FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Desenvolvimento de um Veículo de Competição: Projeto e Produção de Moldes em Fibra de Carbono

Pedro Gonçalves Almeida de Abreu



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador na FEUP: José Manuel Ferreira Duarte

Orientador na Empresa: Frederico Tomé Ribeiro

28 de junho de 2021

© Pedro Abreu, 2021

Desenvolvimento de um Veículo de Competição: Projeto e Produção de Moldes em Fibra de Carbono

Pedro Gonçalves Almeida de Abreu

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

28 de junho de 2021

Resumo

Este projeto de dissertação aborda o desenvolvimento e produção de moldes em fibra de carbono para o fabrico de peças estruturais de um automóvel de competição, nomeadamente, o *chassi* monocoque e a *crash box* traseira. No âmbito desta dissertação, fabricaram-se sete moldes em fibra de carbono. Destes, três são responsáveis por moldar a superfície de topo traseira do *chassi* monocoque e os restantes formam, no seu conjunto, a superfície de moldação responsável pela produção da *crash box* traseira.

O material das peças finais e a elevada exigência de produção, principalmente, ao nível da tolerância e da precisão dimensional, justificam a produção destes moldes em fibra de carbono. Dessa forma, as peças são fabricadas sobre uma superfície de moldação com propriedades mecânicas e térmicas muito similares às do próprio material. Isto permite prever um comportamento dimensional idêntico durante e após o tratamento de cura do compósito, visto que o coeficiente de expansão térmica e a taxa de contração pós-cura do molde e da peça apresentam valores muito próximos.

O fabrico dos moldes em fibra de carbono requer o desenvolvimento de *masters*, moldes positivos que lhes conferem a forma negativa da peça. O projeto e o desenho dos *masters* implica, em primeiro lugar, a definição dos planos de partição da peça, que possibilitem a desmoldagem da mesma. Estas ferramentas de moldação são produzidas pela maquinagem de um conjunto de blocos poliméricos, em resina epóxi.

A laminação da superfície de moldação do *master* exige o corte prévio das laminas de fibra de carbono pré-impregnada, projetadas após desenvolvimento do master, numa máquina CNC de 2 eixos. Segue-se a produção dos moldes, realizada pelo processo de laminação manual em saco de vácuo. A consistência deste processo é garantida pelo cumprimento das regras e da sequência de laminagem. Depois, efetua-se o tratamento de cura do compósito em autoclave, onde o molde é submetido a vácuo e à pressão exterior de 6 bar. Por último, este é introduzido num forno ventilado para realização da pós-cura. No entanto, a pós-cura ocorre depois da execução das operações de acabamento da superfície de moldação e da fixação do conjunto de moldes pelos planos de partição anteriormente definidos.

Os princípios utilizados na obtenção das ferramentas de moldação podem ser adaptados para outras áreas de aplicação dos compósitos, além da indústria automóvel. Este processo permite fabricar peças com um elevado grau de exigência, complexidade geométrica e obter estruturas de elevada dimensão. Contudo, os gastos energéticos inerentes ao processo e o custo do material elevam os custos financeiros do projeto.

Palavras-chave: Fibra de carbono, CFRP, Molde, *Master*, *Vaccum Bag*, *Stock* de maquinagem, Laminado, Cura em autoclave, maquinagem CNC, *crash box*, monocoque.

Abstract

This dissertation project reflects on the development and production of carbon fiber molds for the manufacture of structural parts of a competition car, such as the monocoque chassis and the rear crash box. For the purpose of this dissertation, seven carbon fiber molds were manufactured. Three of these are responsible for shaping the rear top surface of the monocoque chassis and the others form, all together, the shaping surface responsible for producing the rear crash box.

The material of the final parts and the high production requirements, especially in terms of tolerance and dimensional precision, justify the production of these carbon fiber molds. Therefore, the parts are manufactured on a molding surface with mechanical and thermal properties very similar to those of the material itself. This makes it possible to predict an identical dimensional behavior during and after the composite curing treatment, since the coefficient of thermal expansion and post-cure shrinkage rate of the mold and the part have similar values.

The manufacture of carbon fiber molds requires the development of masters, positive molds that give them the negative shape of the part. The design and drawing of the masters imply at first the definition of the parting plans of the part, which make it possible to demould it. These molding tools are produced by machining a set of polymeric blocks made of epoxy resin.

The lamination of the master molding surface requires pre-cutting of the pre-impregnated carbon fiber plies, designed after master development, on a 2-axis CNC machine. This is followed by the production of the molds, carried out by the vacuum bag process. The consistency of this process is guaranteed by complying with the rules and the current laminate construction sequence. Afterwards, the curing treatment of the composite is carried out in an autoclave, where the mold is subjected to a vacuum and an external pressure of 6 bar. Finally, the mold is introduced into a ventilated oven to carry out post-curing. However, post-curing takes place after performing the finishing operations on the molding surface and fixing the set of molds by the previously defined parting planes.

The principles used to obtain molding tools can be adapted to other application areas of composites, in addition to the automotive industry. This process makes it possible to manufacture parts with a high degree of demand, geometric complexity and obtain high dimension structures. However, the energy costs inherent to the process and the cost of the material increase the financial burden of the project.

Keywords: Carbon fiber, CFRP, Mold, Master, *Vaccum Bag*, Laminate, Autoclave cure, CNC machining, crash box, monocoque.

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, ao Professor José Ferreira Duarte, orientador deste trabalho, pela enorme dedicação, disponibilidade e interesse, não só ao longo deste projeto como também ao longo do meu percurso académico.

Agradeço a toda a equipa da Adamastor pela forma como me receberam e integraram. Em especial, agradeço ao Engº Frederico Tomé Ribeiro pela oportunidade de desenvolver este projeto, por toda a ajuda durante a sua realização e pelo tempo dedicado à minha aprendizagem. Ao Engº Diogo Matos por abdicar do seu tempo durante o desenvolvimento desta dissertação e por todo o conhecimento transmitido, que em muito influenciou o sucesso deste projeto. Ao João Passos por todas as sugestões de melhoria, pela cooperação na produção das peças e por me conceder uma visão prática da engenharia. Ao Nuno Silva, por dedicar a sua paixão por compósitos à produção dos moldes projetados e por me mostrar a "arte"da infusão.

Agradeço a todos os meus amigos. Àqueles que me acompanham há muitos anos e àqueles que conheci nestes últimos cinco, por todos os momentos memoráveis que contribuíram para aquilo que sou hoje. Em especial, agradeço ao Luís Martins, pela cumplicidade nestes últimos cinco anos.

Agradeço à minha namorada por todo o apoio incondicional, por acreditar nos meus objetivos, por me motivar a alcançá-los, por todas as palavras de conforto e por fazer de mim uma pessoa feliz e realizada.

Por último, agradeço à minha família por toda a dedicação, amor e confiança. Em especial, agradeço aos meus pais, fonte da minha motivação, por todo o apoio incondicional, a dedicação incessante e por sempre garantirem o melhor para mim.

A todos, o meu obrigado!

Pedro Abreu

Aos meus Pais, por me darem o mundo.

Conteúdo

1 Introdução **1**
- 1.1 Enquadramento do projeto . . . 1
- 1.2 Apresentação da empresa . . . 1
- 1.3 Objetivos principais . . . 2
- 1.4 Estrutura da dissertação . . . 3
- 1.5 Ferramentas . . . 3
  - 1.5.1 SolidWorks ® . . . 3
  - 1.5.2 Autodesk Fusion 360 . . . 3
  - 1.5.3 NX Unigraphics . . . 3
  - 1.5.4 AutoCAD . . . 4

2 Revisão Bibliográfica **5**
- 2.1 Sistemas compósitos poliméricos . . . 5
- 2.2 Reforço fibroso . . . 6
  - 2.2.1 Fibra de vidro . . . 6
  - 2.2.2 Fibra de boro . . . 6
  - 2.2.3 Fibra de kevlar . . . 7
  - 2.2.4 Fibra de carbono . . . 8
  - 2.2.5 Reforço híbrido . . . 9
  - 2.2.6 Configuração das fibras . . . 10
  - 2.2.7 Orientação das fibras . . . 12
- 2.3 Matriz polimérica . . . 14
  - 2.3.1 Termoplásticas . . . 14
  - 2.3.2 Termoendurecíveis . . . 15
- 2.4 Interface Reforço/Matriz . . . 16
- 2.5 Pré-impregnados . . . 17
- 2.6 Processos de produção . . . 18
  - 2.6.1 *Hand Lay-Up* . . . 18
  - 2.6.2 *Spray-Up* . . . 20
  - 2.6.3 *Resin Infusion* . . . 21
  - 2.6.4 *Vaccum Bag* . . . 22
  - 2.6.5 Cura em autoclave . . . 26

3 Desenvolvimento de Moldes para a Produção de CFRP **27**
- 3.1 Desenho do *master* . . . 27
- 3.2 Seleção de material do *master* . . . 28
  - 3.2.1 MDF . . . 29
  - 3.2.2 Resina de poliuretano . . . 30

3.2.3 Resina epóxi . . . 31
3.3 Maquinagem do *master* . . . 32
3.3.1 Otimização do *stock* de maquinagem . . . 33
3.3.2 Montagem do *stock* de maquinagem . . . 33
3.3.3 Operações e ferramentas . . . 35
3.4 Fibra de carbono pré-impregnada para o molde . . . 37
3.4.1 Propriedades do produto . . . 37
3.4.2 Planificação e corte das fibras . . . 39
3.5 Processo de produção do molde em fibra de carbono . . . 41
3.5.1 Preparação do *master* . . . 41
3.5.2 Mecanismos de laminação . . . 43
3.5.3 Compactação . . . 45
3.5.4 Cura . . . 48
3.5.5 Desmoldagem e operações de acabamento . . . 49

4 Projeto e Produção dos Moldes para a Monoque e *Crash Box* Traseira 51
4.1 Molde topo traseiro e lateral da monocoque . . . 51
4.1.1 Partição da peça . . . 52
4.1.2 Caraterísticas da fronteira . . . 53
4.1.3 Estudo da geometria . . . 54
4.1.4 Transformação em sólido . . . 56
4.1.4.1 *Master* do MTT . . . 57
4.1.4.2 *Master* do MTL . . . 58
4.1.5 Otimização do *stock* de maquinagem . . . 60
4.1.6 Maquinagem do *master* . . . 61
4.1.7 Operações de pós-maquinagem . . . 67
4.1.8 Planificação . . . 68
4.1.9 Laminação . . . 70
4.1.10 Desmoldagem . . . 72
4.1.11 Acabamento e Pós-cura . . . 74
4.2 *Crash Box* Traseira . . . 76
4.2.1 Partição da peça . . . 77
4.2.2 Caraterísticas da fronteira . . . 78
4.2.3 Estudo da geometria . . . 79
4.2.4 Transformação em sólido . . . 80
4.2.5 Otimização do *stock* de maquinagem . . . 81
4.2.6 Maquinagem do *master* . . . 82
4.2.7 Operações de pós-maquinagem . . . 86
4.2.8 Planificação . . . 88
4.2.9 Laminação . . . 90
4.2.10 Desmoldagem . . . 92
4.2.11 Acabamento e Pós-cura . . . 94

5 Conclusão e Trabalhos Futuros 97

A Propriedades da Resina Epoxídica 570A/570B 103

B Ciclos de cura e pós-cura da fibra de carbono pré-impregnada HX56 105

C Desenhos 2D do *Stock* de maquinagem **107**

D Desenhos de identificação das planificações para laminação **111**

Lista de Figuras

2.1 Malha de fibra de carbono unidirecional. 10
2.2 Manta de fibra com representação do padrão aleatório de fibras longas e curtas. . 11
2.3 Configurações das laminas de tecido de fibra de carbono [2]. 11
2.4 Configuração do tecido de fibra tri-dimensional [12]. 12
2.5 Variação do módulo de elasticidade e da resistência à rotura de um FRP unidirecional com o ângulo de orientação da fibra [13]. 13
2.6 Ordem comum de orientação das fibras unidirecionais de dois laminados simétricos. Adaptado de [13]. 13
2.7 Pré-impregnado laminado sobre um *master*. 17
2.8 Representação esquemática das etapas do processo *hand lay-up* [20]. 19
2.9 Representação da técnica *hand lay-up* 20
2.10 Representação da técnica de *spray-up* [21]. 21
2.11 Processo de infusão de resina, variante VARIM [24]. 22
2.12 Representação esquemática das etapas do processo *vaccum bag* genérico. Adaptado de [20]. 23
2.13 Camadas acessórias necessárias à implementação do sistema de vácuo [26]. . . . 24
2.14 Acessórios e forma final do processo *vaccum bag* [13]. 25

3.1 Placas de MDF 30
3.2 Exemplo de otimização do *stock* de maquinagem 33
3.3 Aplicação da mistura de resina epóxi para colagem do *stock*. 34
3.4 Secagem/cura da cola epóxi em vácuo. 34
3.5 Ferramentas de maquinagem 36
3.6 Comparação visual entre os tecidos de fibra de carbono 3K e 12K. Imagens à mesma escala [33]. 39
3.7 Planificação e avaliação de deformação de uma superfície de um *master*. 39
3.8 Exemplo de estiramento do tecido *twill* de fibra de carbono. 40
3.9 Corte de planificações em máquina de corte CNC de 2 eixos. 40
3.10 Resultado da aplicação de *trims* de reforço nas zonas de curvatura das peças. . . . 41
3.11 Comparação visual dos efeitos do pós-processamento do *master* maquinado. . . . 42
3.12 Principais cuidados na laminação do compósito [32]. 44
3.13 Cuidados de laminação em cantos vivos exteriores [32]. 45
3.14 Ferramentas de laminação. 45
3.15 Pinças de moldação no saco de vácuo. 46
3.16 Representação do processo de compactação entre camadas [32]. 47
3.17 Etapa final do processo de laminação. Pré-cura do compósito. 47
3.18 Dispositivo para pesquisa de fugas de vácuo. 47
3.19 Ciclo de cura do compósito a 55 ºC em autoclave. Adaptado de [34]. 48

3.20 Cunhas de desmoldagem. 50

4.1 Vista frontal superior da superfície da peça. 51
4.2 Perspetiva frontal superior da partição da superfície da peça. 52
4.3 Perspetiva lateral superior da partição da superfície da peça. 52
4.4 Perspetiva frontal superior das superfícies de fronteira dos moldes. 53
4.5 Perspetiva lateral superior das superfícies de fronteira dos moldes. 53
4.6 Análise dos ângulos de saída do molde topo traseira. 54
4.7 Análise dos ângulos de saída do molde topo lateral. 55
4.8 Resultados da alteração das superfícies com ângulo de saída a zero graus. 55
4.9 Limitações da maquinagem das arestas do *master*. 57
4.10 Vista de topo do *master* do MTT. 57
4.11 Perspetiva lateral superior do *master* do MTT. 57
4.12 Perspetiva lateral superior do *master* do MTT e respetivas abas. 58
4.13 Perspetiva lateral superior do *master* do MTL. 58
4.14 Perspetiva lateral superior do *master* do MTL sem prolongamento da base das abas ao nível da superfície de moldação. 59
4.15 Perspetiva lateral superior do *master* do MTL e respetivas abas. 59
4.16 Stock de maquinagem do *master* do MTT. 60
4.17 *Stock* de maquinagem do *master* do MTL. 60
4.18 Otimização da maquinagem das abas. 61
4.19 Resultado da operação de desbaste, obtido por simulação através do programa *Autodesk Fusion 360*. 62
4.20 Resultado da operação de acabamento sobre a superfície de moldação, obtido por simulação através do programa *Autodesk Fusion 360*. 62
4.21 Resultado da operação de acabamento sobre a superfície de apoio das abas, obtido por simulação através do programa *Autodesk Fusion 360*. 63
4.22 Perspetiva frontal do *Master* do MTT após maquinagem. 64
4.23 Perspetiva lateral do *Master* do MTT após maquinagem. 64
4.24 Vista lateral interior do *Master* do MTL após maquinagem. 64
4.25 Vista lateral exterior do *Master* do MTL após maquinagem. 65
4.26 Pormenor da diferença de acabamento entre a superfície de moldação e a superfície de suporte das abas. 65
4.27 Sequência de maquinagem das abas. 66
4.28 Resultado final da maquinagem da aba exemplo. 66
4.29 Estratégia alternativa para a maquinagem das abas. 67
4.30 Elementos de fixação e aperto do conjunto abas/*master*. 67
4.31 Resultado final da montagem e acabamento do *master* do MTT. 68
4.32 Resultado final da montagem e acabamento do *master* do MTL. 68
4.33 Planificação do *master* do MTL. 68
4.34 Planificação do *master* do MTT. 69
4.35 Organização e identificação das laminas de fibra de carbono após corte. 69
4.36 *Nesting* para corte das laminas 650 do MTT. 70
4.37 Laminação do *master* do MTL. 70
4.38 Aplicação do tecido *breather* e da película *release film* antes de uma pré-compactação. 71
4.39 Saco de pré-compactação e adesivo vedante preto de baixa temperatura do *master* do MTL. 71
4.40 Saco de pré-compactação e adesivo vedante preto de baixa temperatura do *master* do MTT. 71

4.41 Saco de compactação final de alta temperatura para cura do compósito do MTT. . 72
4.42 Saco de compactação final de alta temperatura para cura do compósito do MTL. 72
4.43 MTT após cura e remoção do saco de vácuo. 72
4.44 MTL após cura e remoção do saco de vácuo. 73
4.45 Remoção das abas para desmoldagem do molde. 73
4.46 Superfície de moldação do MTT após cura. 73
4.47 Superfície de moldação do MTL após cura. 74
4.48 Aspeto visual do acabamento final da superfície de moldação. 74
4.49 Pormenor da indentação dos pontos do *master*. 74
4.50 Ilustração do alinhamento da superfície de moldação do conjunto de moldes do *chassi* monocoque. 75
4.51 Resultado do alinhamento do conjunto de moldes da monocoque. 75
4.52 Elementos de fixação das abas. 76
4.53 Vista superior da fixação do conjunto de moldes da monocoque. 76
4.54 Vistas da superfície de peça da *Crash Box*. 77
4.55 Partição inicial da superfície de moldação. 77
4.56 Dimensão da face vertical que impede a maquinagem da sua geometria. 78
4.57 Partição final da superfície de moldação. 78
4.58 Superfícies das abas de fixação do molde da *crash box*. 79
4.59 Análise do ângulo das superfícies da peça em relação ao plano de maquinagem e desmoldagem. 79
4.60 *Master* e abas do M01/02. 80
4.61 Estratégia alternativa de produção da aba lateral do *master*. 80
4.62 *Master* do M03. 81
4.63 *Master* do M04. 81
4.64 *Stock* de maquinagem do *master* do M01/02 e resultado da adaptação do desenho da base à forma dos blocos poliméricos. 82
4.65 Resultado do desbaste do *master*. 83
4.66 Transição de maquinagem do desbaste para a 1ª operação de acabamento. 83
4.67 Resultado da 1ª operação de acabamento do *master*. 84
4.68 Resultado da 2ª operação de acabamento do *master*. 84
4.69 Resolução de um defeito superficial provocado pelo aprisionamento de ar no interior da resina de colagem do *stock*. 85
4.70 Resultado da maquinagem do *master* do M03. 85
4.71 Resultado da maquinagem do *master* do M04. 86
4.72 Resultado final do *master* do M01/M02. 87
4.73 Pormenor do corte da aba do *master* do M01/02. 87
4.74 Resultado final do conjunto de *masters* para o molde da *crash box*. 88
4.75 Planificação do *master* do M01/02. 89
4.76 Planificação do *master* do M03, à direita, e do *master* do M04, à esquerda. 89
4.77 Laminas de fibra de carbono após corte. 90
4.78 *Master* do M01/02 após ultima camada de laminado 205, com orientação a 0º. . . 90
4.79 Saco de compactação final do laminado do M01/02. 91
4.80 Saco de compactação final do laminado do M03. 91
4.81 Saco de compactação final do laminado do M04. 91
4.82 Remoção das abas do *master* do M01/02 para desmoldagem. 92
4.83 Remoção das abas do *master* do M03 para desmoldagem. 92
4.84 Superfície de moldação do M01/02. 93

4.85 Superfície de moldação do M03. 93
4.86 Superfície exterior e de moldação do M04. 94
4.87 Montagem e fixação dos moldes da *crash box* 94
4.88 Resultado final da superfície de moldação do molde da *crash box* traseira. 95
4.89 Resultado final da superfície de moldação do molde da *crash box* traseira. 95

A.1 Ficha técnica da resina epóxi e catalisador 570A/570B. 103

B.1 Ciclo de cura para diferentes temperaturas de cura. 105
B.2 Ciclo de pós-cura com estágios de uniformização de temperatura. 106
B.3 Ciclo de pós-cura com rampa de aquecimento. 106

C.1 Desenho do *stock* de maquinagem do *master* do molde topo traseira. 107
C.2 Desenho do *stock* de maquinagem do *master* do molde topo lateral. 108
C.3 Desenho do *stock* de maquinagem do *master* do M01/02 da *crash box*. 109

D.1 Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do MTL - 1/3. . . 112
D.2 Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do MTL - 2/3. . . 113
D.3 Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do MTL - 3/3. . . 114
D.4 Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do MTT. 115
D.5 Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do M01/02 - 1/3. . 116
D.6 Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do M01/02 - 2/3. . 117
D.7 Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do M01/02 - 3/3. . 118
D.8 Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do M03. 119

Lista de Tabelas

2.1 Vantagens e desvantagens genéricas dos sistemas compósitos. 6
2.2 Propriedades gerais da fibra de boro não impregnada [4, 1]. 7
2.3 Propriedades das fibra de aramida: Kevlar 29, 49 e 149 [4]. 7
2.4 Propriedades gerais da fibra de carbono não impregnada [4, 1]. 9
2.5 Propriedades gerais de alguns polímeros termoplásticos [4, 1]. 15
2.6 Propriedades gerais de alguns polímeros termoendurecíveis [4, 1]. 16

3.1 Propriedades mecânicas e físicas do MDF [4] 30
3.2 Propriedades mecânicas e físicas da Resina Last-A-Foam FR 4500 [29] 31
3.3 Propriedades mecânicas e físicas das placas ferramenta *Trelleborg EP700* e *EP678* [30, 31] 32
3.4 Parâmetros das ferramentas de corte. 36
3.5 Propriedades físicas da matriz do compósito utilizado na produção dos moldes. . 38
3.6 Arranjos de fornecimento da fibra de carbono pré-impregnada Ambertool®HX56 38
3.7 Sequência de laminação das fibras para a configuração simétrica 1-8-1 com 5.9 milímetros de espessura. 44
3.8 Tempo de ciclo médio para diferentes temperaturas de cura. 48

4.1 Resultados da otimização do *stock* de maquinagem dos *masters* MTT e MTL. . . 61
4.2 Descrição do tempo das operações de maquinagem dos *master* MTT e MTL. . . 63
4.3 Resultados da otimização do *stock* de maquinagem do *master* do M01/02. 82
4.4 Descrição do tempo das operações de maquinagem dos *masters* do M01/02, M03 e M04. 86

Abreviaturas

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
CTE	*Coefficient of Thermal Expansion*
FRP	Fiber Reinforced Polymer
Master	Molde positivo
MTT	Molde Topo Traseira da monocoque
MTL	Molde Topo Lateral da monocoque
M01/02	Moldes laterais da *crashbox*
M03	Molde de topo da *crashbox*
M04	Molde traseiro da *crashbox*
PA 66	Nylon de Poliamida
PC	Policarbonato
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
Ply	Lamina de compósito
POM	Polyoxymethylene
PP	Polipropileno
Prepreg	Compósito em fibra pré-impregnada
Stock	Conjunto de blocos poliméricos para maquinagem do *master*

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento do projeto

O desporto automóvel exige um esforço contínuo pela melhoria e implementação de materiais "exóticos"no desenvolvimento dos seus produtos: os automóveis de competição. De entre os diversos materiais "exóticos", os compósitos de fibra de carbono são os que possuem maior notoriedade, quer pelas suas propriedades físico-mecânicas, quer pela sua capacidade de moldação que, consequentemente, aumenta o grau de liberdade do projeto de forma.

O presente projeto, inserido nesta vertente de desenvolvimento, leva a cabo a materialização de diversos produtos de engenharia através da utilização de ferramentas tecnológicas que permitem a sua produção. Deste modo, o presente trabalho descreve todo o processo de materialização, desde o *design* e construção do molde até ao fabrico da peça final. Note-se que, neste caso, o molde de produção será um *master* polimérico, isto é, um molde positivo, e a peça final será um molde negativo de fibra de carbono pré-impregnada capaz de fabricar um componente estrutural ou estético de material similar.

O fabrico de moldes em fibra de carbono apresenta particularidades interessantes. Em primeiro lugar, permite a divisão da peça, a separação dos moldes e a posterior montagem do seu conjunto para obter formas complexas. Em segundo lugar, permite que a ferramenta de moldação seja composta por um material muito similar aquele que dará forma, o que aumenta a qualidade da peça produzida, quer a nível dimensional, quer a nível estrutural e evita o aparecimento de defeitos consequentes dos diferentes comportamentos do material a temperatura elevada.

1.2 Apresentação da empresa

A Adamastor é uma empresa portuguesa que opera na área automóvel, inicialmente focada no desenvolvimento e fabrico de automóveis desportivos *taylor made* com elevado nível de detalhe e personalização, à medida das exigências do cliente. Na sua fundação estão envolvidos profissionais com enorme *know how* do setor automóvel, particularmente na divisão da competição motorizada, com o intuito de introduzir este conceito inovador no mercado. Ao longo dos seus 7

anos de existência, a Adamastor tem vindo a desenvolver projetos *in-house* que vão desde a idealização do conceito até à materialização do produto final, integrando as áreas de projeto, design e produção.

A empresa criou o seu primeiro protótipo em 2012, e em 2017 lançou o primeiro modelo da marca, o Adamastor P003RL, um automóvel de pista de dois lugares homologado para a circulação em estrada, de chassi tubular e carroçaria em material compósito. Cerca de 80% dos componentes deste modelo foram obtidos por produção nacional. De momento, a equipa da Adamastor encontra-se a trabalhar no próximo modelo da marca, caracterizado pela elevada presença de materiais compósitos, quer a nível estrutural como estético. O presente projeto insere-se no desenvolvimento deste último modelo.



1.3 Objetivos principais

O presente projeto foi inicialmente formulado para atender aos seguintes objetivos:

- Desenvolver um *master* para o fabrico de moldes em fibra de carbono tendo em consideração o processo de fabrico, as suas restrições, a desmoldagem, os planos de apartação e as caraterísticas específicas do molde a desenvolver;
- Estruturar o processo de maquinagem do *master* polimérico.

Contudo, durante a realização do projeto foram atendidos outros objetivos inerentes ao processo de fabrico do *master* polimérico e do molde em fibra de carbono, tais como:

- Otimização do *stock* para maquinagem do *master*;
- Planificação das superfícies de moldação do *master*;
- Identificação e arranjo das laminas de fibra de carbono obtidas após corte;
- Elaboração de desenhos de identificação das laminas à secção de laminação na superfície de moldação do *master*.

1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se subdividido em 5 capítulos com a seguinte distribuição:

O capítulo 1 apresenta o conceito do trabalho, o enquadramento do projeto, a empresa de acolhimento para a sua realização e os principais objetivos definidos para este trabalho.

O capítulo 2 desenvolve uma introdução aos compósitos, com especial foco nos materiais em fibra de carbono, que aborda temas como a configuração dos tecidos de fibra, a influência da sua orientação no laminado nas propriedades mecânicas após cura, os processo de produção destes compósitos, etc.

