



M 2015

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CÁLCULO E PROJETO DE BANCO PARA AUTOMÓVEL DESPORTIVO EM MATERIAIS COMPÓSITOS

MANUEL DANIEL DA MOTA MAGALHÃES
DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Cálculo e projeto de banco para automóvel desportivo em materiais compósitos

Manuel Daniel da Mota Magalhães

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. António Tomé Ribeiro



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

2015-02-06

À minha família e amigos

Resumo

A presente dissertação aborda os pontos mais relevantes quando se projeta um componente estrutural, como é o caso de um banco para um automóvel desportivo, recorrendo ao uso de materiais compósitos.

O aumento constante do preço do petróleo e os regulamentos cada vez mais rigorosos em relação ao nível das emissões e do impacto ambiental são hoje os principais fatores que impulsionam os fabricantes de automóveis em todo o mundo a fazer esforços redobrados na descoberta de materiais leves. Neste trabalho, a atenção foi focada no uso de materiais inovadores, tais como os materiais compósitos de matriz termoendurecível, mais especificamente epóxido devido à sua elevada resistência à fadiga, baixa densidade e facilidade de fabricação reforçados com fibras de carbono, de vidro e kevlar.

Numa etapa inicial é realizado um estudo teórico dos materiais compósitos, mais especificamente os materiais de matriz polimérica de forma a estudar as suas propriedades e avaliá-los tendo em conta os objetivos para aplicação em estudo. Como ponto de comparação de materiais compósitos com materiais metálicos são utilizados o alumínio e o magnésio por se tratarem de ligas de baixa densidade e elevada resistência.

Para o dimensionamento estrutural foi utilizado o *software* de elementos finitos *abaqus*, o qual permite a obtenção do estado de tensão e deformação em qualquer ponto da estrutura dimensionada. Assim permite a comparação entre os resultados dos vários materiais utilizados neste estudo.

Dos resultados apresentados percebe-se que existe dependência entre a tensão máxima obtida na estrutura, a espessura, a orientação das fibras e o tipo de material.

São estudados dois modelos, sendo que o modelo dois apresenta melhor combinação de propriedades a nível resistência e leveza.

Calculation and design of a seat for a sports car in composite materials

Abstract

This dissertation address the most relevant points when designing a structural component, such as a seat for a sports car, using composite materials.

The steady increase in petroleum prices and the progressively rigorous regulations regarding the level of emissions and environmental impact are now the main factors driving the car manufacturers around the world to make greater efforts in the discovery of lightweight materials. In this work, attention has fixated on the use of innovative materials, such as thermosets matrix composites, more specifically epoxy due to its high fatigue strength, low density and ease of manufacture, reinforced with carbon, glass and Kevlar fibers.

In an initial stage is performed a theoretical study of composite materials, more specifically the polymeric matrix material in order to study their properties and evaluate them with regard to the objectives in study. As a point of comparison with composite materials are used metallic materials such as aluminum and magnesium because they are low density and high strength alloys.

For structural design was used ABAQUS that is a finite element software. This program allows to obtain the state of stress and strain at any point of the scaled frame. Thus allows as to do evaluations between the results of the various materials used in this study.

From the results presented it is observed that there is dependence between the maximum stress obtained in the structure, thickness, fiber orientation and type of material.

Two models were studied, and was possible to conclude that the model two has the best combination of strength and lightness level properties.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a todos os que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho. Uma palavra de apreço a todos os meus colegas e amigos que, mesmo sem saberem, ajudaram-me muito ao longo da minha vida.

Ao meu amigo Hugo Ramos e à minha namorada Isabel por todo o apoio prestado no decorrer destes anos.

Ao meu orientador professor Tomé Ribeiro, aos engenheiros Frederico Tomé Ribeiro e Rui Amaral por todo o auxílio prestado ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais que tornaram tudo isto possível. Que me deram todo o suporte e me apoiaram em todos os momentos.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Organização e temas abordados no presente relatório	2
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Fundamentos da Mecânica dos Materiais.....	5
2.1.1	Mecânica da fratura	5
2.1.2	Deformação plástica	6
2.1.3	Fadiga em compósitos.....	7
2.1.4	Critérios de rotura	9
2.1.5	Análise das Resistências	10
2.2	Situação dos materiais na indústria	12
2.2.1	Uso de plásticos e compósitos em relação aos materiais convencionais	12
2.2.2	Área de utilização dos materiais compósitos	13
2.2.3	A problemática da substituição de materiais na indústria automóvel.....	15
2.2.3.1	Evolução dos materiais compósitos em aplicações automóveis	17
2.2.4	Desafios da indústria automóvel devido às fibras de carbono	18
2.2.5	Banco para automóveis	20
2.2.5.1	Estrutura do banco em magnésio	20
2.2.5.2	Banco uma parte importante de segurança	21
2.2.5.3	Porsche 918 <i>Spyder</i>	22
2.2.5.4	Marcas construtoras de bancos desportivos.....	22
2.3	Materiais Compósitos, fabricação e final de vida dos materiais	23
2.3.1	Matriz	25
2.3.1.1	Compósitos de matriz termoplástica	25
2.3.1.2	Compósitos de matriz termoendurecíveis	27
2.3.2	Reforço	28
2.3.2.1	Fibra de vidro	30
2.3.2.2	Fibra de carbono	31
2.3.2.3	Fibras Aramídicas	32
2.3.2.4	Fibras de boro	32
2.3.3	Cargas	33
2.3.4	Aditivos	33
2.3.5	Processamento das formas dos produtos: tecidos e pré-formas	34
2.3.6	Processos de fabrico	36
2.3.6.1	Moldação por vácuo.....	37
2.3.6.2	Moldação por injeção.....	38

2.3.6.3	Moldação em Autoclave	41
2.3.6.4	Moldação por compressão a quente	42
2.3.7	Reciclagem de materiais compósitos	43
2.3.8	Compósitos naturais	44
2.3.8.1	Limitações das fibras naturais.....	45
2.3.9	Maquinagem de materiais compósitos.....	46
2.3.9.1	Furação de materiais compósitos	46
2.3.9.2	Corte de materiais compósitos.....	47
2.3.10	Ligações em materiais compósitos.....	47
2.3.10.1	Ligações aparafusadas e rebitadas	48
2.3.10.2	Ligações coladas	48
2.3.10.3	Ligações por fusão.....	49
3	Projeto e considerações na seleção de materiais	51
3.1	Constantes de engenharia	52
3.2	Propriedades dos materiais.....	53
3.2.1	Descrição das propriedades dos materiais	53
3.2.2	Resistência à fratura	55
3.2.3	Resistência à fadiga.....	56
3.2.4	Cedência.....	56
3.2.5	Rigidez.....	57
3.2.5.1	Módulo de <i>Young</i>	57
3.3	Projeto e simulação estrutural com materiais compósitos.....	58
3.4	Moldação de materiais compósitos	59
4	<i>Design</i> e resultados numéricos	61
4.1	Etapas de projeto e soluções propostas	61
4.1.1	Modelo 1	61
4.1.2	Modelo 2	62
4.2	Simulações em <i>Abaqus</i>	63
4.3	Propriedades dos materiais utilizados nas simulações	64
4.3.1	Ligas	64
4.3.2	Materiais compósitos	64
4.4	Condições de Fronteira	65
4.5	Forças aplicadas	65
4.5.1	Simulação estática.....	65
4.5.1.1	Modelo 1	66
4.5.1.2	Modelo 2	66
4.5.2	Simulação dinâmica.....	67
4.5.2.1	Aceleração longitudinal e em curva	67

4.6	Malha	69
4.6.1	Análise de convergência.....	70
5	Resultados das simulações em <i>Abaqus</i>	75
5.1	Simulação estática	75
5.1.1	Modelo 1	75
5.1.1.1	Resultados variando a orientação das fibras	76
5.1.1.2	Resultados reforçando o ponto crítico.....	79
5.1.2	Modelo 2	80
5.1.2.1	Resultados variando a orientação das fibras	80
5.1.2.2	Resultados reforçando o ponto crítico.....	82
5.2	Simulação dinâmica	83
5.2.1	Modelo 1	83
5.2.1.1	Aceleração longitudinal	83
5.2.1.2	Aceleração em curva	85
5.2.2	Modelo 2	87
5.2.2.1	Aceleração longitudinal	87
5.2.2.2	Aceleração em curva	89
5.3	Rigidez dos modelos	92
5.3.1	Resultados das simulações estáticas	93
5.3.2	Resultados das simulações Dinâmicas.....	94
5.3.2.1	Aceleração em curva	94
5.3.2.2	Aceleração longitudinal	95
6	Discussão dos resultados	97
6.1	Propriedades do material	97
6.1.1	Propriedades mecânicas	97
6.1.1.1	Modelo 1	98
6.1.1.2	Modelo 2	104
6.1.2	Propriedades físicas e preço	109
6.2	Orientação das fibras	110
6.3	Espessura do modelo.....	112
6.4	Modelo	113
6.5	Comparação das ligas metálicas com o carbono (IM6) epóxico	115
6.5.1	Propriedades mecânicas	116
6.5.2	Propriedades físicas e preço	116
7	Conclusões e Trabalhos futuros	119
7.1	Conclusões	119
7.2	Trabalhos futuros	121

Referências bibliográficas	123
Anexo A: Simulação com outros materiais e espessuras diferentes	125
Anexo B: Figuras complementares dos resultados.....	131
Anexo C: Figuras complementares do critério de <i>Hashin</i>	139

Siglas

HDT – Temperatura de deflexão sob carga

VRI - *Vacuum Resin Infusion*

VIP - *Vacuum Infusion Process*

VARTM - *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*

RI - *Resin Infusion*

RIFT - *Resin infusion under flexible tooling*

SCRIMP - *Seeman Composites Resin Infusion Molding Process*

CVI - *Controlled Vacuum Infusion*

RTM - *Resin Transfer Moulding*

SRIM - *Structural Reaction Injection Moulding*

RRIM – *Reinforced Reaction Injection Moulding*

FIA - *International Automobile Federation*

CFRP - *Carbon fibers reinforced polymers*

G_{12} ou G_{23} - Módulos de corte no plano e fora do plano (MPa)

E_1 - Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)

E_2 - Módulos de elasticidade transversal (MPa)

ν_{xy} - *Coefficiente de Poisson*

S_{11} – Tensão máxima ao longo do eixo x.

S_{22} - Tensão máxima ao longo do eixo y.

S_{12} – Tensão máxima de corte.

Índice de Figuras

Figura 1. Deformação elástica e plástica de um material carregado para além do limite elástico (Silva 2012).	6
Figura 2. Determinação da tensão alternada para uma tensão média diferente de “0” usando os critérios de Soderberg, Goodman e Gerber (Silva 2012).	8
Figura 3. Exemplos da aplicação do método tensão máxima (Marques 2014).	9
Figura 4. Uso industrial de critérios de rotura em compósitos (Marques 2014).	10
Figura 5. Modos básicos de solitação da camada (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	11
Figura 6. Consumo Mundial: a) em peso (milhões de toneladas) e b) em volume (milhões m ³).	12
Figura 7. Algumas peças do automóvel produzidas em materiais compósitos, adaptado de (Teixeira 2014)	14
Figura 8. Utilização de compósitos na Europa (Yang et al. 2012).	15
Figura 9. Consumo de energia durante o ciclo de vida (Jambor e Beyer 1997).	16
Figura 10. Impacto no consumo de combustível (Jambor e Beyer 1997).	16
Figura 11. Primeiro <i>Corvette</i> (Corvette 1953).	17
Figura 12. Estrutura do banco em magnésio (Jambor e Beyer 1997).	20
Figura 13. Polímero reforçado com fibra de vidro elimina a necessidade de estrutura de aço (Stewart 2010).	21
Figura 14. Bancos do <i>Porsche 918</i> em compósitos (Company, amp, e Porsche Cars North America 2014).	22
Figura 15. Bancos <i>recaro</i> em polímero reforçados com fibra (Tweeks 2014).	22
Figura 16. Banco <i>sparco</i> (Tweeks 2014).	23
Figura 17. Classificação dos materiais compósitos com base na matriz (Yang et al. 2012).	25
Figura 18. Classificação dos materiais compósitos com base no reforço (Yang et al. 2012).	28
Figura 19. Tecido plano (Azevedo 2008).	34
Figura 20. Tecido <i>twill</i> (Azevedo 2008).	34
Figura 21. Tecido cetim (Azevedo 2008).	35
Figura 22. Esquema de produção do pré-impregnados (handbook 1997).	35
Figura 23. Esquema do processo de moldação por vácuo (Almeida 2013).	37
Figura 24. Processo RTM (Alvino 2012).	39
Figura 25. Representação esquemática do processo de SCRIMP (Almeida 2013).	40
Figura 26. Esquema da montagem para a realização de SCRIMP (Almeida 2013).	40
Figura 27. Colocação do rolo corretamente (Berger 2011).	42
Figura 28. Infusão de resina durante o processo SMC (Berger 2011).	42
Figura 29. Processo SMC (F.C.Campbell 2004).	43
Figura 30. Juntas com furo de sobreposição simples (a) e de sobreposição dupla (b) (Marques 2014).	48

Figura 31. Tipos de juntas coladas mais comuns (Marques 2014).....	49
Figura 32. Requisitos da estrutura de um veículo (Jambor e Beyer 1997).	51
Figura 33. Resistência à fratura dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).....	55
Figura 34. Índice de mérito de resistência representado num gráfico de tensão de cedência vs densidade (Silva 2012).....	56
Figura 35. Módulo de elasticidade de alguns materiais em GPa (Biron 2014).	57
Figura 36. Índices de mérito representados num gráfico módulo de Young vs densidade (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).....	58
Figura 37. Vista superior do banco original.....	61
Figura 38. Modelo 2, A) Vista superior; B) Vista lateral.	62
Figura 39. Condições de fronteiras aplicadas (Abaqus/CAE 2014).	65
Figura 40. Pressão aplicada no modelo 1 (Abaqus/CAE 2014).	66
Figura 41. Azul exemplifica a área de aplicação da pressão aplicada em curva.	67
Figura 42. Círculo de aceleração.....	68
Figura 43. Forma de elementos finitos.....	70
Figura 44. Malha <i>triangles</i> utilizado no modelo 1 (Abaqus/CAE 2014).	72
Figura 45. Ponto crítico do banco (Abaqus/CAE 2014).	75
Figura 46. Reforço da estrutura.	79
Figura 47. Tensão máxima para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	131
Figura 48. Deslocamento máximo para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	132
Figura 49. Tensão S_{11} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).	132
Figura 50. Tensão S_{22} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).	133
Figura 51. Tensão S_{12} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).	133
Figura 52. Tensão máxima para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	134
Figura 53. Deslocamento máximo para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014)	134
Figura 54. Tensão S_{11} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).	135
Figura 55. Tensão S_{22} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014)	135
Figura 56. Tensão S_{12} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).	136
Figura 57. Tensão máxima para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	136
Figura 58. Deslocamento máximo para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014)	137
Figura 59. Tensão S_{11} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).	137
Figura 60. Tensão S_{22} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).	138
Figura 61. Tensão S_{12} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).	138
Figura 62. Critério de <i>Hashin</i> , fibra de carbono à tração (Abaqus/CAE 2014).....	139

Figura 63. Critério de <i>Hashin</i> , fibra de carbono à compressão (Abaqus/CAE 2014)	139
Figura 64. Critério de <i>Hashin</i> , matriz epóxico à tração (Abaqus/CAE 2014)	140
Figura 65. Critério de <i>Hashin</i> , matriz epóxico à compressão (Abaqus/CAE 2014).....	140

Índice de Tabelas

Tabela 1. Tensões de rotura de alguns compósitos unidirecionais (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	11
Tabela 2. Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça, adaptada a partir (Moura, Morais, e Magalhães 2011) e (Ces EduPack 2014).	24
Tabela 3. Caraterização de alguns termoplásticos (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	26
Tabela 4. Caraterização de algumas matrizes termoendurecíveis (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	27
Tabela 5. Comparação de propriedades entre termoplásticos e termoendurecíveis (Almeida 2013).	28
Tabela 6. Caraterização de alguns reforços (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	29
Tabela 7. Propriedades de alguns tipos de fibra de vidro (Moura, Morais, e Magalhães 2011), (Biron 2014) e (Ces EduPack 2014).	30
Tabela 8. Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	31
Tabela 9. Propriedades mecânicas de fibras aramídicas (Moura, Morais, e Magalhães 2011) e (Ces EduPack 2014).	32
Tabela 10. Propriedades mecânicas de fibras de boro em função do seu diâmetro (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	33
Tabela 11. Propriedades das fibras de vidro e de diversas fibras naturais (Ces EduPack 2014).	45
Tabela 12. Propriedades físicas e mecânicas de algumas resinas termoendurecíveis.	53
Tabela 13. Propriedades mecânicas de alguns compósitos (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	54
Tabela 14. Propriedades físicas e mecânicas do alumínio e magnésio (Biron 2014).	64
Tabela 15. Propriedades do Carbono (IM6) / Epóxico, E-G / Epóxico e Kevlar 49 / Epóxico (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	64
Tabela 16. Esforço provocado pela aceleração longitudinal e em curva para o modelo 1.	69
Tabela 17. Esforço provocado pela aceleração longitudinal e em curva para o modelo 2.	69
Tabela 18. Valores de análise de convergência, forma do elemento (<i>Triangles</i>) (P = 0,002203 MPa).	70
Tabela 19. Valores de análise de convergência, forma do elemento (<i>Quadrilaterais</i>) (P = 0,002203 MPa).	71
Tabela 20. Valores de análise de convergência, forma do elemento (<i>Quadrilaterais</i>) (P = 0,001886 MPa).	73
Tabela 21. Valores de análise de convergência, forma do elemento (<i>Triangles</i>) (P = 0,001886 MPa).	73
Tabela 22. Resultados do modelo 1 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).	76
Tabela 23. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).	77
Tabela 24. Resultados do modelo 1 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).	77
Tabela 25. Tensões no ponto crítico da E-G / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	77
Tabela 26. Resultados do modelo 1 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).	78
Tabela 27. Tensões no ponto crítico da Kevlar 49 / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	78
Tabela 28. Resultados do modelo 1 com reforço variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).	79

Tabela 29. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	80
Tabela 30. Resultados do modelo 2 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).	80
Tabela 31. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).	81
Tabela 32. Resultados do modelo 2 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).	81
Tabela 33. Tensões no ponto crítico da E-G / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	81
Tabela 34. Resultados do modelo 2 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).	82
Tabela 35. Tensões no ponto crítico da Kevlar 49 / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	82
Tabela 36. Resultados do modelo 2 com espessura 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	82
Tabela 37. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	83
Tabela 38. Resultados do modelo 1 espessura 3 mm, aceleração longitudinal (Abaqus/CAE 2014).	83
Tabela 39. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).	84
Tabela 40. Resultados do modelo 1 espessura 3 e 4 mm, aceleração longitudinal (Abaqus/CAE 2014).	84
Tabela 41. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	84
Tabela 42. Resultados do modelo 1 espessura 3 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).	85
Tabela 43. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).	85
Tabela 44. Resultados modelo 1 espessura 3 e 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).	85
Tabela 45. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	86
Tabela 46. Resultados modelo 1 espessura 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).	86
Tabela 47. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	86
Tabela 48. Resultados modelo 1 espessura 4 e 5 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).	87
Tabela 49. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 4 e 5 mm (Abaqus/CAE 2014).	87
Tabela 50. Resultados do modelo 2 espessura 3 mm, aceleração longitudinal (Abaqus/CAE 2014).	87
Tabela 51. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).	88
Tabela 52. Resultados modelo 2 espessura 3 e 4 mm, aceleração longitudinal (Abaqus/CAE 2014).	88
Tabela 53. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	88
Tabela 54. Resultados do modelo 2 espessura 3 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).	89
Tabela 55. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).	89
Tabela 56. Resultados modelo 2 espessura 3 e 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).	90
Tabela 57. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	90
Tabela 58. Resultados modelo 2 espessura 3 e 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).	90
Tabela 59. Tensões no ponto crítico do E-G / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	91
Tabela 60. Resultados modelo 2 espessura 3 e 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).	91
Tabela 61. Tensões no ponto crítico do Kevlar 49 / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).	91

Tabela 62. Resultados do modelo 2 para as ligas de alumínio e magnésio com espessura 4 mm (Abaqus/CAE 2014).....	91
Tabela 63. Resultados do modelo 2 para as ligas de alumínio e magnésio com espessura 5 mm (Abaqus/CAE 2014).....	92
Tabela 64. Valores de α para o material C (IM6) / Epóxico (simulação estática).	93
Tabela 65. Valores de α para o material E-G / Epóxico (simulação estática).	93
Tabela 66. Valores de α para o material Kevlar 49 / Epóxico (simulação estática).	93
Tabela 67. Valores de α para o material C (IM6) / Epóxico (simulação dinâmica, acel. Em curva).	94
Tabela 68. Resultados da aplicação do critério de rotura de <i>Hashin</i>	94
Tabela 69. Valores de α para o material E-G / Epóxico e Kevlar 49 / Epóxico (simulação dinâmica, acel. Em curva).	95
Tabela 70. Valores de α para o material C (IM6) / Epóxico (simulação dinâmica, acel. longitudinal).	95
Tabela 71. Propriedades físicas e preço (Ces EduPack 2014).	109
Tabela 72. Propriedades físicas e preço (Ces EduPack 2014).	116
Tabela 73. Resultados do modelo 1 para as ligas de alumínio e magnésio (Abaqus/CAE 2014).	125
Tabela 74. Resultados do modelo 1 utilizando espessura de 2 [mm] (Abaqus/CAE 2014).	125
Tabela 75. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	126
Tabela 76. Resultados do modelo 1 utilizando espessuras de 2 e 3 [mm] (Abaqus/CAE 2014).	126
Tabela 77. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	126
Tabela 78. Resultados do modelo 1 utilizando espessuras de 4 e 5 [mm] (Abaqus/CAE 2014).	127
Tabela 79. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	127
Tabela 80. Resultados do modelo 2 utilizando espessura de 2 mm (Abaqus/CAE 2014).	127
Tabela 81. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	128
Tabela 82. Resultados do modelo 2 utilizando espessuras de 2 e 3 [mm] (Abaqus/CAE 2014).	128
Tabela 83. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	128
Tabela 84. Resultados do modelo 1 utilizando espessuras de 4 e 5 [mm] (Abaqus/CAE 2014).	129
Tabela 85. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).	129

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Crescimento do consumo de materiais a nível Mundial (Biron 2014).....	13
Gráfico 2. Áreas de aplicações de materiais compósitos (Yang et al. 2012).	14
Gráfico 3. Comparação das propriedades mecânicas e físicas (Sullivan 2006).	19
Gráfico 4. Resultados da análise de convergência da tensão de <i>Von Mises</i>	71
Gráfico 5. Resultados da análise de convergência do deslocamento.....	71
Gráfico 6. Resultados da análise de convergência da tensão de <i>Von Mises</i>	74
Gráfico 7. Resultados da análise de convergência do deslocamento.....	74
Gráfico 8. Tensão <i>Von Mises</i> para os materiais compósitos submetidos a um carregamento estático para o modelo 1 com espessura uniforme de 3 mm.....	98
Gráfico 9. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 0°/90°).....	99
Gráfico 10. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 0°/90°).	99
Gráfico 11. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 90°/90°)....	100
Gráfico 12. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 90°/90°).	100
Gráfico 13. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 90°/0°).....	101
Gráfico 14. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 90°/0°).	101
Gráfico 15. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 0°/0°).....	102
Gráfico 16. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 0°/0°).	102
Gráfico 17. Resultados da aplicação do critério de rotura de <i>Tsai-Hill</i> para o modelo 1.....	103
Gráfico 18. Tensão <i>Von Mises</i> para os materiais compósitos submetidos a um carregamento estático para o modelo 2 com espessura uniforme de 3 mm.....	104
Gráfico 19. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 0°/90°).....	104
Gráfico 20. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 0°/90°).	105
Gráfico 21. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 90°/90°)....	105
Gráfico 22. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 90°/90°).	106
Gráfico 23. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 90°/0°).....	106
Gráfico 24. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 90°/0°).	107
Gráfico 25. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 0°/0°).....	107
Gráfico 26. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 0°/0°).	108
Gráfico 27. Resultados da aplicação do critério de rotura de <i>Tsai-Hill</i> para o modelo 2.....	108
Gráfico 28. Peso do banco com diferentes materiais (modelo 1 com 3 mm de espessura).	109
Gráfico 29. Preço por unidade considerando apenas o material (modelo 1 com 3 mm de espessura).	110

Gráfico 30. Resultados da aplicação do critério de rotura de <i>Tsai-Hill</i> para o modelo 1, espessura uniforme de 3 mm (carregamento provocado pela ac. em curva).....	111
Gráfico 31. Resultados da aplicação do critério de rotura de <i>Tsai-Hill</i> para o modelo 2, espessura uniforme de 3 mm (carregamento provocado pela ac. em curva).....	111
Gráfico 32. Resultados da aplicação do critério de rotura de <i>Tsai-Hill</i> para o modelo 1, com variação de espessura (carregamento provocado pela ac. em curva).	112
Gráfico 33. Resultados da aplicação do critério de rotura de <i>Tsai-Hill</i> para o modelo 2, com variação de espessura (carregamento provocado pela ac. em curva).	113
Gráfico 34. Resultados da aplicação do critério de rotura de <i>Tsai-Hill</i> para o modelo 1 (espessura 4 e 5 [mm]) e modelo 2 (3 e 4 [mm]) para as diferentes solicitações.....	114
Gráfico 35. Resultados em relação ao peso modelo 1 e 2.	114
Gráfico 36. Preço/unidade para cada modelo.....	115
Gráfico 37. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão/tração e tensão <i>Von Mises</i>	116
Gráfico 38. Peso do banco com diferentes materiais.....	117
Gráfico 39. Preço por unidade considerando apenas o material.	117

1 Introdução

Atualmente os engenheiros são confrontados diariamente com diversos problemas práticos, os quais têm de ser solucionados para que haja um bom desenvolvimento tecnológico. Um desses problemas e o qual será abordado ao longo desta dissertação está relacionado com o uso de materiais de fabrico, processamento, projeto e construção de componentes ou estruturas, mais concretamente do uso de materiais compósitos em bancos de automóveis desportivos.

A maior parte dos componentes de engenharia são feitos de ligas metálicas, mas os polímeros são cada vez mais usados porque oferecem uma combinação de propriedades muito interessantes, tais como a sua resistência e leveza. O engenheiro pode ainda combinar metais, polímeros e cerâmicos para obter materiais compósitos que conseguem reunir as melhores propriedades de cada material. É importante também não ignorar os materiais naturais como a madeira ou o couro, que têm propriedades que mesmo os materiais mais inovadores dificilmente conseguem atingir e se destacam dos restantes materiais por serem 100% recicláveis.

A utilização de materiais leves na indústria automóvel detém um papel de grande importância na medida em que permite a construção de veículos mais leves, proporcionando a redução dos consumos de combustível e conseqüentemente a redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera.

Os carros desportivos têm como principal característica proporcionar grandes acelerações com a finalidade de atingirem elevadas velocidades num curto espaço e tempo. Assim nos componentes projetados para este tipo de carros, o peso é um parâmetro muito importante, pois quanto menor for o peso do veículo menor será a massa a mover pelo motor, permitindo uma maior aceleração obtida pelo veículo. O estudo deste componente é realizado em colaboração com uma empresa, onde sou responsável por desenvolver a estrutura do banco para um veículo que estão a desenvolver.

1.1 Objetivos

Com este trabalho pretende-se projetar um banco em materiais compósitos para um automóvel desportivo.

Assim os objetivos são:

- Dimensionar uma estrutura com resistência e rigidez capaz de suportar os vários carregamentos a que vai estar sujeita durante a sua utilização;
- Conceber uma estrutura leve e a baixo preço;
- Utilização de vários materiais que combinem leveza com rigidez.

Para que seja possível atingir os objetivos propostos é necessário realizar: simulação estrutural através de *software Abaqus*, recorrendo ao método dos elementos finitos com o banco sujeito a solicitações representativas do uso quotidiano.

1.2 Organização e temas abordados no presente relatório

A estrutura do presente trabalho encontra-se dividida em sete capítulos. Sendo o presente capítulo o primeiro, onde é feita uma pequena introdução ao tema, bem como indicação dos conteúdos que serão abordados.

No segundo capítulo é realizada a revisão bibliográfica, onde se começa por apresentar os principais conceitos da Mecânica dos Materiais (capítulo 2.1). Posteriormente é abordada a situação dos materiais na indústria (capítulo 2.2), onde é realizado um estudo comparativo do uso de materiais leves (polímeros e compósitos) com os materiais convencionais (aço e alumínio). De seguida são abordadas as áreas de utilização dos compósitos, bem como indicação dos países mais consumistas deste tipo de materiais. Seguidamente, é apresentado um conjunto de fatores que têm impulsionado a indústria automóvel no sentido de substituírem os materiais convencionais por materiais mais leves. Posteriormente são mencionadas as dificuldades da indústria automóvel no uso das fibras de carbono para a construção de peças. É feito ainda um estudo teórico do componente abordado neste trabalho (banco de automóvel), onde são referidos alguns trabalhos desenvolvidos e mencionados alguns fabricantes de bancos desportivos. No subcapítulo 2.3, analisa-se o estado da arte dos materiais compósitos, onde são abordados os critérios de classificação destes materiais, podendo ser classificados segundo o tipo matriz e reforço. É também abordada a importância da utilização de cargas e aditivos. Posteriormente, é realizado um estudo relativo ao processamento das formas dos produtos, nomeadamente os tecidos e pré-formas. São ainda abordados temas como os processos de fabrico, a reciclagem dos materiais compósitos, compósitos naturais, a maquinagem de materiais compósitos e ainda os tipos de ligações mais utilizados neste tipo de materiais.

No terceiro capítulo são referenciadas algumas considerações que se devem ter em atenção no projeto e seleção de materiais. Posteriormente, é realizado um estudo das propriedades dos materiais, direcionado para os materiais compósitos, pois são o alvo do estudo desta dissertação. Pretende-se assim dar a conhecer as excelentes propriedades destes materiais de forma a ser possível a sua utilização em componentes estruturais.

O quarto capítulo aborda as etapas de projeto, fazendo referência aos modelos em que se vai basear este estudo. De seguida é feita uma breve descrição do procedimento a utilizar para simulação em *abaqus*. São mencionadas as propriedades mecânicas e físicas dos materiais utilizados nas simulações. Posteriormente, é feita uma análise da estrutura, onde se identificam as condições de fronteira. Neste capítulo são quantificados os esforços a que a estrutura está sujeita, quer a nível estático quer a nível dinâmico. A finalizar este capítulo é efetuada análise da malha a nível de convergência, tendo como objetivos a escolha da forma do elemento e o número de elementos mais apropriado.

No quinto capítulo são apresentados os resultados mais relevantes das várias simulações efetuadas. A finalizar é avaliada a rigidez dos modelos através da aplicação do critério de rotura de *Tsai-Hill*.

O sexto capítulo é a discussão dos resultados obtidos, tendo como ponto de partida os requisitos de projeto (modelo que combine leveza com resistência, sem nunca esquecer que o custo é um fator chave em todo o processo de *design*).

No sétimo e último capítulo é feita a apresentação das conclusões do trabalho e das propostas para futuros desenvolvimentos.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica de conceitos relacionados com o tema da dissertação.

2.1 Fundamentos da Mecânica dos Materiais

Nesta secção apresentam-se os principais conceitos da Mecânica dos Materiais.

No projeto de um componente feito de um determinado material, é preciso evitar que o material atinja um valor crítico de uma determinada propriedade que possa levar à sua rotura. Os principais modos de rotura são: por falta de rigidez, por deformação plástica excessiva, por rotura frágil, por acumulação de dano em ciclos repetidos de tensão (fadiga), por uma acumulação de deformação excessiva a elevadas temperaturas (fluência), por desgaste e por ataque químico (corrosão) (Silva 2012) .

2.1.1 Mecânica da fratura

A mecânica da fratura é uma área do conhecimento interdisciplinar que visa caracterizar o comportamento dos materiais à fratura e, com base nessa caracterização avaliar a integridade das estruturas.

Segundo Lucas da Silva (Silva 2012) pode-se pensar nos dois modos de fratura (dúctil e frágil) como sendo uma competição entre cedência vs fratura frágil. Quando se carrega uma estrutura, se a tensão de cedência σ_y for atingida em primeiro lugar, a rotura ocorre de modo dúctil, acompanhada de uma grande deformação plástica. Se a tensão de fratura frágil σ_{fr} for atingida em primeiro lugar, a rotura é frágil. Uma fratura frágil corresponde a uma rotura repentina de uma peça em duas ou mais partes sem qualquer deformação plástica global da peça. Quando esta situação ocorre numa estrutura de engenharia, pode levar à rotura catastrófica da estrutura. Hoje em dia, tenta-se a todo custo evitar a rotura frágil de componentes em serviço, especialmente em componentes críticos de segurança.

É fundamental caracterizar quantitativamente a resistência do material à propagação rápida de um defeito (ou tenacidade). A sua quantificação baseia-se na teoria de *Griffith*.

Na mecânica da fratura assume-se que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo conter defeitos causados pelo próprio processo de fabrico ou por um qualquer acidente durante o seu funcionamento. O objetivo é saber se os defeitos existentes serão suscetíveis de causar a rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura as suas dimensões se mantêm inferiores às críticas, embora se possam propagar de uma forma estável (Yang et al. 2012).

A rotura dos materiais compósitos pode-se dividir em duas formas distintas: intralaminar e interlaminar. No primeiro caso, trata-se de rotura das camadas do compósito, que pode acontecer sob a forma de rotura da matriz, rotura das fibras e descoesão fibra/matriz. A fratura interlaminar designa-se habitualmente por delaminagem, e normalmente ocorre entre camadas diferentemente orientadas (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

2.1.2 Deformação plástica

Deformação plástica define-se como sendo um limite elástico a partir do qual o material parte ou deforma de modo permanente. É necessário ter informação acerca da tensão que inicia a deformação plástica (tensão de cedência) e do modo como o material se deforma plasticamente. Existem vários métodos de medir experimentalmente essas grandezas, sendo o ensaio de tração o mais usado (Silva 2012).

A capacidade de um material se deformar plasticamente é designada por ductilidade.

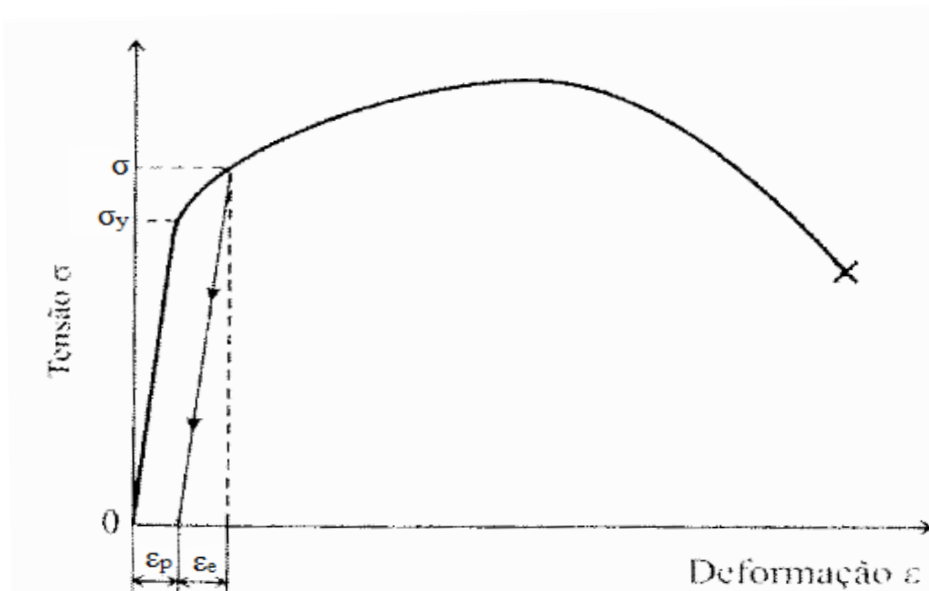


Figura 1. Deformação elástica e plástica de um material carregado para além do limite elástico (Silva 2012).

No caso dos metais, a tensão necessária para produzir uma contínua deformação plástica aumenta com a deformação plástica.

Os compósitos que contêm fibras são menos resistentes à compressão porque as fibras encurvam quando sujeitas à compressão.

Quando um polímero é moldado por injeção ou por pressão, é absorvida energia. O trabalho realizado sobre o material para modificar a sua forma permanentemente é designado por energia de deformação plástica. Esta energia é importante no âmbito da conformação de metais e polímeros porque determina a força que os rolos, a prensa ou a máquina de moldação devem fazer sobre o material (Silva 2012).

2.1.3 Fadiga em compósitos

A fadiga é um tipo de solitação que consiste na aplicação de cargas cíclicas abaixo do limite elástico dos materiais, e que provoca a formação e propagação de defeitos suscetíveis de provocar a rotura. A fadiga é provocada por plasticidades localizadas que aparecem em pontos de concentração de tensões onde localmente a tensão é superior à tensão limite de elasticidade (Silva 2012).

Nos materiais homogêneos e isotrópicos a rotura por fadiga é ditada por iniciação e propagação de uma fenda ao passo que nos materiais compósitos ocorre uma acumulação generalizada de dano de natureza diversa: fissuração transversal e longitudinal, descoesão fibra-matriz, delaminação e rotura de fibras.

Os compósitos unidirecionais possuem uma boa resistência à fadiga na direção das fibras. Dependendo do valor máximo da tensão aplicada, dois mecanismos de dano podem ocorrer em compósitos unidirecionais. 1) Para cargas mais altas, o dano inicia-se pela rotura individual de algumas fibras devido à variabilidade estatística da resistência da fibra ao longo do seu comprimento. Isto origina zonas de concentração de tensões e promove mais roturas de fibras na vizinhança. Rapidamente, este fenómeno debilita o compósito resultando numa rotura catastrófica que ocorre após algumas centenas de ciclos. 2) Para cargas de fadigas mais baixas, as tensões na fibra são inferiores à sua resistência mas a deformação da matriz pode exceder o seu limite de fadiga. Neste caso, o dano inicia-se por rotura da matriz que induz descoesão fibra/matriz. Este processo ocorre de uma forma progressiva e, ao contrário da situação anterior, pode decorrer durante 10^6 ciclos. Para valores intermédios da solitação o mecanismo de dano consiste numa mistura dos dois processos descritos. Assim, a rotura de algumas fibras induzem na vizinhança uma sobrecarga na matriz e na interface fibra/matriz, originando a descoesão entre ambas e a rotura da matriz (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Os compósitos multidirecionais apresentam menor rigidez e resistência que os unidirecionais relativamente à solitação na direção das fibras. Como consequência, o mecanismo de dano é diferente e a sua sequência pode ser dividida em três fases. A primeira fase caracteriza-se por uma queda da rigidez que se justifica pelo aparecimento de rotura da matriz nas camadas com orientação diferente da solitação. A iniciação do dano ocorre nas camadas cuja diferença de orientação é máxima relativamente à solitação. Esta descoesão de fibra-matriz é favorecida pela diferença de rigidez e provoca microfissuras que, por coalescência, originam a rotura da matriz. Após a iniciação, a fissura propaga-se paralelamente às fibras e estende-se a toda a espessura das camadas. A densidade destas fissuras aumenta com o número de ciclos até à saturação. Quando as fissuras atingem as interfaces entre camadas diferentemente orientadas, estamos na segunda fase. Aqui, têm início as delaminações, cuja propagação rápida resulta na separação do laminado em camadas isoladas, o que promove a rotura de fibras das camadas

alinhadas com a solicitação levando à rotura final (terceira fase) (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Os ciclos de tração-compressão são geralmente críticos nos laminados multidirecionais. Assim, os picos de tração induzem à fissuração e à iniciação de laminagem e os de compressão são responsáveis pela propagação instável desta. Os compósitos multidirecionais apresentam menor resistência à fadiga que os unidirecionais quando a solicitação está alinhada com as fibras. A diminuição de resistência à fadiga é mais acentuada quanto maior for o ângulo entre a solicitação e as fibras (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Os compósitos de fibras curtas são muito menos resistentes à fadiga que os compósitos de fibras contínuas, uma vez que, nos primeiros a proporção de carga absorvida pela matriz é muito superior, o que facilita o aparecimento de dano. Este inicia-se por descoesão fibra-matriz das fibras orientadas perpendicularmente à solicitação (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Os compósitos de tecido apresentam mecanismos de dano similares aos multidirecionais, nomeadamente nos laminados cruzados do tipo [0/90]. Contudo, a sua resistência à fadiga é inferior devido à ondulação das fibras. De facto, as zonas de ondulação constituem fonte de iniciação de fissuração da matriz e delaminagem (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

A maioria dos dados de fadiga são obtidos para uma tensão média nula. Porém, uma grande parte das aplicações em engenharia exigem tensões médias diferentes de zero. Para determinar a zona onde se está em segurança, isto é, qual a nova tensão alternada máxima que é possível aplicar para uma tensão média diferente de “0” sem ter de determinar uma nova curva SN, existem vários critérios: *Soderberg*, *Goodman* e *Gerber* (Figura 2) (Silva 2012).

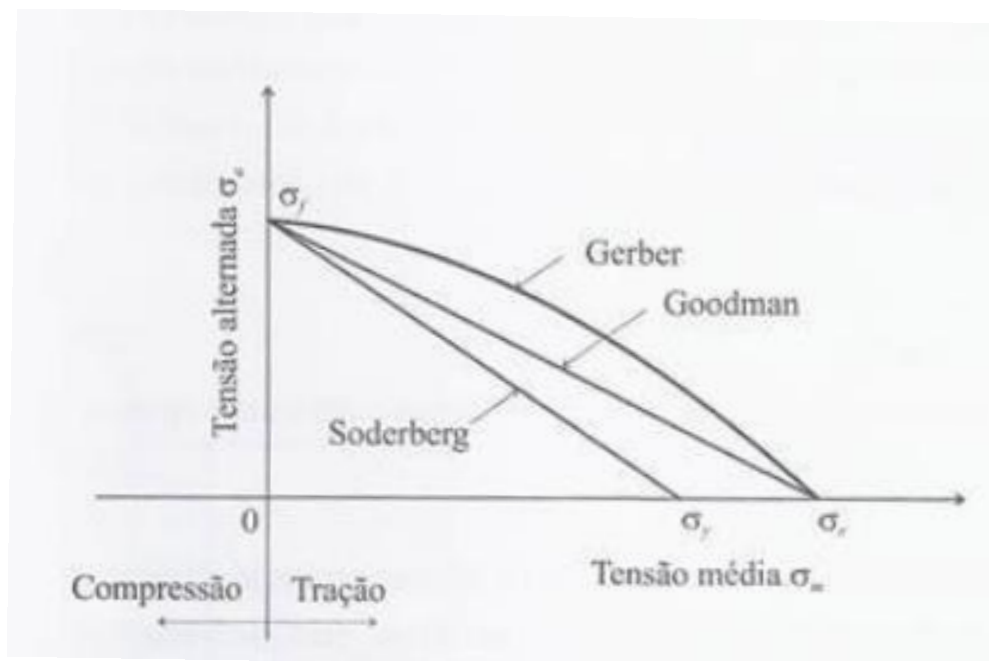


Figura 2. Determinação da tensão alternada para uma tensão média diferente de “0” usando os critérios de *Soderberg*, *Goodman* e *Gerber* (Silva 2012).

2.1.4 Critérios de rotura

A rotura da camada é geralmente um processo complexo, que pode envolver plasticidade, formação e crescimento de fendas localizadas, sendo portanto difícil de prever. Apesar disso, a análise Micromecânica permite tirar conclusões úteis acerca dos mecanismos de rotura e das propriedades relevantes dos constituintes. Mais à frente irá perceber-se que são grandes as diferenças entre as resistências longitudinais e transversais. Os elevados valores de resistências longitudinais das fibras refletem-se na resistência dos compósitos.

O foco será na análise de resistências longitudinais de tração e compressão, que são de resto as mais importantes por duas razões fundamentais. Primeiro, porque são as mais elevadas, visto que beneficiam mais eficazmente do contributo das fibras. Segundo, porque nos compósitos multidirecionais, há todo o interesse em ter camadas orientadas nas direções das camadas principais, pois são estas que suportam a maior parte do esforço, dada a sua maior rigidez.

É necessário saber prever a rotura nas situações mais gerais, em que uma camada integra um compósito multidirecional, sujeito a sollicitações multidirecionais. Idealmente, os critérios de rotura deveriam obedecer a dois requisitos algo contraditórios (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

- Interatividade plena, ou seja, a capacidade de ter em conta os efeitos de todas as componentes das tensões;
- Permitir a identificação do modo de rotura ao nível micromecânico, o que é particularmente importante ao nível da distinção básica entre roturas de fibras e roturas da matriz, pois são as primeiras que comprometem decisivamente a integridade global do laminado.

Existem variados critérios, estes dividem-se em famílias como: critérios não-interativos, que não têm em conta os efeitos combinados das várias componentes do tensor das tensões; os critérios interativos e os critérios parcialmente interativos, que visam atingir um compromisso entre a interatividade e a capacidade de distinguir modos de rotura (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Um dos métodos mais utilizados no cálculo da rotura é o critério clássico de tensão máxima, mas em algumas situações este critério não é aplicável como é possível identificar no caso B) da Figura 3, pois a tensão máxima é exercida numa direção que não é a das fibras.

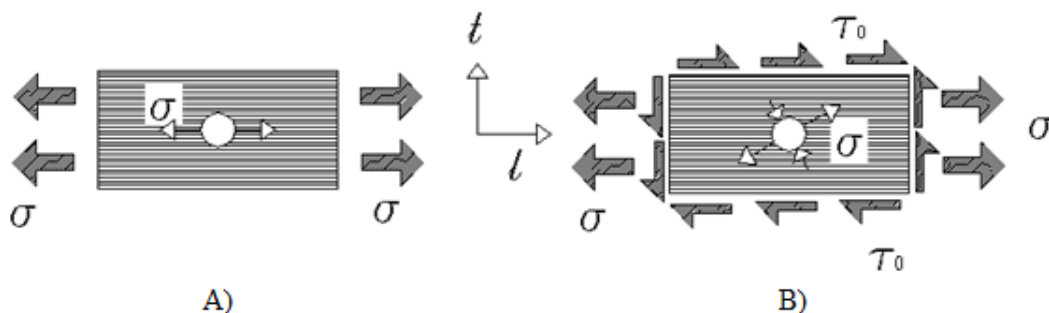


Figura 3. Exemplos da aplicação do método tensão máxima (Marques 2014).

Para contornar o problema anterior, recorre-se ao critério de rotura de *Tsai-Hill*, que está inserido na família dos critérios interativos que se exprime em função das tensões sob a forma de polinómio de segundo grau.

O critério de rotura de *Tsai-Hill* é usado frequentemente e exprime-se da seguinte forma:

$$\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_{lrot}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{trot}} \right)^2 - \frac{\sigma_l \sigma_t}{\sigma_{lrot}^2} + \left(\frac{\tau_{lt}}{\tau_{ltrot}} \right)^2 \quad (2.1)$$

Sendo σ_l , σ_t e τ_{lt} as tensões instaladas em cada camada, com σ_{lrot} , σ_{trot} e τ_{ltrot} a representarem as tensões de rotura, e α é o número de Hill (se $\alpha < 1$ não há rotura).

O critério quadrático interativo é o mais geral, uma vez que inclui interação de diferentes modos de rotura. A sua representação nas direções principais do material é:

$$F_{xx} \sigma_x^2 + 2F_{xy} \sigma_x \sigma_y + F_{yy} \sigma_y^2 + F_{ss} \tau_{xy}^2 + F_x \sigma_x + F_y \sigma_y = 1 \quad (2.2)$$

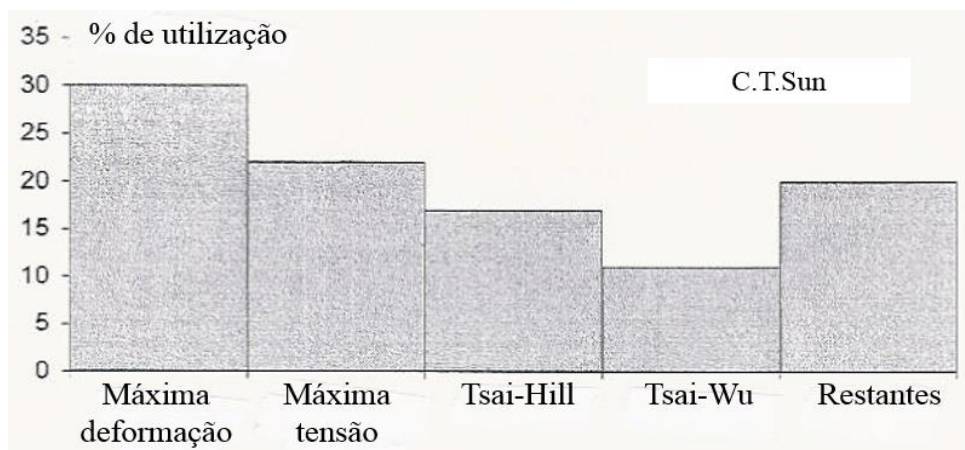


Figura 4. Uso industrial de critérios de rotura em compósitos (Marques 2014).

