

Projeto de fabrico de uma carenagem de um trenó de 2 lugares

(Versão final após defesa)

Manuel da Costa Matos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Mestrado Integrado)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Vieira Gamboa

Março de 2025

Declaração de integridade

Eu, Manuel da Costa Matos, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 43654 do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o Código de Integridades da Universidade da Beira Interior.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 26/03/2025

“Uma pessoa que nunca cometeu um erro, nunca tentou nada de novo”

Albert Einstein

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família: aos meus pais, Manuel e Marília por me terem proporcionado as melhores condições para a minha formação académica, pelo aconselhamento permanente e por toda a motivação que sempre me transmitiram principalmente nos momentos menos positivos que marcaram esta caminhada. Aos meus irmãos, Tomé e Mariana que sempre me incentivaram a fazer mais e melhor, assim como a perseguir os meus sonhos. Obrigado Família por todos os bons exemplos dados!

Ao meu orientador, Professor Pedro Gamboa por todo o cuidado e disponibilidade que sempre demonstrou para me ajudar e guiar no desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus amigos com quem tive o privilégio de partilhar casa na Covilhã, assim como às amigadas que criei nesta cidade e que partilharam comigo tanto momentos mais descontraídos assim como de maior stress, agradeço também, todos os bons conselhos dados durante o meu percurso académico.

A todos o meu muito obrigado!

Resumo

Esta dissertação teve como objetivos a conceção e o projeto de fabrico de uma carenagem de um trenó de *Bobsleigh*. Para o efeito anterior procedeu-se a: uma revisão bibliográfica dos processos de fabrico em compósito e de trabalhos relacionados com geometrias idênticas à da carenagem; estudo e aplicação de uma metodologia para a seleção do melhor processo de fabrico para a conceção da carenagem tendo em conta os constrangimentos e alternativas identificados/as; análise estrutural da carenagem com base no novo empilhamento obtido, de forma a garantir um bom funcionamento do trenó e por fim descrever o procedimento de fabrico da carenagem de modo a possibilitar a utilização do mesmo pelas empresas parceiras do projeto.

Tendo em conta a análise do estado da arte bem como a aplicação da metodologia AHP, foi possível concluir que a forma mais indicada de fabricar a carenagem do trenó seria através de um processo de laminação manual com a utilização de um molde bipartido em MDF, sendo esta forma de fabrico a que obteve uma figura de mérito superior.

Com base no processo de fabrico escolhido, foi feita uma análise estrutural para determinar a sequência de laminados necessária e que cumpra as restrições adotadas no que toca ao fator de segurança mínimo e de deformação máxima permitida, resultantes de três tipos de carregamento: impacto, inércia e fase inicial de corrida. Foi verificado que a condição mais crítica de carregamento é o impacto resultante do contacto das paredes da pista com os *bumpers*, o que motivou o reforço destes últimos.

Partindo da definição do empilhamento dos laminados, assim como as localizações respetivas, este trabalho descreve o procedimento que se inicia com a modelação e construção dos moldes necessários ao processo, seguindo-se os processos de empilhamento dos tecidos e núcleo, desmolde, união das metades, com utilização de novo processo de laminação manual, e por fim tratou-se das aberturas e furos. Este trabalho finaliza com a contabilização dos materiais base necessários ao fabrico da carenagem.

Palavras-chave

Bobsleigh, Carenagem, Fabrico, Processo hierárquico analítico, Compósitos, Laminação manual, Molde aberto, Análise de elementos finitos, Laminados.

Abstract

This dissertation had the following main objectives: a literature review on composite manufacturing processes and works related to geometries similar to the cowling; the study and application of a methodology that, given the constraints and possible alternatives, would allow the selection of the best manufacturing process for the design of the cowling; the structural analysis of the cowling based on the new stacking obtained, in order to ensure the proper functioning of the sled; and finally, to describe the manufacturing procedure of the cowling in order to enable its use by the project partner companies.

It was concluded, based on the state of the art as well as through the AHP methodology, that the most appropriate way to manufacture the sled cowling would be through the Wet Lay-Up process using a split mold made of MDF, with this manufacturing method achieving the highest figure of merit.

Based on the chosen manufacturing process, a structural analysis was performed to determine the necessary laminate sequence that would meet the adopted constraints regarding the minimum safety factor and maximum allowable deformation, resulting from three types of loads: impact, inertia, and initial racing phase. It was found that the most critical loading condition is the impact resulting from the contact between the track walls and the bumpers, which are specially reinforced.

With the stacking fully defined and the respective locations determined, the procedure was described, starting with the modeling and construction of the molds required for the process, followed by the lamination of fabrics and core, demolding, joining the halves, again using the Wet Lay-Up process, and finally addressing the openings and holes. The procedure concludes with the accounting of the base materials necessary for the manufacturing of the cowling.

Keywords

Bobsleigh, Cowling, Manufacturing, Analytic hierarchy process, Composites, Hand Lay-Up, Open mould, Finite element analysis, Laminates.

Índice

Declaração de integridade.....	iii
Agradecimentos	vii
Resumo.....	ix
Abstract	xi
Índice.....	xiii
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas	xix
Lista de Abreviaturas.....	xxi
Nomenclatura	xxiii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura do trabalho.....	4
2 Desporto <i>Bobsleigh</i>	7
2.1 História	7
2.1.1 <i>Bobsleigh</i> em Portugal.....	8
2.2 Aspetos gerais sobre a pista	9
2.2.1 Forças envolvidas.....	11
2.3 O trenó	13
2.4 Regulamentação	14
3 Estado da arte dos processos de fabrico em compósito	17
3.1 Materiais	18
3.2 Processos de fabrico	21
3.2.1 Prepreg Lay-Up	22
3.2.2 Wet Lay-Up	24
3.2.3 Moldação por projeção	27
3.2.4 Enrolamento filamentar	29
3.2.5 Pultrusão	31
3.2.6 Moldação por transferência de resina	33
3.2.7 Infusão.....	35
3.2.8 Processos de injeção e compressão de compósitos	37
3.3 Trabalhos relacionados	39
3.3.1 Exemplo 1	39
3.3.2 Exemplo 2.....	42
3.3.3 Exemplo 3.....	44
3.3.4 Exemplo 4.....	45

4	Comparação dos processos/técnicas de fabrico.....	49
4.1	Metodologia AHP.....	50
4.1.1	Critérios utilizados na metodologia AHP.....	55
4.1.1.1	Características da produção.....	56
4.1.1.2	Considerações de custo.....	56
4.1.1.3	Disponibilidade de equipamentos/recursos humanos.....	57
4.1.1.4	Geometria da carenagem.....	57
4.1.1.5	Facilidade de execução.....	57
4.1.2	Alternativas possíveis para avaliação.....	57
4.1.3	Função de mérito.....	60
5	Estrutura da carenagem do trenó.....	71
5.1	Geometria da carenagem.....	71
5.1.1	Parte frontal.....	72
5.1.2	Parte traseira.....	73
5.2	Materiais.....	74
5.3	Aspetos importantes na simulação computacional.....	75
5.3.1	ACP.....	76
5.3.2	Malha.....	76
5.3.3	Análise estática.....	77
5.3.3.1	Carregamento de inércia.....	78
5.3.3.2	Carregamento na fase inicial da corrida.....	79
5.3.3.3	Carregamento de impacto.....	79
5.3.4	Resultados e estudo de convergência de malha.....	80
5.3.5	Empilhamento obtido.....	88
6	Planeamento do procedimento de fabrico.....	91
6.1	Projeto dos moldes.....	91
6.2	Construção dos laminados da fuselagem.....	94
6.3	Aberturas, furos e uniões.....	95
6.4	Estrutura interna.....	96
6.5	Contabilização dos materiais base necessários.....	99
7	Conclusões e trabalhos futuros.....	103
7.1	Conclusões.....	103
7.2	Propostas para trabalhos futuros.....	105
	Referências bibliográficas.....	107
	Anexo A- Figura de mérito de todas as combinações para o procedimento de fabrico da carenagem.	113

Lista de Figuras

Figura 1.1: Duas formas para definir fabrico: a) como processo tecnológico e b) como processo económico adaptado de [3].....	1
Figura 2.1: Categorias de competição da modalidade <i>Bobsleigh</i>	7
Figura 2.2: Início de corrida em St. Moritz.....	8
Figura 2.3: Equipa portuguesa de <i>Bobsleigh</i> nos Jogos Olímpicos em Calgary, em 1988.....	9
Figura 2.4: Pista dos Jogos Olímpicos de Inverno Pequim 2022 [21].....	10
Figura 2.5: Fase inicial da corrida [22].	11
Figura 2.6: Representação das forças envolvidas numa curva da corrida [12].....	12
Figura 2.7: Representação da força de impacto das paredes.	12
Figura 2.8: Representação das forças aplicadas pela tripulação no trenó na fase inicial da corrida. 12	
Figura 2.9: Sessão de treino da equipa sul coreana, adaptado de [23].....	13
Figura 2.10: Chassis típico de um trenó, adaptado de [12].	13
Figura 3.1: Processos de fabrico em compósito.	18
Figura 3.2: Comparação do módulo elástico e resistência à flexão para cada combinação de CNT's na resina [26].....	19
Figura 3.3: Comparação das curvas tensão-deformação para o laminado com e sem CNT's [26]. ...	20
Figura 3.4: Comparação do número de ciclos até à falha de um material compósito de CFRP inalterado e com nanopartículas adicionadas [28].	21
Figura 3.5: Configuração de uma autoclave [30].....	22
Figura 3.6: Estrutura de apoio ao molde fêmea.....	25
Figura 3.7: Esquema geral do processo de Wet Lay-Up [34].....	25
Figura 3.8: Esquema geral da moldação por projeção [35].	27
Figura 3.9: Esquema geral do processo de enrolamento filamentar [36].	29
Figura 3.10: Esquema geral do processo de pultrusão [38].	31
Figura 3.11: Esquema geral do processo RTM [39].	34
Figura 3.12: Esquema geral dos processos de infusão:(a) VARTM, (b) SCRIMP adaptado de [41]. .	35
Figura 3.13: Esquema geral processo de fabrico de compressão de compósitos [32].	38
Figura 3.14: Esquema geral do processo de injeção de compósitos de matriz termoendurecível [32].	38
Figura 3.15: Modelo de discretização em secções para posterior corte a fio quente [42].....	40
Figura 3.16: Modelo/molde macho superior [42].	41
Figura 3.17: Saco de vácuo aplicado ao molde [42].	41
Figura 3.18: Molde macho em maquinaria [29].	42
Figura 3.19: Metades dos moldes fêmea [29].	43
Figura 3.20: Fases da construção do monocoque de um automóvel, adaptado de [29].	43
Figura 3.21: Parte inferior do molde em MDF [43].	45
Figura 3.22: Molde macho [44].	45

Figura 3.23: Molde fêmea inferior [44].	46
Figura 3.24: Primeira camada de Prepreg sobre o molde [44].	47
Figura 3.25: Colagem da parte superior à inferior [44].	47
Figura 4.1: Hierarquia de três níveis adaptado de [47].	50
Figura 4.2: Fluxograma associado à metodologia AHP.	55
Figura 5.1: Modelo aerodinâmico sólido preliminar.	71
Figura 5.2: Modelo geométrico adaptado para análise estrutural.	72
Figura 5.3: Parte frontal da carenagem do trenó.	72
Figura 5.4: Parte traseira da carenagem do trenó.	73
Figura 5.5: Detalhes da vista de baixo da parte traseira da carenagem do trenó.	74
Figura 5.6: Condições de fronteira aplicadas na parte da frente da carenagem no caso do carregamento de inércia.	78
Figura 5.7: Condições de fronteira aplicadas na traseira da carenagem no caso do carregamento de inércia.	78
Figura 5.8: Condições de fronteira aplicadas na parte traseira da carenagem no caso do carregamento na fase inicial da corrida.	79
Figura 5.9: Condições de fronteira aplicadas na parte frontal da carenagem no caso do carregamento de impacto.	80
Figura 5.10: Condições de fronteira aplicadas na parte traseira da carenagem no caso do carregamento de impacto.	80
Figura 5.11: Distribuição de deformação total na parte traseira da carenagem sujeita ao carregamento de inércia.	81
Figura 5.12: Distribuição do fator de segurança na parte traseira sujeita ao carregamento de inércia.	81
Figura 5.13: Distribuição de deformação total na parte frontal da carenagem sujeita ao carregamento de inércia.	82
Figura 5.14: Distribuição do fator de segurança na parte frontal da carenagem sujeita ao carregamento de inércia.	82
Figura 5.15: Distribuição da deformação total na parte traseira da carenagem sujeita ao carregamento da fase inicial da corrida.	83
Figura 5.16: Distribuição do fator de segurança na parte traseira sujeita ao carregamento da fase inicial da corrida.	84
Figura 5.17: Distribuição de deformação total na parte frontal da carenagem sujeita ao carregamento de impacto.	84
Figura 5.18: Distribuição do fator de segurança na parte frontal da carenagem sujeita ao carregamento de impacto.	85
Figura 5.19: Distribuição de deformação total da parte traseira da carenagem sujeita ao carregamento de impacto.	85

Figura 5.20: Distribuição do fator de segurança na parte traseira da carenagem sujeita ao carregamento de impacto.	86
Figura 5.21: Estudo de convergência de malha da parte frontal da carenagem.....	86
Figura 5.22: Estudo de convergência de malha da parte traseira da carenagem.....	87
Figura 5.23: Empilhamento resultante na parte frontal da carenagem.	88
Figura 5.24: Empilhamento resultante na parte traseira da carenagem.....	89
Figura 6.1: Metade esquerda do molde.	92
Figura 6.2: Metade direita do molde.	92
Figura 6.3: Molde da parte destacável do <i>bumper</i>	93
Figura 6.4: Representação esquemática da junta de união das metades da carenagem.	95
Figura 6.5: Interface longarina-fuselagem.....	96
Figura 6.6: Parte frontal da carenagem onde se encontram os pontos de união à capota.	97
Figura 6.7: Capota da parte frontal da carenagem.	97
Figura 6.8: Ligação entre a raiz e a ponta do <i>bumper</i>	98
Figura 6.9: Detalhe da interface da ponta do <i>bumper</i>	98
Figura 6.10: Pino e porca impresso em ABS.	99

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Escala de importância de relação entre pares de critérios.	51
Tabela 4.2: Índice de consistência médio aleatório [47].	54
Tabela 4.3: Lista de alternativas para o procedimento de fabrico.	59
Tabela 4.4: Identificação das variáveis intervenientes na função de mérito.....	60
Tabela 4.5: Tabela de comparação de critérios.	61
Tabela 4.6: Tabela de comparação relativa ao critério de características da produção.....	61
Tabela 4.7: Tabela de comparação relativa ao critério de custo.....	62
Tabela 4.8: Tabela de comparação relativa ao critério geometria do design.	62
Tabela 4.9: Justificações sobre o subcritério tempo de produção.	65
Tabela 4.10: Justificações sobre o subcritério quantidade produzida.	65
Tabela 4.11: Justificações sobre o subcritério custo dos moldes e acessórios.....	66
Tabela 4.12: Justificações sobre o subcritério custo dos equipamentos.....	66
Tabela 4.13: Justificações sobre o subcritério custo da mão de obra.	66
Tabela 4.14: Justificações sobre o critério disponibilidade de equipamentos.	67
Tabela 4.15: Justificações sobre o critério facilidade de execução.....	67
Tabela 4.16: Justificações sobre o subcritério tolerâncias e acabamentos.....	67
Tabela 4.17: Justificações sobre o subcritério complexidade/adaptabilidade do design à solução...	67
Tabela 4.18: Justificações sobre o subcritério peso.	68
Tabela 4.19: Tabela secundária de avaliação.....	69
Tabela 4.20: Classificação dos cinco processos com melhor avaliação.	70
Tabela 5.1: Propriedades mecânicas da fibra M35J obtidas por laminação manual adaptado de [2].	75
Tabela 5.2: Propriedades mecânicas do núcleo em favo de abelha de aramida adaptado de [2].	75
Tabela 5.3: Características do computador utilizado.	76
Tabela 5.4: Valores médios dos parâmetros de qualidade da malha da parte traseira da carenagem.	87
Tabela 5.5: Valores médios dos parâmetros de qualidade da malha da parte frontal da carenagem.	87
Tabela 5.6: Resumo do empilhamento da parte frontal da carenagem.....	88
Tabela 5.7: Resumo do empilhamento da parte traseira da carenagem.....	89
Tabela 6.1: Volume de MDF necessário para o fabrico dos moldes.....	99
Tabela 6.2: Contabilização da área necessária de tecido para a parte frontal da carenagem.	100
Tabela 6.3: Contabilização da área necessária de tecido para a parte traseira da carenagem.	100
Tabela 6.4: Contabilização da área necessária de material do núcleo.....	100

Lista de Abreviaturas

ABS	- <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
ACP	- <i>Ansys Composite PrePost</i>
AHP	- <i>Analytic Hierarchy Process</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	- <i>Computer Aided Design</i>
CFD	- <i>Computational Fluid Dynamics</i>
CFRP	- <i>Carbon Fibre Reinforced Polymer</i>
CNC	- <i>Computerized Numerical Control</i>
CNT	- <i>Carbon Nanotubes</i>
FEA	- <i>Finite Element Analysis</i>
FM	- <i>Figura de Mérito</i>
FRP	- <i>Fibre Reinforcement Polymer</i>
FS	- <i>Fator de Segurança</i>
IBSF	- <i>International Bobsleigh Skeleton Federation</i>
MDF	- <i>Medium Density Fiberboard</i>
OOA	- <i>Out of Autoclave</i>
QFD	- <i>Quality Function Deployment</i>
RIM	- <i>Reaction Injection Molding</i>
RTM	- <i>Resin Transfer Moulding</i>
SCRIMP	- <i>Seemann Composites Resin Infusion Molding Process</i>
SRIM	- <i>Structural Reaction Injection Moulding</i>
UAV	- <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
VARTM	- <i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i>

Nomenclatura

E_1	Módulo elástico longitudinal da direção 1	[GPa]
E_2	Módulo elástico longitudinal da direção 2	[GPa]
E_3	Módulo elástico longitudinal da direção 3	[GPa]
FM	Figura de mérito	[adimensional]
G_{12}	Módulo elástico de corte no plano 1 2	[GPa]
G_{23}	Módulo elástico de corte no plano 2 3	[GPa]
G_{31}	Módulo elástico de corte no plano 3 1	[GPa]
m_f	Massa da fibra	[kg]
m_r	Massa da resina	[kg]
m_T	Massa total	[kg]
N_i	Nota de avaliação da alternativa i	[adimensional]
t	Espessura da camada	[mm]
W_{AP}	Peso do subcritério de adaptabilidade ao design	[adimensional]
W_C	Peso do critério de custo	[adimensional]
W_{CA}	Peso do subcritério de custo dos acessórios	[adimensional]
W_{CE}	Peso do subcritério de custo dos equipamentos	[adimensional]
W_{CM}	Peso do subcritério de custo da mão de obra	[adimensional]
W_D	Peso do critério de disponibilidade	[adimensional]
W_f	Fração mássica de fibra	[adimensional]
W_F	Peso do critério de facilidade	[adimensional]
W_G	Peso do critério de geometria	[adimensional]
W_P	Peso do critério de produção	[adimensional]
W_{PE}	Peso do subcritério de peso	[adimensional]
W_{QP}	Peso do subcritério de quantidade produzida	[adimensional]
W_T	Peso do subcritério de tolerâncias	[adimensional]
W_{TP}	Peso do subcritério de tempo de produção	[adimensional]

Letras gregas

ν_1	Coefficiente de poisson na direção 1	[adimensional]
ν_2	Coefficiente de poisson na direção 2	[adimensional]
ν_3	Coefficiente de poisson na direção 3	[adimensional]
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]
$\sigma_{1,tração}$	Tensão limite de tração na direção 1	[MPa]

$\sigma_{1,compress\~ao}$	Tens\~ao limite de compress\~ao na dire\~cao 1	[MPa]
$\sigma_{2,tra\~cao}$	Tens\~ao limite de tra\~cao na dire\~cao 2	[MPa]
$\sigma_{2,compress\~ao}$	Tens\~ao limite de compress\~ao na dire\~cao 2	[MPa]
$\sigma_{3,tra\~cao}$	Tens\~ao limite de tra\~cao na dire\~cao 3	[MPa]
$\sigma_{3,compress\~ao}$	Tens\~ao limite de compress\~ao na dire\~cao 3	[MPa]
σ_{12}	Resist\~encia ao corte no plano 1 2	[MPa]
σ_{23}	Resist\~encia ao corte no plano 2 3	[MPa]
σ_{31}	Resist\~encia ao corte no plano 3 1	[MPa]

1 Introdução

A presente dissertação tem como principal objetivo o planeamento dos processos de fabrico da carenagem de um trenó de competição para a prova de *Bobsleigh* dos Jogos Olímpicos de Inverno de 2026. Esta dissertação vem dar continuidade a trabalhos anteriores, onde primeiro se desenvolveu o conceito da geometria da carenagem com o melhor desempenho aerodinâmico possível [1] e em segundo, a partir da mesma, foi dimensionada e definida a estrutura da carenagem [2]. Com toda a informação recolhida passou-se à terceira fase, em que é necessário definir e planear todos os processos de fabrico subjacentes aos componentes que constituem a carenagem do trenó. Em simultâneo com o desenvolvimento deste trabalho foram promovidas alterações significativas à geometria da carenagem e que foram consideradas na nova análise estrutural, com o objetivo de listar um empilhamento mais atualizado para a estrutura final.

Um processo de fabrico pode ser visto sob duas formas distintas: tecnológica e económica. Um processo tecnológico, caracteriza-se pela aplicação de diferentes processos físicos e químicos, pelo que desta forma é possível alterar a geometria, assim como determinadas propriedades a partir de um material base ou conjunto de materiais para fazer partes ou produtos. O fabrico engloba também a montagem de diferentes componentes para formar um único produto. Os processos para realizar o fabrico de uma determinada estrutura envolvem uma combinação de maquinaria, ferramentas, energia e mão de obra tal como evidenciado na Figura 1.1 a) [3].

No caso de um processo económico, o fabrico de uma peça ou produto é a transformação de materiais em produtos/itens de maior valor acrescentado por meio de uma ou mais operações de processamento e/ou montagem tal como é possível verificar na Figura 1.1 b). Neste trabalho em específico, o foco é no processo de fabrico como processo tecnológico e não como um componente para se obter lucro económico.

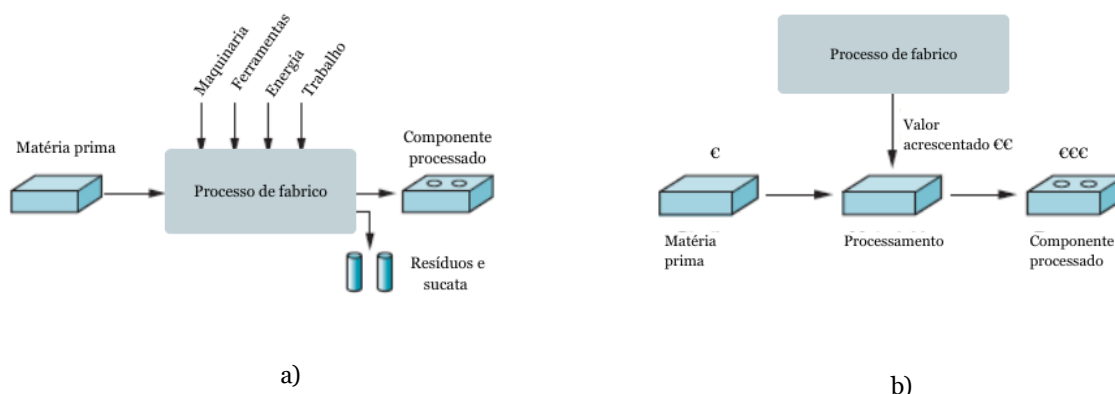


Figura 1.1: Duas formas para definir fabrico: a) como processo tecnológico e b) como processo económico adaptado de [3].

1.1 Motivação

As principais motivações para este trabalho prendem-se com a conceção e idealização de um método de construção que, face a um conjunto de critérios e restrições tanto da geometria como recursos externos (financiamento, tempo de execução, disponibilidade de máquinas, materiais disponíveis, entre outros), permita a implementação de um projeto de fabrico viável.

Embora a descrição do desporto *Bobsleigh* seja feita no segundo capítulo da presente dissertação, é importante notar que tanto neste como em qualquer outro desporto, a engenharia pode dar um contributo decisivo para a melhoria do desempenho dos atletas/equipamentos nas prova.

A engenharia do desporto é uma área de conhecimento relativamente recente, mas que tem tido grande relevância nos últimos anos. Os engenheiros do desporto elaboram estudos que permitem justificar escolhas de design, e de construção com base nos requisitos dos atletas. Estes analisam o comportamento dos equipamentos, dos atletas e ainda a relação equipamento/atleta num ambiente controlado. Além disso, também modelam e simulam as forças atuantes nos atletas e no equipamento, FEA (*Finite Element Analysis*), assim como simulam escoamentos em torno de zonas de interesse, CFD (*Computational Fluid Dynamics*) [4].

Para o caso em específico do desporto *Bobsleigh*, e observando em particular a título de exemplo os resultados dos últimos Jogos Olímpicos de Inverno de 2022 na categoria de “*two-man*” que ocorreram em Beijing (China), a diferença temporal entre a medalha de ouro e a medalha de prata foi de 0.49 s, nessa mesma competição curiosamente todo o pódio foi partilhado por atletas que representavam a Alemanha [5]. Constata-se assim, a grande competitividade associada a este desporto e a constante procura por soluções inovadoras que permitam a obtenção de melhores resultados.

Com o objetivo de melhorar o desempenho dos trenós em competição têm sido conduzidos estudos para: avaliar o impacto da forma/geometria da fuselagem na sua globalidade [6], estudar a influência do posicionamento dos atletas no interior do trenó [7], analisar alterações da forma do capacete assim como o espaçamento entre a componente traseira e dianteira da fuselagem do trenó [8], otimizar a geometria dos “*bumpers*”, uma vez que estes não têm propriamente a função de melhorar o desempenho, mas sim funcionalidades de segurança da tripulação [9], entender a influência do ângulo do corpo do “*brake man*” [7] e por fim, mas não menos importante, melhorar o coeficiente de atrito entre os patins (“*Runners*”) do trenó e o chão da pista. Embora o coeficiente de atrito do gelo seja muito baixo, este é diferente de zero e depende em grande parte tanto da temperatura do gelo assim como da pressão exercida pelo patim [10] [11], resultados dos estudos do coeficiente de atrito durante a corrida permitem uma otimização da forma dos patins [11].

Embora o fabrico não tenha uma relação direta com os parâmetros abordados no parágrafo acima, deve ser definido o design da carenagem ao mesmo tempo que se definem os processos de fabrico, de modo que no futuro não haja incompatibilidades que possam comprometer o desempenho do trenó.

1.2 Objetivos

Nesta subseção do Capítulo 1 são apresentados todos os objetivos da presente dissertação para o desenvolvimento de um plano de fabrico de uma carenagem de um trenó, para participação nos Jogos Olímpicos por parte da equipa portuguesa de *Bobsleigh* na vertente de “two-man” da Federação Nacional de Desportos de Inverno. De modo a atingir o objetivo principal já mencionado acima, enumeram-se de seguida outras etapas que se pretendem atingir:

- Levantamento do estado da arte das tecnologias de fabrico em compósito desde as mais antigas até às mais recentes com base na literatura;
- Comparação das tecnologias de fabrico e concluir qual a técnica mais adequada para o projeto face a pontos fulcrais como: adequação da técnica face à geometria, custo de implementação e material, mão de obra e acesso a maquinaria. Para tal, uma função de mérito foi desenvolvida para ser possível analisar quantitativamente os diferentes processos;
- Analisar estruturalmente o novo modelo de carenagem com base no método de fabrico adotado;
- Face ao método escolhido e com base no estado da arte, assim como na limitação de recursos, descrever o processo de fabrico que engloba desenhos em CAD (*Computer Aided Design*) para moldes e/ou ferramentas, sequência de operações e quantidades de material a disponibilizar.

1.3 Metodologia

A metodologia implementada na presente dissertação consistiu numa primeira parte na análise cuidada de diferentes modelos de trenós, nomeadamente materiais mais utilizados, geometria externa, divisão estrutural interna e funcionalidades associadas a cada componente. Foram também estudados tópicos acerca da prova: regulamentação, formas da pista e divisão da modalidade. Uma vez que a carenagem é totalmente composta por laminados, foi feita uma revisão bibliográfica acerca dos diferentes tipos de processos de fabrico associados a estruturas em compósito.

Numa segunda fase foi utilizado o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para a seleção da melhor alternativa de fabrico para a carenagem com base numa função de mérito. Nessa função estão presentes: os pesos dos diferentes critérios definidos e a avaliação que é dada a cada um deles. No final cada alternativa tem a sua nota final, aquela que apresentar a melhor avaliação é a alternativa que compõe o procedimento adotado.

Numa terceira fase foi utilizado o método dos elementos finitos para, com base no empilhamento da carenagem, verificar que os três tipos de carregamento aplicados não comprometem a

integridade estrutural da carenagem. Garantindo que não há falha, passou-se para a fase final de definição dos procedimentos de fabrico. Para a análise estrutural foi utilizado o programa comercial ANSYS e todos os desenhos CAD necessários foram concebidos em CATIA V5.

1.4 Estrutura do trabalho

A organização desta dissertação fornece ao leitor a oportunidade de obter uma visão geral do conteúdo necessário a uma boa interpretação do tema desta dissertação. Este documento está organizado em sete capítulos, que são descritos na seguinte síntese.

O Capítulo 1, inicia esta dissertação com uma introdução, onde são apresentados os principais objetivos a desenvolver e a estudar, a motivação para a escolha do tema, a metodologia utilizada e por fim, a sua organização.

O Capítulo 2, denominado de Desporto *Bobsleigh*, é onde se apresenta o enquadramento do trabalho para justificar os objetivos a atingir. É feita uma análise do desporto sob o ponto de vista desportivo, mas também de engenharia, de seguida apresenta-se um breve resumo da história deste desporto, constituição de um trenó e funcionalidades de cada componente, a história da modalidade em Portugal e por fim são apresentadas algumas das regulamentações inerentes à geometria do trenó.

O Capítulo 3 abrange em primeiro lugar um apanhado geral relativo aos materiais compósitos mais utilizados neste tipo de estruturas, divisão dos processos de fabrico devido ao tipo de resina, tipos de reforços e resinas mais utilizados. De seguida foi feita uma pesquisa acerca da incorporação de nanopartículas em materiais compósitos de forma a melhorar propriedades mecânicas como: a resistência à fadiga, módulo elástico e limite de resistência. Seguiu-se uma explicação e exposição dos processos de fabrico em compósitos mais importantes na atualidade, onde é abordada a descrição do processo, ferramentas utilizadas, matéria-prima assim como vantagens e desvantagens. Para concluir o capítulo, foram apresentados trabalhos que serviram de ponto de partida para o projeto de fabrico da carenagem do trenó. Embora nenhum dos trabalhos encontrados seja especificamente de um trenó são, no entanto, muito semelhantes em termos geométricos e funcionais. Esses projetos foram implementados na prática pelo que são expostas falhas assim como detalhes que podem auxiliar no fabrico prático da carenagem.

O Capítulo 4 apresenta numa primeira parte o objetivo da metodologia AHP e exemplos de aplicação que justificam a relevância da mesma na presente dissertação. Numa segunda, foi descrito o procedimento de aplicação da metodologia assim como toda a parte matemática subjacente. É apresentado um fluxograma que resume o método. De seguida, foi apresentada a função de mérito, assim como calculados os pesos dos diferentes critérios, a partir dos quais foi feita a avaliação de cada uma das alternativas de fabrico. Por fim, foram expostas as cinco alternativas com os valores mais elevados da função de mérito.

O Capítulo 5 apresenta os detalhes gerais acerca da análise estrutural executada, bem como a metodologia adotada e que inclui o conceito da estrutura da carenagem, o desenho da parte frontal e traseira e os materiais que são utilizados assim como as propriedades mecânicas dos mesmos. São demonstradas as condições de fronteira aplicadas na estrutura bem como os diferentes carregamentos a que se encontra sujeita (impacto, inércia e fase inicial de corrida). Em seguida apresentam-se os resultados, nomeadamente: a distribuição do fator de segurança com base no critério da tensão máxima e de *Tsai-Hill* bem como a distribuição de deformação. Este capítulo inclui ainda a definição da malha (elementos finitos) e apresenta um estudo de convergência onde se conclui que a grande maioria de resultados converge, havendo a registar, contudo, algumas exceções. Sendo o poder computacional limitado, não foi possível atingir uma maior precisão. Após as etapas anteriores concluídas é apresentada uma proposta de empilhamento final de camadas dos diferentes materiais que compõem a carenagem.

O Capítulo 6 introduz com o modo como foi realizado o desenvolvimento dos moldes que posteriormente são utilizados para a laminação da carenagem, bem como os desenhos CAD efetuados. De seguida, apresenta as diferentes etapas que compõe o fabrico da carenagem/fuselagem onde se integram processos de laminação, furação, corte, colagens, polimento, entre outros, incluindo ainda a contabilização dos materiais base necessários a todo o processo.

No último capítulo desta dissertação, 7, são expostas as conclusões finais e ainda algumas considerações acerca das melhorias a realizar assim como sugestões de trabalhos futuros.

2 Desporto *Bobsleigh*

Bobsleigh é um desporto de inverno cujas equipas fazem corridas/descidas cronometradas em pistas estreitas, inclinadas, sinuosas e geladas em trenós cuja propulsão é apenas (a partir dos 65 m desde o ponto de início da pista) a força da gravidade. É um desporto que se caracteriza por ser extremamente rápido e emocionante em que a disputa pelo pódio é muito renhida. Para ganhar a corrida é de grande importância ter um trenó otimizado dos pontos de vista quer de deslizamento quer de aerodinâmica [12].

Bobsleigh é normalmente apelidado de Fórmula 1 no gelo, uma vez que são atingidas velocidades superiores a 150 km/h e acelerações de 10 g. Tipicamente o vencedor ganha por centésimos de segundo [13] [14]. É uma modalidade que pode ser dividida em quatro categorias, dependendo da lotação do trenó assim como do sexo dos atletas, sendo a divisão feita da seguinte forma: *monobob* feminino, *two-man*, *two-woman* e *four-man* como se apresenta na Figura 2.1.

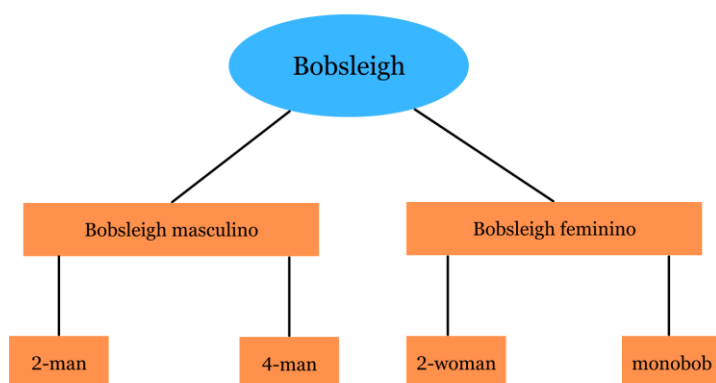


Figura 2.1: Categorias de competição da modalidade *Bobsleigh*.

