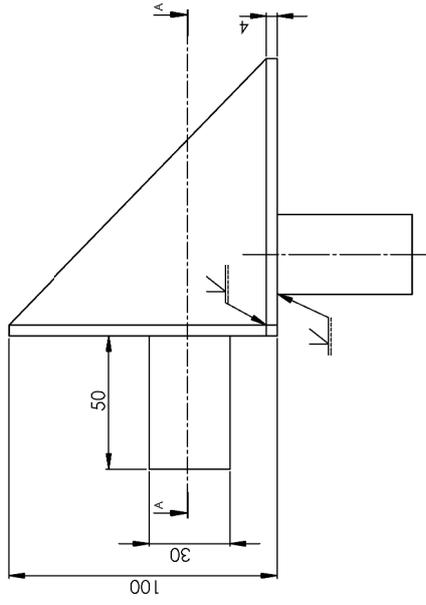
Desenho do Molde para fabrico da Estrutura em Compósito E2.13.2

Material

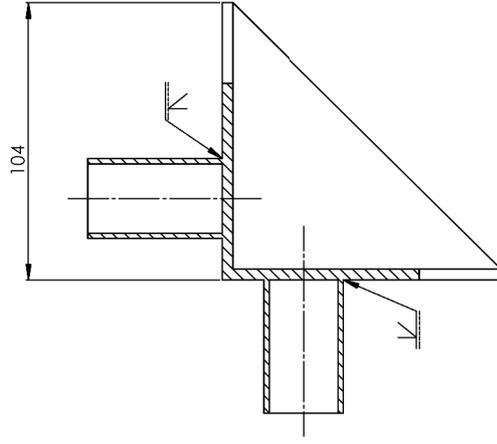
MDF (Laminado de um dos lados)

Observações:

Desenho fora de Escala



CORTE A-A



ANEXO IV.6
Accessório para Fixação da Estrutura E2.13.2 na Mesa de Ensaio

Tolerâncias
 ISO 13920 - BF

Material
 DIN ST-37

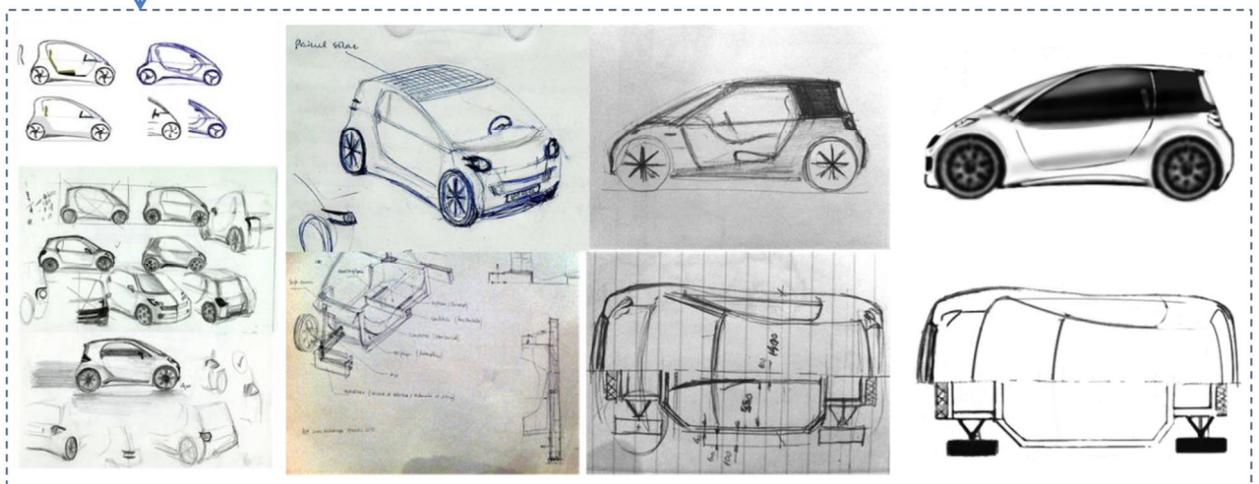
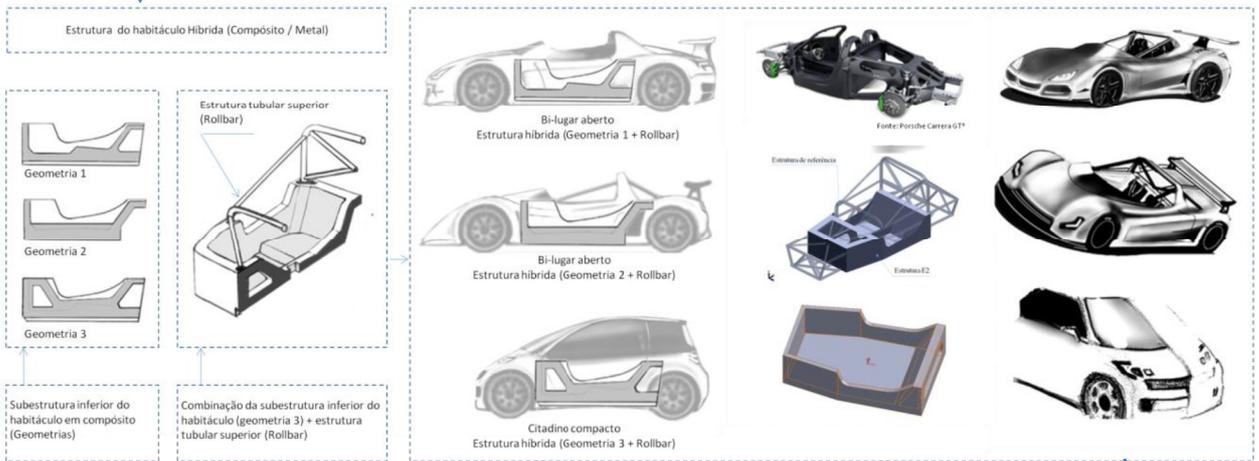
Observações
 Desenho fora de Escala