2.1.5 Análise das Resistências

Segundo Moura, Morais e Magalhães (Moura, Morais, e Magalhães 2011), a rotura da camada é geralmente um processo complexo, que pode envolver plasticidade, formação e crescimento de fendas localizadas, sendo portanto muito difícil de prever. A análise Micromecânica permite tirar conclusões úteis acerca dos mecanismos de rotura e das propriedades relevantes dos constituintes. Convém definir os modos básicos de sollicitação da camada Figura 5, aos quais correspondes as seguintes tensões de rotura:

- σ_{ut1} : tensão de rotura longitudinal à tração;
- σ_{uc1} : tensão de rotura longitudinal à compressão;
- σ_{ut2} : tensão de rotura transversal à tração;
- σ_{uc2} : tensão de rotura transversal à compressão;
- τ_{u12} : tensão de rotura ao corte.

Para as quais a Tabela 1 apresenta alguns valores típicos.

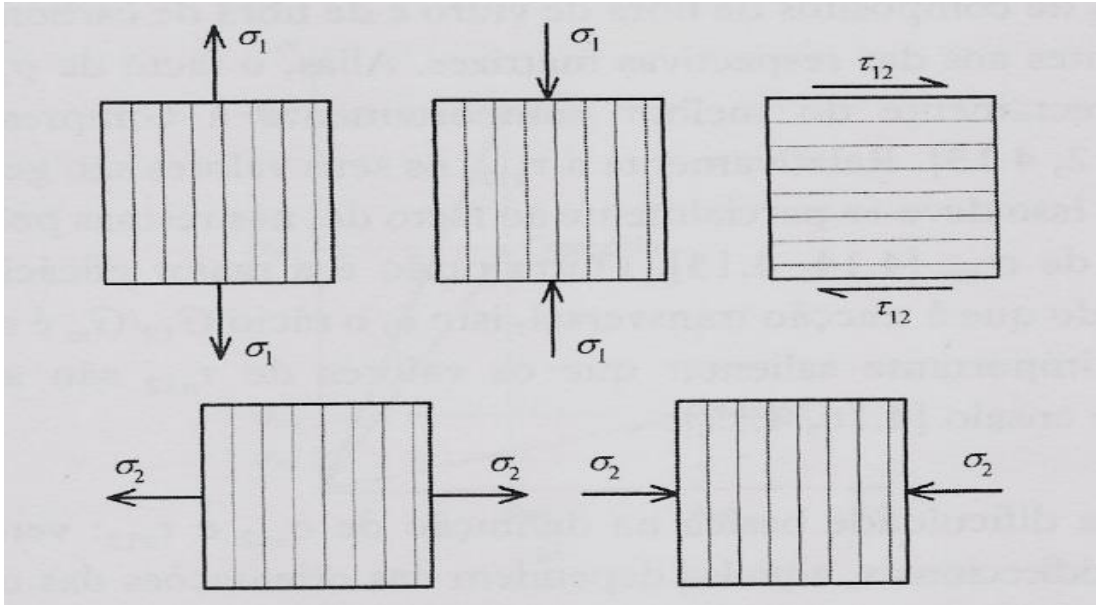


Figura 5. Modos básicos de solicitação da camada (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Tabela 1. Tensões de rotura de alguns compósitos unidirecionais (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Compósito	V_f	σ_{ut1} [MPa]	σ_{uc1} [MPa]	σ_{ut2} [MPa]	σ_{uc2} [MPa]	τ_{u12} [MPa]
C(T300)/Epóxico (934)	0,60	1314	1280	43	168	48
C(T800H)/Epóxico (3900-2)	0,65	2840	1550	52	165	58
C(AS4)/Epóxico (3501-6)	0,63	2280	1440	57	228	71
C(IM6)/Epóxico (SC1081)	0,65	1500	1500	40	246	68
C(IM7)/Epóxico (977-2)	0,65	2818	1612	75	161	109
E-G/Epóxico	0,55	1080	620	39	128	69
Kevlar49/Epóxico	0,60	1280	335	30	158	49

2.2 Situação dos materiais na indústria

Neste capítulo é realizado um estudo do uso dos materiais na indústria, mencionando alguns problemas da utilização das fibras de carbono. E feito também uma abordagem ao componente abordado neste trabalho.

2.2.1 Uso de plásticos e compósitos em relação aos materiais convencionais

No sentido de reduzir o consumo de combustível e o cumprimento das legislações governamentais tem levado a um aumento do uso de plásticos e compósitos em vez do tradicional aço. Segundo Michel Biron (Biron 2014), pode-se constatar que o uso de materiais leves tem aumentado ao longo do tempo.

Ano	Plástico	Aço	Alumínio
1970	30	595	10
1975	40	644	10
1980	48	716	13
1985	68	719	12
1990	107	770	14
1995	150	752	17
2000	185	848	21
2003	208	970	22
2005	223	1147	23
2007	238	1351	25
2009	230	1211	23
2010	241	1414	24
2011	254	1466	24
2015 (Previsão)	311	1696	26
2020 (Previsão)	400	2033	29

a)

Ano	Plástico	Aço	Alumínio
1970	30	76	4
1975	40	82	4
1980	48	92	5
1985	68	92	5
1990	107	99	5
1995	150	96	6
2000	185	109	8
2003	208	124	8
2005	223	147	9
2007	238	173	10
2009	230	155	9
2010	241	181	9
2011	254	188	9
2015 (Previsão)	311	217	10
2020 (Previsão)	400	261	11

b)

Figura 6. Consumo Mundial: a) em peso (milhões de toneladas) e b) em volume (milhões m³).

Da análise da Figura 6, pode-se deduzir que em relação ao uso do aço e dos plásticos tem-se registado um aumento gradual, à exceção do ano 2009, devendo-se este decréscimo à crise económica global que ocorreu entre 2008 e 2009. A taxa média de crescimento anual nos últimos 40 anos para os plásticos, para o aço e alumínio é respetivamente 5,4 %, 2,2 % e 2,2 % (Biron 2014).

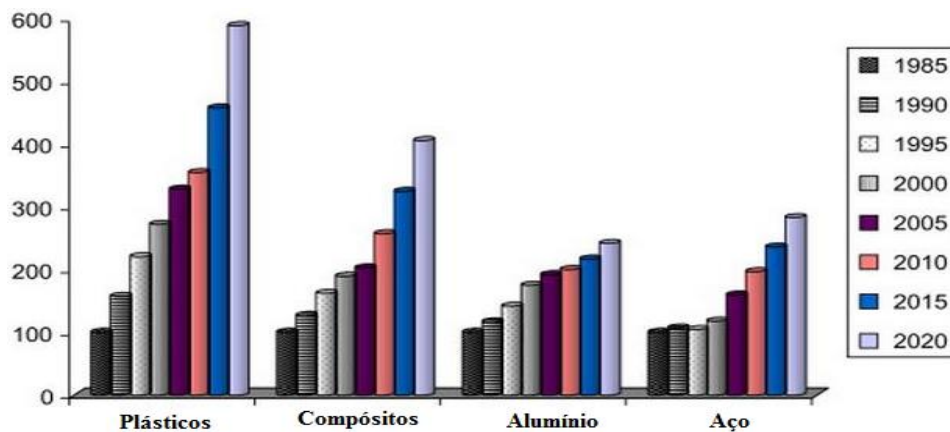


Gráfico 1. Crescimento do consumo de materiais a nível Mundial (Biron 2014).

É de referir que para o ano de referência 1985 foi normalizado para o valor de 100. Entre 1985-2010, as taxas médias de crescimento referenciadas anteriormente para os plásticos e aços confirmam-se. Os compósitos apresentam um crescimento superior aos metais. É de referir que para o período entre 2005 e 2010, o aço apresenta um crescimento superior relativamente aos plásticos para o mesmo período, mas as taxas de crescimento anuais não é afetada significativamente (Biron 2014).

2.2.2 Área de utilização dos materiais compósitos

Existem dois setores em que a utilização dos materiais compósitos se destacam, a indústria automóvel (mais de 30%) e da indústria aeroespacial (mais de 20%). Além disso os materiais compósitos são utilizados em instalações desportivas e de lazer e na construção naval. O Gráfico 2 realça as áreas de aplicações dos materiais compósitos (Yang et al. 2012).

A indústria aeroespacial foi a pioneira no uso de materiais compósitos, atualmente a maioria dos aviões têm peso superior a 50% em materiais compósitos. Recentemente os materiais compósitos tornaram-se a matéria-prima para a nova geração de aviões comerciais, como o Boeing 787, Airbus A380 (25%) e no futuro A350 (53%). Este uso intensivo de compósitos, combinado com outras tecnologias, permite uma redução de 20% de consumo de combustível em relação a outros aviões do mesmo tamanho (Silva 2012) e (Yang et al. 2012).

A redução do peso dos automóveis é fundamental para a redução de consumos. A utilização de compósitos na indústria automóvel tem aumentado. Encontram-se materiais compósitos na construção dos interiores, chassis, componentes elétricos, motores, radiadores, etc.

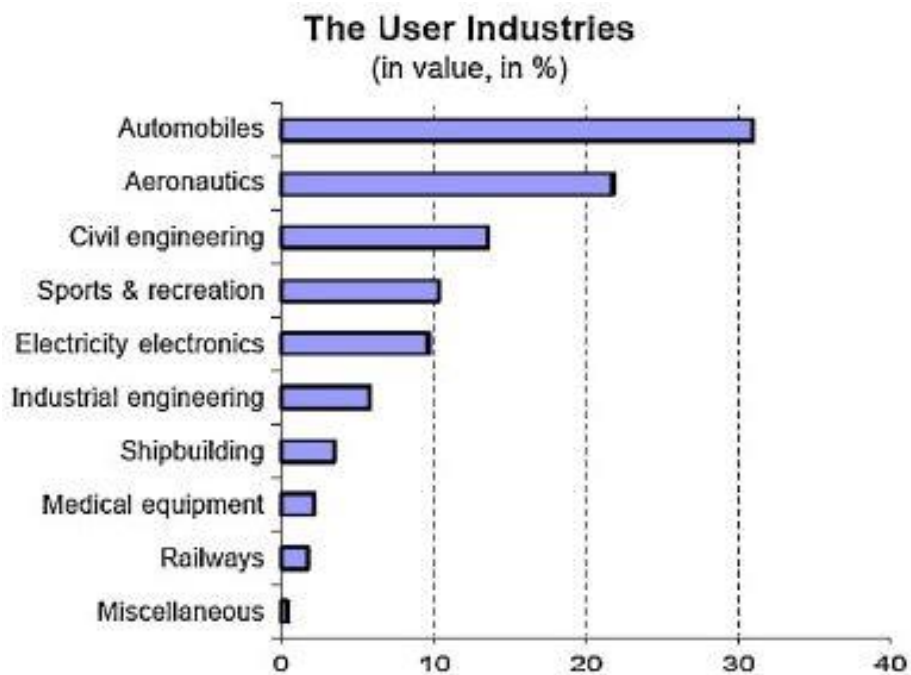


Gráfico 2. Áreas de aplicações de materiais compósitos (Yang et al. 2012).

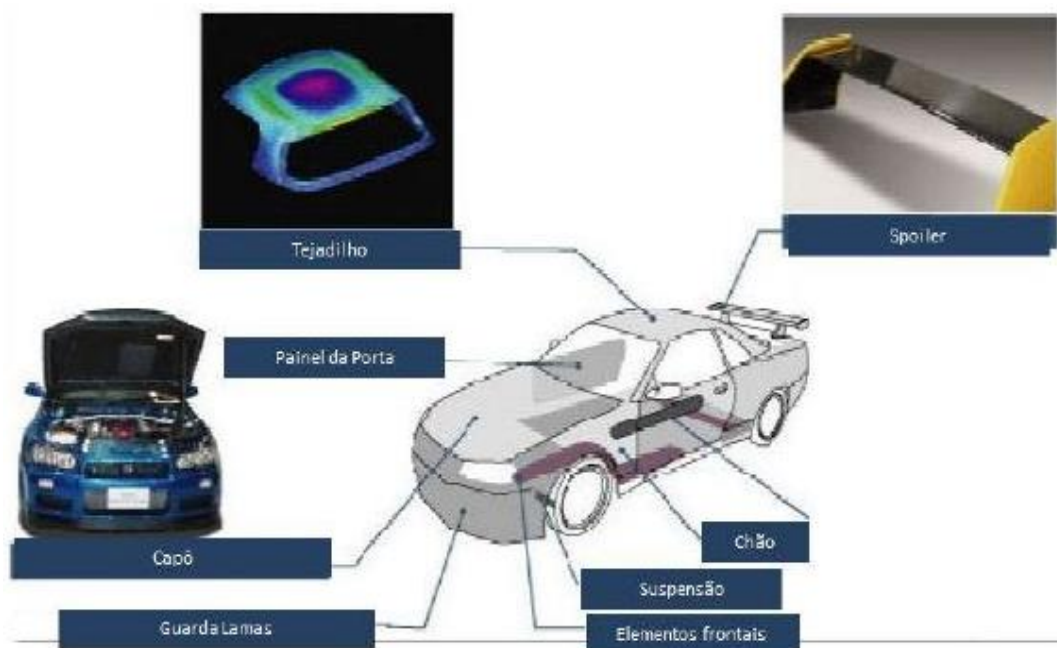


Figura 7. Algumas peças do automóvel produzidas em materiais compósitos, adaptado de (Teixeira 2014)

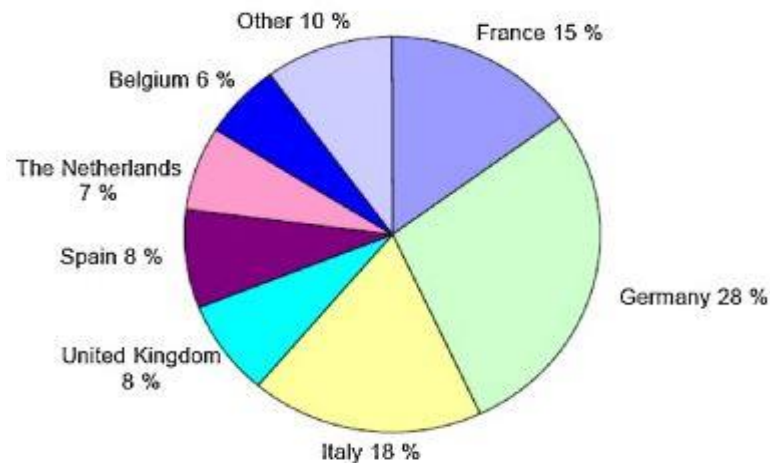


Figura 8. Utilização de compósitos na Europa (Yang et al. 2012).

Como se pode observar pela análise da Figura 8 a Alemanha tem a maior fatia de utilização de materiais compósitos, seguido por Itália e França. Estas três nações representam mais de 60% do consumo de materiais compósitos na Europa, este consumo deve-se em grande parte ao facto de serem as principais indústrias de automóvel e aeroespacial (Yang et al. 2012).

2.2.3 A problemática da substituição de materiais na indústria automóvel

A indústria automóvel encontra-se sob pressão na procura de redução de consumo de combustível e, conseqüentemente redução das emissões de gases poluentes. Ao longo das últimas décadas a densidade do tráfego automóvel tem continuado a aumentar, ao mesmo tempo tem aumentado a procura por veículos mais confortáveis e mais seguros, a satisfação destas necessidades tem tendência para aumentar o peso dos veículos. O objetivo de todos os fabricantes de automóveis é reduzir o consumo de combustível. Sabe-se que o consumo de energia ao longo do ciclo de vida de um veículo é determinado pelo consumo de combustível durante a sua utilização ativa. A Figura 9 mostra a percentagem de energia consumida durante o ciclo de vida de um carro. Estes valores podem ser reduzidos através da incorporação de algumas medidas, tais como (Figura 10): estilo de condução moderado; diminuição do atrito dos pneus ao piso; redução do coeficiente de arrasto; otimização dos componentes auxiliares e redução do peso do veículo (Jambor e Beyer 1997).

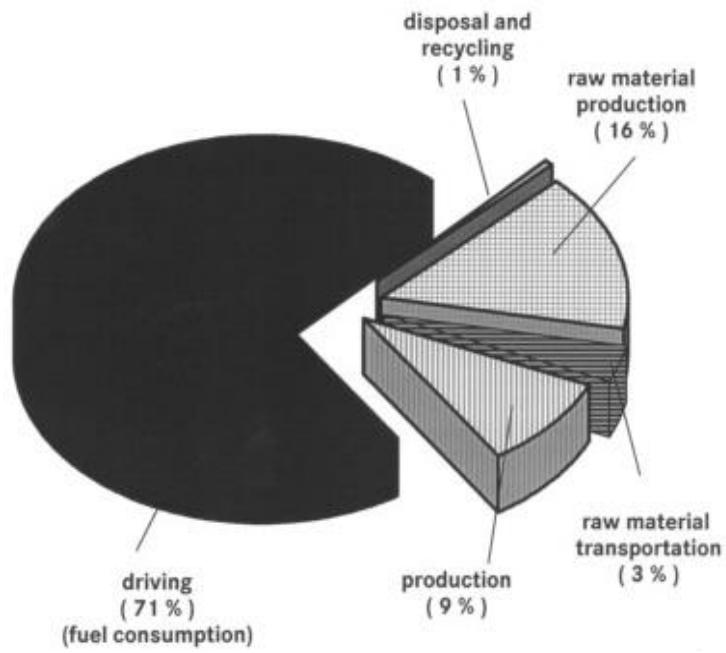


Figura 9. Consumo de energia durante o ciclo de vida (Jambor e Beyer 1997).

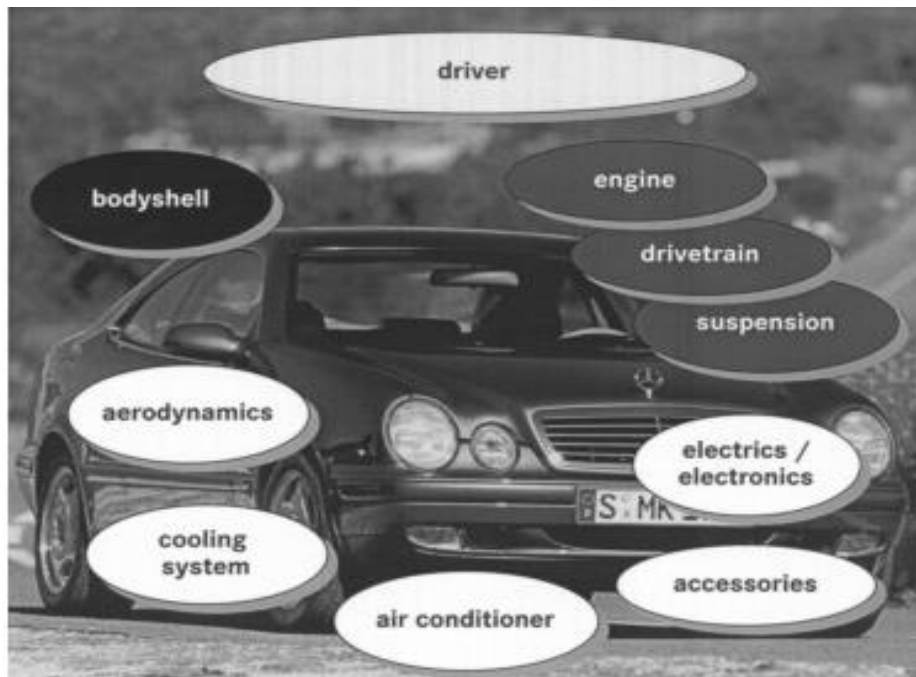


Figura 10. Impacto no consumo de combustível (Jambor e Beyer 1997).

2.2.3.1 Evolução dos materiais compósitos em aplicações automóveis

Nos anos 30, a Ford iniciou a aplicação de materiais compósitos nos seus modelos, embora o maior sucesso conhecido seja a realização de uma estrutura em fibra de vidro para o *Chevrolet Corvette* em 1953 (Moura, Morais, e Magalhães 2011).



Figura 11. Primeiro *Corvette* (Corvette 1953).

Segundo *Edwards* (Edwards 2004), nos veículos modernos quase 15 % do peso do veículo (quase 50 % em volume) é constituído por materiais poliméricos. *Edwards* apresenta três aspetos que na última década têm intensificado o uso de novos materiais nos motores dos automóveis:

- **Restrições ambientais:** uma das formas de reduzir a emissão de gases poluentes é através da redução do consumo de combustível, que pode ser alcançado através do aumento da eficiência termodinâmica do motor, ou como alternativa através da redução de peso do veículo, ou ainda através da redução da resistência aerodinâmica. Para se reduzir o peso são necessários materiais com melhores características, materiais com elevada resistência e rigidez específicas (razão entre a resistência e a densidade e razão entre rigidez e a densidade, respetivamente) permitem obter estruturas leves e mais eficientes para suportar as cargas. Também, os materiais com boas capacidades de processamento possibilitam a obtenção de formas mais complexas, o que faz com que possa conceber peças com boas propriedades aerodinâmicas, e consequentemente reduzir o consumo de combustível.
- **Requisitos económicos:** o custo de fabrico das peças do motor representa cerca de 40 % do investimento total na sua produção. Com a crescente procura de automóveis novos, há uma tendência para a redução de custo de fabrico, um aumento da flexibilidade na produção e uma diminuição dos prazos de entrega. Isto tudo implica o uso de materiais que requerem um baixo investimento para o fabrico, e que possam ser processados de uma forma mais rápida e económica. A crescente necessidade de reciclar, coloca restrições na escolha de materiais a usar.

- **Melhoramento das performances:** atualmente há a necessidade de se ter materiais que possuam uma grande capacidade de manter as suas características ao longo do tempo, pois com os períodos das garantias cada vez maiores obriga a que os componentes tenham maior fiabilidade e melhor resistência às exigências do meio ambiente, o que se consegue através do melhoramento da qualidade e processamento dos materiais.

A indústria automóvel é um dos maiores consumidores de materiais compósitos, o uso destes materiais nos novos modelos tem aumentado de forma constante. O uso de materiais compósitos nos automóveis modernos têm contribuído para a redução de 200 Kg de peso num carro de passageiros, isto torna-se uma enorme poupança ambiental quando multiplicado pelos cerca de 17 milhões de carros que são produzidos por ano na Europa (Yang et al. 2012).

O grande problema dos automóveis elétricos prende-se com a incapacidade de proporcionar grandes autonomias de funcionamento, problema que é causado pelo peso excessivo das baterias. Com o uso de materiais compósitos é possível aumentar a autonomia dos veículos, pois quanto mais leve é o carro maior será a distância percorrida e menor será a potência requerida, porque simplesmente o motor terá menos massa para mover. O *Megacity* da BMW é um carro com motor elétrico, incorpora na sua constituição amplo uso de materiais compósitos de fibra de carbono (Jacob 2010).

2.2.4 Desafios da indústria automóvel devido às fibras de carbono

O elevado custo das fibras de carbono é considerado o principal obstáculo a ultrapassar. Os polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) podem ser amplamente adotados no setor automóvel de modo a contornar a problemática de custos, existem outros obstáculos que devem ser superados, nomeadamente:

- Estabilidade dos preços ao longo do tempo de abastecimento;
- Adquirir mais experiência no uso CFRP para *design*;
- Desenvolvimento da tecnologia de moldação para redução do tempo de ciclo e maior rendimento;
- Demonstração de custo-benefício, reciclagem/recuperação e métodos de recuperação.

Os polímeros reforçados com fibras de carbono representam um atrativo para os projetistas no desenvolvimento de peças estruturais para o automóvel. Mas existe uma grande competição com outros materiais, nomeadamente o alumínio e magnésio que têm sido estudados e testados durante anos, tendo elevada acessibilidade sobre o projeto, fabricação, montagem e reciclagem. Dados recentes mostram que o uso de alumínio na América do Norte superou o aço em média 14 Kg na aplicação por veículo. Sobre o magnésio a sua aplicação situa-se entre 4,5 e 5,4 Kg por veículo, mas é esperado um aumento de 5-7%. A China surgiu nos últimos anos como produtor de magnésio de baixo custo (Sullivan 2006).

Encontram-se no mercado automóvel diversas aplicações em magnésio, como por exemplo os para-lamas do *Corvette Z06*, o tejadilho do BMW M6, o apoio do para-choques da frente do *Dodge Viper*, a estrutura de cobertura da parte traseira do *Ford GT*. Mais aplicações, tais como eixos de transmissão, *spoilers*, estruturas de proteção interior e vários painéis da carroçaria são adotados em outros carros de alto desempenho. Estes veículos de alto desempenho fornecem

experiências em *design* automóvel e um importante conhecimento dos problemas durante o seu uso.

Compósitos avançados, tais como as fibras de carbono, polímeros reforçados representam a substituição mais lógica para estruturas em aço dos veículos, em que a redução de peso dependendo do material utilizado pode superar os 60% (Sullivan 2006).

Como referido anteriormente as limitações do uso de carbono em compósitos para estruturas automóveis são o elevado custo da matéria-prima, entre 8 e 16 EUR/Kg quando comparado com 1 EUR/Kg para o aço, e a necessidade de trabalho especializado para a produção de peças em compósitos avançados. O custo é um fator chave em todo o *design* automóvel, principalmente quando se tratam de materiais compósitos.

No passado, apesar do custo dos materiais compósitos ser superior aos materiais em aço, os compósitos foram justificando a sua aplicação uma vez que o seu uso foi limitado a componentes não estruturais e semi-estruturais, devido a economias de custo na fabricação ou montagem de peças.

Na carroçaria de um automóvel os critérios de desempenho baseiam-se na rigidez, assim a carroçaria tem normalmente resistência adequada se respeitar as metas de rigidez e estabilidade. Observando o pressuposto as melhores alternativas ao aço considerando como vertente o custo por rigidez específica são os compósitos de fibra de carbono e o alumínio. Embora os CFRP apresentem custo por rigidez específica superior ao alumínio, outros importantes fatores têm que ser considerados, tais como poupança de peso, redução de custos para a consolidação de peças, menor custo das ferramentas e equipamentos para tratar CFRP (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007). O Gráfico 3 resume as propriedades de rigidez, densidade e custo para o aço, alumínio, compósitos de fibra de carbono e de fibra de vidro.

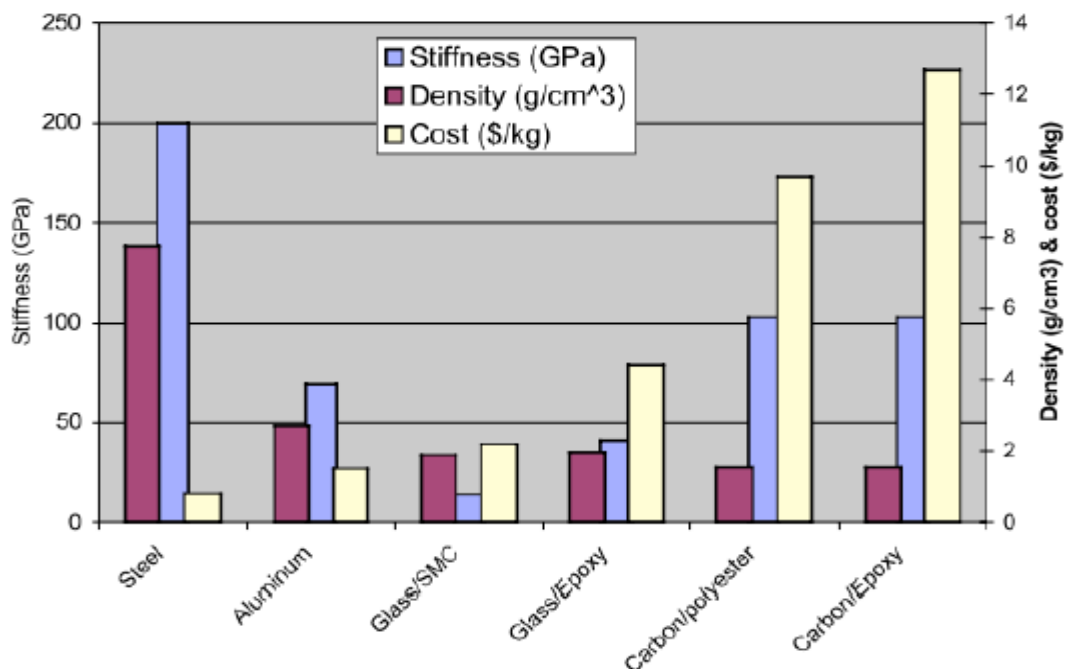


Gráfico 3. Comparação das propriedades mecânicas e físicas (Sullivan 2006).

O aço apresenta os melhores valores de rigidez e custo, mas em contraste é o que tem valores mais altos de densidade, em contraste os compósitos de fibra de carbono têm baixa densidade,

rigidez média, mas um custo elevado. O alumínio e os compósitos de fibra de vidro têm propriedades entre as do aço e compósitos de fibra de carbono. (Sullivan 2006).

2.2.5 Banco para automóveis

É neste componente do carro que se vai focar este estudo, tendo como objetivo obter uma estrutura leve, resistente e a baixo preço.

2.2.5.1 Estrutura do banco em magnésio

O magnésio é um material mais leve que o alumínio. O seu uso na construção de painéis não é aconselhável, porque necessitam de temperaturas elevadas (acima de 300 °C) para o deformar e são necessárias ferramentas aquecidas tornando o processo dispendioso. O uso de magnésio está limitado a peças produzidas por injeção.

Um exemplo do uso de magnésio é a estrutura do banco do Mercedes-Benz 300 SLR, sendo a estrutura do banco feita em magnésio fundido, o seu peso ronda 8 Kg, embora a fixação dos sistemas de retenção de encosto impõem requisitos de resistência muito rigorosos (Jambor e Beyer 1997).

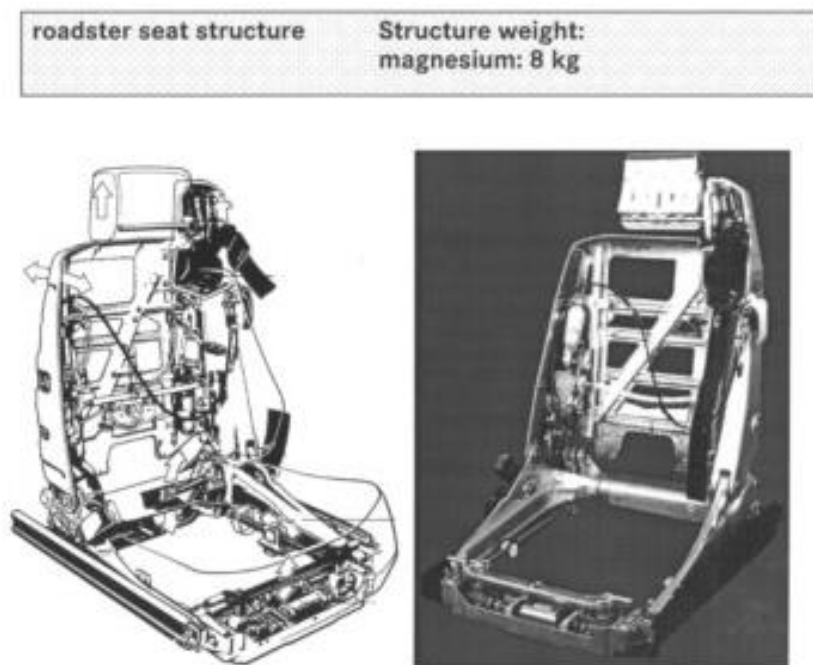


Figura 12. Estrutura do banco em magnésio (Jambor e Beyer 1997).

2.2.5.2 Banco uma parte importante de segurança

Atualmente, os fabricantes de automóveis procuram por bancos mais otimizados, de modo a diferenciar os seus veículos e ir ao encontro da procura do consumidor por equipamento personalizado. Para responder a essa procura, os fabricantes de bancos desenvolvem continuamente os seus produtos (de modo a melhorar o conforto dos ocupantes), sem esquecer que o banco é uma parte vital para a segurança dos utentes.

Hoje em dia o banco do automóvel é parte integrante do sistema de suspensão, sendo projetado para apoiar o condutor e os passageiros, amortecendo-os contra o movimento contínuo gerado pelas irregularidades dos pisos. O banco é projetado para absorver cargas elevadas, e normalmente dura a vida do veículo, com pouca ou nenhuma manutenção.

Na indústria automóvel, a crescente procura dos clientes por veículos com melhor desempenho foi complementada por uma forte procura dos veículos com maior conforto. O que leva os fabricantes apostar no conforto interior como um importante ponto de venda (Grujicic et al. 2009).



Figura 13. Polímero reforçado com fibra de vidro elimina a necessidade de estrutura de aço (Stewart 2010).

2.2.5.3 Porsche 918 Spyder

Atualmente existem vários modelos de carros que incorporam bancos em materiais compósitos. O *Porsche 918 Spyder* tem bancos construídos em polímeros reforçado com fibra de carbono (Company, amp, e Porsche Cars North America 2014).



Figura 14. Bancos do *Porsche 918* em compósitos (Company, amp, e Porsche Cars North America 2014).

2.2.5.4 Marcas construtoras de bancos desportivos

Atualmente existem no mercado automóvel vários fabricantes de bancos desportivos, entre eles destacam-se: a *recaro*, *sparco*, *corbeau*, *cobra*, *konig*, *Mamba* e *Status*.

A *recaro* é uma empresa alemã responsável pelo fabrico e venda de bancos para carros, desde desportivos a cidadãos.



Figura 15. Bancos *recaro* em polímero reforçados com fibra (Tweeks 2014).

Os bancos da Figura 15 são fabricados pela *recaro* para carros desportivos e cumprem os requisitos impostos pela FIA (*International Automobile Federation*), a sua estrutura é construída em materiais leves. O banco a) é fabricado em polímero reforçado com fibra de vidro enquanto o b) é em polímero reforçado com fibra de carbono.

A *sparco* é uma empresa italiana especializada no fabrico de peças como bancos, volantes, capacetes e vestuário desportivo.



Figura 16. Banco *sparco* (Tweeks 2014).

O banco a) é fabricado em fibra de vidro e pesa 7.40 Kg tendo um custo de 303 euros, o banco b) é fibra de carbono e pesa 4.30 Kg custando 1780 euros (Tweeks 2014).

2.3 Materiais Compósitos, fabricação e final de vida dos materiais

Um material diz-se compósito quando resulta da combinação de dois ou mais materiais distintos com propriedades físicas ou químicas significativamente diferentes, que permanecem separados e distintos no interior da estrutura acabada. O termo material compósito refere-se a materiais que têm na sua constituição fibras fortes, contínuas ou não contínuas, rodeada por uma matriz de um material com propriedades mais fracas (Gay e Hoa 2007) e (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Uma das razões principais para as excelentes propriedades dos compósitos resulta do fato de as fibras apresentarem propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na forma maciça (Tabela 2). O conjunto de materiais que se adjetivam de compósitos é muito vasto, e vão desde o vulgar betão armado até aos compósitos de elevado desempenho, à base de resinas de epóxidos reforçados com fibras contínuas de carbono.

Os materiais compósitos podem classificar-se segundo vários critérios, sendo o tipo matriz e reforço dos mais relevantes.

Tabela 2. Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça, adaptada a partir (Moura, Morais, e Magalhães 2011) e (Ces EduPack 2014).

Material	Módulo de elasticidade (E) [GPa]	Resistência à tração (σ_u) [GPa]	Densidade (ρ) [Kg/dm³]	Módulo específico (E/ρ)	Resistência específica (σ_u/ρ)
Fibras:					
Vidro E	72	3,5	2,54	28,5	1,38
Vidro S	87	4,3	2,49	35	1,7
Carbono (HM)	390	5,5	1,9	205	2,9
Boro	393	3,1	2,7	146	1,15
Sílica	72,4	5,8	2,19	33	2,65
Tungsténio	414	4,2	19,3	21	0,22
Berílio	240	1,3	1,83	131	0,71
Kevlar® 49	131	3,6	1,45	90	2,48
Materiais convencionais:					
Aço	210	0,34 – 2,1	7,8	26,9	0,043 – 0,27
Ligas de Al	70	0,14 – 0,62	2,7	25,9	0,052 – 0,23
Vidro	70	0,7 – 2,1	2,5	28	0,28 – 0,84
Tungsténio	350	1,1 – 4,1	19,3	18,1	0,057 – 0,21
Berílio	300	0,7	1,83	164	0,38

2.3.1 Matriz

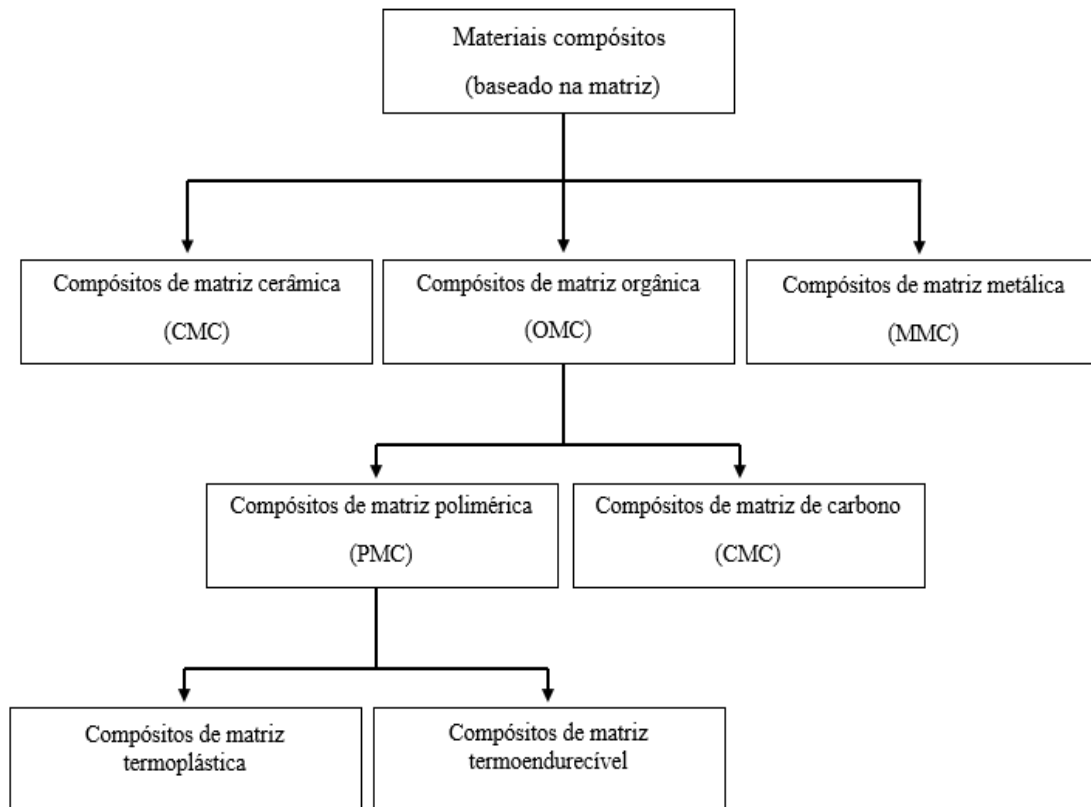


Figura 17. Classificação dos materiais compósitos com base na matriz (Yang et al. 2012).

A matriz faz parte de uma das características mais importantes dos materiais compósitos já que lhe são conferidas funções essenciais como: dar forma estável ao compósito, assegurar a distribuição eficiente da carga pelas fibras, proteger as superfícies das fibras do meio ambiente, acrescentar tenacidade ao compósito e assegurar o posicionamento do reforço. A facilidade de processamento e a baixa densidade dos polímeros fazem com que os compósitos de matriz polimérica sejam atualmente os mais importantes em termos de desempenho e de campo de aplicações. Os materiais compósitos de matriz polimérica podem ser divididos em duas famílias distintas: as termoplásticas e as termoendurecíveis (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

2.3.1.1 Compósitos de matriz termoplástica

Estima-se que os compósitos de matriz termoplástica representem cerca de 35% do mercado mundial de materiais compósitos.

Os termoplásticos são polímeros, com estrutura linear, que se tornam moldáveis ou maleáveis acima de uma determinada temperatura porque as macromoléculas podem-se deslocar umas relativamente às outras, por estarem unidas entre si por forças intermoleculares (forças de *Van Der Waals*) e não por meio de ligações químicas. Quando os polímeros termoplásticos são aquecidos, estas ligações são temporariamente quebradas e passa a existir mobilidade molecular que permite a reconformação. Com o arrefecimento posterior, as moléculas como que

“congelam” nas posições entretanto alcançadas, restabelecendo-se as ligações químicas primitivas. Este processo é reversível, o que significa que os termoplásticos podem ser aquecidos, processados e reprocessados as vezes necessárias sem perda das suas características. Esta qualidade dos termoplásticos significa que podem ser recicláveis, o que constitui um ponto importante nos dias de hoje. Diferem assim dos termoendurecíveis que formam uma ligação química irreversível durante o seu processo de cura, os termoendurecíveis quebram as ligações ao passar para o estado líquido, quando aquecidos, e estas ligações não se estabelecem após o arrefecimento.

Os compósitos de matriz termoplástica podem ser divididos em duas categorias distintas:

- Os compósitos de fibras curtas, produzidos a partir de grânulos contendo fibras de comprimento inferior a 6,4 milímetros;
- Os compósitos de fibras longas, que se destacam por apresentarem propriedades mecânicas superiores.

Para aplicações não estruturais e semi-estruturais, os polímeros que se encontram mais frequentemente como matriz são polipropileno, poliamidas e policarbonatos. São facilmente processados por injeção ou por termoconformação. Nos compósitos avançados de alta resistência usam-se sobretudo o PEEK (Poli-éter-éter-cetano), Poliimidias e o PPS (Polisulfureto de fenileno) (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Tabela 3. Caracterização de alguns termoplásticos (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Compósitos	Temperatura máxima de funcionamento	Caraterísticas
Polipropileno (PP)	250 °C	Boa resistência ao impacto e rigidez, resistência à distorção e possui excelente resistência ao ataque químico.
Poliamida (PA)	265 °C	Baixo coeficiente de atrito, grande resistência ao desgaste, boa resistência térmica e uma boa resistência mecânica.
Policarbonato (PC)	80 °C	Boa resistência térmica, química, elevada resistência ao impacto. É bastante utilizado na indústria automóvel, sob a forma de compósitos de fibras longas.
Poli-éter-éter-cetona (PEEK)	250 °C	Maior tenacidade e baixa absorção de água. Custo elevado. Frequentemente utilizadas em compósitos na indústria aeronáutica.
Poliimidias termoplásticas	260 °C	Elevada resistência mecânica: rigidez a altas temperaturas, estabilidade dimensional, boas propriedades elétricas
Polisulfureto de fenileno (PPS)	225 °C	Elevada resistência mecânica e excelente resistência química.

2.3.1.2 Compósitos de matriz termoendurecíveis

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. Os termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados. Uma vez aquecidos assumem uma forma permanente (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

São frequentemente fornecidos para processamento sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador, quando estes componentes são misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional, num processo que se designa “cura”.

Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, dado que, antes da cura, apresentam viscosidades bastante inferiores comparando com as dos termoplásticos. As resinas termoendurecíveis mais utilizadas no fabrico de compósitos para aplicações não-estruturais e semi-estruturais são os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas. Em compósitos avançados de alta resistência, os epóxidos, as bismaleimidias e as poliimidias são as referências mais comuns (Moura, Morais, e Magalhães 2011) e (Christensen 2005).

Tabela 4. Caracterização de algumas matrizes termoendurecíveis (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Compósitos	Caraterísticas
Poliésteres insaturados	Facilidade de processamento e bom compromisso entre propriedades mecânicas, elétricas e químicas. Baixo custo.
Vinilester	Excelente resistência química, elevada tensão de rotura, baixa viscosidade e processo de cura rápido. Foram especificamente desenvolvidas para o fabrico de compósitos com aplicações em ambientes corrosivos.
Fenólicas	Excelente comportamento ao fogo, com baixa emissão de fumos. A principal desvantagem é a libertação de voláteis na cura, que faz com que sejam pouco usadas em compósitos de alto desempenho.
Epóxidos	Elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química, boas propriedades de adesão à fibra, grande estabilidade dimensional, baixa absorção de água e temperaturas de funcionamento entre 100 e 220 °C. Elevado custo.
Bismaleimidias	Baixo peso molecular, elevada resistência térmica, bom comportamento ao desgaste, baixa flamabilidade e baixa emissão de fumos. Elevado custo.
Poliimidias	Elevada estabilidade dimensional a temperaturas elevadas, resistência térmica, resistência mecânica; boa resistência ao impacto, a resistência à oxidação, a boa capacidade de adesão e baixo coeficiente de atrito. Elevado custo, elevada absorção de água e difícil transformação.

Tabela 5. Comparação de propriedades entre termoplásticos e termoendurecíveis (Almeida 2013).

Propriedades	Termoplásticos	Termoendurecíveis
Custo	Inferior	Superior
Resistência à temperatura	Inferior	Superior
Rigidez	Inferior	Superior
Resistência ao impacto	Superior	Inferior
Tenacidade	Superior	Inferior
Vida à fadiga	Inferior	Superior
Resistência química	Superior	Inferior
Viscosidade	Inferior	Superior
Reciclável	Sim	Não

2.3.2 Reforço

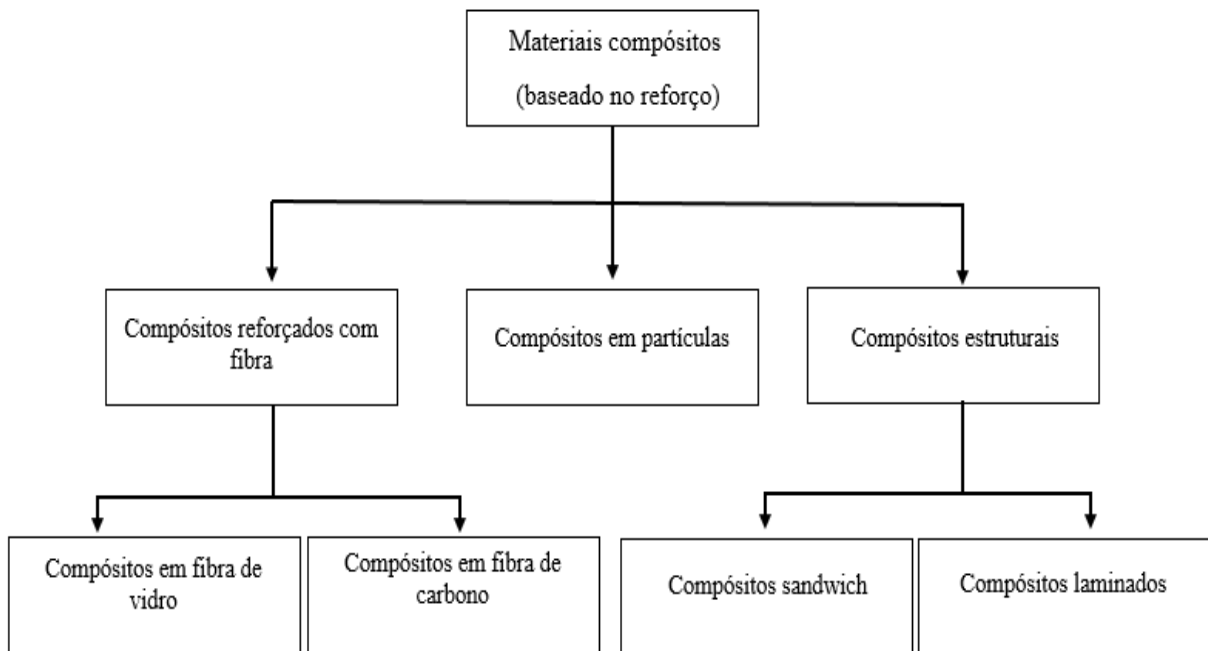


Figura 18. Classificação dos materiais compósitos com base no reforço (Yang et al. 2012).

O reforço tem como principal função suportar as cargas, fornecer resistência e rigidez, bem como dar estabilidade térmica ao compósito. As fibras são utilizadas em larga escala como reforço nos compósitos, pelo facto de apresentarem propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na forma maciça. As fibras não são diretamente utilizadas em aplicações estruturais de engenharia devido às reduzidas dimensões da seção transversal. No entanto, embebidas numa matriz, dão origem a compósitos fibrosos que são de uma classe de

materiais que permite conceber estruturas de elevada resistência mecânica e assinalável leveza (Moura, Morais, e Magalhães 2011) e (Christensen 2005).

Existem vários tipos de reforço, os que são apresentados na Tabela 6 são normalmente utilizados em estruturas de maior exigência e em compósitos avançados. Para além dos mencionados na Tabela 6 existem muitos outros utilizados principalmente em estruturas de menor exigência, destacando-se entre eles as fibras de amianto, sisal, poliamidas e poliésteres (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Tabela 6. Caracterização de alguns reforços (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Reforço	Processo de fabrico	Caraterísticas	Aplicações
Fibra de vidro	Estiramento por vidro fundido.	Resistência ao envelhecimento, alta resistência e útil para aplicações em ambientes corrosivos.	Carcaças de meios de transporte marítimo, tubagens, recipientes de armazenamento, barcos e material desportivo. Industria automóvel
Fibra de carbono	Decomposição térmica de celulose, poliácilonitrilo e alcatrão.	Apresentam as melhores propriedades mecânicas, no sentido longitudinal apresentam um coeficiente de dilatação negativo ou quase nulo.	No domínio da metrologia, da ótica e aeroespacial. Industria automóvel.
Fibras aramídicas (Kevlar®49)	As fibras aramídicas são produzidas a partir de poliamidas aromáticas. A solução de polímero é mantida a baixa temperatura (entre -80° C e -50° C), sendo depois extrudida a uma temperatura de aproximadamente 200° C.	Excelente resistência química, mecânica, ótima relação rigidez-peso, boa resistência ao impacto e à fadiga, boa capacidade de amortecimento de vibrações e boa resistência a solventes orgânicos.	Casco de barcos, estruturas de aviões, capacetes, coletes de proteção balística e automóveis de competição.
Fibras de boro	Deposição de boro em fase de vapor sobre um fio de tungsténio ou carbono, que atua como substrato.	Módulo de elasticidade cinco vezes superiores ao da fibra de vidro, sendo no entanto mais pesados.	Industria aeronáutica.