2.1 História

A história da modalidade inicia-se oficialmente em 1897, com a fundação do primeiro clube de *Bobsleigh* em St. Moritz, na Suíça, Figura 2.2. Embora o trenó já existisse há muito tempo como meio de transporte, o desporto *Bobsleigh* começou no final do século XIX quando foi anexado um mecanismo de direção a um tobogã.

Os primeiros trenós eram feitos de madeira, mas rapidamente foram substituídos por trenós de aço que ficaram conhecidos como *bobsleds* devido à forma como as tripulações balanceavam para a frente e para trás com o intuito de aumentar a velocidade nos trechos retos do percurso.



Figura 2.2: Início de corrida em St. Moritz.

Em 1923 foi criada a Federação Internacional de *Bobsleigh & Skeleton* (IBSF). No ano seguinte ocorreu a primeira corrida da modalidade *four-man* nos Jogos Olímpicos em Chamonix, França. A partir de 1950 iniciaram-se mudanças no que toca à regulamentação do desporto, principalmente na limitação do peso do trenó, assim como da tripulação. Começou a haver, desta forma, mais cuidado no desenvolvimento de trenós de modo a torná-los mais eficazes para obtenção de melhor desempenho. Em 1983 foi solicitado ao Comité Olímpico que propusesse regulamentação para padronização da estrutura do trenó. O principal objetivo foi limitar custos assim como tornar fatores chave da competição, quer o desempenho dos atletas quer o desenho do próprio trenó. Outra etapa importante foi a partir da década de 1990 a estreia da participação de mulheres na competição quer na Europa quer na América do Norte. A partir de 2003 foi aprovada uma proposta para que todos os patins utilizados em competição fossem fabricados em aço padrão, entregue pelo IBSF, de forma a evitar assim tratamentos proibidos no fabrico dos patins que permitiam um menor coeficiente de atrito entre os mesmos e o gelo [15].

2.1.1 Bobsleigh em Portugal

Até aos dias de hoje, apenas houve uma única participação de Portugal na modalidade de *Bobsleigh* nos Jogos Olímpicos. Foi na edição dos XV Jogos Olímpicos de Calgary, Canadá em 1988, onde Portugal esteve representado por duas equipas, uma para a modalidade de *two-man* e outra para *four-man*. Dois dos atletas participaram em ambas as provas, a equipa portuguesa está apresentada na Figura 2.3. Nesta edição e uma vez que os apoios financeiros não seriam os melhores, a equipa portuguesa recorreu ao empréstimo de trenós para assegurar a sua participação nos jogos [16],

contudo e apesar de todos os constrangimentos conseguiram na modalidade de *two-man* atingir o trigésimo quarto lugar em quarenta e uma equipas presentes [17] e na outra modalidade, terminaram em vigésimo quinto lugar num total de vinte seis equipas [18].



Figura 2.3: Equipa portuguesa de *Bobsleigh* nos Jogos Olímpicos em Calgary, em 1988.

Esta dissertação de mestrado advém da vontade que a Federação dos Jogos Olímpicos de Inverno tem em desenvolver e fabricar um trenó competitivo e seguro para a participação da equipa portuguesa (Bobteam Portugal) [19] nos XXV Jogos Olímpicos de Inverno a realizar em 2026 em Milão e Cortina, evitando assim depender de um trenó emprestado como acontecia no passado.

2.2 Aspetos gerais sobre a pista

Nesta subsecção é feita uma análise acerca dos aspetos gerais assim como técnicos sobre as pistas e ainda sobre as provas de *Bobsleigh*.

As competições de *Bobsleigh* para *two-man* e *four-man* são realizadas em pistas que têm de cumprir critérios técnicos estabelecidos, sendo que diferem nas várias secções transversais ao longo do trajeto, distância total assim como raios de curvatura. O comprimento da pista está compreendido no intervalo entre 1200 m (mínimo) e 2000 m (máximo), os ângulos de inclinação variam entre 8 e 15%, o número de curvas não pode ser inferior a treze. Relativamente à pista esta pode ser dividida em três partes [20]:

- A primeira parte é a “zona de aceleração” que tem o declive máximo, com extensão de 350 a 400 m e número limitado de elementos desportivos (curvas).

- A segunda parte é a “zona de máxima performance” e inclui os principais elementos desportivos da pista (curvas), o declive não é superior a 15% e o comprimento é compreendido entre 800 e 850 m.
- A terceira e última parte é o “acabamento ativo” com número limitado de elementos desportivos, devendo apresentar uma secção de desaceleração onde a inclinação é pequena e o comprimento é compreendido entre 350 e 400 m.

Na Figura 2.4 é possível observar a morfologia da pista de *Bobsleigh* dos Jogos Olímpicos de Inverno em Pequim no ano de 2022.



Figura 2.4: Pista dos Jogos Olímpicos de Inverno Pequim 2022 [21].

Relativamente à prova em si, uma corrida pode ser dividida em três fases distintas: a fase inicial, a fase de movimentação e a fase final. Na fase inicial os atletas empurram o trenó, aumentando a velocidade o máximo possível. Ao contrário do que ocorre no *monobob*, é necessário um esforço coletivo para acelerar o veículo a partir do repouso. A fase inicial, descrita na Figura 2.5, pode ser dividida em duas partes. A primeira parte, região a vermelho, compreende a distância inicial de 15 m a partir do ponto de repouso, onde os atletas tentam atingir a maior velocidade possível antes de entrarem oficialmente na corrida. A segunda parte corresponde à zona verde identificada na Figura 2.5, onde tem início a contagem do relógio na marca dos 15 m. A partir desse ponto os atletas podem continuar a empurrar, mas têm de entrar um a um até ao limite da marca dos 65 m, onde todos os atletas têm, obrigatoriamente, de estar no interior do trenó.

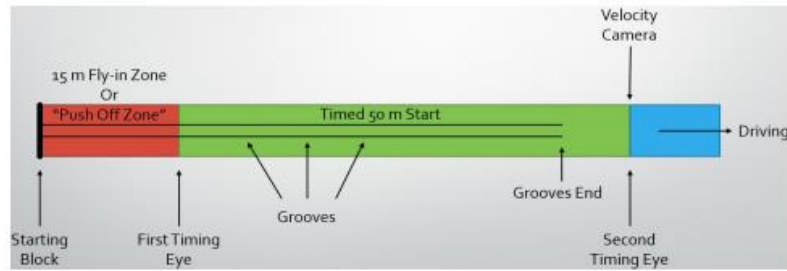


Figura 2.5: Fase inicial da corrida [22].

A fase de movimentação inicia-se na marca dos 65 m a partir da qual o desempenho do piloto é fundamental, sendo que a força propulsiva do veículo é a que advém unicamente da aceleração gravítica. Durante a corrida os atletas irão encontrar um conjunto de elementos na pista que apresentam diferentes dificuldades. Na Figura 2.5 a fase de movimentação está representada pela cor azul. O tempo de descida da prova é contado e o trenó tem de ser desacelerado por meio de um travão e com o auxílio da própria pista, cuja parte final é em forma de subida [13].

2.2.1 Forças envolvidas

De modo simplista e uma vez que é feita uma análise estrutural, é sempre importante a compreensão dos fenómenos físicos envolvidos na corrida, para uma melhor perceção das condições de fronteira aplicadas no Capítulo 5. Descreve-se de seguida as forças envolvidas numa corrida de *Bobsleigh*.

Existem dois casos distintos de carregamento que podem ser identificados, o caso em que o trenó se desloca ao longo de uma linha reta e o caso em que encontra numa curva. Em linha reta pode ser assumido como um corpo simétrico e que as forças atuantes são na direção longitudinal do trenó. De forma a melhorar o desempenho, o peso do trenó deve ser maximizado enquanto o atrito com o gelo e a força de resistência aerodinâmica deve ser minimizada. Em contrapartida, quando o trenó se desloca numa curva o veículo sofre uma aceleração centrífuga, puxando o trenó para fora da trajetória e obrigando o piloto a fazer alterações na direção do trenó de modo a descrever a melhor trajetória possível, conforme apresentado na Figura 2.6. Esta mudança de direção cria uma força resistiva que provoca o aumento do atrito com o gelo, o que origina uma desaceleração no trenó [13].

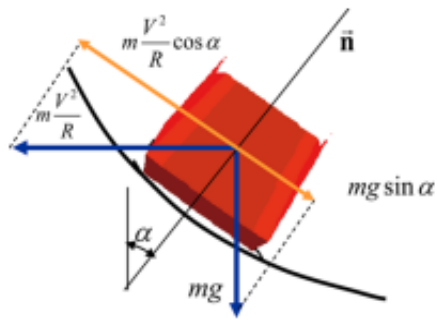


Figura 2.6: Representação das forças envolvidas numa curva da corrida [12].

Outros tipos de forças que também atuam no tremó são: as forças de impacto com as paredes (em caso de choque lateral) conforme a Figura 2.7, atuando nos *bumpers* e as forças que são aplicadas pela tripulação na fase inicial da corrida tanto na *push-bar*, pelo piloto, assim como nos *push-handles*, pelo homem-travão e que se apresenta na Figura 2.8.



Figura 2.7: Representação da força de impacto das paredes.

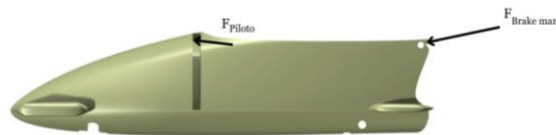


Figura 2.8: Representação das forças aplicadas pela tripulação no tremó na fase inicial da corrida.

2.3 O trenó

Nesta secção do trabalho é feita uma descrição do trenó de *two-man*, modalidade que esta dissertação aborda. Com a evolução dos materiais, assim como dos processos de fabrico e tecnologia, os trenós foram evoluindo de modo a alcançarem cada vez melhores resultados, a par com o cumprimento rigoroso dos regulamentos da prova, que zelam pela segurança dos atletas. Na Figura 2.9, está representado um modelo típico de um trenó de dois lugares.

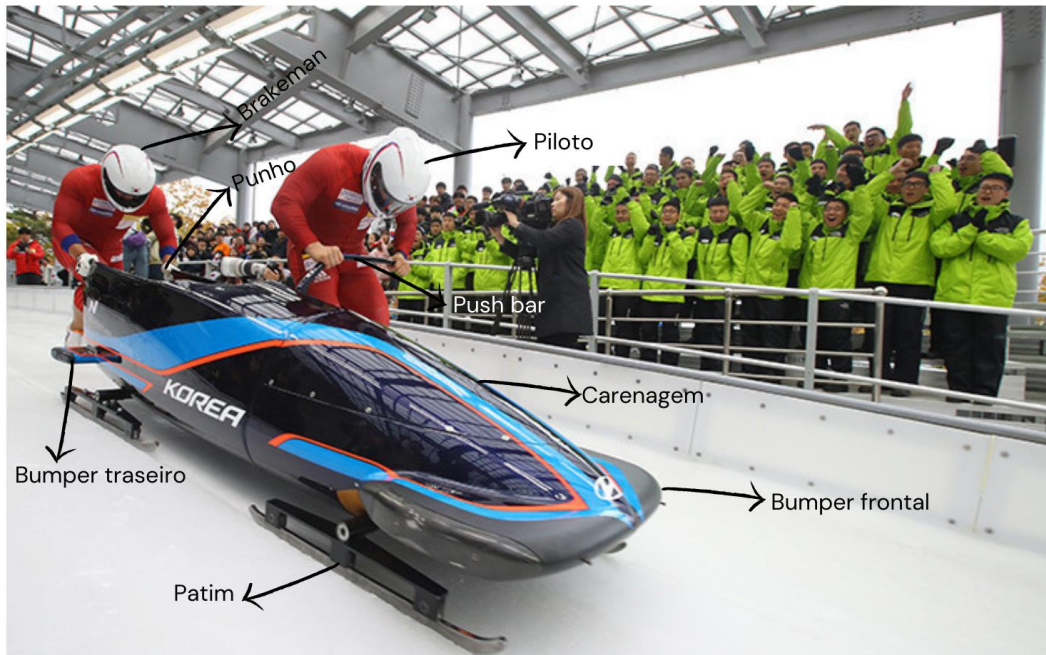


Figura 2.9: Sessão de treino da equipa sul coreana, adaptado de [23].

Um trenó usado em competições de *Bobsleigh* é constituído por: um chassis que constitui a estrutura interna do trenó e que se apresenta na Figura 2.10, quatro patins, dois *bumpers* frontais e dois traseiros, uma *push bar*, uma carenagem que por sua vez é dividida em dois componentes.

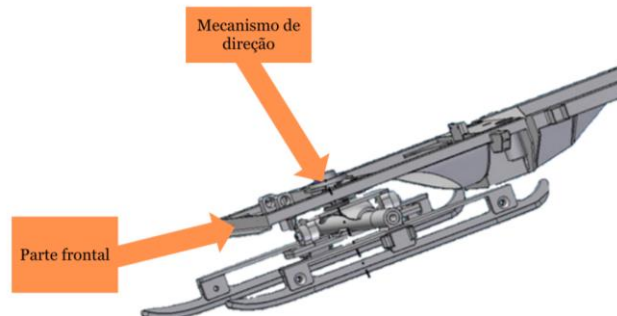


Figura 2.10: Chassis típico de um trenó, adaptado de [12].

O chassis constitui a estrutura interna do trenó e inclui: os patins anteriores com mecanismo de direção e plataforma de suporte ao piloto, os patins posteriores com plataforma de suporte ao *brakeman* e respetivo travão, uma estrutura de interligação entre os patins posteriores e anteriores e os pontos de suporte da carenagem. O material de fabrico do chassis é aço padrão de acordo com as regras do IBSF (*International Bobsleigh Skeleton Federation*).

Os patins são feitos em aço e devem ser muito polidos para obter o menor coeficiente de atrito com a pista, uma vez que estes componentes são os únicos que têm contacto com o chão. Estes estão ligados ao chassis assim como à carenagem do trenó.

Os *bumpers* são elementos obrigatórios no trenó e a sua função principal é garantir a segurança da tripulação quando existe contacto com as paredes da pista, pois é frequente este tipo de choque. Na parte terminal destes elementos é possível observar que não existe continuidade com o *bumper* na sua totalidade, facilitando a sua substituição sem comprometer a restante parte.

A *push bar* a meio do trenó e os *push handles*, têm a função de suportar a força que os atletas aplicam no trenó na fase inicial da corrida. A *push bar* é articulada para facilitar a recolha no início da fase intermédia da corrida, sem que provoque um incremento na força de resistência do veículo na restante prova.

A carenagem é a estrutura que envolve e integra todos os elementos construtivos do trenó já descritos sendo dividida em duas partes, uma frontal e outra traseira para que seja possível ao trenó curvar de forma mais rápida e gradual. A carenagem é normalmente fabricada em compósito de fibra de carbono ou de vidro e é aberto na parte traseira para que os atletas na fase final da corrida inicial possam entrar facilmente para o trenó [9].

2.4 Regulamentação

A regulamentação do desporto de *Bobsleigh*, condiciona o fabrico e estrutura da carenagem do trenó.

A entidade que regulamenta este desporto é a IBSF, e um dos principais objetivos da regulamentação é a necessidade de uniformizar a forma dos diferentes trenós de modo que o desempenho da tripulação seja um dos fatores chave e não a forma do mesmo, permitindo assim que fatores económicos não sejam impeditivos para vencer uma prova.

Qualquer trenó desenvolvido, em primeiro lugar tem de proporcionar segurança aos atletas que alberga. Para satisfazer este requisito, um conjunto de regulamentos rigorosos é imposto pelo IBSF sobre a geometria dos trenós.

Alguns dos princípios gerais são os seguintes [24]:

- Para movimentar o trenó apenas a força dos atletas a empurrar é permitida no início da prova, assim como a força da gravidade;

- Os trenós devem ser carenados de forma a cumprir os regulamentos aqui apresentados;
- A parte traseira da carenagem deve ser aberta na zona superior;
- A partir do início da partida, nenhuma especificação deve ser alterada (não pode haver danos);
- Os fabricantes do trenó são responsáveis pela construção de veículos que devem resistir, sem danos evidentes, a impactos repetidos na pista;
- Para a construção do trenó é proibido usar material transparente ou qualquer material que possa partir após um impacto;
- O termo “aço” significa uma liga de ferro e carbono, com uma quantidade de ferro superior a 50% em peso ou uma liga que reage positivamente a um dispositivo de teste da IBSF;
- Os termos borracha e tipo-borracha definem um material resiliente que deve ter uma dureza inferior a *Shore-D 100* segundo o teste durométrico D2240 da ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Relativamente à carenagem em si, as especificações construtivas para acesso à modalidade desportiva devem ser:

- O orifício do travão tem de estar aberto;
- Não deve haver a tentativa de reduzir a área do orifício com nenhum material;
- Não é permitida a incorporação de elementos externos tais como geradores de vórtices ou furos, cuja função seja claramente a de melhoria aerodinâmica;
- Oferecer segurança adequada à tripulação.

Quanto à ligação da carenagem ao chassis alguns dos pontos fundamentais a cumprir são os seguintes:

- A carenagem deve ter pelo menos quatro pontos de apoio ligados ao chassis para impedir o deslocamento vertical da carenagem relativamente ao chassis;
- Dois dos quatro apoios tem de ser posicionados de forma simétrica relativamente ao plano de simetria do trenó e têm de ser montados sobre o tensor longitudinal do chassis;
- Pode ser usada borracha para a ligação carenagem-chassis e esta deve ser homogénea.

Relativamente à massa do trenó, para o caso da modalidade de *two-man*, a massa deve estar compreendida entre 170 kg e 390 kg. A massa mínima inclui o trenó juntamente com os patins e sem a tripulação, a massa máxima inclui a tripulação assim como os patins e outro equipamento [24].

3 Estado da arte dos processos de fabrico em compósito

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica dos processos existentes de fabrico em compósito. Para este efeito foi elaborado um estudo acerca dos materiais utilizados bem como trabalhos de fabrico em compósito que tenham alguma semelhança com o processo adotado na conceção da carenagem, objeto deste projeto. Este capítulo é fundamental na medida em que no seguinte, seja possível estabelecer uma quantificação do mérito dos processos em ordem à aplicação dos métodos na construção da carenagem.

De uma maneira geral, um material compósito é uma combinação de dois ou mais materiais cujo objetivo é adquirir propriedades muito específicas para uma determinada condição de operação de um componente. Esta combinação pode incluir ligas metálicas, polímeros e materiais cerâmicos. Na forma conjugada de dois ou mais, os materiais constituintes juntos adquirem uma combinação de propriedades melhores do que aquelas que tinham inicialmente em separado.

Tipicamente um material compósito é constituído por uma matriz e por um reforço. Os reforços podem ser fibras, partículas ou “*whiskers*” e a matriz pode ser de origem polimérica, cerâmica ou metálica, sendo a mais comum de origem polimérica. As fibras têm como funções: resistir ao carregamento (para o caso de um compósito estrutural este pode suportar entre 70 e 90% da carga), assegurar rigidez e estabilidade térmica. A matriz tem por funções: ligar e manter as fibras juntas assim como transferir o carregamento para os reforços, oferecer um bom acabamento superficial, proteger os reforços contra-ataques químicos e manter a forma do material compósito.

Os materiais de reforço aparecem na forma de fibras contínuas ou descontínuas, fibras longas ou curtas, orgânicas ou inorgânicas. A fibra de vidro é aquela que é a mais utilizada, devido à sua abundância e menor custo associado.

Para que as fibras suportem a maior carga possível, a matriz tem de ter um módulo de elasticidade menor assim como possuir um alongamento superior ao do reforço. A seleção da matriz é baseada em requisitos: químicos, térmicos, elétricos, de custo, desempenho e, muito importante, requisitos do fabrico do componente em questão. As matrizes dividem-se em dois diferentes tipos: as de natureza termoendurecível e as termoplásticas. As matrizes termoendurecíveis são materiais que depois de curados não podem voltar a ser moldados ao contrário das matrizes termoplásticas. Alguns exemplos de matrizes termoendurecíveis são: poliésteres insaturados, resinas de vinilo, resinas fenólicas, resinas epoxídicas ou epóxi e poliamidas termoendurecíveis. As matrizes termoendurecíveis permitem um melhor processamento no fabrico e melhor impregnação, uma vez que a manipulação deste tipo de resina é feita à temperatura ambiente, para a grande maioria dos processos de fabrico em compósito. As resinas deste tipo conferem à estrutura uma melhor estabilidade térmica e dimensional, rigidez e resistência relativamente às matrizes termoplásticas.

Para o presente trabalho, são expostos apenas os processos de fabrico em compósito com a utilização de resinas termoendurecíveis. Na Figura 3.1 está o resumo dos processos de fabrico para cada tipo de resina (termoplástica e termoendurecível).

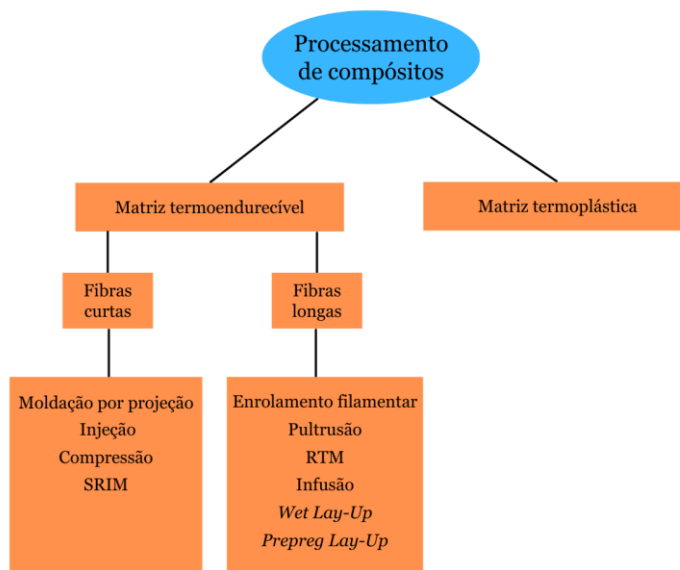


Figura 3.1: Processos de fabrico em compósito.

3.1 Materiais

O comportamento e desempenho de um produto depende em grande parte do tipo de materiais que são utilizados no fabrico do componente. O desempenho de um compósito depende da seleção de materiais, do projeto, do processamento, do custo e da qualidade. A seleção dos materiais para equipamentos desportivos, no presente caso de um trenó, exige um elevado cuidado para assim possibilitar resultados cada vez melhores.

Os materiais que são utilizados no fabrico da carenagem do trenó são os constituintes básicos de um material compósito: fibras, resinas e materiais constituintes do núcleo.

Recentes avanços na área dos materiais refletem-se por exemplo na incorporação de nano partículas em materiais reforçados com fibra de carbono em matriz polimérica, CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*), que melhoram significativamente o desempenho e a funcionalidade dos mesmos. A nanotecnologia permite elevados benefícios para os materiais compósitos nomeadamente: melhoria nas propriedades mecânicas e alteração da superfície. As nanopartículas

de carbono podem ser de vários tipos: nanotubos de carbono, CNT (*Carbon Nanotubes*), grafeno e óxidos de grafeno. Os nanotubos de carbono podem ser de difícil e rara aplicação devido em primeiro lugar ao custo elevado de produção e em segundo, e também muito importante, à difícil aplicação nos processos de fabrico, nomeadamente na dispersão dos nanotubos de carbono na matriz do compósito. O aumento da viscosidade da resina leva a que seja ainda mais difícil a dispersão originando que as nanopartículas se aglomerem e tenham um efeito prejudicial na adesão fibra-matriz, causando uma diminuição das propriedades mecânicas do compósito. Apesar destes inconvenientes os nanotubos de carbono têm no entanto elevado potencial para no futuro serem mais utilizados devido à melhoria significativa que oferecem no que toca à elevada resistência, baixo peso e excelentes propriedades térmicas e elétricas [25].

Um estudo para analisar o efeito da adição de nanotubos de carbono (CNT's) nas propriedades mecânicas da resina assim como para um empilhamento específico foi levado a cabo por Yuanxin Zhou *et al* [26]. Neste estudo foram feitos testes de fratura e flexão (3 pontos) de modo a tentar entender qual a quantidade ideal de CNT's na mistura que permite uma melhoria nas propriedades mecânicas. Numa primeira parte, em que foi feito o teste de flexão de 3 pontos, evidenciou-se uma melhoria para todas as percentagens de CNT's relativamente ao módulo elástico, no entanto para 0.4 wt% há uma diminuição da resistência à flexão como é possível ver na Figura 3.2 . A melhor combinação é, por isso, a que apresenta uma quantidade de CNT's de 0.3 wt% que permitiu observar um aumento de 28.3% no que toca à resistência à flexão.

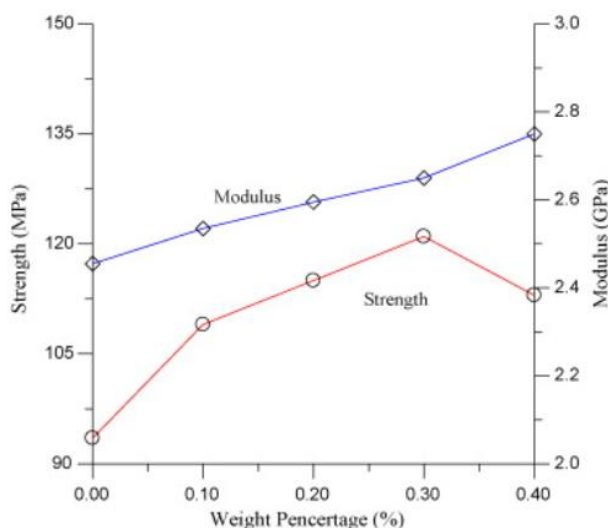


Figura 3.2: Comparação do módulo elástico e resistência à flexão para cada combinação de CNT's na resina [26].

Na segunda parte do trabalho os autores atrás referidos compararam a curva tensão-deformação para o caso de um material compósito com e sem CNT's, e concluíram que houve um aumento tanto da deformação limite assim como da resistência à flexão, 3% e 2% respetivamente, como é possível observar pela Figura 3.3.

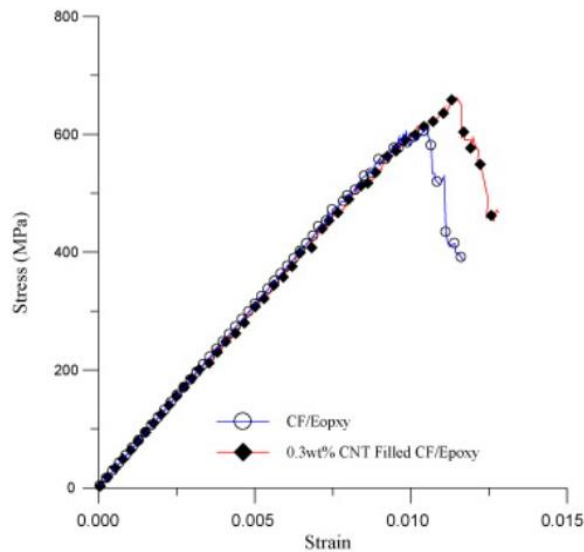


Figura 3.3: Comparação das curvas tensão-deformação para o laminado com e sem CNT's [26].

Parte da estrutura do trenó vai ser constituída por painéis sandwich, sendo por isso necessário um núcleo com material poroso que pode ser espuma ou núcleo de favo de mel, que está entre as camadas dos laminados. O núcleo tem a função de resistir a forças de corte transversais assim como garantir rigidez através do afastamento relativamente à linha neutra da camada superior e inferior do painel. Tem também a função de resistir a forças compressivas e garantir rigidez à torção. Devido à baixa densidade deste tipo de material, os painéis em sandwich permitem obter elevada resistência específica assim como rigidez específica.

Uma forma de melhorar as propriedades intrínsecas da espuma é a adição de CNT's na produção da mesma. Para isso foi estudado por Kukai Yang *et al* uma forma de adicionar nanotubos de carbono na espuma para uma melhoria das propriedades mecânicas do núcleo. O tipo de espuma estudada foi poliuretano, sendo que esta tem propriedades de que se destaca a absorção de energia (choques, vibração e ruído). Nesse estudo os CNT's eram inseridos numa mistura líquida, que posteriormente foram adicionados ao segundo componente para formar a espuma. Foram analisadas diferentes misturas que diferiam tanto no diâmetro dos CNT's assim como na quantidade presente na mistura. Chegou-se à conclusão de que uma pequena quantidade adicionada na espuma promove uma melhoria nas propriedades mecânicas (tensão de tração, alongamento e resiliência). De acordo com o mesmo estudo, as propriedades mecânicas adquiridas pela espuma com CNT's de menor diâmetro eram superiores às da mistura com nanotubos de carbono de maior diâmetro [27].

Por último, apresenta-se um estudo conduzido por Knoll *et al* [28] em que analisaram o efeito da inserção de nanotubos de carbono assim como de grafeno de poucas camadas. O objetivo era analisar o efeito destes compostos sobre a resistência à fadiga e das propriedades mecânicas de um material compósito de fibra de carbono (CFRP). Nesta análise os autores concluíram que a adição de nanopartículas de grafeno promovia um aumento no tempo de serviço do laminado em

comparação com a adição de nanotubos de carbono assim como do laminado sem qualquer nanopartícula, como é possível observar pela Figura 3.4. Uma ilação dos autores para o verificado é a elevada área superficial assim como a existência de um modo de falha adicional na separação das camadas. O laminado CFRP com grafeno consegue absorver mais energia do que com a adição dos CNT's resultando assim num aumento da vida útil do laminado [28].

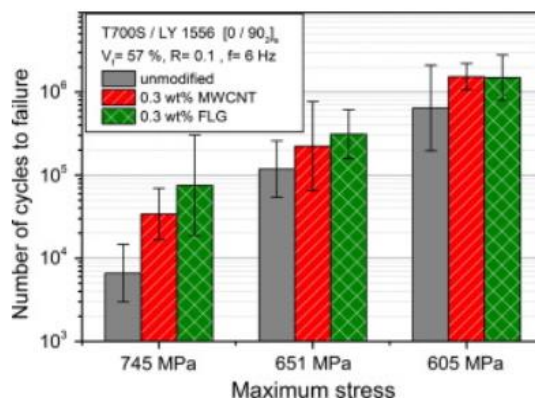


Figura 3.4: Comparação do número de ciclos até à falha de um material compósito de CFRP inalterado e com nanopartículas adicionadas [28].

Como visto nos parágrafos acima, um processo de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais a utilizar no fabrico da carenagem do trenó, é a incorporação de nanopartículas. Contudo, a utilização de nanopartículas é ainda uma área pouco explorada, levando a um aumento dos custos deste tipo de materiais, assim como implica a utilização de máquinas adicionais para o processo.

3.2 Processos de fabrico

Nesta subsecção do trabalho são abordados os principais processos de fabrico em compósito de matriz termoendurecível, apoiado em informações de artigos científicos, bem como livros. Para cada processo de fabrico é feita uma exposição acerca das aplicações, das matérias-primas, requisitos em termos de ferramentas e moldes, sequência de operações e por fim vantagens e limitações associadas.

O processo de laminação manual inclui dois subprocessos que, embora idênticos em termos de procedimento, são distintos: o processo *Prepreg Lay-Up* e o processo de *Wet Lay-Up*.

3.2.1 Prepreg Lay-Up

O primeiro é um processo com baixa taxa de produção e é normalmente utilizado para moldar formas de geometria complexa e com elevada fração em volume de fibras. Neste processo são necessários tecidos que são pré-impregnados com resina que podem ser cortados da forma que for necessária e de seguida colocados sobre um molde aberto conforme a orientação desejada. Estando o empilhamento sobre o molde completo, este é ensacado em vácuo e por fim, colocado todo o sistema no interior de um forno ou numa autoclave, como se mostra na Figura 3.5, para que seja aplicada pressão e temperatura de forma a curar o componente. Este processo é aplicado na indústria aeroespacial, no fabrico de bens desportivos assim como na conceção de protótipos. Os materiais mais utilizados neste tipo de fabrico são os pré-impregnados de carbono com epóxi devido à sua resistência específica e peso reduzido. Para este processo de fabrico, é necessário um molde aberto onde os tecidos pré-impregnados são depositados. Para a construção de protótipos os moldes podem ser de natureza metálica, de madeira ou polímeros que sejam facilmente maquinados. No entanto pode dar-se o caso de o molde também ser feito em compósito de carbono a partir de um protótipo maquinado [29].

De forma a preservar a qualidade do material pré-impregnado, este deve ser mantido refrigerado a uma temperatura relativamente baixa. Todo o processo de laminação de componentes deve ser feito num local limpo de poeiras, com humidade e temperatura controlada. Geralmente o material pré-impregnado pode ser usado na forma de tecidos ou fibras unidireccionais.

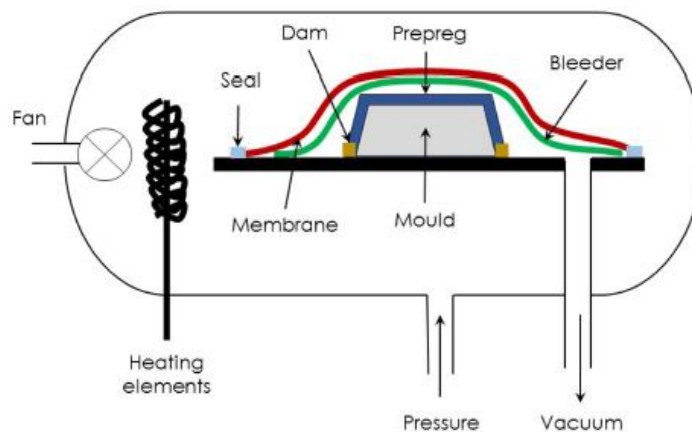


Figura 3.5: Configuração de uma autoclave [30].

Uma autoclave é um vaso fechado normalmente utilizado para aplicações estruturais permitindo a aplicação de temperatura e pressão com uma distribuição pré-determinada anteriormente. A pressão submetida no componente permite diminuir a porosidade (redução de bolhas), manter a forma em redor do molde, assim como permite um maior controlo da proporção de fibras. A linha a

verde na Figura 3.5, é de um material absorvente e é usado para retirar o excesso de ar assim como absorver a resina em excesso enquanto a peça está a ser curada [30]. Para que seja possível aplicar vácuo a partir de um saco, são utilizados selantes em forma de fita de modo a vedar todo o componente em contacto com o molde.

A sequência de operações para o fabrico de uma peça pelo processo de *Prepreg Lay-Up*, inicia-se com a retirada do tecido da câmara frigorífica, seguida da colocação à temperatura ambiente durante algum tempo para evitar condensações, uma vez que a humidade tem efeitos negativos no processo de cura em autoclave, principalmente para geometrias complexas [31]. Depois os tecidos são cortados conforme a necessidade. O molde deve ser limpo para posteriormente ser aplicado um desmoldante na superfície onde são aplicadas as camadas. É retirada a película que está sobre o pré-impregnado e são aplicadas as camadas segundo a orientação prevista no plano de fabrico. Em cada aplicação de tecido é utilizado um rolo de modo a prevenir bolhas de ar e descontinuidades entre os tecidos. O empilhamento deve ser coberto com um saco de vácuo e inserido no interior da autoclave para pode ser submetido ao processo de cura. O ciclo de cura é inserido num computador que controla a autoclave. Findo o processo de cura, retira-se a peça da autoclave e pode proceder-se à fase final que compreende o desmolde do componente [32].