VEÍCULO DE REFERÊNCIA

ESTUDO DE ESTRUTURA LEVE

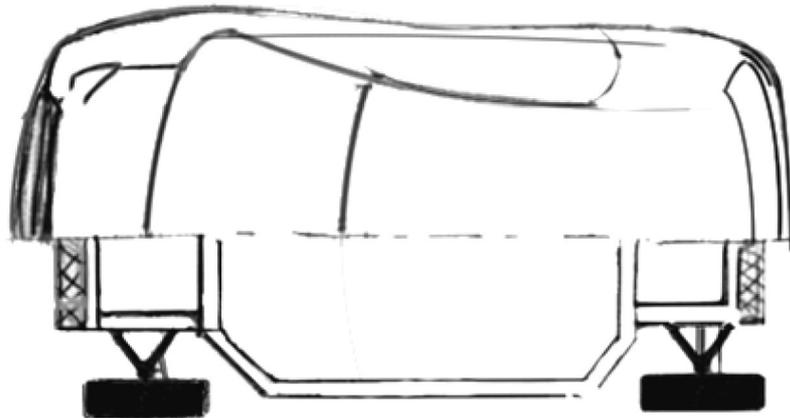
Compatível com diferentes tipos de veículos – Plataforma Comum



VEÍCULO CIDADINO COMPACTO DE BAIXO CUSTO (ULCC)

ANEXO IV.7

Esboços dos Veículos e das Estruturas Híbridas (Compósito/Metal) Estudadas



ESPECIFICAÇÕES PARA VEÍCULO CIDADINO COMPACTO

Tipo:	Citadino com 2 lugares
Dimensões (m):	2,5 x 1,4 x 1,55
Peso (kg):	500
Diâmetro de viragem (m):	6
Motor:	Elétrico
Potência (cv):	50
Binário (Nm):	55
Chassis:	Compósito + tubular
Carroçaria:	Patineis em plástico
Segurança ativa:	ABS
Segurança passiva:	Airbag, crash box frontal e traseira
Suspensão frente:	Triângulos sobrepostos com barra estabilizadora
Suspensão traseira:	Triângulos sobrepostos com barra estabilizadora
Direção:	Pinhão e cremalheira
Capacidade da Bagageira:	150 a 400* litros (suprimindo 1 lugar)
Velocidade máxima:	100 km/h
Autonomia:	Mínimo 100 km

ANEXO IV.8

Esboço e Especificações para Veículo Citadino Compacto com Estrutura Híbrida