2.3.2.1 Fibra de vidro

As fibras de vidro constituem o tipo de reforço mais utilizado na indústria. O seu teor alcalino é o principal responsável pela sua resistência ao envelhecimento, com teores inferiores a 14% apresentam alterações menos significativas em contato com agentes atmosféricos ou químicos. Assim a fibra do tipo A, fortemente alcalina, foi sendo progressivamente substituída pela fibra tipo E, um vidro de borossilicato com baixa quantidade de compostos alcalinos, já que apresenta boas propriedades elétricas, mecânicas e químicas (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Existem também as fibras do tipo S e R que são produzidas a partir de vidros de alta resistência, sendo fortemente utilizadas na indústria aeronáutica.

A técnica mais comum para produzir fibras de vidro é o estiramento de vidro fundido através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios de dimensões muito precisas, a temperatura de fusão ronda os 1260 °C. A estes filamentos é posteriormente feito um revestimento têxtil para o fabrico de tecidos sem risco de danificação da fibra, ou um revestimento plástico para permitir a compatibilização da fibra com as diferentes matrizes orgânicas existentes (Moura, Morais, e Magalhães 2011). O revestimento plástico contém quatro componentes distintas:

- Um ligante que permite manter os filamentos unidos, evitando-se movimento relativo e abrasão; os ligantes são constituídos por suspensões ou emulsões de poliacetato de vinilo, resinas de poliéster ou epóxico;
- Um agente de adesão à base de compostos orgânicos de silício com o objetivo de facilitar a adesão fibra-matriz de resina;
- Um lubrificante;
- Agentes anti-estáticos e/ou agentes de impregnação.

São fibras fortemente higroscópicas, as suas propriedades são quantificadas na Tabela 7.

Tabela 7. Propriedades de alguns tipos de fibra de vidro (Moura, Morais, e Magalhães 2011), (Biron 2014) e (Ces EduPack 2014).

Propriedades	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (g/cm ³)	2,55 - 2,6	2,49 - 2,5	2,55
Módulo de Young (GPa)	72 - 85	86 - 93	86
Tensão de rotura (MPa)	1950 - 3400	4580 - 4800	4400
Deformação na rotura (%)	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	5,0	2,9	4,0
Preço (EUR/Kg)	1,22 - 2,44	14,6 - 24,4	---

2.3.2.2 Fibra de carbono

Existem dois tipos de fibras agrupáveis no termo mais lato de “fibras de carbono”: as fibras de carbono propriamente ditas, com percentagens de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite onde a percentagem de carbono chega aos 99%. Estas são aplicadas em compósitos de elevado desempenho mecânico, em áreas como a aeronáutica e a indústria espacial (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

A produção de fibra de carbono centra-se na decomposição térmica de vários precursores orgânicos, que são essencialmente três:

- As fibras produzidas a partir da celulose (*rayon fibers*) que exigem elevadíssimas temperaturas de grafitação, tornando o processo mais dispendioso;
- Poliacrilonitrilo (PAN) o precursor atualmente mais utilizado;
- As fibras produzidas a partir do alcatrão (*Pitch*), que apresentam propriedades mecânicas inferiores.

As suas propriedades estão retratadas na Tabela 8.

Tabela 8. Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Propriedades	PAN	<i>Pitch</i>	<i>Rayon fibers</i>
Densidade (g/cm ³)	1,8	2,0	1,7
Módulo de Young (GPa)	200 – 400	300 – 700	415 – 680
Tensão de rotura (MPa)	2480 – 5600	1900 – 2200	2070 – 2760
Deformação na rotura (%)	0,6 – 1,2	1 – 1,5	0,5 – 0,6
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	-0,7 a -0,5	-1,6 a -0,9	-

As fibras de carbono apresentam uma particularidade importante: no sentido longitudinal têm um coeficiente de dilatação negativo ou quase nulo.

Segundo Moura, Morais e Magalhães (Moura, Morais, e Magalhães 2011) as fibras de carbono são classificadas com base na sua resistência mecânica e comercializadas segundo a seguinte designação:

- UHM (*ultra high modulus*) para fibras com módulos superiores a 500 GPa;
- HM (*high modulus*) para fibras com módulos superiores a 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo em tração inferior a 1%;
- IM (*intermediate modulus*) para fibras com módulos até 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo de cerca de 1%;
- Fibras de baixo módulo, com valores inferiores a 100 GPa;
- HS (*high strength*) para fibras de resistência à tração superiores a 3 GPa e rácio resistência/rigidez entre 1,5 e 2%.

2.3.2.3 Fibras Aramídicas

As fibras aramídicas são produzidas a partir de poliamidas aromáticas. A solução de polímero é mantida a baixa temperatura (entre -80°C e -50°C), sendo depois extraída a uma temperatura próxima dos 200°C . Por este método, a cadeia molecular é alinhada conseguindo-se obter uma melhoria das propriedades mecânicas (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Atualmente existem dois tipos de produtos:

- As fibras *standard*, tipo Kevlar®29, Twaron® ou HM.50® (referência utilizada pela Teijin), com aplicações correntes em cabos, materiais diversos de baixo coeficiente de atrito e objetos de proteção pessoal;
- As fibras de elevado módulo, tipo Kevlar®49 da Dupont ou Twaron HM® da Enke.

Tabela 9. Propriedades mecânicas de fibras aramídicas (Moura, Morais, e Magalhães 2011) e (Ces EduPack 2014).

Propriedades	Kevlar®29	Kevlar®49	Kevlar®149
Densidade (g/cm^3)	1,43 – 1,45	1,44 – 1,45	1,46 – 1,48
Módulo de Young (GPa)	62 - 80	117 - 130	170 - 190
Tensão de rotura (MPa)	2900 - 3600	2500 - 3300	3200 - 3600
Deformação na rotura (%)	3,6	1,9	3
Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	-2,0	-2,0	---
Preço (EUR/Kg)	18,3 – 30,5	52,6 - 148	67 - 167

2.3.2.4 Fibras de boro

As fibras de boro apresentam um módulo de elasticidade cinco vezes superior ao da fibra vidro mas são ligeiramente mais pesadas do que estas. Utilizam-se na forma de pré-impregnadas numa resina de epóxico, fenólico ou poliimida. Pelo seu elevado custo, os compósitos com fibras de boro aplicam-se sobretudo na indústria aeronáutica. As fibras de boro também podem ser integradas no seio de matrizes metálicas para produzir materiais de utilização a temperaturas muito elevadas. Contudo, o boro tem o inconveniente de reagir com a matriz metálica, destruindo-se. Esta situação é ultrapassada através de uma deposição final de carboneto de boro ou de carboneto de silício, que atua como barreira ao mecanismo de difusão (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Propriedades típicas das fibras de boro são referenciadas na Tabela 10.

Tabela 10. Propriedades mecânicas de fibras de boro em função do seu diâmetro (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Propriedades	100 µm	140 µm	200 µm
Densidade (g/cm³)	2,61	2,47	2,39
Módulo de Young (GPa)	400	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/°C)	4,9	4,9	4,9

2.3.3 Cargas

Os materiais compósitos para além do reforço e da matriz, são constituídos por cargas e outros aditivos que se juntam com o propósito de produzir vários efeitos como:

- Diminuição do custo;
- Facilidade de manuseamento;
- Melhoria das características de moldação;
- Melhoria das propriedades pós-cura.

As cargas mais comuns são obtidas a partir de depósitos naturais, por exemplo: mica, feldspato, sílica, quartzo, argila ou cálcio; têm como principal função diminuir o preço do compósito. As suas principais características devem ser a boa dispersabilidade, estabilidade de suspensão, baixa densidade, cor clara, baixa percentagem de humidade, baixa absorção de óleo, resistência ao calor e resistência química (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

2.3.4 Aditivos

Frequentemente utilizam-se aditivos com o objetivo de melhorar determinadas propriedades específicas sendo elas: diminuição da contração da matriz durante o processo de cura; melhoria da resistência ao fogo; diminuição da emissão de voláteis; supressão da emissão de estireno, contribuindo para melhoria da qualidade do ar no ambiente de trabalho; condutibilidade elétricas; melhoria da tenacidade; estabilizadores de ultravioletas; colaboração; efeitos anti-estáticos (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

2.3.5 Processamento das formas dos produtos: tecidos e pré-formas

Existem várias formas de fabricação tanto para as matrizes como para as fibras, sendo as mais comuns os tecidos e pré-formas. Os tecidos são produzidos antes da etapa de impregnação, oferecem boas oportunidades para criar formas complexas com melhores propriedades mecânicas do que os do tipo unidirecional. Normalmente as fibras usadas são as mesmas tanto na direção longitudinal como transversal. O processo de produção de uma camada de tecido consiste em colocar cada fibra de forma alternada a fim de criar um tecido. As fibras costumam ser usadas sob a forma de tecidos, sendo alguns destes descritos a seguir:

- Tecido plano – cada feixe de fibras passa alternadamente sob e sobre outros feixes de fibras. É o mais comum, com boa resistência mecânica em ambas as direções (vertical e horizontal).

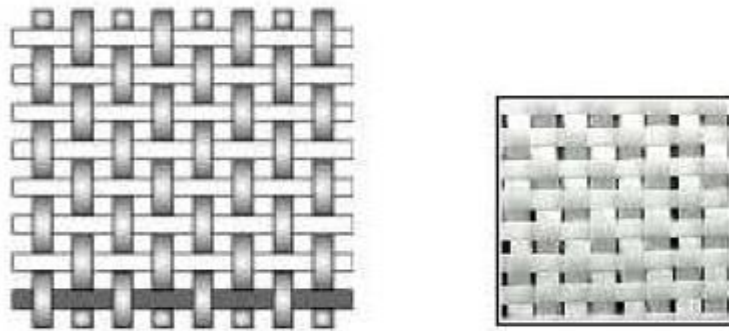


Figura 19. Tecido plano (Azevedo 2008).

- Tecido *twill* – um ou mais feixes de fibras passam alternadamente sob e sobre dois ou mais feixes de fibras de forma repetitiva e regular, o que resulta num padrão diagonal. Tem melhores propriedades mecânicas do que o tecido plano.

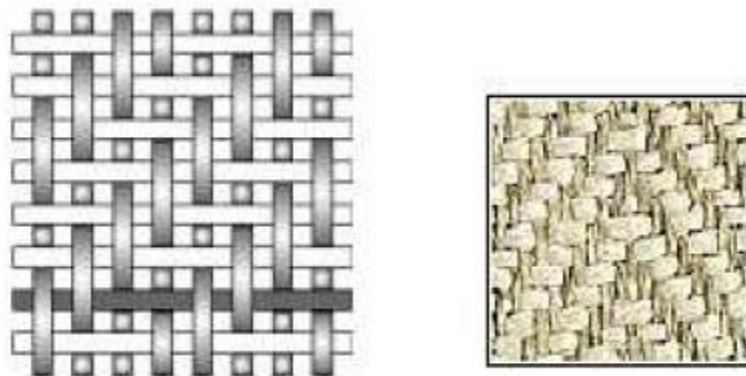


Figura 20. Tecido *twill* (Azevedo 2008).

- Tecido cetim – cada feixe de fibras passa sobre um número de feixes de fibras e depois sob um feixe de fibras, o que resulta num tecido que é facilmente distorcido. Tal como o anterior, tem melhores propriedades mecânicas do que o tecido plano.

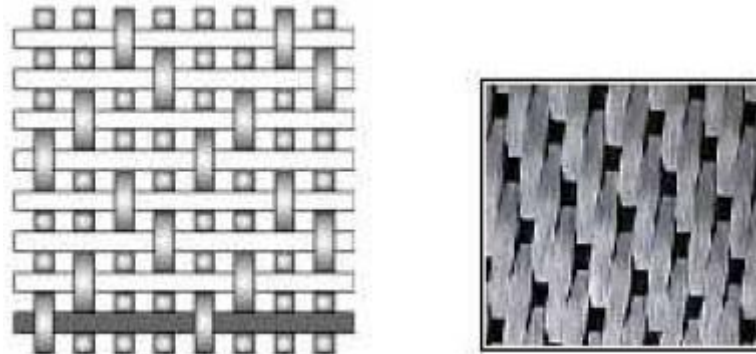


Figura 21. Tecido cetim (Azevedo 2008).

A produção de pré-formas consiste na colocação de fibras em bruto como um fio contínuo com orientação unidirecional. O passo seguinte é espalhar a resina, não deixando-a curar completamente com a finalidade de criar uma junta entre todas as fibras. Uma máquina especial fornece calor e pressão com a finalidade de manter as fibras alinhadas, insere a resina e controla a distribuição da espessura e da resina. Uma inspeção visual ajuda a identificar defeitos na linha. A Figura 22 demonstra o processo de pré-impregnados.

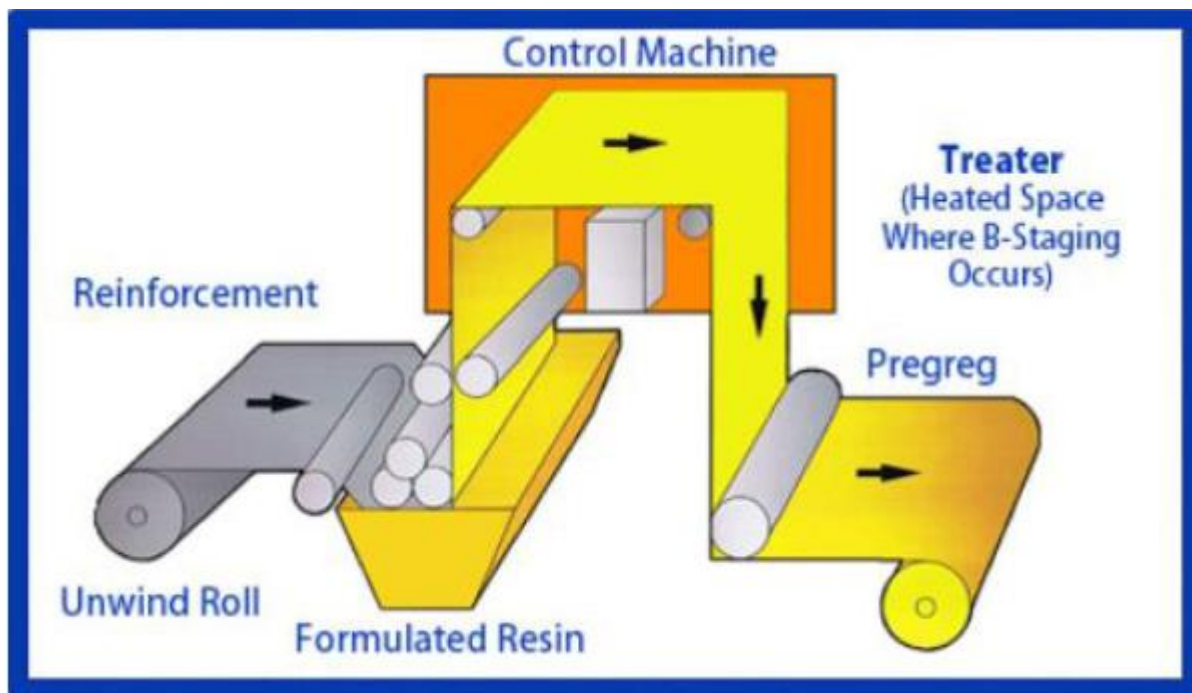


Figura 22. Esquema de produção do pré-impregnados (handbook 1997).

2.3.6 Processos de fabrico

Existem diversos processos de fabrico associados à fabricação de materiais compósitos, cada qual com as suas especificações que condicionam os tipos de peças que podem ser produzidas. Fatores como os requisitos de propriedades mecânicas, dimensões, complexidade das formas, volume e taxa de produção são decisivos na seleção do processo (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Dos vários processos de fabrico existentes, os mais importantes são:

- i. Moldação por contato;
- ii. Moldação por vácuo;
- iii. Moldação por compressão;
- iv. Moldação por injeção;
- v. Autoclave;
- vi. Enrolamento filamentar;
- vii. Pultrusão;
- viii. Centrifugação;
- ix. Moldação em contínuo;
- x. Injeção de termoplásticos reforçados.

Os diferentes processos podem ser, genericamente, classificados em dois tipos: processos em molde aberto ou processos em molde fechado.

- **Processos em molde aberto**

Apenas uma das superfícies tem bom acabamento, limitação que é compensada pela possibilidade de realização de componentes de grandes dimensões e de geometria complexa, pois a pressão exercida é reduzida ou inexistente (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

- **Processos com moldes fechados**

Os componentes obtidos por este processo apresentam excelente acabamento nas duas superfícies e ótima reprodutibilidade. Outra vantagem inerente aos moldes fechados é a menor emissão de produtos voláteis, nocivos à saúde, nomeadamente o monómero de estireno, presente na maior parte dos processos que envolvem as resinas de poliéster (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Dos vários processos mencionados existem vários que servem para fabricar materiais compósitos reforçados por fibras, aqui serão abordados os processos mais utilizados na indústria automóvel.

2.3.6.1 Moldação por vácuo

O processo consiste na aplicação de vácuo no interior do molde. A utilização de moldes estanques permite reduzir as emissões de produtos voláteis, nocivos à saúde. A resina é injetada a baixa pressão no interior do molde ou, alternativamente, a resina e o reforço são introduzidos previamente no interior do molde. De uma forma resumida o processo pode-se simplificar nas seguintes etapas:

- a. Aplicar desmoldante ao molde;
- b. Aplicar uma camada de *gel-coat* para dar cor e para “esconder” as fibras,
- c. Aplicar camada de reforço geralmente na forma de pré-impregnado;
- d. Colocar um filme para facilitar a separação da peça;
- e. Colocar um filme perfurado para comprimir a peça facilitando a saída do ar;
- f. Colocar uma camada para absorver os eventuais excessos de resina;
- g. Pôr um vedante para facilitar a selagem do conjunto;
- h. Colocar um filme plástico ligado a uma bomba de vácuo;
- i. Aplicar vácuo (0,15 até 1 bar) e temperaturas de cura abaixo de 170° C.

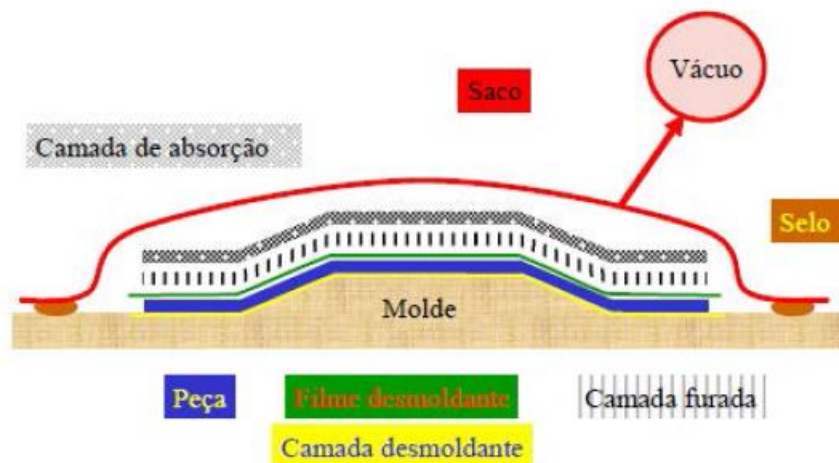


Figura 23. Esquema do processo de moldação por vácuo (Almeida 2013).

O processo referenciado é adequado para produzir componentes de médias e grandes dimensões e séries que vão de 500 até 5000 peças por ano (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Exibe como vantagens: a aplicação de vácuo que compacta a pré-forma e ajuda a resina a penetrar e molhar uniformemente as fibras; ajuda a eliminar materiais ou gases em excesso contidos na resina não curada; permite a obtenção de duas superfícies lisas, com quantidades reduzidas de bolhas de ar e percentagens até 70% de fibras. É de salientar alguns inconvenientes neste processo: preço elevado dos pré-impregnados e do seu armazenamento; despesas avultadas em material não recuperável como é o caso do filme desmoldante, material de absorção, saco, etc; necessita de equipamento auxiliar (arcas frigoríficas para armazenamento dos pré-impregnados, estufa ou autoclave) dispendioso; dificuldade em aplicar vácuo em peças complexas; exige mão-de-obra especializada.

2.3.6.2 Moldação por injeção

A moldação por injeção é um processo muito utilizado para a produção de grandes séries de peças. Pode ser aplicado a compostos de moldação de matriz termoendurecível ou termoplástica. No que diz respeito à produção de componentes termoendurecíveis reforçados, pode-se distinguir a moldação por injeção de granulados reforçados prontos a moldar e de compostos de moldação. Os primeiros apresentam a vantagem de serem facilmente processados em equipamentos convencionais (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

No processo de moldação por injeção é possível uma grande variedade de processos como os que citamos: VRI, VIP, VARTM, RI, RIFT, SCRIMP, CVI, RTM e SRIM. Dos processos referidos vamos prestar particular atenção à análise dos processos de RTM, SRIM, e SCRIMP.

- **RTM**

Nesta variante específica do processo de moldação com injeção de resina, o reforço que normalmente é uma pré-forma ou um tecido, é previamente inserido no molde onde posteriormente é injetada a resina sob baixa pressão. A resina impregna o reforço e cura, formando o compósito (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

É um processo utilizado em componentes de grandes dimensões e geometria complexa. É de uso corrente na indústria automóvel pois permite atingir elevadas taxas de produção, é igualmente visível o seu uso na indústria aeronáutica.

Tem por vantagens: como é realizada uma injeção automática de resina num molde fechado existe uma reduzida libertação de vapores de estireno para o meio ambiente; utiliza pressões de injeção mais baixas em relação à moldação por compressão; origina peças com excelentes características mecânicas uma vez que existe uma grande percentagem de reforço na peça; permite obtenção de peças em que as duas superfícies têm excelente acabamento superficial; processo que se adequa à produção de peças com grande profundidade e com formas complexas (Alvino 2012).

Como inconvenientes temos: para a produção de peças complexas é necessário realizar diversas simulações para garantir que todas as extremidades da peça se encontram impregnadas; é necessário produzir molde o que nem sempre é fácil ou economicamente viável; exige que sejam feitos investimentos de maior vulto que os processos de moldação por contacto ou vácuo e longos tempos de ciclos (Alvino 2012).

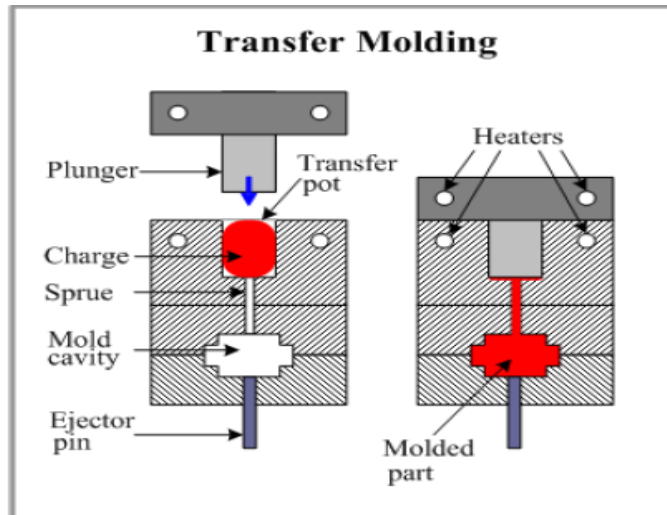


Figura 24. Processo RTM (Alvino 2012).

- **SRIM**

Genericamente esta variante é similar ao processo RTM só que em vez de ser injetada uma resina, é injetada uma mistura de duas resinas que vão reagir quimicamente uma com a outra, ocorrendo o processo de cura. Estas duas resinas são misturadas numa câmara antes de serem injetadas no molde. Para este processo recorre-se usualmente ao uso de um reforço em fibra de vidro e uma resina que apresenta baixa viscosidade.

Com a utilização deste processo produtivo, existe uma poupança de tempo em relação ao processo de RTM pois o SRIM apresenta um tempo de cura da resina muito mais baixo. A rápida mistura dos dois componentes acelera o processo de polimerização, tornando desnecessário o aquecimento do molde para acelerar o processo de cura. As peças produzidas por este processo são particularmente aplicadas na indústria automóvel e destacam-se por apresentarem grandes dimensões, leveza e boa resistência ao choque (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

- **SCRIMP**

O processo de moldação por infusão de resina de *Seemann* é outra das variantes possíveis ao processo RTM sendo representado esquematicamente na Figura 25 Essa técnica foi desenvolvida e patenteada por *William Seemann*, e utiliza somente a pressão de vácuo para infusão da resina. Esta técnica difere do processo de RTM e de VARTM, que são realizados com o auxílio de molde dos dois lados, enquanto esta técnica utiliza apenas molde de um lado da peça.

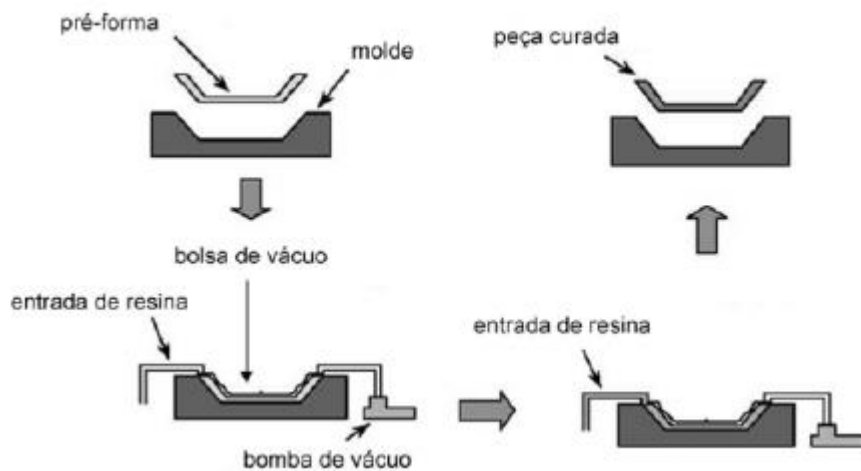


Figura 25. Representação esquemática do processo de SCRIMP (Almeida 2013).

A Figura 26 demonstra o esquema típico para a realização de SCRIMP. A pré-forma é posicionada no molde previamente recoberto por um agente desmoldante. Acima da pré-forma, coloca-se uma camada de um material fino e poroso (“*peel ply*”) que não adere à resina, para facilitar a desmoldagem da peça após o processamento. Em seguida, coloca-se um material de alta permeabilidade que aumenta a velocidade do fluxo de resina através da superfície e, simultaneamente, permite o fluxo na direção transversal da pré-forma. Por último, coloca-se a bolsa de vácuo que é selada com fita selante. Pelo menos duas mangueiras são posicionadas entre o molde e a saco de vácuo, uma é conectada à bomba de vácuo e a outra é posicionada no recipiente que contém a resina. Quando a pressão de vácuo é aplicada, a pré-forma é compactada gerando-se um gradiente de pressão no interior do sistema, permitindo assim a infusão da resina.

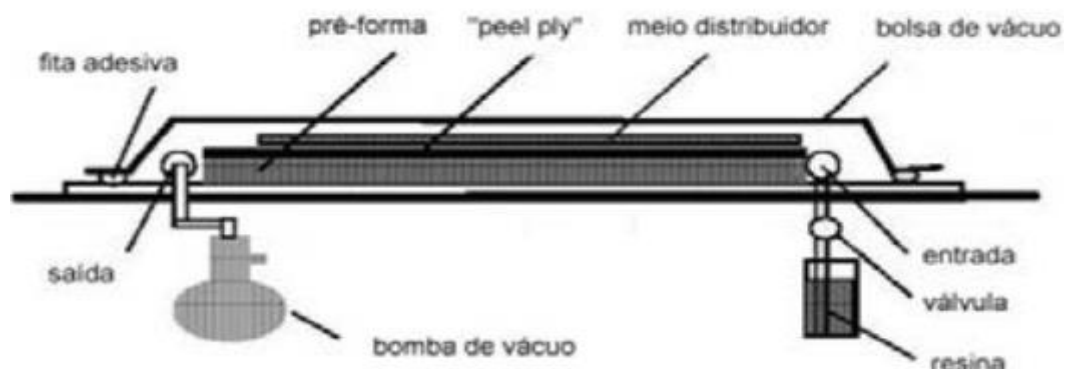


Figura 26. Esquema da montagem para a realização de SCRIMP (Almeida 2013).

A pressão de injeção é igual à pressão atmosférica e a pressão de vácuo é limitada pela pressão de vapor das substâncias voláteis da resina utilizada. No caso da resina éster-vinílica a pressão de vapor é limitada pela pressão de vapor do estireno que é igual a 10 KPa a 40° C.

A principal vantagem do processo de SCRIMP, comparado com o processo de RTM, é a necessidade de apenas um molde, não necessitando de um contra-molde o que possibilita uma redução do investimento inicial. As peças processadas por SCRIMP possuem boa qualidade e alta fração volumétrica de fibras. Outra das vantagens deste processo é a sua baixa emissão de voláteis durante o processamento.

A desvantagem dessa técnica prende-se com a dificuldade de automatização. Além disso, o lado da peça moldado pelo saco de vácuo não tem bom acabamento superficial, e a espessura da peça não é constante devido à compactação não-uniforme da pré-forma.

2.3.6.3 Moldação em Autoclave

O processo de moldação em autoclave consiste em consolidar um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. Os ciclos destas variáveis dependem naturalmente do material a moldar, mas implicam quase sempre uma subida gradual, estágio a valores constantes e diminuição também gradual, estando frequentemente desfasados. Numa primeira fase, procura-se baixar a viscosidade da resina para eliminação de voláteis e promover o fluxo de resina, de modo a garantir teores de fibra elevados e homogêneos. A etapa seguinte é a cura e consolidação do componente, na qual a pressão desempenha o papel mais relevante (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Este processo de moldação é frequentemente utilizado na produção de laminados. Para tal, começa-se por cortar e empilhar o pré-impregnado sobre o molde, na sequência pretendida e até se atingir a espessura desejada. O conjunto é inserido num saco de vácuo e sujeito a um ciclo de pressão e temperatura devidamente definido.

Oferece a vantagem de utilizar elevadas pressões (geralmente 15 bar), resultando numa melhor compactação, maiores percentagens de volume de fibras, e menor teor de vazios e porosidade. Neste processo de moldação são frequentemente utilizados os pré-impregnados que são telas de tecidos de fibra impregnados com resina em percentagens maximizadas para a produção de laminados estruturais denominados os compósitos avançados. A moldação em autoclave permite a produção de peças de grandes dimensões e geometrias complexas com elevada qualidade e excelentes propriedades mecânicas, devido à elevada fração volúmica de reforço (mais de 60%). Os seus principais inconvenientes são o forte investimento inicial em moldes e materiais de saco de vácuo, a morosidade na preparação de todo o sistema e o elevado custo energético do equipamento que torna o processo inadequado para a produção em série (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

2.3.6.4 Moldação por compressão a quente

Neste processo é usado um composto de moldação do tipo SMC (compostos de fibra de vidro curtas com resina poliéster, ou vinilester e cargas) (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

No processo de composição do SMC é selecionado um tecido de vidro e uma resina entre uma ou duas camadas que vai alimentar o misturador. O tecido de vidro tem as fibras orientadas 0/90 graus. O material é combinado numa máquina de composição SMC padrão, com exceção de que o triturador de vidro é substituído por um rolo de tecido. O problema principal durante o processo é manter as fibras perpendiculares durante a sua deposição. A Figura 27 explica como deve ser colocado o rolo tendo em atenção o ângulo e a direção. Na Figura 28 o rolo de fibra foi esticado e impregnado com resina. O material composto necessita no mínimo de 48 horas para estar pronto e de seguida pode ser enviado para a moldagem.



Figura 27. Colocação do rolo corretamente (Berger 2011).

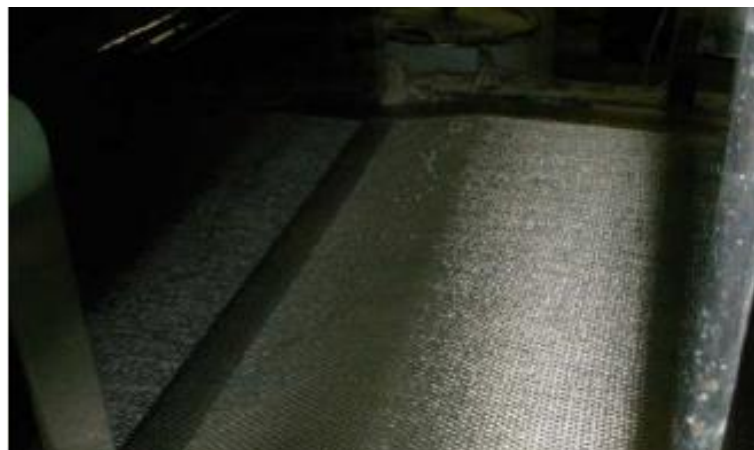


Figura 28. Infusão de resina durante o processo SMC (Berger 2011).

A moldagem por compressão a quente utilizando um composto SMC processa-se da seguinte forma: o composto de moldação é colocado no interior de um molde metálico pré-aquecido até 140°C. Por compressão, o composto flui dentro do molde e preenche a cavidade de moldação expulsando o ar acumulado. A peça fica pronta após um curto processo de cura sob o efeito de pressão e temperatura (Moura, Morais, e Magalhães 2011). A Figura 29 fornece uma melhor percepção do processo.

A vantagem deste processo consiste na elevada taxa de produção para grandes séries. As desvantagens são o custo dos moldes e a necessidade de utilizar prensas de elevada força.

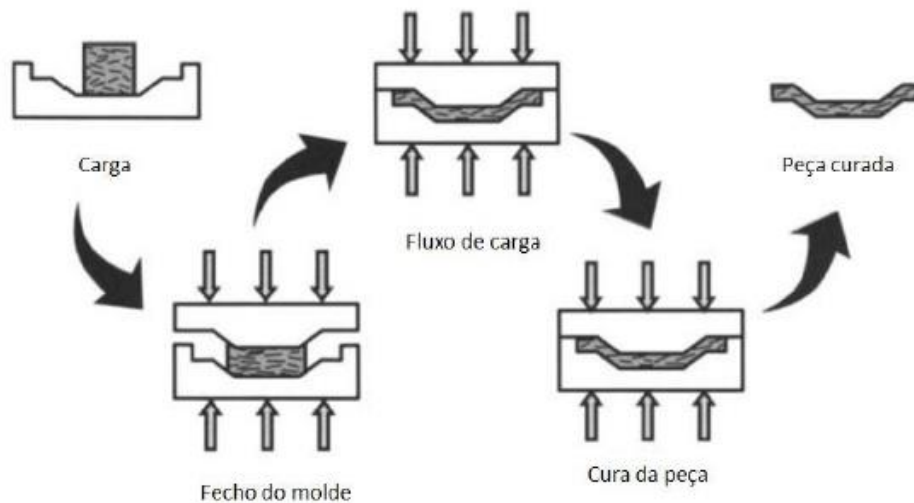


Figura 29. Processo SMC (F.C.Campbell 2004).

2.3.7 Reciclagem de materiais compósitos

A utilização crescente de materiais compósitos conduz naturalmente ao aumento de componentes que estão fora de serviço. Atualmente, o depósito em aterro é o destino da maioria dos resíduos de materiais compósitos. Todavia, como os polímeros e os compósitos não são biodegradáveis, quando depositados num aterro apresentam vida quase infinita e causam poluição ambiental.

A reciclagem nasce da necessidade de preservar os recursos naturais limitados e de proporcionar um melhor ambiente. De salientar que a comunidade europeia estabeleceu recentemente que os polímeros e compósitos devem ser reciclados, não obstante as dificuldades resultantes do fato dos compósitos serem constituídos por dois ou mais materiais diferentes (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

A reciclagem de materiais compósitos em engenharia irá contribuir para a sustentabilidade e desenvolvimento sustentável de processos industriais. Atualmente, metais, vidros, termoplásticos e muitos outros materiais de engenharia são reciclados. No entanto os materiais compósitos são uma categoria especial de materiais de engenharia que ainda não são devidamente reciclados. Isto é causado pela sua inerente natureza heterogénea da matriz e do reforço, o que leva a materiais de fraca capacidade de reciclagem, em particular os materiais compósitos à base de matriz termoendurecível (Yang et al. 2012).

As técnicas atualmente mais usadas para a reciclagem de compósitos são: i) a trituração que é um processo de reciclagem secundário, onde os resíduos do compósito são cortados num tamanho adequado para servirem como cargas noutras aplicações; no caso dos compósitos de matriz termoplástica, os materiais resultantes são usados nos processos de moldação por injeção ou compressão, já os compósitos de matriz termoendurecível são utilizados como cargas nos compostos de moldação; ii) a pirólise, as fibras são separadas e reutilizadas como reforços ou cargas, nomeadamente nos compostos de moldação; iii) a incineração pode ser considerada um processo de reciclagem desde que a energia produzida seja aproveitada para outros fins. E finalmente, iv) a dissolução por ácidos, que consiste no uso de produtos químicos para dissolver o polímero (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

2.3.8 Compósitos naturais

As preocupações ecológicas têm vindo a resultar num crescente interesse do estudo e aplicação dos materiais de natureza natural e biodegradável dando grande atenção aos problemas de reciclabilidade e comportamento ambiental levando à introdução de novos materiais compósitos mais amigos do ambiente.

Praticamente desde o início da civilização que o Homem utiliza materiais compósitos naturais nas suas construções. A sua evolução teve altos e baixos, e hoje, devido à consciencialização de que temos de proteger o nosso meio ambiente, cada vez mais procura-se novas aplicações para esses materiais. Os compósitos naturais podem ser tanto de origem animal (couro, chifre, etc.), como vegetal (sisal, juta, algodão, etc.).

A mudança para construções mais sustentáveis na indústria automóvel é uma exigência dos regulamentos europeus, onde desde 2005 tem de ser reciclável 85% do peso do veículo.

Dando ênfase às necessidades ambientais, resultaram o desenvolvimento de materiais compósitos de origens renováveis, onde se utilizam fibras naturais de origem vegetal, amigas do ambiente, com baixos custos, e como alternativa ao uso de fibras de vidro, combinando sempre que possível o uso de matrizes poliméricas biodegradáveis, desenvolvendo verdadeiros biocompósitos. Em 2015, a percentagem de produtos recicláveis aumentará para 95% do peso do veículo (Koronis, Silva, e Fontul 2013).

Tabela 11. Propriedades das fibras de vidro e de diversas fibras naturais (Ces EduPack 2014).

Propriedades	Fibras						
	Vidro E	Linho	Cânhamo	Juta	Ramie	Sisal	Algodão
Densidade g/cm ³	2,55 – 2,6	1,4	1,48	1,46	1,5	1,33	1,51
Resistência à tração 10E ⁶ N/m ²	2400	800 – 1500	550 – 900	400 – 800	500	600 – 700	400
Módulo de Young, E (GPa)	72 - 85	60 – 80	70	10 – 30	44	38	12
Módulo de Young específico (E/densidade)	29	26 – 46	47	7 – 21	29	29	8
Extensão de rotura (%)	3	1,2 – 1,6	1,6	1,8	2	2 – 3	3 – 10
Absorção de humidade (%)	-	7	8	12	12 – 17	11	8 – 25
Preço (EUR/Kg)	1,22 - 2,44	1,5	0,6 – 1,8	0,35	1,5 – 2,5	0,6 – 0,7	1,5 – 2,2

2.3.8.1 Limitações das fibras naturais

Relativamente às limitações, existem problemas em termos de qualidade, pois as características das fibras dependem muito da forma como são produzidos, o que faz com que seja necessário um bom acompanhamento e sementes de qualidade, por forma garantir obtenção de boas propriedades. A produção exige um controlo mais apertado do que as fibras de vidro. Devido a alta concentração de defeitos nas fibras, faz com que haja uma baixa resistência ao impacto. Tem uma grande afinidade com a água, o que pode significar maiores problemas de degradação e menor capacidade de aderência às matrizes. Podem ficar manchadas e emitir odores (Deyholos e Potter 2014).

2.3.9 Maquinagem de materiais compósitos

A maquinagem em materiais compósitos advém da necessidade de ligar componentes estruturais. A furação é um dos processos de maquinagem mais usado, nomeadamente para o estabelecimento de ligações ou reparações estruturais. O corte de materiais compósitos é outro processo que deve merecer atenção pelos danos que pode causar. Independentemente do método usado, a maquinagem de materiais compósitos apresenta as seguintes características (Moura, Morais, e Magalhães 2011):

- É uma operação delicada, devido à heterogeneidade e anisotropia dos materiais; não se consegue atingir a mesma qualidade obtida nos materiais metálicos;
- Os métodos tradicionais usados nos materiais metálicos devem ser adaptados de modo a reduzir os danos causados por fatores térmicos e mecânicos;
- A orientação das fibras tem grande importância no comportamento ao corte;
- A criação de descontinuidades nas fibras afeta o desempenho do componente;
- As fibras ficam expostas à humidade e ao ataque de agentes químicos;
- A temperatura durante a operação de corte não deve exceder a temperatura de cura nas resinas termoendurecíveis para evitar a degradação do material; as fibras de vidro e aramídias apresentam baixa condutividade térmica, o que pode originar excessivo aquecimento localizado; no caso de resinas termoplásticas, devem-se evitar temperaturas próximas da temperatura de fusão;
- A diferença de coeficiente de expansão térmica entre as fibras e a matriz dificulta o rigor dimensional; é comum a obtenção de furos de diâmetro inferior ao da broca utilizada;
- É difícil a obtenção de superfícies suaves e com bom acabamento; os compósitos de aramida, em particular, são muito tenazes e absorvem bastante energia durante o corte, o que implica uma superfície de corte irregular.

2.3.9.1 Furação de materiais compósitos

Na furação em compósitos recorre-se geralmente a ferramentas de corte revestidas (carboneto de tungsténio, nitreto de titânio ou diamante) para aumentar o tempo de vida útil. Esta operação pode causar diversos defeitos nas peças, como é o caso da delaminação, fissuras interlaminares, descolamento fibra/matriz e danos de origem térmica (Moura, Morais, e Magalhães 2011) e (Durão et al. 2005).

Estudos realizados mostram que brocas mais pontiagudas originam uma penetração mais gradual, diminuindo assim a extensão das delaminações. A força de avanço pode ser substancialmente reduzida através da realização de um pré-furo de menor diâmetro. Os laminados com camadas diferentemente orientadas apresentam melhores superfícies após a maquinagem do que os laminados unidireccionais (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

2.3.9.2 Corte de materiais compósitos

O corte de materiais compósitos pode ser executado recorrendo a três métodos diferentes: o corte com a serra, o corte com jato de água e o corte com laser.

As operações de corte com serra podem ser executadas com diferentes tipos de serra (serras de fita, serras de disco), geralmente diamantadas para melhor resistência ao desgaste.

No corte por jato de água, esta é projetada a alta velocidade (800 m/s) através de um orifício de muito pequenas dimensões (0,25 mm) sobre a superfície a cortar. Os parâmetros mais importantes são: a pressão da água, velocidade de corte, a espessura do laminado e o diâmetro do orifício de saída. Este processo de corte apresenta como vantagens o facto de não originar pó prejudicial à saúde do operador, e o nível de ruído associado ser baixo.

O corte com laser é executado a partir de um feixe concentrado de luz monocromática focada na peça a cortar. O corte executa-se por fusão, vaporização e degradação química. Este processo de corte geralmente danifica a resina na zona de corte devido ao aquecimento localizado que provoca. A necessidade de ventilação é importante devido aos fumos emitidos durante a operação e porque evita a queima da resina (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

2.3.10 Ligações em materiais compósitos

Segundo Moura, Morais e Magalhães (Moura, Morais, e Magalhães 2011), a utilização generalizada de materiais compósitos em estruturas exige frequentemente o estabelecimento de ligações entre diferentes componentes. Estas ligações, usualmente designadas por juntas, podem-se estabelecer entre dois componentes de material compósito ou, por exemplo, entre um componente metálico e um compósito. O pré-requisito fundamental de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre os dois componentes, mantendo a integridade estrutural sob solicitações estáticas e ou dinâmicas e condições ambientais adversas. As juntas são também usadas na execução de reparações. De um modo geral, as juntas implicam um aumento de peso da estrutura, originam problemas de fabrico na sua execução, constituem zonas de potencial colapso da estrutura e encarecem o produto final.

As ligações usadas nos materiais compósitos podem-se dividir em três tipos diferentes:

- Ligações aparafusadas e rebitadas;
- Ligações coladas com adesivo;
- Ligações coladas por fusão do polímero base do compósito, que são exclusivas dos compósitos de matriz termoplástica devido à sua capacidade de reprocessamento.

2.3.10.1 Ligações aparafusadas e rebitadas

É um tipo de ligação muito usada em materiais compósitos. As principais vantagens são: permitem a desmontagem rápida e repetida dos componentes para execução de reparações ou substituição sem o danificar; não requerem a preparação prévia das superfícies; não são afetadas por ciclos térmicos e ambientes húmidos; permitem uma fácil inspeção visual para a deteção da presença de dano ou desgaste; bom desempenho sob solicitações de tração (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Como desvantagens pode-se salientar: a execução de furo interrompe a continuidade das fibras e reduz a resistência dos substratos; a presença do furo induz concentração de tensões nos componentes que pode originar a sua rotura; adiciona peso à estrutura; as propriedades viscoelásticas dos polímeros originam relaxação de tensões, promovendo a diminuição do pré-esforço de aperto e reduzindo assim o desempenho da junta (Marques 2014).

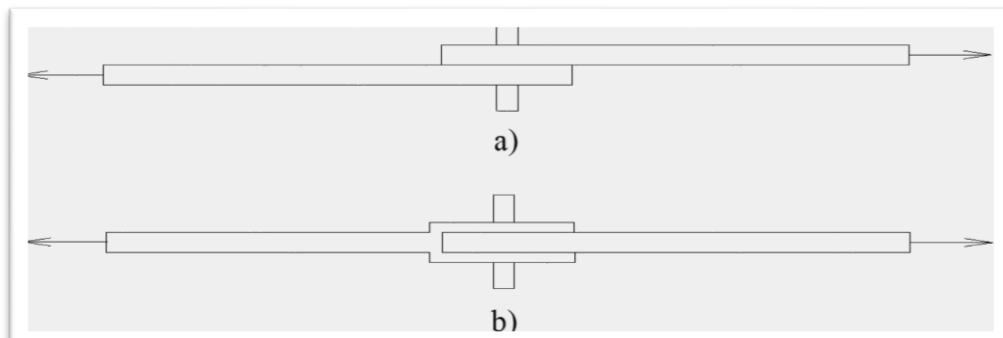


Figura 30. Juntas com furo de sobreposição simples (a) e de sobreposição dupla (b) (Marques 2014).

A simplicidade das primeiras é compensada com o melhor desempenho das segundas, que apresentam resistências superiores em 20% devido aos menores efeitos de flexão provocada pela excentricidade da carga (Marques 2014).

2.3.10.2 Ligações coladas

As ligações coladas consistem na junção de dois elementos, geralmente conhecidos por substratos, através de um adesivo. As principais vantagens deste tipo de ligações relativamente às juntas com furos são: distribuição da carga sobre uma superfície maior, o que diminui a concentração de tensões e, conseqüentemente, proporciona um melhor desempenho sob solicitações de fadiga; a natureza viscoelástica do adesivo promove o amortecimento de vibrações; economia no número de peças e no peso; capacidade de vedação e de isolamento térmico; evita a corrosão galvânica que ocorre nas ligações de materiais diferentes (substratos metálicos); é mais facilmente adaptável à junção de superfícies irregulares; permite a obtenção de contornos suaves, o que é particularmente importante em termos aerodinâmicos e no aspeto estético; é geralmente um processo mais económico e mais rápido. O facto de ser uma operação simples, rápida e fácil de automatizar permite aumentar as cadências de produção e baixar os custos (Moura, Morais, e Magalhães 2011) e (Corbett et al. 2005).