As vantagens deste processo de fabrico são as seguintes [32]:

- Permite o fabrico de peças em compósito com elevada fração volúmica de fibras (acima de 60%) devido ao uso de pré-impregnados, com controlo no uso de resina excessiva;
- Tanto peças simples como complexas podem ser fabricadas utilizando este processo;
- É um processo adequado para o fabrico de partes de um protótipo, as ferramentas necessárias para a implementação deste processo são de custo relativamente baixo à exceção da autoclave que necessita de um investimento superior;
- Componentes com boas propriedades mecânicas (rigidez e resistência) e com baixo peso;
- Menor poluição do local de trabalho;
- É um processo com maior repetibilidade uma vez que o controlo da resina não é feito pelo operador;
- Menos defeitos pós-cura.

Algumas das limitações associadas a este processo de fabrico são [32]:

- Processo com uma taxa de produção baixa, não é possível fabricar muitas peças simultaneamente, devido à cura ter de ser feita numa autoclave, e esta ter limitações de dimensão;
- O custo por peça produzido por este método é elevado;

- Para peças volumosas pode não existir autoclaves para as curar (limitação geométrica);
- A precisão da orientação das fibras no molde não é a melhor devido à deposição manual dos tecidos;
- Possibilidade de ter bolhas de ar entre as camadas.

3.2.2 Wet Lay-Up

O processo *Wet Lay-Up* é o segundo processo integrante do conjunto de procedimentos de laminação manual (*Hand-Lay-Up*). O processo *Wet Lay-Up* é um dos mais antigos métodos de fabrico em compósito. É caracterizado pela sua simplicidade, pois envolve apenas a aplicação de tecidos ou mantas secos juntamente com a resina sobre um molde aberto com o auxílio de rolos ou pincéis [33]. É um processo ainda muito utilizado na construção de protótipos, pás eólicas, na indústria naval assim como de bens que não necessitam de grande rigor na sua construção (piscinas, tanques, entre outros). Este processo envolve uma grande disponibilidade de recursos humanos devido à elevada dimensão das peças e necessita que o início da cura da resina seja atingido apenas no fim de todo o empilhamento efetuado e não enquanto ainda é necessária laminação. Uma vez ser utilizado um molde aberto, o ambiente de produção é normalmente muito nocivo devido à emissão de vapores de solventes provenientes da resina. Este processo requer pouco investimento inicial, é de fácil implementação e vantajoso para peças de grandes dimensões.

A matéria-prima necessária pode englobar tecidos de fibra de vidro, *kevlar* ou carbono como material de reforço. Dependendo dos requisitos da peça, a resina pode ser epóxi, poliéster ou viniléster.

As ferramentas necessárias ao processo são muito simples comparadas com os outros processos de fabrico. O tipo de material usado para os moldes tal como no processo de *Prepreg Lay-Up* são normalmente aglomerados de madeira, por exemplo MDF (*Medium Density Fiberboard*), materiais de natureza metálica ou até um molde feito previamente em compósito assim como outros tipos de materiais para fins de construção de protótipos. O molde pode ser macho ou fêmea dependendo de qual das superfícies necessita de um melhor acabamento, se a exterior ou a interior. Dependendo da dimensão do molde, poderá ser necessário uma estrutura externa para garantir que o molde não se deforma tal como para o caso de um molde de um barco como se apresenta na Figura 3.6. O molde fêmea é construído através de um modelo macho ou protótipo.



Figura 3.6: Estrutura de apoio ao molde fêmea.

Na Figura 3.7 está representado um modelo representativo da configuração geral do processo de fabrico *Wet Lay-Up*. O ciclo temporal do processo depende tanto da natureza da resina como da dimensão do produto. Se a peça for de grandes dimensões e espessa, o trabalho de laminação deve ser faseado de forma que o processo de cura seja bem efetuado, pois entre cada fase de laminação o produto deve ser tapado de modo a ser evitada a contaminação com impurezas provenientes do local onde o processamento está a ser efetuado. O controlo de qualidade no processo é muito difícil uma vez que está fortemente dependente da habilidade da equipa de operários.

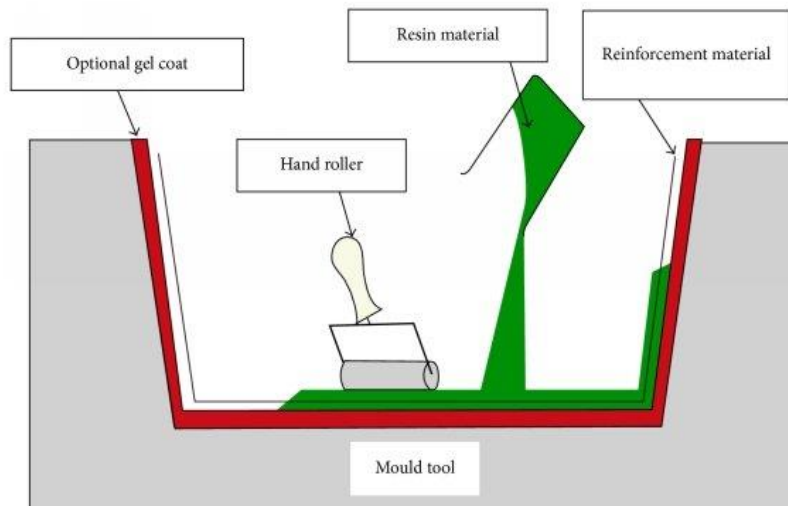


Figura 3.7: Esquema geral do processo de Wet Lay-Up [34].

Para melhorar a adesão entre camadas e melhorar os processos de cura, pode ainda aplicar-se pressão e temperatura. O processo *Wet Lay-Up* é normalmente desempenhado num espaço com temperatura controlada, onde depois de executada a tarefa se deixa curar normalmente um dia ou noite dependendo do tipo de resina. O tempo de cura pode ser reduzido com a utilização de um

ventilador aquecido a soprar sobre a superfície a curar. Durante o processo de deposição da resina a única pressão efetuada é a do pincel/rolo, no entanto, pode ser utilizado no fim de todas as camadas dispostas um saco de vácuo tal como é efetuado no processo de *Prepreg Lay-Up*, de forma a reduzir as bolhas de ar e uma maior adesão entre camadas. Embora não sendo comum, a peça pode ainda ser colocada numa autoclave caso tenha dimensão adequada.

A sequência de passos para o fabrico de uma peça segundo o método descrito acima é a seguinte: com o molde disponível, é aplicado um produto desmoldante na superfície a partir do qual se irá aplicar a primeira camada, para que no final do processo seja possível o desmolde; adicionalmente pode ainda ser usado um produto de modo que a superfície externa da peça tenha um acabamento superior. De seguida pode iniciar-se a aplicação das camadas, dispondo a resina em simultâneo com os tecidos e comprimindo o máximo possível com o pincel/rolo em redor da superfície laminada. Deve ser repetido o procedimento de disposição de tecidos e resina até que seja atingida a espessura desejada. Para o caso de ser construído um painel *sandwich* o núcleo deve ser colado na parte superior da casca inferior em contacto com o molde. Estando o empilhamento concluído, deixa-se curar à temperatura ambiente ou utiliza-se um ventilador para uma cura mais rápida; depois da cura finalizada, desmolda-se a peça.

Algumas das vantagens deste processo são [32]:

- Baixo investimento na implementação do projeto no que toca tanto a materiais como maquinaria;
- O processo é simples e versátil, qualquer tipo de fibra pode ser utilizada e disposta segundo a orientação que se desejar;
- O custo do fabrico de um protótipo é baixo porque o molde também não necessita de ser muito sofisticado para este tipo de fabrico;
- A matéria-prima é barata comparado com o processo de *Prepreg Lay-Up*.

Algumas das limitações são [32]:

- É um processo que necessita de muita mão de obra;
- É adequado para protótipos, assim como estruturas de grandes dimensões;
- Sendo um processo em molde aberto, o ambiente de fabrico é nocivo;
- Não há repetibilidade no processo, isto é, para o mesmo componente as peças são inevitavelmente sempre diferentes devido ao procedimento ser muito manual;
- As peças dificilmente apresentam uma percentagem em massa de fibras superior a 50%;
- Processo relativamente sujo;
- Propriedades mecânicas alcançadas inferiores devido à quantidade de resina utilizada ser excessiva.

3.2.3 Moldação por projeção

O processo de moldação por projeção, Figura 3.8, é um processo muito idêntico ao *Wet Lay-Up*, a maior diferença assenta no facto da resina assim como da fibra serem colocadas com o auxílio de uma pistola que projeta tanto resina como fibra seccionada contra o molde. A pistola está ligada a um rolo que à medida que vai projetando vai cortando o fio de fibra antecipadamente entre 25-75 mm, projetando ao mesmo tempo a resina. O processo de projeção é mais rápido que o processo de laminação manual tanto de tecidos secos como pré-impregnados pois utiliza rolos de fibras secas que podem ser consumidos diretamente pela pistola de projeção. A fração de fibras é tipicamente 20% em volume. As resinas utilizadas têm normalmente um tempo de cura muito reduzido.

Os moldes usados neste processo são muito idênticos aos já vistos anteriormente, dependendo da aplicação podem ser machos ou fêmeas, consoante qual das superfícies lisas se deseja obter (se a exterior ou interior).

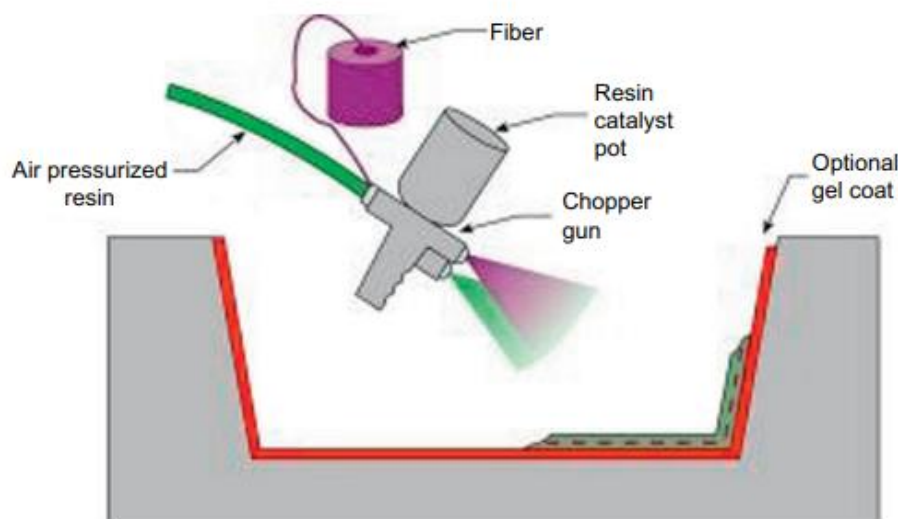


Figura 3.8: Esquema geral da moldação por projeção [35].

O processo de projeção para além de ser simples na aplicação da fibra e da resina, também não tem grande necessidade de aplicação de pressão e temperatura. Normalmente, a cura é executada num forno para uma maior taxa de produção de componentes. Relativamente à aplicação de pressão na cura, não é utilizada. É necessário durante o processo ter a precaução de ir comprimindo contra o molde as camadas após a projeção das mesmas de modo a evitar espaços vazios e bolhas.

A sequência de passos a seguir durante o fabrico de uma peça segundo o processo de projeção é a seguinte: inicia-se com a limpeza e polimento do molde para uma melhor facilidade aquando do desmolde. De seguida é aplicada uma camada de material que dá as características estéticas à parte exterior ou interior do molde, de modo que esta camada inicial não fique com as fibras a serem

notadas e mal acabadas, é aplicado e curado um revestimento barreira. Com auxílio da pistola de projeção, é feito o empilhamento da resina, fibra e catalisador em simultâneo. O movimento da pistola deve ser feito de modo a fazer o empilhamento o mais uniformemente possível de modo a garantir uma espessura constante em redor de todo o molde. Enquanto a projeção está a ser executada é também aconselhável passar um rolo para fazer a compactação do material aplicado contra o molde, de modo a garantir uma superfície mais uniforme e suave e também para reduzir as bolhas de ar, caso existam. De modo opcional, pode ainda haver a necessidade de colocação de um núcleo caso a peça seja uma *sandwich*. O laminado é deixado a curar, finalizada a cura é desmoldado o componente podendo ser feitas ainda algumas correções/alterações depois do desmolde. No final e de modo a garantir o sucesso do processo, a peça deve ser inspecionada no que toca a tolerâncias dimensionais, qualidade dos acabamentos exteriores assim como aspetos estruturais (rigidez), podendo a peça ser rejeitada caso não cumpra algum dos requisitos.

Algumas das vantagens deste processo são [32]:

- É um processo económico para fabrico tanto de peças de grandes dimensões assim como pequenas;
- Utilização de ferramentas e matéria-prima de baixo custo;
- Permite uma taxa de produção elevada;
- Pode ser automatizada num braço robótico;
- Não necessita de muitos recursos humanos.

Algumas das desvantagens do processo são [32]:

- Não é adequado para o fabrico de peças com requisitos estruturais importantes;
- É difícil o controlo da quantidade de fibra no processo, assim como manter uma espessura constante ao longo do molde, muito dependente da capacidade do operador;
- Como no processo de *Wet Lay-Up* e pelo motivo de ser feito em molde aberto, o ambiente de fabrico neste processo é muito nocivo;
- Processo com pouca repetibilidade, inapropriado para peças que necessitem de tolerâncias geométricas apertadas;
- Acabamentos de fraca qualidade.

3.2.4 Enrolamento filamental

O enrolamento filamental é um processo de fabrico que envolve o enrolamento de fibras pré-impregnadas em redor de um molde simétrico rotativo (mandril). Pela alteração da velocidade angular do mandril juntamente com a velocidade linear do sistema de guia é possível obter diferentes padrões, permitindo o controlo das propriedades mecânicas da estrutura em compósito obtida, tal como é possível observar pela Figura 3.9. Equipamentos mais recentes utilizam controlo numérico computadorizado, CNC (*Computerized Numerical Control*), conseguem controlar até 6 eixos, sendo possível definir desta forma o ângulo das fibras assim como a espessura obtida. O enrolamento filamental de uma estrutura em *sandwich* começa pela disposição da fibra junto do molde, superfície interior, interrompe-se o sistema e coloca-se o núcleo, depois reinicia-se o processo para a colocação da fibra para se formar a superfície exterior [36].

As aplicações mais comuns deste tipo de processo de fabrico são estruturas tubulares esbeltas e a principal vantagem assenta na adoção da automação no procedimento [37].

Em geral as matérias-primas para este processo também são de fácil acesso. As fibras utilizadas são contínuas e devem estar na forma de rolo e devem passar por um banho de resina que as impregna. Fibras de vidro, carbono e *kevlar* são utilizadas, embora as mais comuns sejam as fibras de vidro devido ao seu baixo custo. Quanto às resinas, as mais comuns tal como nos processos anteriormente descritos são resinas de epóxi, poliéster e viniléster.

Relativamente às ferramentas necessárias, estas para além de todo o sistema associado ao processo, o fundamental é o molde (mandril) que normalmente é de natureza metálica podendo ser de aço ou alumínio. Os mandris de aço são cromados em certas aplicações para obter um acabamento o mais suave possível para auxiliar a fácil remoção da peça do mandril. Mandris cilíndricos não são caros comparando com os custos de fabrico de moldes complexos característicos dos outros processos abordados anteriormente.

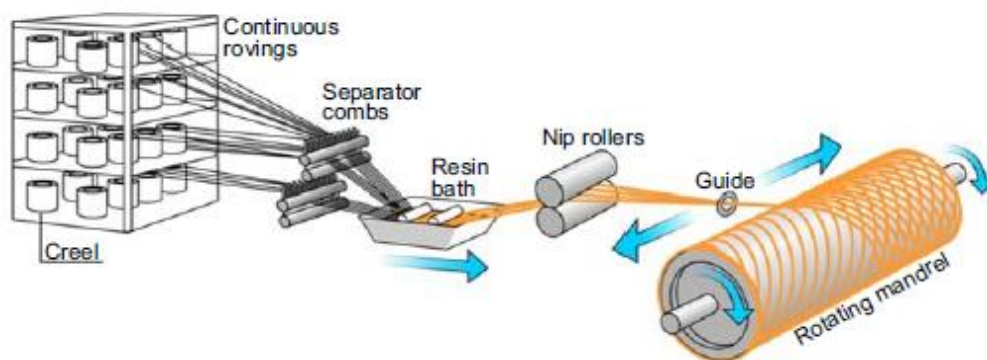


Figura 3.9: Esquema geral do processo de enrolamento filamental [36].

É aplicada pressão durante o processo através da passagem dos fios pela guia que se vai deslocando à medida que o mandril vai rodando. É necessário ter especial cuidado na tensão dos fios da fibra, com tensão a mais, a resina pode ser expulsa e tendo a menos pode haver pouca adesão das várias camadas assim como excesso de resina. Depois de terminado o empilhamento, o laminado é curado à temperatura ambiente ou num forno a alta temperatura para uma cura mais rápida.

O procedimento de fabrico de forma geral é o seguinte: começa com colocação dos rolos de fibra nos carretéis do sistema. A resina deve ser colocada num depósito juntamente com o endurecedor e formar uma mistura homogénea para depois ser inserida num recipiente onde é dada a impregnação da fibra. No molde deve ser colocado um agente desmoldante assim como uma camada de revestimento caso seja necessário obter uma superfície interna lisa e de grande qualidade. De seguida as fibras pré-impregnadas devem ser colocadas no ponto inicial da superfície do molde rotativo. O mandril assim como a guia iniciam o movimento segundo a disposição de fibras que se pretende. Os fios vão se depositando na superfície do mandril. Caso se pretenda uma superfície externa lisa, pode ser adicionado um revestimento depois do processo de enrolamento ter terminado. No fim, o laminado vai ser curado à temperatura ambiente ou em ambiente controlado. Após a cura do laminado este é desmoldado/removido do mandril. Pode dar-se o caso de o mandril ser também parte integrante da estrutura.

Algumas das vantagens deste processo são [32]:

- Para geometrias esbeltas é o método mais indicado com vantagens sob o ponto vista económico e de desempenho estrutural;
- A matéria-prima é de baixo custo;
- É um processo totalmente automatizado, logo menores defeitos e grande repetibilidade do mesmo;
- Indicado para grandes volumes de produção;
- Proporção elevada de fibras.

Algumas das limitações do processo são [32]:

- A principal limitação do método assenta no facto de que apenas permite o fabrico de componente esbeltos/convexos;
- Para ângulos pequenos (0 a 15°), isto é, orientações segundo o eixo de rotação do mandril é difícil a laminação da peça;
- Investimento inicial elevado;
- A superfície exterior pode apresentar algumas imperfeições;
- Durante o enrolamento filamental, é difícil obter uma distribuição uniforme segundo a espessura.

3.2.5 Pultrusão

O processo de pultrusão no fabrico de componentes em compósito, é um método que a partir do reforço em forma de fibra contínua, assim como da resina, resulta um perfil de secção constante [30]. O processo é semelhante ao processo de extrusão de metais na criação de perfis, só que em vez da matéria-prima ser empurrada contra uma matriz, no caso da pultrusão é puxada de modo a originar o perfil dado pela matriz, como é possível observar pela Figura 3.10.

Esta tecnologia de fabrico é simples, de baixo custo, contínuo e automático. As principais aplicações deste processo são nas áreas dos transportes, construção, marítima e aeroespacial [38].

O processo de pultrusão normalmente utiliza fibras unidireccionais, reforços em forma de rolo de vidro, carbono e aramida ou também podem ser usados tecidos bidireccionais e multidireccionais de forma a melhorar propriedades mecânicas nas direcções desejadas. A resina mais comumente utilizada é poliéster insaturada tendo vantagens a nível de desempenho/preço assim como fácil processamento. Um procedimento comum, é a adição de partículas coloidais (*fillers*) na resina de modo a melhorar a resistência química, à radiação e ao fogo.

Ao contrário do que acontece nos processos anteriormente descritos em que a ferramenta base para os processos é um molde, neste é utilizada uma matriz. Esta tem a função de dar a forma ao perfil com a passagem das fibras pré-impregnadas pela mesma. A matriz tem associado um sistema de aquecimento para uma cura mais rápida do produto final. No fabrico de perfis pelo processo de pultrusão, considerações como a espessura das paredes, raios de curvatura dos cantos, tolerâncias, planicidade e acabamento da superfície são tidas em conta. Estas características estão diretamente relacionadas com o desenho da matriz, que deve ser ligeiramente afilada de modo a garantir facilidade na entrada das fibras pré-impregnadas.

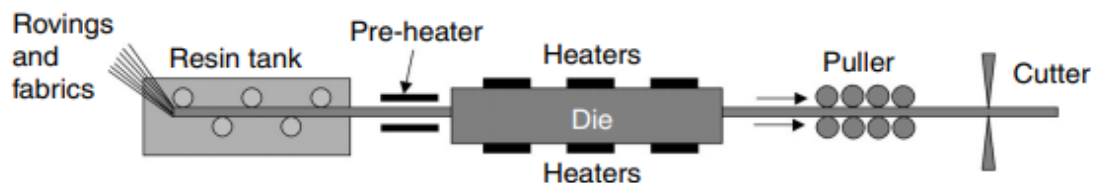


Figura 3.10: Esquema geral do processo de pultrusão [38].

Durante o processo de pultrusão, não existe aplicação de pressão tanto na fase em que atravessa a matriz assim como na cura. Este caracteriza-se por ser um processo de baixa pressão. A compactação e solidificação é providenciada pela matriz. Há aplicação de calor na matriz de forma a curar a resina e para que na saída o perfil tenha a forma desejada.

O procedimento geral para a concepção de um perfil criado segundo o processo de pultrusão é o seguinte: inicialmente é necessário colocar os rolos de fibra nos carretéis do sistema, deve ser preparada a resina e colocada no local onde será dada a impregnação das fibras. A matriz é aquecida até se atingir uma determinada temperatura para ser possível a cura da resina. Estando a matriz totalmente aquecida é iniciado o processo de pultrusão, onde o perfil é extraído por um sistema de puxadores. Estando o perfil totalmente curado, este é cortado à medida assim como é dado um tratamento superficial à peça para melhorar o acabamento da mesma.

Algumas das vantagens do processo são [38]:

- Não tem limitação de dimensão, tanto podem ser produzidas peças compridas como curtas;
- As fibras ficam bem alinhadas pelo que, permite uma boa compactação, elevado teor de fibra e grande resistência mecânica;
- Baixos custos de produção, foi evidenciado que os custos associados ao processo de pultrusão é cerca de 41% do processo de enrolamento filamentar e 26% do processo de *Prepreg Lay-Up*. Cerca de 80 a 90% do custo de componentes feitos por pultrusão correspondem à matéria-prima utilizada, pelo que para grandes volumes de produção o custo da maquinaria assim como de mão de obra é uma pequena porção do custo da peça;
- Elevada taxa de produção dado ser um processo praticamente automatizado;
- Boa qualidade e repetibilidade das peças produzidas devido à inexistência de mão de obra humana no processo.

Algumas das limitações do processo são [38]:

- Formas complexas e afiladas não são possíveis de produzir, apenas componentes de secção constante;
- Peças com paredes finas são difíceis de fabricar;
- Os ângulos das fibras são limitados a 0° embora com tecidos seja possível atingir propriedades bidirecionais;
- O processo não é ajustado para o fabrico de estruturas com carregamentos complexos. Para estruturas feitas por pultrusão estas apresentam muito boas propriedades predominantemente na direção axial;
- Problemas como por exemplo: espaços vazios, cura não uniforme assim como existência de bolhas.

3.2.6 Moldação por transferência de resina

O processo de moldação por transferência de resina é um processo de molde fechado que consiste na colocação dos reforços em forma de manta ou tecido assim como do núcleo, ambos secos sobre o molde que depois é fechado. De seguida o sistema que tem a resina é pressurizado utilizando uma máquina de injeção que bombeia a resina para o interior do molde até que toda a fibra fique totalmente impregnada. O molde deve ser rígido o suficiente de forma a não haver distorção nem abertura do mesmo aquando da injeção da resina. Dependendo da dimensão da peça a moldar pode ser inviável a utilização deste método devido à dimensão necessária que o molde tem de ter [36]. O processo RTM (*Resin Transfer Moulding*) permite o fabrico de componentes com formas complexas com controlo sobre a direção das fibras.

Os principais desafios neste processo de fabrico assentam no escoamento da resina, cura e transferência de calor ao longo do percurso da resina. Durante o preenchimento do molde com a resina, esta ao ir fluindo vai curando, resultando num aumento da sua viscosidade, pelo que maior dificuldade na injeção vai existir. Para peças de grandes dimensões é necessário estudar a existência de mais do que um ponto de injeção. As principais aplicações deste processo são na indústria automóvel, aeroespacial, bens desportivos, entre outros.

O processo RTM permite a utilização de ferramentas de menor custo do que as utilizadas em processos de injeção e compressão uma vez que a pressão usada nestes dois últimos processos é muito superior à usada no processo RTM. Dessa forma, os moldes são menos solicitados pelo que podem ser mais leves, implicando uma redução de custos no seu fabrico. O facto de ser utilizado um molde fechado (macho e fêmea) permite um ambiente de produção mais limpo e seguro. Os moldes tipicamente são de natureza metálica (aço ou alumínio) mas para efeitos de protótipos podem ser de natureza polimérica. Na conceção do molde é necessário ter em atenção a expansão térmica assim como a vedação do mesmo para que as tolerâncias da peça depois da cura sejam cumpridas.

A sequência de passos que este processo de fabrico compõe é a seguinte: colocação da resina num depósito de modo a ser possível o bombeamento da mesma para o molde, de seguida aplicação de um agente desmoldante em todo o molde assim como uma camada de revestimento para um melhor acabamento das superfícies, ficando o molde pronto para a colocação do reforço preformado. O molde é aquecido e fechado, de seguida é iniciado o processo de enchimento até à total impregnação do reforço. É necessário aguardar a finalização do processo de cura para depois desmoldar a peça. Na Figura 3.11 está apresentado o esquema geral do processo acima descrito.

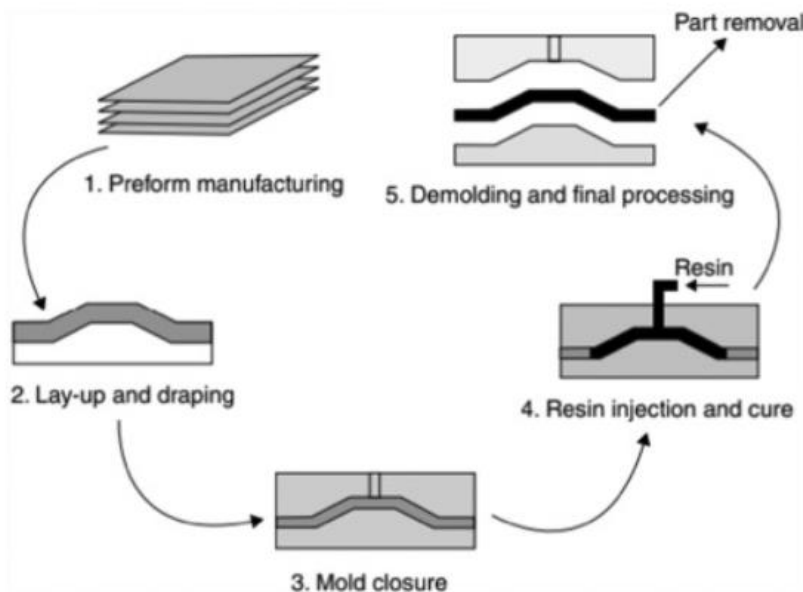


Figura 3.11: Esquema geral do processo RTM [39].

Algumas das vantagens deste processo são [32], [36]:

- Investimento inicial baixo em comparação com injeção e compressão;
- Peças com boa tolerância dimensional;
- Fabrico de peças com geometrias complexas;
- Peças com bom acabamento em toda a superfície devido ao processo ser executado em molde fechado;
- Boas propriedades mecânicas devido à orientação das fibras (variedade de orientações);
- Elevada fração de fibra no componente;
- Baixas emissões durante o processo;
- Automatização do processo;
- Grande variedade de materiais de reforço que podem ser usados.

Algumas das limitações do processo são [32], [36]:

- Os custos das ferramentas são superiores relativamente aos da laminação manual;
- O dimensionamento e desenho dos moldes é complexo;
- Para pequenas escalas de produção não é compensador.

Um processo idêntico ao RTM é o SRIM (*Structural Reaction Injection Molding*), este último é em tudo igual ao processo de moldação por transferência de resina no que toca tanto às ferramentas usadas assim como na sequência de passos do processo, as diferenças são que no processo SRIM as fibras usadas são curtas, a resina utilizada é diferente assim como tem um método distinto de mistura da resina.

3.2.7 Infusão

Os processos de fabrico de infusão, VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*) e SCRIMP (*Seeman Composite Resin Infusion Moulding Process*) são baseados no princípio de diferença de pressão entre a fonte de resina e o saco de vácuo permitindo o transporte de resina, impregnando desta forma os reforços secos. A principal diferença entre os processos de infusão e RTM assenta na ferramenta utilizada para conformar a peça. O processo RTM utiliza um molde fechado rígido para que a injeção da resina seja possível, uma vez que terá de ter uma pressão superior à ambiente, enquanto que para o processo de infusão é utilizado um molde aberto que é fechado com uma película flexível (saco de vácuo) e a injeção da resina é feita a uma pressão abaixo da ambiente através do vácuo [40].

Devido aos baixos custos das ferramentas utilizadas e a grande qualidade das peças moldadas, a infusão foi um processo adotado por um grande número de indústrias, particularmente no fabrico de peças de grandes dimensões como por exemplo: o casco dos barcos ou pás de turbinas eólicas. O processo de infusão tem verificado ao longo do tempo uma série de modificações. Um exemplo disso é a diferença muito residual que existe no processo de VARTM e SCRIMP. Estes dois processos de infusão são em tudo iguais tanto no procedimento como nos materiais utilizados, diferenciando-se na forma como a resina é injetada para o interior do saco. No processo de VARTM a resina é colocada apenas por um canal, já no processo de SCRIMP são utilizados vários canais ou um meio de distribuição 2D de forma a reduzir o tempo de impregnação, assim como a distância a percorrer pela resina. Tanto a resina como os reforços podem ser os mesmos utilizados no processo VARTM, mostra-se na Figura 3.12 a comparação dos processos [41].

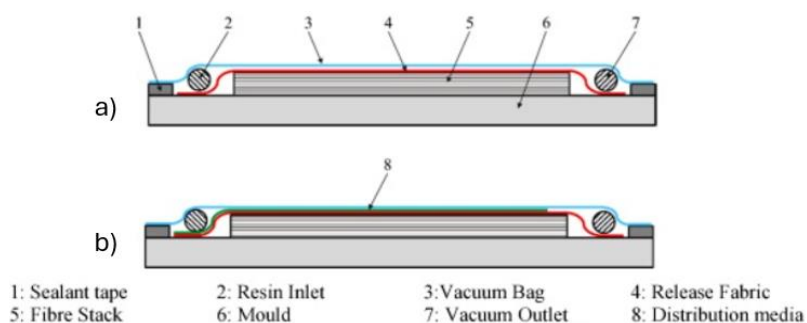


Figura 3.12: Esquema geral dos processos de infusão:(a) VARTM, (b) SCRIMP adaptado de [41].

A matéria-prima utilizada no processo de infusão são fibras de carbono e vidro em forma de tecidos secos uni ou bidirecionais. As resinas utilizadas neste processo têm normalmente menor viscosidade relativamente às utilizadas nos processos de fabrico tradicional. O material do núcleo, caso seja um componente em *sandwich*, deve ter a permeabilidade necessária de modo a permitir o escoamento da resina entre as faces do componente para que fiquem coladas.

Relativamente às ferramentas utilizadas, o componente mais importante como na maioria dos processos de fabrico em compósito é o molde que pode ser macho ou fêmea. Apenas é necessário um molde, ao contrário do que ocorre no processo RTM. Embora em ambos os processos sejam usados moldes fechados, nos processos de infusão o fecho é a partir de um saco de vácuo. Para este processo é ainda necessária uma bomba de vácuo, fita-cola para vedação do molde, um depósito onde está a resina, uma armadilha para recolha do excesso de resina após passagem pelo molde que evita a entrada de resina na bomba de vácuo, um tecido removível e no caso do processo SCRIMP acresce uma rede de distribuição de resina.

A sequência de etapas para o fabrico de um componente por infusão inicia com a construção do molde que deve apresentar para além da forma do componente, abas para facilitar a colocação do saco de vácuo. É colocado um agente desmoldante na superfície do molde, assim como um revestimento para a peça apresentar um melhor acabamento. De seguida são empilhados os tecidos secos de acordo com as orientações definidas anteriormente na fase de projeto. Em caso de ser uma estrutura em *sandwich*, deve acrescentar-se o material do núcleo. Para assegurar que os tecidos secos ficam bem agarrados às paredes do molde até à injeção da resina, pode ser utilizado uma cola spray para uma melhor adesão dos mesmos. Estando o empilhamento concluído, é colocado um tecido removível para garantir que não haverá excesso de resina sobre o laminado assim promover um bom acabamento da parte em contacto com o saco de vácuo. De seguida coloca-se o saco de vácuo devidamente fechado e vedado em volta do molde. É depois colocada a entrada da resina assim como a saída para o vácuo, ficando o sistema pronto a ser iniciado. Estando os tecidos devidamente embebidos, interrompe-se a injeção de resina. No entanto, a cura em vácuo continua por um período estipulado. Quando a cura estiver completa retira-se o saco, assim como todas as partes que não constituem a peça. No final remove-se a peça do molde e fica pronta para ser utilizada.

Algumas das vantagens deste processo são [32]:

- Baixo custo relativamente ao processo RTM;
- O ambiente de produção é mais seguro por ser utilizado um molde fechado (redução do odor);
- Poucas ferramentas necessárias ao processo;
- Elevada proporção de fibras no laminado;
- Fabrico de peças com geometrias complexas;

- Boas propriedades mecânicas;
- Necessidade reduzida de recursos humanos;
- Poucos espaços vazios;
- Tem bom acabamento nos dois lados do laminado;
- Custo mais reduzido relativamente à laminação com pré impregnados;
- Repetibilidade do processo.

Tem desvantagens como por exemplo [32]:

- Necessária experimentação para saber as localizações ideais tanto para a entrada da resina como para a saída do vácuo;
- Existência de pontos onde a resina tenha dificuldade em chegar;
- É necessária uma bomba de vácuo assim como uma armadilha e outros materiais adicionais relativamente às técnicas de laminação tradicional;
- Processo relativamente lento;
- A cura pode ser feita de forma não-uniforme.

3.2.8 Processos de injeção e compressão de compósitos

Nesta subsecção dos processos de fabrico são abordados em simultâneo os processos de conformação de compósitos de injeção e compressão, uma vez que para efeitos estruturais não são métodos relevantes.

O processo de moldação por compressão, apresentado na Figura 3.13 é um processo muito utilizado principalmente na indústria automóvel, uma vez que permite substituir o processo de estampagem quase na totalidade. Este processo consiste na compressão de uma mistura previamente preparada que aglomera fibras com uma matriz termoendurecível que é colocada no interior de um molde fechado e aquecido que depois é comprimido. O molde deve ser aquecido até à cura estar completa, no fim é aberto e é retirada a peça. É um processo muito idêntico ao processo de compressão de polímeros. Apresenta vantagens como: permite uma taxa de produção elevada, baixo custo das peças produzidas e repetibilidade do processo. Alguns inconvenientes são: investimento inicial elevado, para protótipos e pouca quantidade de peças não é economicamente viável e para componentes estruturais não é adequado.