O capítulo 3 expõe o procedimento teórico-prático desenvolvido para o desenvolvimento dos *masters* e produção dos moldes. Para além disso, justifica a seleção do material utilizado para o *master*, apresenta em detalhe as regras e sequência de laminação do compósito e o ciclo de cura do compósito.

O capítulo 4 mostra as diferentes etapas de desenvolvimento do *master* e da produção do molde, através da aplicação dos princípios referidos no capítulo anterior. Adicionalmente, mostra os resultados da otimização dos *stocks* de maquinagem e dos moldes produzidos.

O capítulo 5 contém as notas finais do trabalho e propostas de trabalhos futuros. Neste é referida a influência deste projeto para a formação académica e profissional e a carência de informação disponível acerca desta temática.

1.5 Ferramentas

Nesta secção apresentam-se as ferramentas computacionais utilizadas ao longo deste trabalho, necessárias para o desenvolvimento do projeto descrito neste documento.

1.5.1 SolidWorks ®

O *SolidWorks* é uma ferramenta de CAD, CAE e CAM capaz de desenvolver o desenho e a análise dos mais diversos componentes. Para este projeto, este *software* foi utilizado para definir o *design* e a contrução dos *masters* dos moldes a fabricar, obter planificações de superfícies e projetar o *stock* de maquinagem, bem como os seus desenhos 2D.

1.5.2 Autodesk Fusion 360

O *Autodesk Fusion 360* é um *software* de CAD, CAM, CAE e PCB. Para este projeto, foi utilizado como forma de preparar e simular o processo de maquinagem dos *masters*, gerando o código G capaz de ser lido pelo controlador númerico da fresadora de 3 eixos.

1.5.3 NX Unigraphics

O *NX Unigraphics* é um *software* avançado que possui as ferramentas CAD/CAM/CAE, utilizadas para *design*, análise estrutural e fabrico final. Para este trabalho, este *software* foi utilizado,

quando necessário, como alternativa ao *SolidWorks*, dado a superior flexibilidade e capacidade computacional no *design* de superfícies.

1.5.4 AutoCAD

O *AutoCAD* é um ferramenta de CAD 2D utilizada principalmente na elaboração de desenhos técnicos (2D) de peças desenvolvidas, com possibilidade de gerar modelos tridimensionais (3D). Para este projeto, este *software* foi utilizado para orientar pela mesma referência as planificações dos *masters*, dar-lhes identificação e preparar o seu traçado final.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os conceitos que permitem a total compreensão do trabalho realizado dentro do universo dos compósitos de matriz polimérica, procurando incidir o foco nos compósitos reforçados com fibra de carbono. A exposição teórica e teórico-prática estende-se desde a definição primária de um sistema compósito até aos diferentes processos e métodos de produção. Contudo, estes conceitos serão relembrados de forma sumária ao longo do desenvolvimento do projeto.

2.1 Sistemas compósitos poliméricos

Os sistemas compósitos advêm da combinação de pelo menos dois materiais macroscópicos, cuja cooperação partilha de qualidades sinergéticas, permitindo obter um material heterogéneo cujas propriedades serão superiores aquelas que caraterizam os materiais constituintes isolados. De forma genérica, os constituintes de um sistema compósito podem ser definidos em dois grupos, atendendo à sua função global no sistema:

- A matriz, constituída por um ou vários polímeros termoendurecíveis ou termoplásticos, cerâmicos ou ligas metálicas, é o agente ligante das fibras do reforço. Para além disso, assegura a transferência das cargas exteriores ao reforço, protege a sua superfície, garante a tenacidade necessária ao sistema e é responsável pelo acabamento superficial da peça [1];

- O reforço ou fibra contínua, constituído por fibras ou partículas, é o elemento que confere resistência mecânica e rigidez ao sistema compósito, podendo dominar outras caraterísticas como o coeficiente de expansão térmica e a condutividade. Ocupa uma fração mássica significativa do sistema, tipicamente acima dos 20%[1].

A interface entre os diferentes constituintes desempenha um papel fundamental na *performance* do sistema. No sistema compósito as propriedades favoráveis das fibras e da matriz são potencializadas ao máximo, enquanto as propriedades desfavoráveis de cada constituinte são compensadas pelos restantes componentes do sistema, resultando desta cooperação uma estrutura que

não seria possível obter sem a interação dos diferentes componentes que a compõem [2]. A tabela 2.1 refere algumas vantagens e desvantagens dos sistemas compósitos poliméricos.

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens genéricas dos sistemas compósitos.

Vantagens	**Desvantagens**
• Baixa densidade	• Custo elevado a muito elevado
• Elevado nível de liberdade de forma, materiais e processos	• A análise estrutural requer métodos computacionais sofisticados
• Fácil atribuição de cor e possibilidade de translucidez	• Falhas na preservação do aspeto superficial e de acabamento
• Nível elevado de adaptação de propriedades à aplicação	• Conhecimento limitado do comportamento estrutural de detalhes e dos métodos de junção

2.2 Reforço fibroso

As fibras determinam a resistência e a rigidez do material compósito. Um polímero ao qual são adicionadas fibras direcionais torna-se muito mais resistente na direção das fibras quando comparado com o mesmo polímero sem adição destas fibras. Contundo, na perpendicular à direção das fibras, o aumento de rigidez é menos pronunciado bem como a resistência à rotura [2]. Por este motivo, na prática as fibras são aplicadas em diferentes direções e configurações. A sua resistência teórica é dada pela força das ligações atómicas que mantêm a fibra unida. Deste modo, elementos com ligações químicas fortes tornam-se interessantes para aplicação em sistemas compósitos.

Elementos químicos como o boro, o carbono e o silício possuem grandes estruturas de ligação covalente e, por isso, formam estruturas muito resistentes que se tornam relevantes como fibras para sistemas compósitos. Assim surgem as fibras de vidro, carbono e aramida que constituem os principais materiais utilizados na industria para diferentes aplicações.

2.2.1 Fibra de vidro

As fibras de vidro apresentam elevada resistência e um custo relativamente reduzido. No entanto, possuem um módulo de elasticidade reduzido, moderada suscetibilidade à rotura por fluência e o seu comportamento mostra-se fraco quando na presença de humidade e/ou em ambientes alcalinos. Do universo das fibras de vidro, as E-glass apresentam-se como as de maior utilização, com um vasto campo de aplicação [3].

2.2.2 Fibra de boro

As fibras de boro possuem elevada resistência e elevado módulo de elasticidade, mas um custo extremamente elevado, o que torna este material limitado a aplicações na indústria aeroespacial[1].

Na tabela 2.2 resumem-se as propriedades da fibra de boro mais relevantes para este estudo.

Tabela 2.2: Propriedades gerais da fibra de boro não impregnada [4, 1].

Propriedade	
Densidade (Kg/m^3)	2460 - 2570
Módulo de Young (GPa)	395 - 405
Tensão de rotura (MPa)	2000 - 2500
Elongação (%)	0.5 - 0.8
Coeficiente de expansão térmica (10^{-6}/ ºC)	5.5 - 5.7
Preço (€/kg)	464 - 594

2.2.3 Fibra de kevlar

O kevlar é uma fibra sintética de aramida muito leve e resistente com muitas aplicações em tecnologias industriais e avançadas, como é o caso dos coletes balísiticos, as hélices de helicóptero ou até mesmo componentes de automóvel para competição. Este material, quando comparado com outras fibras, possui uma elongação significativamente menor, elevada resistência à rotura e elevado módulo de elasticidade. Para além disso, para um material polimérico, exibe elevada resistência a altas temperaturas, pois a sua temperatura de transição vítrea ronda os 360 ºC. Contudo, no que toca ao seu comportamento dimensional durante o tratamento de cura este material peca em relação às fibras de carbono [5] devido ao seu coeficiente de expansão térmica, como mostra a tabela 2.3.

Tabela 2.3: Propriedades das fibra de aramida: Kevlar 29, 49 e 149 [4].

Propriedade	**Kevlar 29**	**Kevlar 49**	**Kevlar 149**
Densidade (Kg/m^3)	1430 - 1450	1440 - 1450	1460 - 1480
Módulo de Young (GPa)	62 - 80	125 - 135	170 - 190
Tensão de rotura (MPa)	2900 - 3600	2500 - 3000	3200 - 3600
Elongação (%)	2.5 - 4.4	2.4 - 2.6	1 - 1.3
Coeficiente de expansão térmica (10^{-6}/ ºC)	-3.4 / -3.2	-4 / -2	-3 / -2
Preço (€/kg)	21.9 - 36.5	62.9 - 177	80 - 200

2.2.4 Fibra de carbono

As fibras de carbono possuem elevada resistência à rotura, alta rigidez, são extremamente tolerantes a elevadas temperaturas, à corrosão e ao desgaste. A razão resistência/massa deste material é muito elevada, uma vez que aliada à elevada resistência, os compósitos de fibra de carbono apresentam muito baixa densidade. Para além disso, o seu comportamento ao calor apresenta excelentes caraterísticas devido ao baixo coeficiente de expansão térmica e à elevada condutividade [6]. Estas caraterísticas são o que torna as fibras de carbono de matriz polimérica apetecíveis no contexto da competição automóvel, permitindo construir um veículo de baixo peso, mas de elevada resistência, rigidez e *performance*. Contundo, este material, dependendo da sua configuração, é altamente anisotrópico pelo que deve ser cuidadosamente projetado para cada aplicação.

A produção destas fibras tem origem na descomposição térmica de diversos compostos, através de uma série de processos. Em geral, os compostos utilizados são o PAN (poliacrilonitrilo), material sintético de propriedades controladas, ou *Pitch*, material orgânico obtido através da destilação de alcatrão de carvão ou madeira, ácidos gordos ou óleos gordos. O PAN é preferido para que a qualidade da fibra seja consistente, enquanto o *Pitch* é preferencial quando o custo é o fator primordial [2]. O processo de produção das fibras de carbono pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1. **Oxidação**: As fibras são sujeitas a aquecimento até à temperatura de 300 ºC, numa atmosfera rica em oxigénio, permitindo, assim, a formação de uma cadeia molecular de estrutura reticulada com maior tolerância ao calor. Nesta etapa as fibras obtêm a sua cor escura;

2. **Carbonização:** a cadeia molecular obtida é aquecida entre 800 a 1600 ºC numa atmosfera inerte levando à remoção de todos os elementos da cadeia como, por exemplo, os átomos de azoto, à exceção do carbono que permanecerá como único composto da cadeia;

3. **Grafitização:** ocorre a pirólise da cadeia molecular numa atmosfera inerte, formando uma estrutura altamente orientada e, consequentemente, obtém-se fibras com elevado módulo de elasticidade e anisotropia;

4. **Acabamento:** por último, a superfície é tratada numa atmosfera ácida para permitir melhor as suas propriedades de adesão às diversas resinas com as quais formarão a interface do sistema compósito [1].

O processo descrito resulta na produção das fibras de carbono que, genericamente, podem pertencer a um de dois grupos de designação distinta. Apesar da linguagem corrente referir-se a estas fibras simplesmente como fibras de carbono, existem diferenças linguísticas em relação à sua designação, dependentes do seu conteúdo de carbono. Assim, quando a percentagem de carbono na fibra se encontra entre os 80 a 95% após a sua produção, esta designa-se fibra de carbono. De outro modo, quando a mesmo percentagem atinge valores superiores a 95%, designa-se por fibra de grafite.

Para além disso, é possível verificar experimentalmente que as fibras de carbono caraterizam-se por uma elevada resistência relativa, enquanto as fibras de grafite caraterizam-se por um elevado módulo de elasticidade. A tabela 2.4 apresenta as propriedades relativas a este material mais relevantes para o caso em estudo.

Tabela 2.4: Propriedades gerais da fibra de carbono não impregnada [4, 1].

Propriedade	HS (High Strenght)	HM (High Modulus)	VHM (Very High Modulus)	UHM (Ultra High Modulus)
Densidade (Kg/m^3)	1800 - 1840	1800 - 1840	1900 - 1940	2050 - 2160
Módulo de Young (GPa)	225 - 260	370 - 390	530 - 580	690 - 830
Tensão de rotura (MPa)	4400 - 4800	2400 - 2410	2060 - 2070	2300 - 2400
Elongação (%)	1.7 - 2	0.7 - 1	0.7 - 0.8	0.5-0.6
CTE (10^{-6}/ ºC)	-2 - 0.3			
Preço (€/Kg)	22.5 - 30.1	47 - 94	59.9 - 67.4	120 - 132

2.2.5 Reforço híbrido

Dentro do universo dos reforços fibrosos importa sublinhar as configurações híbridas, isto é, a combinação de diferentes fibras, tipicamente na forma de tecido fibroso, que partilham a mesma matriz polimérica. Os compósitos híbridos são, dentro do mundo dos compósitos, um dos materiais mais avançados e, por isso, possuem um campo de aplicação com enorme potencial, especialmente para projetos no seio da competição automóvel.

Este tipo de reforço permite extrapolar a definição inicial dada para um sistema compósito visto que para além do complemento de propriedades entre reforço e matriz, a combinação de diferentes fibras permite um complemento de propriedades dentro do próprio reforço. Assim, neste tipo de compósitos os benefícios de um tipo de fibra conseguem complementar falhas nas propriedades de outros tipos de fibra presentes no sistema [7].

A seleção de fibras compatíveis é fundamental quando um sistema híbrido é projetado para obter determinadas caraterísticas. As propriedades destes sistemas podem ser determinadas pela regra de mistura imposta pela equação 2.1.

$$P_H = P_1 V_1 + P_2 V_2 \,, \tag{2.1}$$

onde P_H representa as propriedade mecânicas do sistema híbrido, P_1 e P_2 representam as propriedade mecânicas dos sistemas de fibra 1 e 2, respetivamente, e V_1 e V_2 representa a fração volúmica correspondente a cada um dos sistemas de fibra 1 e 2 [8].

2.2.6 Configuração das fibras

Quando os materiais compósitos são considerados para aplicações estruturais, o laminado é produzido geralmente em camadas multidirecionais. O ângulo de orientação da fibra de cada lamina e a sua sequência no laminado são projetados de acordo com os requisitos de carga e a geometria da estrutura [9]. No entanto, para determinada aplicação sujeita a casos de carga não intencional para a qual foi projetada, estes laminados apresentam fracas propriedades. Nestas circunstâncias existem diversas alternativas, como a utilização de compósitos têxteis multidirecionais, ou seja, tecidos de fibra, que conseguem obter estruturas com boas propriedades em ambas as direções ortogonais, mais equilibradas e com resistência ao impacto superior aos laminados multidirecionais [10].

As fibras ou os conjuntos de fibra não são, geralmente, processados diretamente sobre o molde de forma a obter uma lamina de reforço. Na verdade, este reforço é previamente processado para formar tecidos e mantas de fibra cuja aplicação se torna mais fácil e proporciona camadas uniformes de material, maximizando os resultados de moldação.

As fibras de carbono unidirecionais, ilustradas na figura 2.1, são um tipo de reforço fibroso cujas fibras se encontram orientadas numa direção única, de forma ordenada e paralela. Este tipo de malha é extremamente anisotrópica uma vez que apenas confere resistência e rigidez à peça numa direção, no entanto, ao variar a direção da malha durante a laminação e ao combiná-la com diferentes tecidos fibrosos, esta configuração permite obter peças com propriedades mecânicas muito elevadas e uma isotropia significativamente alta.



Figura 2.1: Malha de fibra de carbono unidirecional.

Um filamento de carbono, que representa uma fibra única, pode ser compactado num conjunto e diretamente processado para formar um tapete de fibra, apresentado na figura 2.2. Este produto consiste num conjunto de fibras longas e curtas ligadas entre si de forma arbitrária, obtendo um padrão mais ou menos aleatório.

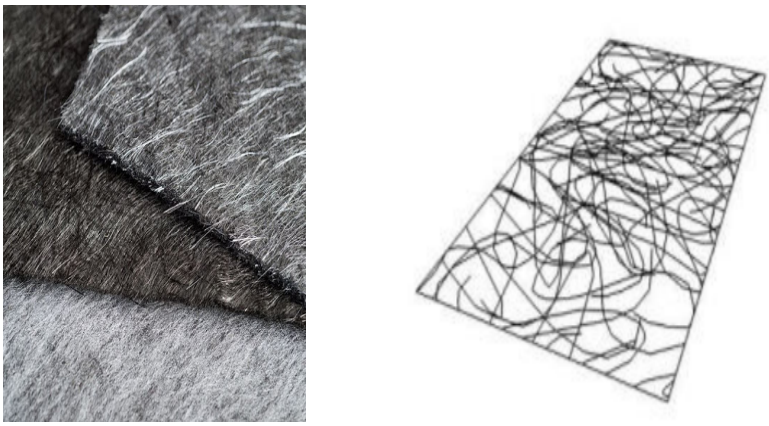
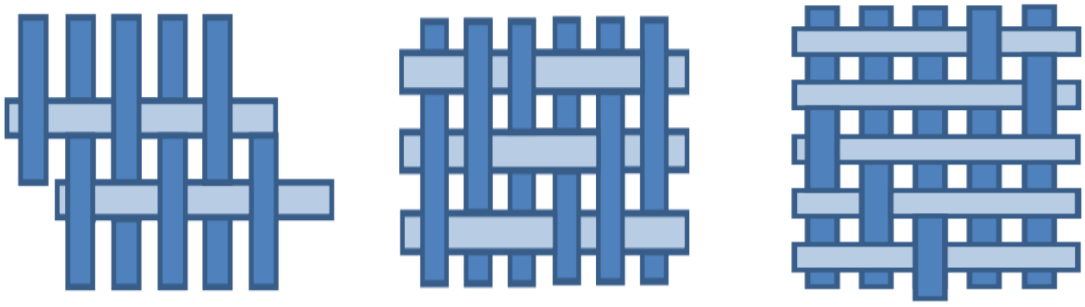


Figura 2.2: Manta de fibra com representação do padrão aleatório de fibras longas e curtas.

Na indústria, as principais configurações de reforço em tecido utilizadas denominam-se *twill weave*, *plain weave* e *satin weave*, que consistem em tecidos de fibra de padrão regular ao longo de todo o seu plano, porém o arranjo deste padrão difere quando comparadas as três configurações.

Em comparação com o tapete fibroso, as configurações da figura 2.3 permitem a produção de compósitos com melhores propriedades de isotropia devido ao arranjo das fibras de forma orientada em duas direções do plano e garantem elevada estabilidade dimensional nos eixos bi-dimensionais. Para além da melhoria das propriedades mecânicas do compósito, os tecidos fibrosos facilitam a produção tornando o processo de laminação mais simples e mais rápido, o que aumenta a sua produtividade.



(a) *Plain Weave* (b) *Twill Weave* (c) *Satin Weave*

Figura 2.3: Configurações das laminas de tecido de fibra de carbono [2].

No que toca à produção do compósito é de evidência prática que a forma de tecido em *plain weave* é mais propensa ao surgimento de poros, especialmente quando se trata de fibras de carbono pré-impregnadas. As zonas de interseção das fibras desta configuração de tecido encontram-se abertas até que a resina da matriz do compósito as preencha. Caso ocorra uma falha no preenchimento destas zonas ou caso se aprisione uma bolha de ar surgem inerentemente porosidades na peça, mesmo que o processo de produção recorra ao vácuo. [11].

Apesar de pouco relevante na indústria de moldes, é de realçar a configuração tri-dimensional de tecido fibroso esquematicamente apresentada na figura 2.4, que simboliza a elevação do nível

tecnológico destes produtos no sentido de procurar dar resposta à "fragilidade"destes materiais ao longo do terceiro eixo geométrico zz. Esta configuração resulta do interlaçamento das fibras entre as várias camadas ao longo da espessura do tecido e não apenas ao longo do plano.



Figura 2.4: Configuração do tecido de fibra tri-dimensional [12].

2.2.7 Orientação das fibras

A orientação das fibras num laminado pode ser definida de modo a atingir diferentes critérios de rigidez e/ou capacidade de carga e, assim, atender a diferentes requisitos do projeto. As propriedades mecânicas de um laminado relacionam-se em grande escala com o seu *design*, pelo que um determinado material pode obter diferentes propriedades segundo diferentes sequências de laminagem, quer seja pela modificação da sua espessura, quer seja pela modificação da sua orientação ao longo das camadas [7]. Por exemplo, em aplicações sujeitas a condições de tensão uniaxial as fibras são alinhadas ao longo do comprimento da peça para que a direção da fibra coincida com a direção do esforço, obtendo mais resistência nesta direção. Por outro lado, para aplicações que experienciam condições de esforço biaxial ou cuja direção de carga varia surge a necessidade de produzir um sistema com diversas orientações de fibra, obtendo uma peça moderadamente isotrópica e capaz de resistir à carga nas varias direções.

Posto isto, é importante reconhecer que as propriedades mecânicas caraterísticas de um FRP, o modo de falha do sistema e a ordem de falha das várias camadas depende da orientação da fibra em cada lamina de reforço e da variação deste ângulo entre as diversas camadas, como indica o gráfico da figura 2.5.

Deste modo, um tipo de laminado comum que tem a capacidade de produzir o mesmo módulo de elasticidade em diversas direções do plano é denominado laminado simétrico *quasi-isotropic*, cuja colocação das fibras segue a ordem [0/90/45/-45/-45/45/90/0]. Nesta ordem é importante a colocação das laminas a 0º como primeira e ultima camada de modo a obter o potencial máximo do sistema em termos de rigidez à flexão. Em casos de vigas/tubos sujeitos a carga torsional, onde as principais cargas ocorrem a 45º e -45º opta-se pela ordem simétrica [45/-45/-45/45] de modo a obter o potencial máximo da peça nesta direção. A figura 2.6 mostra, esquematicamente, a sequência dos laminados supra referidos.

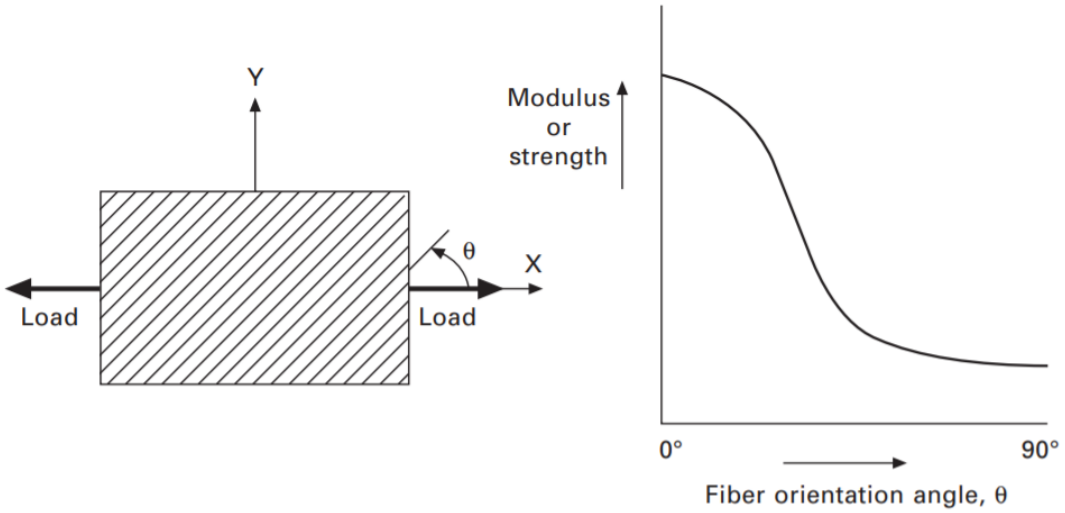
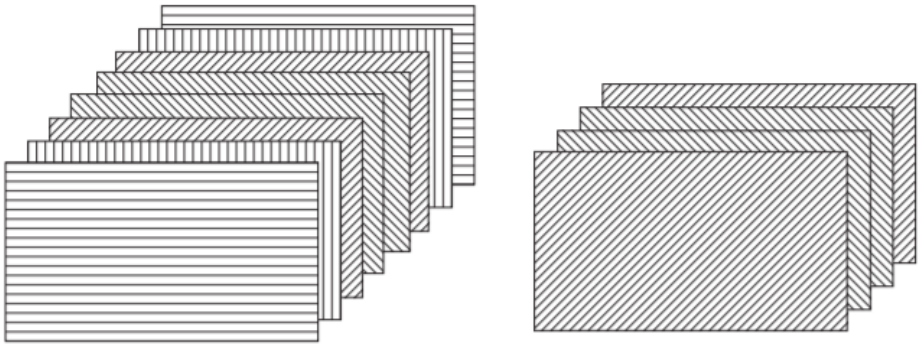


Figura 2.5: Variação do módulo de elasticidade e da resistência à rotura de um FRP unidirecional com o ângulo de orientação da fibra [13].



(a) [0/90/45/-45/-45/45/90/0] (b) [45/-45/-45/45]

Figura 2.6: Ordem comum de orientação das fibras unidirecionais de dois laminados simétricos. Adaptado de [13].

Em caso de utilização de fibras descontínuas, o tamanho da fibra torna-se um parâmetro adicional importante na determinação do módulo de elasticidade e da resistência à rotura do compósito. Por sua vez, a rigidez e resistência que estas fibras conferem ao compósito mostra-se significativamente inferior às mesmas propriedades quando utilizadas fibras unidirecionais contínuas, porém a produção das primeiras envolve menor custo e complexidade. Aplicando orientações aleatórias a estas fibras, o módulo de elasticidade e a resistência tornam-se ainda mais baixos, porém, permite obter um sistema praticamente isotrópico e, por isso, com propriedades semelhantes em várias direções do plano [13].

2.3 Matriz polimérica

Os materiais constituintes da matriz dos sistemas compósitos são polímeros cuja função principal passa por interagir com as fibras do reforço como agente ligante, permitindo que estas se liguem entre si numa estrutura capaz de absorver esforços. Para além disso, como referido, a matriz é responsável por transmitir os esforços externos às fibras, protegê-las, dar-lhes forma e conferir o acabamento superficial caraterístico destes materiais.

A interação do polímero na fibra permite que esta consiga absorver maiores cargas de compressão. Para além disso, como referido, o polímero é responsável pela adesão dos vários laminados. Desta forma, a carga externa é distribuída pelas fibras de modo equilibrado e eficaz, reduzindo a hipótese de o rompimento de uma fibra comprometer toda a secção de determinada peça. Em adição, o polímero determina a sensibilidade do compósito às adversidades exteriores, tais como, presença de químicos, luz ultravioleta, humidade, calor, etc. Em certos casos, determina a cor do compósito, a sua qualidade superficial e a sua opacidade [2].

A matriz, dependendo do tipo de polímero utilizado, pode ser designada termoendurecível ou termoplástica, sendo ao sistema compósito atribuída a mesma designação (ex. Compósito de matriz termoplástica). Esta classificação, em duas categorias, é relevante uma vez que a seleção de grande parte dos processos de produção depende da categoria a que o compósito pertence.

2.3.1 Termoplásticas

As matrizes termoplásticas são compostas por polímeros que se caraterizam por obter um caráter viscoso a alta temperatura, permitindo a sua moldação e/ou fundição após cura sem alteração das suas propriedades físicas. Este tipo de matriz é mais resistente e menos frágil do que as matrizes termoendurecíveis, devido à sua elevada resistência ao impacto e à elevada tolerância ao desgaste, porém o seu comportamento a elevada temperatura, caraterizado pela baixa rigidez, não permite que este material possa ser aplicado em moldes para fabrico de compósitos de alta temperatura de cura, enquanto se garante elevada precisão dimensional das peças. A tabela 2.5 mostra as propriedades de diversos termoplásticos que justificam o que foi anteriormente descrito.