Como limitações podem referir-se: necessidade de limpeza e tratamento prévio das superfícies; os ciclos de cura de alguns adesivos são longos e requerem a aplicação de pressão e temperatura, o que pode constituir uma limitação ao tamanho da peça, caso o processo exija o recurso a um forno ou autoclave; sensibilidade aos fatores ambientais (temperatura, humidade e das radiações ultravioleta); difícil inspeção para verificação de qualidade da junta; criação de ligações de carácter definitivo, não permitindo a desmontagem sem danificação ou destruição dos componentes; mau desempenho sob solicitações de arrancamento; processo de fabrico que necessita de um controlo mais rígido e mão-de-obra especializada; problemas de saúde associados à toxicidade e de segurança inerentes à flamabilidade dos adesivos (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

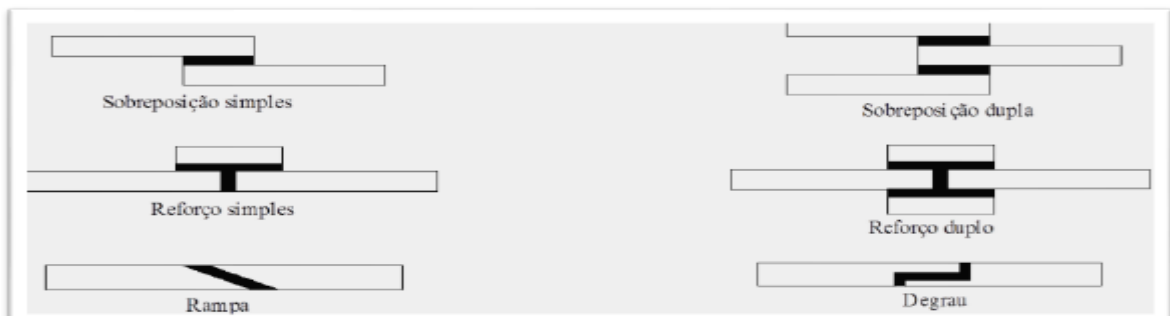


Figura 31. Tipos de juntas coladas mais comuns (Marques 2014).

2.3.10.3 Ligações por fusão

Este tipo de ligação é exclusivo dos compósitos de matriz termoplástica. A ligação estabelece-se por aplicação de calor e pressão adequados, de modo a que a difusão do polímero ocorra na interface. Os principais métodos de aplicação de calor podem-se dividir em três: geração interna, aplicação externa, ou por fricção. No caso de geração interna de calor, destacam-se a ligação estabelecida através de resistência embebida, constituída por um material compatível com o compósito, e a ligação por indução eletromagnética, típica de compósitos que contenham elementos com alguma condutividade elétrica, como é o caso das fibras de carbono. Na aplicação externa de calor, merece referência o processamento na prensa de pratos quentes e autoclave. Finalmente, as ligações estabelecidas por fricção são conseguidas por aplicação de vibrações ou ultra-sons (Marques 2014).

Apresenta como principais vantagens: a junta apresenta propriedades semelhantes ao material dos substratos, uma vez que não é inserido um material diferente na interface; o tratamento superficial necessário é mínimo; apresenta boa ductilidade, durabilidade e são facilmente reparáveis; boa resistência química e à humidade; tempo de processamento e custo inferiores às juntas coladas com termoendurecíveis (Marques 2014).

A principal desvantagem prende-se com a necessidade de fornecimento de calor e pressão externas, o que, num processo automatizado, exige equipamento adequado.

3 Projeto e considerações na seleção de materiais

Os engenheiros são confrontados diariamente com o fabrico de materiais, processamento, projeto e construção de componentes ou estruturas. Um material é selecionado para uma determinada aplicação porque tem a combinação apropriada de propriedades mecânicas e físicas para essa aplicação, é de considerar também, ser capaz de poder ser processado ou fabricado na forma final, e deve representar uma solução economicamente viável (Silva 2012).

Um *design* de um veículo leve deve ter em consideração os seguintes critérios: baixo custo de produção em quantidades elevadas; requisitos de resistência, rigidez e resistência ao impacto; durabilidade; reciclagem; conceito de reparação; propriedades acústicas (Jambor e Beyer 1997).

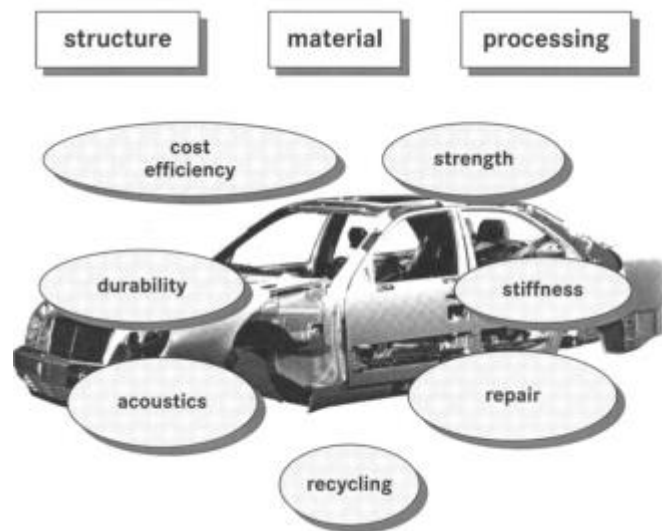


Figura 32. Requisitos da estrutura de um veículo (Jambor e Beyer 1997).

No momento de fazer a seleção dos materiais, é sempre necessário fazer algum compromisso porque é impossível satisfazer todos os requisitos.

3.1 Constantes de engenharia

No caso dos materiais compósitos, a camada é constituída por uma infinidade de fibras, a Micromecânica procura geralmente recorrer a modelos do tipo “célula elementar”, cujo comportamento seja representativo de toda a camada, e de maneira que a análise conduza a expressões analíticas relativamente simples. É extremamente difícil medir algumas propriedades das fibras, sobretudo se estas são anisotrópicas, como é o caso das fibras de carbono e aramida. Normalmente encontram-se disponíveis o módulo e a tensão de rotura à tração longitudinal enquanto as propriedades transversais são frequentemente estimadas a partir de resultados de ensaios de compósitos usando modelos micromecânicos (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

A previsão das tensões de rotura é muito mais complexa do que as previsões das constantes elásticas. Para isso contribuem os efeitos de heterogeneidade local e os diferentes modos de rotura (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Os modelos que determinam as constantes de engenharia são de complexidade muito variável, mas baseiam-se em conjuntos de hipóteses como: i) fibra e matriz são os únicos constituintes, excluindo vazios e inclusões; ii) arranjos regulares simplificados para a distribuição espacial das fibras; iii) comportamento linear elástico para a fibra e para a matriz que se admite isotrópica; iv) perfeita adesão interfacial fibra/matriz. Estes modelos podem ser enquadrados em categorias:

- **Modelos da mecânica dos materiais:** baseiam na análise de uma célula elementar bidimensional, constituída por uma só fibra e envolvida por duas camadas de matriz. Quando solicitada longitudinalmente a célula elementar sofre deformação longitudinal e transversal. Recorre-se a este modelo para retirar o valor de E_1 e ν_{12} .
- **Modelo auto-consistente:** considera uma célula elementar cilíndrica, embebida num meio homogéneo de propriedades equivalentes iguais às da célula. São realizadas análises de tensões em coordenadas cilíndricas e é utilizado para retirar o valor de G_{12} .
- **Método das células:** baseia-se numa análise 3D de uma célula elementar. A análise envolve a aplicação das condições de equilíbrio, bem como a determinação das propriedades em todas as direções do plano. Em seguida, procede-se ao cálculo dos valores médios de todas as propriedades nesse plano, de forma a satisfazer o requisito de isotropia transversal. Daqui resultam equações longas que, depois de alguma manipulação, permitem obter a equação para o cálculo de E_2 .

A partir dos modelos descritos, foram calculadas as constantes utilizadas neste estudo e que serão escritas mais à frente no documento de maneira a caracterizar os materiais utilizados.

3.2 Propriedades dos materiais

As propriedades mecânicas descrevem como um material responde a uma força aplicada e inclui a rigidez, a resistência, a ductilidade e a tenacidade. Também é importante saber como o material se comporta quando exposto a um impacto, quando a força varia ciclicamente (fadiga), quando exposto a elevadas temperaturas (fluência) ou quando sujeito a brasão (desgaste). Propriedades gerais como a densidade, a disponibilidade, a facilidade de fabricação e o custo também são muito importantes na seleção de um material. Distinguem-se também as propriedades térmicas como a temperatura de fusão, a temperatura de transição vítrea, a expansão térmica, a condutibilidade térmica e o calor específico (Silva 2012).

Para determinadas aplicações deve-se ter em conta a resistência elétrica, a opacidade, a durabilidade, etc.

3.2.1 Descrição das propriedades dos materiais

Neste subcapítulo a investigação será focada na descoberta e caracterização dos materiais utilizados na análise estrutural. O banco do automóvel é projetado para absorver cargas elevadas, sendo normalmente projetado para durar a vida do veículo com pouca ou nenhuma manutenção. Considerando como base de seleção dos materiais os requisitos de projeto (estrutura resistente, leve e a um preço acessível), dos vários materiais analisados os que fornecem melhores resultados são os compósitos de matriz termoendurecível. Sendo as resinas epóxicas as que apresentam melhor comportamento à fadiga que se justifica pela sua tenacidade, durabilidade, boa resistência mecânica, baixa contração durante o processo de cura e boa adesão às fibras.

As propriedades consideradas são a densidade, a fim de avaliar o peso da estrutura; o preço para ter noção do custo dos materiais; e mais importante as propriedades mecânicas de onde se salienta: o módulo de *Young* (E), módulo de corte (G) e coeficiente de *Poisson* (ν). As propriedades mecânicas permitem executar as simulações com a finalidade de comparar as diferentes soluções.

Tabela 12. Propriedades físicas e mecânicas de algumas resinas termoendurecíveis.

	Densidade [g/cm ³]	Preço [EUR/Kg]	Módulo de Young [GPa]	Módulo de corte [MPa]	Coefficiente de <i>Poisson</i>
Epóxico	1,25	1,89	2,71	0,97	0,40
Fenólica	1,28	1,42	3,79	1,37	0,39
Poliéster	1,22	1,56	3,24	1,17	0,39

Os materiais compósitos são classificados como anisotrópicos, em geral são caracterizados por vinte e uma constantes independentes mas são reduzidos para nove para materiais ortotrópicos

e para cinco no caso de materiais transversalmente isotrópicos (E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} e ν_{23} ou G_{23}) (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

As constantes elásticas independentes necessárias para caracterizar o comportamento tensão-deformação da camada são:

- E_1 : Módulo de elasticidade longitudinal;
- E_2 : Módulos de elasticidade transversal;
- G_{12} : Módulo de corte no plano x-y;
- G_{23} : Módulo de corte no plano y-z;
- ν_{12} : Coeficiente de *Poisson* no plano x-y;
- ν_{23} : Coeficiente de *Poisson* no plano y-z.

A Tabela 13 apresenta alguns valores típicos destas grandezas, obtidas em ensaios de compósitos unidirecionais. Os valores de G_{23} são calculados assumindo a isotropia transversal, que impõe:

$$E_3 = E_2; \nu_{13} = \nu_{12}; G_{13} = G_{12}; G_{23} = E_2/2(1 + \nu_{23})$$

Tabela 13. Propriedades mecânicas de alguns compósitos (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Compósito	Reforço	ν_f	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	G_{12} [MPa]	ν_{12}
C(T300)/Epóxico (934)	UD	0,60	138000	9650	4550	0,30
C(T800H)/Epóxico (3900-2)	UD	0,65	162000	9000	6200	0,28
C(AS4)/Epóxico (3501-6)	UD	0,63	143000	10300	7200	0,27
C(IM6)/Epóxico (SC1081)	UD	0,65	177000	10800	7600	0,27
C(IM7)/Epóxico (977-2)	UD	0,65	168000	7600	5500	0,30
E-G/Epóxico	UD	0,55	39000	8600	3800	0,28
Kevlar49/Epóxico	UD	0,60	87000	5500	2200	0,34
C(T300)/Epóxico(LTM25)	Twill 2x2	0,47	55000	55000	2900	0,04

3.2.2 Resistência à fratura

Todos os materiais contêm fendas em consequência do processo de fabrico ou por ação de processos de maquinagem. Mesmo na ausência de fendas, o material encarrega-se de as formar por fadiga ou corrosão.

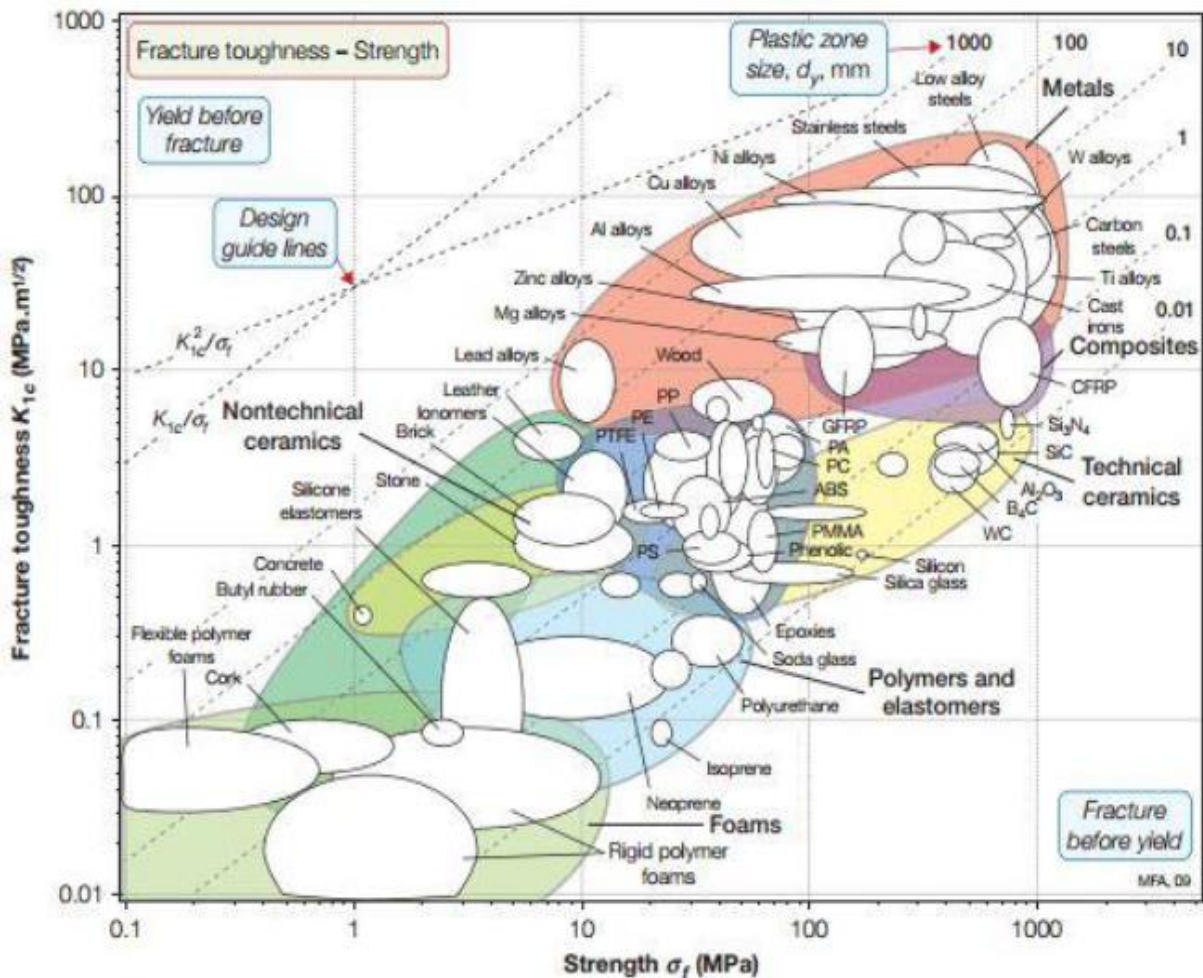


Figura 33. Resistência à fratura dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).

Na Figura 33 os materiais que estão para o lado superior direito, que é o caso dos materiais compósitos, têm alta resistência e baixa tenacidade, eles fraturam antes de ceder. O contrário acontece com os materiais que estão em direção ao lado esquerdo, eles cedem antes de fraturar.

3.2.3 Resistência à fadiga

Um dos aspetos mais importantes que influenciam o comportamento à fadiga dos materiais compósitos é o tipo de material. A resistência à fadiga aumenta com o módulo das fibras que, no caso dos compósitos unidireccionais desempenham um papel preponderante no comportamento à fadiga. As fibras de alta rigidez, como é o caso do carbono e do boro, limitam a deformação no compósito e evitam as deformações elásticas e viscoelásticas na matriz que são precursoras de dano. Por outro lado, as fibras de baixo módulo, como é o caso do vidro, permitem a existência de deformações suscetíveis de originar dano prematuro na matriz. As fibras aramídicas apresentam um comportamento intermédio entre os dois casos anteriores, uma vez que as próprias fibras são afetadas pela solitação. No que respeita às resinas, o fator preponderante é a deformação à rotura. As resinas epoxídicas apresentam melhor comportamento à fadiga que se justifica pela sua tenacidade, durabilidade, boa resistência mecânica, baixa contração durante o processo de cura e boa adesão com as fibras, nomeadamente com as de vidro (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

3.2.4 Cedência

No caso da seleção de materiais em termos de um limite de resistência, o objetivo é evitar o colapso plástico. Isto significa que a peça deve trabalhar sempre no regime elástico sem atingir a tensão de cedência do material. O índice de mérito do material é definido dependendo do tipo de carregamento: barra à tração σ_y/ρ , viga em flexão $\sigma^{2/3}/\rho$, placa em flexão $\sigma^{1/2}/\rho$. Quanto mais elevado for o índice melhor é o material. Todos os materiais que se encontram ao longo das linhas indicadas na Figura 34 têm o mesmo índice de mérito (Silva 2012).

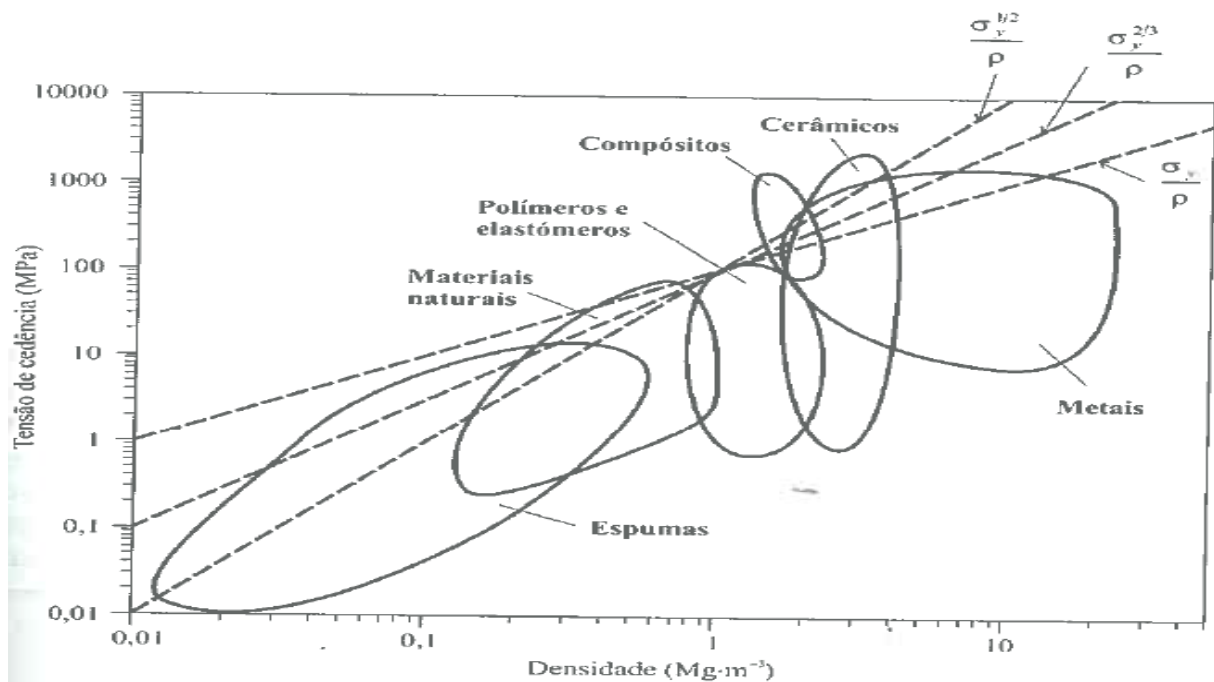


Figura 34. Índice de mérito de resistência representado num gráfico de tensão de cedência vs densidade (Silva 2012).

Através da figura anterior percebe-se que os materiais compósitos têm elevada resistência a nível de cedência.

3.2.5 Rigidez

A seleção de materiais é muitas vezes pensada apenas em termos de resistência. No entanto, uma estrutura pode não atingir o seu limite de resistência mas não estar adequada do ponto de vista da deflexão elástica (Silva 2012).

3.2.5.1 Módulo de *Young*

O módulo de *Young* ou módulo de elasticidade define a rigidez de um material sólido. É uma propriedade intrínseca do material que depende da composição química, da microestrutura e dos defeitos. É a razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida pelo material (equação 3.1). No caso dos materiais compósitos, a fibra normalmente tem um módulo superior ao da matriz. Nestes casos é dado por uma média ponderada da rigidez dos dois componentes, dependendo da fração de volume das fibras.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.1)$$

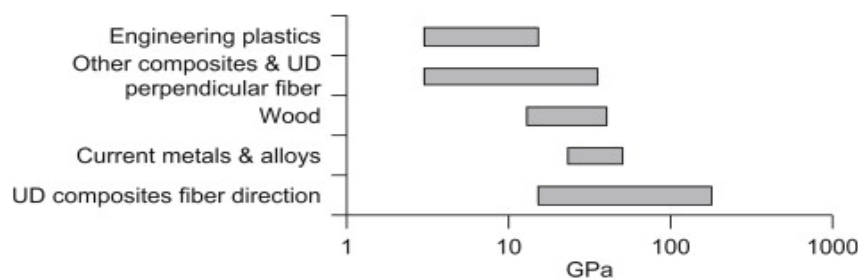


Figura 35. Módulo de elasticidade de alguns materiais em GPa (Biron 2014).

A estrutura em análise vai estar submetida a uma pressão que causa uma flexão e uma torção. De modo a minimizar o consumo e maximizar a velocidade, a estrutura deve ser tão leve quanto possível. Os requisitos do projeto só podem ser atingidos através da seleção do material e da espessura da estrutura.

É definido um índice de mérito do material para simplificar a escolha através da análise da Figura 36. Quanto mais elevado for o índice de mérito de um material e tendo em conta um valor de rigidez considerável melhor é o material. Todos os materiais que se encontram ao longo das linhas indicadas na Figura 36 têm o mesmo índice de mérito.

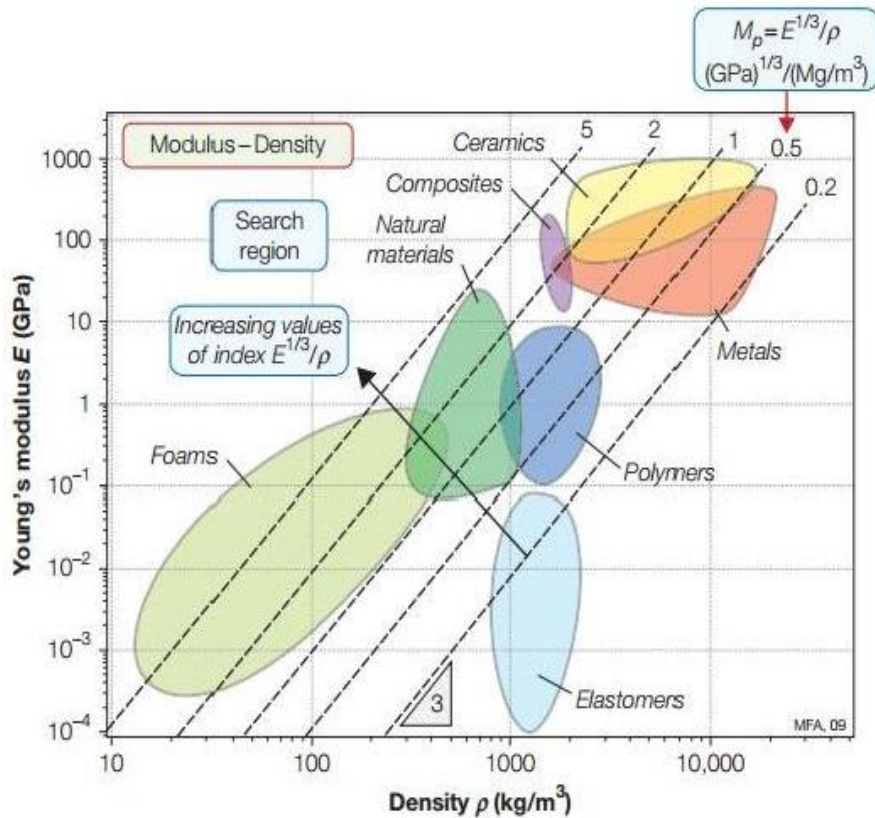


Figura 36. Índices de mérito representados num gráfico módulo de Young vs densidade (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).

É possível, analisando a Figura 36 perceber que existem materiais metálicos e materiais compósitos que, apresentando a mesma rigidez tendo densidades bem distintas, ou seja, com a utilização de materiais compósitos consegue-se diminuir a densidade de um componente mantendo a rigidez do mesmo quando fabricado por materiais metálicos.

3.3 Projeto e simulação estrutural com materiais compósitos

Quando os materiais compósitos foram introduzidos na indústria automóvel não foram totalmente apreciados pelos projetistas. Tradicionalmente, o setor automóvel adotava folhas isotrópicas de metal que eram unidas por processos de soldadura. Os compósitos, pelo contrário, exigem o conhecimento específico dos materiais e processos de moldação.

É importante que os projetistas de veículos compreendam os processos de moldação dos compósitos a fim de os relacionar com o componente que vão desenvolver. Nos primeiros tempos da utilização dos compósitos, havia uma grande distância entre as expectativas dos projetistas e os fabricantes de compósitos, resultando muitas vezes na má utilização de materiais e atrasos na produção.

Atualmente, um dos principais desafios no projeto de compósitos nos automóveis é a disponibilidade de ferramentas de simulação e a falta de caracterização de materiais compósitos. Outra desvantagem é o tempo computacional necessário para modelar estruturas em

compósitos. A maioria dos modelos em materiais compósitos necessitam de elevado tempo de simulação. Numa primeira abordagem do desenvolvimento do veículo estes tempos são geralmente longos durante o qual várias opções têm que ser analisadas em alguns meses.

Para uma devida avaliação dos compósitos, numa fase inicial a indústria automóvel precisa de reduzir os tempos na obtenção de uma solução válida. Os *softwares* comerciais desenvolvidos ainda não resolveram esta limitação, por isso alguns centros *design* de investigação mais avançados desenvolveram as suas próprias metodologias que geralmente são confidenciais. Em resumo atualmente os projetistas de automóveis têm uma compreensão dos compósitos, mas existe uma falta de *software* de simulação adequado a todas as fases de conceção (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).

3.4 Moldação de materiais compósitos

Moldação e simulação numérica são aspetos fundamentais atualmente no setor automóvel. São úteis a fim de reduzir o tempo de lançamento no mercado de novos produtos e os custos associados a testes experimentais. Existem duas zonas em que o uso de simulação do veículo é essencial, no *design* e nos processos de fabricação. Em termos de *design* do veículo, o setor automóvel tem o compromisso de análise estrutural (estático, dinâmico, segurança, ruído e vibração) com duração de muitos anos.

Com o crescente aumento do uso dos materiais compósitos em termos estruturais no setor automóvel especialmente em carros desportivos, tornou-se necessário criar modelos com mais exatidão. Em certa medida, a indústria automóvel tem sido capaz de utilizar as experiências da indústria aeroespacial.

Contudo, em muitos casos os materiais e os objetivos do *design* são suficientemente divergentes em que a direta transferência de tecnologia nem sempre é conveniente. Durante a moldação de compósitos, um dos principais desafios é equilibrar a sofisticação dos modelos contra os razoáveis tempos de solução computacional.

Os processos de fabricação de compósitos usados atualmente para médio e alto volume de produção automóvel são a moldação por injeção, moldação do tipo SMC e o processo RTM, são todos suportados por códigos numéricos, sendo possível simulá-los. Convém recordar que a produção de elevado volume requer a melhor forma de otimização, com o objetivo de reduzir o tempo de ciclo, sucata e o número de peças rejeitadas.

O tempo para obtenção de resultados têm diminuído, derivado do aumento da capacidade computacional, assim garante-se uma maior qualidade, precisão e tamanho dos modelos. Em geral, não há dúvida de que a importância da moldação e simulação no ramo automóvel vai continuar a aumentar (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).

4 *Design* e resultados numéricos

4.1 Etapas de projeto e soluções propostas

Nesta secção pretende-se demonstrar a construção e a evolução dos modelos projetados. A ideia nesta fase do projeto foi estudar os diferentes *designs* de forma a encontrar a melhor solução para aplicar em materiais compósitos.

4.1.1 Modelo 1

O processo de aperfeiçoamento do banco inicia-se com o modelo fornecido pela empresa, que é designado por modelo 1, Figura 37.

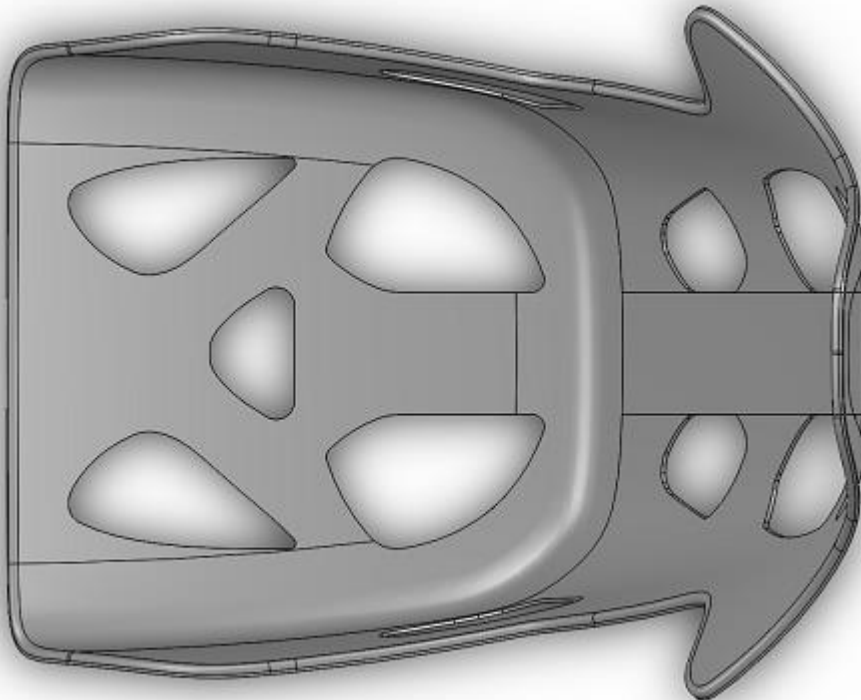


Figura 37. Vista superior do banco original.

4.1.2 Modelo 2

Para a construção do modelo 2, foi necessário proceder a uma análise mais detalhada do modelo fornecido e perceber se a falta de material (existência de vários furos), estava relacionada apenas com questões económicas (do peso de material envolvido na sua construção) ou se existiriam outros fatores que obrigariam a essa geometria. Através de uma análise detalhada concluiu-se que eram necessários apenas os furos para os cintos de segurança e para a fixação do banco. O modelo 2, apresentado na Figura 38 é uma abordagem mais económica e resistente, pois segundo Moura, Morais e Magalhães (Moura, Morais, e Magalhães 2011) trabalhar geometrias complexas em compósitos é difícil, e é ainda de salientar que os furos interrompem o seguimento das fibras, diminuindo a resistência do componente (a presença de furos induz a concentração de tensões nos componentes podendo originar a sua rotura).



Figura 38. Modelo 2, A) Vista superior; B) Vista lateral.

Apesar de o objetivo do trabalho ir apenas ao encontro da implementação de materiais compósitos na estrutura de um banco de automóvel, usando os dois modelos esperam-se resultados mais abrangentes, de maneira a entender, também, qual o *design* do banco mais apropriado e o porquê.

4.2 Simulações em *Abaqus*

Neste capítulo serão narradas as várias simulações realizadas, tendo como objetivo encontrar o material, a orientação das fibras, a espessura e o modelo ideal para a aplicação em estudo. O trabalho desenvolvido consiste em simular com diferentes materiais variando o *design* do componente, a orientação das fibras e a espessura. Pretende-se também demonstrar as fases que normalmente é preciso passar um problema deste género: a) pré processamento, onde é definida a geometria do problema; b) definição do material a utilizar; c) definição das condições de fronteira e cargas a aplicar; d) definição de elementos a utilizar os quais posteriormente dão origem à malha; e) pós processamento: resultados obtidos que podem ser lidos de diferentes modos.

No *Abaqus* as peças são criadas como modelos 3D, deformáveis e cascas planas. Na introdução das propriedades do material é necessário ter em consideração que tratando-se de um material isotrópico, por exemplo alumínio, aço e magnésio é apenas necessário considerar o módulo de elasticidade, coeficiente *Poisson* e módulo de corte.

Tratando-se da simulação com materiais compósitos o procedimento para a definição das propriedades do material é diferente. A opção “*lamina*” tem de ser selecionada e as propriedades seguintes têm de ser consideradas: E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} , G_{13} e G_{23} .

Conhecidas as propriedades dos materiais tem de ser definida a secção Para materiais isotrópicos a superfície da casca é homogênea e o valor da espessura tem de ser introduzido; no caso dos materiais compósitos tem de ser selecionada a opção “*composite*” e têm de ser definidos os parâmetros: número, material e a espessura de cada camada; o ângulo de orientação das fibras; o número de integrações e o nome do plano. A integração da espessura da secção é realizada recorrendo à regra de *Simpson*.

No comando “*Step*” é definido o tipo de carregamento a simular, o tipo de incrementação é automático tendo um máximo de 100 incrementos. Em seguida no “*Load*” é criado o tipo de solicitação a que está submetida a estrutura e são definidas as condições de fronteira. O próximo passo consiste em criar a malha, onde é definido o número de incrementos e o tipo de malha, e assim é gerada a malha. Várias iterações foram realizadas variando o número de elementos da malha com o objetivo de obter uma convergência de resultados. Em seguida é corrida a simulação e posteriormente apresentados os resultados na secção “*Visualization*”.

As análises realizadas serão de carácter estático e dinâmico, sendo que a nível estático são consideradas as forças a que a estrutura está sujeita, nomeadamente o peso do indivíduo. A nível dinâmico é testada a estrutura submetida a uma aceleração longitudinal e em curva.

4.3 Propriedades dos materiais utilizados nas simulações

Neste capítulo são quantificadas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados.

4.3.1 Ligas

As ligas são resistentes e têm baixa densidade, e são muito utilizadas em componentes estruturais. O alumínio e o magnésio são testados a fim de comparação com os compósitos.

Tabela 14. Propriedades físicas e mecânicas do alumínio e magnésio (Biron 2014).

	Alumínio	Magnésio
Densidade	2,7 E3 Kg/m ³	1,73 E3 Kg/m ³
Módulo de <i>Young</i>	70 E3 MPa	45,5 E3 MPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0,3	0,28
Tensão de cedência	120 MPa	130 MPa

4.3.2 Materiais compósitos

Dos vários materiais compósitos de matriz termoendurecível, foram selecionados as que apresentam melhores propriedades.

Tabela 15. Propriedades do Carbono (IM6) / Epóxico, E-G / Epóxico e Kevlar 49 / Epóxico (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

	Carbono (IM6) / Epóxico	E-G / Epóxico	Kevlar 49 / Epóxico
Densidade [Kg/m³]	1,55 E3	1,95 E3	1,38 E3
E₁ [MPa]	177000	39000	87000
E₂ [MPa]	10800	8600	5500
v₁₂	0,27	0,28	0,34
G₁₂ [MPa]	7600	3800	2200
G₂₃ [MPa]	4500	3583	2100
σ_{ut1} [MPa]	1500	1080	1280
σ_{uc1} [MPa]	1500	620	335
σ_{ut2} [MPa]	40	39	30
σ_{uc2} [MPa]	246	128	158
τ_{u12} [MPa]	68	69	49

4.4 Condições de Fronteira

Em termos de condições de fronteira, o banco vai estar preso por elementos roscados a um suporte em alumínio que está aparafusado ao chassi. Considera-se que o banco na zona dos furos não sofre rotação nem deslocamento, ou seja, que se encontra encastrado nessa zona, como é ilustrado na Figura 39.

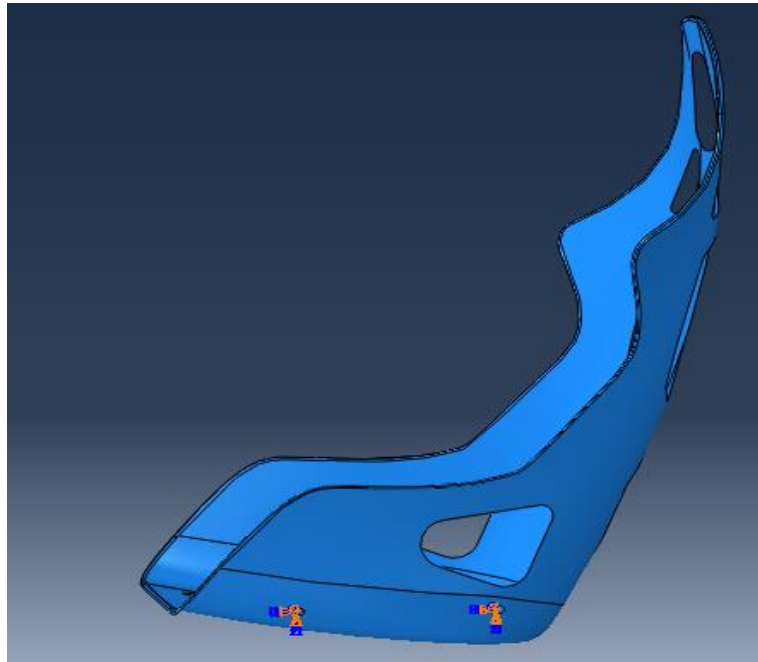


Figura 39. Condições de fronteiras aplicadas (Abaqus/CAE 2014).

4.5 Forças aplicadas

A estrutura vai estar sujeita a esforços estáticos e dinâmicos. Neste subcapítulo serão abordadas as metodologias de cálculo e quantificadas as forças aplicadas nos modelos.

4.5.1 Simulação estática

A nível estático o banco está sujeito ao peso do indivíduo, o qual se considera como sendo uma carga distribuída pela área do banco como apresentado na Figura 40. Para a análise emprega-se o peso de um indivíduo de massa 112,5 Kg (sendo a massa obtida relativa a um indivíduo de 75 Kg e utilizando um fator de segurança de 1,5).

4.5.1.1 Modelo 1

Sendo a força definida pelo peso a multiplicar pela aceleração gravítica,

$$F = 112,5 \times 9,81 \Leftrightarrow F = 1103,625 \text{ N}$$

Recorrendo às funcionalidades do *solidworks* retira-se a área sobre a qual está aplicada a força,

$$A = 501005,5 \text{ mm}^2$$

Sabendo que,

$$P = F/A \Leftrightarrow P = 0,0022 \text{ MPa}$$

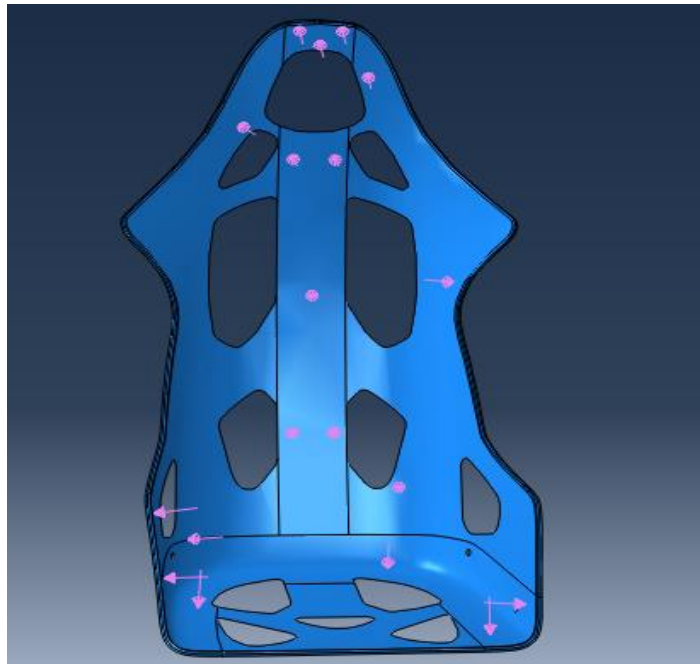


Figura 40. Pressão aplicada no modelo 1 (Abaqus/CAE 2014).

4.5.1.2 Modelo 2

Recorrendo às funcionalidades do *solidworks* retira-se a área sobre a qual está aplicada a força,

$$A = 585114,87 \text{ mm}^2$$

Sabendo que,

$$P = F/A \Leftrightarrow P = 0,0019 \text{ MPa}$$

4.5.2 Simulação dinâmica

Tendo em conta que um veículo é comercializado para se mover, sendo constantemente afetado por acelerações, estas acelerações vão provocar na estrutura em estudo esforços extras a que esta tem de resistir de modo a não fraturar.

A massa utilizada para as simulações dinâmicas é a mesma que foi utilizada para a simulação estática, que é de 112,5 Kg.

4.5.2.1 Aceleração longitudinal e em curva

O indivíduo sujeito a uma aceleração longitudinal causa um esforço extra na zona das costas da estrutura.

Quando essa aceleração diz respeito ao descrever de uma curva, este esforço extra situa-se na zona lateral do banco (Figura 41) o qual é estudado apenas para um lado pois no outro o esforço é idêntico.

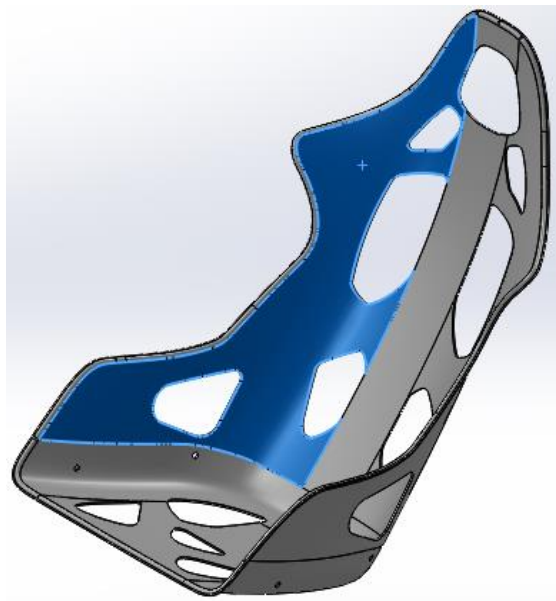


Figura 41. Azul exemplifica a área de aplicação da pressão aplicada em curva.

Analisando a Figura 42 e utilizando as funções trigonométricas calcula-se a aceleração longitudinal e em curva. Sendo a massa constante e tendo em consideração a segunda lei de *Newton* ($F = m \times a$), obtém-se a força a que está sujeita a estrutura.

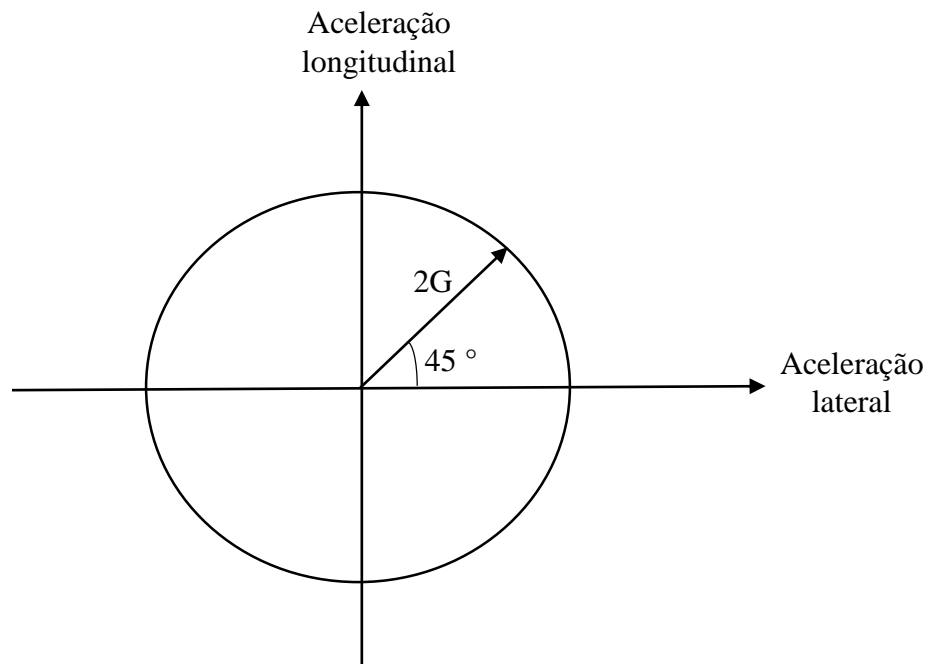


Figura 42. Círculo de aceleração.

- **Aceleração longitudinal**

$$a = 2 \times 9,81 \times \sin 45 \Leftrightarrow a = 13,87 \text{ m/s}^2$$

Aplicando a segunda lei de *Newton*,

$$F = 112,5 \times 13,87 \Leftrightarrow F = 1560,761 \text{ N}$$

- **Aceleração em curva**

$$a = 2 \times 9,81 \Leftrightarrow a = 19,62 \text{ m/s}^2$$

Aplicando a segunda lei de *Newton*,

$$F = 112,5 \times 19,62 \Leftrightarrow F = 2207,25 \text{ N}$$

- **Pressão aplicada nos modelos**

Sabendo as forças para a solicitação provocada pela aceleração longitudinal e em curva, recorrendo às funcionalidades do *solidworks* retira-se a área sobre a qual está aplicada a força e obtém-se a respetiva pressão aplicadas no modelo 1 e modelo 2, sendo posteriormente apresentadas na Tabela 16 e Tabela 17 respetivamente.

Tabela 16. Esforço provocado pela aceleração longitudinal e em curva para o modelo 1.

	Aceleração longitudinal	Aceleração em curva
Força [N]	1560,761	2207,25
Área de aplicação [mm²]	361028,1	144422,1
Pressão [MPa]	0,004323	0,01528

Tabela 17. Esforço provocado pela aceleração longitudinal e em curva para o modelo 2.

	Aceleração longitudinal	Aceleração em curva
Força [N]	1560,761	2207,25
Área de aplicação [mm²]	442244,5	177011,57
Pressão [MPa]	0,003529	0,01247

4.6 Malha

A geração da malha é o processo mais importante na análise de um sistema físico pelo método de elementos finitos, pois dependendo do tipo de malha, da densidade e do elemento utilizado, os resultados podem variar significativamente.

O módulo da geração da malha possui as seguintes características: ferramentas para definir a densidade da malha a nível local e global, a coloração do modelo que indica a técnica de malhagem atribuída em cada região do modelo (malha estruturada, malha por varrimento, malha livre), uma variedade de controlos de malha (forma do elemento, técnica de malhagem, algoritmo da malha), ferramenta para verificar a qualidade da malha, ferramentas para refinar a malha e para melhorar a qualidade da malha e ainda uma ferramenta para conservar o conjunto malhado. O módulo malha pode gerar malhas que contêm diversos tipos de elementos finitos, estando os mais comuns representados na Figura 43.

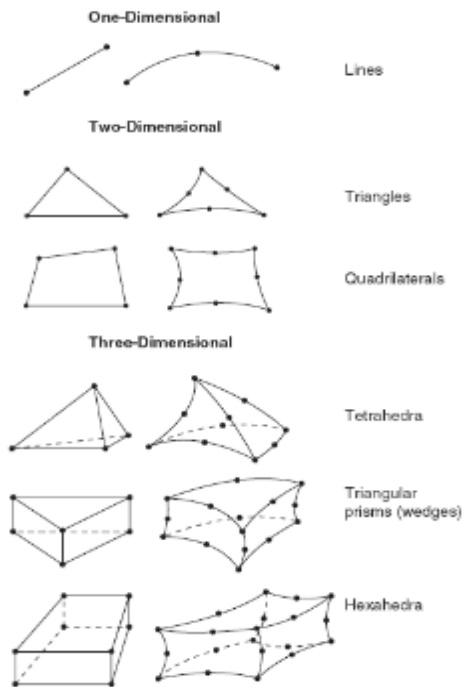


Figura 43. Forma de elementos finitos.

4.6.1 Análise de convergência

a. Modelo 1

A análise de convergência tem como objetivos a escolha da forma do elemento de malha e o número de elementos gerados apropriado para a estrutura em estudo.

O estudo de convergência foi realizado de modo simples, utilizando o mesmo carregamento (ou seja, aplicando a mesma carga) e o mesmo material (alumínio), e como é evidente, diferentes tamanhos do elemento da malha.

Tabela 18. Valores de análise de convergência, forma do elemento (*Triangles*) ($P = 0,002203$ MPa).

Elementos gerados	Tensão de <i>Von Mises</i> [MPa]	Deslocamento [mm]
46726	75,44	6,692
66248	74,63	6,782
91000	79,45	6,868
120011	81,37	6,896
159754	82,44	6,94
257505	82,73	6,979

Tabela 19. Valores de análise de convergência, forma do elemento (*Quadrilaterais*) ($P = 0,002203$ MPa).