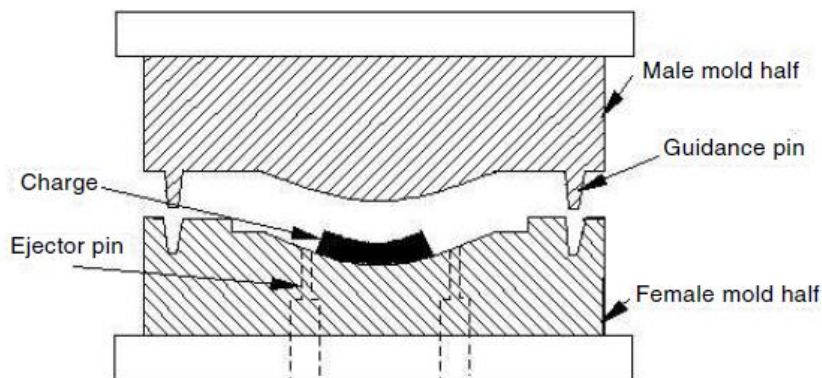


Figura 3.13: Esquema geral processo de fabricação de compressão de compósitos [32].

Relativamente ao processo de injeção de compósitos, RIM (*Reaction Injection Molding*), Figura 3.14, este embora mais comum no processamento de polímeros, também apresenta relevância na construção de compósitos. É um processo com alto volume de produção e normalmente utilizado na indústria automóvel e de bens gerais. É idêntico ao processo de compressão por serem utilizados também moldes bipartidos que normalmente são previamente aquecidos e depois no caso da injeção, é injetada a mistura para o interior do molde. Depois de curada a peça, esta é retirada. Os moldes são tipicamente feitos em aço. A matéria-prima utilizada é uma mistura de fibras e resina, em que normalmente a fração de fibras é relativamente baixa, 20%. As vantagens e limitações do processo são as mesmas que as do processo de moldação por compressão.

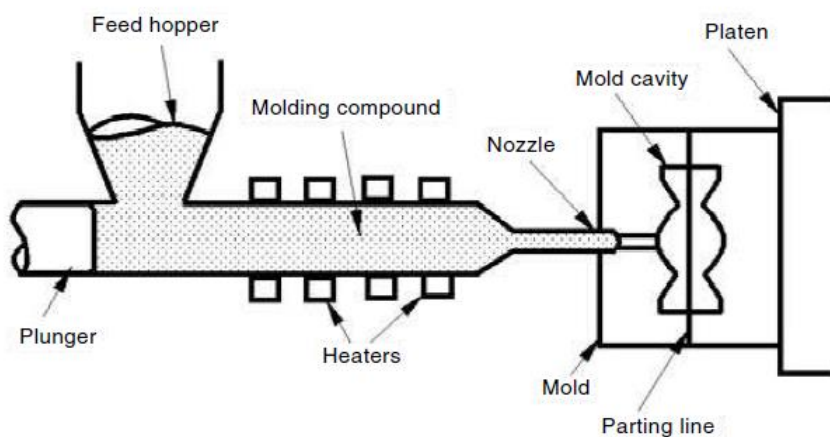


Figura 3.14: Esquema geral do processo de injeção de compósitos de matriz termoendurecível [32].

3.3 Trabalhos relacionados

Neste subcapítulo e de forma a concluir a revisão bibliográfica da presente dissertação, é feita uma exposição dos métodos utilizados no fabrico de estruturas monocoque, que servem de exemplo aos métodos de fabrico da carenagem do trenó. Por falta de informação no que toca a trabalhos já realizados relativamente aos processos de fabrico adotados na construção de carenagens de trenós, foram analisados os processos de fabrico de monocoques de duas competições universitárias relativamente famosas no meio académico de Engenharia: a competição *Shell Eco Marathon* e o *Formula Student*. Ambas têm uma estrutura idêntica, pelo que são um bom ponto de partida para a conceção do fabrico da carenagem.

3.3.1 Exemplo 1

O primeiro trabalho apresentado é parte integrante de um relatório de um carro para participar na competição *Shell Eco Marathon* [42] na edição de 2013, cujo objetivo é o desenvolvimento de um protótipo que tenha o menor consumo de combustível possível, sendo um dos focos essenciais a conceção de uma fuselagem ótima sob o ponto vista aerodinâmico. Embora a competição de *Bobsleigh* seja totalmente diferente, tem este ponto em comum com a competição anteriormente referida.

O fabrico do carro inicia com a conceção de um modelo sólido à escala feito em espuma, sendo este o molde macho que é utilizado no empilhamento dos tecidos. O corte da espuma foi feito através de fio quente, no entanto a fuselagem tem formas complexas com dupla curvatura, o que torna o processo de corte a fio quente não indicado. Este tem de estar sempre esticado entre dois pontos da CNC, logo apenas consegue descrever curvaturas simples. De modo a resolver esse problema os autores do projeto, para além de enviar à empresa de maquinação o modelo da fuselagem, enviaram também as secções transversais de três em três polegadas de uma ponta à outra do carro. O procedimento adotado pela empresa tem em conta as secções referidas anteriormente, permitindo traçar o perfil, nas transições (em linha reta), ficando no final um conjunto de peças separadas que quando unidas constituem a fuselagem do carro. As secções têm a forma correta, mas a transição entre as mesmas não está a exatamente fiel ao projeto. Na Figura 3.15 está apresentado o modelo assim como as secções que o constituem.

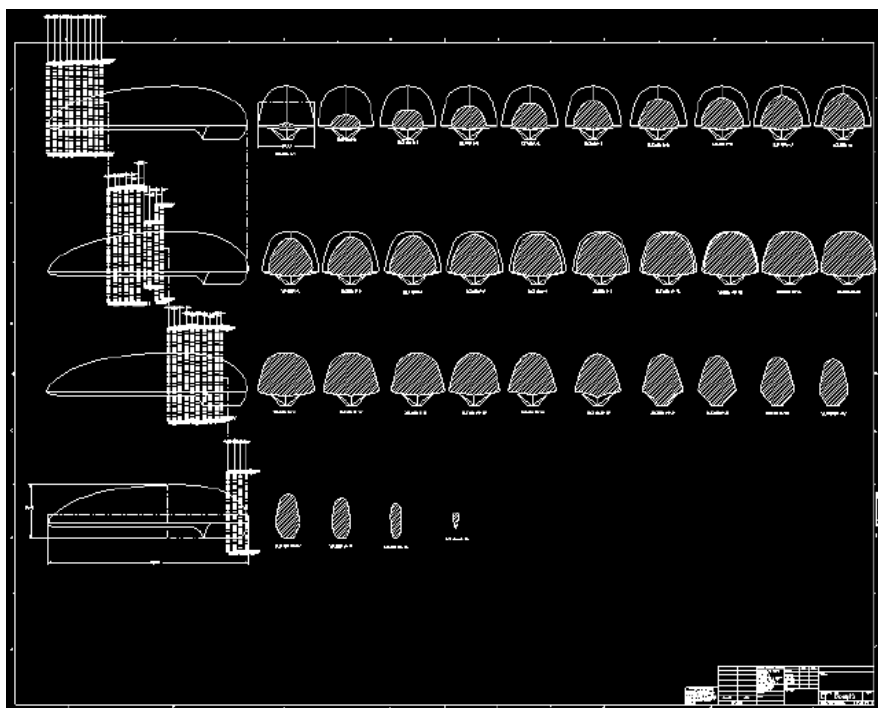


Figura 3.15: Modelo de discretização em secções para posterior corte a fio quente [42].

A geometria assim obtida, não sendo ainda a ideal, exige ainda um processo de polimento adicional para poder dar uma forma mais fidedigna à fuselagem. Esse processo foi levado a cabo manualmente pelo que erros adicionais foram inevitavelmente incorporados, não permitindo assim um corpo perfeitamente simétrico, como era o desejável. O corte a fio quente é assim um processo relativamente fácil e simples, mas para o caso de estruturas complexas (duplas curvaturas) pode não ser o mais adequado, uma vez que necessita de recurso humanos adicionais, implicando erros na forma.

Depois de polido todo o corpo, foi verificado a ocorrência de danos no modelo devido ao polimento, nomeadamente cavidades, pelo que foi aplicado um enchimento para os mesmos seguido de uma aplicação de resina em toda a superfície. Após os revestimentos aplicados, foi feito um segundo polimento com uma lixa muito fina para um melhor acabamento. Estando o modelo/molde feito como é possível ver pela Figura 3.16, passaram à aplicação de seis camadas de cera que serviu como agente desmoldante do corpo.

Depois da cera estar completamente seca, foi iniciado o processo de empilhamento dos tecidos secos alternando com a aplicação da resina, tal como no processo de laminação manual já descrito neste mesmo capítulo do trabalho na secção 3.2.2.



Figura 3.16: Modelo/molde macho superior [42].

Embora não estando explícito no trabalho, o modelo depois de trabalhado foi cortado em duas componentes, uma superior e outra inferior constituindo assim o molde macho superior e inferior, respectivamente. O trabalho de empilhamento dos tecidos foi descrito como difícil uma vez que a geometria da fuselagem é bastante convexa. À medida que os tecidos iam ficando embebidos de resina o processo ia ficando mais simples, devido à adesão criada entre os mesmos e o molde macho superior. Com o processo de deposição das camadas finalizado, o molde, juntamente com o empilhamento, foi colocado num saco de vácuo, como é possível ver pela Figura 3.17, para uma melhor adesão das camadas ao molde. No entanto, o processo de vácuo não correu da melhor forma pois em vez do saco ser fechado no plano horizontal onde o molde estava colocado, envolveram toda a metade superior no saco, pelo que as abas que dividem a parte superior da inferior ficaram com muito pouca qualidade.



Figura 3.17: Saco de vácuo aplicado ao molde [42].

Finalizado o processo de cura, foram cortados os excessos e foi feito um polimento final para depois ser aplicada uma pintura. O processo de fabrico da parte inferior do carro foi feito da mesma forma que a superior e no final ambas as parte foram coladas formando o carro.

3.3.2 Exemplo 2

Outro trabalho distinto, tanto no processo assim como nas ferramentas e materiais utilizados, está descrito por *Monomen* na conceção de um carro para participar na competição *Formula Student* [29] na edição de 2023.

Os materiais utilizados foram pré-impregnados de carbono que não necessitam de autoclave para a sua cura, OOA (*Out of Autoclave*), atingindo, no entanto, as mesmas propriedades que aquelas que seriam atingíveis com autoclave. A estrutura em monocoque incluía também um núcleo em espuma. Outro consumível utilizado foi resina epóxi adesiva para a colagem do núcleo à parte interior e exterior da carenagem do carro.

Neste projeto, foi necessário em primeiro lugar criar um molde macho ou modelo e a partir dele criar o molde fêmea através de laminação. O molde macho ou modelo foi maquinado por uma CNC de cinco eixos, a partir de placas de poliuretano de baixa densidade coladas que formavam um bloco maciço, Figura 3.18.



Figura 3.18: Molde macho em maquinação [29].

Com o molde macho totalmente maquinado, a equipa fez um polimento adicional assim como a aplicação de uma tinta primária de modo a reduzir a porosidade do material do molde, uma vez que a espuma de poliuretano é muito porosa. Posteriormente, foi aplicado um agente desmoldante. Estando o molde macho pronto, os autores passaram à laminação do molde fêmea sobre o molde macho. O molde fêmea utiliza também pré-impregnados de fibra de carbono tal como a carenagem do carro. O objetivo desta decisão foi a de alcançar um nível mais elevado de estabilidade térmica,

assim como um melhor acabamento quando comparado com outros processos de fabricação em compósito, como por exemplo: laminação manual ou infusão. Estes necessitam de tratamentos posteriores, ao contrário do processo adotado.

Depois de curadas e desmoldadas as duas metades do molde fêmea, Figura 3.19, foram feitas as aberturas necessárias segundo o que estava definido no projeto, assim como furos adicionais nas abas do molde para fixar ambas as metades, de modo a prevenir problemas de aberturas indesejadas devido à flexão.



Figura 3.19: Metades dos moldes fêmea [29].

Estando os moldes fêmea prontos a ser utilizados para o empilhamento, o trabalho que se segue na construção pode ser dividido em 4 fases que são separadas entre si com curas na estufa: a primeira fase compreendeu o empilhamento da primeira camada (casca exterior do carro), a segunda incluiu a colocação do aro frontal assim como a aplicação de camadas de compósito em volta do mesmo, a terceira englobou o corte e posicionamento do material do núcleo e por fim, na última fase, foram dispostas as últimas camadas que constituem a casca interior. A Figura 3.20 apresenta um esquema representativo das fases adotadas pela equipa do projeto durante a construção do monocoque.

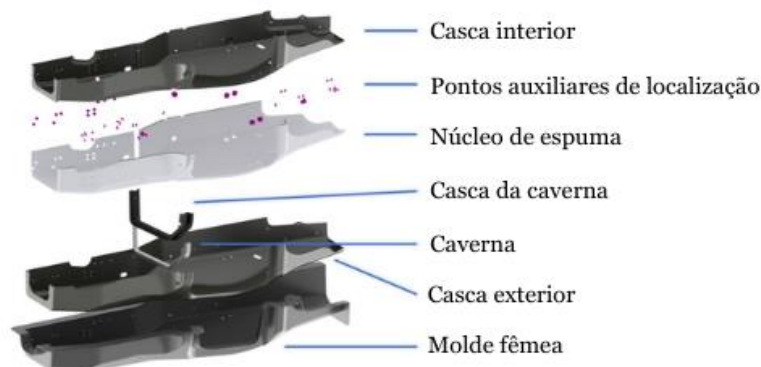


Figura 3.20: Fases da construção do monocoque de um automóvel, adaptado de [29].

Na fase inicial, em que se dá a aplicação das camadas exteriores de compósito, a primeira é dada com os moldes ainda devidamente separados; depois das camadas iniciais, os moldes fêmea são juntos e aparafusados de forma a não haver qualquer movimento relativo entre eles. A partir deste ponto, todas as restantes camadas são dispostas com os moldes juntos. Para uma melhor adesão das camadas ao molde, foram sendo usados sacos de vácuo de modo a melhorar o processo de compactação das mesmas.

A segunda fase compreende a colocação do aro frontal assim como do empilhamento das camadas em volta do mesmo. Depois da cura da casca exterior estar finalizada, o aro foi colocado na posição inicialmente prevista no projeto do carro através de colagem utilizando um adesivo de natureza epoxídica. As camadas foram colocadas sobre o aro assim como por cima da casca e alternadas com fases de compactação utilizando sacos de vácuo.

Na terceira fase a equipa procedeu ao corte e posicionamento dos materiais que compõem o núcleo. A espuma em questão é normalmente aquecida para uma melhor conformação, de modo a tornar o processo mais rápido. Os autores desenharam em CAD as formas que necessitavam e utilizaram-nas como *template* para o corte da espuma assim como usaram parafusos/pinos integrados no molde de modo a posicionar o núcleo no local correto. Foi ainda usada uma resina adesiva de modo a permitir a colagem entre a casca interior e o núcleo. No final, os moldes foram ensacados em vácuo e colocados na estufa para garantir a adesão do núcleo à forma da casca interior, colocada anteriormente, assim como permitir um escoamento apropriado da resina no material do núcleo.

Na quarta fase foram colocados apoios já inicialmente previstos no projeto. De seguida, sobre o núcleo e os apoios, foram dispostas as camadas que compõem a casca interior do carro. A disposição das mesmas foi feita de forma totalmente semelhante à disposição das camadas que constituem a casca exterior. No final desta fase as camadas foram curadas com o auxílio de sacos de vácuo e de uma estufa.

Por fim, foi feito o desmolde da peça, desaparafusados os apoios que uniam as flanges dos moldes assim como cortados os pinos guia que serviram para localização dos diferentes empilhamentos. Os pinos guia dificultaram o desmolde por estarem muito ligados ao molde. Foi novamente utilizado um dispositivo de corte CNC de cinco eixos para cortes e aberturas na carenagem do carro.

3.3.3 Exemplo 3

Outro trabalho idêntico de fabrico de um carro para participação na competição *Formula Student* do ano de 2013 foi feito por *Andersson et al* [43]. Neste projeto, para construir o monocoque do carro, os autores usaram um molde fêmea maquinado previamente. O molde é separado em duas partes, superior e inferior, e é em MDF tal como se pode ver pela Figura 3.21.



Figura 3.21: Parte inferior do molde em MDF [43].

Neste caso, não foi criado um modelo ou protótipo inicial, o molde fêmea foi executado diretamente por uma CNC de corte. Os autores decidiram construir o molde em MDF por ser um material de baixo custo e que consegue suportar elevada pressão e temperatura, normalmente utilizada nos processos de cura depois do empilhamento. No entanto, por ser um molde em MDF, este ficou bastante pesado quando comparado com moldes em fibra de vidro ou carbono. A título de exemplo, só a parte inferior do molde pesava cerca de 75 kg, o que o torna pouco prático de transportar. Os passos seguintes consistiram no empilhamento, que embora não esteja bem explícito, utilizou o processo de laminação manual. Esta escolha é explicada pela falta de condições que não permitiram usar os processos de *Prepreg Lay-Up* ou infusão.

3.3.4 Exemplo 4

Por último apresenta-se também um projeto de fabrico de um chassis monocoque para participar na competição *Formula Student* da edição de 2021, à semelhança dos dois projetos anteriores aqui já descritos [44]. O fabrico inicia com a maquinação de um molde macho ou protótipo, Figura 3.22, em espuma poliuretano, que depois de polido e aplicado um revestimento é iniciado o processo de empilhamento de fibra de vidro que irá compor o molde fêmea.

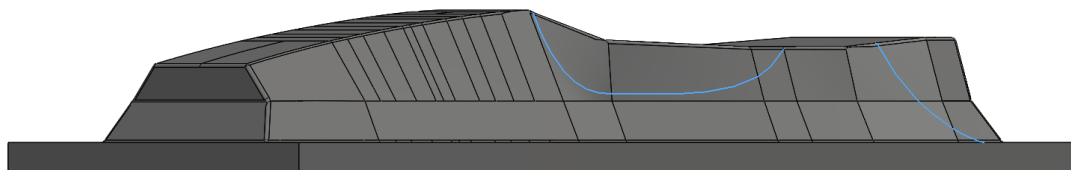


Figura 3.22: Molde macho [44].

O processo de fabrico utilizado para o molde fêmea foi o processo *Wet Lay-Up*. A primeira camada que contacta com o molde macho é constituída por um tecido muito fino. Após embebimento com a resina, são empilhados tecidos com maior espessura. Depois da colocação dos tecidos de gramagem média, é disposta uma massa de construção misturada com um endurecedor. Por fim, e em cima, é colocada um tecido grosso de fibra de vidro que conclui o empilhamento. Para garantir uma melhor compactação, é aplicado um saco de vácuo em volta do empilhamento, foi tido o cuidado de não danificar o molde macho de espuma. De seguida desmoldaram a peça e o molde fêmea foi sujeito a uma pós-cura com aquecimento para evitar deformações permanentes aquando da laminação do chassis do carro. O resultado do molde fêmea apresenta-se na Figura 3.23.

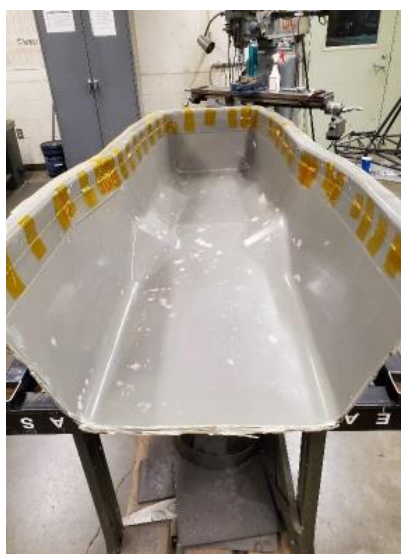


Figura 3.23: Molde fêmea inferior [44].

Estando o molde fêmea totalmente pronto para ser utilizado, os autores do projeto iniciaram a conceção do produto final. O chassis ao contrário do molde fêmea, foi feito em fibra de carbono pré-impregnado, pelo que o primeiro passo que adotaram foi a criação de *templates* em papel desenhados sobre o molde, obtendo-se assim as planificações e permitindo desta forma fazer os cortes no tecido pré-impregnado de forma mais assertiva e sem desperdícios. Depois do tecido que compõe o primeiro laminado ter sido cortado e sobre o molde fêmea ter sido aplicado um agente desmoldante, aquele é disposto sobre todo o molde. Deve ser destacado que a primeira camada que compõe a camada exterior do carro é igual para as duas metades que o constituem. Ao contrário do projeto de *Monomen*, esta estrutura foi feita em duas partes totalmente separadas e unidas no final (parte de baixo e cima). Após a finalização da primeira camada, o molde foi ensacado em vácuo. Finalizada a cura da primeira camada, Figura 3.24, procederam à disposição das camadas seguintes. O empilhamento foi feito segundo o dimensionamento do projeto. Estando o empilhamento completo, foi feita uma aplicação de vácuo assim como cura em autoclave. De seguida fizeram uma limpeza à superfície do laminado, cortaram o núcleo com as formas

adequadas ao molde e dispuseram-no seco na superfície do laminado para garantir que estava bem cortado. Para a construção do monocoque foram utilizados três tipos de núcleo: balsa, favo de abelha e alumínio. Para cada um destes tipos de núcleo aplicaram o adesivo mais indicado para cada um. Depois de colocados os adesivos, assentaram o núcleo e de seguida voltaram a ensacar em vácuo para uma melhor adesão do mesmo. Aplicaram uma camada única por toda a superfície anteriormente curada. Uma vez ser material pré-impregnado, foi aplicado vácuo. De seguida, foram dispostas as restantes camadas segundo o projeto e por fim mais um período de vácuo e autoclave. Estando as curas completas, foi feito o desmolde das duas partes do chassis.



Figura 3.24: Primeira camada de Prepreg sobre o molde [44].

Para a união das duas partes, laminaram os tecidos segundo o processo *Wet Lay-Up* tanto na parte interior como exterior do monocoque, Figura 3.25, aplicando simultaneamente resina com trinças.

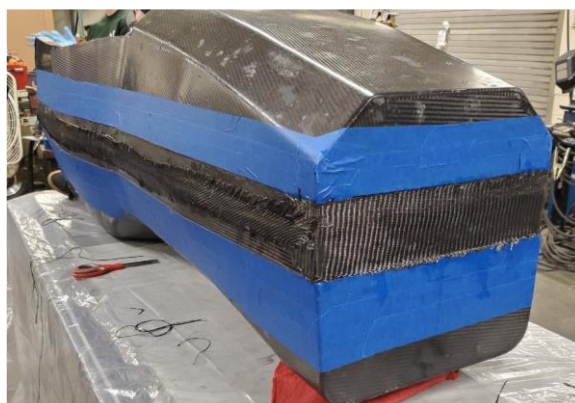


Figura 3.25: Colagem da parte superior à inferior [44].

4 Comparação dos processos/técnicas de fabrico

Neste capítulo descreve-se a metodologia adotada para a seleção do processo que melhor se adequa para o fabrico da carenagem do trenó. Tradicionalmente, a seleção do processo de fabrico de um determinado produto era realizada na fase de projeto detalhado, o que implicava que pontos cruciais relativos ao processo de fabrico não fossem identificados até esta fase do projeto. Tomando em consideração o processo de fabrico logo na fase do projeto concetual é possível aumentar a eficiência assim como evitar recuos no desenvolvimento do design do produto. Tipicamente a decisão de escolher um processo de fabrico adequado ao produto a desenvolver é feita por um especialista, que pela sua experiência empírica noutros projetos consegue ter uma melhor perceção face a uma pessoa com menor experiência passada.

Com vista a melhorar o procedimento de seleção de um processo de fabrico, alguns autores desenvolveram/utilizaram métodos de forma a tornar o processo mais sistemático e objetivo. Um exemplo dos trabalhos desenvolvidos foi executado por *Hambali et al* [45] cujo objetivo foi a partir da metodologia AHP selecionar o melhor método face aos critérios e subcritérios definidos, assim como as alternativas possíveis de serem aplicadas para o fabrico de uma viga em compósito para utilizar na indústria automóvel. Foram consideradas cinco alternativas de processos de fabrico: moldação por injeção, moldação por transferência de resina, SRIM, RIM e moldação por compressão. Foram analisados seis critérios e doze subcritérios. O resultado da metodologia aplicada indica que o processo mais adequado para o fabrico da viga é a moldação por injeção.

Outro trabalho desenvolvido que também usa a metodologia AHP, mas integrada com a ferramenta QFD (*Quality Function Deployment*), foi executado por *Kamal et al* [46]. O objetivo do artigo foi a escolha da melhor configuração de um UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) com base em requisitos do cliente assim como operacionais. A metodologia QFD baseia-se: nas necessidades e classificações do cliente, nos requisitos de projeto, na avaliação entre as necessidades do cliente e os requisitos de projeto, preenchimento da matriz de correlação que combina os vários requisitos entre si e, por fim, uma pesquisa da concorrência. Esta análise enquadra-se essencialmente no projeto global de um produto e não apenas na seleção do processo de fabrico. Este trabalho é relevante uma vez que utiliza a metodologia AHP para conhecer o vetor de prioridades de cada um dos requisitos do projeto.

4.1 Metodologia AHP

O processo analítico hierárquico é uma abordagem simples para a tomada de uma determinada decisão. É um método que permite refletir de forma numérica uma escolha, a partir de comparações com base na opinião/intuição do avaliador. Permite selecionar a melhor alternativa a partir de um conjunto de possibilidades, que estão associadas a uma série de critérios e subcritérios. Neste processo, quem toma a decisão realiza julgamentos simples entre pares de critérios com base numa escala, que se apresenta de seguida, de forma a calcular as prioridades para classificar cada uma das alternativas possíveis de seleção.

A metodologia AHP implica a existência de inconsistência no que toca à atribuição das avaliações, uma vez que é em grande parte subjetiva e por vezes apresenta dificuldades na avaliação. A forma mais simples para estruturar um problema de decisão é uma hierarquia composta por três níveis, tal como apresentado na Figura 4.1 em que: no primeiro nível encontra-se a meta a alcançar, de seguida encontram-se os critérios (podendo adicionalmente haver um outro nível onde se encontram subcritérios) e por último as alternativas possíveis de escolha.

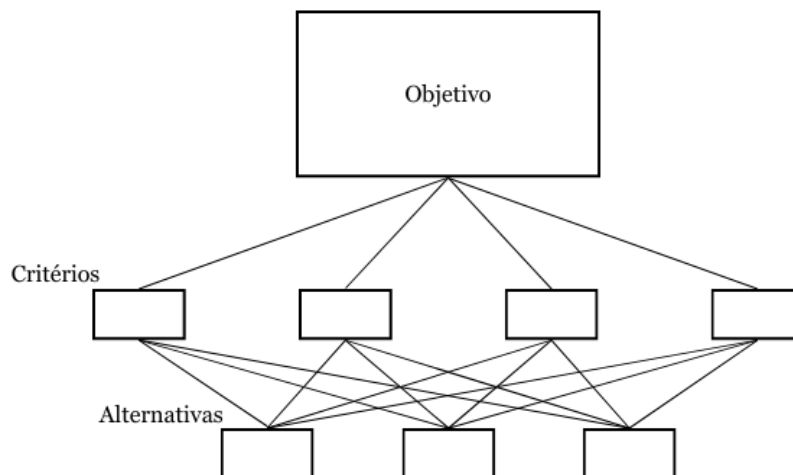


Figura 4.1: Hierarquia de três níveis, adaptado de [47].

Os julgamentos das comparações feitas entre pares de critérios devem obedecer à escala que se apresenta na Tabela 4.1. A escala recomendada por [47] compreende valores de $1/9$ a 9 , inclusivos, em que 1 reflete a indiferença de importância de um critério em relação ao outro e 9 significa extrema importância relativamente a outro critério. Os valores racionais representam o inverso dos números naturais constituintes da escala.

Tabela 4.1: Escala de importância de relação entre pares de critérios.

Intensidade da importância	Definição
1	Igual importância
2	Fraco
3	Importância moderada
4	Moderadamente superior
5	Fortemente importante
6	Forte superior
7	Muito forte
8	Muito muito forte
9	Importância extrema
Inverso dos valores acima	Se um critério i tem um valor de intensidade igual aos de cima comparado com j , então j quando comparado com i terá o valor inverso de importância
Racionais	Tem a função de forçar a consistência da matriz

Uma vez que se utiliza notação matricial, a notação usada nesta dissertação é a seguinte: variáveis matriciais são representadas em negrito e maiúsculas; para a representação de variáveis vetoriais é utilizado negrito em letras minúsculas; variáveis escalares são representadas com letra normal minúscula; constantes escalares são representadas em maiúsculas apenas.

No método de análise hierárquica (AHP), a utilização de N critérios permite estabelecer uma matriz de $N \times N$ coeficientes que representam as comparações entre critérios, que é a matriz de comparação \mathbf{W} . Assim o ij -ésimo elemento é o rácio entre os valores w_i e w_j dos critérios i e j . Neste método AHP o objetivo é precisamente conhecer os valores isolados de w_i e w_j de forma a saber qual o peso de cada um dos critérios para ser feita a seleção da melhor alternativa.

Assim, a matriz de comparação é da forma como se apresenta na Equação (4.1):

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 / w_1 & w_1 / w_2 & \cdots & w_1 / w_n \\ w_2 / w_1 & w_2 / w_2 & \cdots & w_2 / w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n / w_1 & w_n / w_2 & \cdots & w_n / w_n \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

É objetivo, portanto transformar a matriz \mathbf{W} , que apenas apresenta os rácios acoplados, no vetor das prioridades $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n]^T$ recuperando assim todos os w_i 's a partir dos rácios da matriz \mathbf{W} . De acordo com a metodologia AHP o vetor de prioridades ou pesos \mathbf{w} apresenta-se de forma tal que a soma de todos os elementos do vetor é igual à unidade (100%).

A estrutura da matriz \mathbf{W} é interessante na medida em que:

- A diagonal principal é composta pela unidade;
- A matriz é quadrada;
- A matriz é positiva ($a_{ij} > 0$ para todo o $i, j = 1, 2, \dots, n$);
- A matriz é recíproca, isto é, $a_{ij} = 1 / a_{ji}$.

Embora na literatura no âmbito da metodologia AHP se denomine a matriz de comparação de recíproca, em álgebra linear o termo recíproco é visto como sinónimo de invertível. Em todo o caso, esta estrutura de matriz não permite de forma imediata obter o vetor de pesos (\mathbf{w}). No entanto, o facto de todos os elementos da matriz serem positivos, implica que a matriz \mathbf{W} apresente sempre um valor próprio positivo de multiplicidade unitária e que excede em módulo todos os outros valores próprios [48]. Note-se também que sendo todas as colunas múltiplas da primeira coluna e todas as linhas sendo múltiplas da primeira linha, esta situação faz com que a característica da matriz seja 1.

Note-se que caso se multiplique \mathbf{W} por \mathbf{w} obtém-se:

$$\mathbf{W}\mathbf{w} = N\mathbf{w} \quad (4.2)$$

A Equação (4.2) é a que se utiliza para o cálculo dos valores e vetores próprios de uma matriz. A mesma tem uma solução se e só se N é um valor próprio de \mathbf{W} e assim o vetor de prioridades \mathbf{w} é um vetor próprio de \mathbf{W} .

Ainda relativamente à Equação (4.2):

- Tal como visto em cima, a característica de \mathbf{W} é 1, logo implica que existe apenas um único valor próprio não negativo;

- A matriz \mathbf{W} é positiva logo, pelo teorema de *Perron-Frobenius*, sabe-se que o valor próprio não nulo é real e não um número complexo;
- Outro ponto igualmente importante, é que o traço da matriz \mathbf{W} é igual ao número de linhas/colunas da matriz \mathbf{W} . O traço da matriz é calculado a partir da soma dos elementos da diagonal principal, sendo todos eles iguais à unidade. Da álgebra linear sabe-se que a soma de todos os valores próprios de uma matriz é igual ao traço da matriz:

$$\sum \text{ValoresProprios} = \text{tr}(\mathbf{W}) = N \quad (4.3)$$

A solução para o vetor de prioridades \mathbf{w} é qualquer coluna de \mathbf{W} . As soluções irão diferir de uma constante multiplicativa. A convenção na metodologia AHP é que \mathbf{w} deve estar numa forma específica em que a soma de todos os seus elementos tem de ser igual à unidade o que torna assim a solução única, não interessando qual das colunas é utilizada.

Para além da solução acima explicada, é interessante verificar que a matriz \mathbf{W} representa uma matriz ideal de julgamentos. Na prática a matriz que utiliza os julgamentos do avaliador é a matriz \mathbf{J} [49].

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & j_{12} & \cdots & j_{1N} \\ j_{21} & 1 & \cdots & j_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j_{N1} & j_{N2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Tal como na matriz \mathbf{W} , basta preencher metade das entradas da matriz (por exemplo acima da diagonal principal sendo que a diagonal principal continua a ser unitária.

Em geral (quase sempre), \mathbf{J} não é consistente. Cada j_{ij} é diferente de w_i/w_j , tal não se deve unicamente à escala de quantificação dos julgamentos, mas também porque existem variações nas preferências relativas do avaliador entre os critérios.

Devido ao exposto, a matriz \mathbf{J} , embora também positiva tal como \mathbf{W} , deixa de apresentar uma característica igual à unidade pelo que tanto as colunas como as linhas deixam de diferir por uma constante multiplicativa. Assim, \mathbf{J} pode ter múltiplos valores próprios. De modo a recuperar uma estimativa do vetor de prioridades $\hat{\mathbf{w}}$, é necessário resolver:

$$\mathbf{J}\hat{\mathbf{w}} = \lambda_{max}\hat{\mathbf{w}} \quad (4.5)$$

A diferença entre o valor próprio λ_{max} e N é a medida da inconsistência de \mathbf{J} . O autor *Saaty* [47] define índice de consistência como:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.6)$$

Calculado o índice de consistência é necessário calcular o rácio de consistência, que é dado por:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (4.7)$$

Este rácio é obtido por comparação de *C.I.* com um índice de aleatoriedade, *R.I.*, que está apresentado na Tabela 4.2. Caso o valor de *C.R.* não seja inferior a 0,1 é necessário rever a avaliação dos julgamentos na matriz **J** para que a consistência da matriz seja adequada.

Se $\hat{j}_{ij} = w_{ij} + \varepsilon_{ij}$, \hat{j}_{ij} representa o peso verdadeiro de um determinado critério e ε_{ij} representa um erro pequeno entre o julgamento efetuado e o peso ideal que devia ter para que a matriz fosse 100% consistente, assim se ε_{ij} for muito pequeno, λ_{max} tende para *N*. Isto só ocorre uma vez que as matrizes de comparação advêm de uma avaliação subjetiva para a determinação de pesos de importância.

Tabela 4.2: Índice de consistência médio aleatório [47].

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistência aleatório (R.I.)	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.4	1.45	1.49

Para o cálculo dos vetores próprios e valores próprios de **J** é utilizada uma ferramenta online denominada de *Matrix Calculator*.