Dada a possibilidade de fundir os polímeros termoplásticos, torna-se mais fácil a reparação de possíveis defeitos que surjam após a produção da peça e, para além disso, é possível manipular a sua forma após endurecimento o que acarreta vantagens do ponto de vista do tratamento da peça em fim de vida [14]. Adicionalmente, os polímeros termoplásticos mostram-se interessantes para aplicações em que o peso é um fator crítico, visto que a sua densidade é inferior quando comparados com os termoendurecíveis.

Contudo, a viscosidade dos termoplásticos[1] dificulta significativamente a sua capacidade de impregnação no reforço/fibras, uma vez que não permite uma "molhagem" correta das fibras e desta forma torna-se impossível obter um sistema compósito com boas propriedades de interação [14]. Assim, para produzir um compósito com matriz termoplástica é necessário recorrer a um processo que envolve elevada temperatura e pressão (ex. moldação por compressão). Deste modo,

[1] Viscosidade elevada no estado líquido/plástico, relacionada com o estado molecular

um projeto de produção de peças de alta tecnologia a partir de polímeros termoplásticos acarreta custos significativamente superiores relativamente aos custos de produção de peças em material compósito termoendurecível, dada a necessidade energética que exigem para que se assegure a adequada impregnação das fibras [1].

Tabela 2.5: Propriedades gerais de alguns polímeros termoplásticos [4, 1].

Propriedade	Densidade (Kg/m^3)	Tensão de rotura (MPa)	Temp. Max. de Serviço (ºC)	Coeficiente de expansão térmica (10^{-6} ºC)	Custo (€/Kg)
PP	900 - 930	20 - 50	90 - 120	35 - 100	1
PEAD	950 - 970	20 - 30	100 - 120	100 - 200	1
PC	1150 - 1200	60 - 70	100 - 145	120 - 130	2.5 - 4
PA 66	1050 - 1400	50 - 100	60 - 110	80 - 150	2.5 - 4
PEEK	1300	70 - 100	240 - 280	70 - 200	70 - 90
POM	1390 - 1410	45 - 90	75 - 120	90 - 200	2.5 - 4
ABS	1040 - 1200	30 - 55	80 - 120	100 - 250	1.5 - 2

2.3.2 Termoendurecíveis

A matrizes termoendurecíveis resultam da utilização de polímeros termoendurecíveis, que se caraterizam por atingir a sua forma sólida após cura (aquecimento controlado, durante um período definido) de modo irreversível (desintegração da resina). Assim, após cura não é possível que este tipo de polímeros retorne à sua forma inicial [14]. Em termo químicos, os polímeros termoendurecíveis consistem num conjunto de cadeias moleculares relativamente curtas que asseguram a sua baixa viscosidade no estado não curado [2]. A cura resulta na erupção de uma reação química onde as curtas cadeias moleculares ligam-se para formar estruturas em rede tridimensional.

A matrizes termoendurecíveis conferem ao compósito uma estrutura de elevada rigidez, compacta e muito resistente à fadiga mecânica e térmica. A baixa contração pós-cura e o baixo coeficiente de expansão térmica promovem o interesse na sua utilização para o fabrico de peças de elevada precisão e tolerância dimensional. Contudo, estes polímeros são frágeis e pouco resistentes ao impacto, o que torna mais importante a sua função de transferência de esforço às fibras do reforço. A tabela 2.6 expõe as propriedades dos polímeros termoendurecíveis mais utilizados na indústria de compósitos.

No que toca à produção e à atribuição de forma, os compósitos de matriz termoendurecível são, geralmente, mais baratos, fáceis de manipular e trabalhar, uma vez que no estado não curado as suas resinas são líquidas e suficientemente fluidas [2], apesar da sua elevada viscosidade. No entanto, após cura, estes polímeros não podem ser novamente moldados o que torna difícil a sua reutilização e até mesmo o seu tratamento em fim de vida.

Tabela 2.6: Propriedades gerais de alguns polímeros termoendurecíveis [4, 1].

Propriedade	Densidade (Kg/m^3)	Tensão de rotura (MPa)	Coeficiente de expansão térmica (10^{-6} K)	Temp. Max. de Serviço (ºC)	Contração pós-cura (%)	Custo (€/Kg)
Resina epoxídica	1100 - 1400	50 - 100	50 - 120	120 - 180	0.1 - 2.5	3 - 20
Poliéster	1000 - 1500	40 - 90	100 - 180	90 - 130	5 - 15	1
Resina fenólica	1200 - 1500	30 - 60	115 - 130	140 - 200	0.1 - 1.5	1 - 2
Poliuretano	1190 - 1210	40 - 51	160 - 165	80 - 105		1.5 - 2.2

Na prática encontram-se inúmeras evidências que permitem uma comparação qualitativa entre estes materiais:

- Poliésteres e vinilésteres são mais baratos de produzir do que as resinas epoxídicas;
- Époxi apresenta menor contração pós-cura do que os poliésteres e os vinilésteres;
- Poliésteres são mais sensíveis ao aparecimento de danos por osmose (água/humidade absorvida pelo polímero pode levar à formação de blisters/porosidades);
- Poliésteres são classificados como termoendurecíveis mas podem também ser termoplásticos. As resinas fenólicas, a determinadas temperaturas, comportam-se como termoplásticos;
- Todos os polímeros requerem pelo menos a mistura de dois componentes. Por exemplo, no caso do poliéster e do vinil éster é requerido o monómero e um catalisador para que seja curado; [2].

2.4 Interface Reforço/Matriz

As propriedades da interface fibra/matriz, tais como a resistência ao descolamento e resistência ao deslizamento, desempenham um papel predominante na determinação das propriedades dos compósitos [15]. A interface das fibras e da resina polimérica impregnada é conseguida por via de um conjunto de mecanismos químicos e físicos descritos de seguida:

- **Ligações covalentes:** Partilha de eletrões entre as fibras do reforço e os polímeros da matriz. Este é o tipo de ligação mais forte em compósitos de matriz termoendurecível;
- **Bloqueio Mecânico:** A rugosidade das superfícies permite o atravancamento mecânico dos diversos materiais na sua interface;

- **Interdifusão:** Difusão das cadeias moleculares do revestimento da fibra entre o polímero da matriz [1].

A junção dos constituintes de um sistema compósito é, geralmente, obtita através de dois métodos distintos. As fibras podem ser pré-impregnadas na resina, formando um tipo de material denominado *prepeg*, ou a resina pode ser apenas impregnada durante o processo de produção das peças [16].

2.5 Pré-impregnados

Os pré-impregnados são uma classe de material compósito semi-acabado cuja resina polimérica é impregnada nas fibras ou nos tecidos de fibra previamente à laminação do compósito. Deste modo, aquando da sua laminação a resina encontra-se impregnada nas fibras, em proporção controlada e pronta a curar, tal como ilustra a figura 2.7. Tipicamente, os pré-impregnados de matriz termoendurecível contêm resina ativa com um tempo de conservação limitado, quer à temperatura ambiente, quer à temperatura de armazenamento que se deve situar abaixo dos 0 ºC [17].

Este material encontra-se numa forma designada por estágio B ou, mais corretamente, *B-stage*, que se define como uma cura parcial do compósito. Esta cura parcial é o que permite a adesão da matriz polimérica pré-impregnada às fibras do reforço, eliminando a necessidade de controlar a razão resina/fibra e de proceder à sua mistura durante a laminação do compósito [18]. Na verdade, o pré-impregnado pode ser designado por sistema compósito antes de ser submetido ao processo de produção, uma vez que possui um sistema parcialmente curado de dois materiais distintos, um reforço e uma matriz. O *B-stage* permite criar tecidos compósitos flexíveis, capazes de serem cortados em qualquer forma e com moldabilidade suficiente para se adaptarem às formas mais complexas do molde.

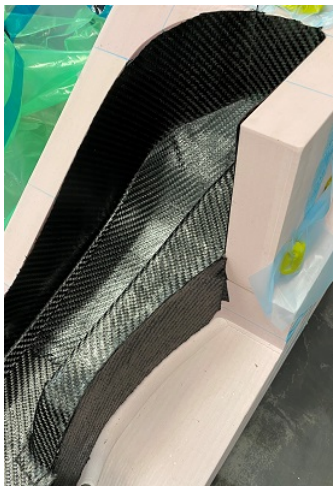


Figura 2.7: Pré-impregnado laminado sobre um *master*.

A produção de peças a partir deste material tem como preferência a laminação das várias camadas sobre um molde sujeito ao processo de saco de vácuo e cura em autoclave ou num forno

ventilado. Porém, o processo de cura dependerá da composição do pré-impregnado e das propriedades da sua matriz, visto que diferentes componentes possuem diferentes temperaturas de cura [18]. Para uma análise mais aprofundada a este tipo de material recomenda-se ao leitor a consulta das referências [18] e [17], inseridas ao longo deste texto.

2.6 Processos de produção

Os métodos de produção apresentam uma vasta gama na indústria, cada um corresponde a diferentes necessidades e a sua complexidade varia desde os processos mais rudimentares e totalmente manuais aos processos automatizados e de alta tecnologia. A escolha do processo a adotar para determinado compósito e/ou determinada peça depende de uma série de fatores. Entre eles, a necessidade de produção de peça única ou de produção em série, a temperatura e pressão de cura do compósito, a taxa de cura, a qualidade superficial desejada, os materiais utilizados, a necessidade de equipamentos e ferramentas e os custos do processo.

Para além disso, a escolha do processo depende da configuração do material fornecido e vice-versa. As opções principais no que toca à configuração dos materiais fornecidos são [2]:

- Bobinas com fios ou enrolamento de fios de fibra;
- Tecido em fibra;
- NCF's;
- Tapete fibra com diferentes combinações da orientação da fibra;
- Pré-impregnados.

De modo geral, os processos de produção que serão abordados envolvem, em primeiro lugar, a necessidade de produzir um molde com a forma negativa da peça, sobre o qual será laminado o material compósito definido de modo a obter a peça pretendida, após cura. Parte destes processos utilizam pressão para promover uma compactação adequada dos laminados, garantindo uma boa adesão entre as diversas laminas de reforço e a matriz, o que evita o aparecimento de porosidades no compósito e a melhora a qualidade estética e estrutural da peça.

Os compósitos de matriz termoendurecível são, atualmente, os mais utilizados para aplicações estruturais, quer na indústria automóvel quer na indústria aeronáutica ou aeroespacial [19]. A produção de peças em fibra de carbono requer uma enorme necessidade energética que acarreta custos elevados. Porém, este custo pode ser compensado pelos custos totais de utilização da peça devido à baixa manutenção que requer, à baixa energia consumida no seu transporte (baixo peso) ou até mesmo à sua função, que poderá permitir gerar energia (pás das turbinas eólicas) [2].

2.6.1 *Hand Lay-Up*

A técnica de *hand lay-up* é o método mais antigo e rudimentar de produção de compósitos poliméricos de reforço fibroso. Este método de molde aberto consiste na laminação manual das

laminas de fibra no molde. Sobre estas é impregnada resina líquida com auxílio de ferramentas como rolos de pintura, para as grandes superfícies, e pincéis, para as zonas mais detalhadas [12]. O sucesso de produção por este método depende de vários fatores como, a mistura da resina, a quantidade de resina no laminado e a qualidade do laminado. Estes fatores são cruciais para a produção de uma peça com qualidades mecânicas e estéticas adequadas e, por este motivo, a eficácia da técnica *hand lay-up* é altamente dependente do operador [7]. Contudo, é um método barato (custo-eficiente), uma vez que apenas requer ferramentas simples e um baixo número de consumíveis [2], e pode ser aplicável a diversos compósitos (por exemplo, fibra de carbono ou de vidro) e a distintas configurações do reforço (por exemplo, *chopped fiber*, *woven fabric*, etc.)

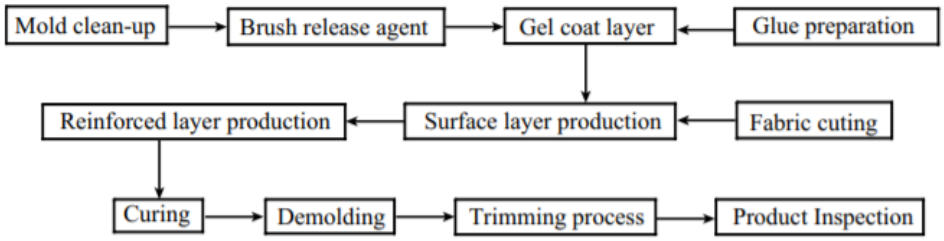


Figura 2.8: Representação esquemática das etapas do processo *hand lay-up* [20].

O método de *hand lay-up* segue uma série de etapas que visam promover o melhor resultado possível na produção do compósito, como mostra o diagrama presente da figura 2.8. Antes de mais, a superfície do molde é tratada com a aplicação de um agente desmoldante para evitar que o polímero lhe adira (por vezes são necessárias múltiplas camadas) [12, 19]. Em seguida, para obter um acabamento superficial de elevada qualidade é aplicada uma camada espessa de resina, a *gel coat*, que poderá ser pigmentada caso se pretenda que a superfície da peça possua uma cor específica. Para além disso, a *gel coat* atua como uma camada protetora da peça ao desgaste causado pelo meio envolvente, aumentando a sua permeabilidade, a resistência a agentes químicos e evita o contacto das fibras do reforço com o meio envolvente. A aplicação desta camada tanto é possível com o auxílio de pincéis como com o auxílio de uma pistola de *spray*. A técnica de spray promove a uniformização da espessura da camada, o que eleva a qualidade superficial da peça, e acelera o processo pois permite uma maior taxa de deposição [20].

Após a cura da camada superficial de resina, a superfície do molde encontra-se preparado a receber as camadas de reforço e o respetivo polímero ligante. As várias camadas de tecido do reforço, previamente cortadas com a forma planificada do molde, são colocadas manualmente sobre este, intercalando entre cada a impregnação da resina[2] com auxílio de pincéis ou rolos, como mostra a figura 2.9. A quantidade de camadas de reforço dependerá da espessura e do projeto estrutural da peça [12]. Após a colocação de cada camada de reforço, é aplicada pressão sobre o laminado de modo a remover o ar aprisionado na matriz, o excesso de resina e garantir a compactação do laminado.

[2]Mistura de resinas previamente preparada com adição de um agente catalisador.

A cura inicia pela ação do catalisador presente no sistema, previamente misturado na resina, que fomenta uma reação de polimerização, conferindo ao polímero o seu endurecimento sem a necessidade de utilizar uma fonte de calor exterior [7]. Desta forma, o compósito cura à temperatura ambiente, entre 15 a 30 ºC durante 8 a 24 horas[3], sem a necessidade de utilizar mecanismos auxiliares de temperatura e pressão, reduzindo significativamente as necessidades energéticas do processo e daí o seu custo [21]. Porém, como forma de aumentar a produtividade, a cura pode ser feita em forno a uma temperatura de 60 a 80 ºC o que permite um período de cura entre 1 a 2 horas [20].

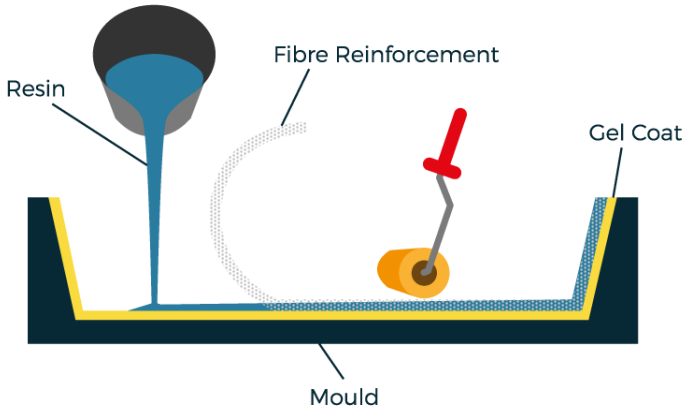


Figura 2.9: Representação da técnica *hand lay-up*

2.6.2 *Spray-Up*

A técnina de *spray-up* é um método de molde aberto semelhante ao processo descrito anteriormente, capaz de produzir peças de enormes dimensões e de complexidade geométrica mais elevada [22]. Em relação à técnica de *hand lay-up*, este processo permite tempos de produção mais curtos, maior complexidade geométrica e, por vezes, oferece melhor controlo da quantidade de material utilizado, ainda que dependa de modo semelhante do operador.

A preparação do molde segue os mesmos pressupostos do método *hand lay-up*, bem como aplicação da *gel coat*. As diferenças centram-se na técnica de impregnação das fibras e da mistura de resina que neste caso é conseguida com auxílio de uma pistola pressurizada, como indica a figura 2.10. Esta pistola deposita *chopped fibers* saturadas em resina sobre o molde [21]. Entre cada aplicação procede-se à compactação do material depositado de modo semelhante ao processo *hand lay-up* a fim de remover o aprisionamento de ar e promover a compactação do laminado. Este processo repete-se até alcançar a espessura definida.

Adicionalmente é possível laminar, entre camadas depositadas pela pistola pressurizada, camadas de tecido de fibra de forma a aumentar a quantidade de reforço [22].

[3]Depende da taxa de cura da resina utilizada, quantidade de catalisador fornecido à mistura, etc.

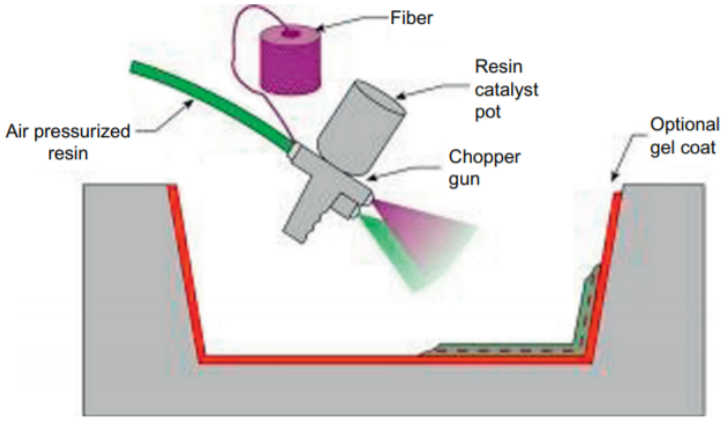


Figura 2.10: Representação da técnica de *spray-up* [21].

2.6.3 *Resin Infusion*

O método de infusão de resina é um processo de produção de compósitos avançado que partilha procedimentos similares ao método de moldação manual assistido a vácuo. Este processo é amplamente utilizado na produção de compósitos em molde fechado visto que esta técnica combina diversos benefícios como, baixo custo das ferramentas, elevada qualidade estética, repetibilidade, flexibilidade dos materiais e minimização de porosidades. Adicionalmente, a infusão de resina é um processo limpo quando comparado com a impregnação manual de resina e tanto permite a produção de peças de elevada como de pequena dimensão [23].

Na literatura, a designação deste processo de produção possui pequenas variantes, tais como: VARTM - *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*, VARIM - *Vacuum Assisted Resin Infusion Moulding*, VBRTM - *Vacuum Bag Resin Transfer Moulding*, VARI - *Vacuum Assisted Resin Infusion*, entre outros. Todas as designações envolvem praticamente a mesma tecnologia e descrevem métodos baseados na impregnação de fibras secas laminadas previamente na cavidade do molde a partir da infusão resinas termoendurecíveis líquidas que fluem sob ação de vácuo [24].

As resinas utilizadas neste processo são, geralmente, poliéster, viniléster ou epóxi previamente misturadas com um catalisador, um agente de cura e outros ingredientes, entre os quais, *fillers* e solventes, utilizados para reduzir a viscosidade inicial da resina. A viscosidade da resina e a permeabilidade dos elementos que compõem a técnica de infusão são dois parâmetros importantes a controlar e que podem definir a qualidade final da peça produzida, isto porque os cálculos de infusão são baseados na lei de Darcy (equação 2.2).

$$Q = \frac{-K \cdot \Delta P \cdot A}{\mu \cdot l}, \tag{2.2}$$

onde,

Q = caudal de resina [m/s]

K = permeabilidade [m^2]

A = área da secção [m^2]

μ = viscosidade [Pa · s]

ΔP = diferencial de pressão [Pa]

l = comprimento de infusão [m]

Como seria de prever, a equação 2.2 mostra que quanto maior a permeabilidade, a diferença de pressão e menor a viscosidade da resina, maior será o valor do volume que irá fluir por uma determinada secção de área A até ao interior da cavidade de moldação [2].

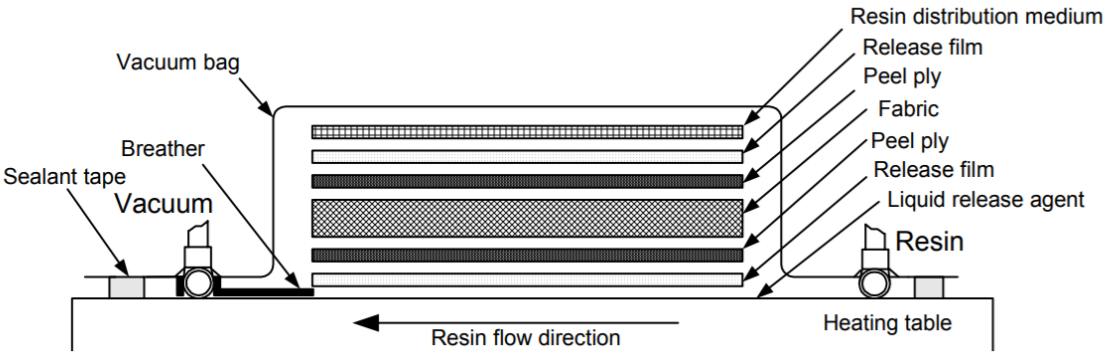


Figura 2.11: Processo de infusão de resina, variante VARIM [24].

A seguinte descrição deste processo está centrada na variante VARIM - *Vacuum Assisted Resin Infusion Moulding* cuja diferença em relação às restantes está na execução do processo sobre uma mesa aquecida, como mostra a figura 2.11. Neste processo, tal como nas restantes variantes, os tecidos de fibra seca são colocados sobre a superfície de moldação em molde aberto e um saco plástico de vácuo é estendido pelo seu topo. Os conectores de vácuo são inseridos no saco e introduzem-se mangueiras que fazem ponte entre a bomba de vácuo e a fonte de resina. A partir da ação do vácuo no interior da cavidade moldante a resina líquida flui, preenchendo as fibras previamente colocadas. A cura do compósito e a desmoldagem seguem a infusão da resina [24]. Este processo utiliza componentes similares ao processo de *vaccum bag*, o qual será abordado de seguida. De qualquer forma, na figura 2.11 é possível identificar de antemão os produtos e ferramentas utilizadas.

A descrição do processo de infusão de resina, não sendo exaustiva, é recomendado ao leitor a consulta do texto [25] que oferece uma revisão completa e detalhada dos parâmetros deste processo.

2.6.4 *Vaccum Bag*

No seio dos processos abordados, o método de produção em saco de vácuo é aquele que será apresentado com mais detalhe pois será utilizado para produzir as peças estudadas neste trabalho.

O processo *vaccum bag*, consiste na introdução de vácuo no interior do molde após a laminação do compósito e durante a sua cura. A pressão negativa utilizada eleva o grau de compactação do compósito garantindo a total moldação do material às superfícies do molde. Apesar de ser

um processo em molde fechado, este necessita apenas de um molde ou *master* para dar forma ao laminado, uma vez que o fecho é conseguido pelo saco de vácuo inserido em redor da moldação e que cobre toda a superfície de laminação. Tal como os restantes processos, esta técnica segue um conjunto de etapas representadas de forma esquemática na figura 2.12 e que são posteriormente descritas.

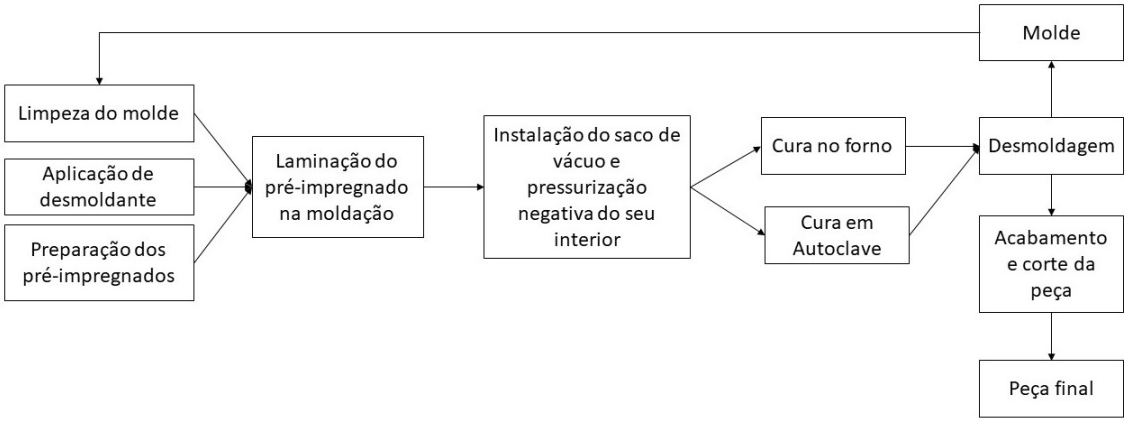


Figura 2.12: Representação esquemática das etapas do processo *vaccum bag* genérico. Adaptado de [20].

Os principais equipamentos que este método requer são o molde da peça, o sistema de vácuo (que engloba a bomba de vácuo, o saco de vácuo, acessórios inerentes a estes últimos e adesivo para selar a moldação, como mostra a figura 2.13) e um forno ou outro equipamento capaz de transferir calor ao molde (ex. autoclave). A aplicação de vácuo no interior da cavidade moldante leva a que o saco realize pressão sobre a sua superfície, conseguindo até 0.1 MPa de pressão sobre a peça [20]. Este mecanismo aumenta a eficácia de remoção do aprisionamento de ar no interior da matriz do compósito, o excesso de resina e aumenta a compactação do laminado. Desta forma obtém-se um sistema compósito com uma percentagem significativamente superior de reforço em relação aquela que seria conseguida por um método menos tecnológico, como é o caso do processo *hand lay-up*.

Por norma, os materiais utilizados para este processo são materiais compósitos pré-impregnados quer de fibras contínuas unidirecionais quer bidirecionais, e de matriz termoendurecível parcialmente curada, tipicamente de resina epoxídica. As laminas de compósito previamente planificadas e definidas a nível de tamanho, forma e orientação da fibra, são cortadas quer manualmente quer em máquina de corte CNC. Tradicionalmente, a aplicação das laminas de fibra, na respetiva zona do molde para a qual foram desenhadas, é feita de forma manual. Porém, para produções em série de elevada cadência é possível recorrer a máquinas de controlo numérico [13].