Elementos gerados	Tensão de <i>Von Mises</i> [MPa]	Deslocamento [mm]
25662	64,23	7,04
35767	70,76	7,056
49760	74,87	7,067
64849	77,06	7,07
86840	80,59	7,077
137601	81,54	7,087

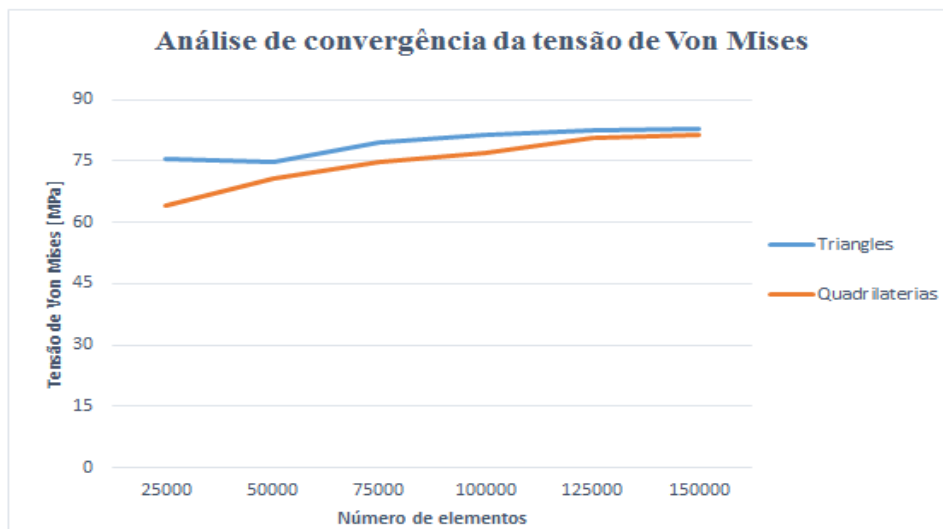


Gráfico 4. Resultados da análise de convergência da tensão de *Von Mises*.

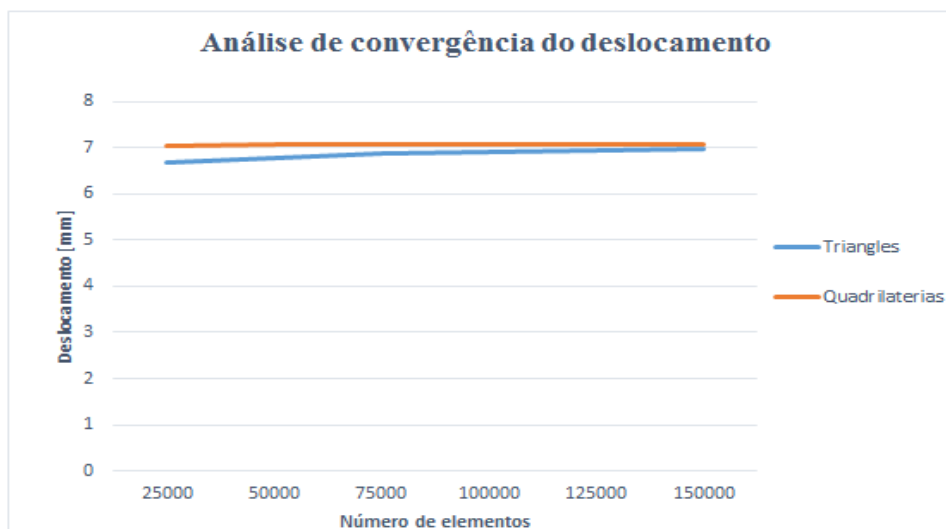


Gráfico 5. Resultados da análise de convergência do deslocamento.

Através da análise das tensões de *Von Mises* (Gráfico 4) não se obtém uma convergência acentuada. Analisando os deslocamentos (Gráfico 5), é possível obter uma convergência acentuada dos dois tipos de malha. Para a seleção do tipo de elemento de malha analisou-se o número de elementos distorcidos de cada tipo, o tipo de malha *triangles* é o que apresenta menor número de elementos distorcidos, sendo este o selecionado para posteriores simulações. Para uma maior economia de esforço computacional e pelos valores serem aceitáveis, todas as análises posteriores a esta serão efetuadas com 159754 elementos. Análises com exagerado número de elementos têm algumas desvantagens como por exemplo o tempo necessário para a análise computacional ser por vezes inoportável face aos prazos de projetos, propagação de forma acentuada de erros computacionais, entre outras. Alternativamente poderia ter-se refinado localmente a malha, o que é de momento proposto como trabalho futuro.

Para as simulações optou-se por utilizar um tipo de malha *triangles* (Figura 44) com 159754 elementos e 81516 nós para o modelo 1.

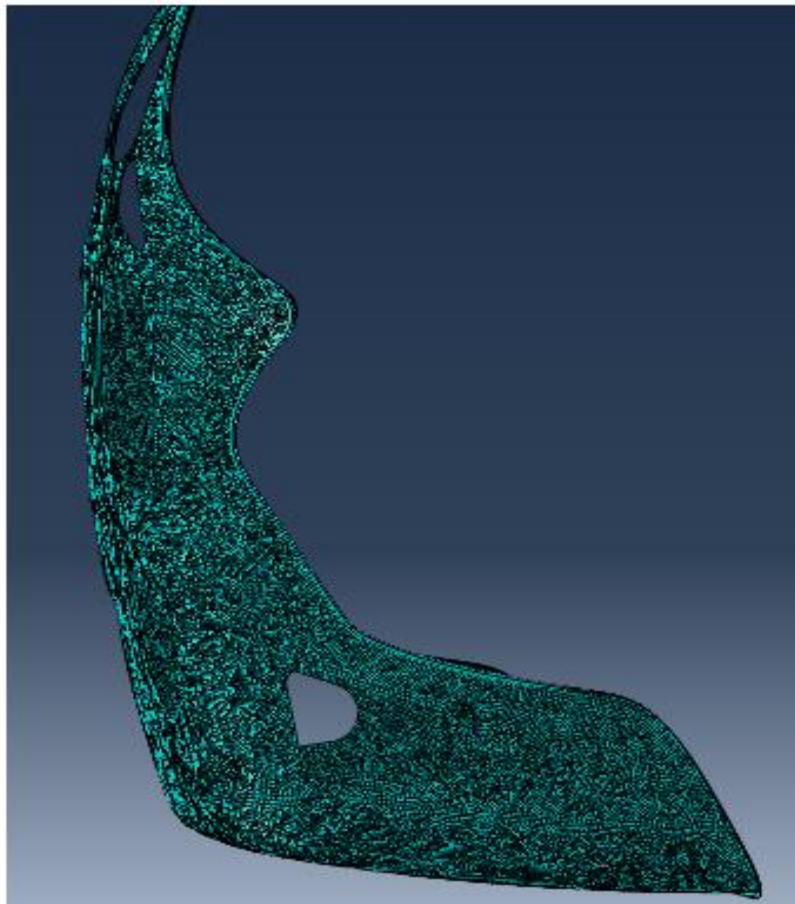


Figura 44. Malha *triangles* utilizado no modelo 1 (Abaqus/CAE 2014).

b. Modelo 2

Para o modelo 2 realizou-se o mesmo estudo de convergência que foi feito para o modelo 1.

Tabela 20. Valores de análise de convergência, forma do elemento (*Quadrilaterais*) ($P = 0,001886$ MPa).

Elementos gerados	Tensão de <i>Von Mises</i> [MPa]	Deslocamento [mm]
24749	81,95	6,425
34428	74,72	6,434
52027	86,43	6,441
68485	84,99	6,442
95663	90,46	6,445
152072	91,44	6,449

Tabela 21. Valores de análise de convergência, forma do elemento (*Triangles*) ($P = 0,001886$ MPa).

Elementos gerados	Tensão de <i>Von Mises</i> [MPa]	Deslocamento [mm]
38120	93,81	7,214
49585	96,31	7,234
80168	101,9	7,243
105454	103,2	7,249
147959	105,3	7,258
239245	105,1	7,264

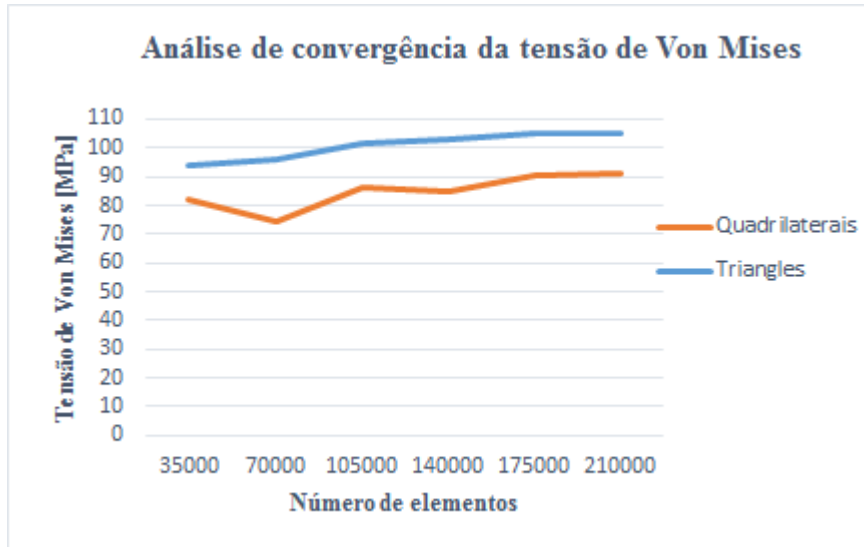


Gráfico 6. Resultados da análise de convergência da tensão de *Von Mises*.

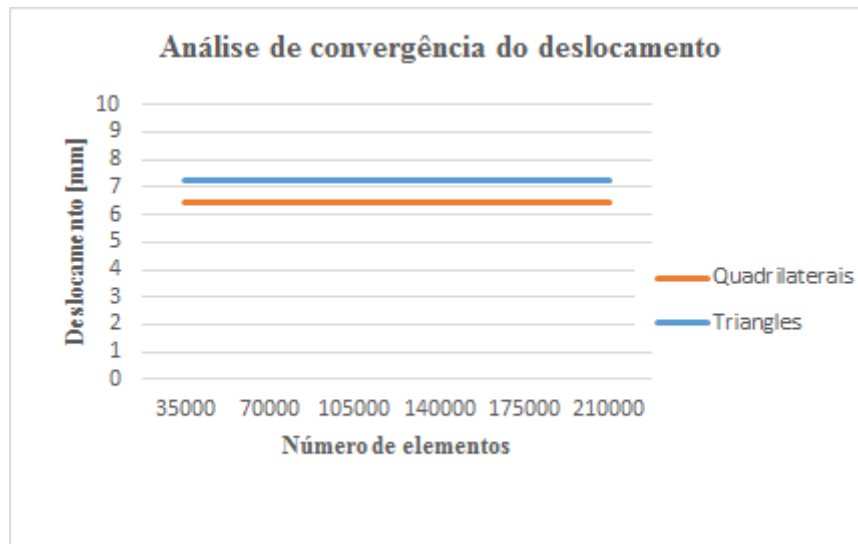


Gráfico 7. Resultados da análise de convergência do deslocamento.

Para posteriores simulações optou-se por utilizar um tipo de malha *triangles* (pois é o que tem menos elementos distorcidos) com 147959 elementos e 74882 nós para o modelo 2.

5 Resultados das simulações em *Abaqus*

Nesta secção vão ser apresentados apenas os resultados mais relevantes. Todos os resultados serão posteriormente apresentados no anexo A e B. Serão abordadas várias formas de projeto, nomeadamente utilizando modelos e materiais diferentes, variando a espessura da estrutura e orientação das fibras, com o objetivo de encontrar as tensões máximas e as deformações sofridas pela estrutura em diferentes situações a fim de avaliar a sua resistência.

5.1 Simulação estática

Posteriormente são apresentados os resultados das simulações estáticas efetuadas no modelo 1 e modelo 2.

5.1.1 Modelo 1

Depois de aplicadas todas as etapas referidas no capítulo 4.2, foi possível identificar os pontos críticos da estrutura.

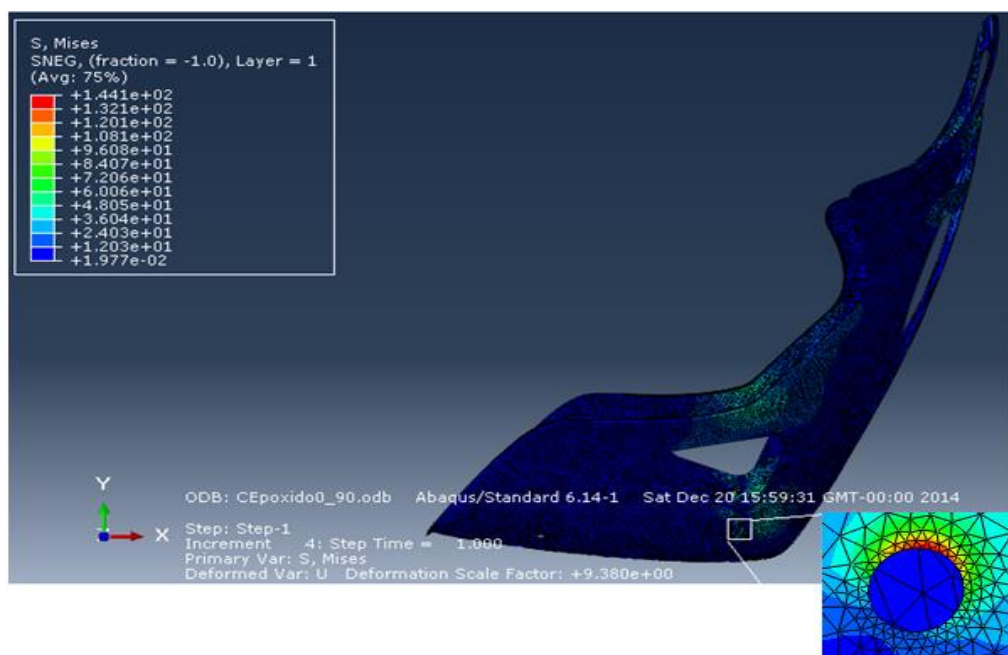


Figura 45. Ponto crítico do banco (Abaqus/CAE 2014).

Da análise da Figura 45 identifica-se os pontos críticos da estrutura para os quais as tensões são máximas. Sendo estes as zonas onde vão ser aparafusados os suportes de fixação ao chassi, estes pontos são analisados com mais cuidado, pois trata-se das zonas onde a resistência do banco é menor.

5.1.1.1 Resultados variando a orientação das fibras

Os laminados são constituídos por várias camadas sobrepostas, sendo que cada camada não costuma exceder 0.2 milímetros de espessura. As camadas podem ser colocadas variando a orientação das fibras.

De modo a identificar a orientação que fornece melhores resultados a nível de resistência serão efetuadas simulações variando a orientação das fibras.

a. Material Carbono (IM6)/epóxico

Tabela 22. Resultados do modelo 1 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3	144,1	9,37
	90 / 90	3	94,65	13,63
	90 / 0	3	117,5	9,27
	0 / 0	3	114,3	17,47

A orientação 0° / 90° significa que a primeira camada é a 0° e a segunda a 90° e assim sucessivamente cruzando a orientação das fibras.

As propriedades dos materiais compósitos são definidas para as direções transversais e longitudinais. Tendo em consideração os pontos críticos da estrutura identificados anteriormente para os quais se verificam as tensões máximas, estas tensões serão analisadas ao pormenor nestes pontos, de onde se salientam as tensões S_{11} e S_{22} pertencentes às principais direções ao longo dos eixos x e y. Também é referenciada a tensão S_{12} referente à tensão de corte.

Desta forma obtiveram-se resultados que serão apresentados na Tabela 23, referente ao carbono (IM6) epóxico.

Tabela 23. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 90	90 / 0	0 / 0	
S₁₁ [MPa]	-144	-100,2	-120,6	-112,5	$\sigma_{uc1} = 1500$ [MPa]
	49,36	42,41	40,78	57,5	$\sigma_{ut1} = 1500$ [MPa]
S₂₂ [MPa]	-10,42	-49,83	-12,34	-35,42	$\sigma_{uc2} = 246$ [MPa]
	2,674	15,51	3,397	11,87	$\sigma_{ut2} = 40$ [MPa]
S₁₂ [MPa]	-16,16	-20,72	-16,6	-20,36	$\tau_{u12} = 68$ [MPa]
	16,54	20,62	16,15	19,95	

b. Material E-G/epóxico

Tabela 24. Resultados do modelo 1 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).

E-G / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3	127,6	28,61
	90 / 90	3	83,47	32,26
	90 / 0	3	96,88	28,41
	0 / 0	3	100,6	36,23

Tabela 25. Tensões no ponto crítico da E-G / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 90	90 / 0	0 / 0	
S₁₁	-130,3	-86,8	-101,9	-101,3	$\sigma_{uc1} = 620$
	38,21	29,61	31,5	37,39	$\sigma_{ut1} = 1080$
S₂₂	-28,44	-68,97	-35,82	-47,84	$\sigma_{uc2} = 128$
	7,748	19,19	9,138	15,16	$\sigma_{ut2} = 39$
S₁₂	-21,09	-23,99	-21,34	-22,86	$\tau_{u12} = 69$
	20,89	24,24	21,54	22,31	

c. Material Kevlar 49/epóxico

Tabela 26. Resultados do modelo 1 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).

Kevlar 49 / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3	151	23,06
	90 / 90	3	98,24	33,28
	90 / 0	3	129,8	22,81
	0 / 0	3	116,6	41,5

Tabela 27. Tensões no ponto crítico da Kevlar 49 / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 90	90 / 0	0 / 0	
S ₁₁	-151,8	-108,8	-135,1	-115,5	$\sigma_{uc1} = 335$
	54,39	40,80	44,98	56,53	$\sigma_{ut1} = 1280$
S ₂₂	-12,62	-55,11	-14,29	-41,21	$\sigma_{uc2} = 158$
	3,028	16,04	3,844	13,04	$\sigma_{ut2} = 30$
S ₁₂	-13,43	-15,82	-13,95	-16,61	$\tau_{u12} = 49$
	14,05	15,35	13,26	16,33	

5.1.1.2 Resultados reforçando o ponto crítico

De modo a aumentar a resistência da estrutura à fadiga, decidiu-se reforçar o ponto crítico com mais um milímetro de espessura de material compósito. A Figura 46, identifica a azul a zona da estrutura que é reforçada.

Por uma questão de redução dos tempos de simulação este estudo vai ser realizado para o material que apresenta melhores resultados de resistência, o qual é o Carbono (IM6)/Epóxico.

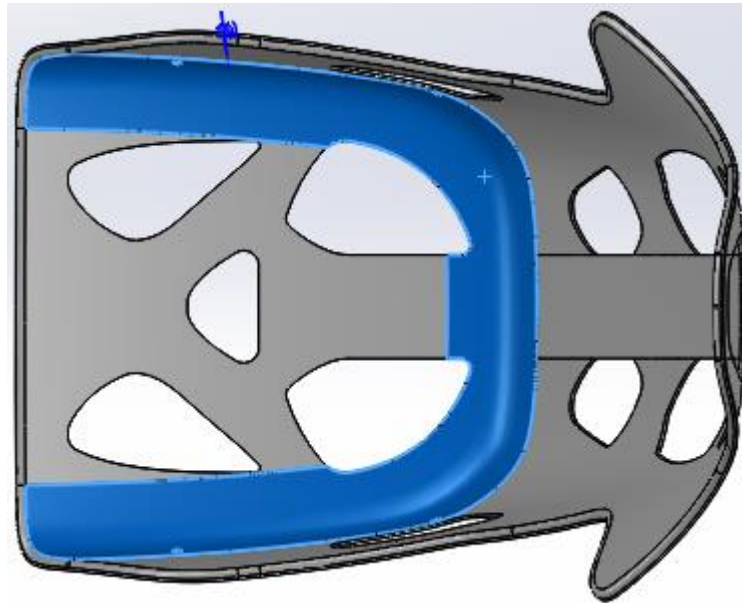


Figura 46. Reforço da estrutura.

Tabela 28. Resultados do modelo 1 com reforço variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3 e 4	120,3	8,91
	90 / 90	3 e 4	65,54	12,77
	90 / 0	3 e 4	86,04	8,737
	0 / 0	3 e 4	97,53	16,9

Como era esperado ao reforçar a zona da estrutura mais solicitada as tensões máximas e os deslocamentos máximos diminuem.

Tabela 29. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 90	90 / 0	0 / 0	
S₁₁	-120,4	-68,78	-88,4	-97,24	$\sigma_{uc1} = 1500$
	43,96	31,9	39,24	56,54	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-7,54	-39,22	-9,116	-26,72	$\sigma_{uc2} = 246$
	2,591	13,66	2,978	11,69	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-12,51	-15,99	-12,91	-16,31	$\tau_{u12} = 68$
	12,85	15,92	12,52	15,99	

5.1.2 Modelo 2

O mesmo estudo efetuado para o modelo 1 é posteriormente efetuado para o modelo 2.

5.1.2.1 Resultados variando a orientação das fibras

De modo a identificar a orientação que fornece melhores resultados a nível de resistência serão efetuadas simulações variando a orientação das fibras.

a. Material Carbono (IM6)/epóxico

Tabela 30. Resultados do modelo 2 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico	Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3	193,4
	90 / 90	3	132,3
	90 / 0	3	164,2
	0 / 0	3	170,7

Tabela 31. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 90	90 / 0	0 / 0	
S₁₁ [MPa]	-193	-139,8	-168,5	-169,1	$\sigma_{uc1} = 1500$ [MPa]
	59,24	58,51	53,95	58,19	$\sigma_{ut1} = 1500$ [MPa]
S₂₂ [MPa]	-14,37	-64,5	-16,48	-51,17	$\sigma_{uc2} = 246$ [MPa]
	4,229	20,65	4,173	17,87	$\sigma_{ut2} = 40$ [MPa]
S₁₂ [MPa]	-21,92	-26,8	-21,82	-28,54	$\tau_{u12} = 68$ [MPa]
	22,05	26,78	21,74	28,46	

b. Material E-G/epóxico

Tabela 32. Resultados do modelo 2 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).

E-G / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3	172,9	28,99
	90 / 90	3	111,6	33
	90 / 0	3	130,5	28,72
	0 / 0	3	141,9	34,66

Tabela 33. Tensões no ponto crítico da E-G / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 90	90 / 0	0 / 0	
S₁₁	-175,5	-116	-137,1	-142,8	$\sigma_{uc1} = 620$
	46,79	39,33	44,91	40,79	$\sigma_{ut1} = 1080$
S₂₂	-38,19	-90,21	-47,58	-66,07	$\sigma_{uc2} = 128$
	12,02	25,39	11,19	23,74	$\sigma_{ut2} = 39$
S₁₂	-28,12	-32,05	-28,68	-31,12	$\tau_{u12} = 69$
	28,11	31,93	28,65	31,07	

c. Material Kevlar/epóxico

Tabela 34. Resultados do modelo 2 variando a orientação das fibras (Abaqus/CAE 2014).

Kevlar 49 / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3	202,6	21,80
	90 / 90	3	145,7	20,91
	90 / 0	3	186,5	21,30
	0 / 0	3	175,6	35,64

Tabela 35. Tensões no ponto crítico da Kevlar 49 / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 90	90 / 0	0 / 0	
S₁₁	-202,9	-160,7	-193,7	-174,3	$\sigma_{uc1} = 335$
	66,74	58,21	62,50	80,73	$\sigma_{ut1} = 1280$
S₂₂	-17,55	-71,44	-18,96	-60,48	$\sigma_{uc2} = 158$
	4,853	21,44	4,797	19,34	$\sigma_{ut2} = 30$
S₁₂	-18,25	-19,49	-17,78	-23,18	$\tau_{u12} = 49$
	18,30	19,42	17,73	23,04	

5.1.2.2 Resultados reforçando o ponto crítico

Como o carbono (IM6)/Epóxico e a orientação 0° / 90° e 90° / 0° são as que fornecem melhores resultados, para redução dos tempos de simulação vai-se analisar apenas para este material e orientações.

Tabela 36. Resultados do modelo 2 com espessura 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3 e 4	120,8	8,436
	0 / 90	3 e 4	163,6	8,663

Tabela 37. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-124	-163,5	$\sigma_{uc1} = 1500$
	44,36	53,87	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-12,18	-10,46	$\sigma_{uc2} = 246$
	3,678	2,979	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-16,78	-17,02	$\tau_{u12} = 68$
	16,67	17,07	

Reforçando a zona mais solicitada da estrutura obtém-se tensões e deslocamentos inferiores em comparação com a estrutura com uma espessura uniforme de 3 milímetros.

5.2 Simulação dinâmica

De modo a reduzir os tempos de simulação serão efetuadas as simulações para os carregamentos mais frequentes neste tipo de estrutura, o estudo dinâmico é efetuado tendo em consideração as orientações que apresentam melhores resultados.

5.2.1 Modelo 1

De seguida são apresentados os resultados referentes às simulações dinâmicas efetuadas para o modelo 1.

5.2.1.1 Aceleração longitudinal

a. Espessura 3 [mm]

Tabela 38. Resultados do modelo 1 espessura 3 mm, aceleração longitudinal (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3	233,4	17,69
	0 / 90	3	280,2	17,86

Tabela 39. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-239,6	-279,4	$\sigma_{uc1} = 1500$
	77,28	98,08	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-23,76	-20,19	$\sigma_{uc2} = 246$
	6,548	5,996	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-31,67	-31,55	$\tau_{u12} = 68$
	31,5	31,74	

b. Espessura 3 e 4 [mm]

O mesmo estudo efetuado para um carregamento estático com reforço do ponto crítico é abordado para um carregamento dinâmico.

Tabela 40. Resultados do modelo 1 espessura 3 e 4 mm, aceleração longitudinal (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3 e 4	173,1	16,7
	0 / 90	3 e 4	234,6	17,01

Como é possível identificar pelos resultados obtidos reforçando o ponto crítico a tensão máxima e os deslocamentos máximos diminuem.

Tabela 41. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-177,8	-234,3	$\sigma_{uc1} = 1500$
	74,41	96,81	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-17,57	-14,92	$\sigma_{uc2} = 246$
	5,756	5,832	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-24,57	-24,49	$\tau_{u12} = 68$
	24,45	24,61	

5.2.1.2 Aceleração em curva

Para este carregamento dada a sua complexidade da aplicação da força na estrutura vão ser abordadas todas as orientações das fibras. Por uma questão de redução dos tempos de simulação o estudo seguinte foca-se no material que fornece melhores resultados.

a. Espessura 3 mm

Tabela 42. Resultados do modelo 1 espessura 3 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3	611,2	16,8
	90 / 90	3	624,2	27,03
	0 / 90	3	304,9	16,68
	0 / 0	3	328,8	29,78

Tabela 43. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	90 / 90	0 / 90	0 / 0	
S ₁₁	-611,5	-635	-290,1	-276,5	$\sigma_{uc1} = 1500$
	443	428,8	241	270,7	$\sigma_{ut1} = 1500$
S ₂₂	-24,29	-132,7	-42,4	-171,7	$\sigma_{uc2} = 246$
	16,6	71,56	24,81	116,2	$\sigma_{ut2} = 40$
S ₁₂	-133,7	-139,8	-55,13	-72,23	$\tau_{u12} = 68$
	54,16	59,19	112,1	109,5	

b. Espessura 3 e 4 [mm]

Este estudo é efetuado para as duas orientações que apresentam melhores resultados.

Tabela 44. Resultados modelo 1 espessura 3 e 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3 e 4	498,2	15,81
	0 / 90	3 e 4	253,9	15,8

Tabela 45. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-497,5	-240,9	$\sigma_{uc1} = 1500$
	391,4	216,2	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-18,19	-33,96	$\sigma_{uc2} = 246$
	15,35	21,24	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-96,93	-45,99	$\tau_{u12} = 68$
	44,21	94,45	

c. Espessura 4 [mm]

Os resultados apresentados em seguida são referentes ao modelo 1 para uma espessura uniforme de 4 mm.

Tabela 46. Resultados modelo 1 espessura 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	4	402,2	9,343
	0 / 90	4	201,6	9,311

Tabela 47. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-400,2	-194,2	$\sigma_{uc1} = 1500$
	326,9	168,1	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-14,23	-26,21	$\sigma_{uc2} = 246$
	11,2	18,30	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-79,46	-34,54	$\tau_{u12} = 68$
	33,01	76,75	

d. Espessura 4 e 5 [mm]

Tabela 48. Resultados modelo 1 espessura 4 e 5 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	4 e 5	340,6	8,995
	0 / 90	4 e 5	173,9	8,945

Tabela 49. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 4 e 5 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S ₁₁	-338,7	-167,5	$\sigma_{uc1} = 1500$
	292,3	161,5	$\sigma_{ut1} = 1500$
S ₂₂	-12,17	-21,9	$\sigma_{uc2} = 246$
	10,76	16,63	$\sigma_{ut2} = 40$
S ₁₂	-69	-28,71	$\tau_{u12} = 68$
	28,81	68,07	

5.2.2 Modelo 2

De seguida são apresentados os resultados referentes às simulações dinâmicas efetuadas para o modelo 2.

5.2.2.1 Aceleração longitudinal

a. Espessura 3 mm

Tabela 50. Resultados do modelo 2 espessura 3 mm, aceleração longitudinal (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3	193,3	16,68
	0 / 90	3	239,9	16,96

Tabela 51. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-197,6	-215,8	$\sigma_{uc1} = 1500$
	86,16	110	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-17,73	-16,51	$\sigma_{uc2} = 246$
	7,83	5,791	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-16,42	-15,69	$\tau_{u12} = 68$
	16,43	15,70	

b. Espessura 3 e 4 [mm]

Tendo como objetivo aumentar a vida útil da estrutura reforçou-se a zona mais solicitada.

Tabela 52. Resultados modelo 2 espessura 3 e 4 mm, aceleração longitudinal (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3 e 4	142,1	15,68
	0 / 90	3 e 4	185,3	16,07

Tabela 53. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-145,4	-187,4	$\sigma_{uc1} = 1500$
	83,84	99,17	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-14,23	-11,88	$\sigma_{uc2} = 246$
	6,943	5,66	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-16,02	-15,87	$\tau_{u12} = 68$
	16,04	15,87	

Como era de prever reforçando a zona mais afetada as tensões máximas no ponto crítico diminuem.

5.2.2.2 Aceleração em curva

Para este carregamento dada a sua complexidade da aplicação da força na estrutura vão ser abordadas todas as orientações das fibras.

a. Espessura 3 mm

Tabela 54. Resultados do modelo 2 espessura 3 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3	359,5	17,90
	90 / 90	3	495,7	31,77
	90 / 0	3	459,1	18,23
	0 / 0	3	254,3	27,56

Tabela 55. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 90	90 / 0	0 / 0	
S ₁₁ [MPa]	-228,6	-506,4	-463,4	-255,8	$\sigma_{uc1} = 1500$ [MPa]
	276,9	263,7	247,7	242,1	$\sigma_{ut1} = 1500$ [MPa]
S ₂₂ [MPa]	-33,38	-70,67	-19,04	-96,39	$\sigma_{uc2} = 246$ [MPa]
	16,62	97,77	19,88	69,93	$\sigma_{ut2} = 40$ [MPa]
S ₁₂ [MPa]	-34,55	-43,46	-42,71	-37,01	$\tau_{u12} = 68$ [MPa]
	42,74	44,77	34,47	66,88	

b. Espessura 3 e 4 [mm]

Este estudo é efetuado para as duas orientações que fornecem melhores resultados, tratando-se do modelo mais indicado para a produção em materiais compósitos este vai ser objeto de estudo para todos os materiais.

- **Carbono (IM6) / Epóxico**

Tabela 56. Resultados modelo 2 espessura 3 e 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	3 e 4	258,5	16,73
	90 / 0	3 e 4	355,1	16,97

Tabela 57. Tensões no ponto crítico do Carbono (IM6) / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	90 / 0	
S₁₁	-216,5	-358,2	$\sigma_{uc1} = 1500$
	255,9	238,8	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-25,21	-14,9	$\sigma_{uc2} = 246$
	15,61	18,53	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-33,58	-35,64	$\tau_{u12} = 68$
	34,32	33,54	

Como pode-se evidenciar através das Tabela 56 e Tabela 57 as tensões diminuem consideravelmente.

- **E-G/epóxico**

Tabela 58. Resultados modelo 2 espessura 3 e 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).

E-G / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3 e 4	283,1	51,65
	0 / 90	3 e 4	209,4	51,13

Tabela 59. Tensões no ponto crítico do E-G / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-290,4	-178,4	$\sigma_{uc1} = 620$
	204,3	208,9	$\sigma_{ut1} = 1080$
S₂₂	-46,84	-70,55	$\sigma_{uc2} = 128$
	50,99	46,98	$\sigma_{ut2} = 39$
S₁₂	-46,54	-41,11	$\tau_{u12} = 69$
	42,02	45,64	

- **Kevlar 49/epóxico**

Tabela 60. Resultados modelo 2 espessura 3 e 4 mm, aceleração em curva (Abaqus/CAE 2014).

Kevlar 49 / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	90 / 0	3 e 4	427,7	41,56
	0 / 90	3 e 4	323,3	41,26

Tabela 61. Tensões no ponto crítico do Kevlar 49 / Epóxico para 3 e 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	90 / 0	0 / 90	
S₁₁	-434,9	-218,1	$\sigma_{uc1} = 335$
	248,3	283,3	$\sigma_{ut1} = 1280$
S₂₂	-17,22	-30,74	$\sigma_{uc2} = 158$
	20,95	16,36	$\sigma_{ut2} = 30$
S₁₂	-27,20	-27,75	$\tau_{u12} = 49$
	27,15	26,90	

- **Ligas de alumínio e magnésio**

Tabela 62. Resultados do modelo 2 para as ligas de alumínio e magnésio com espessura 4 mm (Abaqus/CAE 2014).

Material	Espessura [mm]	Deslocamento [mm]	Tensão máxima [MPa]	Tensão de cedência [MPa]
Alumínio	4	6,692	133,5	120
Magnésio	4	10,44	132,7	130

Da análise da Tabela 62, tendo em conta o critério de rotura tensão máxima, sendo as tensões máximas superiores às tensões limites de cada material pode-se constatar que utilizando estes materiais com uma espessura de 4 mm a estrutura fraturará.

Tabela 63. Resultados do modelo 2 para as ligas de alumínio e magnésio com espessura 5 mm (Abaqus/CAE 2014).

Material	Espessura [mm]	Deslocamento [mm]	Tensão máxima [MPa]	Tensão de cedência [MPa]
Alumínio	5	4,074	92,33	120
Magnésio	5	6,361	91,15	130

Através da análise da Tabela 63 tendo em consideração a tensão máxima e as tensões limites de cada material, utilizando uma espessura de 5 mm a estrutura não fraturará.

5.3 Rigidez dos modelos

A seleção de materiais é muitas vezes pensada apenas em termos de resistência. No entanto, uma estrutura pode não atingir o seu limite de resistência mas não ter rigidez suficiente para suportar as cargas impostas.

Assim é utilizado o critério de rotura de *Tsai-Hill* abordado anteriormente no capítulo 2.1.4, a fim de avaliar a rigidez com o objetivo de prever a existência de rotura.

5.3.1 Resultados das simulações estáticas

Tabela 64. Valores de α para o material C (IM6) / Epóxico (simulação estática).

Material	Carbono (IM6) / Epóxico				
	Orientação [°]	0/90	90/90	90/0	0/0
Modelo 1 (2 mm)		0,45	---	---	---
Modelo 1 (2 e 3 mm)		0,31	---	---	---
Modelo 1 (3 mm)		0,26	0,37	0,26	0,34
Modelo 1 (3 e 4 mm)		0,21	0,25	0,2	0,27
Modelo 1 (4 e 5 mm)		0,15			
Modelo 2 (2mm)		0,6	---	---	---
Modelo 2 (2 e 3 mm)		0,41	---	---	---
Modelo 2 (3mm)		0,35	0,48	0,34	0,48
Modelo 2 (3 e 4 mm)		0,28	---	0,26	---

Analisando o valor de α na Tabela 64, sendo este inferior a um pode concluir-se que nenhuma das simulações efetuadas a nível estático utilizando o material carbono (IM6) / epóxico apresenta rotura.

Tabela 65. Valores de α para o material E-G / Epóxico (simulação estática).

Material [°]	E-G / Epóxico				
	Orientação	0° / 90°	90° / 90°	90° / 0°	0° / 0°
Modelo 1 (3 mm)		0,42	0,65	0,47	0,51
Modelo 2 (3 mm)		0,56	0,85	0,59	0,71

Através da análise da Tabela 65, sendo os valores α inferiores a um, utilizando o material E-G / Epóxico para o carregamento estático, pode-se afirmar que não há rotura.

Tabela 66. Valores de α para o material Kevlar 49 / Epóxico (simulação estática).

Material	Kevlar 49 / Epóxico				
	Orientação [°]	0° / 90°	90° / 90°	90° / 0°	0° / 0°
Modelo 1 (3 mm)		0,53	0,53	0,48	0,51
Modelo 2 (3 mm)		0,7	0,7	0,67	0,74

Através da análise da Tabela 66, sendo os valores α inferiores a um, utilizando o material Kevlar 49 / Epóxico para o carregamento estático, pode-se afirmar que não há rotura.

5.3.2 Resultados das simulações Dinâmicas

5.3.2.1 Aceleração em curva

Tabela 67. Valores de α para o material C (IM6) / Epóxico (simulação dinâmica, acel. Em curva).

Material	Carbono (IM6) / Epóxico			
	0 / 90	90/90	90/0	0/0
Modelo 1 (3 mm)	1,67	2,16	2	1,76
Modelo 1 (3 e 4 mm)	1,4	---	1,5	---
Modelo 1 (4 mm)	1,14	---	1,2	---
Modelo 1 (4 e 5 mm)	1,01	---	1,04	---
Modelo 2 (3 mm)	0,67	2,56	0,86	1,07
Modelo 2 (3 e 4 mm)	0,54	---	0,74	---

Analisando a tabela anterior pode-se constatar que para o modelo 1 existe rotura em todos os casos, enquanto para o modelo 2 só há rotura para as orientações unidirecionais (90° / 90° e 0° / 0°).

Analisando o modelo 1 (para espessura 4 e 5 mm) para a orientação 0° / 90° o valor α (tendo em conta o critério de *Tsai-Hill*) indica que existe rotura da estrutura, mas como este valor é muito próximo de um, vai ser utilizado um outro critério (o critério de *Hashin*) para confirmar se existe ou não rotura. O critério de *Hashin* permite a análise de resultados na fibra e na matriz do compósito quando estes estão à tração e/ou à compressão. Neste critério desde que os valores da simulação estejam abaixo da unidade significa que a fibra e/ou a matriz não sofrem qualquer dano. Na Tabela 68 são apresentados os resultados da aplicação do critério, estando presente no anexo C as respetivas imagens obtidas pelo programa.

Tabela 68. Resultados da aplicação do critério de rotura de *Hashin*.

Propriedade	Matriz	Fibra
Tração	0,1876	0,0507
Compressão	0,9772	0,0655

Pelos resultados obtidos é perceptível que não existe rotura, contrariando o pressuposto pelo critério de *Tsai-Hill*. Apesar desta contradição os resultados considerados foram os do critério *Hashin*, por este ser o mais utilizado e indicado para os materiais compósitos, porque permite uma análise mais abrangente das deformações que ocorrem no material.

Tabela 69. Valores de α para o material E-G / Epóxico e Kevlar 49 / Epóxico (simulação dinâmica, acel. Em curva).

Orientação [°]		0 / 90	90 / 0
Modelo 2 (3 e 4 mm)	E-G / Epóxico	0,89	1,53
	Kevlar 49 / Epóxico	0,63	1,55

Através da Tabela 69, para o modelo 2 utilizando os materiais E-G / Epóxico e Kevlar 49 / Epóxico para a orientação 0° / 90° não há rotura o mesmo não é válido para a orientação 90° / 0°.

5.3.2.2 Aceleração longitudinal

Tabela 70. Valores de α para o material C (IM6) / Epóxico (simulação dinâmica, acel. longitudinal).

Material	Carbono (IM6) / Epóxico		
	Orientação [°]	0 / 90	90 / 0
Modelo 1 (3 mm)		0,51	0,5
Modelo 1 (3 e 4 mm)		0,4	0,39
Modelo 1 (4 e 5 mm)		0,28	---
Modelo 2 (3 mm)		0,28	0,28
Modelo 2 (3 e 4 mm)		0,27	0,26

Da análise da tabela anterior e tendo em consideração que o valor de α é inferior a um não há rotura da camada.

6 Discussão dos resultados

Depois de apresentados os resultados, segue-se a discussão dos mesmos através da comparação entre as várias situações estudadas para posterior obtenção do modelo, material, espessura da estrutura e orientação das fibras que apresentem melhores resultados a nível de resistência, peso e a nível económico.

Os materiais compósitos são elásticos até à sua rotura e é por este facto que não podem ser comparados com os materiais metálicos, pois estes admitem plasticidade antes da rotura. Desta forma, apenas a comparação com a tensão limite não é suficiente, por isso, é feita a comparação das tensões longitudinais e transversais no ponto crítico e é feito o estudo à rotura do material.

Cada simulação estática efetuada demorou perto de cinco minutos, enquanto as simulações dinâmicas demoram quatro horas cada uma. Este aspeto torna-se importante em todo o desenvolvimento do projeto, pois em relação ao estudo dinâmico foram realizadas apenas as simulações que se consideraram mais frequentes no uso deste tipo de componente.

6.1 Propriedades do material

A análise do material é realizada com base na conjugação de várias propriedades, nomeadamente as propriedades mecânicas, físicas (peso da estrutura) e o preço, tendo em conta o carregamento estático, pois é o carregamento mais solicitado na vida da estrutura.

6.1.1 Propriedades mecânicas

De seguida serão analisados os materiais compósitos tendo em comparação a sua resistência à rotura, as tensões máximas (tensão *Von Mises*), as suas tensões longitudinais e transversais no ponto crítico.

6.1.1.1 Modelo 1

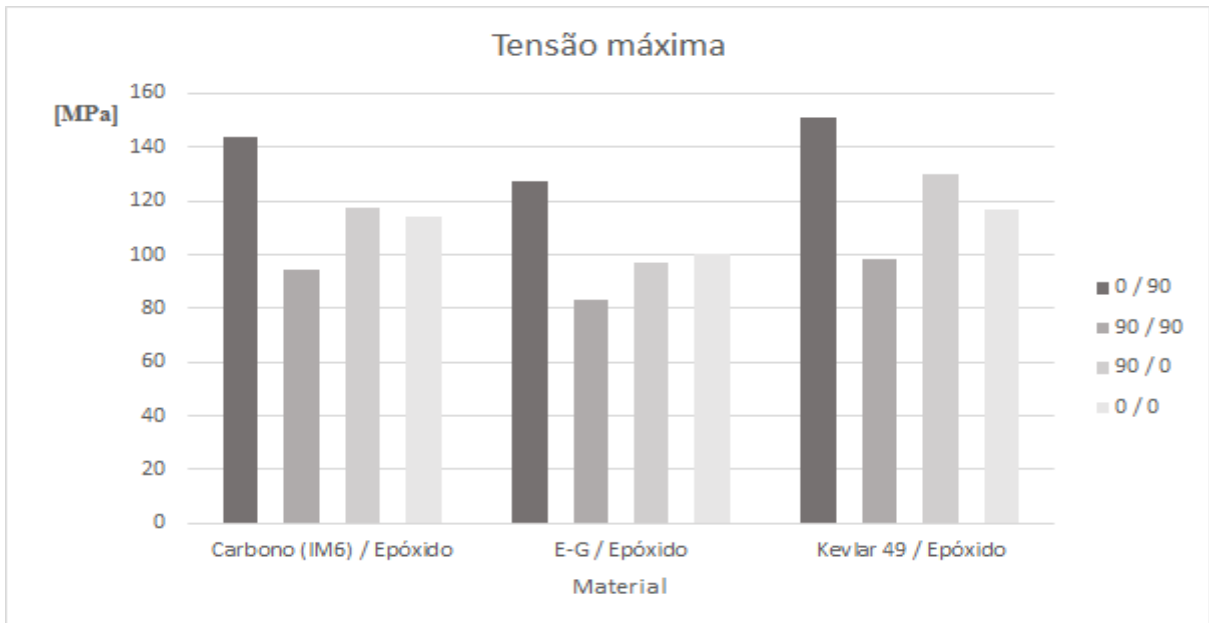


Gráfico 8. Tensão *Von Mises* para os materiais compósitos submetidos a um carregamento estático para o modelo 1 com espessura uniforme de 3 mm.

Através do Gráfico 8 analisando a estrutura com uma espessura uniforme de 3 mm para um carregamento estático, o compósito E-G / Epóxido é o que apresenta tensão máxima menor. O material que tem tensões superiores é o Kevlar 49 / Epóxido.

Para facilitar a análise das tensões longitudinais e transversais no ponto crítico foi estabelecido um coeficiente de segurança, que tem por base a divisão das tensões limites de cada material com as tensões máximas no ponto crítico.

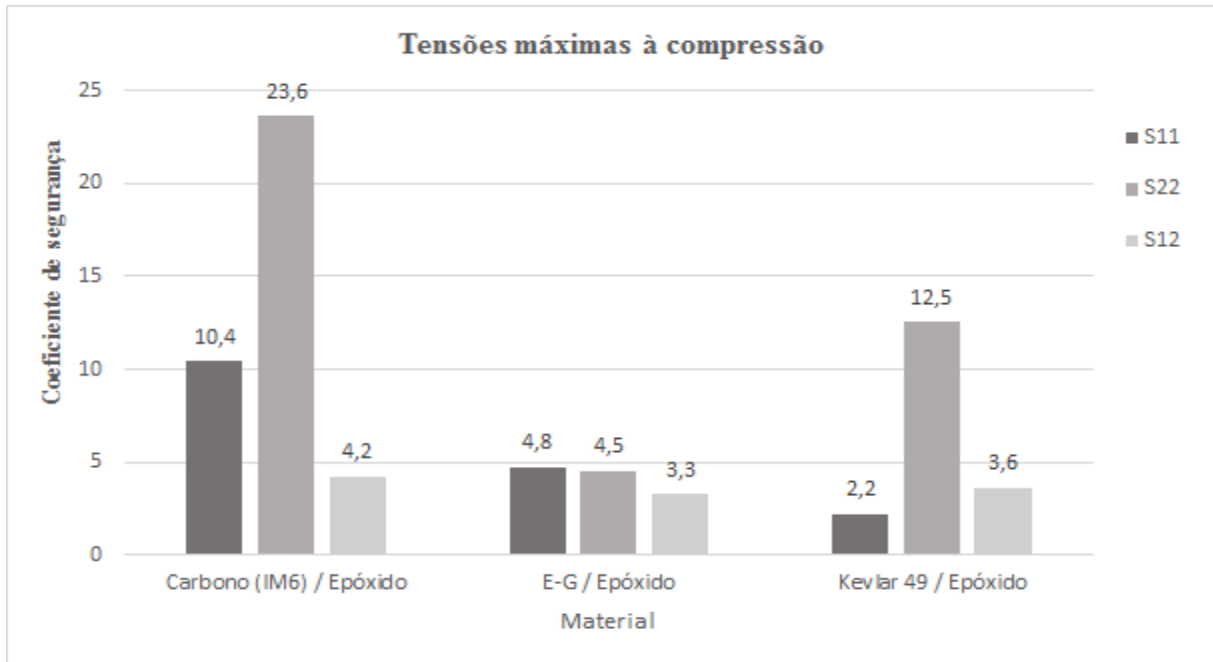


Gráfico 9. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 0°/90°).

Da análise do Gráfico 9 pode-se constatar que o Carbono (IM6)/Epóxico é o que tem coeficiente de segurança mais elevada para a orientação 0°/90°. Da análise do Gráfico 8 constatou-se que o compósito de carbono tinha tensões máximas superiores ao E-G/Epóxico, mas tendo em conta as tensões limites de cada material o carbono (IM6)/Epóxico apresenta tensões limites superiores.

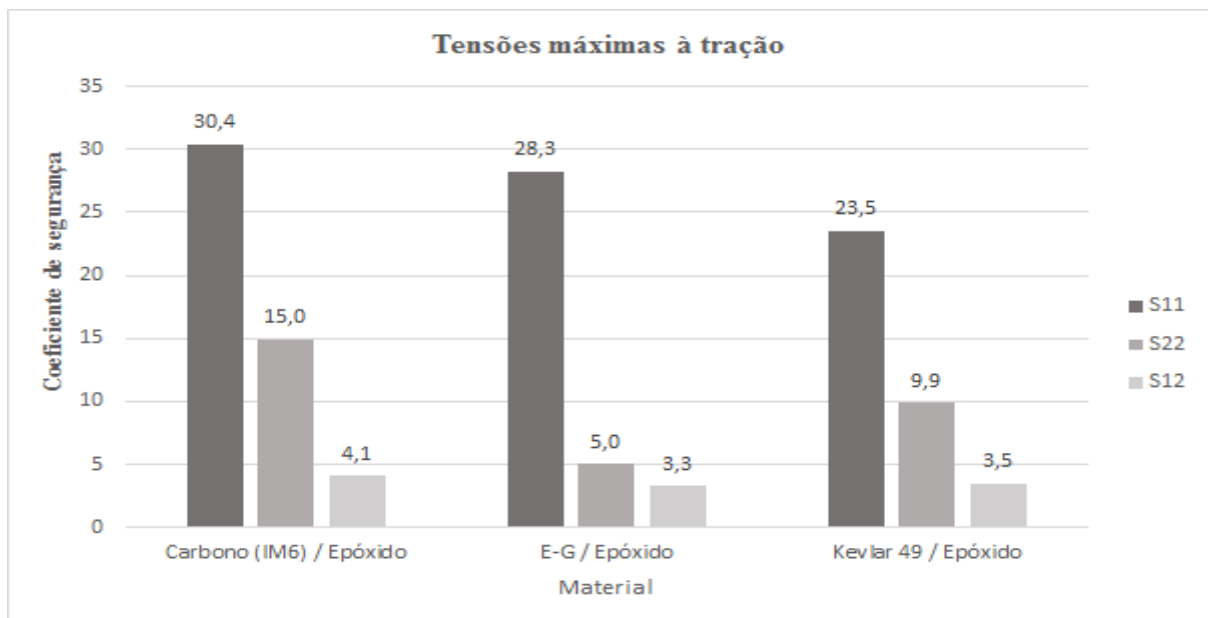


Gráfico 10. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 0°/90°).