De forma geral, o fluxograma que deve ser seguido para o cálculo dos pesos de cada critério para posterior avaliação de um conjunto de alternativas é o que se apresenta na Figura 4.2.

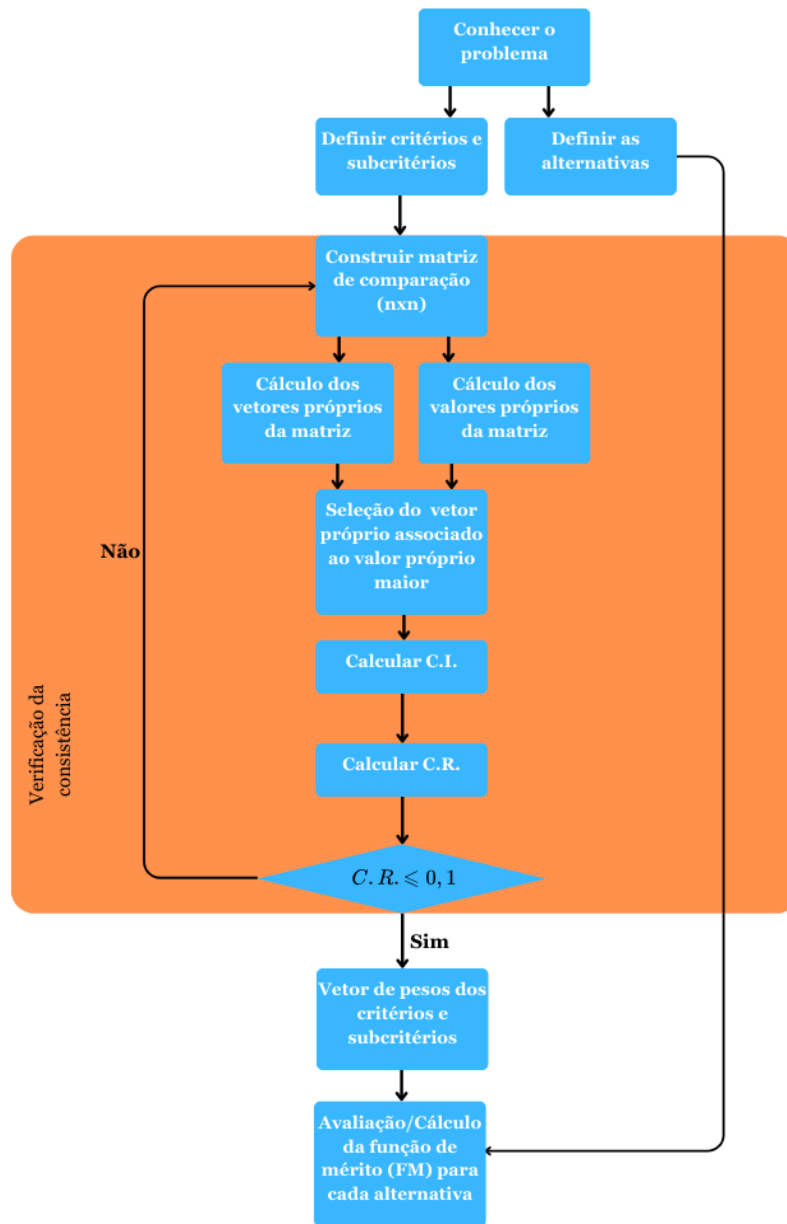


Figura 4.2: Fluxograma associado à metodologia AHP.

4.1.1 Critérios utilizados na metodologia AHP

Nesta subseção e de modo a poder aplicar a metodologia AHP, são definidos os critérios e subcritérios que compõem o segundo e terceiro nível do método (o primeiro nível compreende o principal objetivo, que é a seleção do processo de fabrico mais adequado).

4.1.1.1 Características da produção

As características de produção são um fator essencial em determinar o processo de fabricação mais adequado. As características de produção não estão relacionadas com a funcionalidade do design nem com a habilidade do processo produzir o produto. Este critério por sua vez pode dividir-se em dois subcritérios:

- Quantidade produzida, é um fator importante na medida em que o volume de produção pode ser elevado ou não, o que afeta a viabilidade do processo/investimento. Para produções em série, que não é o caso da carenagem do trenó, pode ser necessário estudar o ponto de equilíbrio de vendas para que um determinado processo de fabricação em massa seja economicamente viável. Para o fabricação do trenó, o objetivo não é produzir uma grande quantidade, mas sim uma ou duas unidades, pelo que deve ser tido em conta que poderá ser necessário alguma reutilização de moldes. Logo, a quantidade produzida deve ser um subcritério considerado.
- Tempo de processamento/fabrico, é um subcritério que embora não sendo dos mais fundamentais, deve ser tido em conta uma vez que se vai refletir nos custos do processo.

4.1.1.2 Considerações de custo

As considerações de custo são das mais importantes em qualquer projeto, uma vez que o objetivo é sempre a obtenção de lucros para rentabilizar a venda do produto. Qualquer critério pode ser diretamente relacionado com as considerações de custo. De forma a simplificar e para melhor entendimento das considerações de custo foram considerados três subcritérios:

- Custo do molde e acessórios, que engloba todos os custos associados aos moldes que dependem do molde ser macho ou fêmea assim como do número de moldes necessários; os acessórios podem englobar, tubos de resina, tecidos removíveis, sacos de vácuo, depósitos, entre outros.
- Custo dos equipamentos necessários, que agrega todas as máquinas que poderão ser necessárias como por exemplo: autoclave para o caso da carenagem ser feita em tecidos pré-impregnados; este tipo de custo engloba os custos de utilização e não o custo associado à compra propriamente dita dos equipamentos.
- Custo da mão de obra, que depende da solução escolhida que compõe o grupo das alternativas possíveis; pode ser necessário mais ou menos tempo assim como número de pessoas para apoio no fabricação.

4.1.1.3 Disponibilidade de equipamentos/recursos humanos

Face aos apoios disponibilizados pelos parceiros do projeto, poderá haver soluções que não serão de todo possíveis devido à escassez de determinados recursos tanto materiais como de pessoas para o auxílio do fabrico.

4.1.1.4 Geometria da carenagem

A seleção do processo de fabrico para a fuselagem do trenó pode ser determinada pela sua configuração. Desta forma este critério foi dividido em três subcritérios que contemplam:

- Peso, que partindo dos valores de peso apresentados em [2] é possível evidenciar diferenças relativamente aos processos de fabrico considerados.
- Tolerâncias e acabamentos, uma vez sendo a redução da resistência aerodinâmica fundamental para sucesso da prova, deu-se mais mérito a processos que permitam melhores acabamentos superficiais.
- Complexidade do design/adaptação do processo, a complexidade é definida com a presença de partes disformes ou difíceis de aceder, pouca simetria, furos/aberturas, entre outros; estes detalhes devem ser considerados de forma a prevenir processos adicionais e que compliquem o processo de fabrico.

4.1.1.5 Facilidade de execução

Este critério serve para dar primazia a processos de fabrico mais simples, logo que sejam facilmente produzidos com poucos recursos assim como menos necessidade de recursos humanos especializados.

4.1.2 Alternativas possíveis para avaliação

Com base na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 3, e de forma a ter possíveis soluções de fabrico distintas, foram definidos cinco grupos de variações para o processo de fabrico da carenagem do trenó.

O primeiro grupo é o conjunto em que estão inseridas as três técnicas de fabrico possíveis de ser implementadas, são elas a laminação manual (*Wet Lay-up*), o fabrico com pré-impregnados (*Prepreg Lay-Up*) e por último a infusão. Os outros processos apresentados na revisão bibliográfica como o enrolamento filamentar, moldação por projeção, pultrusão, moldação por transferência de resina, injeção e compressão foram descartados de imediato uma vez que não são de todo adequados ao fabrico de uma estrutura com a complexidade que a carenagem do trenó apresenta.

O segundo grupo de variações é o que se relaciona com o tipo de molde utilizado, como foi possível verificar nos trabalhos mencionados no Capítulo 3. Num deles o molde utilizado foi um molde macho, noutra foi feito um modelo e depois criado um molde fêmea a partir daquele e ainda noutra trabalho foi utilizado um molde fêmea maquinado previamente e usado diretamente. Este grupo integra as seguintes alternativas: laminação com molde macho apenas, com macho e fêmea e com molde fêmea unicamente.

O terceiro grupo relaciona-se com a forma de laminar, isto é, se o processo de fabrico é feito com os moldes unidos ou é feito em duas partes totalmente separadas e por fim unidas.

O quarto grupo adiciona a possibilidade de integrar um saco de vácuo ou não.

Por último, o quinto grupo integra a possibilidade de ser utilizada uma estufa para a cura da carenagem do trenó.

Com base na composição de cada grupo foram feitas combinações entre os vários grupos. No entanto verificou-se que certas combinações não faziam sentido sob o ponto de vista do fabrico e essas foram descartadas. Por exemplo, num processo de fabrico que envolva a utilização de pré-impregnados é necessário obrigatoriamente usar autoclave, ou seja, utilização obrigatória de um saco de vácuo e cura em estufa simultaneamente, que é exatamente a função da autoclave. Assim, existe na totalidade um conjunto de 36 possibilidades distintas para o processo de fabrico. Poderá haver outros aspetos incompatíveis que só serão detetados aquando do fabrico propriamente dito da estrutura.

De seguida, na Tabela 4.3 apresentam-se as várias alternativas possíveis de análise.

Tabela 4.3: Lista de alternativas para o procedimento de fabrico.

Índice da alternativa	Grupos de procedimentos de fabrico				
1	Wet Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes separados	Com saco de vácuo	Cura em estufa
2	Wet Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes separados	Com saco de vácuo	Cura ambiente
3	Wet Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes separados	Sem saco de vácuo	Cura em estufa
4	Wet Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes separados	Sem saco de vácuo	Cura ambiente
5	Wet Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes unidos	Com saco de vácuo	Cura em estufa
6	Wet Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes unidos	Com saco de vácuo	Cura ambiente
7	Wet Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes unidos	Sem saco de vácuo	Cura em estufa
8	Wet Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes unidos	Sem saco de vácuo	Cura ambiente
9	Wet Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes separados	Com saco de vácuo	Cura em estufa
10	Wet Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes separados	Com saco de vácuo	Cura ambiente
11	Wet Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes separados	Sem saco de vácuo	Cura em estufa
12	Wet Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes separados	Sem saco de vácuo	Cura ambiente
13	Wet Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes unidos	Com saco de vácuo	Cura em estufa
14	Wet Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes unidos	Com saco de vácuo	Cura ambiente
15	Wet Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes unidos	Sem saco de vácuo	Cura em estufa
16	Wet Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes unidos	Sem saco de vácuo	Cura ambiente
17	Wet Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes separados	Com saco de vácuo	Cura em estufa
18	Wet Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes separados	Com saco de vácuo	Cura ambiente
19	Wet Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes separados	Sem saco de vácuo	Cura em estufa
20	Wet Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes separados	Sem saco de vácuo	Cura ambiente
21	Wet Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes unidos	Com saco de vácuo	Cura em estufa
22	Wet Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes unidos	Com saco de vácuo	Cura ambiente
23	Wet Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes unidos	Sem saco de vácuo	Cura em estufa
24	Wet Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes unidos	Sem saco de vácuo	Cura ambiente
25	Prepreg Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes separados		
26	Prepreg Lay-Up	Com molde macho apenas	Laminação com moldes unidos		
27	Prepreg Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes separados		
28	Prepreg Lay-Up	Com molde macho e fêmea	Laminação com moldes unidos		
29	Prepreg Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes separados		
30	Prepreg Lay-Up	Com molde fêmea apenas	Laminação com moldes unidos		
31	Infusão	Com molde macho apenas	Cura em estufa		
32	Infusão	Com molde macho apenas	Cura ambiente		
33	Infusão	Com molde macho e fêmea	Cura em estufa		
34	Infusão	Com molde macho e fêmea	Cura ambiente		
35	Infusão	Com molde fêmea apenas	Cura em estufa		
36	Infusão	Com molde fêmea apenas	Cura ambiente		

4.1.3 Função de mérito

A função de mérito (FM) destina-se a determinar o melhor conjunto de condições de fabrico da carenagem e é definida tendo em conta o peso e a nota associada a cada critério, da seguinte forma:

$$FM = N_{i,1}W_P + N_{i,2}W_C + N_{i,3}W_D + N_{i,4}W_G + N_{i,5}W_F \quad (4.8)$$

Sendo que alguns dos termos são calculados com base em pesos e notas associadas a subcritérios respetivos, nomeadamente os seguintes:

$$N_{i,1}W_P = N_{i,1,1}W_{QP} + N_{i,1,2}W_{TP} \quad (4.9)$$

$$N_{i,2}W_C = N_{i,2,1}W_{CA} + N_{i,2,2}W_{CE} + N_{i,2,3}W_{CM} \quad (4.10)$$

$$N_{i,4}W_G = N_{i,4,1}W_{PE} + N_{i,4,2}W_T + N_{i,4,3}W_{AP} \quad (4.11)$$

A nomenclatura está presente na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Identificação das variáveis intervenientes na função de mérito.

Nomenclatura	Significado
W_P	Peso do critério de produção
W_C	Peso do critério de custo
W_D	Peso do critério de disponibilidade
W_G	Peso do critério de geometria da carenagem
W_F	Peso do critério de facilidade
W_{QP}	Peso do subcritério de quantidade produzida
W_{TP}	Peso do subcritério de tempo de produção
W_{CA}	Peso do subcritério de custo dos acessórios
W_{CE}	Peso do subcritério de custo dos equipamentos
W_{CM}	Peso do subcritério de custo da mão de obra
W_{PE}	Peso do subcritério de peso
W_T	Peso do subcritério de tolerâncias
W_{AP}	Peso do subcritério de adaptabilidade ao design

A Equação (4.8) é a geral na medida em que apenas está presente o peso e a nota associada a cada critério, enquanto as equações (4.9), (4.10) e (4.11) são as que apresentam os subcritérios

associados a três dos critérios. A representação da função de mérito foi apresentada dessa forma de modo a não sobrecarregar a escrita.

Para o cálculo da função de mérito relativa a cada alternativa de fabrico possível de poder ser implementada e tal como foi explicado, é necessário proceder ao cálculo dos pesos de cada critério interveniente na função de mérito. Para isso é necessário construir a matriz de comparação onde se atribui valores segundo a escala do método AHP presente na Tabela 4.1. Para o presente caso de estudo a tabela de comparação entre os critérios está apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Tabela de comparação de critérios.

	Características da produção	Considerações de custo	Disponibilidade de equipamentos	Geometria da carenagem	Facilidade de execução
Características da produção	1	1/6	1/7	1/4	3
Considerações de custo	6	1	1/4	1/2	4
Disponibilidade de equipamentos	7	4	1	2	5
Geometria da carenagem	4	2	1/2	1	5
Facilidade de execução	1/3	1/4	1/5	1/5	1

Logo a matriz de comparação global, J_I , fica da forma que se apresenta na Equação (4.12):

$$J_I = \begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 1/7 & 1/4 & 3 \\ 6 & 1 & 1/4 & 1/2 & 4 \\ 7 & 4 & 1 & 2 & 5 \\ 4 & 2 & 1/2 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/4 & 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Uma vez que três dos critérios apresentam subcritérios, é necessário construir tabelas de comparação para se obter os pesos correspondentes a cada um dos subcritérios.

Assim, a tabela de comparação correspondente aos subcritérios tempo de produção e quantidade produzida relativamente ao critério características da produção, está apresentada na Tabela 4.6:

Tabela 4.6: Tabela de comparação relativa ao critério de características da produção.

	Tempo de produção	Quantidade produzida
Tempo de produção	1	8
Quantidade produzida	1/8	1

Como resultado da Tabela 4.6, surge a matriz de comparação relativa ao critério de características de produção, \mathbf{J}_2 , presente na Equação (4.13):

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 8 \\ 1/8 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Do critério das considerações de custo resultaram três subcritérios: custo dos moldes e acessórios, custo dos equipamentos e custo da mão de obra. A tabela de comparação está presente na Tabela 4.7:

Tabela 4.7: Tabela de comparação relativa ao critério de custo.

	Custo do molde e acessórios	Custo dos equipamentos	Custo da mão de obra
Custo dos moldes e acessórios	1	1	2
Custo dos equipamentos	1	1	4
Custo da mão de obra	1/2	1/4	1

Com o resultado da Tabela 4.7, construiu-se a matriz de comparação relativa ao critério de custo, \mathbf{J}_3 , como se apresenta na Equação (4.14):

$$\mathbf{J}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Por fim, apresenta-se a última tabela de comparação que advém do critério geometria da carenagem, que por sua vez se divide nos três subcritérios já mencionados anteriormente, sendo eles: peso, tolerâncias e acabamentos e complexidade do design. Apresenta-se assim a Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Tabela de comparação relativa ao critério geometria da carenagem.

	Peso	Tolerâncias e acabamentos	Complexidade do design
Peso	1	2	6
Tolerâncias e acabamentos	1/2	1	6
Complexidade do design	1/6	1/6	1

Surge assim a matriz de comparação relativa ao critério de geometria da carenagem, \mathbf{J}_4 , que se apresenta na Equação (4.15):

$$\mathbf{J}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 6 \\ 1/2 & 1 & 6 \\ 1/6 & 1/6 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Estando as matrizes todas definidas é necessário proceder à verificação da consistência das mesmas, isto é, verificar que o rácio de consistência, *C.R.*, é inferior a 0,1. Para fazer a verificação foi necessário calcular os vetores próprios e valores próprios correspondentes a cada matriz. Por existir mais do que um valor próprio associado às matrizes anteriormente apresentadas, deve seleccionar-se o valor próprio real de maior módulo associado a cada uma das matrizes respetivas.

Na primeira matriz \mathbf{J}_1 , o valor próprio associado selecionado toma o valor de $\lambda_{max, J1}=5,417$, logo *C.R.*=0,094, sendo inferior a 0,1 a consistência da matriz \mathbf{J}_1 está assegurada.

O valor próprio real de maior módulo associado à matriz \mathbf{J}_2 é $\lambda_{max, J2}=2$, logo é uma matriz totalmente consistente, sendo *C.R.*=0, uma vez ser uma matriz com 4 entradas, logo apenas é necessário preencher uma delas dado que a matriz é recíproca. A matriz \mathbf{J}_3 , cujo valor próprio é $\lambda_{max, J3}=3,054$ implica que *C.R.*=0,054; sendo um valor inferior a 0,1, a consistência está garantida para esta matriz de comparação.

Por fim, a matriz \mathbf{J}_4 , apresenta o valor próprio associado à mesma de $\lambda_{max, J4}=3,054$ e o valor do rácio de consistência é *C.R.*=0,054.

É de acrescentar que para o caso da matriz \mathbf{J}_1 , o preenchimento da mesma não foi feito logo de uma vez, foram necessárias algumas tentativas até ser obtida a consistência mínima necessária, uma vez que quanto maiores forem as matrizes, mais facilmente se fazem julgamentos inconsistentes entre os vários critérios. Para matrizes de menor dimensão a consistência é mais facilmente obtida, por serem menos julgamento necessários.

Com todos os valores próprios e vetores próprios das matrizes obtidos anteriormente, apresenta-se de seguida os vetores próprios associados ao valor próprio real de maior valor absoluto para cada uma das matrizes. Tendo os vetores próprios, e de modo a seguir a convenção do método AHP, é necessário transformar cada um dos vetores próprios no vetor de prioridades associado a cada uma das matrizes, ou seja, de forma que a soma dos elementos do vetor de prioridades seja igual à unidade.

Com o vetor próprio calculado é necessário somar todos os elementos desse vetor e depois dividir cada um dos elementos do vetor por essa soma, obtendo-se o vetor de prioridades que se deseja.

Estando feito o cálculo do rácio de consistência e estando todas as matrizes em conformidade, apresentam-se os vetores próprios associados às matrizes \mathbf{J}_1 , \mathbf{J}_2 , \mathbf{J}_3 e \mathbf{J}_4 nas Equações (4.16), (4.17), (4.18) e (4.19), respetivamente.

$$\mathbf{j}_1 = [1.434 \quad 3.986 \quad 9.414 \quad 5.301 \quad 1.000]^T \quad (4.16)$$

$$\mathbf{j}_2 = [8.000 \quad 1.000]^T \quad (4.17)$$

$$\mathbf{j}_3 = [2.520 \quad 3.175 \quad 1.000]^T \quad (4.18)$$

$$\mathbf{j}_4 = [7.560 \quad 4.762 \quad 1.000]^T \quad (4.19)$$

Com os vetores próprios de cada uma das matrizes de comparação, apresentam-se nas Equações (4.20), (4.21), (4.22), (4.23) os vetores de prioridades adimensionalizados (\mathbf{w}_1 , \mathbf{w}_2 , \mathbf{w}_3 , \mathbf{w}_4) associados a cada uma das matrizes, \mathbf{J}_1 , \mathbf{J}_2 , \mathbf{J}_3 , \mathbf{J}_4 , respetivamente. Estes vetores informam sobre o peso de cada critério assim como subcritério em percentagem, na função de mérito.

$$\mathbf{w}_1 = [6.785 \quad 18.860 \quad 44.542 \quad 25.082 \quad 4.731]^T \quad (4.20)$$

$$\mathbf{w}_2 = [88.889 \quad 11.111]^T \quad (4.21)$$

$$\mathbf{w}_3 = [37.640 \quad 47.423 \quad 14.937]^T \quad (4.22)$$

$$\mathbf{w}_4 = [56.748 \quad 35.746 \quad 7.506]^T \quad (4.23)$$

Tendo os vetores de prioridade de cada critério e subcritério e de forma a ser mais simples a perceção dos pesos de cada critério ou subcritério, de seguida apresenta-se na Equação (4.24) um vetor, \mathbf{wr} , onde se incluem todos os pesos juntos. Ressalva-se que cada subcritério atua como parte de um critério ou seja, existindo um critério com subcritérios relacionados, as percentagens dos subcritérios somados igualam a percentagem do critério que os originou. Por exemplo, o critério de custo tem um peso na função de mérito final de 18,86%, logo os subcritérios subjacentes ao mesmo que são custo dos moldes e acessórios, custo dos equipamentos e custo da mão de obra e todos juntos igualam o valor de 18,86%.

O vetor global de pesos dos critérios/subcritérios da função de mérito é por isso o que se apresenta de seguida:

$$\mathbf{w}_T = [6.031 \quad 0.754 \quad 7.100 \quad 8.944 \quad 2.817 \quad 44.542 \quad 4.731 \quad 14.233 \quad 8.965 \quad 1.883]^T \quad (4.24)$$

A ordem pela qual se apresenta o vetor global de pesos dos critérios, em percentagem, é a seguinte e de forma respetiva: tempo de produção, quantidade produzida, custo dos moldes e acessórios, custos dos equipamentos, custo de mão de obra, disponibilidade de equipamentos, facilidade de execução, peso, tolerâncias e acabamentos, complexidade do design/adaptabilidade do processo.

De forma a calcular o valor da função de mérito e tendo já o valor dos pesos de todos os critérios considerados, falta fazer a avaliação de cada alternativa. De forma a avaliar as alternativas e sendo já um número considerável de possibilidades, foi criada uma tabela secundária, que faz a comparação entre os cinco grupos de alternativas e os vários critérios considerados no estudo.

A avaliação foi qualitativa na maioria dos critérios e quantitativa naqueles em que foi possível (custos, peso e tempo de produção).

Procede-se de seguida à explicação, de forma geral para cada critério, a influência das alternativas tidas em conta, nas Tabela 4.9, Tabela 4.10, Tabela 4.11, Tabela 4.12, Tabela 4.13, Tabela 4.14, Tabela 4.15, Tabela 4.16, Tabela 4.17 e Tabela 4.18. A escala utilizada compreende a atribuição de valores de 1 a 5 para a avaliação das alternativas apresentadas.

Tabela 4.9: Justificações sobre o subcritério tempo de produção.

Tempo de produção	
Grupo	Justificação
1	As taxas de produção são assumidas como sendo: <i>Prepreg</i> =1.5kg/h, <i>Wet Lay-up</i> =0.9kg/h e <i>infusão</i> =0.8kg/h [50]
2	Ter apenas um molde fêmea implica menos tempo consumido, a solução com macho e fêmea implica um tempo de produção mais elevado e por fim com o molde macho implica um desmolde mais complexo
3	Com moldes unidos não é necessária uma segunda fase de laminação para união de partes
4	Com saco de vácuo, implica mais tempo de produção e preparação
5	Cura em estufa permite reduzir o tempo de cura, logo uma poupança de tempo

Tabela 4.10: Justificações sobre o subcritério quantidade produzida.

Quantidade produzida	
Grupo	Justificação
1	Sendo apenas necessário fazer um ou dois exemplares, a técnica de infusão implica mais experiência, logo a menos adequada comparado com <i>Wet Lay-Up</i> e <i>Prepreg</i>
2	No caso de efetivamente ser necessário dois exemplares, o molde macho não permite uma reutilização do molde, já com moldes fêmea sim
3	Moldes separados permite possivelmente produzir mais quantidade
4	Sem relação
5	Sem relação

Tabela 4.11: Justificações sobre o subcritério custo dos moldes e acessórios.

Custo dos moldes e acessórios	
Grupo	Justificação
1	O <i>Prepreg</i> na parte da laminação propriamente dita, não necessita de tantos acessórios como a laminação manual, a infusão é aquela que mais acessórios necessita
2	A solução mais cara é a que necessita de molde macho e fêmea, seguida do molde macho apenas e por fim a solução que utiliza um molde fêmea unicamente [51]
3	Sem relação
4	Com a utilização de saco é necessário mais acessórios
5	Maior necessidade de acessórios

Tabela 4.12: Justificações sobre o subcritério custo dos equipamentos.

Custo dos equipamentos/utilização	
Grupo	Justificação
1	A laminação manual é a que menos necessita de equipamentos, sendo a infusão dependente e o processo de <i>Prepreg</i> muito mais ainda
2	Tanto a laminação em molde macho ou fêmea unicamente, envolve menos custos enquanto para o caso de ser necessário um molde macho e fêmea envolve um processo de laminação extra logo maiores custos de utilização de equipamentos
3	Sem relação
4	Necessidade de utilização de bomba de vácuo logo custos de utilização superiores em comparação com o caso de não se utilizar
5	A utilização da estufa implica gastos energéticos superiores

Tabela 4.13: Justificações sobre o subcritério custo da mão de obra.

Custo da mão de obra	
Grupo	Justificação
1	Uma vez que a taxa de trabalho de laminação é superior no caso do <i>Prepreg</i> seguida da laminação manual e por fim a infusão. A avaliação mais elevada é a do processo <i>Prepreg</i>
2	O caso de ser utilizado um molde macho e fêmea implica obviamente um custo de mão de obra superior, nos casos de ser utilizado um molde macho e fêmea unicamente, ficam em pé de igualdade
3	Com os moldes unidos o processo torna-se mais complicado, implicando uma mão de obra mais cara
4	Com saco há mais tempo gasto no processo
5	A estufa permite reduzir o tempo do procedimento, logo menores custos

Tabela 4.14: Justificações sobre o critério disponibilidade de equipamentos.

Disponibilidade de equipamentos	
Grupo	Justificação
1	No que toca à disponibilidade, a laminação manual é a mais facilmente disponibilizada
2	No caso de se utilizarem moldes únicos, macho ou fêmea é a que apresenta classificação superior
3	Igual classificação uma vez que os moldes ao serem utilizados unidos ou separados, não implica a disponibilidade de equipamentos adicionais
4	Com ou sem saco, não há grande diferença em termos de disponibilidade
5	No caso do uso da estufa, é um equipamento que pode não ser disponibilizado ou ter a dimensão adequada

Tabela 4.15: Justificações sobre o critério facilidade de execução.

Facilidade de execução	
Grupo	Justificação
1	A laminação manual assim como <i>Prepreg</i> são as técnicas mais simples de laminação
2	Menos processos implicam maior facilidade, logo tanto um modelo macho ou fêmea apenas é o ideal
3	A laminação com os moldes separados tende a simplificar o processo
4	Não existindo o procedimento de aplicação do saco de vácuo, mais fácil se torna o processo
5	Não acrescenta dificuldade adicional o uso da estufa

Tabela 4.16: Justificações sobre o subcritério tolerâncias e acabamentos.

Tolerâncias e acabamentos	
Grupo	Justificação
1	O processo de <i>Prepreg</i> e infusão por apresentarem fração de fibras superior, consegue adquirir melhores tolerâncias, o processo de laminação manual é mais complicado de controlar a qualidade
2	Uma vez que é a superfícies externa que se deseja com muito bom acabamento, o mais adequado são as soluções que utilizam moldes fêmeas para o fabrico da carenagem
3	Feita a laminação manual com os moldes fêmea juntos ou não, a zona de união na parte exterior não terá em princípio nunca protuberâncias, pelo que se atribui uma nota igual
4	O saco de vácuo permite retirar alguma resina em excesso, logo melhor toleranceamento do produto
5	Sem relação

Tabela 4.17: Justificações sobre o subcritério complexidade/adaptabilidade do design à solução.

Complexidade/adaptabilidade do design à solução	
Grupo	Justificação
1	Devido à existência dos <i>bumpers</i> , a infusão não é muito adaptável à geometria. Os restantes métodos são perfeitamente aplicados
2	A solução de utilização do molde macho, não é muito adequado na medida em que é necessária a colocação de material de núcleo em posições distintas da carenagem
3	Pelo facto de ser uma estrutura muito fechada, este tipo de alternativa complica o procedimento de laminação com os moldes unidos. Com uma metade feita de cada vez, o procedimento de laminação simplifica-se
4	Difícil aplicação do saco de vácuo nos <i>bumpers</i>
5	Totalmente aplicável a colocação em estufa

Tabela 4.18: Justificações sobre o subcritério peso.

Peso	
Grupo	Justificação
1	Para comparação de pesos, foi recolhida informação em [2], acerca dos pesos obtidos para a carenagem do trenó com os três tipos de processos de fabrico.
2	Sem relação
3	Com união adicional entre partes separadas, implica aumento de peso
4	O saco permite reduzir a fração de resina, logo uma resistência específica maior
5	Sem relação

Face às justificações aqui apresentadas, foi feita uma atribuição de 1 a 5, como se apresenta na Tabela 4.19 e depois calculada a função de mérito para cada uma das alternativas de forma sistemática, calculando a média de cada combinação com base nos critérios definidos.

Tabela 4.19: Tabela secundária de avaliação.

	Hand Lay-up	Prepreg	Infusão	C/ molde macho	C/ molde macho e fêmea	C/ molde fêmea	Moldes separados	Moldes unidos	C/saco	S/saco	Estufa	Ambiente
Tempo de produção	3	5	2	4	3	5	3	5	3	5	5	2
Quantidade produzida	5	5	3	2	3	5	4	3	-	-	-	-
Custos dos moldes e acessórios	4	5	3	4	3	5	-	-	3	5	3	5
Custo dos equipamentos	5	1	3	5	1	5	-	-	3	5	3	5
Custo do trabalho em si	4	5	3	4	2	5	5	2	4	5	5	3
Disponibilidade de equipamentos	5	1	2	4	1	5	4	4	4	5	1	5
Facilidade de execução	5	4	3	4	3	4	5	1	3	5	5	5
Peso	3	4	5	-	-	-	4	5	4	3	-	-
Tolerâncias e acabamentos	3	5	4	3	5	5	4	4	4	3	-	-
Complexidade do design	5	4	2	3	4	5	5	1	2	5	5	5

Assim, apresenta-se a Tabela 4.20 onde é possível observar as cinco alternativas que apresentam o valor da função de mérito mais elevada, sendo que a primeira classificada será aquela que irá ser implementada para a construção da carenagem do trenó.

Tabela 4.20: Classificação dos cinco processos com melhor avaliação.

Classificação	Caso
1º	20
2º	24
3º	18
4º	22
5º	4

Como é possível observar, os cinco melhores processos partilham uma característica comum, que é o processo de fabrico adotado ser a laminação manual (*Wet Lay-Up*). Apresentam diferenças sobretudo no procedimento de fabrico, há a possibilidade de construir com as metades dos moldes fêmea unidas ou não, e se são utilizados sacos de vácuo. O procedimento em quinto lugar diferencia-se dos restantes pela utilização de um molde macho. O procedimento que está em primeiro lugar caracteriza-se pela sua simplicidade e acima de tudo acessibilidade, que como visto neste capítulo, são fulcrais e com peso muito grande na escolha do processo de fabrico da carenagem. No Anexo A encontra-se uma tabela resumo da figura de mérito de cada combinação.

5 Estrutura da carenagem do trenó

No capítulo que se segue é apresentada a metodologia aplicada na simulação computacional estrutural executada. Uma vez que já existe um trabalho focado na análise estrutural da carenagem do trenó, não foi feita uma explicação muito detalhada acerca da metodologia, isto é, neste ponto do trabalho é apresentada uma abordagem mais superficial dos métodos aplicados. A geometria da fuselagem do trenó apresentou alterações significativas, foi imprescindível uma atualização no que toca aos empilhamentos utilizados assim como a correção de algumas falhas encontradas na análise estrutural no trabalho anterior [2].

5.1 Geometria da carenagem

Apresenta-se de seguida o novo modelo aerodinâmico preliminar desenvolvido [52].

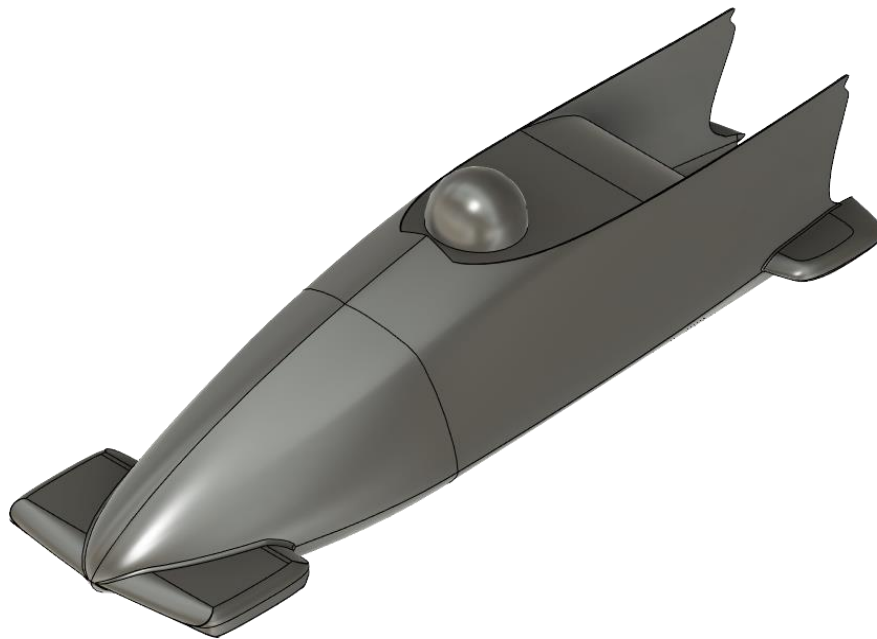


Figura 5.1: Modelo aerodinâmico sólido preliminar.

Como é possível observar, o modelo encontra-se em formato sólido, Figura 5.1, sendo por isso necessário toda uma adaptação para poder ser analisado estruturalmente através de um modelo composto por cascas, Figura 5.2. Como já referido anteriormente, a carenagem é dividida em duas partes, uma frontal e outra traseira que são apresentadas nas duas subsecções que se seguem.