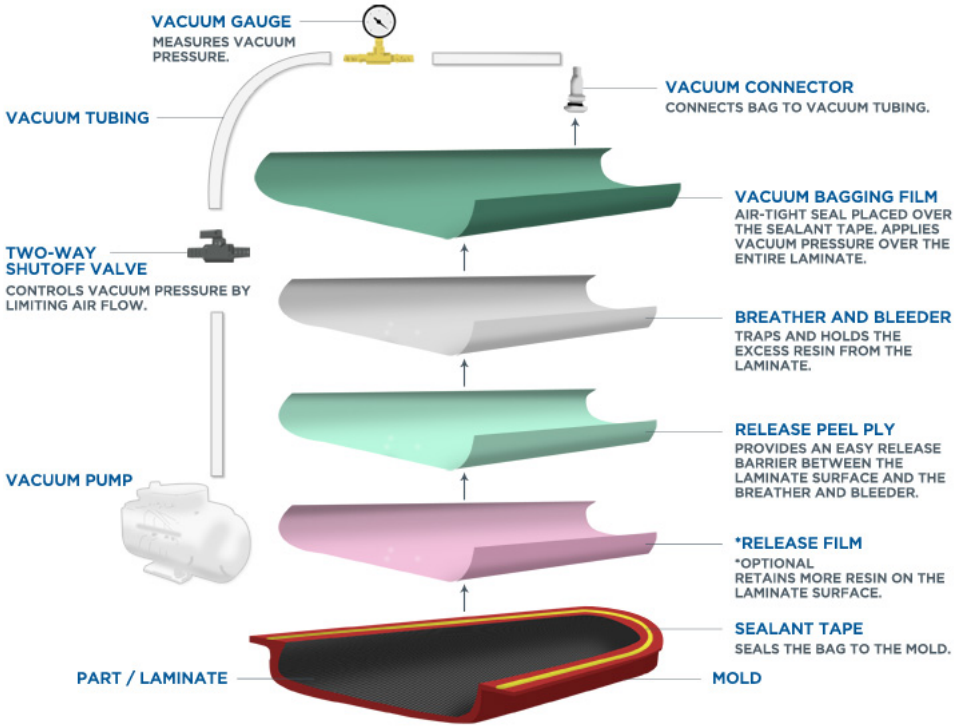


Figura 2.13: Camadas acessórias necessárias à implementação do sistema de vácuo [26].

O molde requer uma preparação prévia através de técnicas, por vezes manuais, como a lixagem, a aplicação de selante [4] e de desmoldante para garantir que o compósito não adere à superfície de moldação. Assim, evita-se o surgimento de empenos na peça durante a sua remoção. Com a superfície do molde preparada inicia-se o processo de laminação das várias camadas de compósito, dispondo cada camada com diferentes orientações de fibra até atingir a espessura da peça requerida.

No que toca ao fecho do molde os diferentes materiais utilizados podem ser consultados na figura 2.13. Em primeiro lugar, é aplicado um filme de plástico sobre a peça que irá impedir o *breather* de aderir à resina do compósito. Por este motivo, este filme é importante para assegurar a qualidade acabamento da peça. O *breather* permite a homogeneização da pressão do vácuo no interior do molde. Para além disso, este material poroso manter canais de abertos durante o processo de remoção de ar do molde para garantir que toda a secção se encontra em vácuo [13]. Quando o vácuo é utilizado, após as técnicas de laminação, o *breather* poderá funcionar também como *bleeder* dado a sua capacidade de absorver a resina em excesso que é extraída do compósito durante a compactação.

As camadas de *release film* e de *peel ply*, que impedem a adesão do *breather* à resina do laminado, são produzidas em nylon, fibra de vidro ou poliéster, que são materiais com excelente capacidade de extração da peça após compactação e cura. [27]. Após a colocação de todas estas camadas acessórias segue-se o saco de vácuo, como mostra a figura 2.14, que, após fixação e

[4] A aplicação de selante é necessária quando o molde é constituído por material poroso como, por exemplo, resina epoxídica ou outro polímero, podendo causar defeitos superficiais na peça e mau acabamento.

vedação das suas extremidades nas abas do molde, é sujeito à remoção do ar contido no seu interior. Isto, é conseguido a partir de uma bomba de vácuo. Após o vácuo total da peça é inserido um manómetro que permitirá perceber a existência de fugas de vácuo. O compósito segue para tratamento de cura em forno ventilado ou autoclave. O vácuo deve ser mantido durante todo o processo de endurecimento.

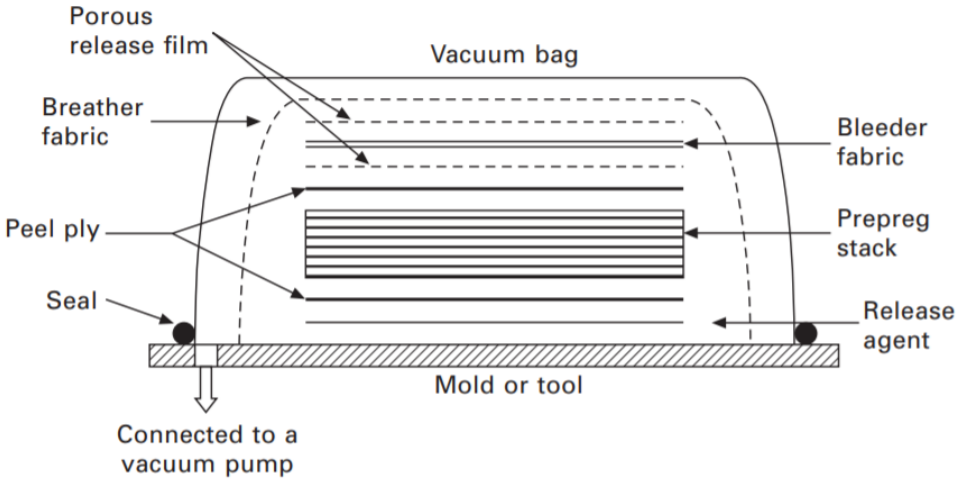


Figura 2.14: Acessórios e forma final do processo *vaccum bag* [13].

Normalmente, as resinas utilizadas neste processo possuem temperatura de cura sensivelmente superiores à temperatura ambiente e, por isso, surge a necessidade de submeter o molde a uma fonte térmica. O ciclo de cura é dado pelo fornecedor do compósito e deve ser seguido para que a cura confira as propriedades mecânicas desejadas ao material. Deste modo, como referido, o processo de cura poderá ocorrer em forno ventilado ou, desejavelmente, em autoclave. Caso a cura seja submetida em forno ventilado a consolidação do compósito ocorre à pressão atmosférica no exterior do saco de vácuo e, dependendo da resina, o processo levará entre 30 minutos a várias horas. Por outro lado, a utilização do autoclave produz um nível consolidação e compactação do compósito mais elevado e presumivelmente uma taxa de porosidades significativamente inferior. Por estes motivos, recomenda-se a cura em autoclave especialmente para peças de elevada espessura e exigência mecânica. [13].

Apesar da sofisticação do processo em relação aos tratados anteriormente, esta técnica assistida a vácuo depende ainda da qualidade do operador, visto que grande parte das etapas são realizadas manualmente. Contudo, a utilização de pré-impregnados e de pressão auxiliar de compactação permite obter resultados muito superiores e, de certo modo, estes resultados mostram-se menos dependentes da mão de obra humana [21].

2.6.5 Cura em autoclave

O autoclave é muito utilizado para a cura de materiais compósitos avançados. Este equipamente produz pressão estática e calor através de controladores altamente precisos, o que permite estabelecer rampas de temperatura extremamente rigorosas às necessidades do compósito enquanto que a atmosfera pressurizada ajuda na compactação do laminado. De um modo geral, o vácuo permite que o saco exerça sobre a peça 100 KPa de pressão. Porém, o autoclave consegue uma pressurização atmosférica geralmente entre os 300 a 700 KPa. Deste modo, é possível exercer sobre a peça 800 KPa de pressão, correspondente a 8 bar [21].

Este tipo de cura permite obter peças com propriedades significativamente superiores, principalmente no que toca à uniformização da resina ao longo de todas as fibras, à compactação interna da estrutura do sistema compósito e da remoção de bolhas de ar aprisionadas entre as camadas do laminado [20]. Assim, consegue-se a minimização dos poros na matriz do compósito e elevar as suas propriedades mecânicas. Contudo, a cura em autoclave possui gastos energéticos significativos dado a necessidade de gerar calor e pressão, encarecendo o custo do processo [21].

Capítulo 3

Desenvolvimento de Moldes para a Produção de CFRP

Este capítulo aborda, detalhadamente, todo o projeto de desenvolvimento de um molde em fibra de carbono pré-impregnada, através de um processo de moldação em vácuo com cura em autoclave. Assim, serão apresentadas todas as considerações teórico-práticas inerentes ao projeto, desde a seleção de material para o *master* até ao último detalhe de acabamento do molde.

3.1 Desenho do *master*

O *master* é o elemento de moldação que representa o positivo da peça que se pretende obter e sobre o qual será laminado um compósito de fibra de carbono pré-impregnada de resina epóxi. Desta laminação será obtido um molde que representa o negativo da peça, também designado por contra-molde, a partir do qual será produzida a peça final.

O desenho do *master* requer um pré-estudo da peça que se pretende obter e das restrições inerentes ao projeto. Dessa forma, torna-se importante perceber o enquadramento de cada molde, a fim de conhecer as suas fronteiras, cuja existência/ ou inexistência condicionará o desenho dos seus elementos. Por outro lado, é de igual forma primordial conhecer as restrições do projeto como, as dimensões limite de maquinagem e a sua profundidade máxima. Adicionalmente, as caraterísitcas de laminação do compósito devem ser estudados de forma a ter em conta a sua capacidade de moldação às curvaturas da peça e para sejam respeitados os seus requisitos. Por fim, devemos ter em conta as propriedades resultantes da própria geometria da peça, como a existência de contra-saídas e zonas de furo, que podem condicionar a definição dos planos de partição e a adição de elementos acessórios. Assim, em forma de síntese, o desenho do molde deve ter em conta as seguintes caraterísticas:

- Definição dos planos de partição da peça;
- Prever as caraterísitcas de fronteira entre os múltiplos moldes, de modo a adicionar elementos de ligação e de contacto;

- Adicionar elementos de alinhamento do conjunto e de zonas de furo de modo a marcar o seu lugar geométrico.
- Verificar a existência de contra-saídas;
- Conferir um ângulo mínimo de 3º em todas as superfícies em relação à direção de desmoldagem;
- Estudar a capacidade de maquinagem do molde tendo em conta as limitações inerentes a este processo;
- Prever possíveis alterações ao desenho resultantes do processo de maquinagem [1], adaptando a sua geometria;
- Analisar a presença de paredes finas no molde adaptando-as de modo a evitar defeitos de maquinagem como a rotura do material;
- Analisar a necessidade de separar elementos cuja operação de maquinagem seja incapaz de conferir os resultados pretendidos;
- Otimizar o volume e o desenho do molde como forma de reduzir a quantidade de material e/ou diminuir o tempo de maquinagem;
- Assegurar, se possível, que o desenho do *master* permite a homogeneização da distribuição de calor de forma a obter uma cura uniforme. Assim, obtem-se um laminado com caraterísticas constantes, enquanto se reduzem as distorções causadas pela contração da resina;
- Evitar que a geometria do *master* leve ao aparecimento de pontos de sobreaquecimento que resultem na polimerização exotérmica da resina.

As caraterísiticas enumeradas serão evidenciadas de modo prático no capítulo seguinte, explorando aprofundadamente a importância de cada uma.

3.2 Seleção de material do *master*

O *master* é a ferramenta primária de moldação do compósito que permitirá obter os moldes responsáveis pela produção da peça final. Assim sendo, o material que o constitui deve apresentar uma capacidade de moldação apropriada às exigências do processo. Desta forma, a escolha do material deve seguir uma série de considerações fundamentais, entre elas:

- Elevada rigidez: o *master* deve ter rigidez suficiente para assegurar a precisão geométrica requerida, principalmente para curas em autoclave;

[1] Um caso prático comum é a incapacidade de obter ângulos retos entre paredes cuja normal seja perpendicular ao eixo da fresa. Nestes casos permanecerá um excesso de material, correspondente ao raio da fresa utilizada na operação de maquinagem

- Elevada precisão dimensional, consistência dimensional e baixa propensão a impenos;
- Baixo coeficiente de expansão térmica ou equivalente à do compósito;
- Excelente maquinabilidade;
- Elevada densidade [2];
- Capacidade de aquecimento à temperatura de cura do compósito;
- Resistência estrutural a baixa e alta temperatura;
- Durabilidade, baixo desgaste superficial e elevada resistência à fadiga térmica;

Para esta aplicação é comum encontrar na indústria três materiais distintos cujas propriedades respondem, quer para melhor quer para pior, aos requisitos enumerados anteriormente, sendo eles:

- MDF ou *Medium Density Fiberboard*
- Resina de poliuretano
- Resina epóxi

Estes materiais podem ser fornecidos em placas ou blocos desenvolvidos especialmente para maquinagem e, em particular, para a moldação de compósitos. Como tal, a escolha terá em consideração produtos catalogados cujas propriedades tendem a satisfazer os requisitos do projeto. A análise destes materiais é apresentada de seguida.

3.2.1 MDF

O MDF ou *Medium Density Fibreboard*, apresentado na figura 3.1, é um material composto por finas partículas de madeira aglomeradas por um agente ligante de cera e resina. A produção deste agregado resulta da aplicação de elevada pressão e temperatura. Este material, normalmente fornecido em blocos ou placas, apresenta uma densidade muito elevada, uma textura muito uniforme ao longo de todo o seu volume e proporciona resultados de maquinagem de baixa rugosidade devido ao tamanho das suas partículas. Este último fator contribui, posteriormente, para a melhoria da qualidade superficial do compósito.

Para além disso, as caraterísticas de produção deste material garantem a inexistência de poros no seu interior. Estes poros são simples depressões que podem aparecer na superfície do *master* após a operação de maquinagem que não sendo tratados irão afetar, inevitavelmente, a qualidade superficial do molde CFRP.

Adicionalmente, o MDF revela uma maquinabilidade muito elevada, consequente da baixa dureza, indicada na tabela 3.1. Esta propriedade traduz-se num baixo desgaste das ferramentas e num menor tempo de operação, ou seja, podem ser utilizadas velocidades de corte superiores.

[2] No que toca aos materiais estudados para esta aplicação, a densidade é um bom indicador do teor poroso do material

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas e físicas do MDF [4]

Propriedades	**Valor**	**Unidades**
Densidade	600 - 900	kg/m^3
Módulo de Elasticidade	2,9 - 5	*GPa*
Resistência à rotura	10,2 - 25,2	*MPa*
Temperatura de transição vítrea	77 - 102	℃
Coeficiente de expansão térmica	10 - 15	10^{-6}/ ℃
Dureza	6,1 - 7,5	HV



Figura 3.1: Placas de MDF

Por outro lado, este material apresenta baixa consistência dimensional quando comparado com os restantes. Esta desvantagem evidencia-se principalmente para produção em série, devido às alterações geométricas e empenos que surgem da fadiga térmica do material após sucessivos tratamentos de cura do compósito. Para além da baixa resistência ao calor, este material é altamente propenso à absorção de água gerando inchaços que tornam a ferramenta inutilizável, mesmo apenas na presença de humidade atmosférica. Por este motivo, torna-se difícil o seu armazenamento para utilização futura sem que ocorram flutuções nas suas dimensões.

Durante a operação de maquinagem o MDF requer cuidados especiais, uma vez que contém compostos organicos voláteis como, por exemplo, formaldeído, cuja inalação coloca em risco a saúde, causando irritação nos olhos e nariz, sendo também uma substância cancerígenea [28].

3.2.2 Resina de poliuretano

A resina de poliuretano apresenta diversas configurações e estados de fornecimento. As placas estudadas são desenvolvidas especificamente para a produção de ferramentas de moldação através de maquinagem. Por este motivo, a maquinabilidade é uma das suas principais vantagens em relação aos demais materiais em análise.

No entanto, o poliuretano é um polímero cujo comportamento varia consideravelmente quando sujeito a uma fonte de calor externa. Deste modo, torna-se complexa a sua utilização quando o compósito requer tratamento de cura em autoclave. Isto porque, o aquecimento deste material durante ciclos prolongados, caraterísticos da cura de compósitos, pode provocar distorções térmicas na peça, o que associado à aplicação de pressão externa no autoclave será de prever o surgimento de empenos e de graves alterações geométricas da ferramenta. Assim, este material deve ser previamente testado de modo a avaliar a sua viabilidade de utilização em autoclave [29]. Por outro lado, o poliuretano possui excelentes caraterísticas como ferramenta de moldação para processos menos sofisticados, nomeadamente quando a cura do compósito acontece à temperatura ambiente.

De forma a expor estas propriedades foi realizada uma pesquisa junto de um fornecedor de placas de poliuretano específicas para compósitos, cujo catálogo referia a possibilidade de submeter o material a temperatura e pressão. Desta forma, torna-se possível comparar a capacidade de moldação do poliuretano com os restantes materiais em estudo. As propriedades deste produto encontram-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Propriedades mecânicas e físicas da Resina Last-A-Foam FR 4500 [29]

Propriedades	**FR-4520**	**FR-4530**	**FR-4540**	**FR-4550**	**Unidades**
Densidade	320	481	641	804	kg/m^3
Resistência à rotura	6,05	10,3	17,2	21,4	MPa
Temperatura Máxima de Serviço	93	93	93	93	^oC
Coeficiente de expansão térmica	52	52	52	52	$10^{-6}/\,^oC$

A resina de poliuretano *Last-A-Foam FR 4500* apresenta quatro variantes com diferentes valores de densidade, cujo aumento se traduz num acréscimo em resistência. Verifica-se ainda que todas as variantes conseguem atingir uma temperatura de trabalho superior aos requisitos de cura do carbono, porém, apresentam um coeficiente de expansão térmica significativamente elevado quando comparado com os restantes materiais, o que prejudicará a estabilidade dimensional da ferramenta produzida a partir destes blocos poliméricos, durante o processo de cura.

3.2.3 Resina epóxi

A resina epóxi, tal como o poliuretano, é um polímero termoendurecível que apresenta propriedades desejáveis à moldação de compósitos, quer seja como *master* de moldação quer seja como composto da matriz do compósito. À semelhança dos materiais estudados anteriormente, a resina epóxi em análise é fornecida em placas poliméricas rígidas desenvolvidas para maquinagem e moldação de compósitos.

Para esta opção foram estudadas as propriedades dos blocos epóxi fornecidos pelo fabricante *Trelleborg* que apresenta diferentes soluções adequadas não só à industria automóvel como também à industria aeronáutica e aeroespacial. Dentro das várias opções consideraram-se as placas

ferramenta referenciadas por *EP700* e *EP678*, cujas propriedades são apresentadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas e físicas das placas ferramenta *Trelleborg EP700* e *EP678* [30, 31]

Propriedades	**EP700**	**EP678**	**Unidades**
Densidade	670	708	kg/m^3
Resistência à rotura	45	52	MPa
Temperatura Máxima de Serviço	129	135	$°C$
Coeficiente de expansão térmica	34	37	$10^{-6}/°C$
Dureza	484	528	HV

Este material possui uma vantagem muito significativa em relação aos restantes analisados: a compatibilidade química. Esta vantagem advém da similaridade entre a composição deste material e a composição do compósito que será laminado sobre o *master*, uma vez que a sua matriz é também composta por uma resina epóxi. Para além desta compatibilidade, a semelhança entre a composição da matriz do compósito e do *master* beneficia a estabilidade dimensional da peça, visto que os coeficientes de expansão térmica apresentam valores próximos, resultando num comportamento idêntico ao aquecimento durante e após o processo de cura.

Por outro lado, os elevados valores de dureza, resultado da presença de cargas de sílica na sua constituição, colocam este material na pior classificação no que toca a maquinabilidade, principalmente pelo elevado nível de desgaste causado nas ferramentas de corte e ainda pela quantidade de pós resultantes deste processo. De qualquer forma, a sua coesão proporciona elevada precisão dimensional, superfícies de corte uniformes e baixa rugosidade superficial. O *master* obtido a partir deste material possui elevada rigidez e uma superfície de moldação de elevada qualidade.

Por todos os motivos apresentados entende-se que o melhor material para a produção do *master*, tendo em conta a exigência e os requisitos do projeto apresentados inicialmente, são os blocos de resina epóxi referidos, de referência *EP700*.

3.3 Maquinagem do *master*

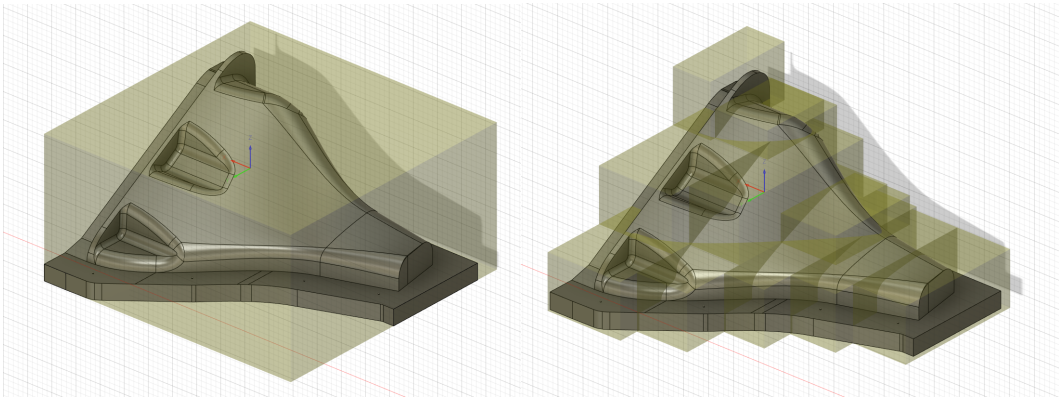
O processo de maquinagem do *master* acontece numa máquina CNC de três eixos, cujas dimensões permitem a produção de todas as peças consideradas no projeto. Por este motivo, a liberdade de design do *master* é apenas sujeita a limitações geométricas contornáveis durante o seu desenvolvimento e que são, pormenorizadamente, evidenciadas no próximo capítulo. Nesta secção são apresentados os procedimentos de otimização do *stock* de maquinagem, os parâmetros, as estratégias e as ferramentas utilizadas neste processo.

3.3.1 Otimização do *stock* de maquinagem

O processo inicia com a definição das dimensões dos blocos epóxi necessários à maquinagem do *master*, que daqui em diante se designará por *stock* de maquinagem ou simplesmente *stock*. Considera-se que o *stock* deve possuir, no mínimo, 4 milímetros de material adicional em relação à superfície de moldação do *master* de modo a que seja possível completar todas as operações de maquinagem e, assim, obter os resultados pretendidos.

A otimização de *stock* consiste em calcular o volume mínimo de material necessário para o processo de maquinagem, como mostra a figura 3.2, e, assim, projetar os diversos blocos poliméricos, atendendo ao sobredimensionamento mínimo definido e à carga de trabalho e tempo que o corte das placas epóxi em blocos de dimensão otimizada exige. Este processo é fundamental nesta fase de produção de modo a reduzir o tempo de maquinagem, o desperdício de material e ainda o desgaste das ferramentas.

O fornecedor do material possui blocos de dimensões *standard* para este tipo de produto (1524 x 610 mm), mas com diferentes valores de espessura. Para a produção dos moldes referidos neste documento utilizaram-se placas com espessuras de 50 e 100 mm, o que permite alguma flexibilidade na definição do *stock* e, deste modo, a melhoria da sua otimização.



(a) *Stock* não otimizado (b) *Stock* otimizado

Figura 3.2: Exemplo de otimização do *stock* de maquinagem

3.3.2 Montagem do *stock* de maquinagem

A otimização do *stock* de maquinagem conduz à necessidade de cortar as placas ferramenta e, em seguida, proceder à montagem do conjunto de blocos de modo a obter a estrutura projetada. Assim, são elaborados dois documentos que permitem a construção da ferramenta a maquinar:

- **Desenho técnico 2D:** contém as cotas de montagem dos blocos bem como a sua identificação, posição e orientação.
- **Lista de blocos:** contém as dimensões dos blocos do *stock* e a correspondente identificação, em par com o desenho 2D.

A colagem dos diversos blocos resulta da utilização de uma resina epóxi líquida, como mostra a figura 3.3, cujas propriedades após cura são extremamente idênticas aquelas que o material polimérico dos blocos do *stock* apresenta. Esta cola epóxi de designação *Base 570A/570B*, para consulta em anexo, é formulada a partir da mistura de dois componentes: uma resina adesiva de baixa densidade e um catalisador, na razão de 5:1, respetivamente. Este produto tem a capacidade de curar à temperatura ambiente durante cerca de 24 horas, no entanto, obtém propriedades suficientes à maquinagem num período de tempo significativamente mais curto. As propriedades máximas são alcançadas através de pós-cura que, no caso, acontece em simultâneo com à cura do molde de fibra de carbono pré-impregnada.



Figura 3.3: Aplicação da mistura de resina epóxi para colagem do *stock*.

A semelhança entre a resina de adesão e os blocos epóxi do *master* evita o surgimento de tensões no seu interior durante a cura do compósito e ainda permite obter uma superfície de rugosidade e dureza semelhantes. De modo a evitar o aparecimento de poros nas zonas de colagem dos blocos, o *stock* é colocado no interior de um saco em vácuo que lhe proporciona máxima compactação e a remoção do excedente de cola e de possíveis bolhas de ar introduzidas na resina durante a mistura dos seus dois componentes. A figura 3.4 mostra este processo.

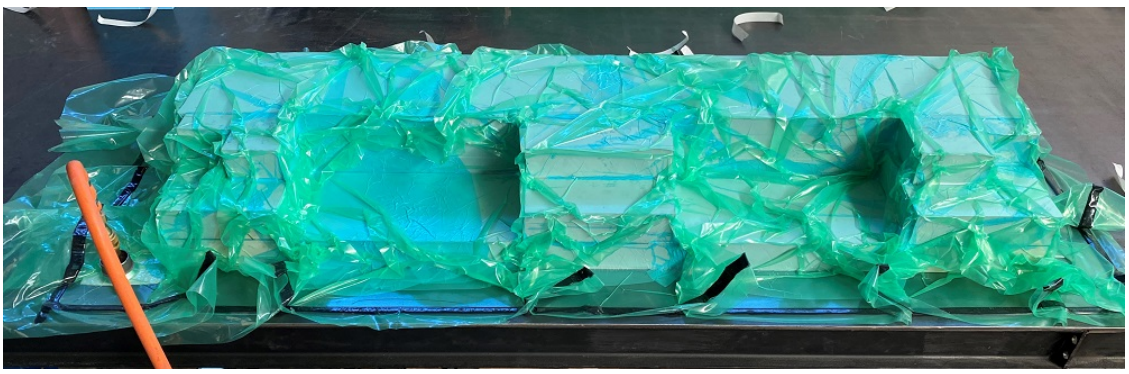


Figura 3.4: Secagem/cura da cola epóxi em vácuo.