Comparando agora as tensões máximas à tração o carbono (IM6)/Epóxico é o que tem melhor coeficientes de segurança para a orientação 0°/90°.

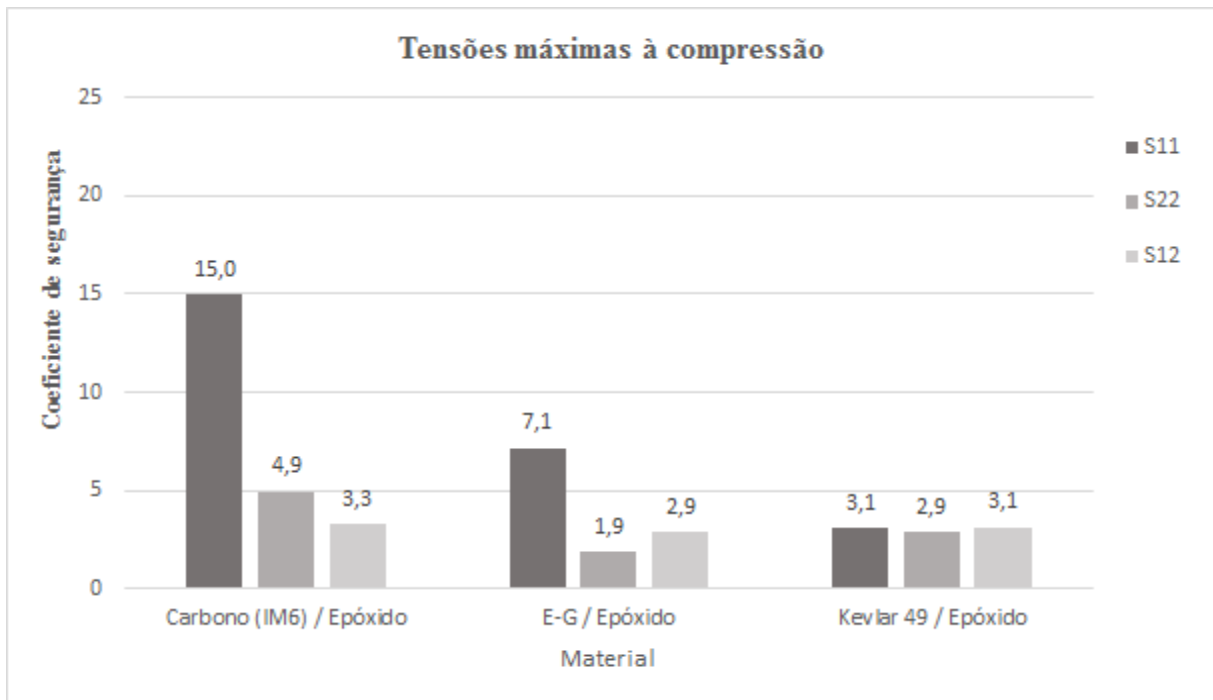


Gráfico 11. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 90°/90°).

Para a orientação das fibras unidireccionalmente a 90°, o compósito de carbono (IM6)/Epóxico é o que tem maior coeficiente de segurança para as tensões máximas à compressão.

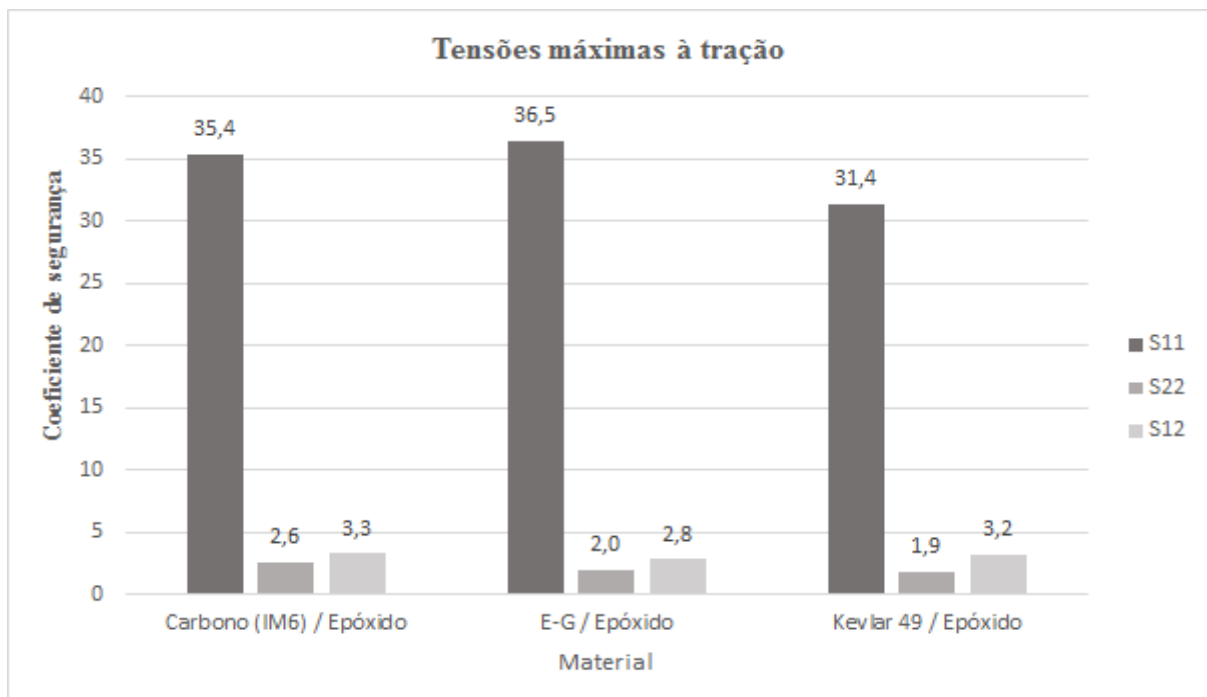


Gráfico 12. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 90°/90°).

Relativamente às tensões máximas à tração, o E-G/Epóxico para a tensão S₁₁ apresenta melhor coeficiente de segurança, mas em relação às restantes tensões é inferior ao carbono.

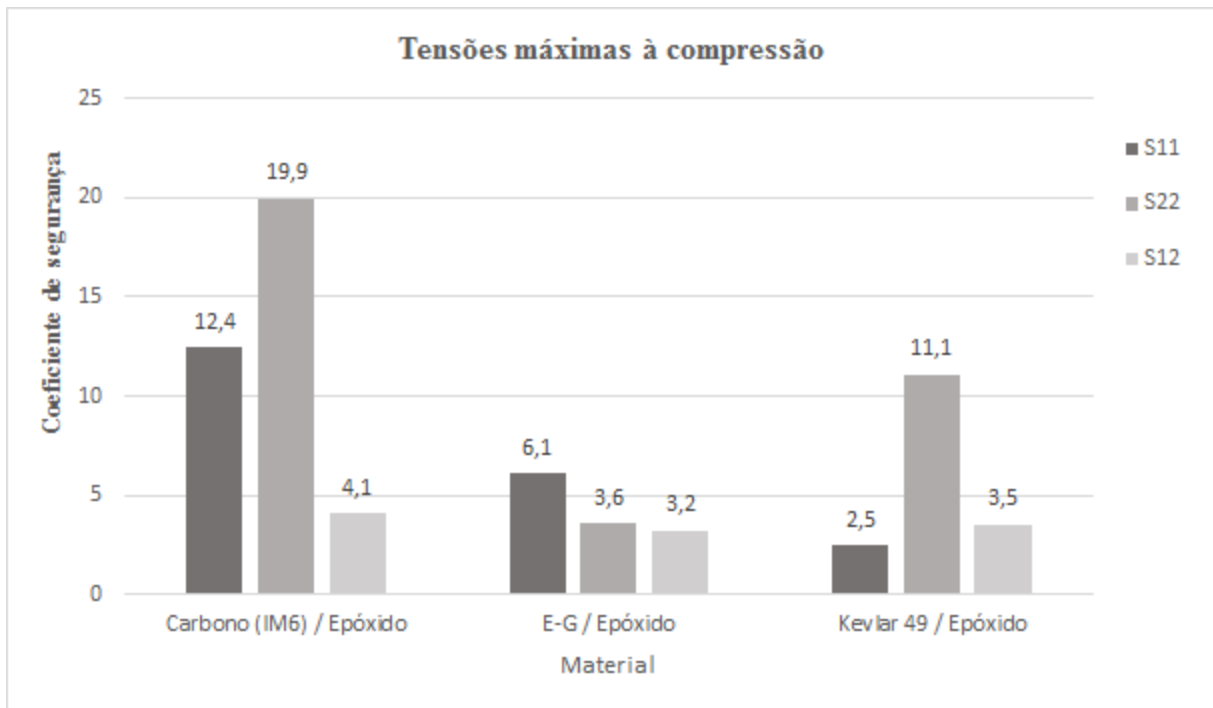


Gráfico 13. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 90°/0°).

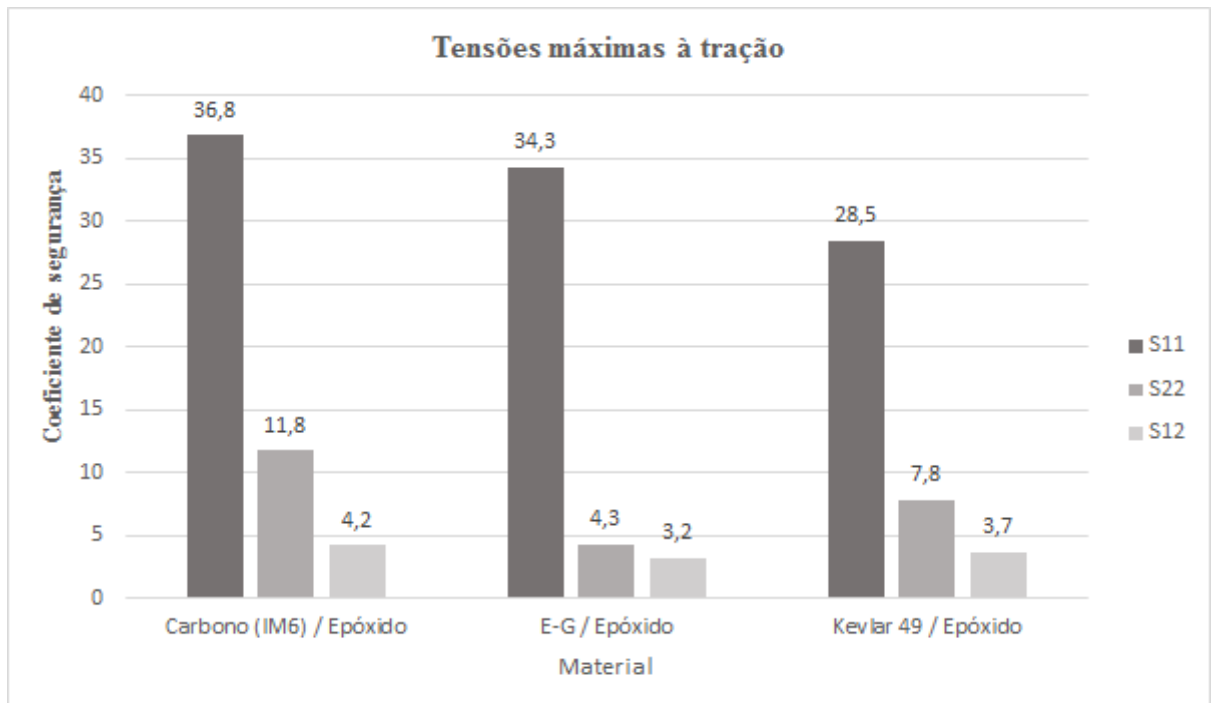


Gráfico 14. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 90°/0°).

Analisando os resultados dos Gráfico 13 e Gráfico 14, relativos à orientação 90°/0° o carbono (IM6)/Epóxico tem coeficiente de segurança superior aos restantes, tanto para as tensões à compressão como para tensões à tração.

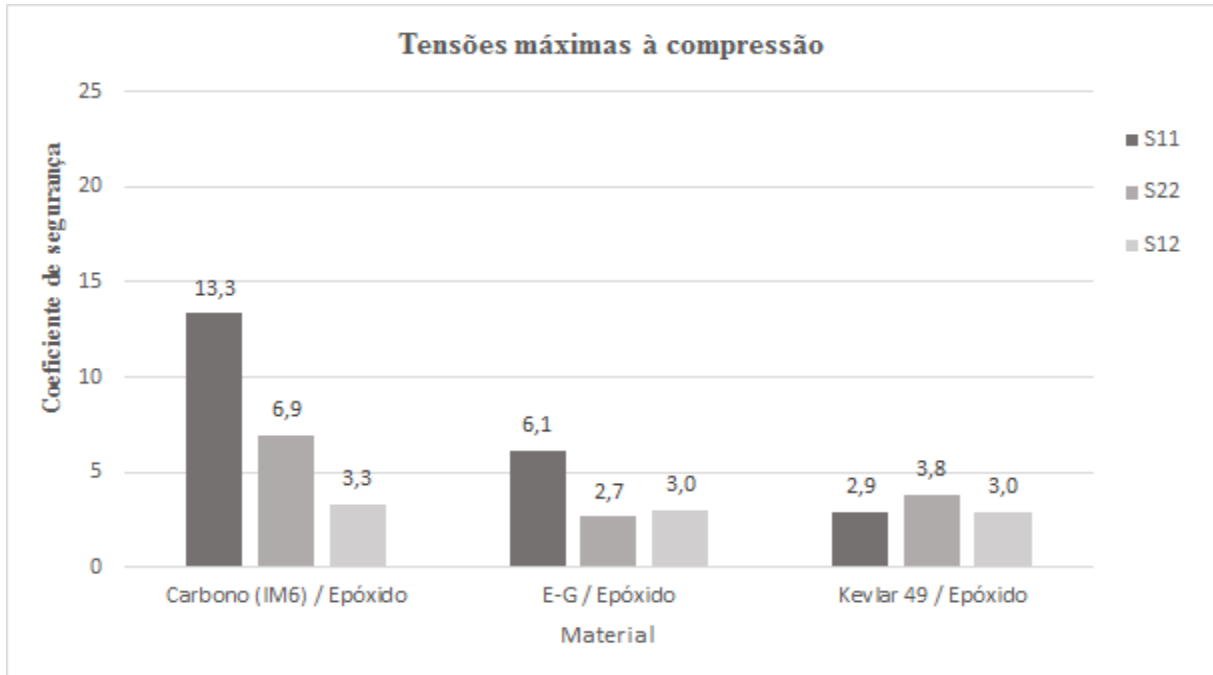


Gráfico 15. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 0°/0°).

Para a orientação das fibras unidireccionalmente a 0°, o compósito de carbono (IM6)/Epóxico é o que tem maior coeficiente de segurança para as tensões máximas à compressão.

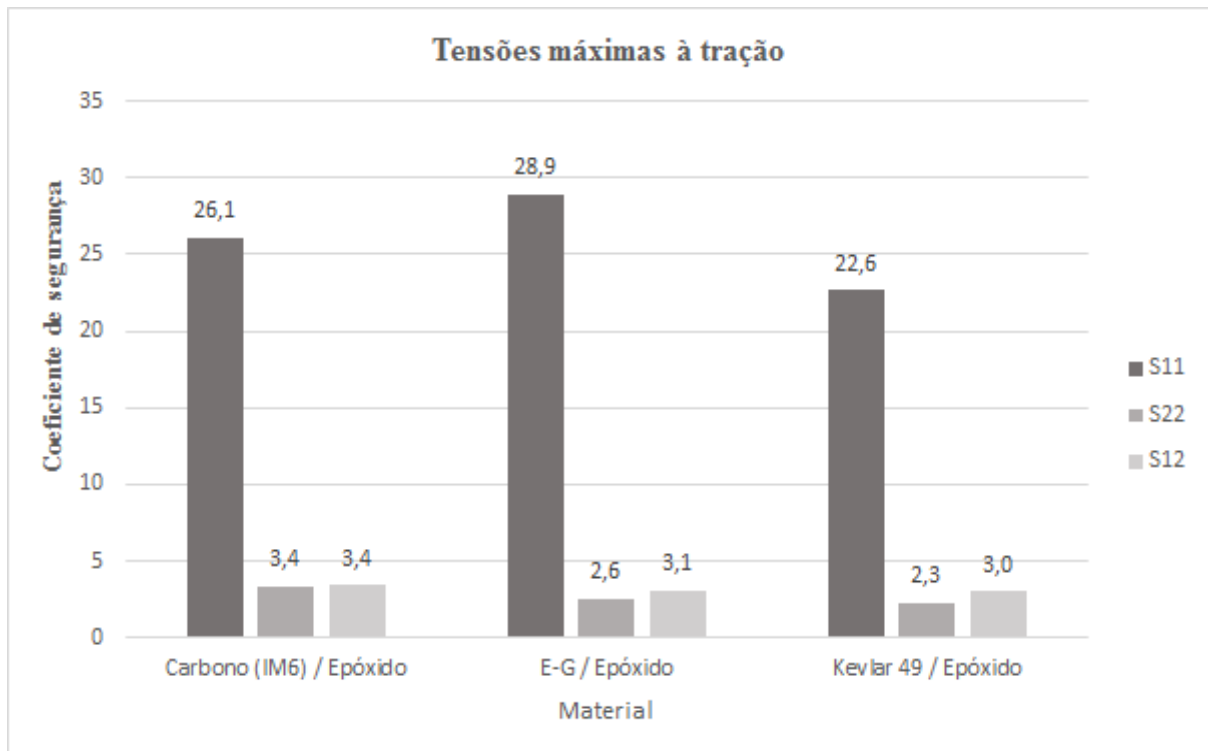


Gráfico 16. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 0°/0°).

Relativamente às tensões máximas à tração, o E-G/Epóxico para a tensão S₁₁ apresenta melhor coeficiente de segurança, mas em relação às restantes tensões é inferior ao carbono.

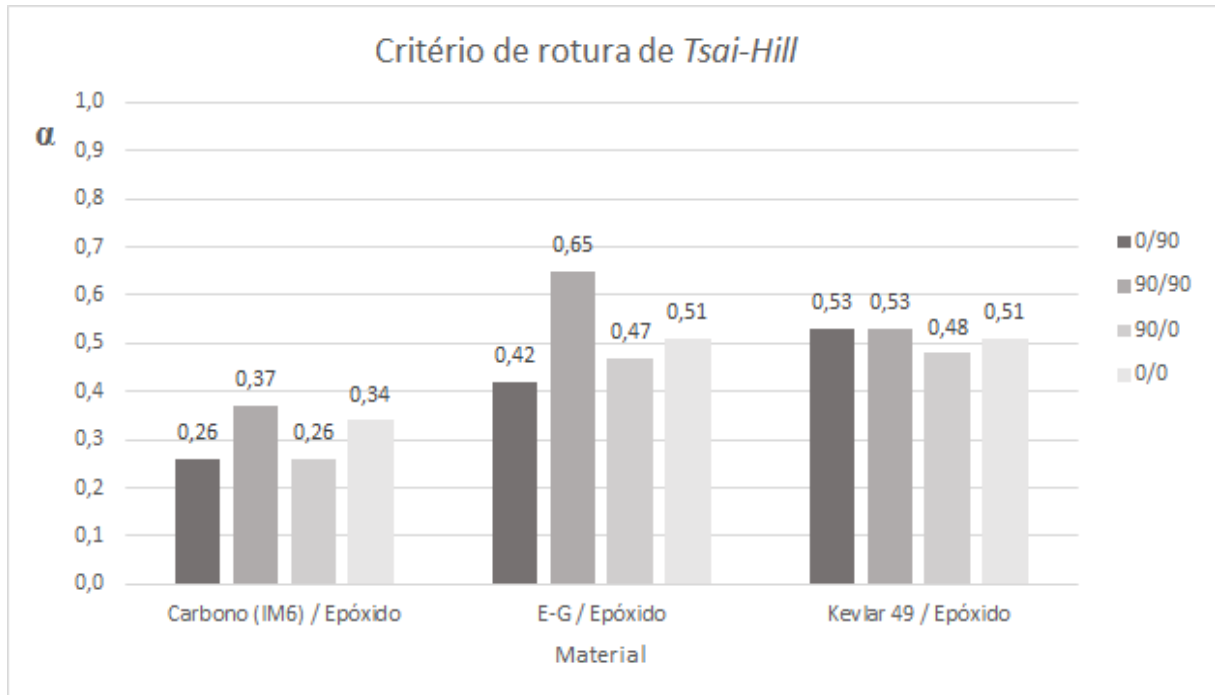


Gráfico 17. Resultados da aplicação do critério de rotura de *Tsai-Hill* para o modelo 1.

Sendo um elemento estrutural projetado para sofrer vários ciclos de esforços e sujeito a fadiga é necessário ter um elevado coeficiente de segurança (já que não foram efetuados cálculos à fadiga), pois o comportamento deste tipo de materiais não é constante ao longo da sua vida, ou seja, se a estrutura em estudo for projetada para durar vinte anos, o decréscimo das tensões limites do material podem reduzir cerca de dez vezes provocadas pelos vários impactos sofridos pelo banco. Através da análise do Gráfico 17, dos materiais utilizados o carbono (IM6)/Epóxico é o que tem melhor resistência à rotura, pois apresenta os valores mais baixos e como tal mais distantes de um (sendo que o valor de $\alpha = 1$ significa que existe rotura da estrutura), sendo assim o que apresenta maior resistência à fadiga.

6.1.1.2 Modelo 2

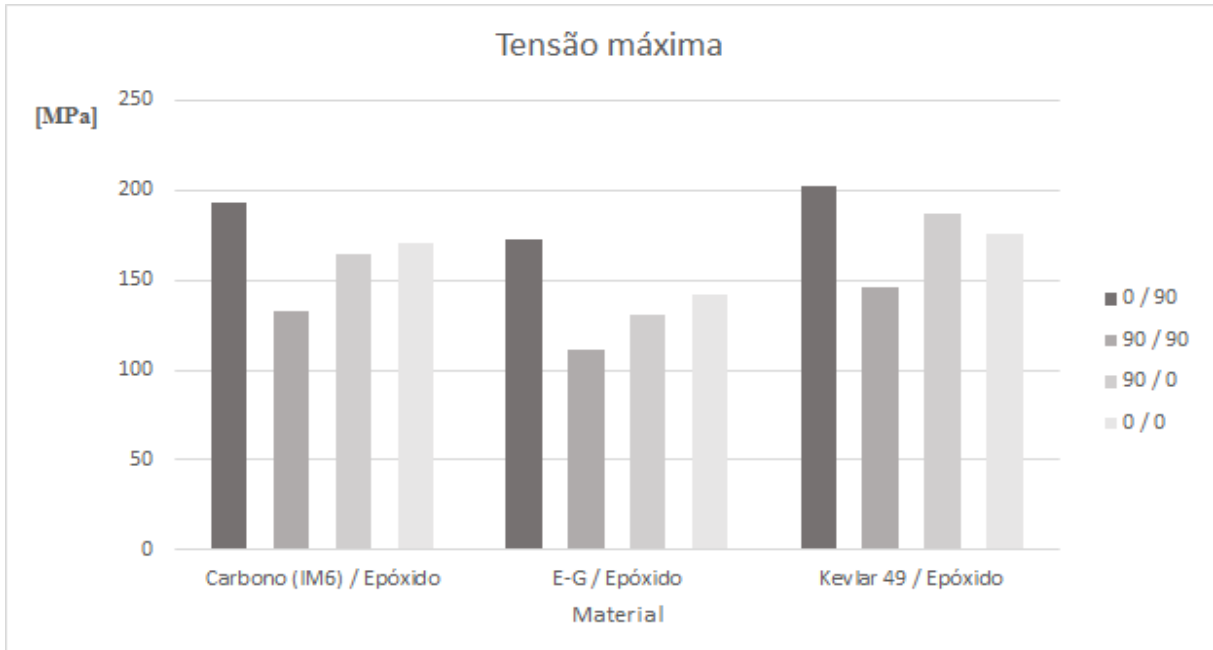


Gráfico 18. Tensão *Von Mises* para os materiais compósitos submetidos a um carregamento estático para o modelo 2 com espessura uniforme de 3 mm.

Da análise do Gráfico 18, o compósito E-G / Epóxico é o que tem tensão máxima menor em contraste o que tem tensão superior é o Kevlar 49 / Epóxico.

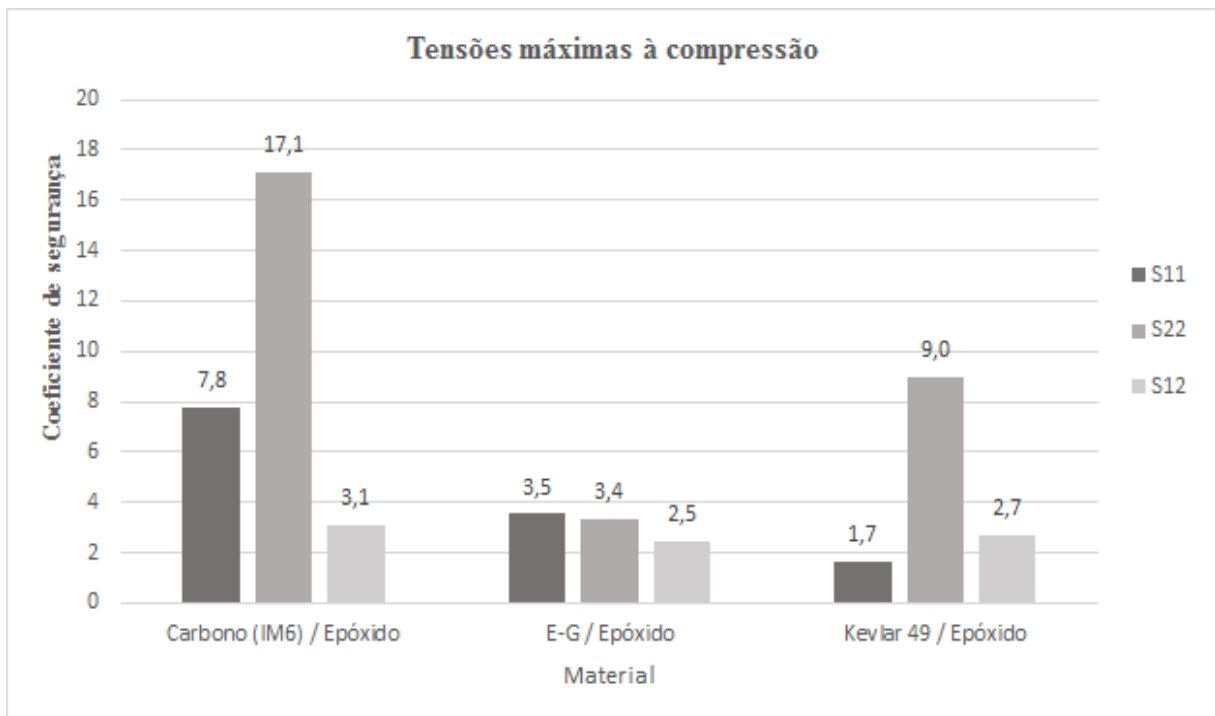


Gráfico 19. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 0°/90°).

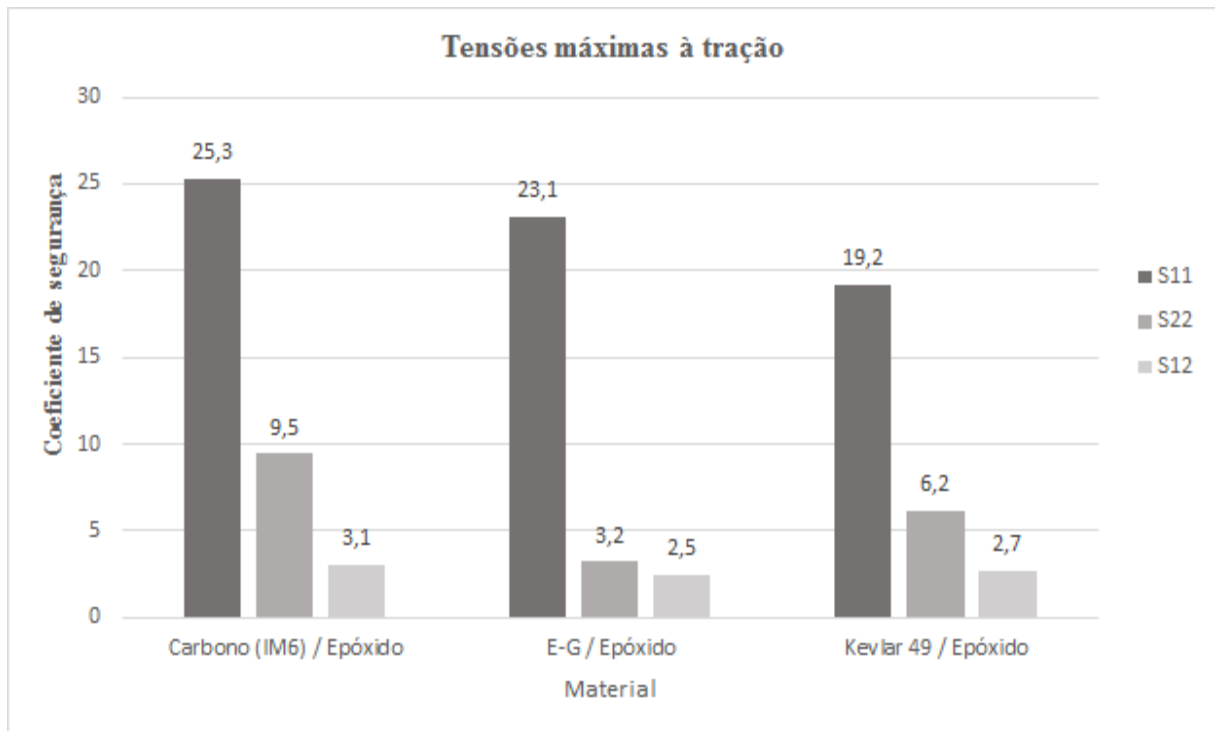


Gráfico 20. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 0°/90°).

Através da análise do Gráfico 19 e Gráfico 20, relativos à orientação 0°/90°, o carbono (IM6)/Epóxico tem coeficiente de segurança superior aos restantes, tanto para as tensões à compressão como para tensões à tração.

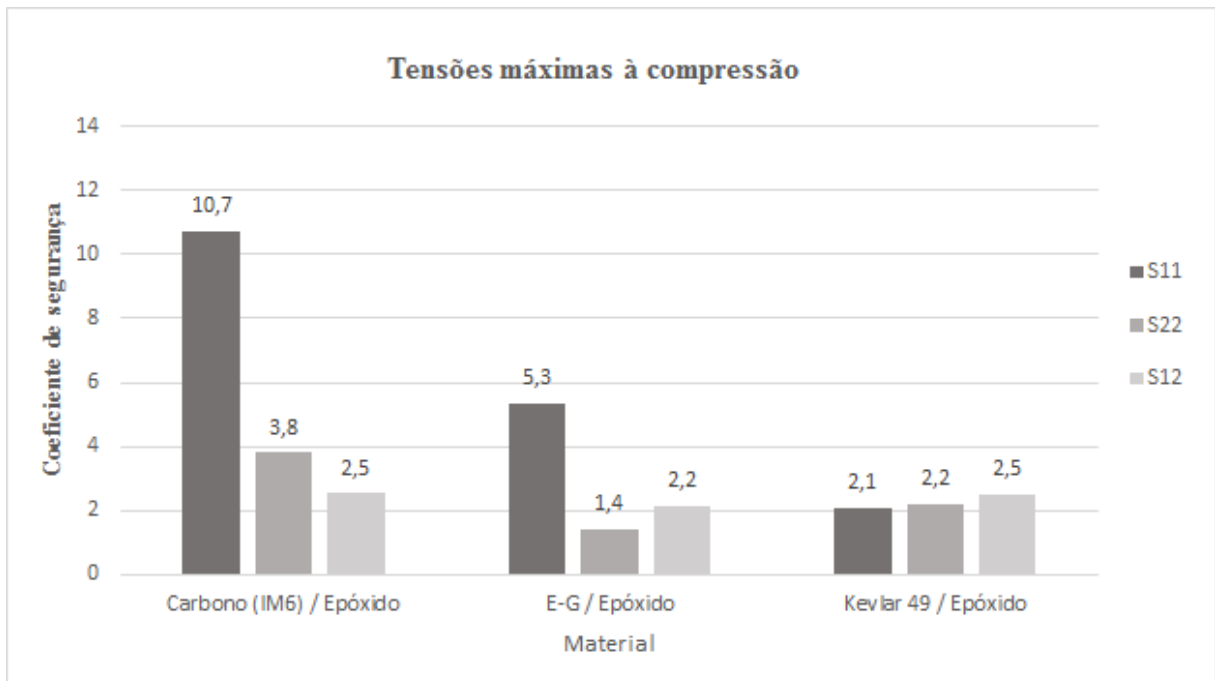


Gráfico 21. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 90°/90°).

Para a orientação das fibras unidireccionalmente a 90°, o compósito de carbono é o que tem maior coeficiente de segurança para as tensões máximas à compressão.

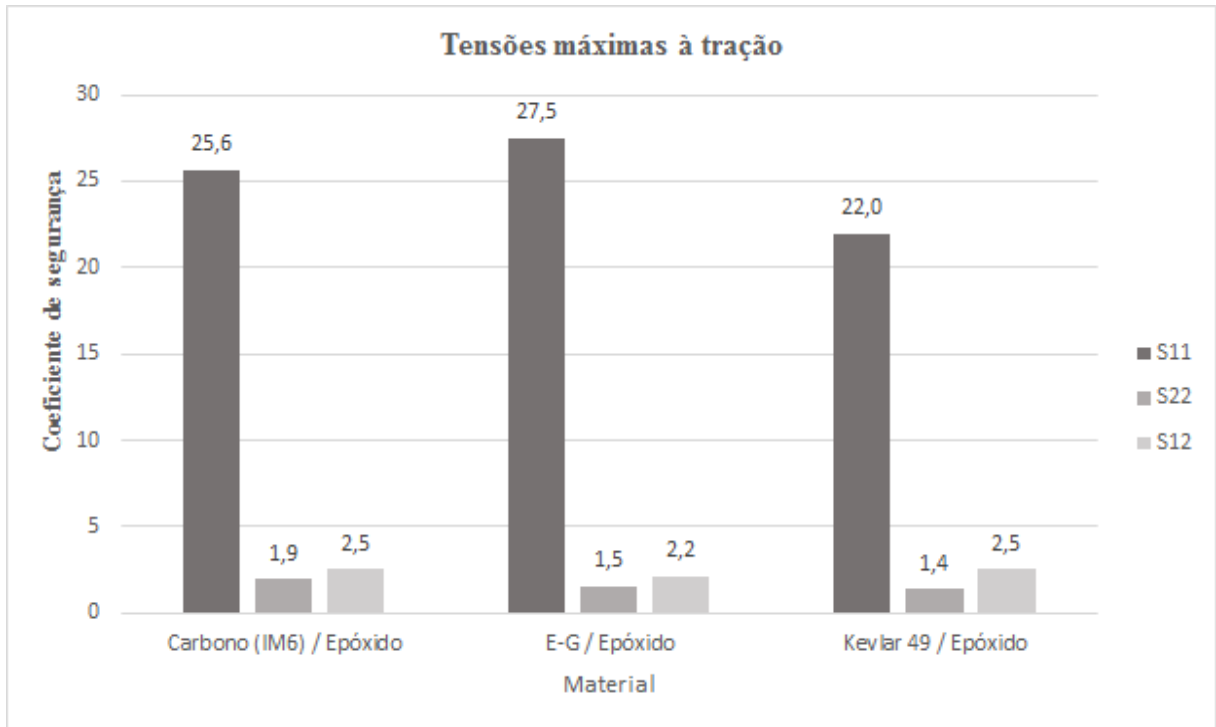


Gráfico 22. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 90°/90°).

Relativamente às tensões máximas à tração, o E-G/Epóxido para a tensão S_{11} apresenta melhor coeficiente de segurança, mas em relação às restantes tensões é inferior ao carbono.

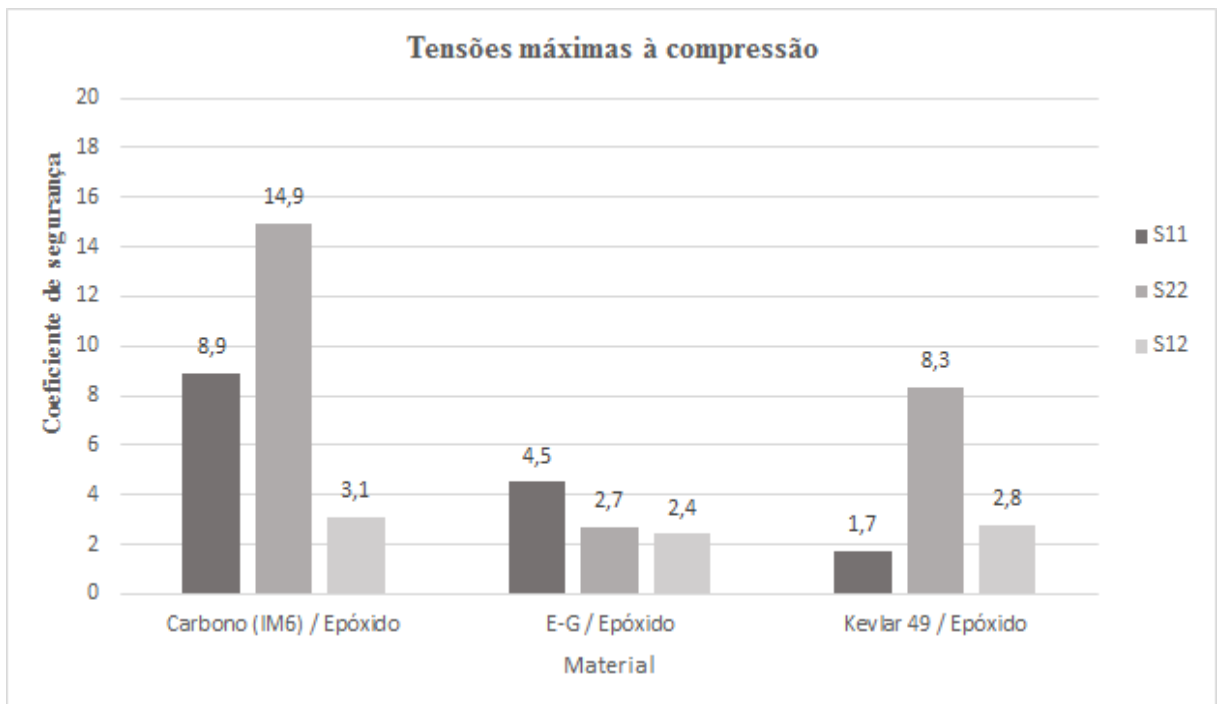


Gráfico 23. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 90°/0°).

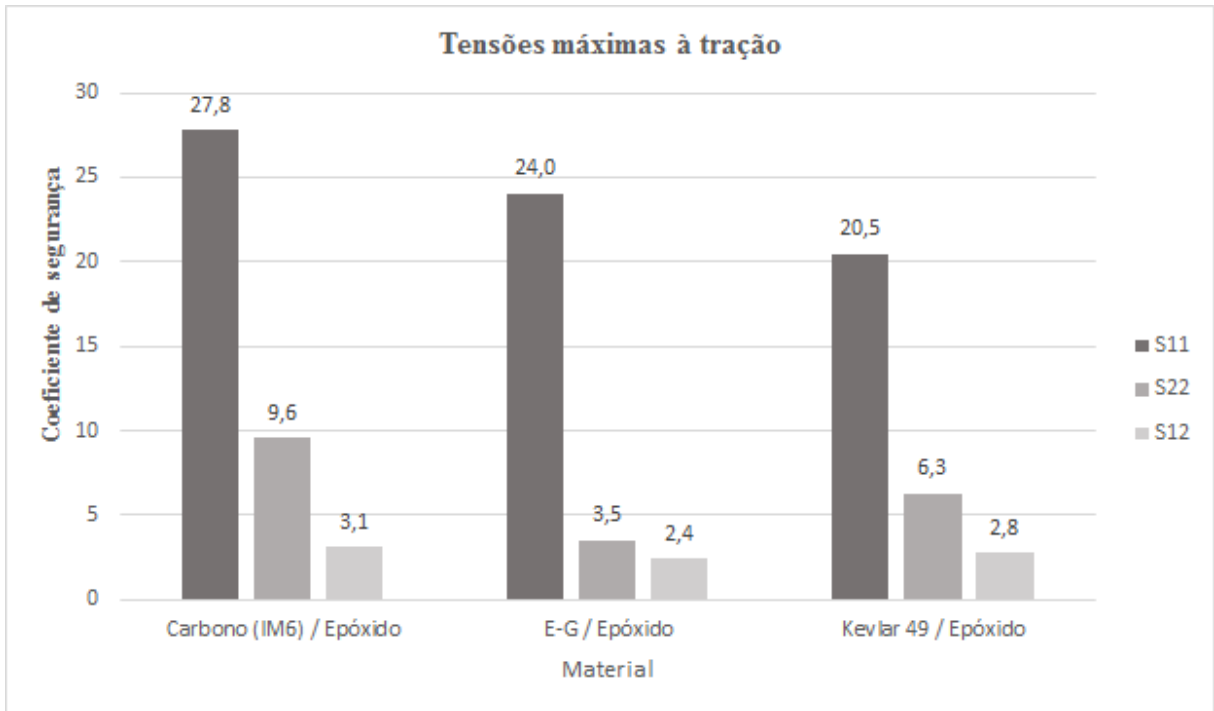


Gráfico 24. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 90°/0°).

Através da análise do Gráfico 23 e Gráfico 24, para a orientação 90°/0° o carbono (IM6)/Epóxico é o que tem maior coeficiente de segurança, tanto para as tensões máximas à compressão como para à tração.

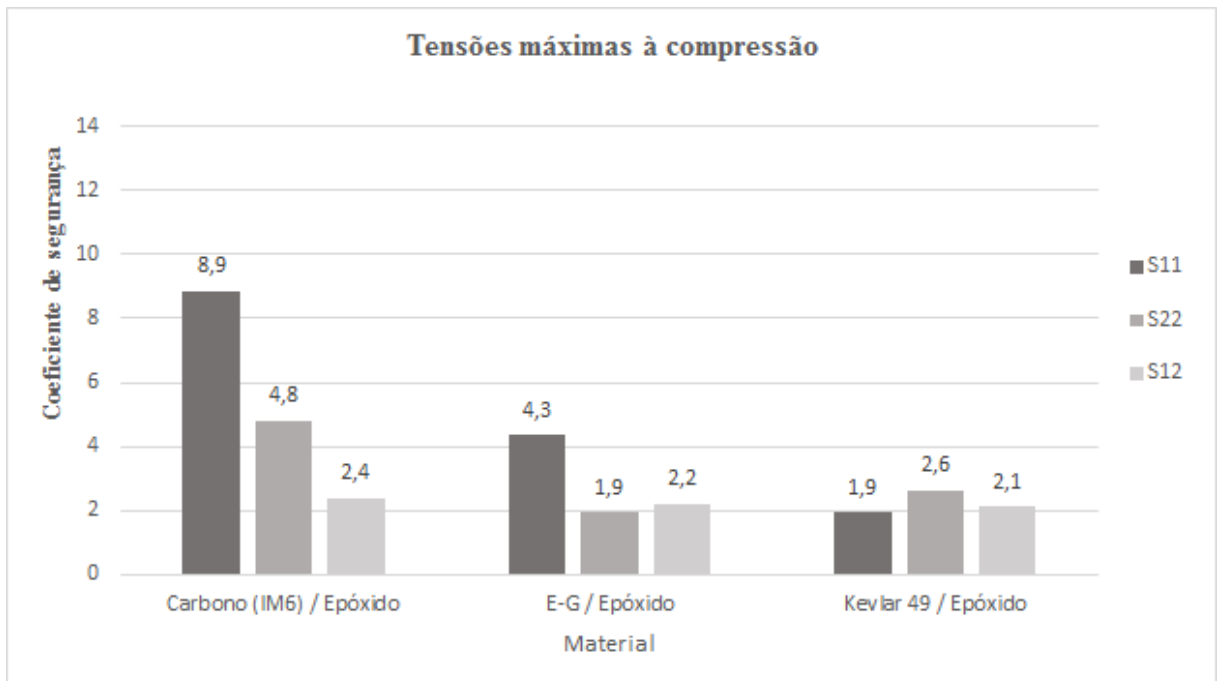


Gráfico 25. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão (orientação 0°/0°)

Para a orientação das fibras unidireccionalmente a 0°, o compósito de carbono (IM6)/Epóxico é o que tem maior coeficiente de segurança para as tensões máximas à compressão.

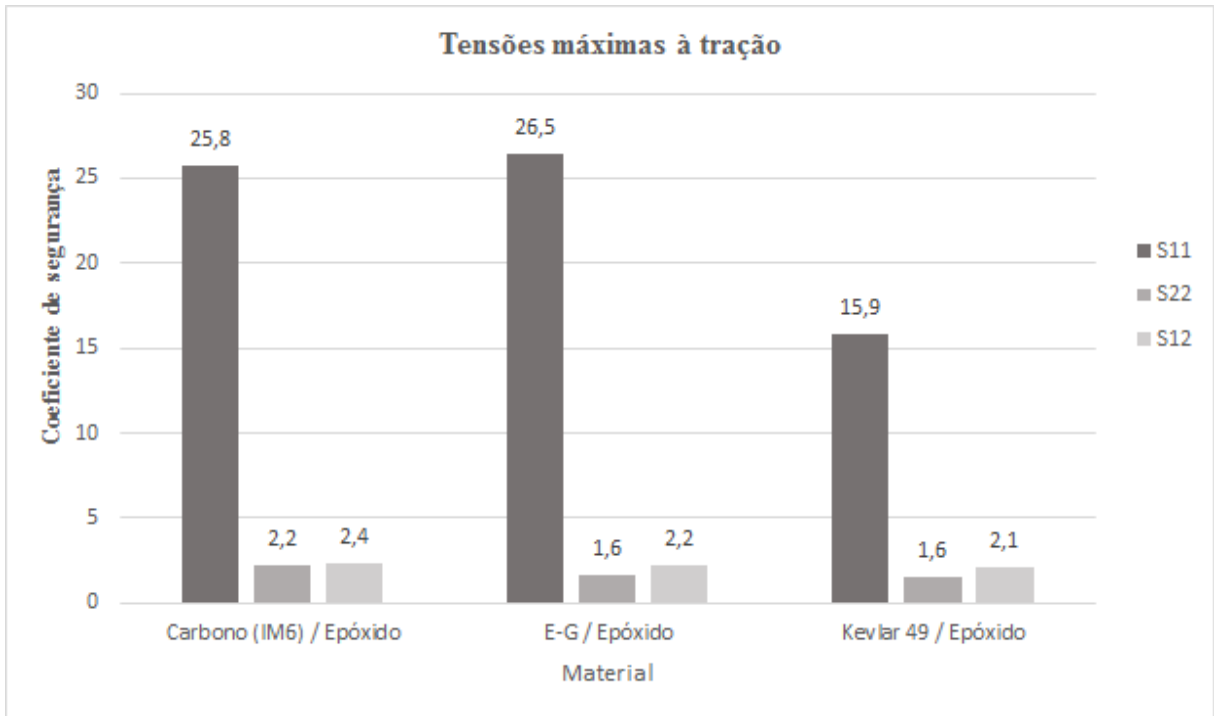


Gráfico 26. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à tração (orientação 0°/0°).

Relativamente às tensões máximas á tração, o E-G/Epóxico para a tensão S_{11} apresenta melhor coeficiente de segurança, mas em relação às restantes tensões é inferior ao carbono (IM6)/Epóxico.