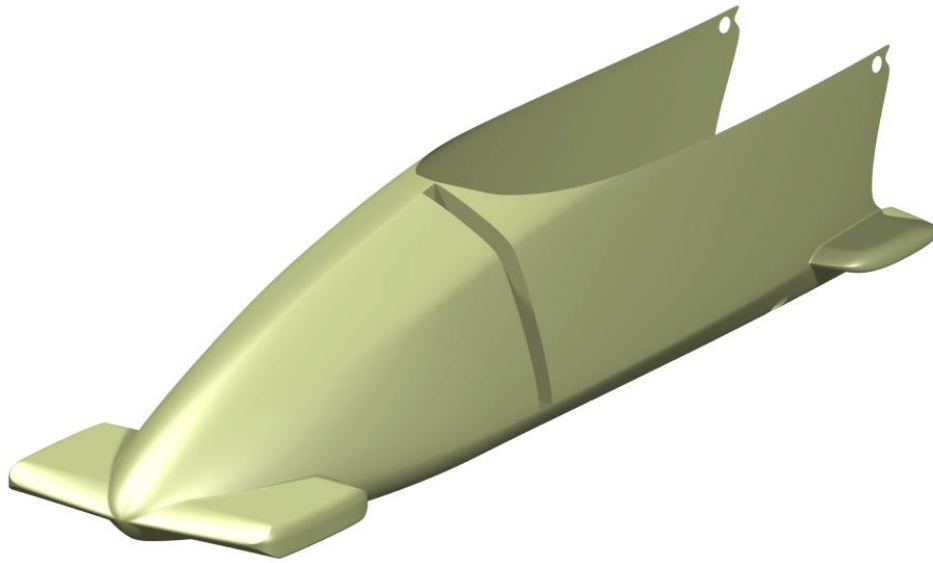


Figura 5.2: Modelo geométrico adaptado para análise estrutural.

5.1.1 Parte frontal

A parte frontal da fuselagem do trenó como se apresenta na Figura 5.3, tem como componentes principais a longarina, a fuselagem e os *bumpers*.

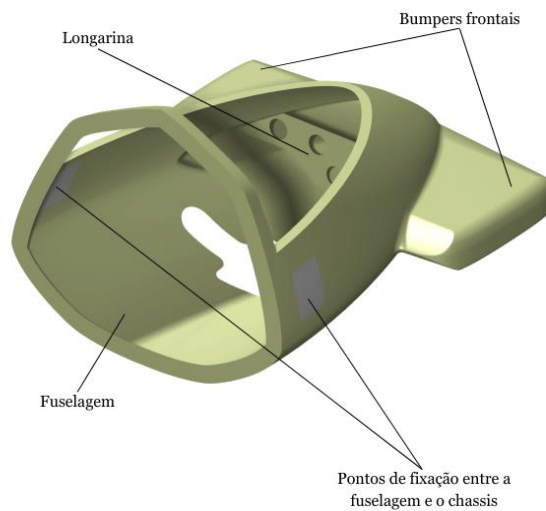


Figura 5.3: Parte frontal da carenagem do trenó.

A parte frontal tem vários pontos que devem ser mencionados e explicados. Começando pela parte interna, esta compreende uma longarina com aberturas de forma a reduzir a massa. De modo a cumprir a sua função, a longarina deve ser fixa tanto ao chassis como à fuselagem.

Relativamente aos *bumpers*, como é possível observar, estes dividem-se numa parte destacável que pode ser mudada caso algum dano ocorra durante a corrida. Compreende ainda a parte que está fixa e solidária à fuselagem. Inicialmente foi colocada a hipótese de em vez da parte destacável ser feita em laminado de carbono, ser de um material resistente (polímero de plástico) ao impacto. No entanto, o problema principal não é o impacto, mas sim a fricção que advém do contacto da parte terminal do *bumper* com o gelo. Um laminado de carbono consegue ser muito mais liso do que um polímero, por exemplo de ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*).

Por fim, foram feitas duas aberturas, uma na parte superior que constitui a capota, que é unida com base em ligações aparafusadas a uma aba que também foi desenhada em toda a volta da abertura. A outra, na parte de baixo é para ficar acondicionado o sistema de direção do trenó. Estão também representados na Figura 5.3 os pontos de fixação da fuselagem ao chassis.

5.1.2 Parte traseira

A parte traseira do trenó apresenta a caverna como parte integrante da estrutura interna feita em material compósito à semelhança do que acontece com a parte frontal, como é possível observar pela Figura 5.4.

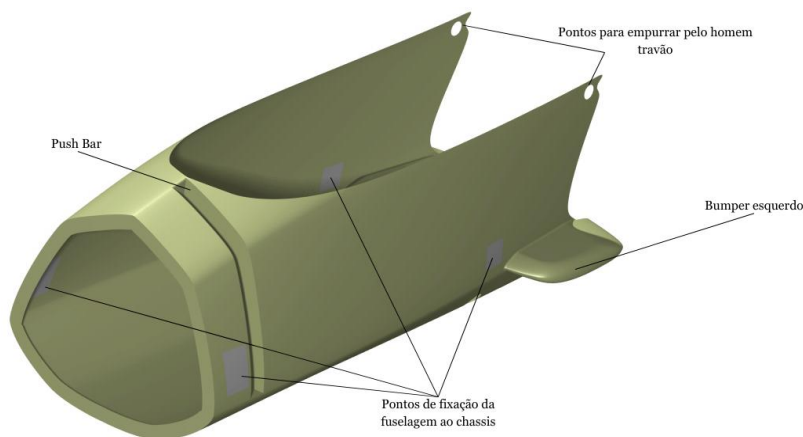


Figura 5.4: Parte traseira da carenagem do trenó.

Esta parte do trenó, à semelhança da parte frontal, apresenta *bumpers* mas que não têm qualquer divisão, isto é, não é necessário que haja nenhuma parte destacável para substituição em caso de dano porque também é muito menos provável de ocorrer.

As aberturas da parte traseira são: uma na parte da frente, onde se colocou uma caverna em toda a volta para melhoria da rigidez; outra que serve de passagem dos eixos do chassis onde assentam os patins e que foi desenhada com base na estrutura preliminar do chassis do trenó; uma abertura na parte traseira junto da posição onde está sentado o homem travão para colocação do travão; e por fim as aberturas que servem para a colocação das mãos do homem travão na fase inicial de corrida como se pode ver pelas Figura 5.4 e Figura 5.5.

Foi modelada a cavidade onde se encontra a *push bar* assim como os pontos de fixação. Estes são quatro e localizam-se entre a carenagem do trenó e o chassis. Foram utilizados posteriormente para colocação de condições de fronteira na análise estrutural.

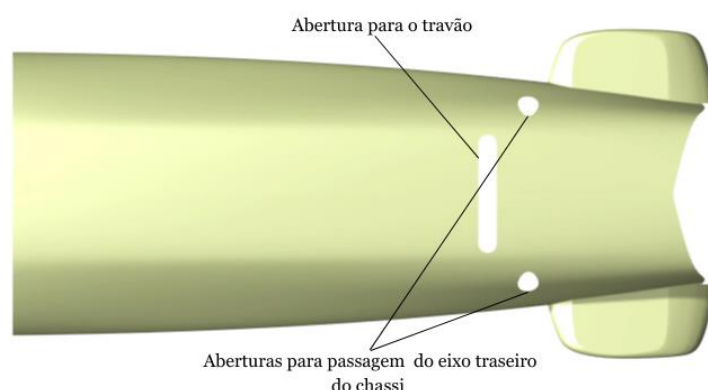


Figura 5.5: Detalhes da vista de baixo da parte traseira da carenagem do trenó.

5.2 Materiais

Os materiais utilizados para a construção da estrutura foram a fibra de carbono M35J com a adaptação das propriedades mecânicas por ser utilizado o método de laminação manual. Por causa disso, definiu-se uma redução em 50% relativamente às propriedades mecânicas da camada apresentadas pelo fabricante. É utilizado um núcleo de favo de abelha de aramida em parte da estrutura. As propriedades mecânicas dos materiais apresentam-se nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2 e foram depois inseridas no módulo *ACP (Ansys Composite PrePost)* para posterior construção dos laminados. Deve ser referido que no trabalho anteriormente executado [2], o autor seleciona estes materiais como os ideais para a construção da carenagem, justificando assim a escolha dos mesmos para este trabalho. A escolha dos materiais resultou de um estudo efetuado partindo de um conjunto de fibras assim como materiais constituintes do núcleo. Nesse estudo foi tido em conta a resistência específica dos materiais assim como o processo de fabrico adotado, foi concluído que a fibra M35J é a que apresenta uma relação entre resistência específica e elasticidade melhor.

Embora estejam presentes as propriedades mecânicas enumeradas na Tabela 5.2, aquando da importação dos dados do núcleo para o programa de simulação, o procedimento foi um pouco diferente. Uma vez que o *ACP* necessitava de muitas outras propriedades que não estavam descritas, foi necessário desta forma procurar um ficheiro em formato *.xml* que se encontrava na base de dados do site *matweb* [53] disponível na internet com o material do núcleo selecionado.

Tabela 5.1: Propriedades mecânicas da fibra de carbono M35J obtidas por laminação manual adaptado de [2].

ρ [kg/m ³]	1642
t [mm]	0.09
E_1 [GPa]	101
E_2 [GPa]	10
E_3 [GPa]	10
G_{12} [GPa]	3.75
G_{23} [GPa]	1
G_{31} [GPa]	3.75
ν_1	0.3
ν_2	0.1
ν_3	0.3
$\sigma_{1,tração}$ [MPa]	1345
$\sigma_{1,compressão}$ [MPa]	-700
$\sigma_{2,tração}$ [MPa]	17
$\sigma_{2,compressão}$ [MPa]	-90
$\sigma_{3,tração}$ [MPa]	17
$\sigma_{3,compressão}$ [MPa]	-90
σ_{12} [MPa]	27.5
σ_{23} [MPa]	17
σ_{31} [MPa]	27.5

Tabela 5.2: Propriedades mecânicas do núcleo em favo de abelha de aramida adaptado de [2].

ρ [kg/m ³]	48
t [mm]	2
Resistência à compressão [MPa]	0.75
Módulo elástico à compressão [MPa]	25
Resistência à tração [MPa]	0.0015
Módulo elástico à tração	0.5
Resistência ao corte segundo a largura [MPa]	0.3
Módulo elástico segundo a largura [MPa]	11
Resistência ao corte segundo o comprimento [MPa]	0.45
Módulo elástico segundo o comprimento [MPa]	15

5.3 Aspectos importantes na simulação computacional

Neste subcapítulo são apresentados os resultados mais importantes das simulações estruturais executadas. A análise estrutural é feita individualmente a cada umas das partes em separado, isto é, é simulada a parte frontal em separado da parte traseira por dois motivos: o primeiro é porque

efetivamente são partes que embora tenham ligação ao chassis não estão unidas estruturalmente e a outra razão é para redução do número de nós/elementos por cada simulação.

5.3.1 ACP

Toda a análise estrutural foi feita recorrendo ao software *Ansys*. Utilizando-se para o efeito o módulo *ACP* para a definição dos laminados, rosetas, sentido de empilhamento e tudo o que se relaciona diretamente com a parte de compósitos. A carenagem do trenó é uma estrutura típica de parede fina pelo que o modelo geométrico importado em formato *.stp* é um conjunto de superfícies. Desta forma utilizaram-se elementos do tipo casca para a análise, pela simplicidade assim como baixo custo computacional envolvido. Tem, no entanto, alguns pressupostos que não podem ser descurados, nomeadamente a não variação de tensão ao longo da espessura, as propriedades de cada camada são constantes ao longo da espessura entre outras que devem ser tidas em conta como por exemplo ser utilizado um modelo linear assim como os deslocamentos serem iguais ou inferiores à espessura da casca.

5.3.2 Malha

Ainda no módulo *ACP*, foi necessário definir a malha. A malha constitui um dos passos fundamentais para qualquer análise estrutural, uma vez que necessita de acautelar dois pontos fundamentais: precisão e custo computacional. A precisão dos resultados pode ser verificada com base num estudo de convergência de malha que foi feito na secção 5.3.4 deste mesmo Capítulo 5. No entanto, este estudo de convergência de malha foi limitado pelas características do computador, isto é, o valor mínimo possível para o tamanho do elemento foi de 2 mm, que se revelou bastante dispendioso computacionalmente para o dispositivo utilizado, as características do computador utilizado para as análises apresentam-se resumidas na Tabela 5.3. O tipo de elemento utilizado foi um quadrilátero com seis graus de liberdade em cada nó correspondente às translações e rotações segundo os três eixos coordenados (x , y , z). A estrutura é um conjunto de superfícies. De forma a evitar ter de estabelecer contactos com todas elas, pela complexidade excessiva, foi utilizada a opção de *share topology* para que a malha gerada apresente, nas superfícies que se contactam, nós partilhados entre si.

Tabela 5.3: Características do computador utilizado.

Especificações do hardware utilizado	
Processador	Intel(R) Core (TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz
Memória RAM	12GB
Placa gráfica	NVIDIA GeForce GTX 1650

5.3.3 Análise estática

Com o modelo *ACP* totalmente definido e transferida a informação dos empilhamentos para o módulo *Static Structural*, é necessário definir o carregamento e condições de fronteira, assim como verificar se a malha está aceitável bem como se os empilhamentos estão corretos e de acordo com o definido no módulo *ACP*.

A análise estática estrutural permite determinar deslocamentos, tensões, extensões e forças em estruturas ou componentes causados por carregamentos que não induzem grandes efeitos de inércia e amortecimento.

Assume-se que os carregamentos e a resposta da estrutura variam lentamente com o tempo. Os tipos de carregamento que podem ser aplicados neste módulo são: forças externas e pressões, forças inerciais em estado estacionário, deslocamentos impostos e temperaturas [54].

Os carregamentos e as condições de fronteira aqui descritos, advêm do trabalho feito anteriormente em [2] com algumas adaptações face às mudanças da geometria, que foram aplicados/as a cada uma das partes da carenagem do trenó. Os três casos de carregamento podem ser divididos em:

- Fase de aceleração máxima em corrida;
- Fase da corrida inicial;
- Ocorrência de choque dos *bumpers* com as paredes da pista, ou seja, forças de impacto.

Para cada um dos casos é analisada a distribuição de deformações assim como o fator de segurança (*FS*) com base no critério de falha de *Tsai-Hill* e critério da tensão máxima do elemento, resultantes do carregamento submetido.

As condições de fronteira utilizadas na análise estrutural foram as seguintes:

- Para o caso do carregamento de inércia, foi utilizada a aceleração, sendo que esta condição de fronteira permite definir uma aceleração linear segundo um ou mais eixos e que atua sobre toda a estrutura no respetivo centro de gravidade do corpo [54].
- Para o caso do impacto sobre uma parede de gelo, foi utilizada a condição de fronteira de força, esta pode ser aplicada numa face, vértice, numa face de um elemento finito ou num nó de um modelo 3D. Para o caso de um modelo 2D pode ser aplicado numa aresta, vértice ou nó do elemento finito [54].
- Em todos os casos de carregamento utilizaram-se apoios fixos para fixar os pontos que têm ligação com o chassis. O apoio fixo permite que não haja qualquer deslocamento e rotação. Pode ser aplicado em modelos 2D ou 3D para fixar corpos, faces, arestas e/ou vértices. Deve ser tido o cuidado, quando se fixam arestas ou vértices, para não aparecerem singularidades, ou seja, pontos cuja tensão tende para infinito, também denominados de concentradores de tensão [54].

5.3.3.1 Carregamento de inércia

Relativamente à fase de corrida, o valor de aceleração longitudinal, lateral e vertical aplicado na carenagem é 0,6 g, 3,0 g e 10,0 g, respetivamente. Para a análise estática da parte frontal foram aplicados apoios fixos nas zonas de fixação da casca ao chassis e na longarina como se pode ver pela Figura 5.6. Já na parte traseira, foram fixos apenas os pontos de interface casca-chassis, como se comprova pela Figura 5.7, representado a azul. Em ambas as partes, a condição de carregamento aplicada foi a aceleração segundo os três eixos como já referido. Esta condição de fronteira submete todo o modelo à força de inércia resultante. Esta força é aplicada no centro de massa do corpo.

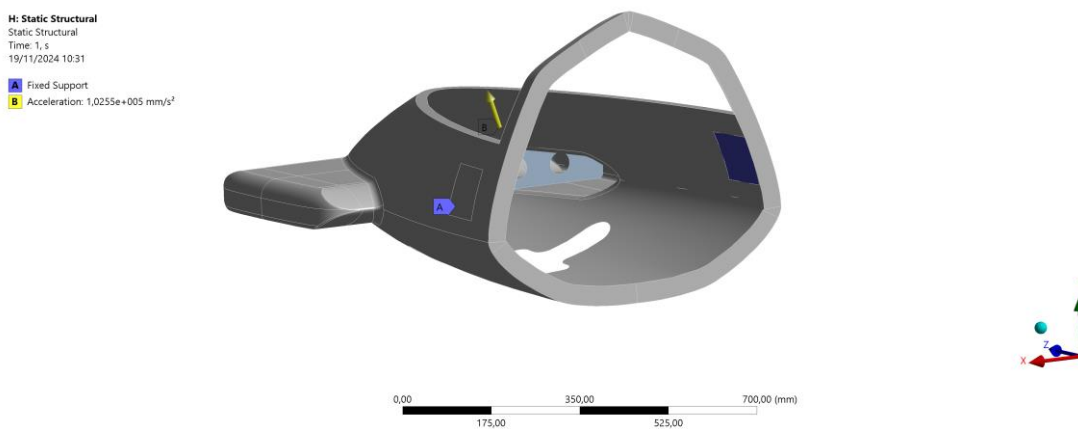


Figura 5.6: Condições de fronteira aplicadas na parte da frente da carenagem no caso do carregamento de inércia.

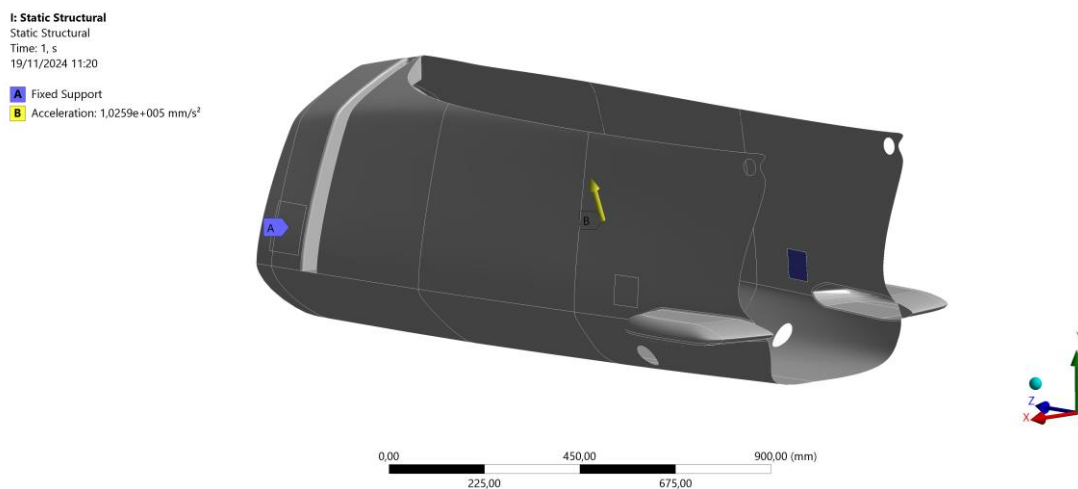


Figura 5.7: Condições de fronteira aplicadas na traseira da carenagem no caso do carregamento de inércia.

5.3.3.2 Carregamento na fase inicial da corrida

Para a fase em que o trenó está a ser empurrado, na parte inicial da corrida, considera-se que o piloto aplica uma força de 860 N na direção longitudinal e 800 N na direção vertical, na *push bar* do trenó. Considera-se que essa carga é transferida para a face onde a barra contacta com a fuselagem, como apresentado na Figura 5.8 e Figura 5.10 em B.

Relativamente ao homem-travão, este aplica uma força de 2600 N na direção longitudinal e -700 N na direção vertical nos pontos de apoio traseiros para o efeito, que no caso são as arestas junto da abertura na parte superior da componente traseira da carenagem e que se apresenta na Figura 5.8 em C tanto do lado direito como esquerdo. Deve ser destacado que este tipo de carregamento só é aplicado na parte traseira da carenagem.

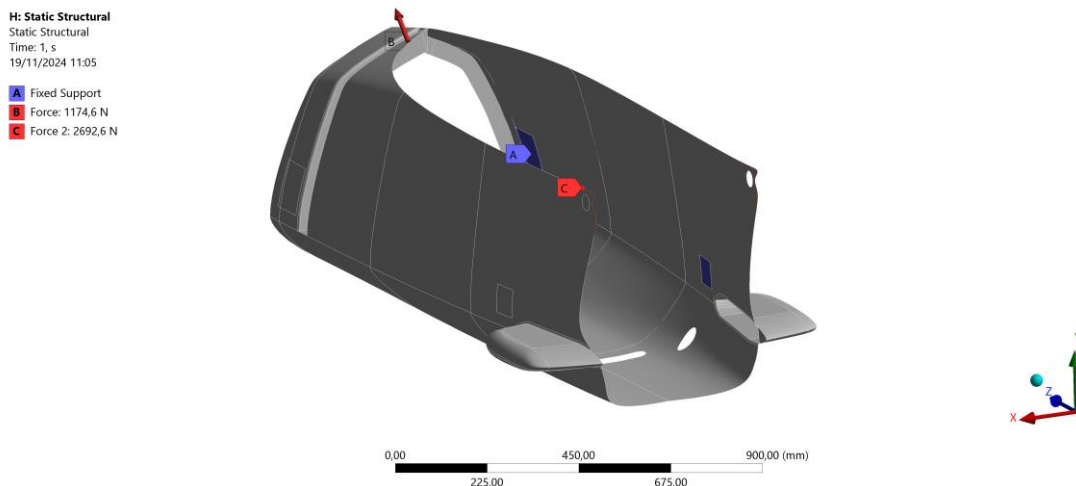


Figura 5.8: Condições de fronteira aplicadas na parte traseira da carenagem no caso do carregamento na fase inicial da corrida.

5.3.3.3 Carregamento de impacto

Quanto à simulação de possíveis impactos nos *bumpers* laterais, a força de reação que os *bumpers* frontais poderão sofrer é de 5750 N e o conjunto de *bumpers* traseiros, 30% do anterior valor apresentado, 1725 N, como é possível observar pela Figura 5.9 e pela Figura 5.10.

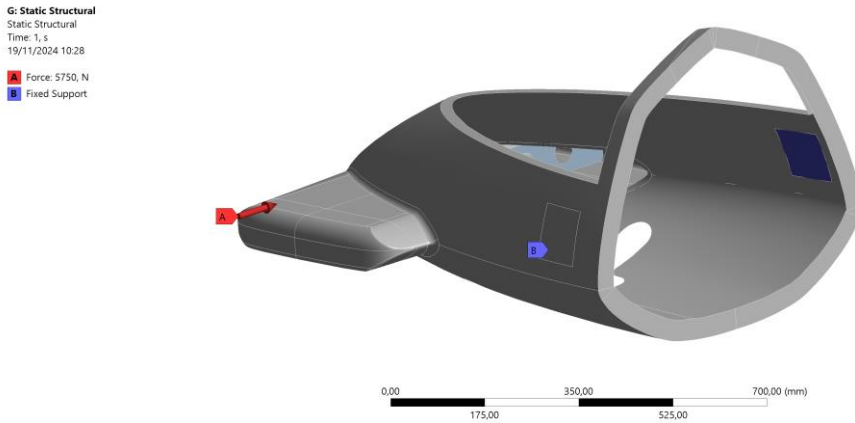


Figura 5.9: Condições de fronteira aplicadas na parte frontal da carenagem no caso do carregamento de impacto.

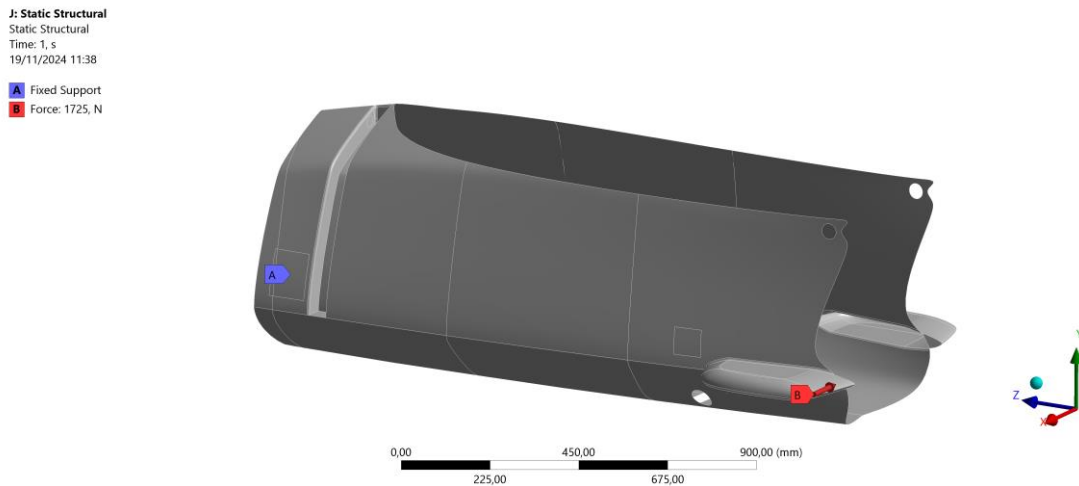


Figura 5.10: Condições de fronteira aplicadas na parte traseira da carenagem no caso do carregamento de impacto.

5.3.4 Resultados e estudo de convergência de malha

Nesta secção do trabalho encontram-se os resultados obtidos, nomeadamente as distribuições de deformação total assim como do fator de segurança. O processo de encontrar uma solução é moroso. Neste caso o objetivo é encontrar um empilhamento que resista às cargas aplicadas com o menor número de camadas possível, logo uma menor massa e custo envolvidos. Neste processo iterativo manual utilizando o *Ansys* foi definido como fator de segurança mínimo o valor de 1,25 e de deformação total máxima de 2 mm [2]. A deformação deve ser limitada na medida em que, deformações muito elevadas levam a que haja uma distorção da geometria da carenagem e

consequentemente uma redução do desempenho da mesma devido, por exemplo, ao incremento de força de resistência do ar na carenagem.

A análise dos resultados iniciou-se com o estudo do carregamento de inércia na parte traseira, Figura 5.11. É possível analisar que é atingido o valor máximo de 0,38 mm de deformação total na parte traseira, uma vez ser nesta zona onde se encontra a maior parte da massa da estrutura. O fator de segurança, Figura 5.12, atinge um valor de aproximadamente 3,06 nas imediações da zona onde está aplicado um apoio fixo.

Com os valores apresentados, conclui-se que este caso de carregamento na parte traseira não compõem uma condição crítica, estando os limites estabelecidos bastante afastados de forma positiva dos valores apresentados.

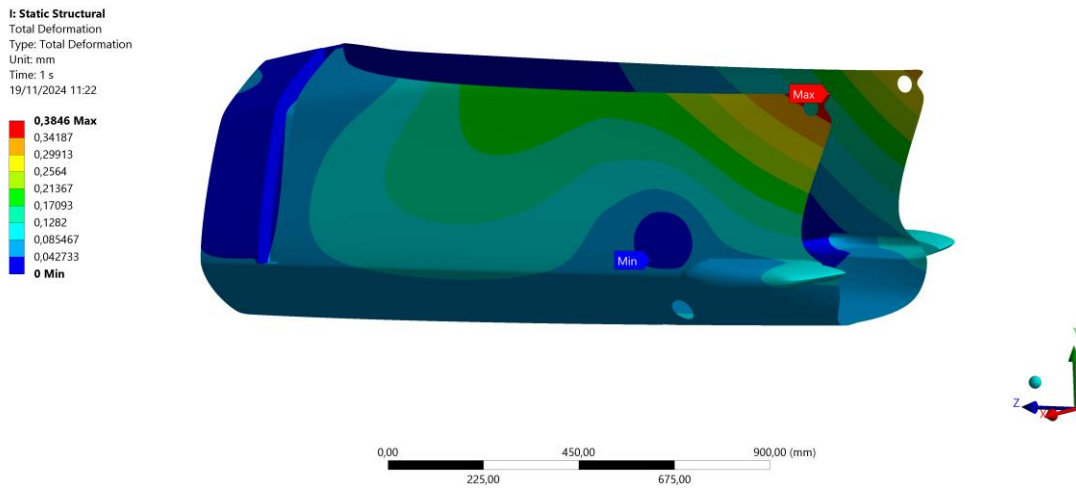


Figura 5.11: Distribuição de deformação total na parte traseira da carenagem sujeita ao carregamento de inércia.

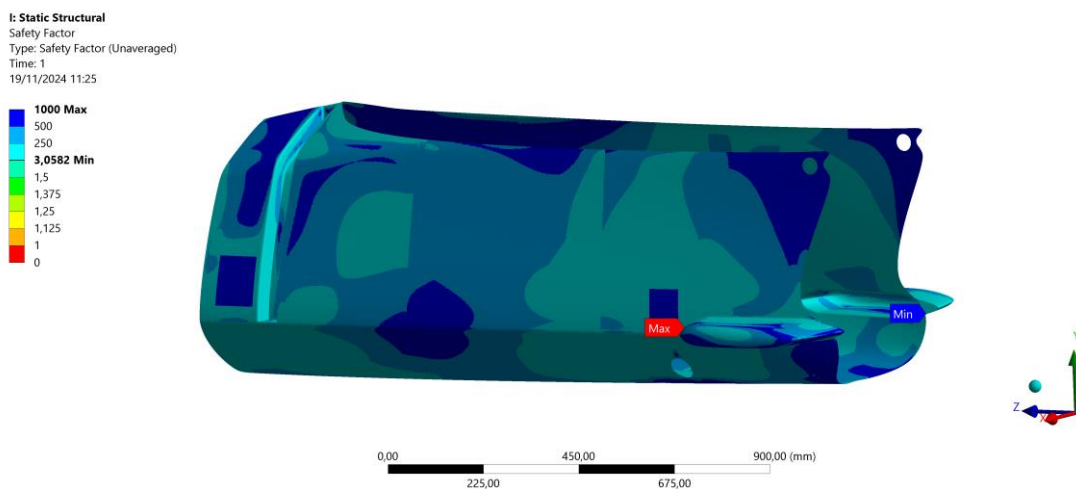


Figura 5.12: Distribuição do fator de segurança na parte traseira sujeita ao carregamento de inércia.

Na parte frontal, Figura 5.13 e Figura 5.14, a deformação máxima encontra-se sobretudo na zona da abertura para acondicionamento do sistema de direção do trenó, sendo o seu valor de 0,132 mm. O fator de segurança mínimo localiza-se na zona de interface entre a fuselagem e o *bumper* sendo o seu valor de 3,98. Assim, como já mencionado acerca da parte traseira, também na parte frontal da carenagem o caso do carregamento de inércia não é crítico, estando os valores obtidos por simulação bem afastados dos limites impostos.

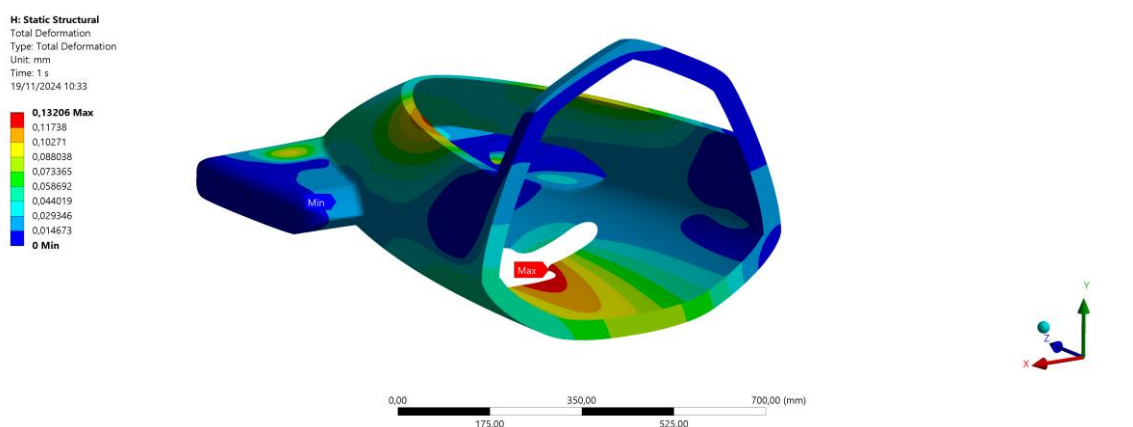


Figura 5.13: Distribuição de deformação total na parte frontal da carenagem sujeita ao carregamento de inércia.

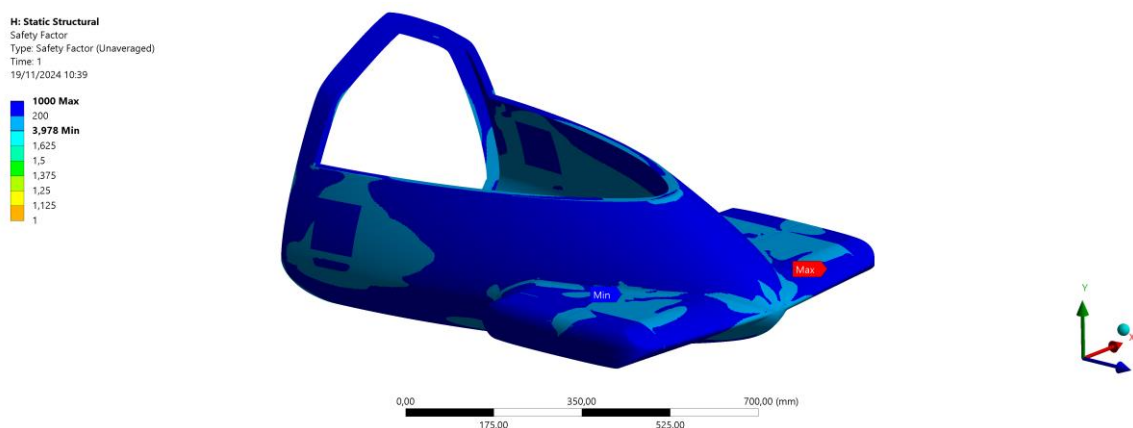


Figura 5.14: Distribuição do fator de segurança na parte frontal da carenagem sujeita ao carregamento de inércia.

Relativamente ao carregamento na fase inicial da corrida, a estrutura está a ser empurrada por forças do piloto e homem travão, principalmente segundo o eixo longitudinal do trenó. Apresenta-se nas Figura 5.15 e Figura 5.16 os resultados obtidos.