3.3.3 Operações e ferramentas

A maquinagem do *master* é realizada através de três operações principais que, geralmente, permitem alcançar os resultados pretendidos, quer a nível de forma quer a nível de acabamento. Estas operações são sequenciais e devem seguir a ordem seguinte:

- **Desbaste:** permite a remoção do material de modo grosseiro deixando 3 milímetros de material em relação à peça para futuro acabamento;

- **1º Acabamento/Uniformização:** permite a uniformização do corte do material através de inúmeras passagens paralelas ao eixo *xx* com um avanço de 6 milímetros. Após esta operação sobra ainda 2 milímetros de material por remover;

- **2º Acabamento:** utiliza uma ferramenta de acabamento de ponta redonda de modo a obter um acabamento fino em zonas planas e não planas. Esta operação utiliza a mesma estratégia do 1º acabamento, no entanto, o avanço é reduzido para 0.5 milímetros. No final desta operação de maquinagem sobram 0.05 milímetros de material sobre a superfície do *master* que será removido manualmente durante as operações pós-maquinagem;

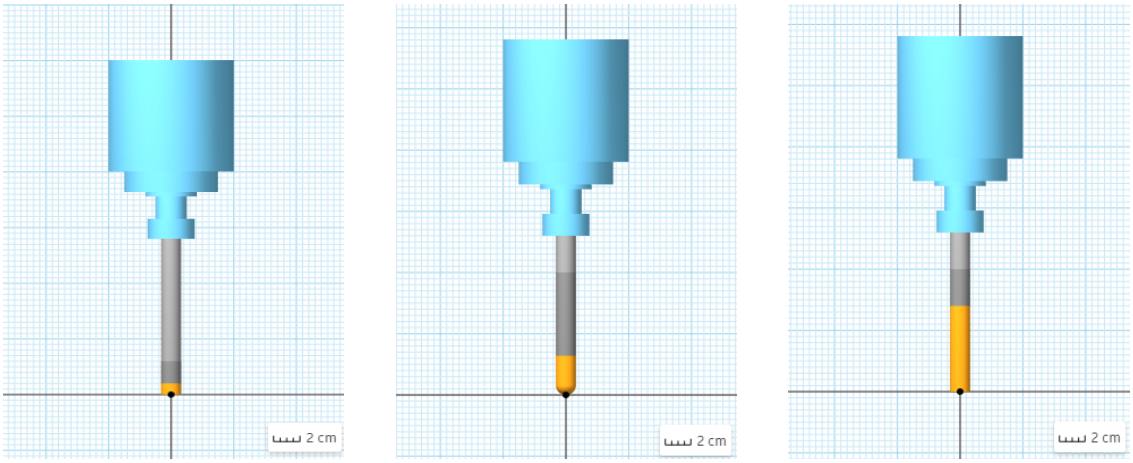
- **Contorno:** a última operação tem como objetivo maquinar o material sobrante nas paredes situadas na periferia da superfície de moldação. Esta operação deve seguir sempre o acabamento da peça. Durante as operações de maquinagem em paralelo a ferramenta realiza sucessivos ataques à peça sobre estas paredes, surgindo por vezes cortes vibrados nas zonas entrada da ferramenta resultantes da vibração da fresa. Aplicando esta estratégia, o vibrado surgirá na zona de material sobrante que será removido nesta operação. Assim, evita-se o aparecimento destes defeitos na superfície de moldação do *master*.

De qualquer modo, para certos casos, surge a necessidade de adaptar esta estratégia às necessidades do *master* e às suas particularidades geométricas como veremos no próximo capítulo.

As operações referidas recorrem a diferentes ferramentas de corte, cada uma com caraterísticas específicas para a correspondente operação exercida. Para as operações de desbaste e 1º acabamento é utilizada uma fresa de topo plano (T24) enquanto que o 2º acabamento requer uma fresa de topo esférico (T5) de modo a obter a mesma qualidade em toda a superfície do *master*, quer seja plana quer não. Para o contorno é montada uma ferramenta de topo plano (T7) de igual diâmetro às demais mas com uma altura de corte significativamente superior. As caraterísticas e parâmetros das ferramentas podem ser consultadas na tabela 3.4, enquanto as suas representação são apresentadas na figura 3.5.

Tabela 3.4: Parâmetros das ferramentas de corte.

	T24	**T5**	**T7**
Diâmetro	16 mm		
Altura total da ferramenta	200 mm	150 mm	150 mm
Altura da ferramenta abaixo do suporte	140 mm	130 mm	130 mm
Altura da lâmina de corte	10 mm	32 mm	70 mm
Penetramento de trabalho	6 mm		
Velocidade de avanço de corte	2000 mm/min		
Velocidade de rotação da fresa	7000 rpm		



(a) Fresa T24 (b) Fresa T5 (c) Fresa T7

Figura 3.5: Ferramentas de maquinagem

A operação de acabamento final, que utiliza a fresa T5 caracterizada na tabela 3.4 e ilustrada na figura 3.5, permite um excelente acabamento superficial e de baixa rugosidade. A partir da equação 3.1 é possível estimar o valor teórico da rugosidade obtida após maquinagem.

$$R_{th} = \frac{D_c}{2} - \sqrt{\frac{D_c^2 - a_e^2}{4}} \tag{3.1}$$

$$a_e = 2 \times \sqrt{R_{th}(D_c - R_{th})} \tag{3.2}$$

Sendo,

D_c = diâmetro da ferramenta, mm

a_e = largura de corte ou penetramento de avanço, mm

R_{th} = rugosidade, mm

Substituindo pelos parâmetros conhecidos temos,

a_e = 0.5 mm; D_c = 16 mm

$$R_{th} = \frac{16}{2} - \sqrt{\frac{16^2 - 0.5^2}{4}} = 0,0039mm = 3,9\mu m \tag{3.3}$$

Apesar do valor teórico de rugosidade obtida ser baixo, é exigida uma operação de acabamento adicional, realizada manualmente, para garantir a melhor qualidade superficial possível. Esta operação de pós-maquinagem termina com a aplicação de selante no *master*, o que permite obter uma superfície com acabamento extremamente fino, dado a capacidade deste produto para preencher as cavidades rugosas micrométricas que a lixagem se vê incapaz de remover.

3.4 Fibra de carbono pré-impregnada para o molde

O compósito utilizado para a produção dos moldes insere-se na categoria dos compósitos termoendurecíveis com reforço em fibra de carbono. A sua facilidade de moldação, a elevada resistência, precisão dimensional, o excelente comportamento térmico e durabilidade justificam a seleção deste material a fim de conferir forma às peças finais, também elas em fibra de carbono de matriz termoendurecível.

Para além das propriedades referidas, o fator chave da escolha deste compósito como ferramenta de moldação está estreitamente ligado ao fenómeno de expansão térmica. As ferramentas de moldação de fibra de carbono pré-impregnada possuem um coeficiente de expansão térmica muito próximo do coeficiente da peça e deste modo, durante o processo de cura, a contração e expansão da ferramenta e da peça serão similares, privilegiando a precisão dimensional.

3.4.1 Propriedades do produto

A fibra de carbono pré-impregnada utilizada, designada *Toray Ambertool®HX56*, é especialmente desenvolvida para a produção de moldes nas indústrias automóvel e *motorsport*. Este material benificia de uma elevada estabilidade dimensional uma vez que, aliado à baixa temperatura de cura, o baixo coeficiente de expansão térmico[3], presente na tabela 3.5 , aparece como fator decisivo da qualidade do compósito neste domínio. De modo a benificiar desta propriedade, não é recomendada a utilização de ferramentas de moldação (*master*) não epoxídicas, dado que podem afetar os mecanismos de cura do compósito, levando a falhas neste processo e ao fraco acabamento superficial do molde [32]. Deste modo, surge uma indicação fundamental que justifica, mais uma vez, a preferência pelas placas epóxi para a produção do *master*.

Para além das propriedades referidas, este pré-impregnado permite um nível de acabamento muito elevado, consegue obter uma temperatura de transição vítrea elevada que permite que o

[3]De realçar que o valor de coeficiente de expansão térmica do compósito depende do seu tipo de construção. O valor apresentado baseia-se no tipo de laminação *quasi-isotropic* 1-8-1 que é utilizado na produção do molde.

molde suporte a cura de compósitos até 180 ºC e ainda tem a capacidade de sofrer pós-cura sem necessidade de suporte do *master*.

A excelente qualidade de acabamento superificial deste compósito deve-se, em parte, à sua capacidade de cura em autoclave a uma pressão constante de 6 bar (600 KPa), que adicionando à pressão exercida pelo vácuo sobre o compósito soma 7 bar (700 KPa) de pressão total durante todo o ciclo de cura.

Tabela 3.5: Propriedades físicas da matriz do compósito utilizado na produção dos moldes.

Densidade	1230 Kg/m^3
Temperatura de transição vítrea	185 ºC
Coeficiente de expansão térmica	3.2 x 10^{-6}/ºC

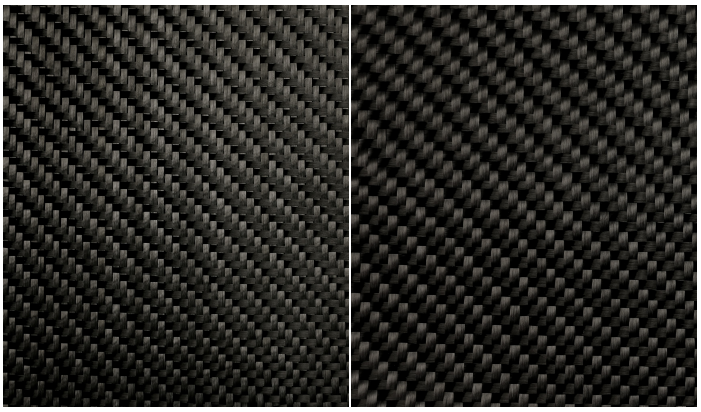
Este material é fornecido em rolos para corte manual ou CNC e cada molde utilizará dois tipos de arranjo deste material, apresentados na tabela 3.6. Ambos possuem um tempo de vida de 60 horas à temperatura média de 18 ºC. Passado este prazo, o nível de pré-cura do *prepreg* impossibilita a sua manipulação e, consequentemente, este perde a capacidade de moldação ao *master*. Para além disso, surgem alterações significativas nos mecanismos de cura do compósito. Por este motivo, o seu armazenamento requer um ambiente seco de -18 ºC por um período que se extende no máximo aos 6 meses.

O carbono de alta resistência 3K, adiante desginado tecido 205, é utilizado para moldar a primeira e última camadas do laminado, dado a sua maior capacidade de moldação à geometria e às reentrâncias do *master*. O carbono de alta resistência 12K, adiante designado 650, confere a estabilidade e resistência necessárias ao molde, dando-lhe estrutura e espessura.

Tabela 3.6: Arranjos de fornecimento da fibra de carbono pré-impregnada Ambertool®HX56

Tipo de fibra	**Gramagem (g/m^2)**	**Configuração da fibra**	**Espessura após compactação (mm)**	**Conteúdo em resina**
Carbono de alta resistência 3K	205	2x2 Twill	0.23	46 (*Ply superficial*)
Carbono de alta resistência 12K	650	2x2 Twill	0.62	35 (*Bulk ply*)

A identificação 3K e 12K que surge no tipo de fibra refere-se à quantidade de fibras de carbono presentes numa malha de fibra cujo interlaçamento forma o seu tecido. No caso 3k existem 3000 fibras por malha, enquanto que no caso 12k exitem 12000 fibras por malha, o que a torna quatro vezes mais larga. Estas caraterísticas podem ser identificadas visualmente na figura 3.6.



(a) Tecido de fibra 3K (b) Tecido de fibra 12K

Figura 3.6: Comparação visual entre os tecidos de fibra de carbono 3K e 12K. Imagens à mesma escala [33].

3.4.2 Planificação e corte das fibras

Após conclusão desenho do *master*, para além da projeção do *stock* de maquinagem e da elaboração do programa de maquinagem, é necessário definir a planificação das laminas de fibra de carbono que serão laminadas sobre o mesmo. Para isto, é utilizado o desenho 3D do *master*, no qual é definida e marcada a área de superfície a laminar para cada *ply*. Após esta seleção, a ferramenta *flatten surface* é capaz de gerar a projeção das várias superfícies selecionadas num plano bi-dimensional, obtendo assim a planificação.

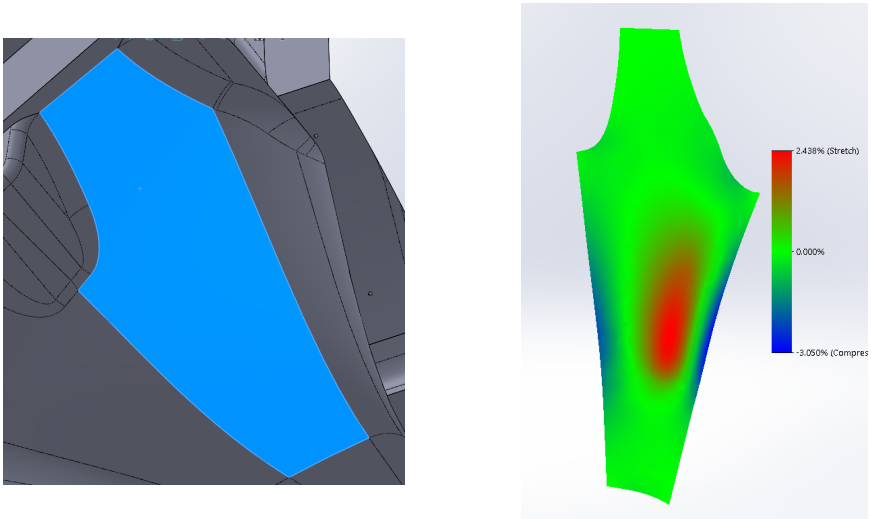


Figura 3.7: Planificação e avaliação de deformação de uma superfície de um *master*.

Todas as superfícies planificadas devem ser estudadas em termos de deformação da sua malha, isto é, avaliar qual será a deformação da lamina aquando da sua moldação à forma da superfície

que lhe foi definida. Desta avaliação considera-se que a taxa máxima de deformação deverá situar-se abaixo dos 5%, uma vez que acima deste valor exite risco de ocorrer estiramento do tecido do reforço, o que leva ao aparecimento de zonas com descontinuidade de fibra, cuja figura 3.8 retrata.

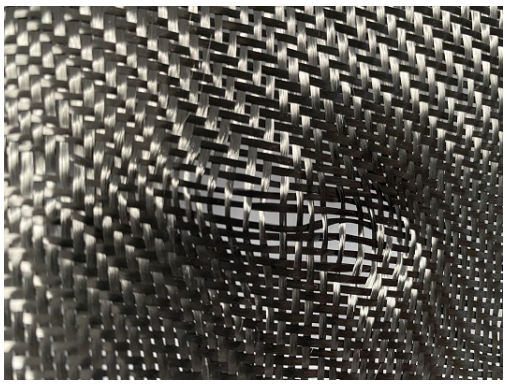


Figura 3.8: Exemplo de estiramento do tecido *twill* de fibra de carbono.

As planificações devem estar alinhadas segundo a mesma linha de referência do *master* de modo a que não surjam diferenças na orientação da fibra entre planificações, ao longo de uma camada de laminado. Após o alinhamento, é realizado o *nesting* das planificações de modo a aumentar o rendimento do rolo de compósito, e assim obter maior quantidade de cortes por rolo, reduzindo o desperdício de material e os custos do projeto. O corte das *plies* segundo o *nesting* definido é conseguido num máquina CNC de lâmina de corte, com dois eixos de movimentação, como mostra a figura 3.9.



Figura 3.9: Corte de planificações em máquina de corte CNC de 2 eixos.

Tal como referido na secção 3.4.1, a baixa temperatura de cura deste compósito requer que o seu armazenamento seja mantido à temperatura de -18 ºC. Por este motivo, o material deve ser retirado do congelador entre 4 a 6 horas antes do corte de modo a reduzir a rigidez e a dureza da resina resultantes da contração ao frio. O descongelamento deve ser realizado de forma controlada, dentro de um saco selado, para prevenir a condensação da humidade atmosférica sobre

a superfície do compósito pré-impregnado. Após o corte, as laminas de compósito obtidas devem ser organizadas e colocadas num saco selado para que estejam protegidas da condensação à entrada e à saída da congelação.

Para além do corte das planificações, nesta etapa do processo é estimada a quantidade de *trims* que a forma geométrica do *master* requer. Estes *trims* são cortados em forma retangular com largura de 40 milímetros e comprimento que varia entre os 25, 50 e 100 milímetros. O corte deve ser definido para a orientação da fibra a 45º como forma de promover a sua capacidade de moldação. Isto porque, estas laminas de fibra têm a finalidade de moldar a primeira camada de compósito em qualquer zona da peça que possua curvatura acentuada, conferindo reforço nestes pontos críticos onde a taxa de deformação das laminas será superior à da restante superfície do *master*. A figura 3.10 mostra o resultado da sua utilização e os locais de colocação.

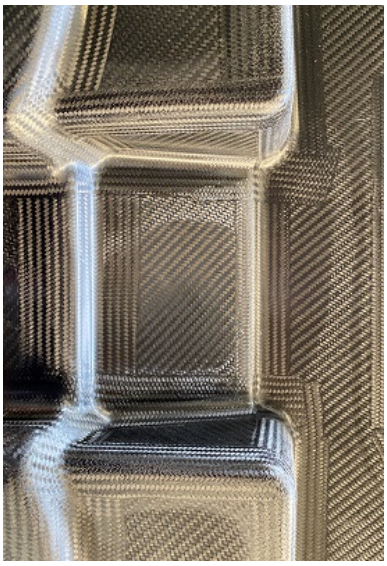


Figura 3.10: Resultado da aplicação de *trims* de reforço nas zonas de curvatura das peças.

3.5 Processo de produção do molde em fibra de carbono

A produção do molde de fibra de carbono segue o processo de moldação em saco de vácuo com cura em autoclave. Este processo, explicado no capítulo 2, utiliza um saco de vácuo em volta do *master* que permite o seu "fecho"e a compactação do laminado antes e durante o processo de cura. Nesta secção são apresentados os procedimentos de produção do molde, que têm início na preparação do *master*.

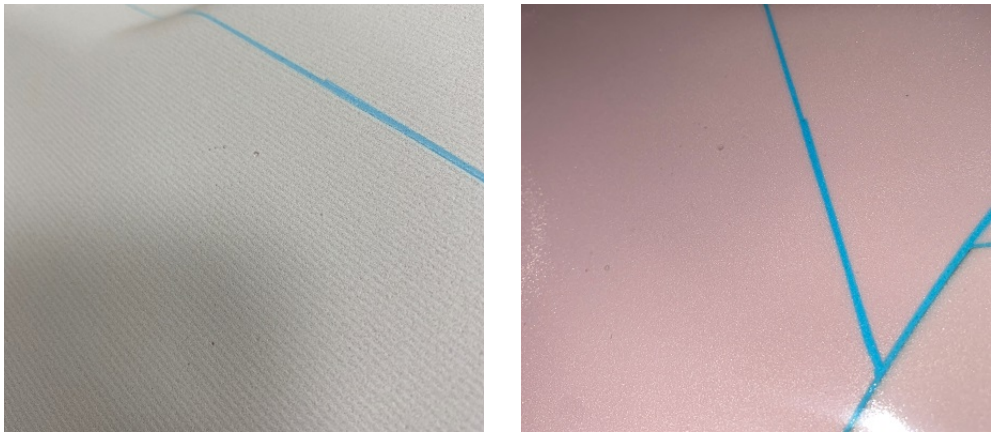
3.5.1 Preparação do *master*

A preparação do *master*, que ocorre após a finalização do processo de maquinagem, tem como objetivo afinar a qualidade superficial desta ferramenta, sujeitando-a a operações de acabamento e de pré-laminação. Os resultados pretendidos após estas operações são apresentados na figura 3.11.

Este procedimento segue uma sequência de operações manuais comuns a qualquer peça produzida nas condições descritas, das quais se destacam:

- **1º Operação:** remoção das marcas da ferramenta de maquinagem através de lixagem manual com lixa de granulação 320;
- **2º Operação:** pulverização de selante com pistola pressurizada para garantir a uniformização da camada;
- **3º Operação:** uniformização da superfície através de lixagem manual com lixa de água de granulação 1200;
- **4º Operação:** aplicação manual de duas camadas de selante com intervalo de secagem entre elas;
- **5º Operação:** polimento da superfície do *master* com massa de polir de corte após secagem do selante;
- **6º Operação:** remoção da massa de polir e aplicação de 3 a 4 camadas de desmoldante.

O material dos blocos poliméricos que compõem o *master* possui microporosidades que o tornam ligeiramente permeável. Por este motivo, é indispensável a aplicação de selante sobre a sua superfície de modo a garantir a impermeabilização. A impermeabilização, por sua vez, garante que o *master* não será afetado pela humidade do meio de armazenamento e que não absorverá a resina do compósito durante o processo de moldação.



(a) Qualidade superficial após maquinagem (b) Qualidade superficial após acabamento

Figura 3.11: Comparação visual dos efeitos do pós-processamento do *master* maquinado.

O agento de desmoldagem ou desmoldante é responsável por criar uma barreira entre o molde e a peça prevenindo a adesão entre ambos. Este mecanismo facilita a remoção da peça, previne o surgimento de defeitos durante a desmoldagem e evita danos no *master*. Os agentes de desmoldagem para este tipo de moldação podem ser ceras ou produtos químicos poliméricos à base

de solvente, nafta ou água. Apesar dos benefícios dos desmoldantes à base de solvente e nafta como a maior durabilidade, maior taxa de evaporação e menor danificação do *master*, a produção e emissão de compostos orgânicos voláteis desmotiva a sua utilização. Assim, para o presente caso, é utilizado um agente desmoldante à base de água que para além de não acarretar riscos para a saúde possui vantagens no que toca à facilidade de limpeza.

A aplicação de desmoldante na superfície polida do *master* pode parecer um processo pouco complexo, porém, a importância deste passo para o sucesso da produção da molde e para a durabilidade da ferramenta de moldação, implica que esta seja executada com o máximo nível de detalhe, garantindo a cobertura total e uniforme da superfície de moldação. A necessidade de repetir este procedimento após desmoldagem depende do tipo de desmoldante utilizado, contudo recomenda-se que seja aplicada pelo menos uma camada.

3.5.2 Mecanismos de laminação

A laminação deste compósito segue especificações exigentes para que o molde obtenha as propriedades estruturais esperadas e elevada qualidade superficial. Esta laminação segue a configuração 1-8-1, isto é, a primeira e última camada são laminadas com o tecido *twill* 205 e as oito camadas intermédias com o tecido *twill* 650. Ao longo da colocação das várias camadas são requeridas diversas pré-compactações para facilitar a moldação do pré-impregnado, garantir o preenchimento das formas mais complexas do *master* e promover a adesão das laminas. Finalmente, seguindo esta configuração e as instruções referentes às diversas compactações é esperado um molde de elevada qualidade com uma espessura de 5.9 milímetros.

A partir da tabela 3.7, que contém a sequência de procedimentos para a laminação do compósito, visualiza-se o caráter simétrico desta configuração, em vista de se obter um molde com boas propriedades isotrópicas.

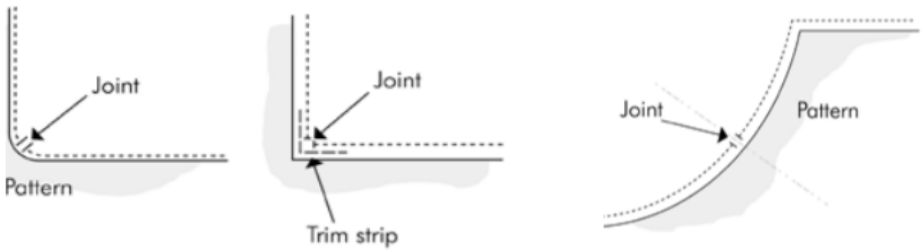
Para além da importância da sequência de laminação projetada, existem diferentes pormenores que devem ser tidos em conta e seguidos durante este processo. A camada zero a laminar sobre o *master* tem como objetivo preencher todas as reentrânicas e curvaturas de forma e, para isso, utilizam-se pequenas laminas com 40 milímetros de largura cortadas a +/- 45º. Esta orientação de corte é fundamental para os *trims*, uma vez que lhes confere o máximo de maleabilidade de modo adaptarem-se facilmente e sem estiramento a estas zonas complexas do *master*. Não obstante, esta camada "zero"funciona como reforço uma vez que estas zonas contêm, em muitos casos, os pontos críticos do molde.

Seguida da laminação dos *trims*, a primeira camada requer procedimentos cuidados, uma vez que será reponsável por definir a qualidade superficial do molde, o que afetará diretamente a peça final. Assim, nesta camada não podem haver sobreposições de laminas, a orientação da fibra a 0º deve estar consistente ao longo de toda a superfície, as laminas devem ser cortadas nas reentrâncias do *master*[4] como indica a figura 3.12a e em curvas de raio elevado as laminas devem se encontrar no ponto médio do perímetro da curvatura como indica a figura 3.12b.

[4]Esta regra é tida em conta na etapa de planificação da superfície do *master* e corte das laminas, onde superfícies que forma ângulos vivos são planificadas separadamente.

Tabela 3.7: Sequência de laminação das fibras para a configuração simétrica 1-8-1 com 5.9 milímetros de espessura.

Procedimentos	**Nº da camada**	**Orientação da fibra**
Trims	-	+/- 45º
Laminado 205	1	0º
Compactação		
Laminado 650	2	0º
Laminado 650	3	+45º
Laminado 650	4	-45º
Compactação		
Laminado 650	5	90º
Laminado 650	6	90º
Laminado 650	7	-45º
Compactação		
Laminado 650	8	+45º
Laminado 650	9	0º
Laminado 205	10	0º
Compactação Final		



(a) (b)

Figura 3.12: Principais cuidados na laminação do compósito [32].

Por último, nos cantos vivos exteriores o laminado pode ser prolongado no máximo até 5 milímetros da aresta, vísivel na figura 3.13, e deve ser evitada a utilização ferramentas de laminação afiadas, uma vez que estas podem provocar danos macroscopicamente invisíveis nas fibras mas que levam ao enfraquecimento estrutural do laminado.

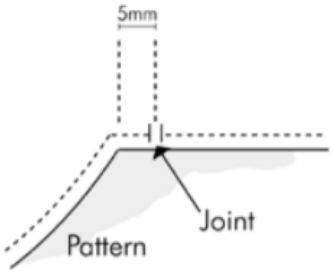


Figura 3.13: Cuidados de laminação em cantos vivos exteriores [32].

Os cuidados referidos anteriormente devem extrapolar, se possível, para a laminação das camadas intermédias. Para estas camadas torna-se importantes evitar, sempre que possível, sobreposições das laminas, garantir em cada camada a laminação total da superfície para que não existam falhas intermédias de material. Estas falhas são propensas à formação de poros e contribuem para o enfraquecimento estrutural do compósito. Por último, o padrão da fibra deve ser consistente com o que está projetado para cada camada e em simultâneo, ao longo da camada.

3.5.3 Compactação

Durante a laminação do compósito é fundamental realizar uma série da compactações entre camadas. Estas compactações devem ser aplicadas, no mínimo, após a primeira camada, após três camadas subsequentes e após a última camada. Este conjunto irá garantir a consolidação das laminas de compósito e a remoção do ar da sua interface. Adicionalmente, para formas mais complexas as compactações devem ser mais frequentes de modo a facilitar a laminação e a assegurar o preenchimento de todos os detalhes do *master*. Contudo, durante a colocação de uma camada de laminado devem ser utilizadas ferramentas adequadas, como mostra a figura 3.14, para auxiliar a moldação de cada camada às formas mais complexas, permitindo aumentar a eficácia da compactação que se segue.



Figura 3.14: Ferramentas de laminação.

As sucessivas compactações requerem a preparação de um saco de vácuo. Este saco é preparado antes de se dar início à laminação do *master*, a fim de poupar o tempo de vida do compósito. Em simultâneo, são organizados os restantes elementos acessórios desta operação como o *release film* e o tecido *breather*. Por último, é colocado o adesivo selante sobre a mesa em volta do *master*. Nesta fase é importante verificar se o saco possui dimensão suficiente para cobrir toda a superficie do *master* e, assim, garantir que não surgirão zonas de tensão no saco, especialmente nas arestas interiores da superfície de moldação. Para evitar estas zonas tencionadas são colocadas "orelhas"ou "pinças de moldação"no alinhamento das zonas mais altas do *master*, como mostra a figura 3.15.



Figura 3.15: Pinças de moldação no saco de vácuo.

Aquando das compactações entre camadas, a superfície laminada deve ser totalmente revestida com *release film* para que não surjam complicações na remoção do *breather* e do saco de vácuo após compactação. O *release film* deve ser perfurado para aumentar a eficácia da remoção de ar entre as camadas do compósito. O *breather* é colocado com a função de uniformizar a pressão de vácuo pelo *master* e de manter abertos canais entres as suas fibras para que o ar possa ser totalmente removido do interior do saco. Por último, é colocado o saco de vácuo de baixa temperatura [5] cujo selante será responsável pelo seu fecho e por garantir o vácuo no seu interior. A ação do vácuo deverá compactar o laminado durante um período de 30 minutos, após o qual é removido e é procedida a laminação das restantes camadas de fibra de carbono. A figura 3.16 ilustra o processo tratado e os materiais utilizados para o efeito.