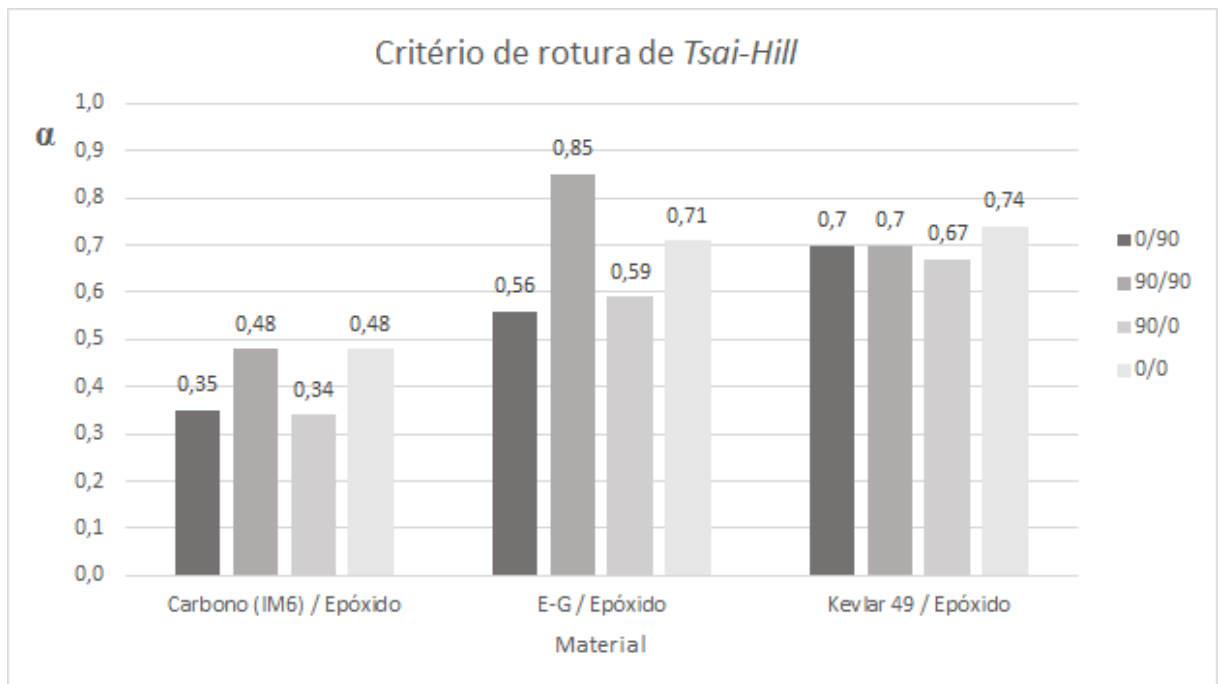


Gráfico 27. Resultados da aplicação do critério de rotura de *Tsai-Hill* para o modelo 2.

Através da análise do Gráfico 27, dos materiais utilizados o carbono (IM6)/Epóxico é o que tem melhor resistência à rotura.

6.1.2 Propriedades físicas e preço

O peso da estrutura como referido anteriormente é das propriedades mais importantes, pois reduzindo ao peso reduz-se os consumos e conseqüentemente as emissões de gases poluentes, sendo a grande preocupação dos construtores de veículos atualmente.

Com recurso às funcionalidades do *solidworks*, calcula-se o volume da estrutura. Através da seguinte dedução tendo em conta a densidade do material obtém-se o peso do banco para modelo 1.

Sendo a densidade definida por,

$$d = \frac{m}{V} \quad (6.1)$$

Obtém-se o peso por,

$$p = \frac{m}{V} \times V \quad (6.2)$$

Tabela 71. Propriedades físicas e preço (Ces EduPack 2014).

Material	Densidade [Kg/m ³]	Preço [EUR/Kg]
Carbono (IM6) / Epóxico	1550	45
E-G / Epóxico	1950	30
Kevlar 49 / Epóxico	1380	35,8

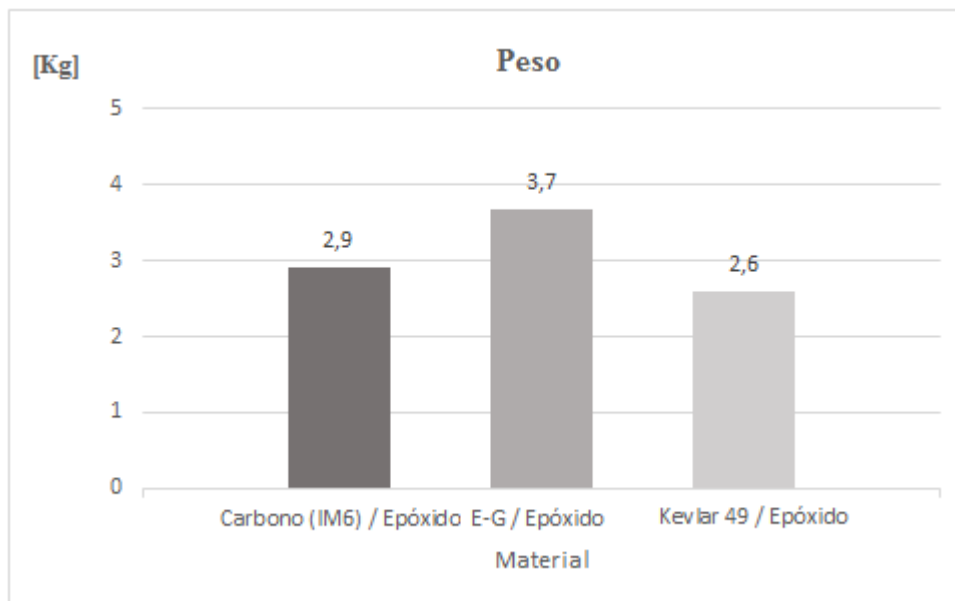


Gráfico 28. Peso do banco com diferentes materiais (modelo 1 com 3 mm de espessura).

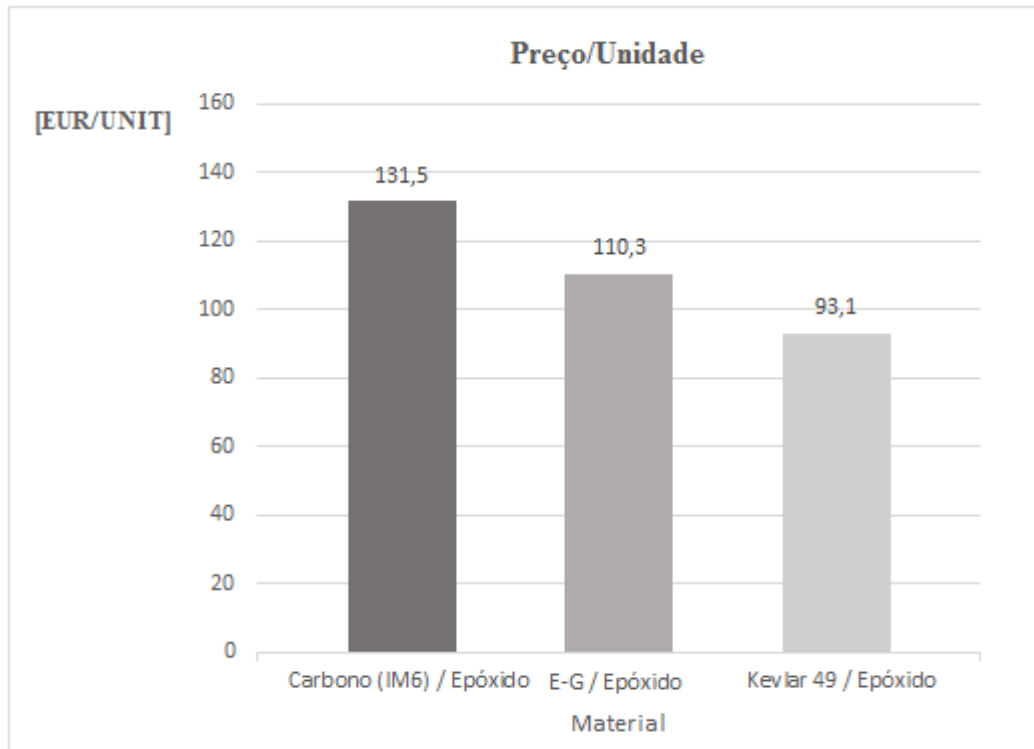


Gráfico 29. Preço por unidade considerando apenas o material (modelo 1 com 3 mm de espessura).

Da análise dos Gráfico 28 e Gráfico 29 identifica-se que o material Kevlar 49 / Epóxico é o que tem menor peso. O material E-G/Epóxico é o mais pesado. O material que apresenta melhor relação preço/unidade é o Kevlar 49 / Epóxico, sendo o carbono (IM6)/Epóxico o que tem pior relação. É de referir que é um valor estimado e que na realidade este será sempre maior devido a desperdícios.

6.2 Orientação das fibras

Uma das vantagens fundamentais dos laminados é a sua capacidade de se adaptar e controlar a orientação das fibras relativamente à direção do carregamento imposto, com a finalidade de aumentar a resistência do material. Por essa razão, é importante saber a orientação das fibras que contribuem para o aumento da resistência do laminado. Este estudo vai ser baseado nas várias simulações efetuadas para o material que fornece melhores propriedades mecânicas, sendo este o Carbono (IM6)/Epóxico e tendo em consideração o carregamento mais prejudicial para a estrutura provocado pela aceleração em curva.

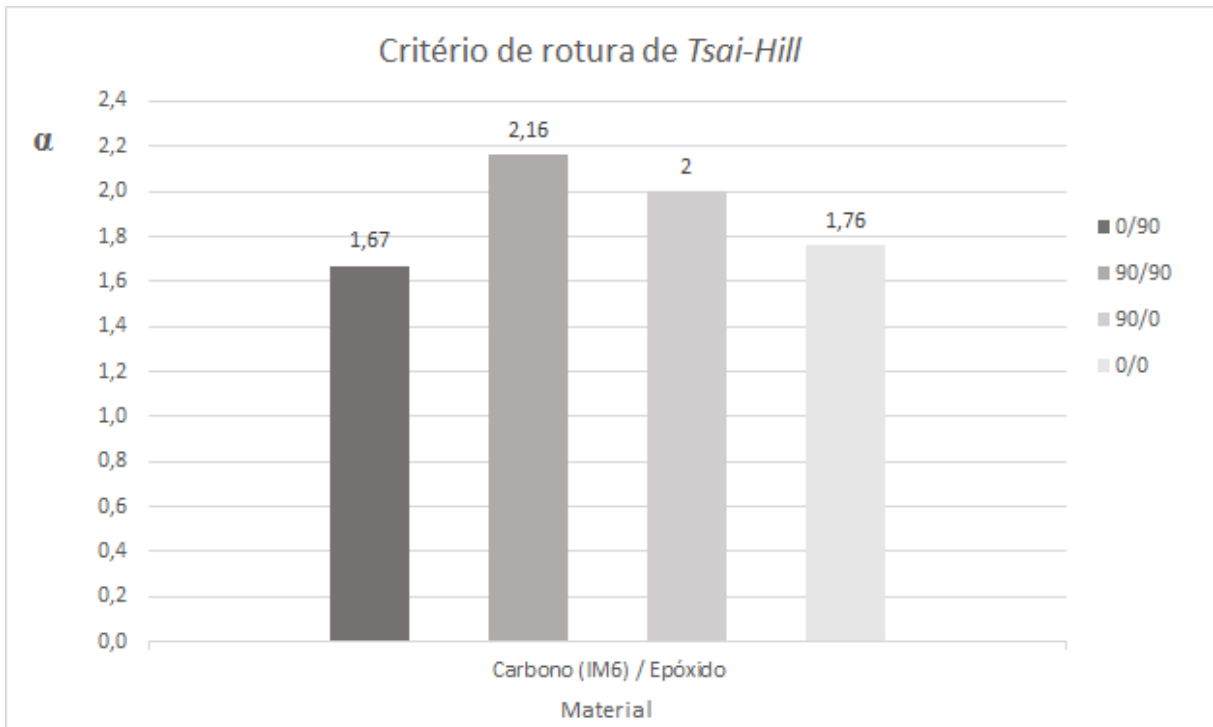


Gráfico 30. Resultados da aplicação do critério de rotura de *Tsai-Hill* para o modelo 1, espessura uniforme de 3 mm (carregamento provocado pela ac. em curva).

Através da análise do Gráfico 30, pode-se constatar que para uma espessura uniforme de 3 mm utilizando o modelo 1 submetido a um esforço dinâmico provocado pela aceleração em curva que há rotura da estrutura, mas mesmo havendo rotura da estrutura a orientação 0°/90° é a que apresenta menor valor de α , ou seja, é a orientação que tem melhor resistência para este tipo de carregamento.

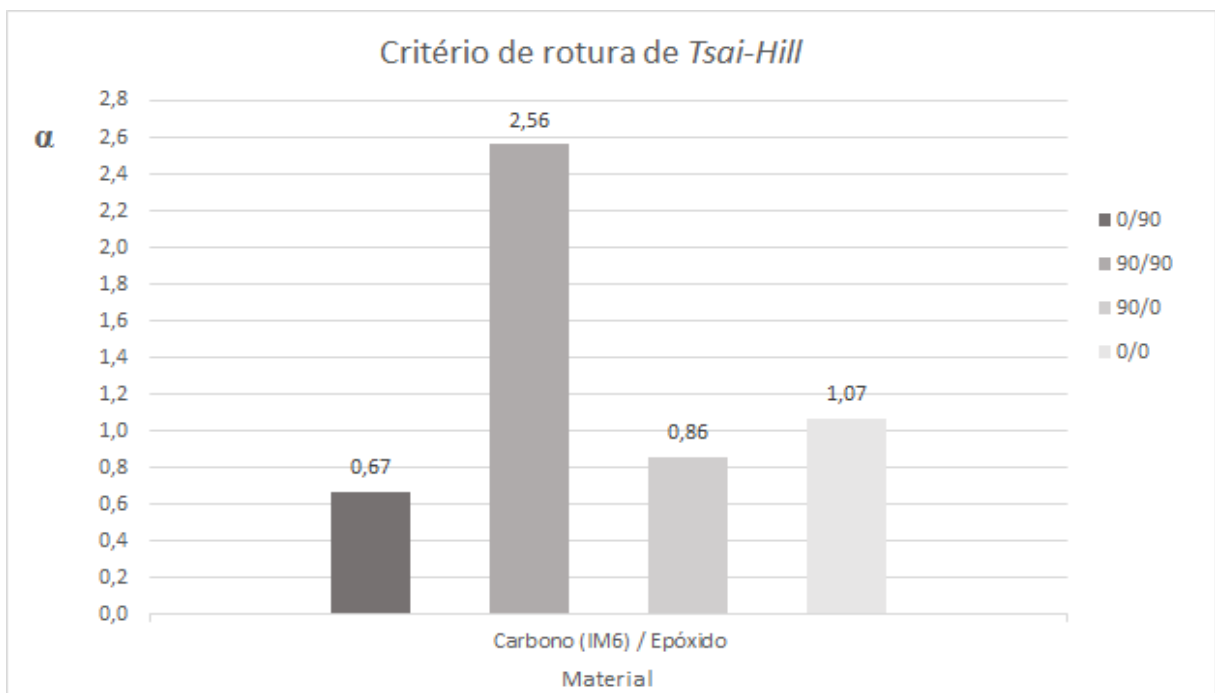


Gráfico 31. Resultados da aplicação do critério de rotura de *Tsai-Hill* para o modelo 2, espessura uniforme de 3 mm (carregamento provocado pela ac. em curva).

Da análise do Gráfico 31 tendo em consideração o modelo 2 com uma espessura uniforme de 3 mm submetido a um carregamento dinâmico provocado pela aceleração em curva do veículo, a orientação $0^\circ/90^\circ$ é a que apresenta maior resistência para este tipo de solicitação.

6.3 Espessura do modelo

Tendo como objetivo uma estrutura leve e resistente, este subcapítulo retrata a otimização da espessura da estrutura. Este estudo vai ser baseado nas várias simulações efetuadas para o material e orientação que fornece melhores propriedades mecânicas, sendo este o Carbono (IM6)/Epóxico e a orientação $0^\circ/90^\circ$.

Tendo em análise as simulações estáticas e dinâmicas realizadas, identificou-se a mais prejudicial para a estrutura, sendo esta a provocada pelo carregamento imposto pela aceleração em curva. A seleção da espessura é baseada nos resultados obtidos para os critérios de rotura de *Tsai-Hill*.

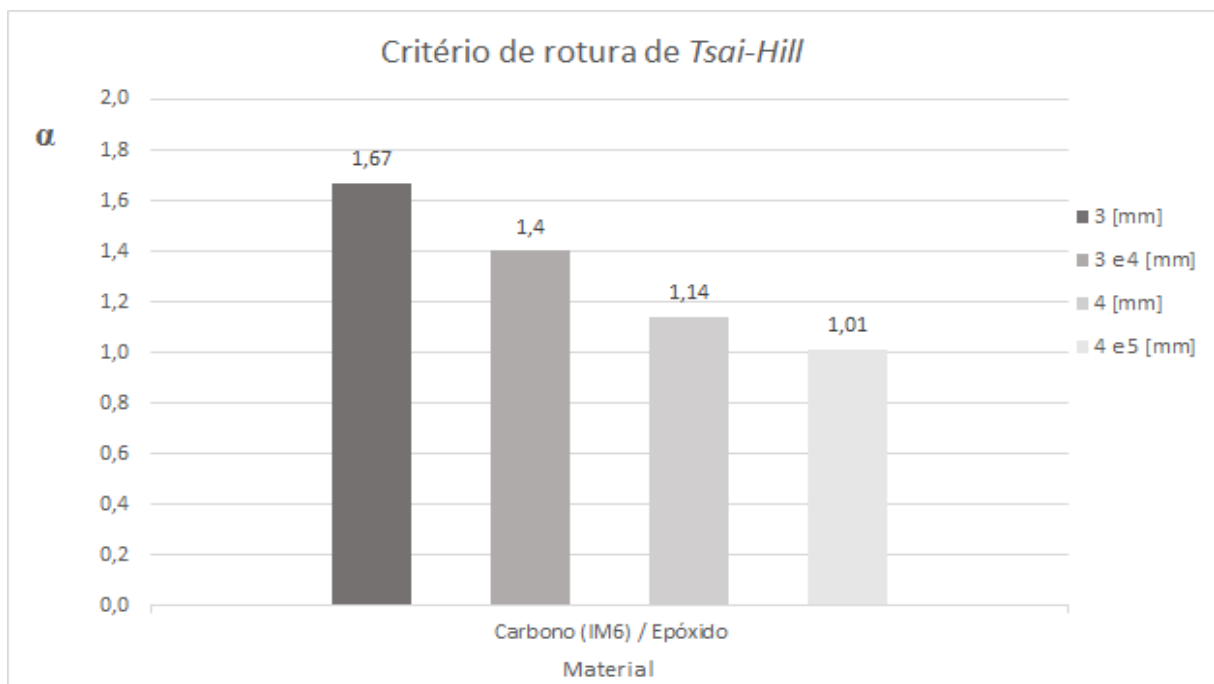


Gráfico 32. Resultados da aplicação do critério de rotura de *Tsai-Hill* para o modelo 1, com variação de espessura (carregamento provocado pela ac. em curva).

Analisando os resultados do critério de rotura *Tsai-Hill* (Gráfico 32), com o aumento da espessura o valor de α diminui, pois as tensões do ponto crítico diminuem. Para espessura de 4 milímetros e na zona dos furos 5 milímetros aplicando o critério *Tsai-Hill* indica que existe rotura mas como já foi demonstrado anteriormente pelo critério de *Hashin* não existe rotura para a estrutura com essa espessura.

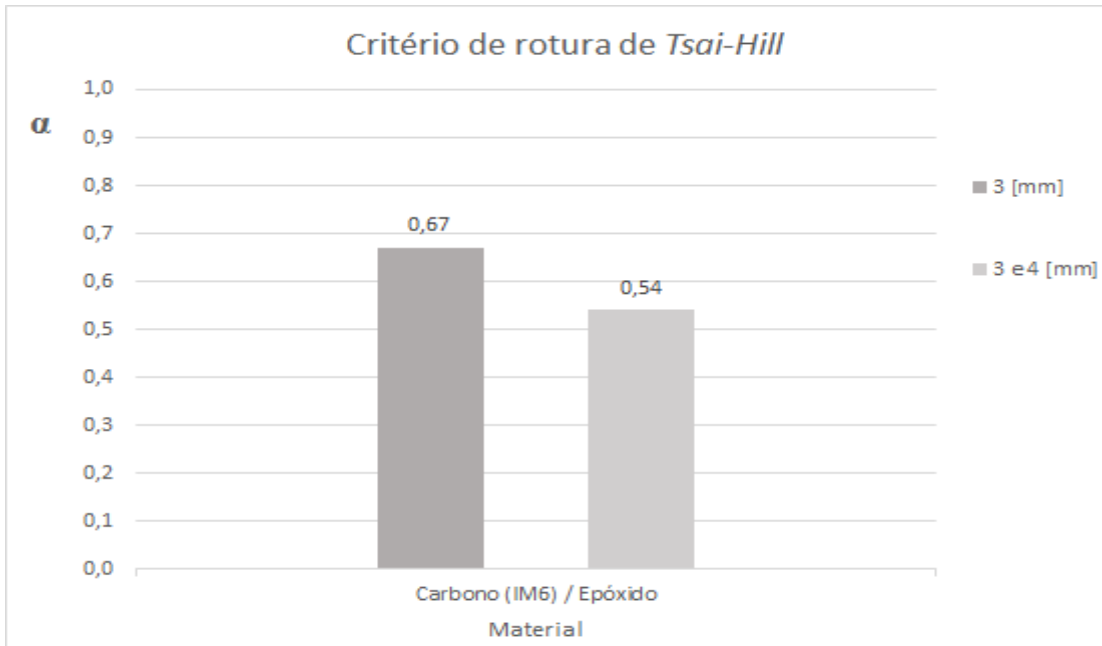


Gráfico 33. Resultados da aplicação do critério de rotura de *Tsai-Hill* para o modelo 2, com variação de espessura (carregamento provocado pela ac. em curva).

Através da análise do Gráfico 33 para uma espessura uniforme de 3 milímetros já se obtém um modelo resistente ao esforço imposto. Com o objetivo de melhorar a resistência do modelo à fadiga reforça-se a zona mais solicitado com mais um milímetro de espessura obtendo-se um maior coeficiente de segurança.

6.4 Modelo

Tendo em conta que os requisitos de projeto são a resistência, leveza e o baixo preço da estrutura, estes parâmetros vão ser analisados para cada modelo de modo a selecionar o modelo que satisfaça todos os requisitos de projeto. Este estudo é realizado tendo em consideração o material, a orientação e a espessura que apresentam melhores propriedades e que foram evidenciadas anteriormente.

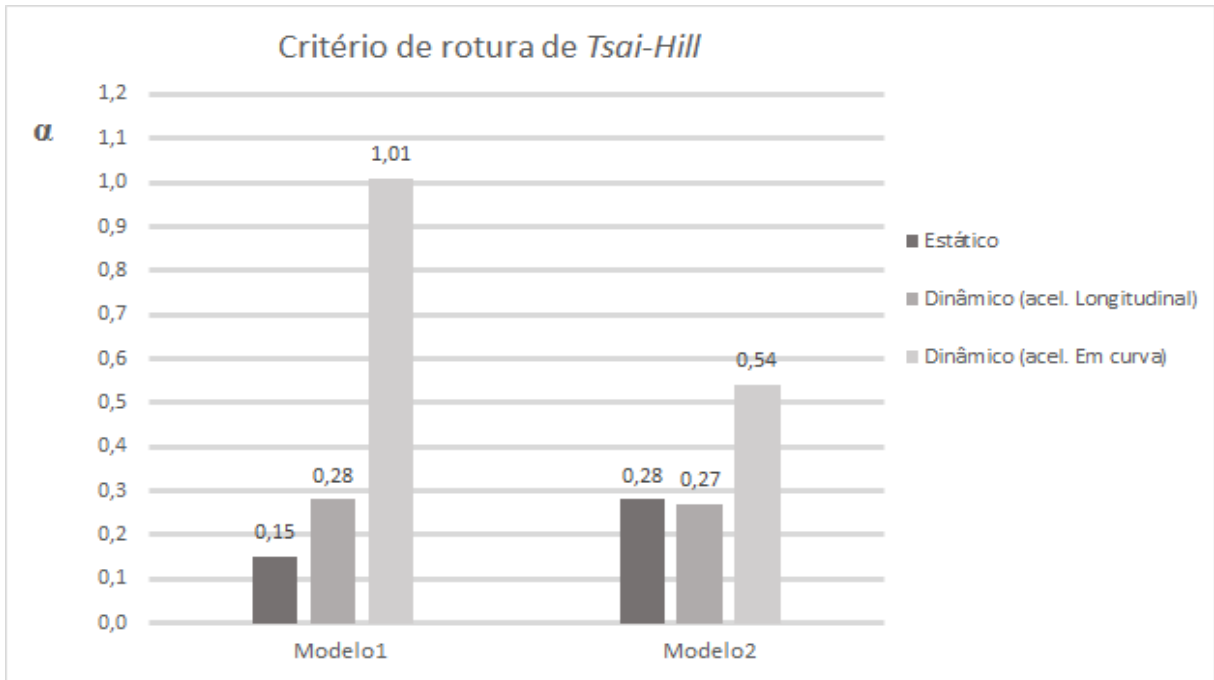


Gráfico 34. Resultados da aplicação do critério de rotura de *Tsai-Hill* para o modelo 1 (espessura 4 e 5 [mm]) e modelo 2 (3 e 4 [mm]) para as diferentes solicitações.

Através da análise do Gráfico 34, a nível estático o modelo 1 apresenta melhores resultados. Analisando a nível dinâmico o modelo 2 superioriza-se ao modelo 1, principalmente quando se analisa tendo em consideração a carga imposta pela aceleração em curva. Como um elemento estrutural é projetado para resistir a vários ciclos de esforço, o modelo 2 é o mais indicado a nível de resistência pois é o que tem maior coeficiente de segurança.

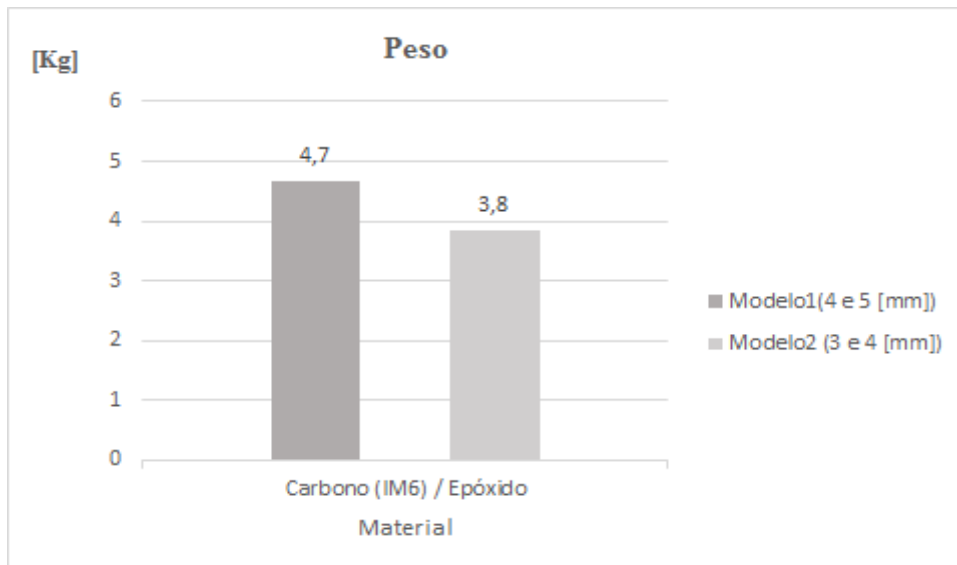


Gráfico 35. Resultados em relação ao peso modelo 1 e 2.

Dado que a concessão de uma estrutura leve é um dos principais requisitos, da análise do Gráfico 35 constata-se que o modelo 2 é o modelo mais leve, este facto deve-se à necessidade de uma espessura inferior deste modelo em comparação com o modelo 1.

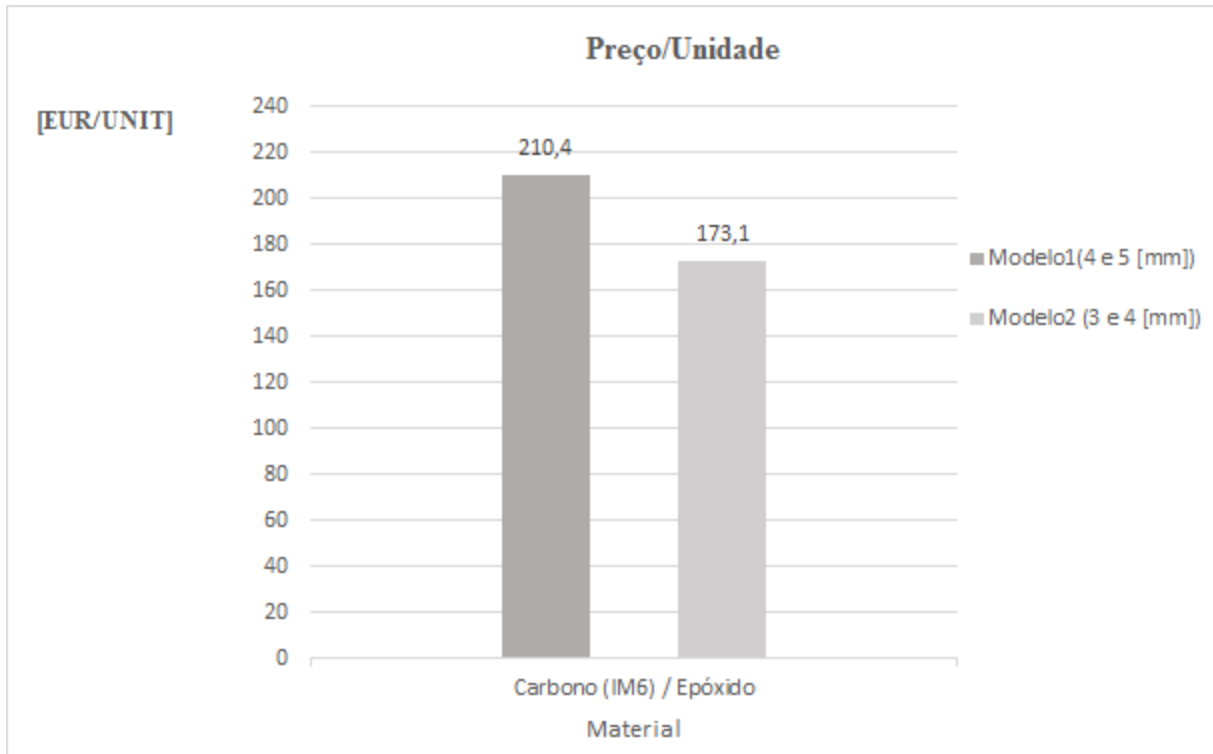


Gráfico 36. Preço/unidade para cada modelo.

A quantidade de matéria-prima é um parâmetro importante para a comercialização de qualquer produto. O modelo 2 é o que necessita de menos material para o seu fabrico e como tal é o que tem menor custo por modelo fabricado, como se pode constatar pela análise do Gráfico 36.

Também é importante mencionar que a nível qualitativo o modelo 2 é o que tem melhor qualidade, pois é um modelo com formas menos complexas.

6.5 Comparação das ligas metálicas com o carbono (IM6) epóxico

Para este estudo vai-se utilizar o material que apresenta melhores resultados, a orientação, a espessura e o modelo que se considera mais indicado para a produção da estrutura do banco.

Do exposto anteriormente, o modelo 2 com uma espessura de 3 milímetros e 4 milímetros na zona dos furos de fixação utilizando o material carbono (IM6)/Epóxico com a orientação das fibras da primeira camada a 0° e a seguinte a 90°, é o mais apropriada para de aplicação em estudo. Sendo este posteriormente objeto de estudo em relação a outros materiais mais baratos, nomeadamente as ligas de alumínio e magnésio.

6.5.1 Propriedades mecânicas

Este estudo é realizado para o carregamento mais prejudicial para a estrutura, nomeadamente o carregamento imposto pela aceleração em curva.

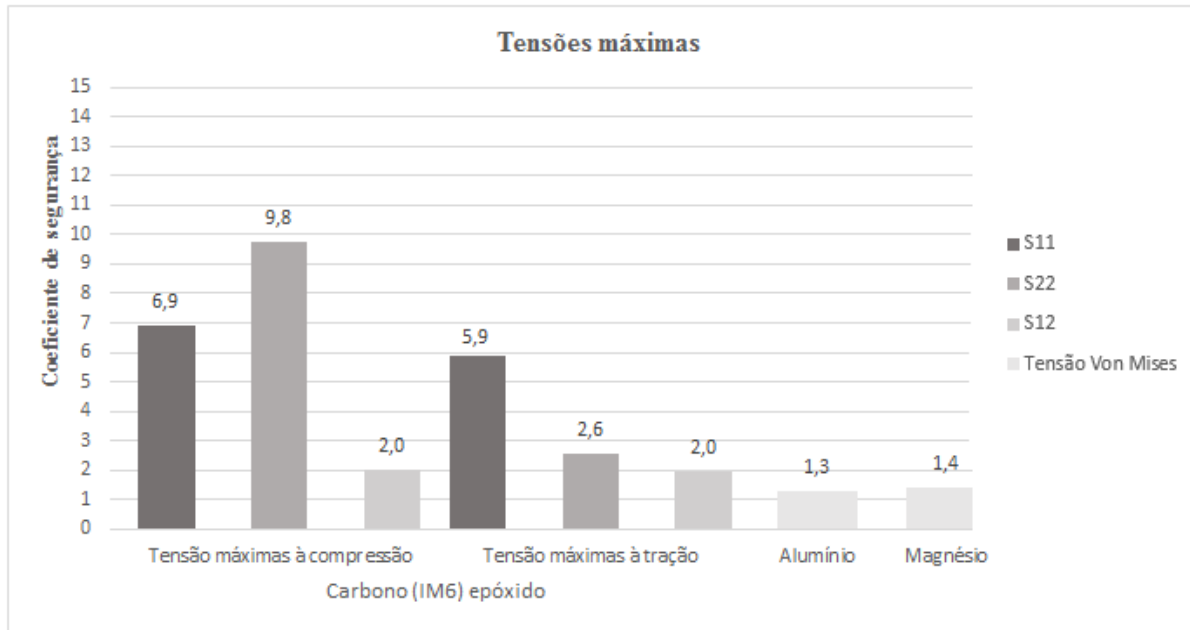


Gráfico 37. Coeficiente de segurança tensões máximas no ponto crítico à compressão/tração e tensão *Von Mises*.

Pela análise do Gráfico 37, o carbono (IM6)/epóxico apresenta maior coeficiente de segurança quando comparado com as ligas de alumínio e magnésio.

6.5.2 Propriedades físicas e preço

Tabela 72. Propriedades físicas e preço (Ces EduPack 2014).

Material	Densidade [Kg/m ³]	Preço [EUR/Kg]
Carbono (IM6) / Epóxico	1550	45
Alumínio	2700	1,67
Magnésio	1730	4,42

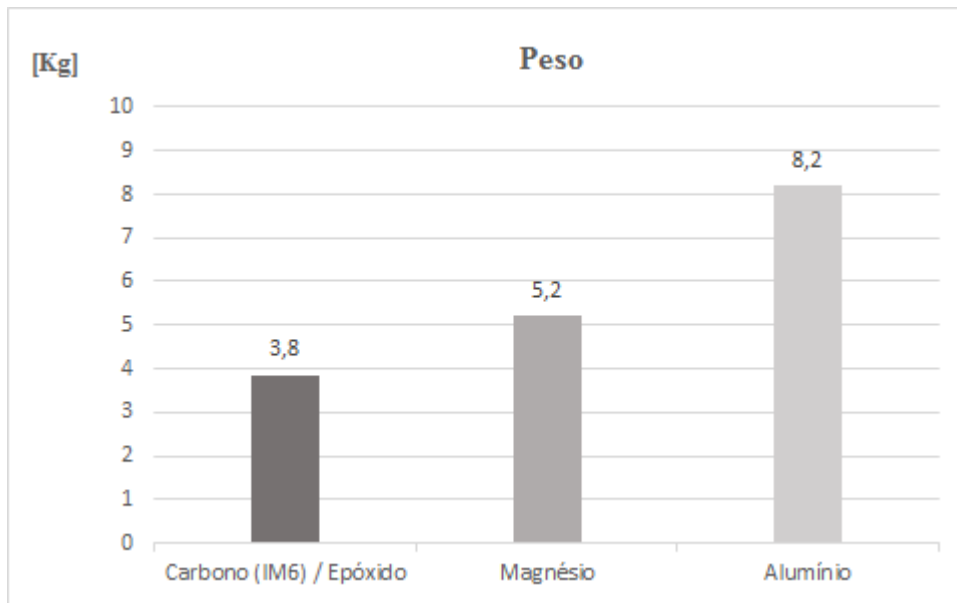


Gráfico 38. Peso do banco com diferentes materiais.

Sendo o peso da estrutura um dos requisitos mais importantes no dimensionamento da estrutura do banco, da análise do Gráfico 38 pode-se constatar que o carbono (IM6)/epóxico é o que tem menor peso, este facto deve-se à densidade inferior do material e à necessidade de uma espessura inferior do modelo em comparação com os outros materiais (modelo com carbono IM6/epóxico é de 3 milímetros e de 4 milímetros na zona dos furos de fixação enquanto que utilizando as ligas é necessário uma espessura de 5 milímetros).

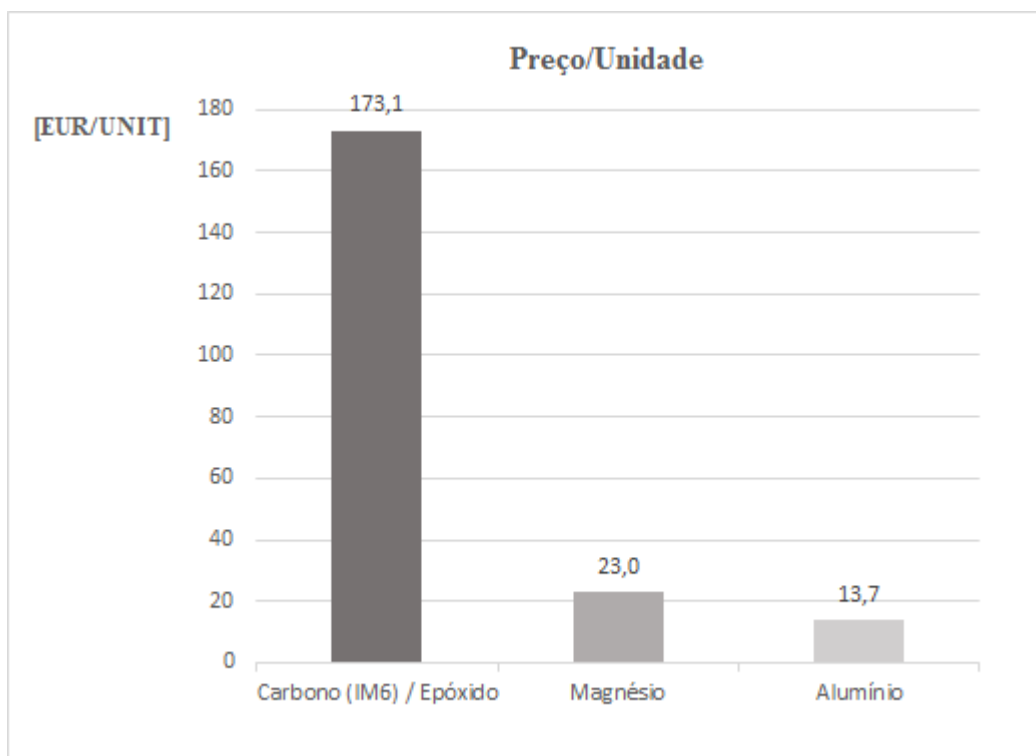


Gráfico 39. Preço por unidade considerando apenas o material.

Tendo em análise os custos de matéria-prima, as ligas mesmo precisando de uma maior espessura para suportar o carregamento imposto, e como tal necessitam de uma maior quantidade de material apresentam valores de custo muito inferiores em relação ao carbono (IM6)/epóxico.

Da análise do Gráfico 38 e Gráfico 39 analisando o peso e o custo de cada modelo, o magnésio é um material a ter em consideração, quando esta análise é focada apenas na matéria-prima. Mas muitas vezes sendo o material mais barato a sua aplicação torna-se mais dispendiosa por causa dos processos de fabrico. O material para uma dada aplicação não pode ser selecionado tendo como base apenas preço de matéria-prima, mas sim tendo em consideração o custo a toda a linha de produção. É de salientar que o magnésio a nível de processo de fabrico apresenta limitações a ter em consideração, nomeadamente necessitar de temperaturas elevadas (acima de 300 °C) para o deformar e são necessárias ferramentas aquecidas, tornando o processo dispendioso.

7 Conclusões e Trabalhos futuros

7.1 Conclusões

Este trabalho baseou-se no projeto de um banco para um automóvel desportivo em materiais compósitos tendo como objetivos obter uma estrutura leve, resistente e de baixo preço.

Nesta fase final do projeto é necessário refletir sobre todo o trabalho elaborado. Em relação ao *software abaqus*, apesar do inicial desconhecimento relativo a este programa, foi possível a obtenção das capacidades necessárias para o tratamento de um problema deste tipo. Apesar das dificuldades sentidas, considera-se que foram atingidos todos os objetivos propostos. São apresentados dois modelos, cada um com pelo menos uma solução admissível.

O uso do método dos elementos finitos torna possível, a aplicação de um sistema de forças em qualquer ponto e/ou direção, de onde se obtém resultados em relação aos deslocamentos e o grau de tensão provocado por essas cargas ao elemento, situação que analiticamente necessita de simplificações para se obter resultados aproximados.

De uma forma geral esta dissertação pode ajudar a ter uma perceção do processo iterativo que leva à escolha do material a usar numa estrutura e que características têm que ser analisadas numa estrutura para a escolha do material a usar ser a mais adequada possível. É perceptível que as características a escolher num material terão que ser as adequadas para corresponder às necessidades ou restrições impostas pela estrutura em causa. Algumas dessas necessidades e requisitos poderão ser desde as deformações e tensões a que a estrutura estará sujeita, o peso final que a estrutura poderá ter entre outros já referidos neste trabalho e que foram tomados em consideração na escolha dos materiais a serem usados para a construção da estrutura do banco.

Outro dos fatores mais importantes e muitas vezes o mais relevante é o fator económico, desde o custo das matérias-primas escolhidas até ao custo do processo de fabrico que irá dar forma ao projeto. Muitas vezes o principal objetivo neste âmbito, e em qualquer projeto de construção estrutural, é o de economizar em tudo que seja possível. Muitas vezes os materiais que cumprem os requisitos mínimos exigidos para aplicação na estrutura, ou partes dela, não será o mais económico mas mais importante que o fator económico num projeto estrutural é a fiabilidade que esse material pode fornecer ao projeto.

É imprescindível ainda referir que existe uma quase infinidade de materiais, os quais seriam possíveis de escolher para a execução deste trabalho, sendo que a análise de todos eles iria exigir um enorme consumo de tempo de dimensionamento.

Dos materiais compósitos utilizados o carbono (IM6)/Epóxico é o que tem maior resistência à rotura.

Foi possível perceber pelos resultados obtidos para o carregamento mais prejudicial, que é preferível a primeira camada do laminado ter a orientação 0° e a seguinte 90° e assim sucessivamente.

Dos modelos propostos o modelo 2 é o que apresenta melhores resultados a nível qualitativo, pois tem menor concentração de tensões, devido a sua geometria ser menos complexa. Analisando a nível quantitativo, no carregamento estático o modelo 1 tem maior resistência à rotura, mas para os carregamentos dinâmicos efetuados o modelo 2 apresenta melhores resultados em todas vertentes, ou seja, tem maior resistência à rotura e necessita de uma espessura inferior para suportar o carregamento imposto (o que possibilita que este modelo seja mais leve e necessite de menos matéria-prima para a sua construção).

É necessário referir que devido ao grande coeficiente de segurança obtido para o modelo proposto para construção (para além do coeficiente de segurança inicial utilizado referente à massa do indivíduo), podemos referir que ficamos com uma boa margem de segurança em relação à fadiga e até mesmo a impactos que possam ocorrer durante a sua utilização, o que traduz num resultado muito satisfatório.

Para a escolha do processo de fabrico a utilizar é necessário abordar alguns aspetos importantes, nomeadamente a taxa de produção, complexidade das formas, dimensões do componente e custos referentes a cada processo de fabrico. Tratando-se de um carro desportivo para comercializar em Portugal com uma meta de vendas estimada em 100 unidades/ano, sendo que o veículo tem 2 lugares serão necessários anualmente 200 bancos. O processo de fabrico mais indicado para este tipo de produção é a moldação por vácuo e autoclave. Esta escolha poderá proporcionar uma melhor qualidade de acabamento. Sendo que a moldação por vácuo é um processo usado na maioria das vezes em componentes de média e grande dimensão, será um processo adequado para a fabricação da estrutura do banco. O uso do Autoclave iria trazer benefícios evidentes ao acabamento das superfícies e às propriedades mecânicas da estrutura, o que não esconde as notórias desvantagens devido ao custo elevado que este processo acarreta.

A título de curiosidade, foram utilizadas as ligas de alumínio e magnésio com a finalidade de as avaliar a nível de resistência e comparar com os materiais compósitos. A nível de resistência o carbono/Epóxico tem coeficiente de segurança muito superior. Tendo como ponto de comparação as propriedades físicas, com este estudo foi possível perceber que a substituição da estrutura do banco em carbono (IM6)/Epóxico por alumínio tem como penalização um aumento de peso na ordem dos 54%. Em relação à substituição por magnésio vai haver um aumento do peso a rondar os 27%. Sendo a leveza e custo do componente parâmetros importantes, o magnésio é um material a ter em consideração em relação ao seu custo de matéria-prima, pois o preço do magnésio ronda os 4.42 EUR/Kg, o qual é muito inferior ao preço do carbono (IM6)/Epóxico que é de 45 EUR/Kg, proporcionando uma poupança em relação aos custos de matéria-prima na ordem dos 87%. É de salientar que o magnésio a nível de processo de fabrico apresenta limitações a ter em consideração, nomeadamente necessitar de temperaturas elevadas (acima de 300 °C) para o deformar e são necessárias ferramentas aquecidas, tornando o processo dispendioso. Portanto, somente a análise da relação custo benefício de toda a linha de produção permitirá a escolha do material mais adequado para a estrutura do banco.

Pode-se então concluir, primeiramente e admitindo uma precisão aceitável dos resultados obtidos, que o modelo mais indicado para produção é o modelo 2 utilizando o material carbono

(IM6)/Epóxico, com uma espessura de 3 milímetros e na zona dos furos de fixação que ligam ao suporte 4 milímetros. Por fim a orientação da primeira camada do laminado será a 0° e a seguinte a 90° pois é a que fornece melhores resultados.

7.2 Trabalhos futuros

Existem alguns aspetos de projeto que podem ser estudados futuramente, nomeadamente fazer um refinamento da malha localmente com o objetivo de obter um modelo sem elementos distorcidos. Em relação às simulações dinâmicas era interessante avaliar a estrutura sujeita a uma colisão frontal, lateral e traseira.

Seria interessante construir um protótipo e testá-lo de maneira a avaliar a veracidade dos resultados obtidos. Testar o modelo a cargas cíclicas a fim de avaliar a sua resistência à fadiga.

Tendo o modelo sido avaliado seria interessante construir um modelo à escala real que seria posto em funcionamento de forma a avaliar o comportamento do mesmo quando sujeito a solicitações decorrentes do uso quotidiano.

Referências bibliográficas

Abaqus/CAE 6.14-1.

Almeida, Pedro Miguel Vasques Eusébio da Costa. 2013. "FEUP BUS/CIVITAS", FEUP. Acedido a 28/9/2014. http://digitool.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=744063.

Alvino, Gerardo. 2012. "Innovative composite materials application in the design of seats and interior parts". M.A.Sc., University of Windsor (Canada). <http://search.proquest.com/docview/1176542875?accountid=43623>.

Azevedo, Mariana Adelaide Martins Moreira de. 2008. <<A>> *articulação de um banco de automóvel estudo da utilização de novos materiais*. Porto: [s. n.].

Berger, Libby. 2011. "Program Summary of the ACC Automotive Composites Underbody". Comunicação apresentada em Society of Plastics Engineers Automotive Composites Conference and Exhibition, Troy, MI.

Biron, Michel. 2014. "1 - Outline of the Actual Situation of Plastics Compared to Conventional Materials". Em *Thermosets and Composites (Second Edition)*, editado por Michel Biron, 1-24. Oxford: William Andrew Publishing. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455731244000018>.

Ces EduPack 14.3.5. Granta Design Limited, Cambridge.

Christensen, Richard M. 2005. *Mechanics of composite materials*. Dover Books on Engineering. Mineola, NY: Dover Publications.

Company, The Gary Stock, amp e Inc Porsche Cars North America. 2014. <http://press.porsche.com/news/release.php?id=787>.

Corbett, Tim, Mark Forrest, Haydn Law e B Fox. 2005. "Melding: A new alternative to adhesive bonding". *Quickstep Technologies Pty Ltd whitepaper*.

Corvette. 1953. Corpo do veículo em fibra de vidro. <http://www.corvetteactioncenter.com>.

Deyholos, Michael K. e Simon Potter. 2014. "Engineering bast fiber feedstocks for use in composite materials". *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* no. 3 (1):53-57. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818113001023>.

Durão, LMP, AG Magalhães, João Manuel RS Tavares e A Torres Marques. 2005. "Delamination analysis after carbon/epoxy plate drilling". *ENVC2005-Encontro Nacional de Visualização Científica 2005*.

Edwards, K. L. 2004. "Strategic substitution of new materials for old: Applications in automotive product development". *Materials & Design* no. 25 (6):529-533. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306904000032>.

F.C.Campbell. 2004. "Manufacturing Processes for Advanced Composites". *Elsevier Advanced Technology*.

Gay, Daniel e Suong Van Hoa. 2007. *Composite materials design and applications*. Vol. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press.