É possível observar que a deformação máxima se encontra na zona onde foram aplicadas as forças, resultantes da interação das mãos do homem travão com a carenagem, sendo por isso essa zona mais reforçada. As forças aplicadas encontram-se a uma distância considerável dos apoios fixos. O valor máximo de deformação total é de 1,16 mm. Na Figura 5.15 é possível também analisar que existe deformação considerável na zona onde foram submetidas as forças aplicadas pelo piloto do trenó. Relativamente à Figura 5.16, é possível ver que o fator de segurança mínimo se encontra na zona de contacto entre a fuselagem e a *push bar*. Nessa mesma localização, aquando do processo de simulação, foi encontrado um ponto de concentração de tensão. Pelo facto desta interface fuselagem-*push bar* formar um ângulo reto e um vértice, por muito que se refinasse a malha naquele ponto o fator de segurança diminuía cada vez mais, ou seja, a tensão estava a tender para infinito. A resolução deste problema passou pelo arredondamento das arestas, retirando o vértice e a aresta. Após estas alterações geométricas fundamentais para a apresentação de resultados com significado físico coerente, o problema foi resolvido sendo possível obter convergência de resultados. Este tipo de singularidades é particularmente comum em simulações FEA e algumas das vezes não é de todo possível solucioná-las.

O fator de segurança mínimo, como é possível observar, toma o valor de 1,42 estando assim já perto do limite estabelecido.

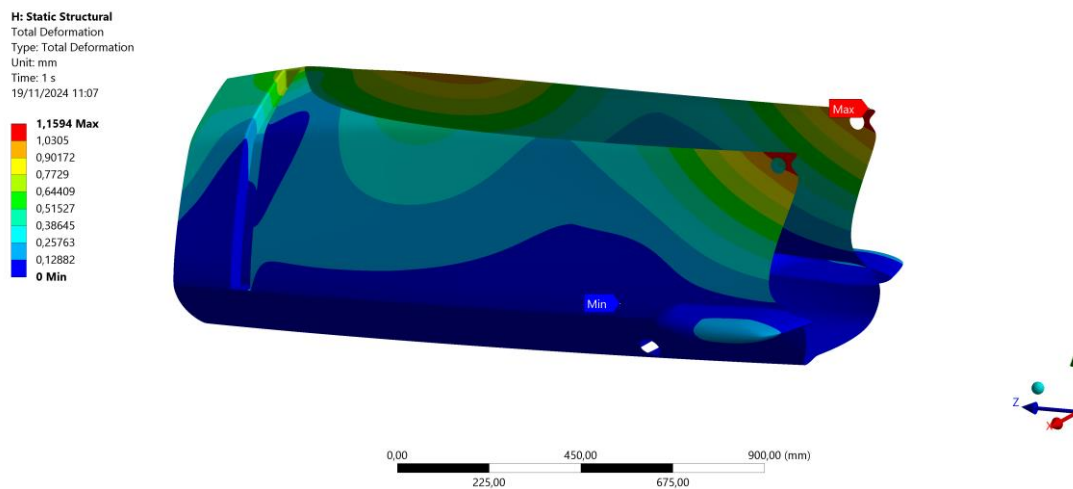


Figura 5.15: Distribuição da deformação total na parte traseira da carenagem sujeita ao carregamento da fase inicial da corrida.

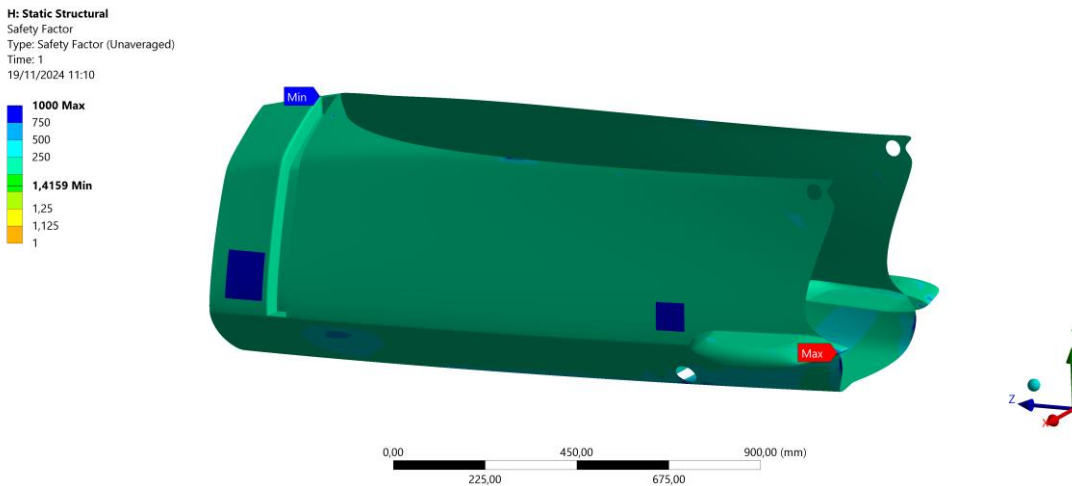


Figura 5.16: Distribuição do fator de segurança na parte traseira sujeita ao carregamento da fase inicial da corrida.

Por último, apresentam-se os resultados devido ao carregamento de impacto em cada uma das partes (frontal e traseira). Começando pela parte frontal, é possível observar pela Figura 5.17 que a zona que apresenta maior deformação é nas imediações da abertura para acomodação do sistema de direção assim como na borda de contacto com a capota, atingindo o seu valor máximo de 0,35 mm. É no *bumper* esquerdo onde está aplicada a força de impacto, que se observa os valores de maior módulo no caso da deformação. Deve ser referido que esta força de impacto também pode ser aplicada no *bumper* direito, sendo as distribuições exatamente as mesmas, mas na zona simétrica (direita), uma vez que a parte frontal da carenagem apresenta um plano de simetria (yz).

A distribuição de fator de segurança, Figura 5.18, como seria de esperar apresenta o seu valor mínimo de 1,7 na zona onde o carregamento de 5750 N é aplicado, mais precisamente no ponto de contacto entre a longarina e a casca do *bumper*.

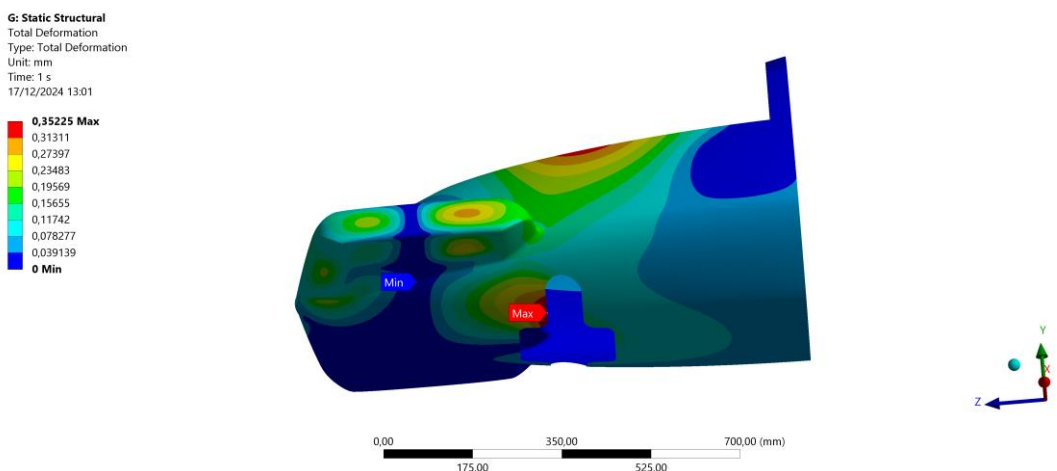


Figura 5.17: Distribuição de deformação total na parte frontal da carenagem sujeita ao carregamento de impacto.

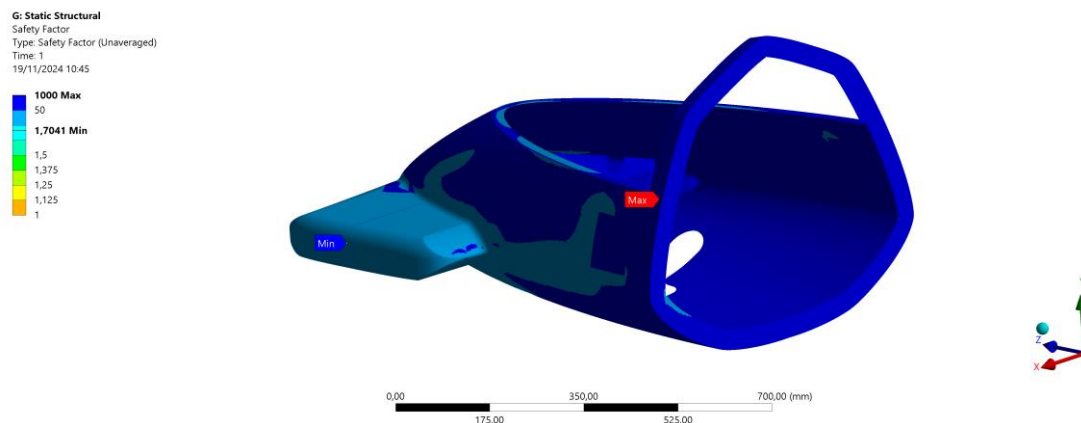


Figura 5.18: Distribuição do fator de segurança na parte frontal da carenagem sujeita ao carregamento de impacto.

Quanto à parte traseira, como é possível ver pela Figura 5.19, o valor de deformação máxima é de 1,36 mm sendo este atingido na parte mais traseira do *bumper*. Estando o apoio fixo localizado muito à frente, a casca sofre uma deflexão semelhante à de uma viga carregada na ponta. Relativamente ao fator de segurança, Figura 5.20, o valor atingido é de 1,28, sendo nesta simulação o mais próximo do limite estabelecido de 1,25. O valor máximo encontra-se na zona de interface entre o *bumper* e a casca mais traseira. Até ser atingido este valor foram necessárias muitas iterações e até mesmo uma alteração geométrica no que toca à adição de uma tampa na parte mais traseira do *bumper* para efetivamente aumentar a rigidez assim como a resistência da zona crítica. Desta forma, foi possível resolver a falha neste ponto. Ao contrário do que acontecia na geometria inicial do trenó simulada por [2], os *bumpers* desta nova geometria encontram-se bem mais longe dos apoios, daí o aumento do reforço das camadas, como se pode ver mais à frente na lista de laminados utilizados que se apresenta na secção 5.3.5.

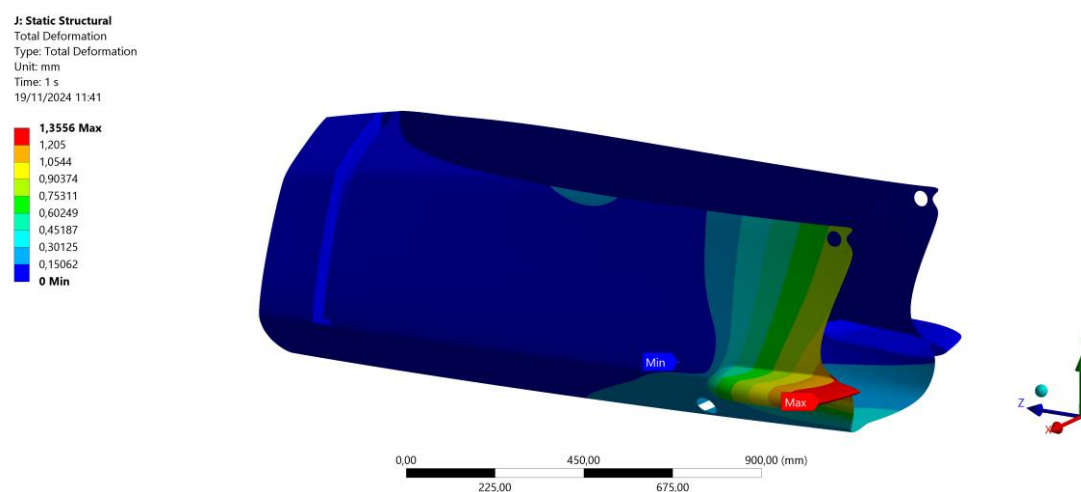


Figura 5.19: Distribuição de deformação total da parte traseira da carenagem sujeita ao carregamento de impacto.

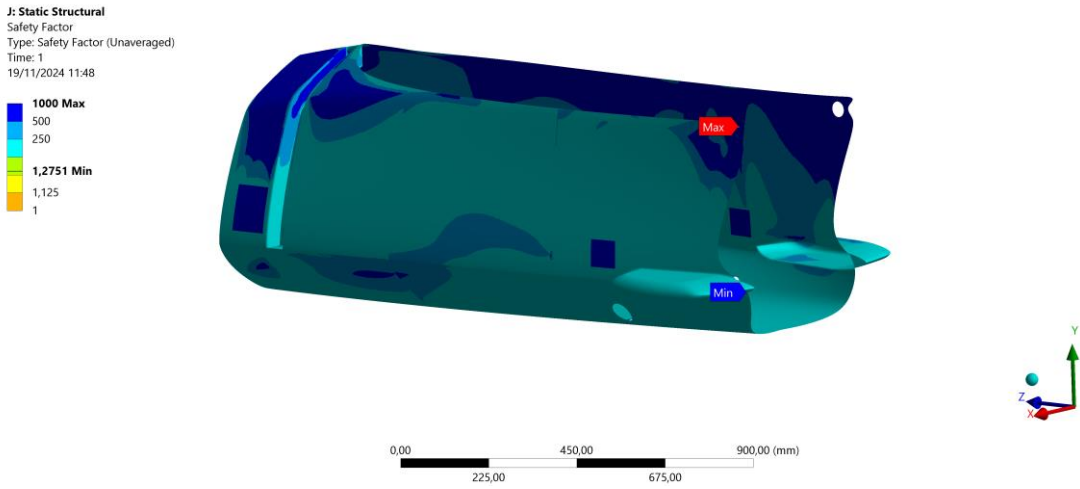


Figura 5.20: Distribuição do fator de segurança na parte traseira da carenagem sujeita ao carregamento de impacto.

Estando os resultados apresentados e explicados, é necessário em qualquer simulação computacional verificar a validade dos resultados, ou seja, confirmar que os resultados convergem ou que pelo menos têm a tendência para tal. Os resultados têm por isso de ser independentes da malha gerada. Posto isto, apresentam-se as Figura 5.21 e Figura 5.22 para evidenciar que todos os resultados aparentam convergir, sendo que existem dois que apresentam maior variação. São eles o fator de segurança no caso do carregamento de inércia na parte frontal assim como o fator de segurança no caso do carregamento de impacto na parte traseira da carenagem; a sua variação do penúltimo para o último resultado é de 9,8% e 12,6%, respetivamente. Por norma, as deformações são sempre convergentes, já as tensões podem variar sendo possível também que nunca convirjam na totalidade como acontece em pontos de concentração de tensão.

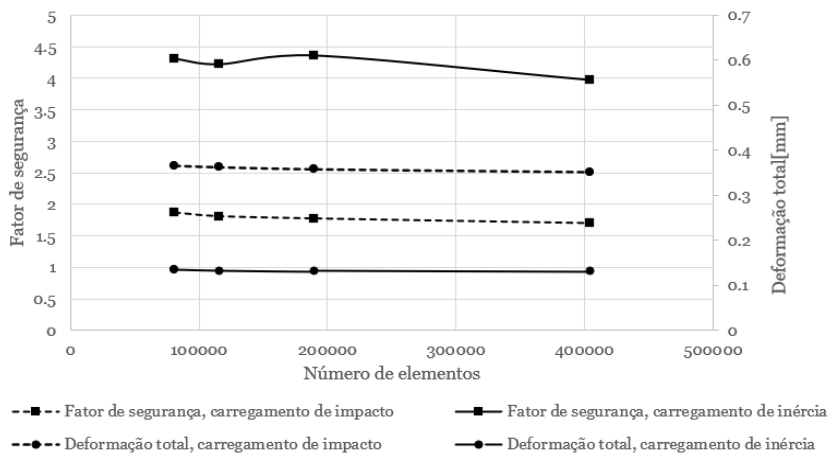


Figura 5.21: Estudo de convergência de malha da parte frontal da carenagem.

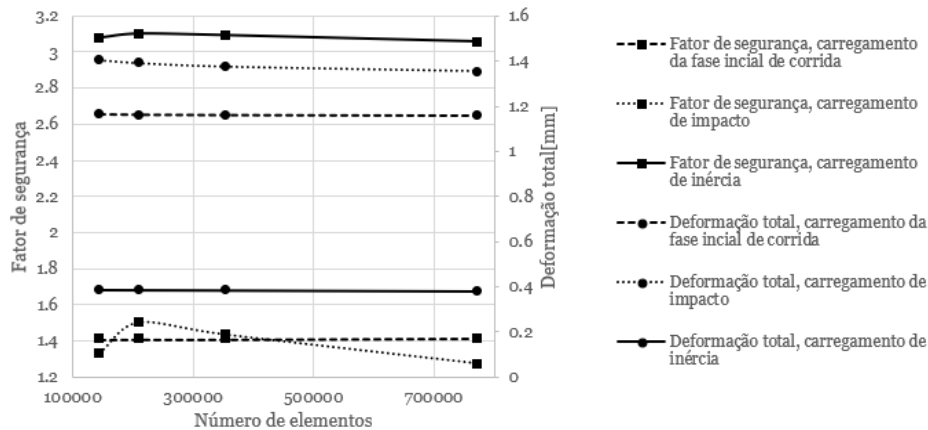


Figura 5.22: Estudo de convergência de malha da parte traseira da carenagem.

Quanto à qualidade da última malha utilizada na parte frontal e traseira, apresenta-se na Tabela 5.4 e Tabela 5.5 o resumo das características técnicas das malhas geradas:

Tabela 5.4: Valores médios dos parâmetros de qualidade da malha da parte traseira da carenagem.

		Porcentagem de elementos
Razão de aspeto	1.05	99
Skewness	5.99e-2	83
Qualidade do elemento	0.95	87

Tabela 5.5: Valores médios dos parâmetros de qualidade da malha da parte frontal da carenagem.

		Porcentagem de elementos
Razão de aspeto	1.06	99
Skewness	7.68e-2	73
Qualidade do elemento	0.93	77

Quanto à razão de aspeto, esta avalia o quociente entre o comprimento mais longo pelo mais curto de cada elemento finito utilizado, logo varia da unidade até ao infinito. Quanto mais perto da unidade melhor qualidade confere à malha. Para ambas as partes (frontal e traseira) os valores médios obtidos estão muito próximos da unidade pelo que têm boa qualidade.

O parâmetro *Skewness*, avalia quanto um elemento quadrado é distorcido, sendo o ideal, o mínimo possível, ou seja, aproximar-se do valor zero. Nas malhas geradas este valor é mínimo, logo, também este parâmetro contribui positivamente para uma boa qualidade da malha.

Por fim, a qualidade do elemento é um indicador composto, quanto mais perto da unidade melhor e, verificando os valores, conclui-se que tem boa qualidade.

Em conclusão, a malha apresenta boa qualidade sendo a precisão dos resultados boa apesar do poder computacional disponível ser limitado.

5.3.5 Empilhamento obtido

Por fim, apresenta-se o empilhamento obtido e cujos resultados já se apresentaram na secção 5.3.4 no que toca tanto à distribuição de deformação total assim como ao fator de segurança associado ao critério de falha de *Tsai-hill* e tensão máxima.

A divisão das diferentes partes, Figura 5.23, assentou sobretudo na repartição anteriormente feita aquando da análise estrutural da carenagem preliminar [2]. Houve a necessidade de acrescentar mais divisões, tanto nas partes frontal como traseira, de modo a reduzir o número de camadas.

Relativamente à parte frontal, esta foi dividida em seis partes: fuselagem (laranja), parte terminal dos *bumpers* (vermelho), *bumper* (azul), longarina (vermelho), borda de apoio para assentamento da capota e caverna (azul). Apresenta-se na Tabela 5.6 a descrição de cada constituinte para o caso da parte frontal.

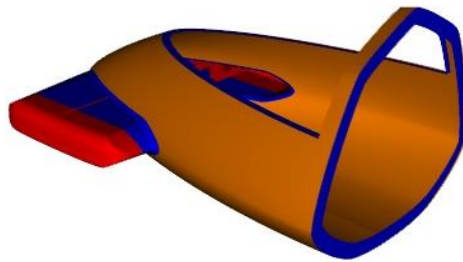


Figura 5.23: Empilhamento resultante na parte frontal da carenagem.

Tabela 5.6: Resumo do empilhamento da parte frontal da carenagem.

Parte	Cor	Camada superior	Espessura do núcleo [mm]	Camada inferior
Fuselagem	Laranja escuro	(90/0) ₃	2	(90/0) ₃
Parte terminal <i>bumpers</i>	Vermelho	(90/0) ₁₆	-	-
Raiz do <i>bumper</i>	Azul	(90/0) ₄	-	-
Longarina	Vermelho	(90/0) ₂₆	-	-
Borda da capota	Azul	(90/0) ₂	-	-
Caverna	Azul	(90/0) ₂	-	-

Relativamente à parte traseira, esta foi dividida em nove partes: caverna (azul escuro), parte dianteira (verde claro), parte do meio (verde escuro), parte traseira (vermelho), interface bumper-parte traseira (azul turquesa), *push bar* (azul claro), raiz do bumper (verde azulado), parte terminal *bumper* (azul escuro) e por fim tampa do *bumper* como é possível observar pela Figura 5.24. Nesta

parte da carenagem foi acrescentada uma componente nova de interface entre o *bumper* e a parte traseira uma vez que essa região é particularmente crítica aquando do carregamento de impacto aplicado. O resumo do empilhamento encontra-se na Tabela 5.7.

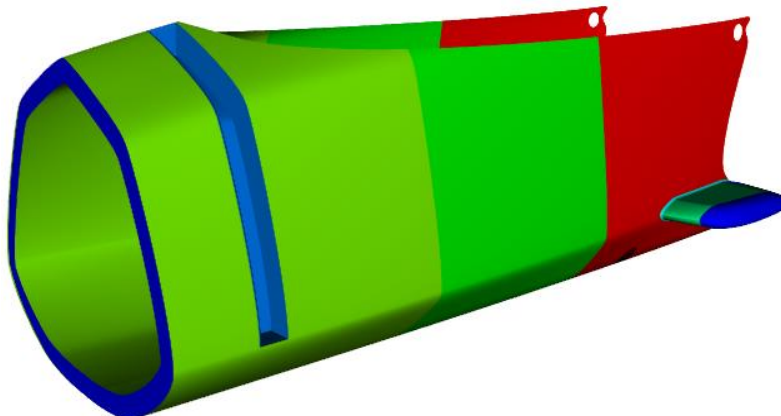


Figura 5.24: Empilhamento resultante na parte traseira da carenagem.

Tabela 5.7: Resumo do empilhamento da parte traseira da carenagem.

Parte	Cor	Camada superior	Espessura do núcleo [mm]	Camada inferior
Caverna	Azul escuro	(90/0) ₆	-	-
Parte dianteira	Verde claro	(90/0) ₁₀	8	(90/0) ₁₀
Parte do meio	Verde escuro	(90/0) ₁₀	6	(90/0) ₁₀
Parte traseira	Vermelho	(90/0) ₂₀	10	(90/0) ₂₀
Interface bumper parte traseira	Azul turquesa	(90/0) ₃₀	-	-
Push bar	Azul claro	(90/0) ₂₀	-	-
Raiz bumper	Verde acizentado	(90/0) ₃₅	-	-
Parte terminal do bumper	Azul escuro	(90/0) ₁₀	-	-
Tampa bumper	Azul escuro(não visível)	(90/0) ₁₅	-	-

De forma geral verifica-se que todas as camadas aplicadas têm a orientação de 0° e 90°. Este facto explica-se pelo carregamento ser essencialmente normal à casca. A espessura de núcleo utilizada foi a que já era aplicada no modelo de trenó preliminarmente analisado e que se revelou suficiente para a atual geometria. Também é possível analisar que o número de camadas é essencialmente o dobro daquelas que foram utilizadas no modelo preliminar. Este facto deve-se, ao método de fabrico adotado ser a laminação manual (*Wet Lay-Up*), levando a uma redução nas propriedades mecânicas dos laminados.

6 Planeamento do procedimento de fabrico

Neste capítulo da dissertação é descrito todo o procedimento de fabrico da carenagem do trenó em estudo. Tendo por base a carenagem sólida, em que apenas está presente a forma exterior que depois evoluiu para a estrutura física e real da mesma em forma de superfície, foi possível listar um conjunto de tarefas que são necessárias realizar para a construção da carenagem e que se seguem nos subcapítulos seguintes.

6.1 Projeto dos moldes

O processo de laminação é efetuado com o auxílio de um molde fêmea bipartido feito em MDF, pelo que foi necessário tratar da modelação dos moldes. Deve referir-se que foi utilizado o software *CATIA V5* em todos os desenhos CAD efetuados no âmbito desta dissertação.

A partir do modelo sólido executado por [52] e importado o ficheiro em formato *.stp*, foram feitas algumas alterações no que toca ao preenchimento de espaços vazios assim como a incorporação da cavidade que condiciona a *push bar* do trenó. Para o efeito foi necessário extrair a superfície onde se localiza a cavidade e fazer uma interseção do plano de simetria da mesma com a superfície extraída, obtendo-se uma linha. Foi desenhado o perfil da cavidade no ponto inicial da linha gerada. De seguida foi feito um varrimento do perfil, estando pronta a superfície a ser convertida numa parte sólida. Por fim, foi utilizada uma operação booleana de remoção: à carenagem sólida em bruto, foi removida a parte sólida criada através da superfície varrida, ficando uma cavidade tal como desejado. Ainda foram feitos alguns ajustes no que toca ao preenchimento de espaços vazios e correção de superfícies que iriam prejudicar as operações seguintes.

Estando o modelo sólido totalmente concluído e tratado, foi possível passar à fase seguinte. Esta etapa passa por criar um prisma retangular, cuja altura, largura e comprimento foram definidas de modo a haver uma distância mínima de 150 mm à parte mais exterior da carenagem, Figura 6.1, de modo a garantir que o futuro molde tenha boa resistência. Desenhado o prisma retangular totalmente sólido, foi utilizada mais uma vez uma operação booleana de remoção, isto é, foi removida do prisma a carenagem sólida editada, ficando assim o prisma com a cavidade correspondente, originando assim o molde desejado.

O molde foi cortado de modo a obter a parte esquerda e direita separadas, uma vez que a laminação deve ser feita em cada uma das metades de forma independente. Para facilitar a operação de desmolde das duas metades, em zonas que tenham duas faces totalmente paralelas como é o caso da *push bar* e a raiz dos *bumpers*, foi aplicada conicidade no desenho da *push bar*. Como não é possível fazer alterações ao ficheiro *.stp* no que toca à modificação da raiz do *bumper*, a melhor solução para mitigar o problema passou pelo tratamento das superfícies do molde, de forma a ser retirado algum material para garantir uma conicidade mínima.

Apresenta-se nas Figura 6.1 e Figura 6.2, o molde bipartido, parte esquerda e direita respetivamente.

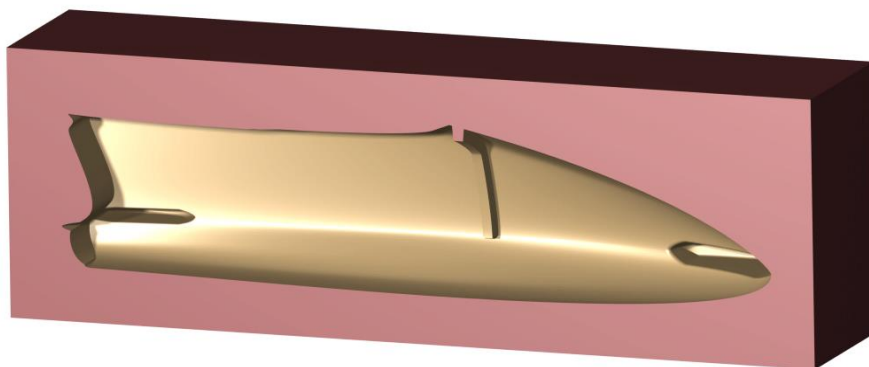


Figura 6.1: Metade esquerda do molde.

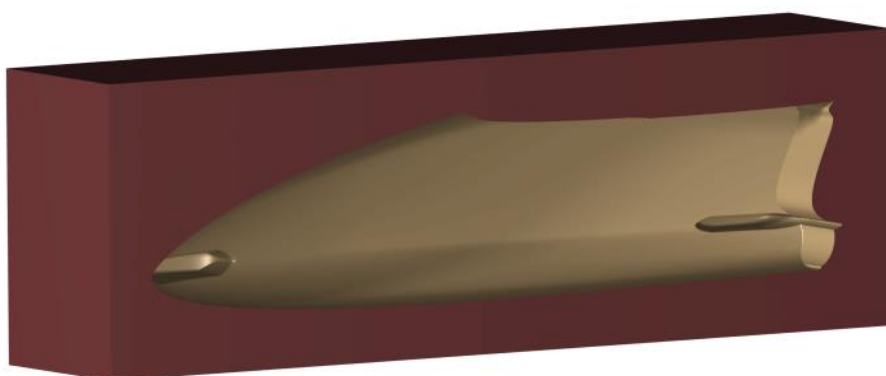


Figura 6.2: Metade direita do molde.

Como já referido anteriormente neste trabalho, a parte terminal dos *bumpers* frontais, possibilita a troca em caso de dano, pelo que também foi desenhado um molde para este componente, como se apresenta na Figura 6.3. Este molde foi dividido em duas partes que são unidas a partir de 5 varões roscados com anilha e porca em cada umas das faces das duas metades (superior e inferior). Esta divisão foi feita para evitar a alteração geométrica e facilitar o desmolde da peça, tal solução foi possível uma vez que é um componente de pequena dimensão.

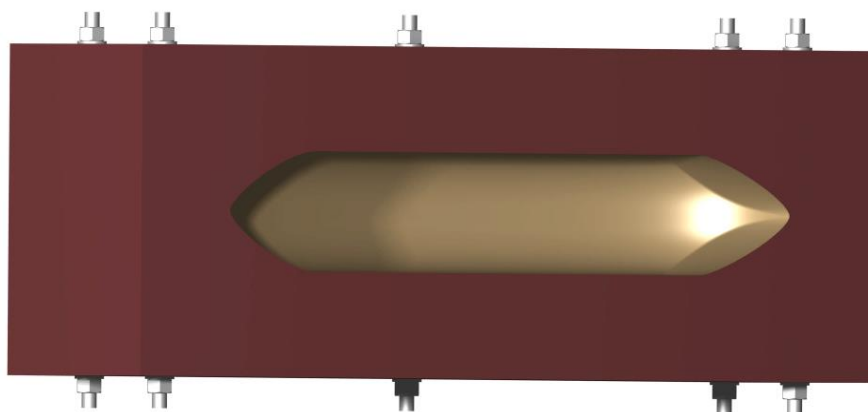


Figura 6.3: Molde da parte destacável do *bumper*.

Com os desenhos finalizados, o passo seguinte é a construção do molde, que se inicia com a colagem de sucessivas placas com um adesivo apropriado para colagem de madeira. Após a colagem, obtém-se os blocos brutos que devem ser enviados juntamente com os desenhos para a maquinação. Depois dos moldes estarem maquinados, e uma vez ser necessário reduzir a porosidade da superfície interna do molde, esta tem de ser polida com uma lixa de número elevado até ficar lisa ao toque. De seguida o molde tem de ser soprado para não ficarem resíduos do processo de polimento e por fim deve ser aplicada uma tinta apropriada para uma superfície melhorada, tapa-poros e só depois uma passagem de tinta primária. Caso se verifique que o acabamento ainda apresenta alguma rugosidade ou porosidade, o processo anterior de polimento e aplicação de tinta deve ser repetido até ser atingida a melhor superfície possível. É de notar que este processo deve ser efetuado com o cuidado adequado uma vez que facilmente se induzem defeitos superficiais aquando da manipulação dos moldes. A superfície interna dos moldes deve ser a melhor possível para que a forma exterior da carenagem seja também muito boa.

Sendo necessário seguir o empilhamento definido, sugere-se a colocação de agulhas (suficientemente compridas) espetadas nas localizações chave de forma a tornar mais fácil o empilhamento no que toca às posições das camadas. Estas inserções têm a função secundária de servir como localizadores para a colocação dos tecidos de reforço e núcleo. Para efeitos de corte e separação de partes da carenagem como se refere na secção 6.3, é importante que o molde seja marcado de modo a facilitar os processos de separação das partes assim como colagens entre a carenagem e o chassis, caso contrário esses procedimentos tornam-se complicados e pouco precisos.

6.2 Construção dos laminados da fuselagem

Neste subcapítulo dá-se início à explicação do procedimento de laminação propriamente dito. A laminação deve ser feita com especial cuidado, uma vez que está a ser utilizado um molde fêmea e que a primeira camada será a exterior e, portanto, a que fica exposta durante a prova.

O procedimento inicia-se com a realização de *templates* em papel a partir do molde fêmea. É de notar que a camada base para o caso da parte traseira e frontal da carenagem é igual para todas as diferentes regiões.

Procede-se de seguida ao recorte dos tecidos com as formas pretendidas. Aplica-se cera na superfície do molde e de seguida um agente desmoldante para evitar problemas de adesão entre o molde e a peça no desmolde da carenagem. Deixa-se secar o agente desmoldante o tempo indicado no rótulo do produto. Prepara-se a solução de *gelcoat* com o devido catalisador. Estando a mistura finalizada, deposita-se uma camada fina sobre todo o molde (direito e esquerdo). Terminada a deposição de *gelcoat*, aguarda-se que o mesmo cure para de seguida preparar a resina que irá ser necessária à laminação juntamente com o endurecedor.

Estando os tecidos previamente cortados segundo os *templates* e a resina pronta a aplicar, pode dar-se a deposição da primeira camada de resina sobre cada uma das metades do molde. De seguida aplica-se os primeiros tecidos que devem ser dispostos com grande cuidado de forma a garantir a melhor adesão sobre o molde, e assim reduzir o efeito de “*bridging*” em zonas próximas de arestas.

Existe uma região na parte frontal (fuselagem) da carenagem que logo após as primeiras camadas necessita da aplicação de núcleo, pelo que mais uma vez devem ser usados os *templates* feitos previamente para o recorte do material do reforço. Cortadas as partes de núcleo com as formas adequadas é novamente necessária a preparação de resina juntamente com endurecedor da mesma forma como foi feito para a aplicação da primeira camada de reforço. O núcleo pode ser de difícil flexão principalmente na parte frontal, nesta zona aconselha-se a utilização de uma pistola de ar quente para tornar o núcleo mais moldável e de mais fácil aplicação em zonas particularmente curvas.

O procedimento de aplicação de resina, tecidos de reforço e material de núcleo é sempre o mesmo e deve ser repetido. Há, no entanto, um ponto importante no que toca à aplicação da resina, que é o tempo de trabalho que apresenta, sendo em média 30 a 45 minutos. Logo, uma vez que o trenó apresenta uma dimensão considerável deve ser feito o processo de laminação em etapas, não demorando em cada uma mais do que o tempo de trabalho da resina, pelo que devem ser laminadas até três camadas de cada vez. Deve ser aguardado entre cada uma delas o tempo de cura aconselhado para um ambiente seco e com temperatura não inferior a 20°C. Outra possibilidade que existe é de laminação toda de forma seguida, mas utilizando uma resina com tempo de cura alargado. Para o caso de haver mais mão de obra disponível, a primeira opção é melhor, caso contrário a segunda é a mais indicada.

Neste processo de laminação, ainda não estão considerados os furos/aberturas, ou seja, lamina-se na mesma sobre os mesmos como se não existissem. Logo após a deposição de material do núcleo, em cima do mesmo aplica-se uma passagem de resina para depois ser laminada a camada seguinte, de reforço da estrutura.