A compactação final, apresentada na figura 3.17b, requer uma preparação mais exigente dado que terá de resistir ao ciclo de cura do compósito e à pressão exterior aplicada sobre ele. Por este motivo, finalizada a laminação do pré-impregnado, é colocado um saco de compactação e um adesivo selante formulados para altas temperaturas. Nesta etapa são colocadas duas camadas de adesivo selante em paralelo para garantir a correta vedação do saco e, assim, permitir obter vácuo

[5] Na fase de pré-compactação utiliza-se um saco de vácuo e adesivo selante de baixa temperatura para reduzir os custos do processo, uma vez que o *master* não será exposto a temperatura.

constante durante toda a cura do compósito. Por último, utiliza-se um dispositivo detetor de fugas, exibido na figura 3.18, para procurar fugas de vácuo no adesivo em volta do saco. Adicionalmente, realiza-se um *drop test* durante 30 minutos para verificar se existe queda de pressão de vácuo. Para este procedimento é utilizado o manómetro de pressão de vácuo da figura 3.17a.

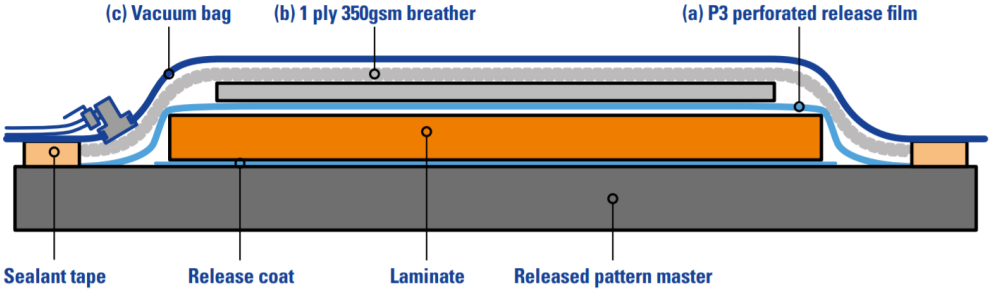


Figura 3.16: Representação do processo de compactação entre camadas [32].



(a) Manómetro de pressão de vácuo



(b) Saco de compactação final

Figura 3.17: Etapa final do processo de laminação. Pré-cura do compósito.



Figura 3.18: Dispositivo para pesquisa de fugas de vácuo.

3.5.4 Cura

A cura deste compósito requer uma temperatura mínima definida entre os 40 a 55 ºC e prolonga-se por um período médio de 6 a 18 horas, como indica a tabela 3.8. Devido à natureza reativa dos sistemas de resina, é essencial que a cura seja sujeita a um controlo muito apertado para evitar desvios no ciclo de tratamento e, assim, prevenir possíveis reações exotérmicas do compósito. Este controlo é conseguido pela aplicação de termopares sobre a moldação.

Tabela 3.8: Tempo de ciclo médio para diferentes temperaturas de cura.

Temperatura [ºC]	**Tempo de estágio [Horas]**
40	18
45	12.5
50	8.5
55	6

Os moldes produzidos seguem o ciclo de cura a 55 ºC em autoclave de modo a garantir o aumento da produtividade do processo, assegurando, porém, que o *master* e a moldação em vácuo possuem resistência suficiente para aguentar as cargas térmicas e a pressão exercida durante este tratamento. O ciclo de cura possui um perfil em rampa com uma taxa de aquecimento de 0.5 ºC/min, um estágio de 6 horas a 55 ºC e arrefecimento a uma taxa de 2 ºC/min até atingir a temperatura de 20 ºC. Este procedimento corresponde a um tempo de cura total na ordem as 7 horas e 30 minutos, como é dado pelo gráfico da figura 3.19. Na figura B.1 do anexo B, encontra-se a representação gráfica dos ciclos para as restantes temperaturas indicadas na tabela 3.8.

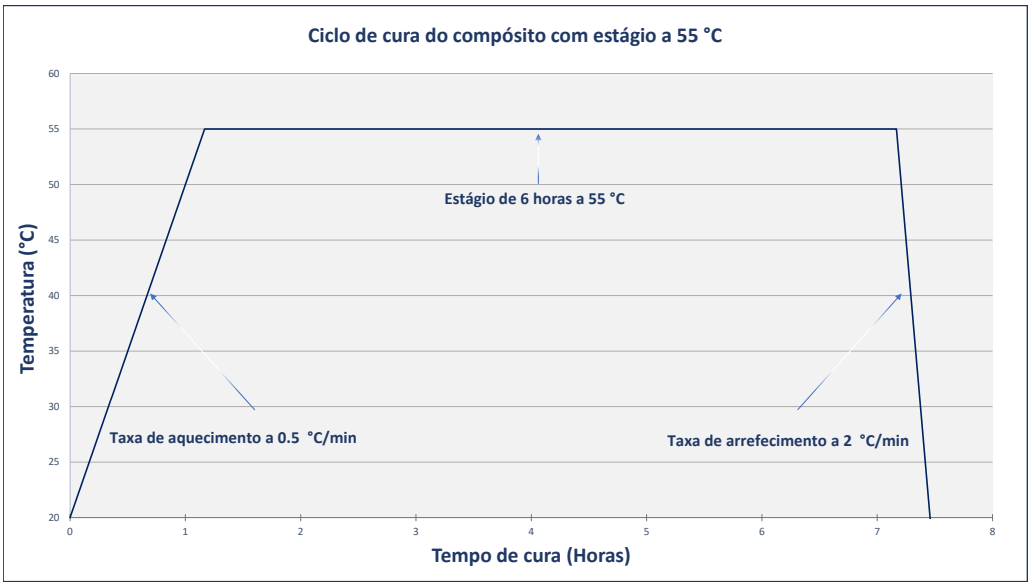


Figura 3.19: Ciclo de cura do compósito a 55 ºC em autoclave. Adaptado de [34].

Durante o processo de cura inicial, para além da ação do vácuo, a moldação é submetida a pressão exterior em autoclave, o qual também é responsável por controlar o ciclo de cura, respeitando as linhas de aquecimento, estágio e arrefecimento presentes na figura 3.19. Deste modo, a moldação é mantida a 6 bar de pressão exterior o que aumenta o nível de compactação do laminado, refletindo-se quer a nível estrutural quer a nível de acabamento superficial.

A desmoldagem da peça deve anteceder a pós-cura a fim de se verificar a qualidade da peça obtida e aliviar a tensão residual peça-*master*. Assim, uma vez identificados na peça obtida defeitos irreparáveis é possível evitar os desperdícios energéticos e económicos que surgiriam do tratamento de pós-cura. Para além disso, quando a produção de determinada peça requer vários moldes, como é o caso das peças tratadas no capítulo 4, a pós-cura deve ser realizada apenas após a montagem e alinhamento do conjunto de moldes para prevenir deformações nas abas de fixação.

O ciclo de pós-cura é essencial para que o compósito desenvolva um aumento da temperatura de trasição vítrea, a fim de resistir à posterior cura da peça que irá moldar. Para isto, é recomendado sujeitar o molde ao ciclo de pós-cura A, apresentado na figura B.2 do anexo B, caraterizado pelos diversos estágios de uniformização de temperatura. Estes estágios permitem que a temperatura de transição vítrea do compósito estabilize a um valor superior à temperatura do forno ao longo do ciclo, prevenindo o amaciamento da matriz [34]. Este tratamento térmico não requer a ação de vácuo nem de pressão exterior sobre a peça, pelo que é realizado num forno ventilado para que as correntes de ar no seu interior promovam a uniformização da temperatura do molde.

3.5.5 Desmoldagem e operações de acabamento

A desmoldagem do molde de fibra de carbono do *master* é auxiliada pela utilização de cunhas de desmoldagem. Estas cunhas são introduzidas gradualmente na interface *master*/molde de modo a levantar cuidadosamente a fibra de carbono até que esta "descole"totalmente da superfície do *master*.

Após desmoldagem seguem-se as operações de acabamento. No caso em que o molde pertence a um conjunto, é necessário proceder ao alinhamento e fixação desse conjunto para avaliar a qualidade da junção das várias partes. A utilização de grampos permite fixar o conjunto dos moldes no alinhamento correto enquanto a suas abas são furadas para que sejam introduzidos os elementos de aperto: parafuso, porca e anilha. Após esta operação as várias partes são novamente separadas e tratadas individualmente de acordo com os seguintes passos:

1. Lixagem da superfície de moldação com lixa de água fina;

2. Aplicação manual de quatro camadas de selante, com intervalo de secagem de 30 minutos entre elas;

3. Aplicação de três camadas de desmoldante, com intervalo de secagem de 30 minutos entre elas.



Figura 3.20: Cunhas de desmoldagem.

Capítulo 4

Projeto e Produção dos Moldes para a Monoque e *Crash Box* Traseira

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos através da aplicação dos procedimentos desenvolvidos no capítulo 3 para diferentes elementos estruturais do automóvel. Assim, será possível perceber todas as etapas de produção de um molde em fibra de carbono pré-impregnada, produzido a partir do processo de moldação em saco de vácuo e com cura em autoclave.

4.1 Molde topo traseiro e lateral da monocoque

O molde tratado nesta secção tem como objetivo dar forma à parte de topo traseira e lateral da monocoque do automóvel, cuja superfície de peça se encontra representada na figura 4.1. Estes moldes complementam um agregado de ferramentas similares que no seu conjunto permitem o fabrico da monocoque do automóvel em fibra de carbono. Os restantes moldes desta peça estrutural não são tratados neste trabalho, porém, é referida a sua influência no projeto de desenho dos moldes. Para o caso em análise, devido a implicações dimensionais e de otimização do projeto esta superfície de moldação será divida, pelo que serão construídos três moldes. O primeiro desenvolvido para obter a superfície traseira e outros dois para obter as laterais.

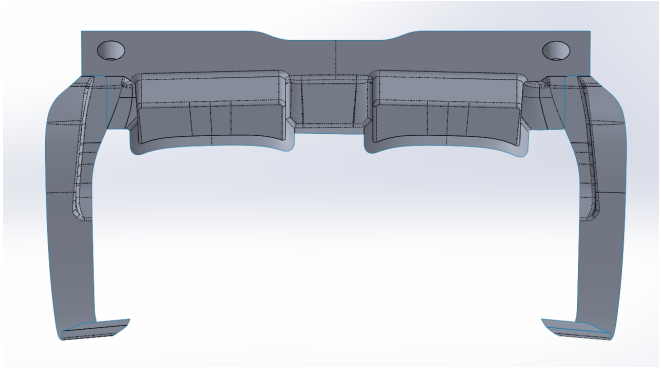


Figura 4.1: Vista frontal superior da superfície da peça.

Esta divisão obriga a desenvolver elementos de fronteira. Estes elementos garantem o alinhamento e o encaixe dos moldes após fabrico. Para além da fronteira, importa conhecer a forma dos elementos de alinhamento e encaixe dos moldes previamente obtidos e que se encontram em volta do perímetro deste conjunto.

4.1.1 Partição da peça

A partição da peça é crucial para definir superfícies de moldação cuja produção seja possível, tendo em conta as ferramentas existentes para o efeito e atendendo às limitações do projeto. Assim, é necessário ter em consideração as dimensões de peça, a sua forma e geometria. Deste modo, no presente caso, a peça foi seccionada pelas zonas laterais, o que levanta a necessidade de produzir três *masters* e daí, três moldes de fibra de carbono. Como é possível verificar pela figura 4.1, a peça em estudo possui uma geometria complexa, isto é, estende-se por duas direções do plano, o que dificulta a otimização do processo de maquinagem, de laminação e até mesmo a sua introdução em autoclave. Por estas razões, a superfície da peça foi dividida de acordo com as figuras 4.2 e 4.3.

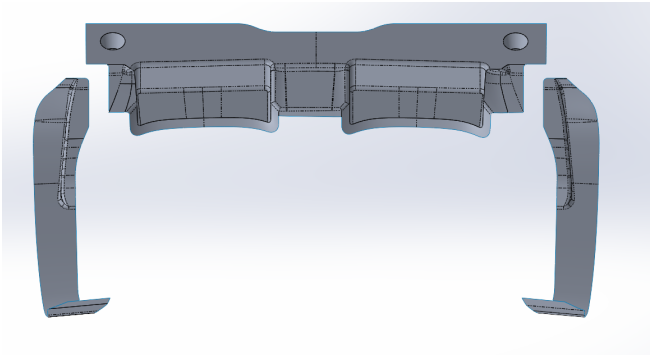


Figura 4.2: Perspetiva frontal superior da partição da superfície da peça.

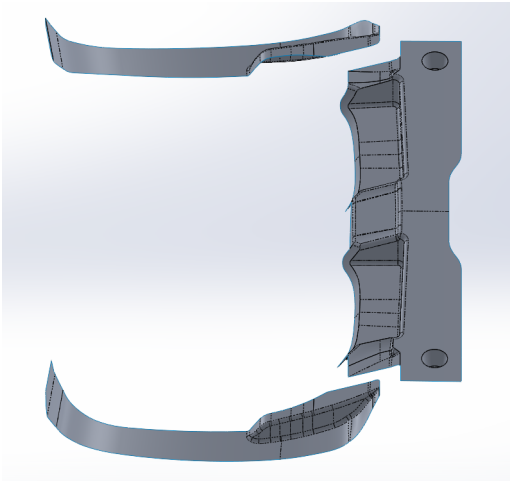


Figura 4.3: Perspetiva lateral superior da partição da superfície da peça.

4.1.2 Caraterísticas da fronteira

A análise da fronteira da peça é uma das etapas primárias e fundamentais para o correto *design* do *master* e, por sua vez, do molde. Esta particularidade do projeto é consequente da divisão da superfície da peça em várias partes, sendo cada uma moldada por uma ferramenta diferente, mas agregada num conjunto. A divisão gera condições de fronteira entre os moldes que devem ser meticulosamente projetadas para que não surjam problemas de alinhamento ou defeitos dimensionais na peça produzida. Assim, o desenho do *master* deve conter elementos responsáveis por moldar estas superfícies. Estes elementos sólidos designam-se por abas do *master* ou abas de moldação e a superfície que produzem no molde designa-se por aba do molde.

Para além de se definirem nesta etapa as caraterísticas da superfície de contacto entre os moldes, é importante projetar os pontos de ligação entre eles. Assim, as abas do *master* devem conter pequenos detalhes em forma de pico que marcam as zonas de furação dos moldes após a sua produção, que se designam por pontos. Nestas zonas são realizadas furações após cura do molde para introduzir os elementos de ligação entre os mesmos. As zonas de furação e as superfícies de fronteira dos moldes podem ser visualizados nas figuras 4.4 e 4.5.

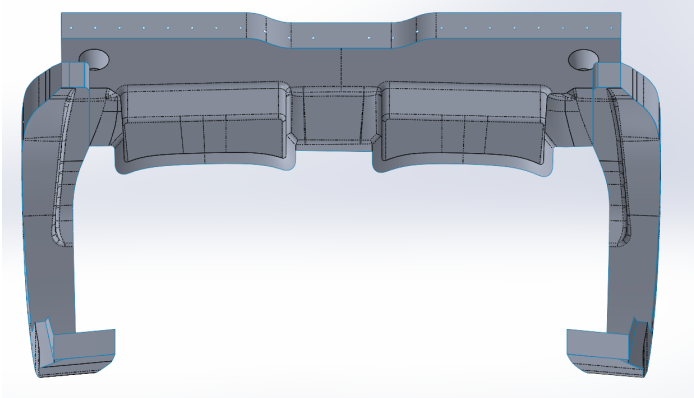


Figura 4.4: Perspetiva frontal superior das superfícies de fronteira dos moldes.

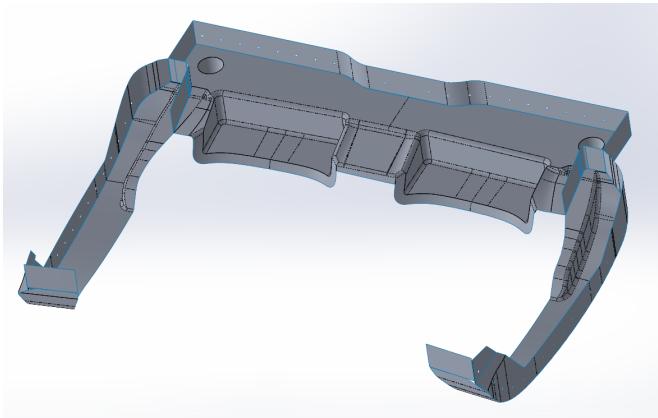


Figura 4.5: Perspetiva lateral superior das superfícies de fronteira dos moldes.

4.1.3 Estudo da geometria

O estudo da geometria da peça tem como finalidade analisar as suas superfícies, cuja geometria é igual à geometria da superfície de moldação do *master*, de modo a verificar que estas podem ser obtidas por maquinagem segundo os planos de partição definidos e que não existe qualquer entrave à desmoldagem do molde.

Assim sendo, esta análise investiga a existência de contra-saídas e de saídas a zero, ou seja, permite avaliar o ângulo das superfícies da peça em relação à normal do plano de maquinagem que representa, simultaneamente, a direção de desmoldagem. A existência de contra-saídas torna inviável a produção do *master* uma vez que estas superfícies se encontram em ângulo negativo em relação ao plano de maquinagem, pelo que não é possível obtê-las numa máquina CNC de 3 eixos. Para além disso, estas tornar-se-iam um obstáculo à desmoldagem da peça ao ponto de tornar impossível esta operação. Por estes motivos, caso resulte da análise a presença de uma contra-saída, a estratégia de maquinagem e a direção de desmoldagem devem ser reformuladas. Contudo, para a maioria dos casos é necessário definir diferentes planos de partição ou adicionar divisões aos planos existentes.

A segunda análise investiga a existência de saídas a zero que apesar de constituírem um fator de menor risco para o sucesso da produção do molde devem ser evitadas sempre que possível. As saídas a zero existem na presença de superfícies verticais cuja normal possua ângulo reto em relação à normal do plano de maquinagem e desmoldagem. Durante o processo de maquinagem destas superfícies existe o risco da fresa tocar em todo o comprimento da superfície à medida que a maquina, o que gera um enorme esforço no *spindle*, o desgaste prematuro da ferramenta e vibrações que podem afetar irreversivelmente a qualidade superficial do *master* e, consequentemente, do molde. De outro modo, estas superfícies dificultam a desmoldagem da peça do *master*, principalmente quando apresentam uma área considerável. Isto acontece porque sobre estas superfícies, a peça terá de ser removida por deslizamento sobre a superfície de moldação, o que exige maior esforço, podendo provocar danos no *master* e no molde produzido. Desta forma, considera-se que qualquer superfície deve ter um ângulo de saída de, pelo menos, 3º para garantir a desmoldagem da peça e evitar defeitos de maquinagem.

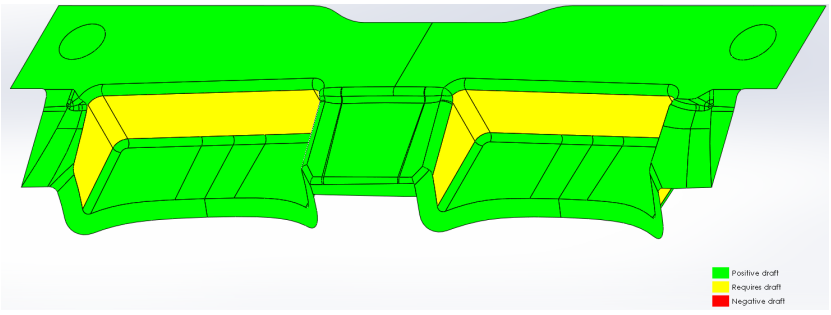


Figura 4.6: Análise dos ângulos de saída do molde topo traseira.

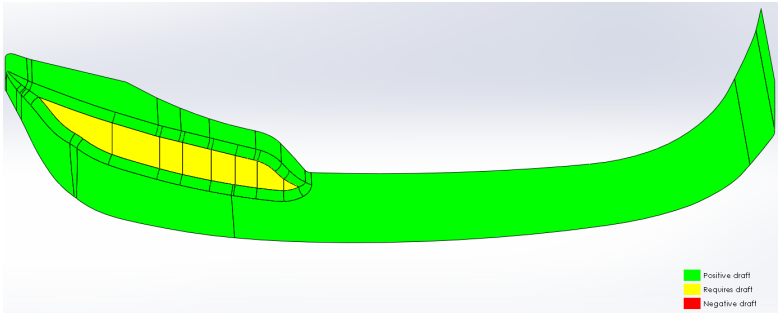
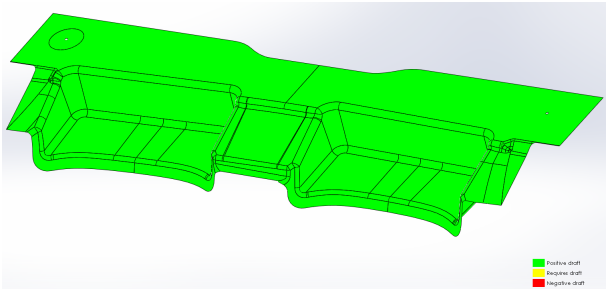


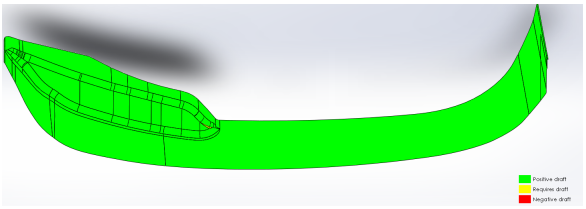
Figura 4.7: Análise dos ângulos de saída do molde topo lateral.

A figura 4.6 possui a análise do ângulos das superfícies da peça cujo molde se designará, a partir de agora, por molde topo traseira ou MTT. Esta análise está configurada para que as superfícies com um ângulo inferior a 3º em relação à normal do plano de maquinagem sejam apresentadas com a cor amarela, as superfícies com ângulo inferior a 0º com a cor vermelha e as superfícies com ângulo de saída igual ou superior a 3º com a cor verde. A figura 4.7 apresenta o mesmo método para o molde designado por molde topo lateral ou MTL[1]. A partir desta análise, verifica-se que ambas os moldes apresentam superfícies com ângulo de saída a 0º de dimensão significativa que podem ser alteradas de modo a conferir-lhes um ângulo de saída a 3º e, assim, garantir a qualidade superficial da peça e evitar defeitos de desmoldagem consequentes das dificuldades criadas.

Após alteração do ângulo destas superfícies, cujo resultado é apresentado na figura 4.8, foi possível obter uma superfície de moldação com um ângulo de saída mínimo de 3º.



(a) MTT



(b) MTL

Figura 4.8: Resultados da alteração das superfícies com ângulo de saída a zero graus.

[1] Ao longo deste capítulo será apenas tratado o MTL do lado direito da monocoque, visto que os moldes laterais são iguais mas simétricos.

Em segundo lugar, é fundamental avaliar a capacidade de maquinagem do *master* a partir das ferramentas disponíveis. Isto é, analisar se todas as superfícies da peça possuem acesso suficiente para que sejam maquinadas pelo plano designado e que a sua altura não excede o comprimento das ferramentas que, no caso, é de 130 milímetros, tal como referido no capítulo 3. Para os casos em análise, a superfície de moldação respeita estas condições pelo que não requer qualquer alteração.

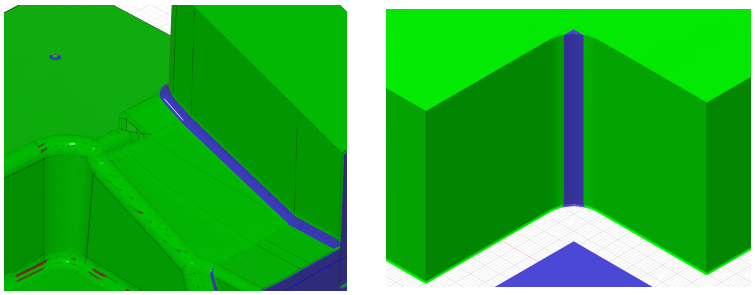
4.1.4 Transformação em sólido

A fase de transformação da superfície de moldação num elemento sólido precede a análise e estudo da superfície de peça, uma vez que desta análise resultam conclusões que influenciam o *design* do *master*. No presente caso, as caraterísticas estudadas que influenciam o desenho são a vizinhança dos moldes e as superfícies com ângulo de saída a zero. As caraterísiticas da vizinhança implicam a construção de abas de moldação, enquanto que as saídas a zero carecem de modificação de modo a que passem a ter um ângulo de saída de 3º, minimizando consequentes alterações geométricas nas restante superfície.

Após a modificação das superfícies verticais, evidenciada na figura 4.8, segue-se a construção do *master*. Esta inicia pelo desenho dos suportes das abas de moldação e pelas superfícies de prolongamento do molde. Quando um molde requer uma aba vertical surge a necessidade desenhar o elemento sólido responsável pela sua moldação em separado, para que este seja desacoplável do corpo do *master*, devido a dois principais motivos:

1. A maquinagem da geometria do *master* em três eixos não tem capacidade para obter superfícies não planas junto a paredes verticais, uma vez que a ferramenta trabalha em *offset*, correspondente ao raio de fresa. Deste modo, não é possível maquinar o material polimérico junto à parede da aba, como mostra a figura 4.9a. Quando a superfície a maquinar é plana, é possível obter a sua geometria final mas existe o risco de surgir um padrão vibrado na parede vertical da abas. O mesmo acontece na maquinagem de arestas entre duas faces, onde se torna impossível obter um ângulo vivo, verificando-se um volume de material sobrante que será tanto maior quanto maior for o raio da fresa, como mostra a figura 4.9b;

2. As abas do *master* possuem pequenos detalhes com forma cónica, os pontos da aba, que permitem moldar indentações nas abas do molde. Estes têm como objetivo centrar os pontos de furação onde são introduzidos os elementos de ligação entre os moldes. Estes pontos funcionam como contra-saída, pelo que as abas do *master* têm de ser previamente removidas perpendicularmente à direção de desmoldagem para permitir a saída da peça.



(a) Resultado da maquinagem da linha de final de peça junto às abas.

(b) Resultado da maquinagem de um aresta vertical entre duas faces.

Figura 4.9: Limitações da maquinagem das arestas do *master*.

4.1.4.1 *Master* do MTT

As figuras 4.10 e 4.11 mostram o desenho do *master* correspondente ao MTT. Nestas imagens observam-se as bases de suporte das abas e o fecho da superfície de topo onde a peça final contará com uma zona de furo. Contudo, para simplificação do projeto, esta zona de furo é substituída por um detalhe de centragem, tal como projetado nas abas, que permite definir no molde a posição do furo e, por sua vez, moldar na monocoque esta mesma posição que será sujeita a pós-operações de acabamento.

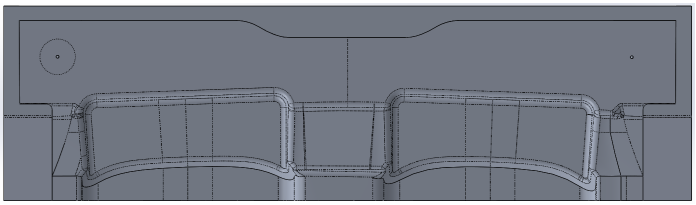


Figura 4.10: Vista de topo do *master* do MTT.