- Grujicic, M., B. Pandurangan, G. Arakere, W. C. Bell, T. He e X. Xie. 2009. "Seat-cushion and soft-tissue material modeling and a finite element investigation of the seating comfort for passenger-vehicle occupants". *Materials & Design* no. 30 (10):4273-4285. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909001770>.
- handbook, Department of defense. 1997. *Composite materials handbook*. Vol. Volume 3.
- Jacob, Amanda. 2010. "BMW counts on carbon fibre for its Megacity Vehicle". *Reinforced Plastics* no. 54 (5):38-41. Acedido a 2010/10//. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034361710701739>.
- Jambor, Arno e Matthias Beyer. 1997. "New cars — new materials". *Materials & Design* no. 18 (4-6):203-209. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306997000496>.
- Koronis, Georgios, Arlindo Silva e Mihail Fontul. 2013. "Green composites: A review of adequate materials for automotive applications". *Composites Part B: Engineering* no. 44 (1):120-127. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812004350>.
- Mangino, Enrico, Joe Carruthers e Giuseppe Pitarresi. 2007. "The future use of structural composite materials in the automotive industry". *International Journal of Vehicle Design*.
- Marques, António Torres. 2014. *Materiais compósitos: conceber e fabricar para durar*.
- Moura, Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de, Alfredo Manuel Balacó de Moraes e António Gonçalves de Magalhães. 2011. *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. Vol. 2ª ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas.
- Silva, Lucas Filipe Martins da. 2012. *Comportamento mecânico dos materiais*. Porto: Publindústria.
- Stewart, Richard. 2010. "Automotive composites offer lighter solutions". *Reinforced Plastics* no. 54 (2):22-28. Acedido a 2010/4//. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034361710700618>.
- Sullivan, Rogelio A. 2006. "Automotive carbon fiber: Opportunities and challenges". *JOM* no. 58 (11):77-79.
- Teixeira, Ana Rita Pinto. 2014. "Design of a Composite Chassis Car", Universidade do Porto.
- Tweeks, Demon. 2014. "Seats & Accessories". <http://www.demon-tweeks.co.uk/motorsport/seats>.
- Yang, Yongxiang, Rob Boom, Brijan Irion, Derk-Jan van Heerden, Pieter Kuiper e Hans de Wit. 2012. "Recycling of composite materials". *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* no. 51 (0):53-68. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270111002029>.

Anexo A: Simulação com outros materiais e espessuras diferentes

A.1 Resultados da simulação estática do modelo 1 utilizando outros materiais

A.1.1 Ligas de alumínio e magnésio

Tabela 73. Resultados do modelo 1 para as ligas de alumínio e magnésio (Abaqus/CAE 2014).

Material	Espessura [mm]	Deslocamento [mm]	Tensão máxima [MPa]	Tensão de cedência [MPa]
Alumínio	3	6,94	82,44	120
Magnésio	3	10,82	80,09	130

Como ponto de comparação dos materiais compósitos com os metálicos, foram utilizadas as ligas de alumínio e magnésio, pois trata-se de materiais igualmente leves. Da análise da Tabela 73, tendo em conta as tensões máximas e tensões limites de cada material, pode-se afirmar que utilizando estes materiais a estrutura não fraturará para o carregamento estático.

A.2 Resultados da simulação estática do modelo 1 utilizando espessuras diferentes

A.2.1 Espessura da estrutura de 2 mm

Os resultados apresentados de seguida são referentes ao material que apresenta melhor coeficiente de segurança (divisão das tensões limites de cada material com as tensões máximas) e à orientação que apresenta resultados mais satisfatórios.

Tabela 74. Resultados do modelo 1 utilizando espessura de 2 [mm] (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico	Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	2	223,3
			23,23

Como era de prever com a redução da espessura as tensões máximas aumentam.

Tabela 75. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	
S₁₁	-229,4	$\sigma_{uc1} = 1500$
	77,67	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-27,86	$\sigma_{uc2} = 246$
	6,471	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-27,9	$\tau_{u12} = 68$
	27,31	

A.2.2 Espessura da estrutura de 2 mm e na zona dos furos 3 mm

Nos resultados que se seguem utilizou-se 2 mm na estrutura e 3 mm no reforço das zonas mais solicitadas nomeadamente onde se vai aparafusar o banco ao suporte.

Tabela 76. Resultados do modelo 1 utilizando espessuras de 2 e 3 [mm] (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	2 e 3	136,5	21,36

Comparando com os resultados obtidos para a estrutura com uma espessura uniforme de 2 mm, a tensão máxima desceu consideravelmente.

Tabela 77. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	
S₁₁	-141,1	$\sigma_{uc1} = 1500$
	73,34	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-20,37	$\sigma_{uc2} = 246$
	5,604	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-19,31	$\tau_{u12} = 68$
	19	

A.2.3 Espessura da estrutura de 4 mm e na zona dos furos 5 mm

Tabela 78. Resultados do modelo 1 utilizando espessuras de 4 e 5 [mm] (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	4 e 5	66,56	4,665

Tabela 79. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	
S ₁₁	-65,76	$\sigma_{uc1} = 1500$
	30,80	$\sigma_{ut1} = 1500$
S ₂₂	-4,935	$\sigma_{uc2} = 246$
	1,47	$\sigma_{ut2} = 40$
S ₁₂	-9,483	$\tau_{u12} = 68$
	9,827	

A.3 Resultados da simulação estática do modelo 2 utilizando espessuras diferentes

A.3.1 Espessura da estrutura de 2 mm

Os resultados apresentados de seguida são referentes a simulações utilizando uma espessura de 2 mm na estrutura para um carregamento estático.

Tabela 80. Resultados do modelo 2 utilizando espessura de 2 mm (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	2	312	24,23

Tabela 81. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	
S₁₁	-319,7	$\sigma_{uc1} = 1500$
	123,7	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-38,55	$\sigma_{uc2} = 246$
	9,176	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-36,92	$\tau_{u12} = 68$
	36,72	

A.3.2 Espessura da estrutura de 2 mm e na zona dos furos 3 mm

Nos resultados que se seguem utilizou-se 2 mm na estrutura e 3 mm no reforço das zonas mais solicitadas nomeadamente onde se vai aparafusar o banco ao suporte.

Tabela 82. Resultados do modelo 2 utilizando espessuras de 2 e 3 [mm] (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	2 e 3	192,7	22,2

Em comparação com a tensão máxima obtida para a estrutura com uma espessura uniforme de 2 mm, reforçando a zona mais solicitada a tensão máxima diminui consideravelmente.

Tabela 83. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	
S₁₁	-199,5	$\sigma_{uc1} = 1500$
	95,59	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-28,25	$\sigma_{uc2} = 246$
	7,725	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-25,35	$\tau_{u12} = 68$
	25,22	

A.4 Resultados para o modelo 1 da simulação dinâmica do carregamento imposto pela aceleração longitudinal

Tabela 84. Resultados do modelo 1 utilizando espessuras de 4 e 5 [mm] (Abaqus/CAE 2014).

Carbono (IM6) / Epóxico		Espessura [mm]	Tensão máxima [MPa]	Deslocamento [mm]
Orientação [°]	0 / 90	4 e 5	127,3	9,094

Tabela 85. Tensões no ponto crítico Carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Orientação [°]	0 / 90	
S₁₁	-126	$\sigma_{uc1} = 1500$
	59,63	$\sigma_{ut1} = 1500$
S₂₂	-9,36	$\sigma_{uc2} = 246$
	2,872	$\sigma_{ut2} = 40$
S₁₂	-17,78	$\tau_{u12} = 68$
	18,38	

Anexo B: Figuras complementares dos resultados

Todos os resultados apresentados neste anexo são referentes ao modelo selecionado para a fabricação, ou seja, o modelo 2.

B.1 Simulação estática

B.1.1 Resultados utilizando espessura 3 e 4 mm

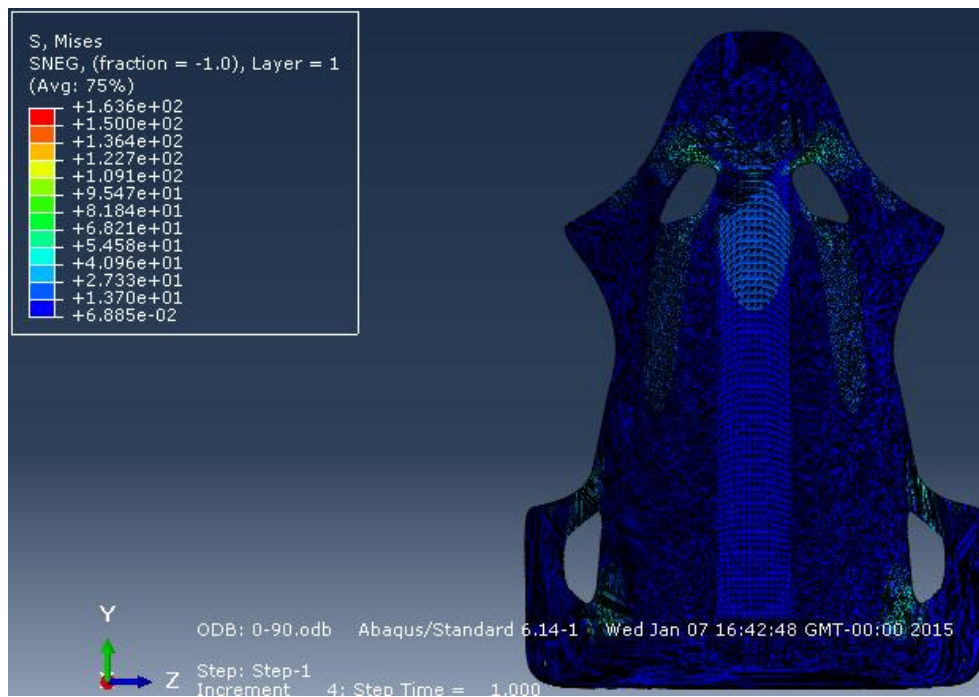


Figura 47. Tensão máxima para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

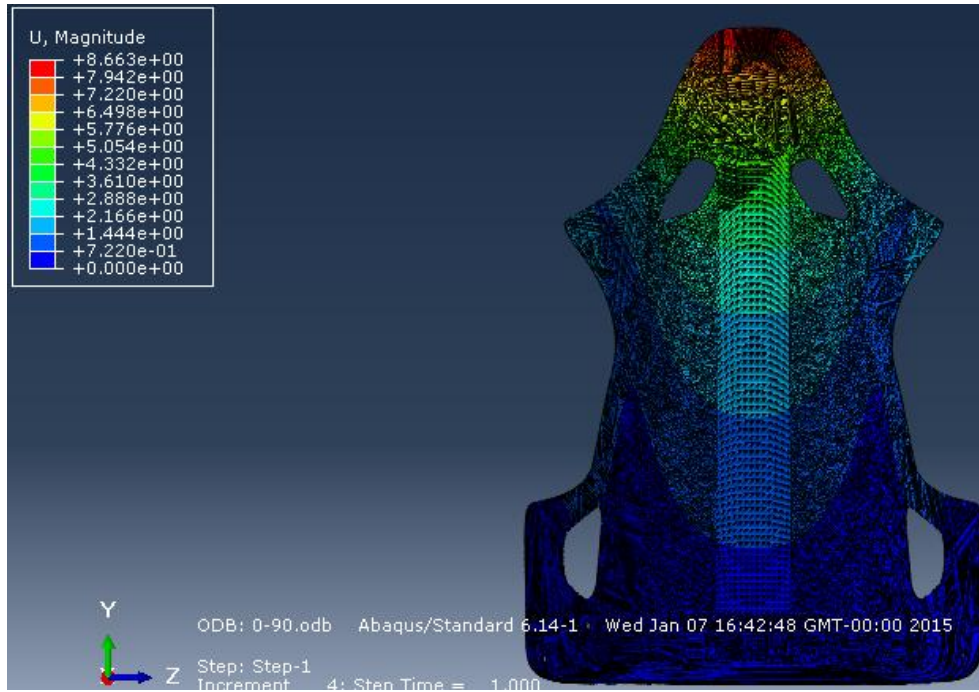


Figura 48. Deslocamento máximo para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

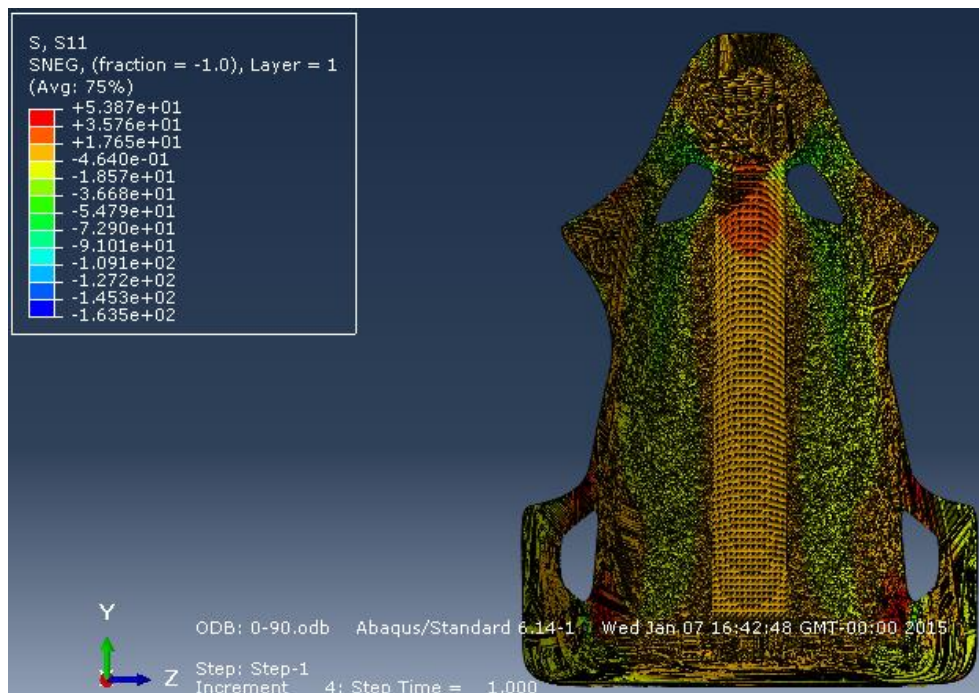


Figura 49. Tensão S_{11} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

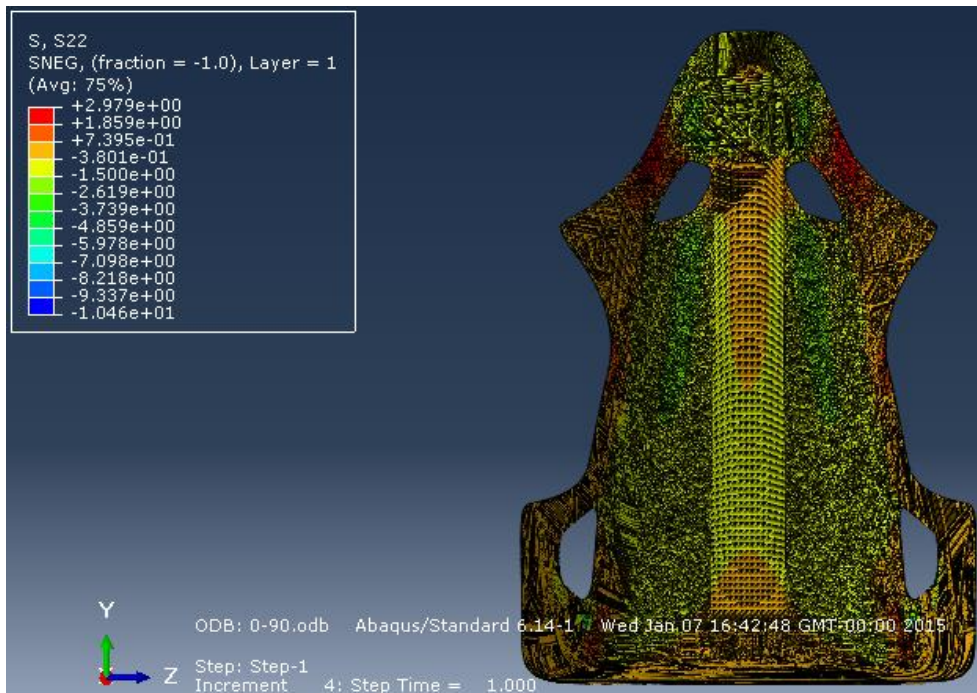


Figura 50. Tensão S_{22} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

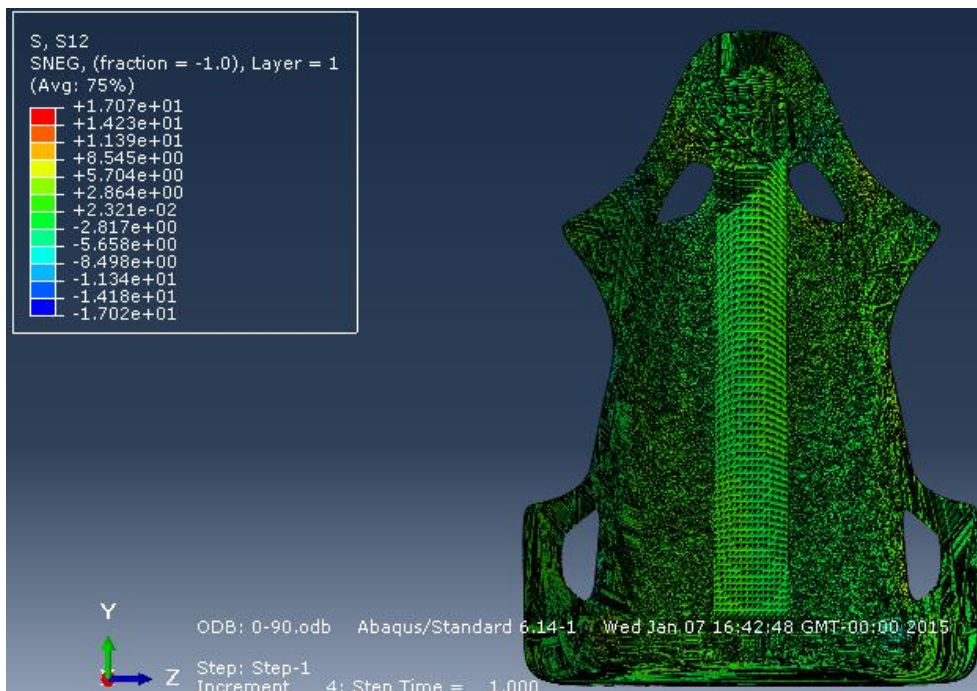


Figura 51. Tensão S_{12} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

B.2 Simulação dinâmica

B.2.1 Resultados utilizando espessura 3 e 4 mm para orientação 0 / 90 (aceleração longitudinal)

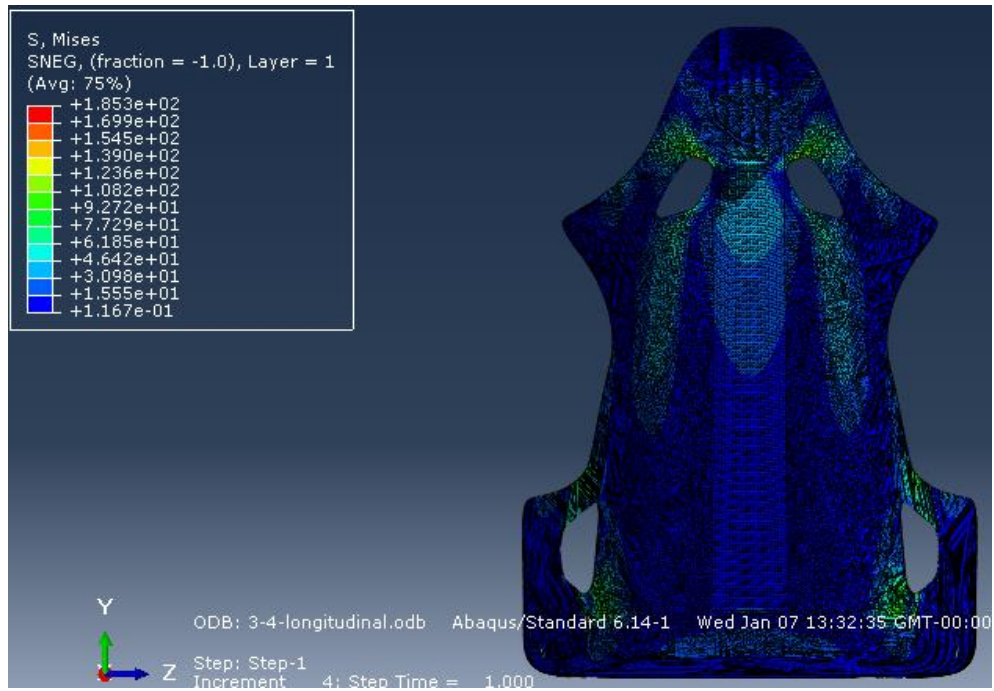


Figura 52. Tensão máxima para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

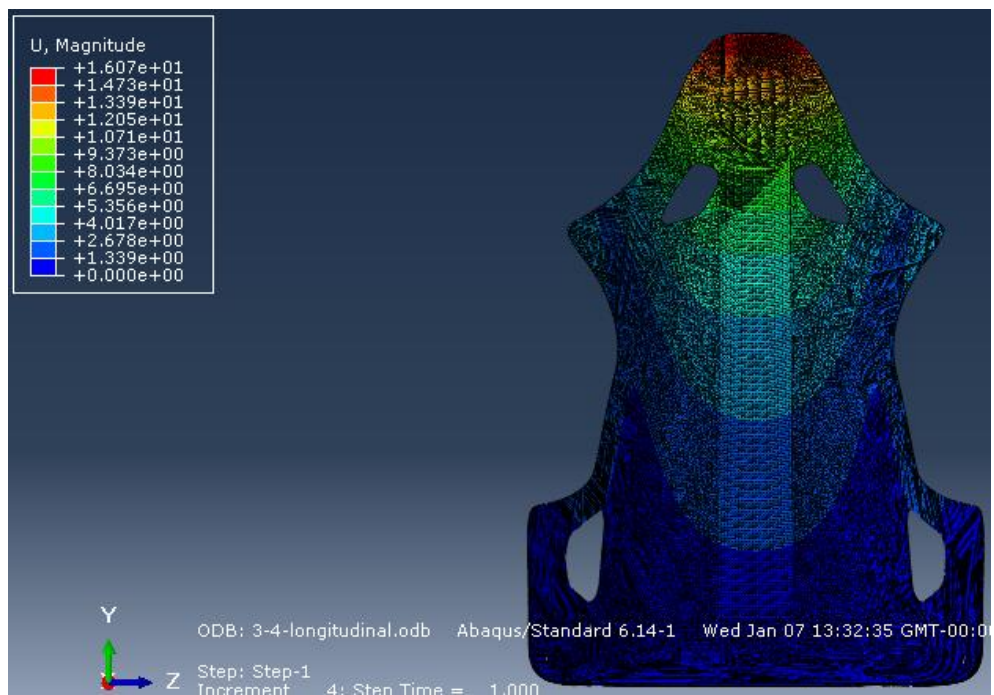


Figura 53. Deslocamento máximo para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014)

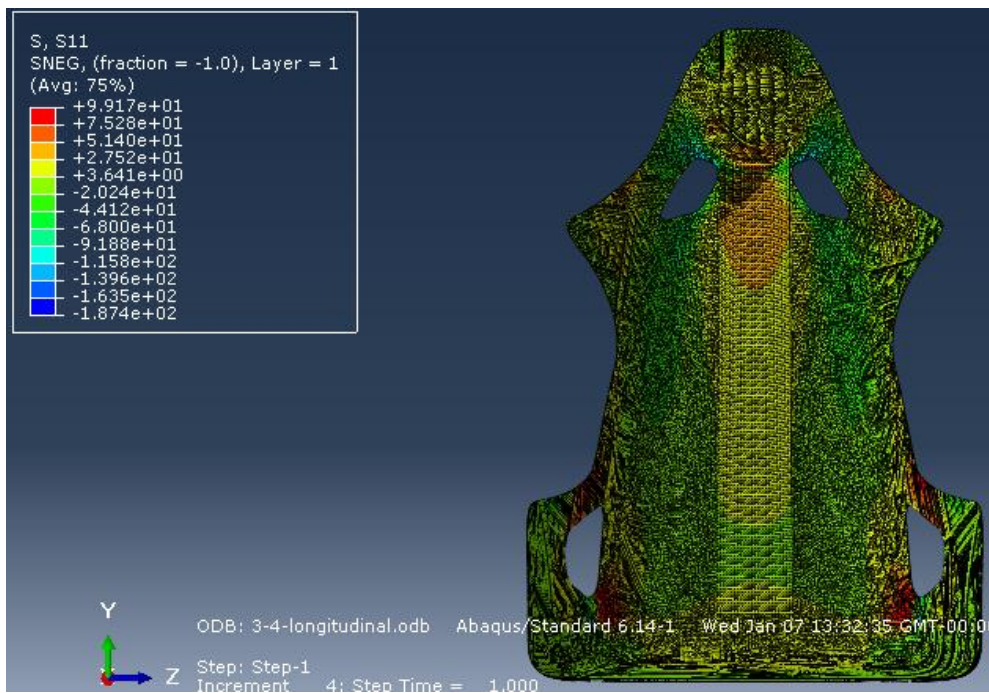


Figura 54. Tensão S_{11} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

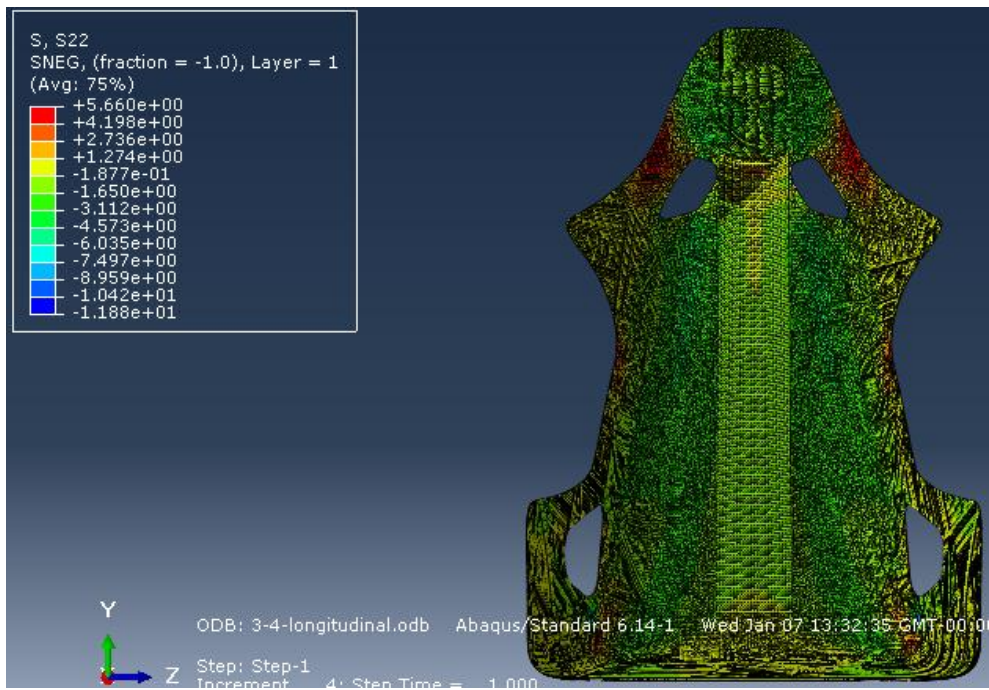


Figura 55. Tensão S_{22} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

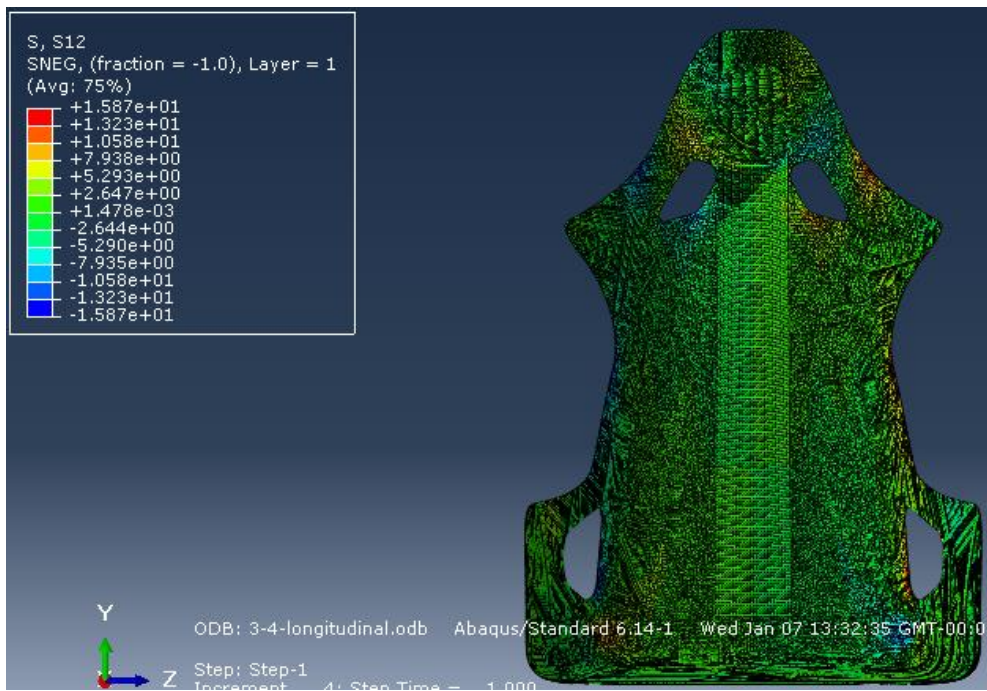


Figura 56. Tensão S_{12} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

B.2.2 Resultados utilizando espessura 3 e 4 mm para orientação 0/90 (aceleração em curva)

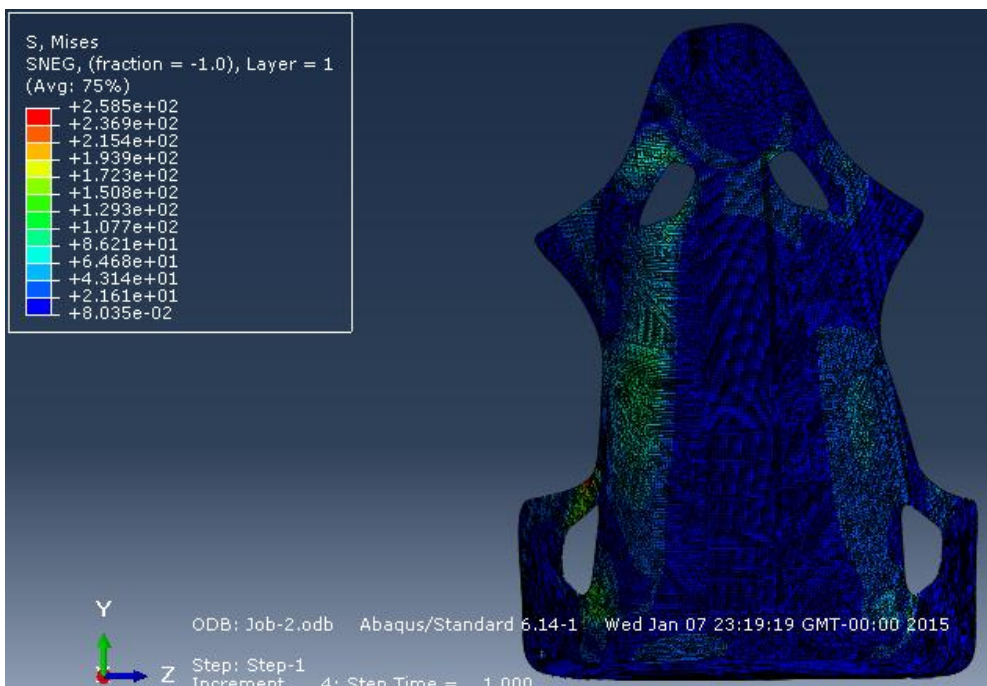


Figura 57. Tensão máxima para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014).

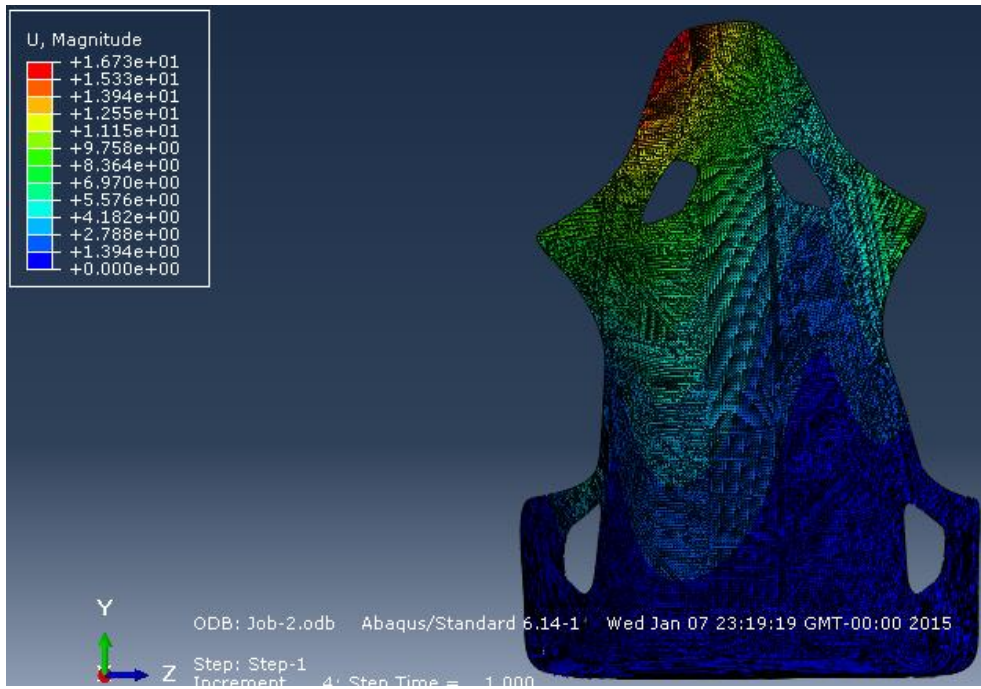


Figura 58. Deslocamento máximo para o carbono (IM6) / Epóxico (Abaqus/CAE 2014)

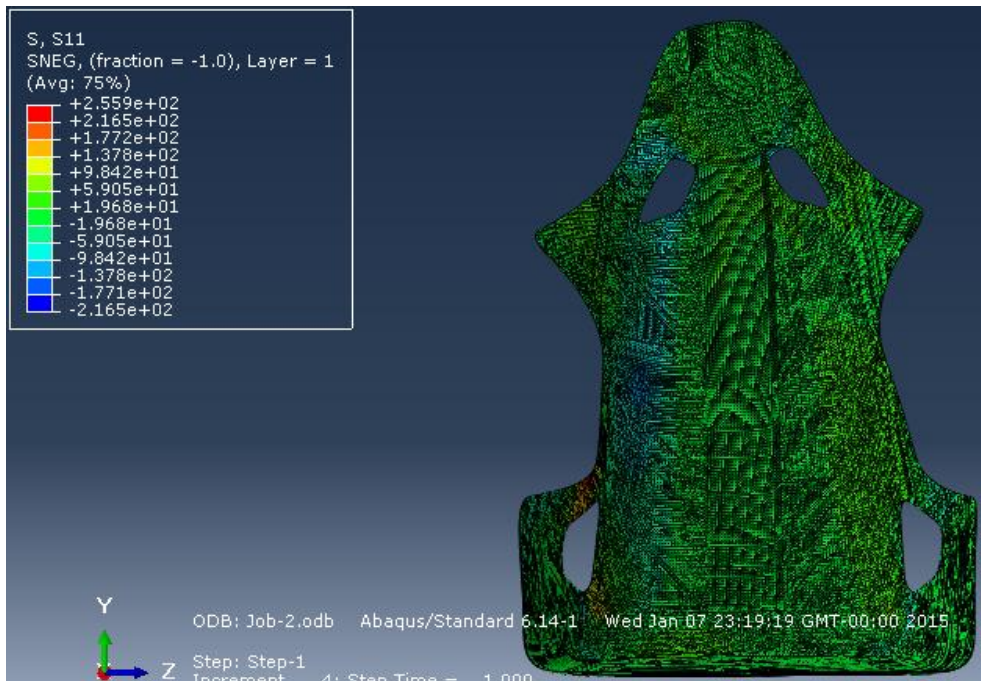


Figura 59. Tensão S_{11} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

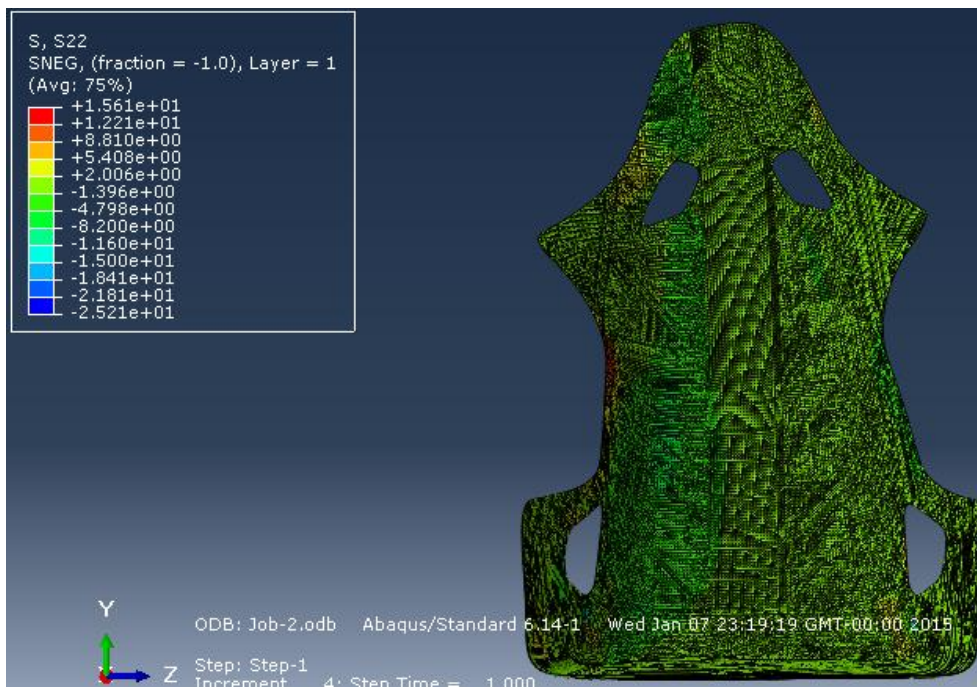


Figura 60. Tensão S_{22} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

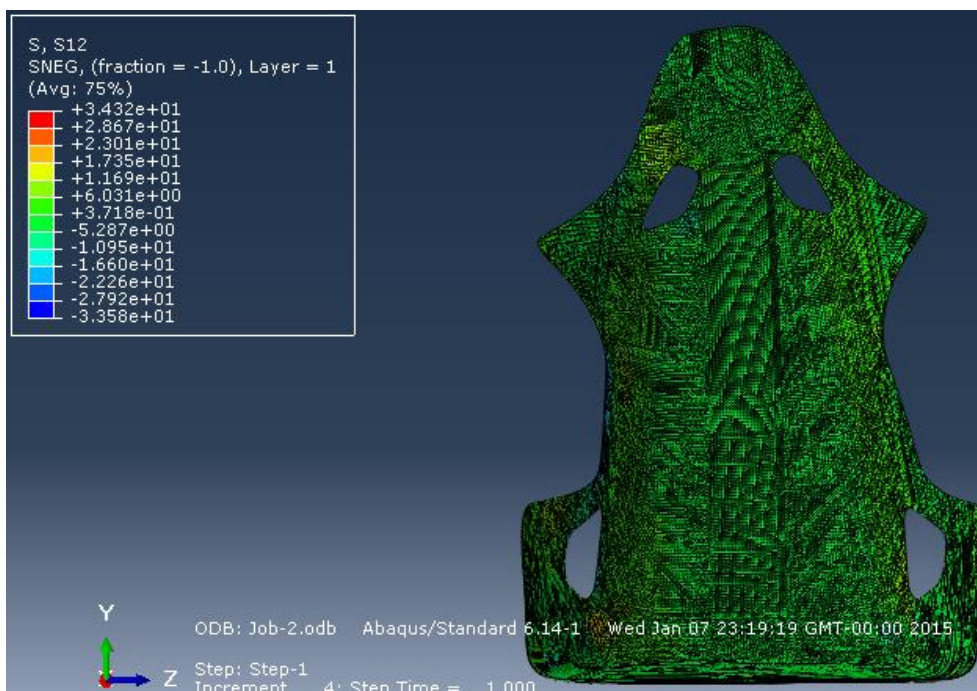


Figura 61. Tensão S_{12} no ponto crítico de fibra de carbono epóxico (Abaqus/CAE 2014).

Anexo C: Figuras complementares do critério de *Hashin*

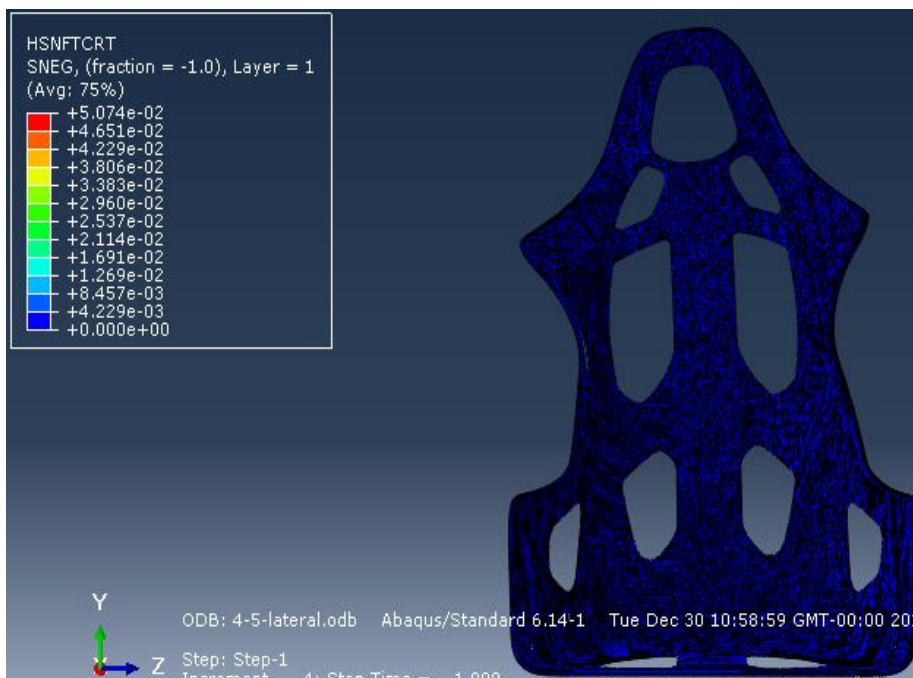


Figura 62. Critério de *Hashin*, fibra de carbono à tração (Abaqus/CAE 2014).

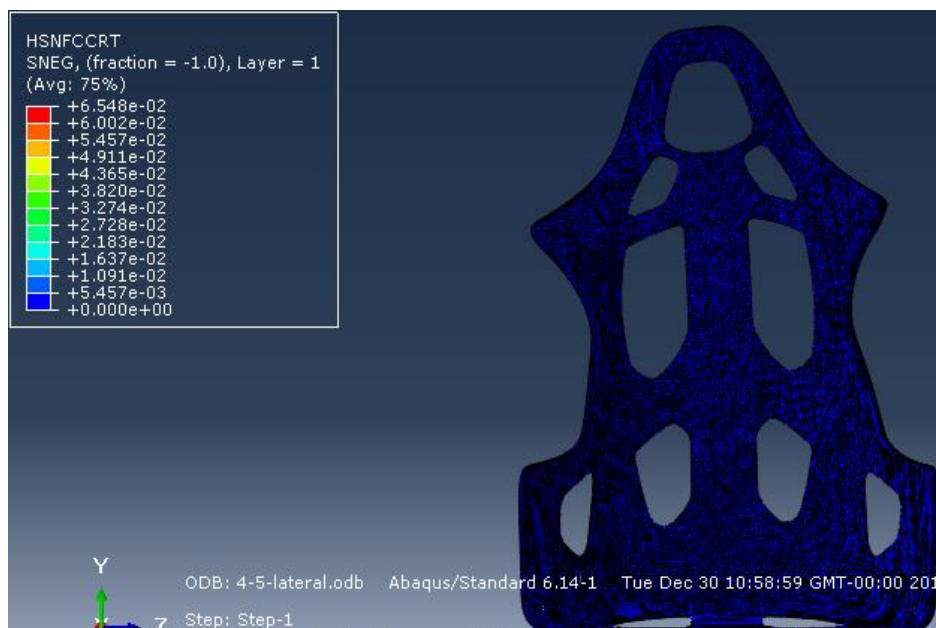


Figura 63. Critério de *Hashin*, fibra de carbono à compressão (Abaqus/CAE 2014)

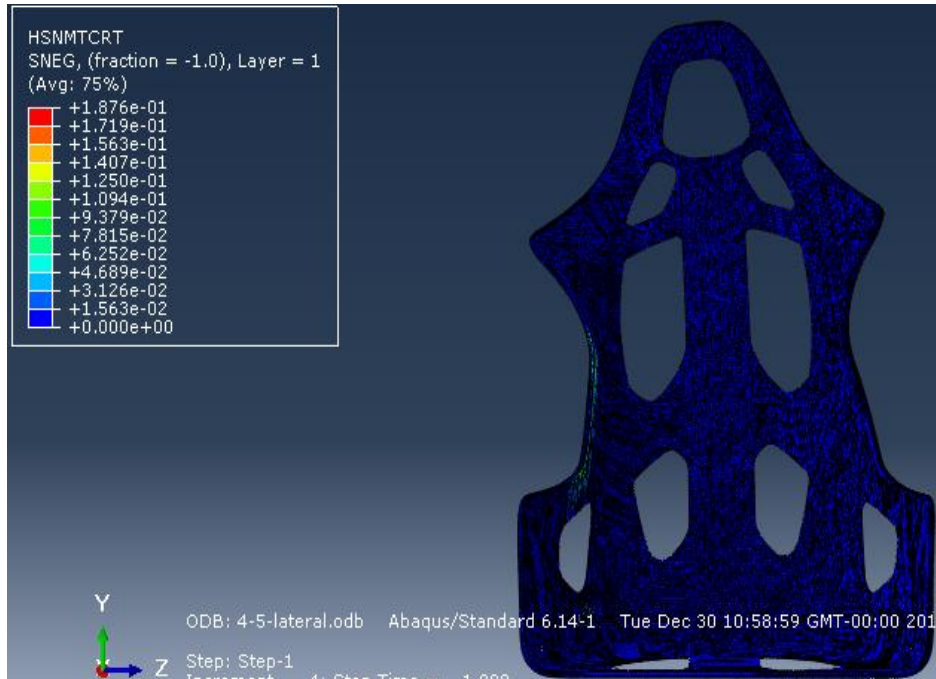


Figura 64. Critério de *Hashin*, matriz epóxico à tração (Abaqus/CAE 2014)

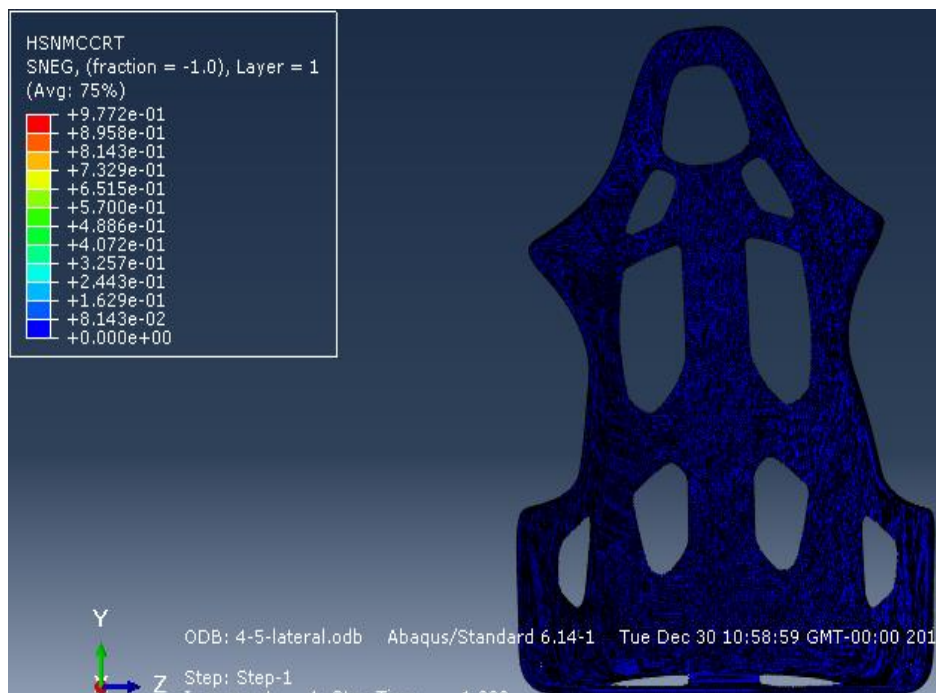


Figura 65. Critério de *Hashin*, matriz epóxico à compressão (Abaqus/CAE 2014).