Há ainda um aspeto muito importante que deve ser tomado em conta. As duas metades vão ser laminadas separadamente. Na zona onde há a união dessas metades deve ter-se o cuidado de apenas laminar as camadas base, ou seja, as primeiras abaixo do núcleo, num espaçamento de 50 mm para cada lado. Este procedimento vai diminuir o desperdício de material e permitir a união correta das duas metades.

6.3 Aberturas, furos e uniões

Com o empilhamento completo, procede-se ao desmolde de cada uma das metades da carenagem dos moldes respetivos. Uma vez que as duas metades têm de ser unidas para formar o conjunto completo, deve juntar-se lado a lado as duas metades assim como posicionar a longarina entre elas. Com esta montagem, e para permitir a união, são adicionadas duas a três camadas de tecido bidirecional na zona onde a laminação está propositadamente por concluir. Reposiciona-se e cola-se o núcleo novamente e por cima lamina-se tal como apresentado na Tabela 5.6 e Tabela 5.7, ficando a junta colada do tipo como se apresenta na Figura 6.4, havendo sobreposição tanto face inferior assim como superior para permitir uma transferência de esforços adequada.

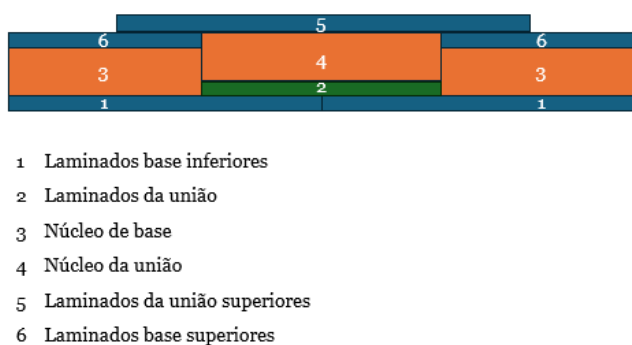


Figura 6.4: Representação esquemática da junta de união das metades da carenagem.

Relativamente à parte traseira procedeu-se: à furação para as *push handles* do trenó, ao corte das aberturas para passagem de parte da estrutura do chassis e também ao corte para a abertura onde se vai colocar o travão.

Na parte frontal da fuselagem é necessário recorrer ao corte/separação da parte superior (capota) da inferior (fuselagem), assim como proceder ao recorte da abertura na parte inferior. A carenagem

do trenó é dividida em duas partes frontal e traseira, tem de se proceder ao corte ao longo de todo o perímetro da secção que faz a divisão das partes do mesmo. Estas partes depois de separadas tem de ser unidas ao chassis posteriormente. Para o caso em estudo, o chassis já incorpora as estruturas de suporte da carenagem que será posteriormente ligada através de ligações aparafusadas, sendo unidas nas zonas de contacto a cinzento como é possível ver pela Figura 5.4.

Estes cortes devem ser efetuados por meio de uma CNC ou em caso de inexistência desse equipamento, terá de ser um misto de utilização de berbequim e disco de corte. Devem ser utilizados equipamentos de proteção individual devido à toxicidade das partículas geradas no corte deste tipo de materiais.

6.4 Estrutura interna

Para a conceção da longarina, em primeiro lugar devem ser feitos *templates* com a geometria exata da mesma para depois serem cortados tecidos com igual dimensão e forma. Depois, o procedimento é o de laminação manual como já explicado no subcapítulo 6.2. Estando a longarina laminada na totalidade, deve ser verificada a geometria do perímetro exterior e em caso de necessidade proceder ao corte de arestas mal concebidas. Por fim, devem ser feitos os furos internos com auxílio de uma broca. A longarina é incorporada na parte frontal, logo que se iniciar o processo de união das duas metades da carenagem. Para fixação da longarina à carenagem, é necessário laminar duas camadas de reforço bidirecional, representadas a verde na Figura 6.5, de forma a fixá-la em todas as arestas externas ao longo da fuselagem.

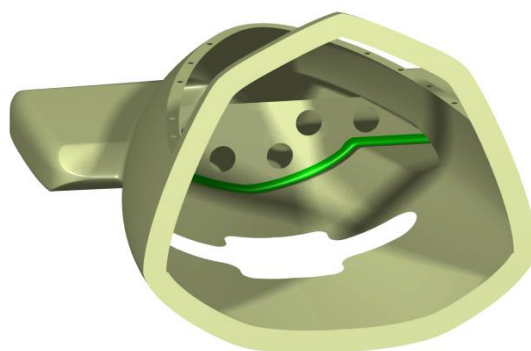


Figura 6.5: Interface longarina-fuselagem.

Quanto à parte traseira da carenagem, nomeadamente a caverna, logo após serem feitos todos os furos e aberturas, e estando as duas partes do trenó totalmente separadas (frontal e traseira), a forma de fabrico da caverna passa pelas seguintes etapas: colocação de uma tábua larga (contraplacado por exemplo) em contacto com a aresta que partilha a ligação da parte anterior com

a posterior e com posterior laminação de um perfil em L em toda a periferia interna aplicando o método de laminação manual já explicado e explorado na secção 6.2 segundo o empilhamento definido.

A parte da frente da carenagem, por ter uma abertura, necessita de ser reforçada tanto na tampa como na parte inferior. À semelhança do que se fez na parte traseira da carenagem, lamina-se um perfil em L em todo o perímetro da abertura das duas partes (capota e parte frontal) de forma a poder ligá-las mais facilmente com auxílio de parafusos. Neste caso utilizaram-se vinte e dois parafusos M6 com porca e duas anilhas (uma em cada superfície de contacto) como se pode ver pelas Figura 6.6 e Figura 6.7. O processo de laminação é manual e utiliza as placas que servem de base para a laminação das cavernas. Ambas as placas servem de suporte à laminação em L, tanto da capota como da parte inferior e devem ter uma abertura no meio para tornar os procedimentos de laminação manual mais simples e de fácil acesso.

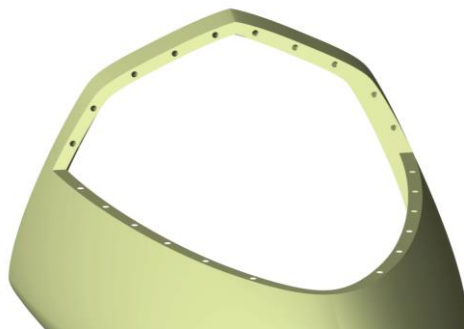


Figura 6.6: Parte frontal da carenagem onde se encontram os pontos de união à capota.



Figura 6.7: Capota da parte frontal da carenagem.

Estando a parte destacável totalmente pronta, deve ser laminado um perfil em toda a volta ao longo da aresta da raiz do *bumper* e da ponta, segundo o processo de laminação manual. Por fim, a forma de os unir é através de 7 parafusos M4 com anilha e porca entre os dois perfis laminados em cada uma das partes onde o acesso é mais fácil. Na zona mais próxima do nariz, o mecanismo de ligação é distinto, a união é através de pinos cónicos que são impressos em 3D e apertados com uma porca de plástico também impressa, na superfície da ponta do *bumper*, permitindo assim entrar à pressão fixando a ponta do *bumper* na zona mais dianteira como se pode ver pelas Figura 6.8 e Figura 6.9.

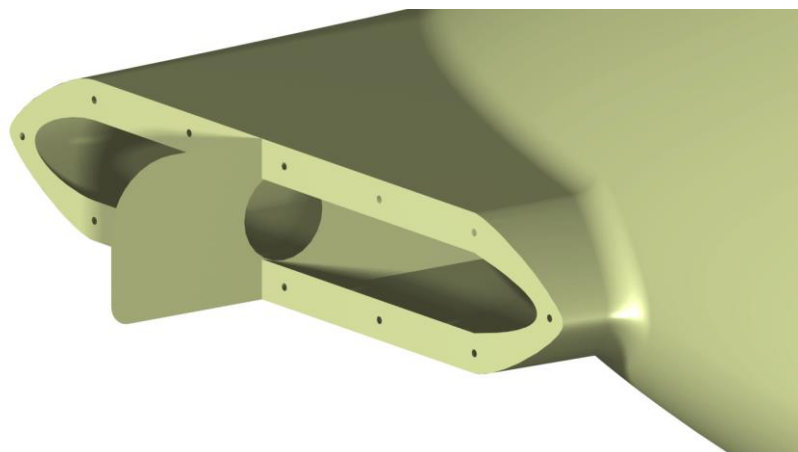


Figura 6.8: Ligação entre a raiz e a ponta do *bumper*.

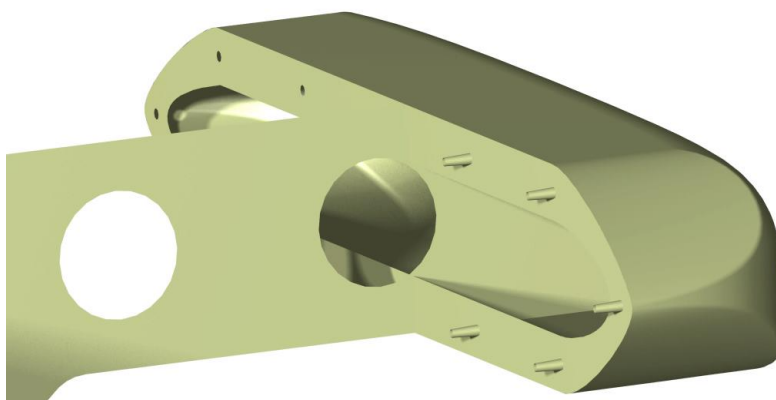


Figura 6.9: Detalhe da interface da ponta do *bumper*.

Por último, deve ser referido que as aberturas onde passam os eixos dos patins são reforçados com borracha a toda a volta para um encaixe entre os tubos de aço e a carenagem.

Apresenta-se na Figura 6.10 com maior detalhe os pinos que são utilizados na zona inacessível da ponta do *bumper*. Este pino é encostado à borda da ponta do *bumper* e depois é colocada uma porca pelo lado de dentro também impressa em 3D. Para a impressão deste componente sugere-se a utilização de um filamento de ABS, que é um polímero de plástico com boas propriedades mecânicas [55].



Figura 6.10: Pino e porca impresso em ABS.

6.5 Contabilização dos materiais base necessários

À semelhança de qualquer projeto que se queira implementar, é necessário proceder à contabilização das matérias base necessárias mais importantes no fabrico da carenagem. Dentro destes inclui-se:

- A quantidade necessária de MDF (*Medium-density Fiberboard*) que compõe o bloco em bruto para a maquinação das duas metades do molde fêmea que dará a forma à carenagem do trenó assim como o molde da parte terminal do *bumper*;
- O material do núcleo;
- O material de reforço;
- O material da matriz.

Para a contabilização da quantidade de MDF necessário, basta calcular o volume dos dois moldes, molde principal da carenagem e molde da ponta do *bumper*. Os volumes são os que se apresentam na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Volume de MDF necessário para o fabrico dos moldes.

Tipo de molde	Volume [m³]
Molde da carenagem global	3.96
Molde da ponta do bumper	0.0217

Quanto ao cálculo do material de reforço necessário, isto é, a área necessária de tecido, apresentam-se as Tabela 6.2 e Tabela 6.3 onde está presente a área superficial de cada zona de interesse assim como o valor total.

Tabela 6.2: Contabilização da área necessária de tecido para a parte frontal da carenagem.

Parte	Área [m ²]	Número de camadas	Área total de tecido [m ²]
Fuselagem	0.931	6	5.59
Parte terminal bumpers	0.1928	16	3.08
Raiz do bumper	0.280	4	1.12
Borda da capota	0.0487	4	0.1948
Longarina	0.0669	26	1.739
Caverna	0.0748	2	0.1496
Capota	0.352	6	2.11
			$\Sigma=13.98$

Tabela 6.3: Contabilização da área necessária de tecido para a parte traseira da carenagem.

Parte	Área [m ²]	Número de camadas	Área total de tecido [m ²]
Caverna	0.0746	6	0.448
Parte dianteira	1.001	20	20.0
Parte do meio	0.815	20	16.30
Parte traseira	0.780	40	31.2
Interface bumper parte traseira	0.01014	30	0.304
Push bar	0.0948	20	1.896
Raiz bumper	0.01656	35	5.80
Parte terminal do bumper	0.0704	10	0.704
Tampa bumper	0.001936	15	0.029
			$\Sigma=76.7$

O cálculo do material do núcleo é feito da mesma forma que no caso do reforço, como se pode ver pela Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Contabilização da área necessária de material do núcleo.

Parte	Área [m ²]	Número de camadas	Área total de núcleo [m ²]
Fuselagem da parte frontal	0.931	1	0.931
Capota da parte frontal	0.352	1	0.352
Zona frontal da parte traseira da carenagem	1.001	4	4.00
Zona central da parte traseira da carenagem	0.815	3	2.45
Zona traseira da parte traseira da carenagem	0.780	5	3.90
			$\Sigma=11.63$

Para o cálculo de uma estimativa da massa de resina necessária parte-se do princípio que a massa de um componente qualquer, m_T , sendo excluída a massa do material do núcleo, é a soma da massa de resina, m_r , juntamente com a massa do reforço, m_f , utilizado logo:

$$m_T = m_f + m_r \Leftrightarrow$$

$$m_r = m_T - m_f \Leftrightarrow$$

$$m_r = \frac{m_f}{W_f} - m_f \quad (6.1)$$

$$m_r = \frac{m_f}{W_f} (1 - W_f)k \quad (6.2)$$

Sendo W_f , a fração mássica de fibra no componente e a constante k da Equação (6.2), com base na Equação (6.1), toma o valor de 1,2, ou seja, implica um aumento de 20% na quantidade de resina necessária que advém da norma ISO1268-2 (relacionada com o embebiamento inicial dos tecidos secos) [56] relativa ao fabrico de componentes em compósito e utilizada em ambientes de produção.

Assumindo que se consegue atingir uma fração mássica de fibras de 55% e que a massa total da carenagem que se obteve (através do *Ansys ACP*) é de 29,1 kg e excluindo o núcleo, 28 kg, logo a massa estimada de resina necessária é de 15,12 kg.

Todas estas quantidades aqui apresentadas, assumem um pressuposto: o procedimento é todo corretamente efetuado e que não há desperdícios de materiais. Assim, e de forma a acautelar estes constrangimentos possíveis de acontecer, deve ser considerado um fator de 1,5 para todas as quantidades aqui calculadas relativas aos tecidos de reforço núcleo e resina, ou seja, um aumento em 50% de forma a garantir que não faltará material.

É ainda necessário referir que são necessários acessórios:

- 14 parafusos M4 juntamente com 28 anilhas e 14 porcas da mesma dimensão;
- 22 parafusos M6 juntamente com 44 anilhas e 22 porcas da mesma dimensão;
- 5 varões roscados M10 de 300 mm de comprimento juntamente com 10 porcas e 10 anilhas da mesma dimensão nominal do varão.

Todos os componentes metálicos necessários devem ser em aço inoxidável AISI 316, devido às boas propriedades mecânicas assim como resistência contra a corrosão. O ambiente da prova de *bobsleigh* tende a ser húmido, por este motivo devem ser utilizados materiais resistentes à corrosão.

Quanto ao estudo anteriormente executado [2], a massa obtida final foi de 13 kg, com os mesmos materiais seleccionados, mas com a adoção de um processo de infusão e diferente geometria. Este último, não é indicado para o tipo de material de núcleo adotado (favo de abelha). A massa da carenagem dimensionada neste trabalho é praticamente o dobro daquela que foi desenvolvida anteriormente, no entanto tal facto não é impeditivo para uma boa performance. O estudo da carenagem preliminarmente desenvolvida permite um menor custo associado ao material gasto no processo, por implicar uma fração mássica de fibras maior.

7 Conclusões e trabalhos futuros

7.1 Conclusões

A dissertação apresentou como objetivos: estudo do estado da arte dos processos de fabrico em compósito e de aplicações relacionadas com geometrias idênticas à da carenagem; estudo e aplicação de uma metodologia que face aos constrangimentos e alternativas possíveis permitisse a seleção do melhor processo de fabrico; análise estrutural da carenagem com base numa proposta de empilhamento concebido de forma a garantir um bom funcionamento e resistência do trenó; e por fim descrever o processo de fabrico da carenagem. Tendo em conta o trabalho realizado pode afirmar-se que os objetivos inicialmente definidos para esta dissertação foram alcançados com sucesso.

Com este trabalho, foi possível concluir que a engenharia aplicada ao desporto tem um papel fundamental para melhorar o desempenho e a segurança tanto dos atletas como das estruturas utilizadas e a relação entre atleta-estrutura, nomeadamente através da elaboração de modelos mecânicos personalizados para cada equipa desenvolvidos de acordo com as suas necessidades específicas. Contudo, apesar da grande disputa pelo pódio por parte de atletas e dirigentes desportivos, verifica-se que tópicos como o fabrico/produção de estruturas tais como os que são objeto deste trabalho têm apresentado cada vez mais desenvolvimentos, mas são ainda pouco publicados/divulgados.

O desporto olímpico de inverno, *Bobsleigh*, é extremamente competitivo na medida em que são atingidas acelerações elevadíssimas assim como velocidades que podem superar os 150 km/h. Não é trivial a estratégia para vencer a prova, isto é, existe uma série de fatores que contribuem para o sucesso da mesma. Nem sempre o melhor trenó aerodinâmica e estruturalmente traduz um melhor resultado. O desempenho dos atletas é também muito decisivo, verificando-se por isso que ultimamente tem sido o fator chave. O que contribui para este facto tem sido a atualização da regulamentação da prova tornando os trenós cada vez mais semelhantes assim como mais seguros.

A adição de CNT's em laminados permite benefícios no que toca: ao aumento da tensão de rutura evidenciado pela curva tensão-deformação, aumento da resistência à flexão e aumento do número de ciclos até atingir a rutura. Este tipo de material seria o ideal de utilização, mas tem, no entanto, vários inconvenientes como o custo e equipamento suplementar necessário para a sua aplicação.

Apesar de abordados os principais processos de fabrico em compósito em matriz termoendurecível, apenas parte desses processos são apropriados para o fabrico da carenagem (laminação manual, prepreg e infusão). Dada a pouca informação disponível na literatura, como já mencionado, apresentaram-se exemplos de estruturas de CFRP com funções idênticas às da carenagem do trenó, mas que apresentam algumas diferenças no que toca aos materiais utilizados, tipos de processo de

laminação adotado assim como tipo de molde usado, tendo sido concluído que partes dos procedimentos ou combinações dos mesmos podem servir de base à carenagem em estudo.

Apresentaram-se exemplos de aplicação da metodologia AHP para o caso de seleção de um processo de fabrico de uma peça da indústria automóvel. Concluiu-se que o método AHP é uma boa ferramenta na tomada de decisões com base em aspetos qualitativos e também quantitativos. Este método permite determinar o vetor global de prioridades com base em matrizes de comparação. Estas matrizes resultam da priorização entre pares de critérios fornecidos pelo avaliador. Quanto mais critérios/subcritérios se consideram mais difícil é atingir a consistência mínima necessária. Com os critérios e subcritérios totalmente definidos, propuseram-se diferentes alternativas de fabrico com base na revisão bibliográfica efetuada. Considerou-se uma série de fatores de variação, nomeadamente: o método de fabrico, o tipo de molde, cura com a possibilidade de ser usado vácuo e estufa. Com os pesos de cada um dos critérios determinados e as alternativas possíveis enumeradas, fez-se a avaliação da figura de mérito (*FM*) para cada umas das combinações e concluiu-se que o método de laminação manual apresenta uma figura de mérito superior, e por isso, a combinação escolhida foi a de laminação manual, com moldes fêmea bipartidos separados, sem saco de vácuo e sem estufa para a cura.

Com o resultado da otimização aerodinâmica do trenó e com a geometria preliminar do chassis, foi desenhado o modelo estrutural em superfície com todos os detalhes necessários no que toca a pontos de ligação carenagem-chassis assim como as aberturas necessárias para os travões, *push-handles* e locais de passagem dos eixos dos patins. A geometria atualizada é mais fechada assim como os *bumpers* traseiros são bem mais recuados em comparação com o apoio traseiro da carenagem. Verifica-se por isso, que estas mudanças não beneficiam a estrutura da carenagem na medida em que o *bumper* traseiro tem de ser reforçado com mais camadas. Os materiais utilizados foram no caso do reforço, um tipo de fibra de carbono de alto módulo elástico (M35J) e um núcleo de favo de abelha de aramida. Com a utilização deste tipo de materiais foi possível obter deformações baixas, por um lado devido à natureza da fibra e por outro, devido à utilização de um núcleo, que permite o afastamento das camadas superiores e inferiores do laminado, logo um aumento da rigidez à flexão do componente em causa.

Para a análise estrutural foi utilizado o software *Ansys*, nomeadamente os módulos de *static structural* e ACP. Os elementos usados foram do tipo casca dada a natureza da estrutura. Os carregamentos aplicados foram de três tipos: inércia, impacto e fase inicial de corrida. Concluiu-se pelos resultados obtidos que o carregamento mais crítico é o de impacto, uma vez que é aquele que demonstra um menor fator de segurança associado assim como o valor da deformação total mais elevado. Para a validação dos resultados foi feito um estudo de convergência de malha. Neste estudo concluiu-se que a grande maioria dos resultados convergiu, à exceção de dois com uma diferença relativa superior a 5%. No entanto, concluiu-se também, que tanto a última malha aplicada na parte frontal e na traseira apresentam boa qualidade, sendo os parâmetros analisados: a razão de aspeto, *skewness* e qualidade geral da malha. O empilhamento obtido foi

aproximadamente o dobro, em termo de número de camadas utilizadas, em relação ao primeiro modelo desenvolvido anteriormente por [2]. Uma forma de reduzir o número de camadas seria acrescentar mais divisões na geometria.

Com os empilhamentos da carenagem totalmente definidos, passou-se à fase seguinte de planejar e descrever o procedimento geral do fabrico da carenagem. O procedimento inicia com o desenho e fabrico dos moldes, seguindo-se a laminação das duas metades da carenagem. Depois é feito o desmolde das duas metades, coloca-se e fixa-se a longarina seguindo-se a união das duas metades com uma junta do tipo *strap*, de seguida deve tratar-se de todos os cortes e aberturas necessárias. Por fim, são laminadas as interfaces com a estrutura interna, cavernas, capota-fuselagem e longarina-fuselagem. São utilizadas ligações aparafusadas e no caso da ligação entre a raiz e a ponta do *bumper*, na zona onde há difícil acesso, aplicam-se pinos cónicos. Por último foi feita uma contabilização geral dos materiais necessários ao fabrico da carenagem.

Concluiu-se, assim, que este procedimento compõe um conjunto de indicações que não são de todo restritivas, podendo ter falhas/incompatibilidades aquando do processo prático, pelo que a sua validação só pode ser verificada aquando do fabrico propriamente dito pelas empresas parceiras do projeto. No entanto, foi a solução escolhida como ótima com base na avaliação dos critérios analisados no Capítulo 4.

7.2 Propostas para trabalhos futuros

O estudo desenvolvido é muito relevante para acrescentar informação no que toca aos vários pontos que esta dissertação abordou, nomeadamente a forma de seleção do processo de fabrico, passando pela análise estrutural assim como pelo procedimento apresentado. No entanto, pode ser listado um conjunto de trabalhos futuros que poderão trazer mais valias a este estudo.

- Conceber uma carenagem a uma escala reduzida segundo as diferentes alternativas apresentadas de modo a poder quantificar de forma mais exata parâmetros como: custos, tempo e dificuldades encontradas. Verificar se efetivamente a avaliação feita com base na literatura está em consonância com a prática;
- Acrescentar mais divisões na geometria da carenagem do trenó de forma a otimizar o número de camadas utilizadas;
- Estudar as frequências naturais da estrutura dimensionada;
- Verificar a exatidão dos resultados e simular os modelos de elementos finitos com uma malha mais refinada para as situações onde não se verificou convergência;
- Acompanhamento do processo de fabrico da carenagem de forma a verificar a consonância deste estudo com a prática.

Referências bibliográficas

- [1] M. Vasconcelos, “Estudo Aerodinâmico Preliminar de um Bobsled de 2 lugares,” Msc Thesis, Universidade da Beira Interior, 2023.
- [2] R. Filipe, “Structural Design of a Bobsleigh Cowling using FEA,” Msc Thesis, Universidade da Beira Interior, 2023.
- [3] M. P.Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials Processes and Systems*, 4th ed. Bethlehem, 2010.
- [4] Z. Taha, A. Majeed, and M. Hassan, “An overview of sports Engineering:History, impact and research,” *Movement Health & Exercise*, pp. 1–4, 2014, doi: 10.15282/mohe.v2i0.8.
- [5] O. W. Games, “Beijing 2022 Bobsleigh 2-man results.” Accessed: Feb. 28, 2024. [Online]. Available: <https://olympics.com/en/olympic-games/beijing-2022/results/bobsleigh/2-man>
- [6] G. Gilbertini, A. Soldati, M. Campolo, M. Andreoli, and G. Moretti, “Aerodynamic Analysis of a Two-Man Bobsleigh,” in *6th World Congress of Biomechanics*, Singapore, 2010, pp. 228–231. doi: 10.1007/978-3-642-14515-5_59.
- [7] P. Dabnichki and E. Avital, “Influence of the position of crew members on aerodynamics performance of two-man bobsleigh,” *Journal of Biomechanics*, vol. 39, pp. 2733–2742, 2005, doi: 10.1016/j.jbiomech.2005.10.011.
- [8] O. Lewis, “Aerodynamic Analysis of a 2-man Bobsleigh,” Msc Thesis, TU Delft, 2006.
- [9] H.-S. Shim, Y.-N. Lee, and K.-Y. Kim, “Optimization of Bobsleigh bumper shape to reduce aerodynamic drag,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 164, pp. 108–118, 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.02.012.
- [10] M. F.Zaeh and P. Gebhard, “Manufacturing of Bobsled Runners,” in *The Engineering of Sport 6*, Springer, New York, NY, 2006, pp. 119–122. doi: 10.1007/978-0-387-45951-6_22.
- [11] J. von Schleinitz, L. Wörle, M. Graf, and A. Schröder, “Modeling ice friction for vehicle dynamics of a Bobsled with application in driver evaluation and driving simulation,” *Tribology International*, vol. 165, p. 107344, 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107344.
- [12] F. Braghin, F. Cheli, M. Donzelli, S. Melzi, and E. Sabbioni, “Multi-body model of a bobsleigh: comparison with experimental data,” *Multibody System Dynamics*, vol. 25, pp. 185–201, 2011, doi: 10.1007/s11044-010-9218-7.
- [13] H. H. Ubbens, R. P. Dwight, A. Sciacchitano, and N. Timmer, “Some results on bobsleigh aerodynamics,” *Procedia Engineering*, vol. 147, pp. 92–97, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.195.
- [14] P. Dabnichki, “Bobsleigh performance characteristics for winning design,” *Procedia*

- Engineering*, vol. 112, pp. 436–442, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.221.
- [15] IBSF, “History bobsleigh.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.ibsf.org/en/our-sports/bobsleigh>
- [16] V. Neto, “Cinderelas Olímpicas:o time de bobsled que reviveu Portugal nos Jogos de Inverno.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://olympics.com/pt/noticias/cinderelas-olimpicas-o-time-de-bobsled-que-reviveu-portugal-nos-jogos-de-inverno>
- [17] O. W. Games, “Calgary 1988 Bobsleigh two-man men results.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://olympics.com/en/olympic-games/calgary-1988/results/bobsleigh/two-man-men>
- [18] O. W. Games, “Calgary 1988 Bobsleigh four-man men results.” [Online]. Available: <https://olympics.com/en/olympic-games/calgary-1988/results/bobsleigh/four-man-men>
- [19] B. Portugal, “Construir a história da nossa nação.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://bobteamportugal.pt/pt/inicio/>
- [20] M. Komarova, “World Bobsleigh Tracks: from Geometry to the Architecture of Sports Facilities,” *Nexus Network Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 235–249, 2018, doi: 10.1007/s00004-017-0348-6.
- [21] P. and P. Systems, “Hermetic Refrigerant Pumps for the Largest Bobsleigh, Luge and Skeleton Track in the World.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://fluidhandlingpro.com/fluid-process-technology/pumps-pumping-systems/hermetic-refrigerant-pumps-for-the-largest-bobsleigh-luge-and-skeleton-track-in-the-world/>
- [22] A. P.Harrison, “The Bobsled Push Start: Influence on Race Outcome and Push Athlete Talent Identification and Monitoring,” Phd thesis, East Tennessee State University, 2017.
- [23] D. McSweeney, “South Korea unveil new bobsleigh and skeleton uniforms.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.insidethegames.biz/articles/1057280/south-korea-unveil-new-bobsleigh-and-skeleton-uniforms>
- [24] IBSF, “International Bobsleigh rules 2023.” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: https://www.ibsf.org/fileadmin/user_upload/Resources/Sports/Rules_Quotas/2023_International_Rules_BOBSLEIGH.pdf
- [25] A. Bin Rashid, M. Haque, S. M. M. Islam, and K. M. R. U. Labib, “Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites:Recent advancements on processing techniques and applications.,” *Heliyon*, vol. 10, no. 2, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24692.
- [26] Y. Zhou, F. Pervin, L. Lewis, and S. Jeelani, “Fabrication and characterization of carbon/epoxy composites mixed with multiwalled carbon nanotubes.,” *Material Science*

- and Engineering: A*, vol. 475, no. 1–2, pp. 157–165, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.04.043.
- [27] F. Yang, M. Xie, Z. Yudi, and X. Xu, “Effect of multi-walled carbon nanotubes with different diameters on morphology and thermal and mechanical properties of flexible polyurethane foams.,” *Cellular Polymers*, vol. 40, no. 4, pp. 165–179, 2021, doi: 10.1177/02624893211017284.
- [28] J. B. Knoll, B. T. Riecken, N. Kosmann, S. Chandrasekaran, K. Schulte, and B. Fiedler, “The effect of carbon nanoparticles on the fatigue performance of carbon fibre reinforced epoxy.,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 67, pp. 233–240, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.08.022.
- [29] J. Mononen, “Design and Manufacturing of a Formula Student Composite Chassis,” Bsc Thesis, Tampere University of Applied Sciences, 2023.
- [30] P. Alam, *Composites Engineering: An A-Z Guide*, 1st ed. Edinburgh, 2021.
- [31] C. N. A, D. H. A, M. B. A, P. H. B, and S. B. A, “Effects of environmental conditions on uncured prepreg characteristics and their effects on defect generation during autoclave processing,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 151, p. 1, 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106636.
- [32] S. K. Mazumbar, *Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering.*, 2th ed. Boca Raton, 2002.
- [33] A. D. Kelkar, J. S. Tate, and R. Bolick, “Introduction To Low Cost Manufacturing Of Composite Laminates.,” in *2003 American Society for Engineering Education Annual conference & Exposition*, Nashville, 2003. doi: 10.18260/1-2--11656.
- [34] S. R. Udupi and L. L. R. Rodrigues, “Detecting Safety Zone Drill Process Parameters for Uncoated HSS Twist Drill in Machining GFRP Composites by Integrating Wear Rate and Wear Transition Mapping.,” *Indian Journal of Materials Science*, vol. 2016, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1155/2016/9380583.
- [35] K. Balasubramanian, M. T. H. Sultan, and N. Rajeswari, “Manufacturing techniques of composite for aerospace applications.,” *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, vol. 1, pp. 55–67, 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-102131-6.00004-9.
- [36] S. Rana and R. Figueiro, *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering Processing, Properties, and Applications*. Duxford, 2016.
- [37] J. M. Kenny and L. Nicolais, “Science and Technology of Polymer Composites.,” *Comprehensive Polymer Science and Supplements*, pp. 471–525, 1989, doi: 10.1016/b978-0-08-096701-1.00236-6.
- [38] S. C. Joshi, “The pultrusion process for polymer matrix composites,” *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites*, pp. 381–413, 2012, doi:

10.1533/9780857096258.3.381.

- [39] N. Razali, M. R. Mansor, G. Omar, S. A. F. S. Kamarulzaman, M. H. Zin, and N. Razali, “Chapter 15 - Out-of autoclave as a sustainable composites manufacturing process for aerospace applications.,” *Design for Sustainability*, pp. 395–413, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-819482-9.00011-3.
- [40] A. Hindersmann, “Confusion about infusion:An overview of infusion processes.,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 126, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105583.
- [41] S. Van Oosterom, T. Allen, M. Battley, and S. Bickerton, “An objective comparison of common vacuum assisted resin infusion processes.,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 125, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105528.
- [42] B. Acosta, M. Betancourt, and F. Pinheiro, “Shell Eco-Marathon 100% of final Report,” Bsc Thesis, Florida International University, 2012.
- [43] C. Andersson, “Analysis of Composite Chassis,” Bsc Thesis, Chalmers University of Technology, 2023.
- [44] A. Carline, M. Hiller, and M. Riley, “Manufacturing of a Carbon Fiber Composite Monocoque Chassis for a Formula-Style Vehicle.,” Spring, 2020.
- [45] H. A., S. M. Sapuan, N. Ismail, and N. Yusoff, “Composite manufacturing process selection using analytical hierarchy process.,” *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 4, pp. 49–61, 2009.
- [46] A. Kamal and A. Ramirez-Serrano, “Systematic Methodology for Aircraft Concept Development with Application to Transitional Aircraft.,” *Journal of Aircraft*, 2019.
- [47] T. L. Saaty and L. G. Vargas, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process.*, Second. Pittsburgh, 2012. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6.
- [48] A. R. S. Avilla, “Um Estudo Sobre os Conceitos Matemáticos que Sustentam o Método de Análise Hierárquica (AHP),” Bsc Thesis, Universidade Federal do Rio Grande, 2023.
- [49] J. Klein, “Calculating the AHP priority vector.,” Pittsburgh, 2019.
- [50] A. P. Mouritz, *Introduction to aerospace materials.*, First. Cambridge: Woodhead, 2012.
- [51] M. K. Hagnell and M. Akermo, “A composite cost model for the aeronautical industry:Methodology and case study.,” *Composites Part B:Engineering*, vol. 79, pp. 254–261, 2015, doi: 10.1016.
- [52] S. Ribeiro, “Otimização aerodinâmica da fuselagem de um trenó para competir na prova de Bobsleigh dos Jogos Olímpicos de 2026.,” Msc Thesis, Universidade da Beira Interior, 2025.
- [53] H. Corporation, “MatWeb.” Accessed: Sep. 10, 2024. [Online]. Available:

<https://www.matweb.com/index.aspx>

- [54] Ansys, “*Mechanical User’s Guide 2023 R2.*”
- [55] M. A. Dundar and G. S.Dhaliwal, “Investigation for impact behavior of acrylonitrile-butadiene-styrene amorphous thermoplastic,” *Polymer Testing*, vol. 89, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106624.
- [56] ISO1268-2, “Fibre-reinforced plastics -Methods of producing test plates”

Anexo A- Figura de mérito de todas as combinações para o procedimento de fabrico da carenagem

Caso	FM
1	3.698
2	4.087
3	3.857
4	4.246
5	3.697
6	4.086
7	3.856
8	4.245
9	3.341
10	3.731
11	3.501
12	3.890
13	3.341
14	3.730
15	3.500
16	3.889
17	3.882
18	4.271
19	4.041
20	4.431
21	3.881
22	4.270
23	4.041
24	4.430
25	3.533
26	3.525
27	2.887
28	2.879
29	3.826
30	3.818
31	3.234
32	3.856
33	2.691
34	3.312
35	3.549
36	4.171