Para além disso, este *master* contém um prolongamento na zona frontal que permitirá obter no molde uma aba por onde se formará a "rebarba"de laminado, permitindo obter após acabamento e corte, a linha de final de peça. As arestas da superfície do *master* foram arredondas para facilitar a sua maquinagem, desmoldagem e melhorar o acabamento do molde.

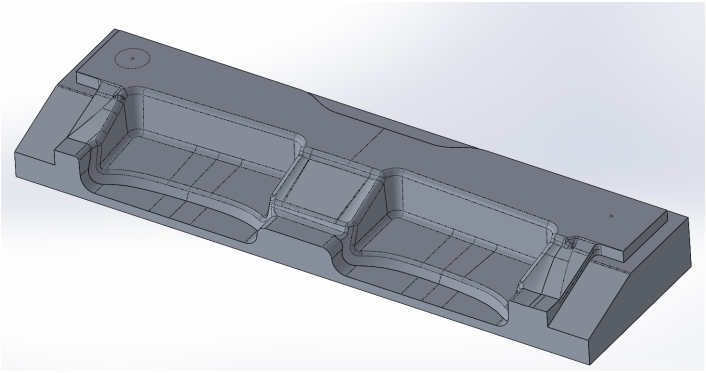


Figura 4.11: Perspetiva lateral superior do *master* do MTT.

A figura 4.12 contém o desenho completo do *master* de moldação do MTT. As abas desenhadas são desacopladas do corpo do *master* pelo que é necessário definir as zonas de aperto. Por este motivo, após maquinagem, são feitos furos passantes nas abas e furos roscados no *master*, entre os quais são introduzidos parafusos M8 que garantem o alinhamento e fixação destes elementos. Tal como referido, as abas do *master*, móveis e maquinadas separadamente, contêm os pontos que permitem definir o centro de furação da aba do molde para fixação e aperto do conjunto. Estes detalhes são visíveis na aba traseira do MTT na figura 4.12.

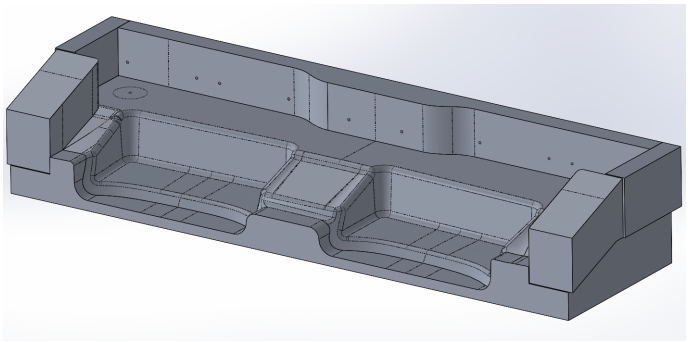


Figura 4.12: Perspetiva lateral superior do *master* do MTT e respetivas abas.

4.1.4.2 *Master* do MTL

O molde de topo lateral, tal como o MTT, possui algumas particularidades que levaram à sua forma final, apresentada nas figuras 4.13 e 4.15. Observando as figuras mencionados evidencia-se que, ao contrário do *design* do MTT onde a base das abas se encontra num plano inferior em relação à superfície de moldação, de modo a permitir o seu encosto no *master*, fixação e alinhamento, neste caso foi necessário desenhar a base de duas abas ao longo do plano da superfície de moldação. A figura 4.14 mostra a razão desta particularidade.

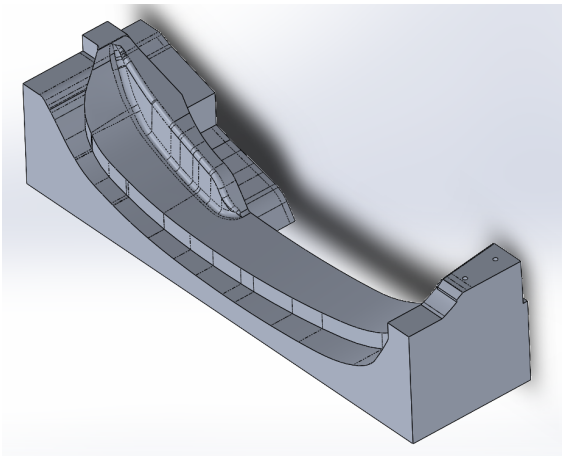


Figura 4.13: Perspetiva lateral superior do *master* do MTL.

O corte do volume do *master* onde se situam as abas frontal e traseira origina uma zona de parede muito fina, com elevado risco de fratura do material polimérico, quer durante a maquinagem

quer durante a laminação. Para além disso, não seria possível fixar a aba frontal, uma vez que a pequena espessura da parede do *master* não permitiria a furação e geração de roscado. Por estes motivos, a base das abas nestas zonas foi prolongada ao longo da linha periférica da superfície de moldação e o desenho das abas adaptado a este *design*.

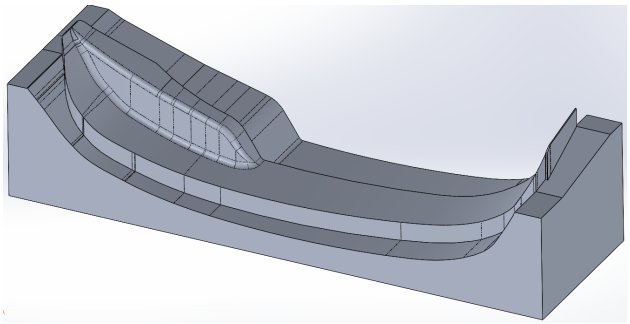


Figura 4.14: Perspetiva lateral superior do *master* do MTL sem prolongamento da base das abas ao nível da superfície de moldação.

Na figura 4.15 é possível identificar a presença de uma saliência na parede lateral do *master*. Esta parede lateral do *master* confere ao molde uma aba de moldação com uma linha de marcação vincada sobre ela, que marca o final da peça. Assim, a peça final a produzir sobre a superfície de moldação do molde em fibra de carbono contará com esta linha de peça, pela qual será feito o corte do compósito. De realçar que este detalhe é apenas necessário para superfícies que não tenham contacto com superfícies de outros moldes do conjunto.

Ainda no que toca à parede lateral do *master*, existe uma solução de *design* que importa realçar. Na figura 4.15 é possível observar, no plano abaixo da linha de peça, uma superfície curva sobre a qual não está desenhada nenhuma aba do *master*. Na verdade, esta superfície foi desenhada devido às limitações de maquinagem referidas no capítulo 3. A sua função é impedir que durante a maquinagem da parede lateral, a ferramenta ultrapasse a profundidade de maquinagem máxima de 130 milímetros, uma vez que, caso este limite fosse ultrapassado, a estrutura da CNC iria embater no topo da superfície do *master*, provocando danos irreparáveis e, possivelmente, a danificação da máquina.

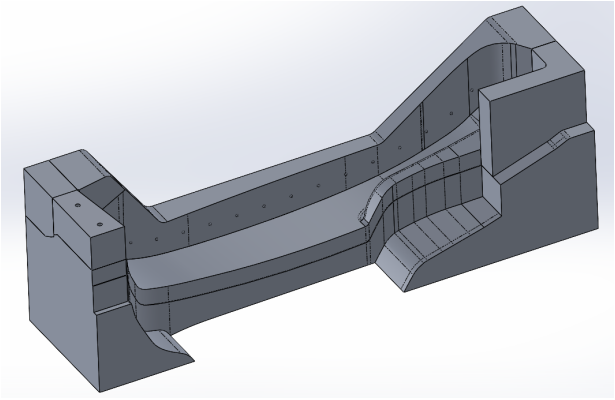


Figura 4.15: Perspetiva lateral superior do *master* do MTL e respetivas abas.

4.1.5 Otimização do *stock* de maquinagem

No capítulo 3 foi referida a necessidade de otimização do *stock* de maquinagem de modo a reduzir o tempo desta operação, o desgaste das ferramentas e o desperdício de material polimérico. Na figura 4.16 apresenta-se a solução de otimização alcançada para o *master* do molde de topo traseiro, enquanto que na figura 4.17 apresenta-se o mesmo tipo de solução para o molde de topo lateral da monocoque. No anexo C, encontram-se os desenhos 2D com as dimensões dos blocos poliméricos e as respetivas dimensões de montagem para ambos os conjuntos.

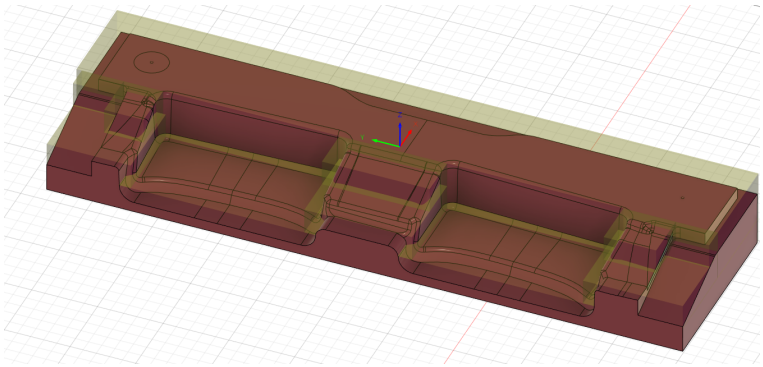


Figura 4.16: Stock de maquinagem do *master* do MTT.

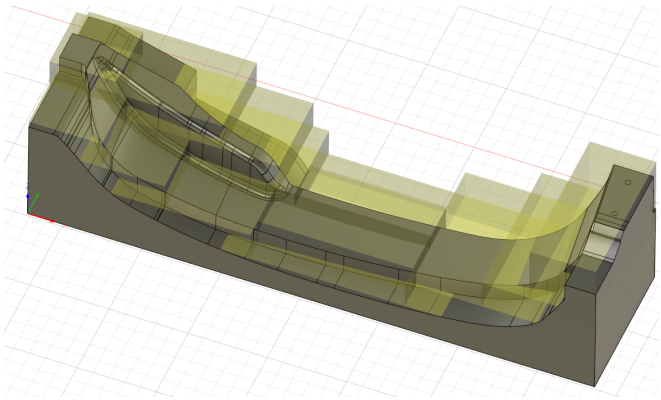


Figura 4.17: *Stock* de maquinagem do *master* do MTL.

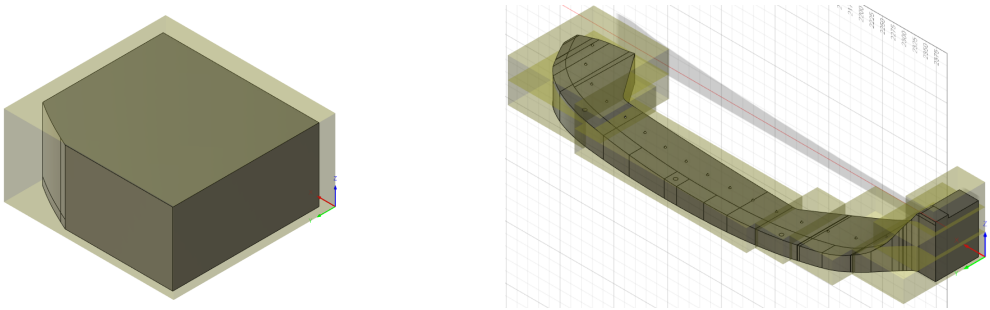
Como forma de provar a importância desta etapa do projeto no que toca à redução de custos e ao aumento da produtividade, foi realizada uma análise de dados de maquinagem a fim de comparar os resultados obtidos pelo método de otimização com aqueles que seriam obtidos caso este processo não fosse desenvolvido. Os resultados desta análise são apresentados na tabela 4.1.

Observando a tabela 4.1 podemos perceber que a otimização do *master* MTL permitiu reduzir mais do dobro de material em relação ao resultado conseguido após a otimização do *master* MTT, no entanto, a mesma proporção não se verificou ao nível do tempo de maquinagem. Estes dados permitem perceber que a geometria do *master* tem muita influência no tempo do processo e deste modo deve existir uma preocupação em otimizá-la, se possível, durante o seu de desenho.

Tabela 4.1: Resultados da otimização do *stock* de maquinagem dos *masters* MTT e MTL.

	Bloco Único		**Otimização**		**Resultados**	
	Volume (m^3)	Tempo de maquinagem	Volume (m^3)	Tempo de maquinagem	Redução de material	Redução de tempo
MTT	57,2 x 10^{-3}	15h18min	48,7 x 10^{-3}	11h04min	15%	4h14min
MTL	49,2 x 10^{-3}	12h28min	30,8 x 10^{-3}	6h49min	37%	5h39min

O processo de otimização é realizado também sobre as abas. Nestas o método torna-se ligeiramente distinto uma vez que a otimização ocorre no sentido de adaptar a espessura da aba à espessura do bloco de *stock*, minimizando o volume de material a maquinar. Por exemplo, no caso em que a aba do *master* requer apenas um bloco polimérico, a sua espessura deve ser próxima da espessura do bloco de *stock*, deixando apenas 5 milímetros de material para maquinar sobre o topo e laterais do bloco, o que permite obter um volume de maquinagem muito baixo e, assim, a redução do tempo deste procedimento. Pelo contrário, quando a geometria da aba não é plana e possui elevadas dimensões, o seu *stock* deve ser construído de forma otimizada, tal como procedido para o *stock* do *master*. Na figura 4.18 é dado um exemplo de solução para cada uma das estratégias de otmização referidas.



(a) Exemplo de otimização através da adptação da espessura da aba.

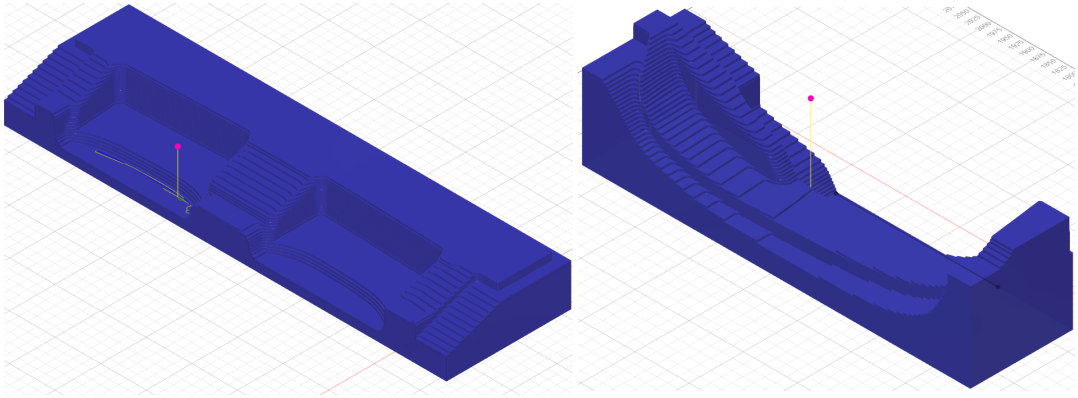
(b) Exemplo de otimização do *stock* das abas.

Figura 4.18: Otimização da maquinagem das abas.

4.1.6 Maquinagem do *master*

No capítulo 3 foram definidas as etapas de maquinagem genéricas às quais cada *stock* de *master* será submetido. Contudo, existem algumas particularidades que não permitem que o procedimento seja tão linear como apresentado. Na verdade, a superfície de moldação do *master* requer as quatro etapas apresentadas anteriormente para que seja obtida a máxima qualidade de acabamento. Porém, as superfícies periféricas como, por exemplo, a base de apoio das abas ou as faces de encosto, não requerem um nível de acabamento fino, portanto, o processo é adaptado para reduzir o tempo de maquinagem e otimizar os procedimentos, garantindo os resultados pretendidos.

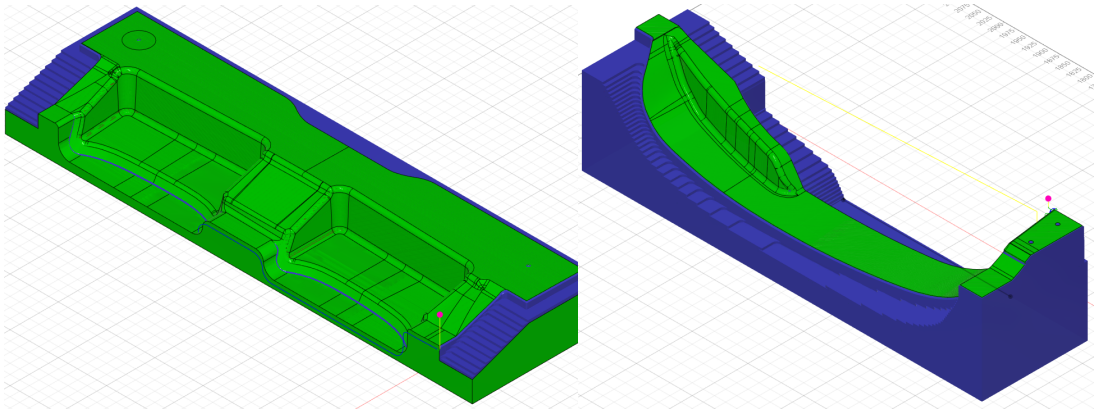
A operação de desbaste é realizada da mesma forma para qualquer *master* a maquinar. Durante esta operação é utilizada a fresa T24 de 16 milímetros de diâmetro, programada com um penetramento de trabalho de 6 milímetros e *stepdown* de 5 milímetros, deixando 3 milímetros de material sobrante em relação à superfície final, que será removido através das operações seguintes. O resultado da operação de desbaste é ilustrado pela figura 4.19.



(a) *Master* MTT (b) *Master* MTL

Figura 4.19: Resultado da operação de desbaste, obtido por simulação através do programa *Autodesk Fusion 360*.

Finalizada a operação de desbaste, cada *master* é submetido a duas operações de acabamento na área correspondente à sua superfície de moldação. A primeira operação é realizada com um avanço (*stepover*) de 6 milímetros e é programada para maquinar o material apenas na direção paralela ao eixo *xx*, permitindo a uniformização das linhas de corte. A segunda operação remove os 2 milímetros de material sobrante com um avanço de 0.5 milímetros, a fim de obter o melhor acabamento superficial possível. O resultado destas operações é ilustrado pela figura 4.20.

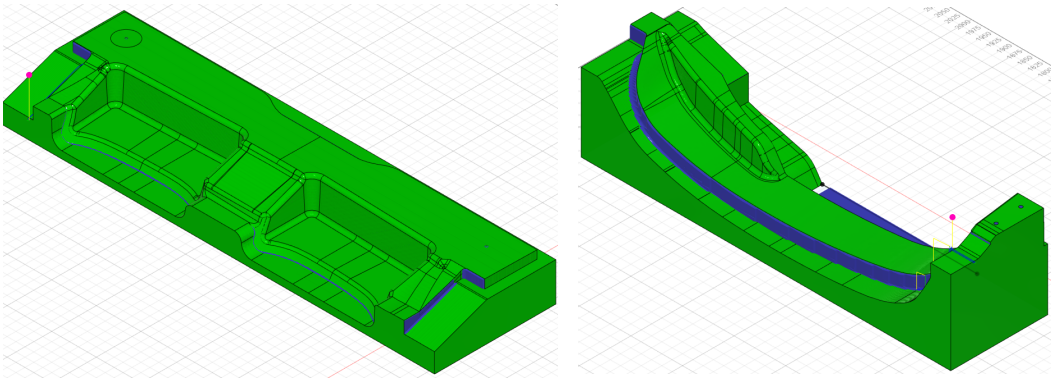


(a) *Master* MTT (b) *Master* MTL

Figura 4.20: Resultado da operação de acabamento sobre a superfície de moldação, obtido por simulação através do programa *Autodesk Fusion 360*.

As superfícies de apoio das abas do *master* sofrem apenas uma operação de acabamento. Uma

vez que a função destas faces passa por apoiar os elementos sólidos responsáveis pela moldação das abas do molde, é suficiente para o seu acabamento uma única passagem com uma ferramenta de ponta plana e um penetramento de avanço de 3 milímetros. Esta operação singular permite remover os 3 milímetros de material sobrante nas abas após desbaste e deixar o *master* pronto a receber a operação de contorno final, ilustrada pela figura 4.21



(a) *Master* MTT (b) *Master* MTL

Figura 4.21: Resultado da operação de acabamento sobre a superfície de apoio das abas, obtido por simulação através do programa *Autodesk Fusion 360*.

A operação de contorno permite maquinar a superfície de encosto das abas do master que se situa em redor da linha periférica da superfície de moldação. Esta etapa, apesar de simples, é importante para garantir uma folga mínima entre a aba e a superfície de moldação e para remover material vibrado no seu topo, resultante do processo de acabamento da superfície de moldação. Após esta operação, a maquinagem do *master* encontra-se finalizada, restando a maquinagem das suas abas móveis. A tabela 4.2 expõe o tempo de maquinagem referente a cada operação deste processo.

Tabela 4.2: Descrição do tempo das operações de maquinagem dos *master* MTT e MTL.

Operações	**Tempo de maquinagem**	
	MTT	MTL
Desbaste	2h54min	3h50min
Acabamento da superfície de moldação	7h53min	2h31min
Acabamento da superfície das abas	12min	15min
Contorno	5min	13min
Total	11h04min	6h49min

Nas figuras 4.22 e 4.23 é apresentado o resultado da maquinagem do *master* do molde topo traseira, antes das operações de acabamento manual.

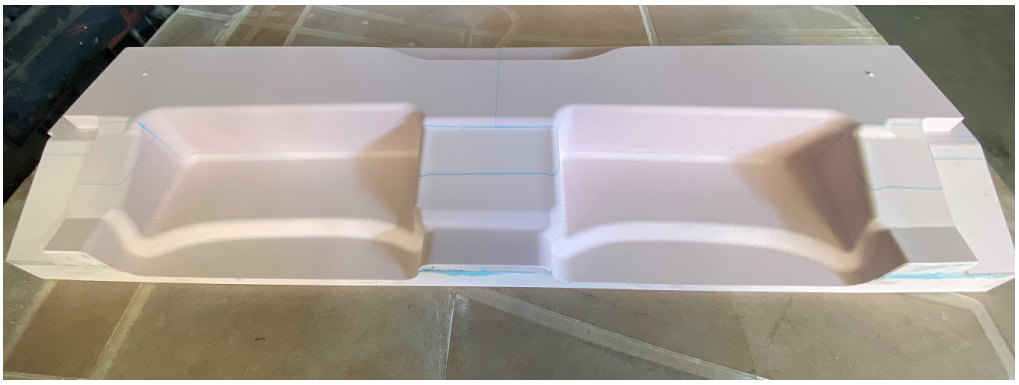


Figura 4.22: Perspetiva frontal do *Master* do MTT após maquinagem.

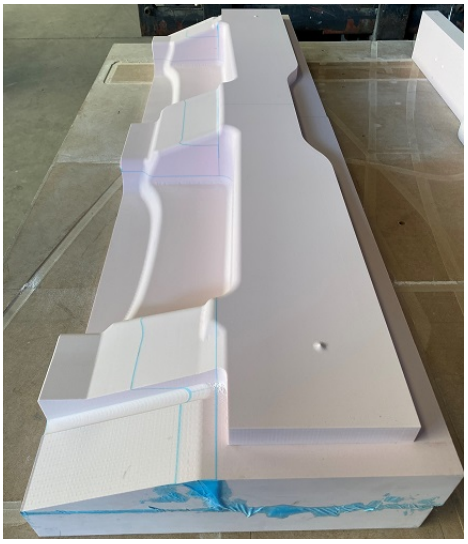


Figura 4.23: Perspetiva lateral do *Master* do MTT após maquinagem.

Nas figuras 4.24 e 4.25 é apresentado o resultado de maquinagem do *master* do molde topo lateral, antes das operações de acabamento manual, tal como o anterior.

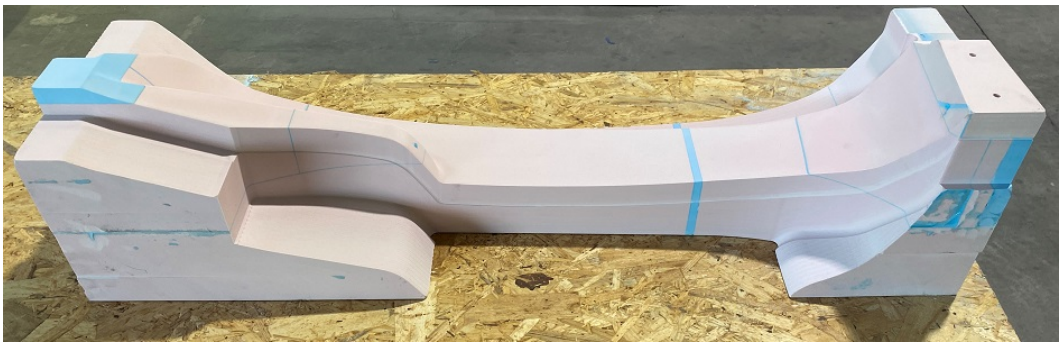


Figura 4.24: Vista lateral interior do *Master* do MTL após maquinagem.

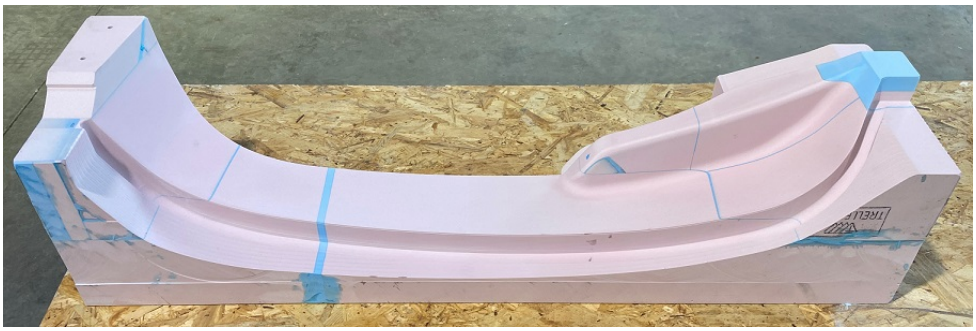
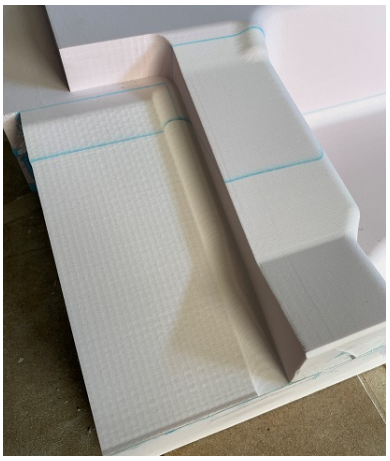


Figura 4.25: Vista lateral exterior do *Master* do MTL após maquinagem.

A figura 4.26 evidencia a diferença de acabamento após maquinagem da superfície de apoio das abas em relação à superfície de moldação do *master*. Apesar de ser notória a rugosidade desta superfície, o seu acabamento não traz problemas para a qualidade do molde, uma vez que garante um apoio correto da aba apoiada, na posição projetada. Para além deste pormenor, é possível observar que a superfície em análise apresenta um corte de material, que vai para além do limite do seu plano, junto à face de encosto. Este corte é realizado para garantir que a aba encosta totalmente sobre a face vertical. Na realidade, dado que esta superfície de apoio da aba não é paralela ao plano de maquinagem de três eixos, surgem dificuldades em remover o material existente na aresta entre a face de encosto e esta superfície, tal como referido no capítulo 3. Assim, é programada uma passagem de corte abaixo do plano desta superfície para que seja possível remover todo o material sobrante.



(a) *Master* MTT

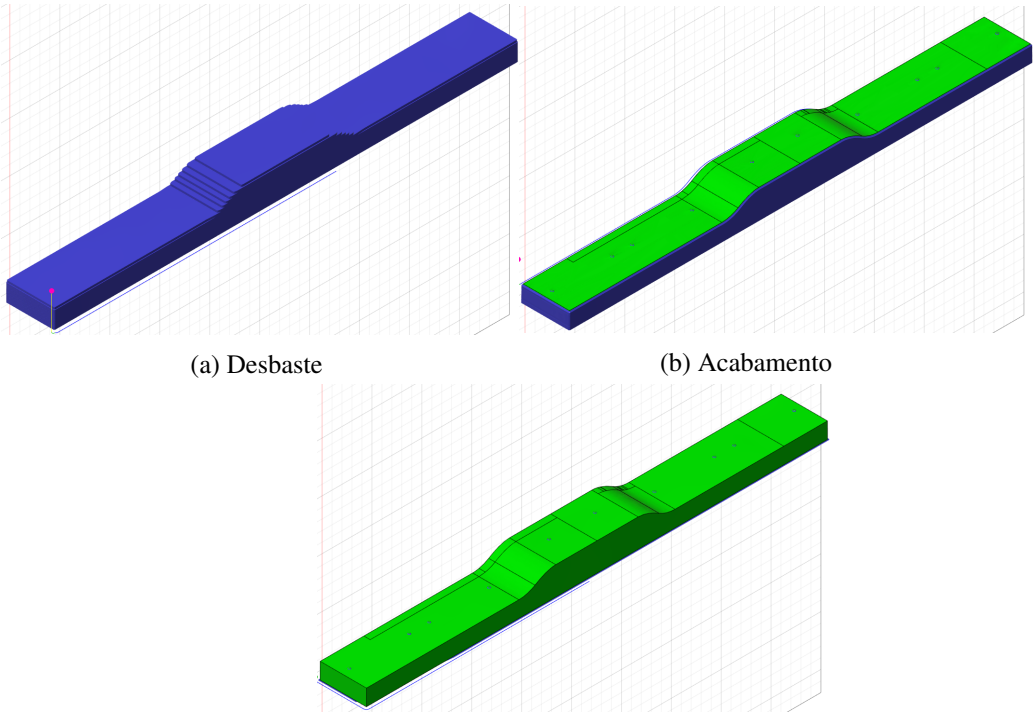


(b) *Master* MTL

Figura 4.26: Pormenor da diferença de acabamento entre a superfície de moldação e a superfície de suporte das abas.

Após a maquinagem do *master* procede-se à produção das suas abas utilizando procedimentos de maquinagem similares aqueles que foram apresentados, como mostra a sequência 4.27. Contudo, ao contrário do *master*, a maquinagem das abas opera sobre todas as suas faces, de topo e laterais, visto que estas contactam com a superfície de encosto do *master* e com as faces das

restantes abas. A maquinagem é deste modo programada para desbastar e conferir acabamento na superfície de topo que é, tipicamente, a superfície de moldação das abas do molde, e nas faces laterais, para garantir o seu correto posicionamento em relação ao *master* e o assentamento do conjunto das abas. Os parâmetros, bem como a sequência, utilizados para a maquinagem das abas são iguais aqueles que foram anteriormente apresentados para a maquinagem da superfície de moldação do *master*. No final de toda a sequência apresentada são efetuados os furos passantes previamente projetados e identificáveis na figura 4.28.



(a) Desbaste

(b) Acabamento

(c) Contorno

Figura 4.27: Sequência de maquinagem das abas.

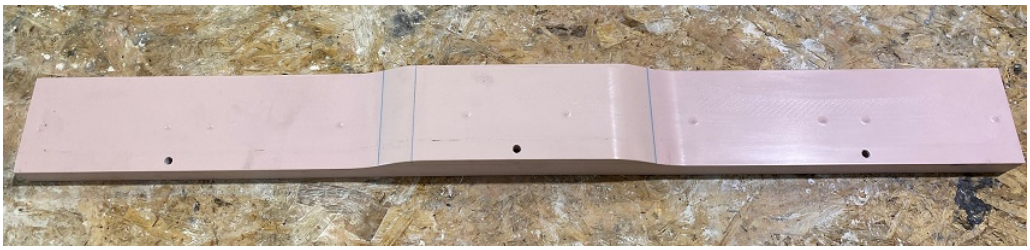
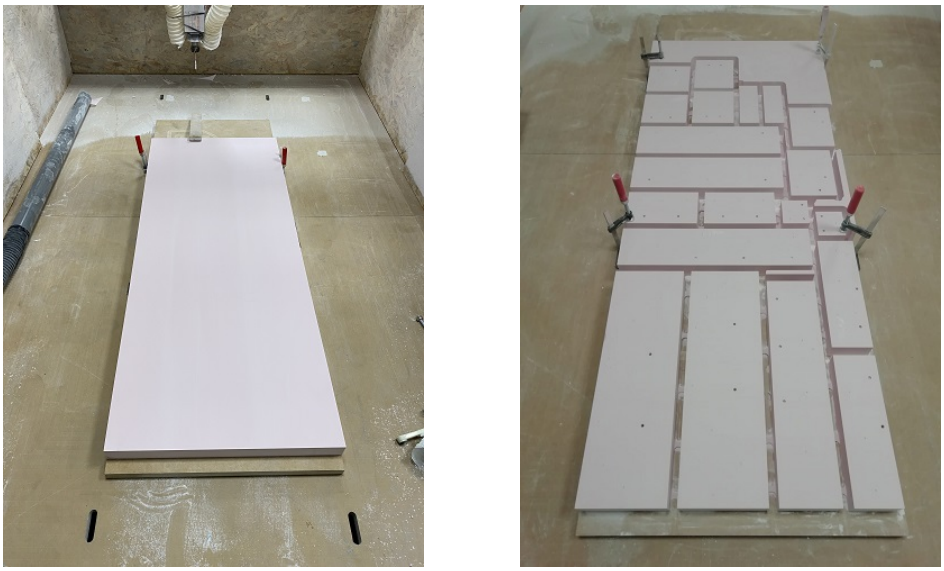


Figura 4.28: Resultado final da maquinagem da aba exemplo.

Para as abas de superfície plana com uma espessura inferior a 50 milímetros adota-se uma estratégia diferente que permite dispensar o corte de blocos poliméricos para o seu *stock*. Nestes casos, o corte do *stock* das abas e a sua maquinagem pode ser realizada em simultâneo a partir de uma placa de resina epóxi, como mostra a figura 4.29.

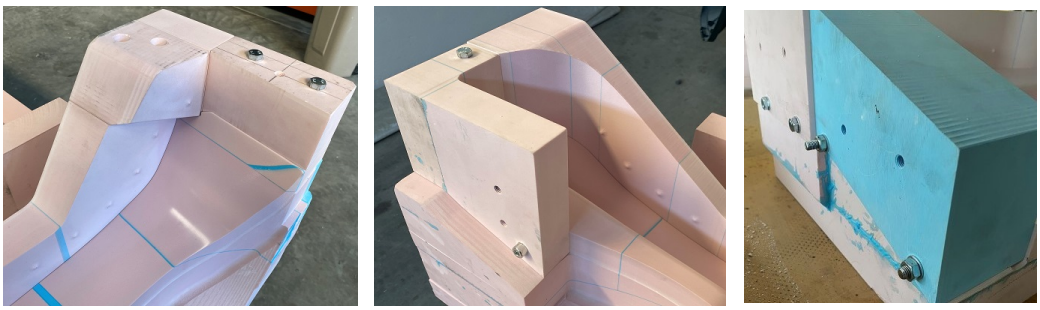


(a) Placa polimérica (*stock*) (b) Conjunto de abas após maquinagem

Figura 4.29: Estratégia alternativa para a maquinagem das abas.

4.1.7 Operações de pós-maquinagem

Como foi referido no capítulo anterior, a superfície de moldação do *master* e das abas requer um pós-tratamento de maquinagem, cujos procedimentos passam pela lixagem da sua superfície, pela aplicação de selante e de desmoldante. Após o tratamento manual de acabamento, o *master* possui a qualidade superficial adequada à produção do molde em fibra de carbono. Contudo, é necessário proceder à montagem de todo o conjunto dos seus elementos, isto é, conceber as furações roscadas M8 nas faces de encosto das abas para que seja possível a sua fixação e aperto, como mostra a figura 4.30.



(a) (b) (c)

Figura 4.30: Elementos de fixação e aperto do conjunto abas/*master*.

Finalmente, o *master* encontra-se completamente construído e capaz de produzir o molde em fibra de carbono para o qual foi projetado. Os resultados obtidos após todas as operações de acabamento e montagem são apresentados nas figuras 4.31 e 4.32.

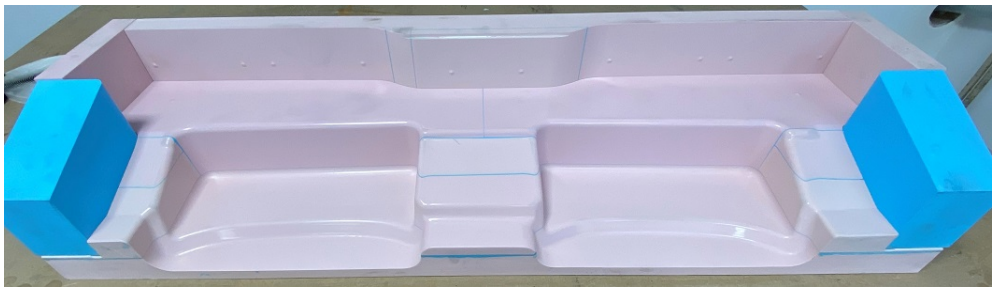


Figura 4.31: Resultado final da montagem e acabamento do *master* do MTT.

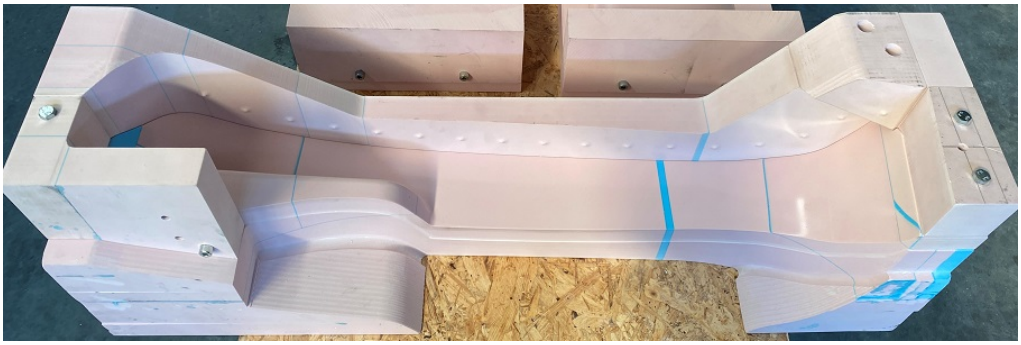


Figura 4.32: Resultado final da montagem e acabamento do *master* do MTL.

4.1.8 Planificação

A planificação tem como objetivo transformar a geometria tridimensional da superfície de moldação do *master* num conjunto de secções bidimensionais planas correspondentes à diversas laminas de fibra de carbono que serão laminadas sobre este. Tal como referido no capítulo 3, cada lamina planificada deve ter dimensões que permitam o seu corte nas várias orientações, dentro dos limites do rolo de fibra utilizado. Para além disso, a deformação de cada lamina quando moldada sobre o *master* não deve exceder os 5%, algo que é possível verificar através de ferramentas de cálculo computacional. As figuras 4.33 e 4.34 mostram a planificação obtida para os *master* projetados.

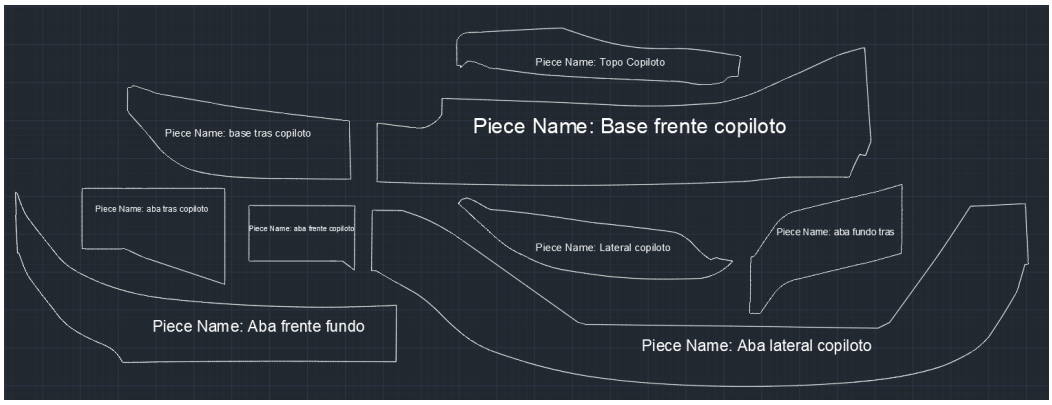


Figura 4.33: Planificação do *master* do MTL.

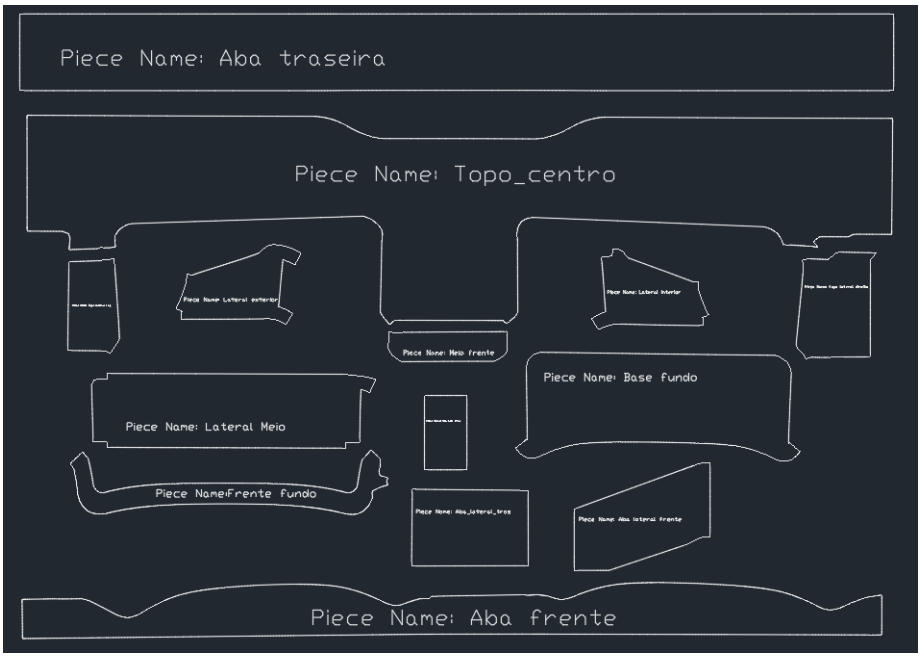
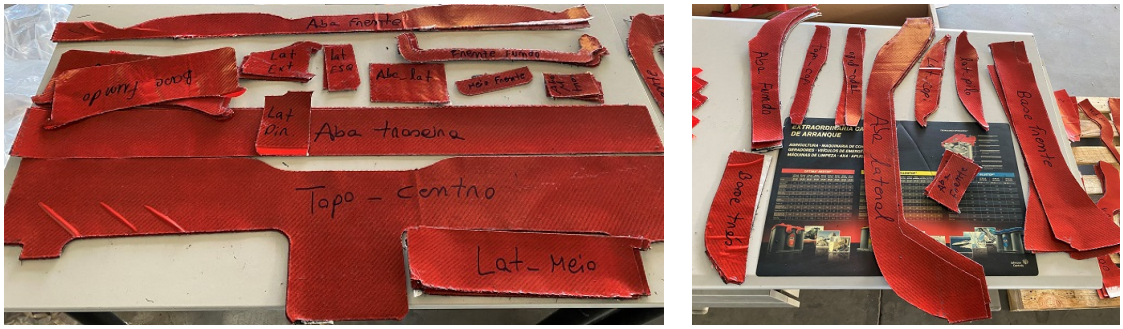


Figura 4.34: Planificação do *master* do MTT.

Durante a correção do posicionamento e alinhamento das planificações obtidas, segue-se a atribuição da sua identificação. Esta será fundamental para facilitar o processo de laminação, evitando o desperdício de tempo na procura da planificação correspondente a cada secção do *master*. Posto isto, após corte, cada lamina será identificada com a designação atribuída e com a orientação de corte da fibra. De forma a complementar este procedimento são realizados desenhos[2] que permitem identificar a que secção do *master* corresponde cada lamina de fibra de carbono cortada. O conjunto destes elementos de produção tem como objetivo aumentar a produtividade do processo de laminação do *master* e, assim, reduzir o tempo desta etapa. A figura 4.35 mostra as laminas após corte, com as respetivas identificações e organizadas por secção. Estas laminas são de seguida colocadas num saco selado e inseridas no congelador para preservar o tempo da resina.

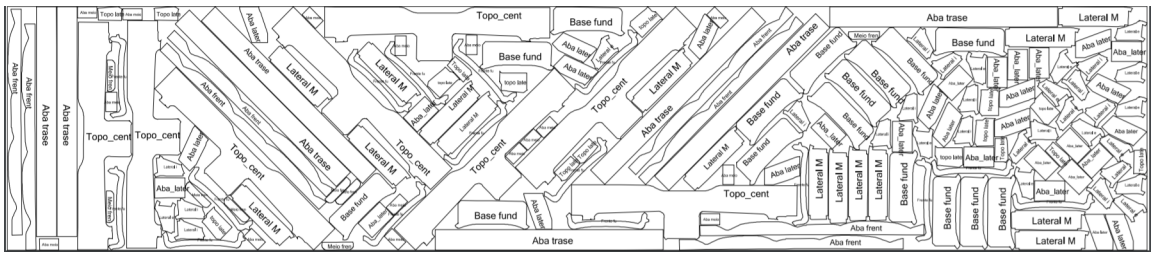


(a) MTT (b) MTL

Figura 4.35: Organização e identificação das laminas de fibra de carbono após corte.

[2]Disponíveis para consulta no anexo D

Para que seja possível proceder ao corte do rolo de fibra de carbono pré-impregnada é realizado o *nesting*. Este consiste em agrupar as planificações do molde com a quantidade e orientação pretendida de forma a retirar o maior proveito possível das dimensões do rolo de fibra. A figura 4.36 mostra um exemplo de *nesting*, utilizado para cortar as laminas de fibra 650 para o MTT, com um perímetro de corte de 159.23 metros e uma taxa de aproveitamento do rolo de 81%.


Topo_cent
Base fund
Aba trase
Lateral M
Aba_later
Aba front
Aba_front
Aba trase
Topo_cent
Topo_cent
Aba trase
Lateral M
Aba_later
Aba front
Topo_cent
Lateral M
Base fund
Aba trase
Topo_cent
Base fund
Aba_later
Aba_later
Topo_cent
Lateral M
Aba trase
Base fund
Base fund
Aba_later
Lateral M
Lateral M
Lateral M
Base fund
Base fund
Base fund
Lateral M
Lateral M
Topo_cent
Aba front
Aba trase
Aba front
Base fund
Aba trase
Base fund
Lateral M
Lateral M
Aba_later
Aba_later
Aba_later

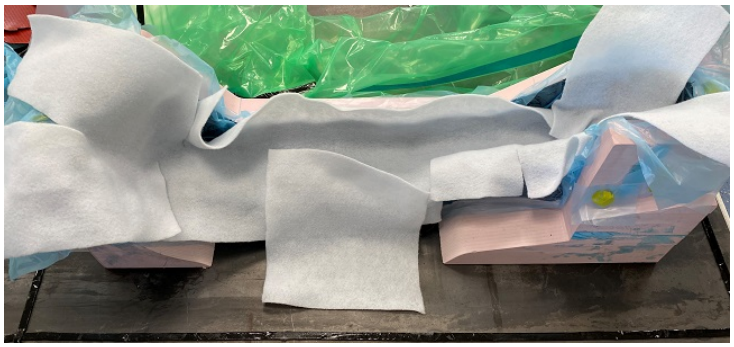


Figura 4.38: Aplicação do tecido *breather* e da película *release film* antes de uma pré-compactação.

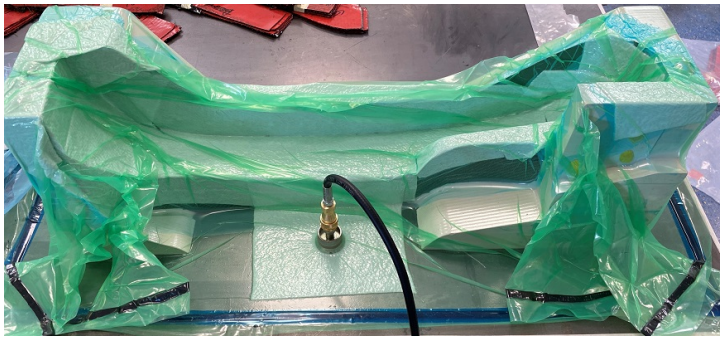


Figura 4.39: Saco de pré-compactação e adesivo vedante preto de baixa temperatura do *master* do MTL.



Figura 4.40: Saco de pré-compactação e adesivo vedante preto de baixa temperatura do *master* do MTT.

Após laminação, a correta colocação do saco de compactação é essencial. Por um lado, para que o compósito se mantenha em vácuo e à pressão exterior de 6 bar durante todo o período de cura e, por outro, para que não surjam zonas de tensão, pois estas prejudicam a aplicação de pressão sobre o laminado e podem levar ao rompimento do saco. Estas zonas de tensão no saco ocorrem quando a sua dimensão não é suficiente para contactar com toda a superfície do *master* em vácuo, pelo que é importante dimensioná-lo em excesso, evitando este problema. As figuras 4.41 e 4.42 mostra o saco de compactação final para cura do compósito do MTT e do MTL, respetivamente.



Figura 4.41: Saco de compactação final de alta temperatura para cura do compósito do MTT.

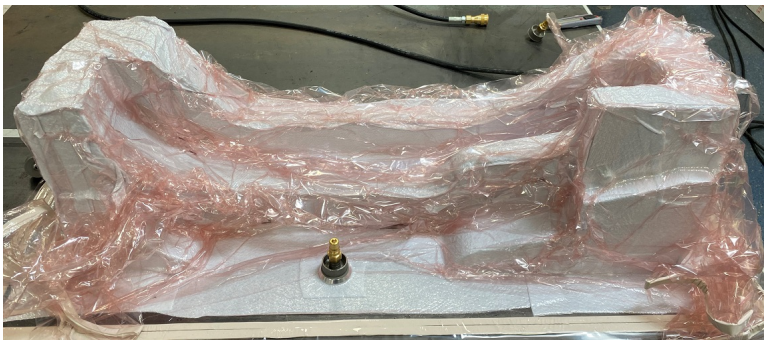


Figura 4.42: Saco de compactação final de alta temperatura para cura do compósito do MTL.

4.1.10 Desmoldagem

Após o tratamento de cura do compósito, a rampa de arrefecimento indicada pelo fabricante deve ser respeitada para evitar deformações derivadas do choque térmico e da contração do *master*. A desmoldagem segue este arrefecimento para assegurar que a rampa é cumprida e que a temperatura do molde é adequada ao seu manuseamento. Este processo inicia pela remoção do saco de vácuo e de todos os acessórios de compactação inerentes ao processo utilizado, como mostram as figuras 4.43 e 4.44.



Figura 4.43: MTT após cura e remoção do saco de vácuo.



Figura 4.44: MTL após cura e remoção do saco de vácuo.

A remoção das abas é necessária para a desmoldagem do molde uma vez que os seus pontos, introduzidos para marcar os centros de furação, originam uma contra-saída em relação ao plano de desmoldagem do molde. Esta particularidade é uma das razões pelas quais as abas são móveis e separáveis do corpo do *master*, como referido anteriormente.

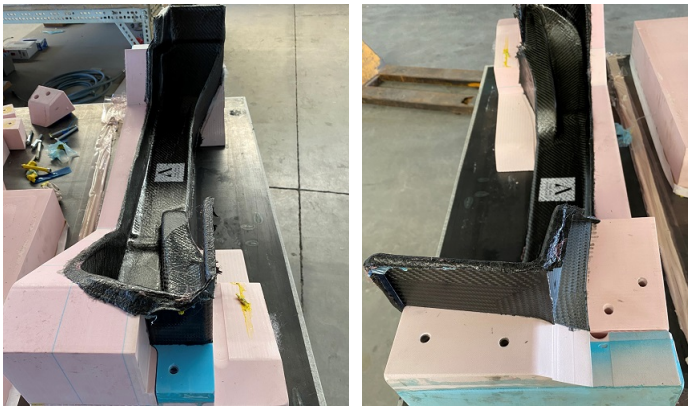


Figura 4.45: Remoção das abas para desmoldagem do molde.

Após a remoção de todas abas, como mostra a figura 4.45, é possível retirar o molde com o auxílio das ferramentas de desmoldagem apresentada anteriormente. De seguida, são apresentados os resultados obtidos e o nível de acabamento visual da superfície de moldação dos moldes MTT, figura 4.46, e MTL, figura 4.47 após cura.

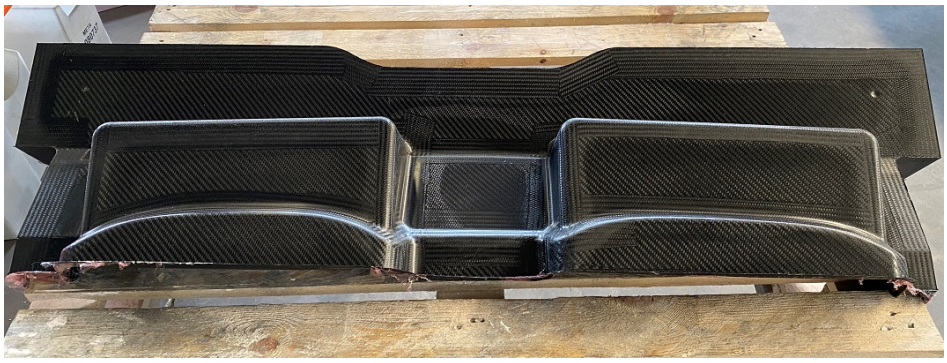


Figura 4.46: Superfície de moldação do MTT após cura.



Figura 4.47: Superfície de moldação do MTL após cura.

4.1.11 Acabamento e Pós-cura

Os moldes produzidos sofrem, após desmoldagem, diversas operações de acabamento. No caso em questão, foi inicialmente testado o alinhamento do conjunto de moldes produzido com o restante conjunto da monocoque, previamente fabricado, para confirmar a inexistência de distorções dimensionais e geométricas. Caso existam, podem ser reparadas com a adição de camadas de fibra, ou caso contrário, pela remoção do excesso através de lixagem, de forma a obter uma superfície uniforme e plana .



Figura 4.48: Aspeto visual do acabamento final da superfície de moldação.

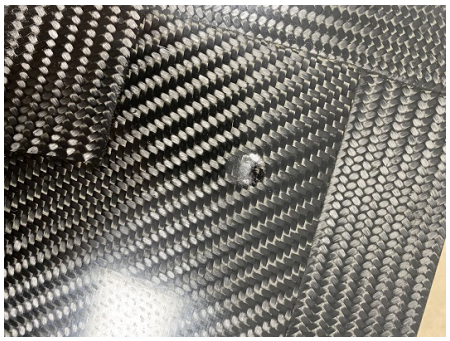


Figura 4.49: Pormenor da indentação dos pontos do *master*.

Após a verificação da qualidade do molde é realizada a furação das abas para introduzir os elementos de fixação do conjunto e procede-se ao refinamento da sua superfície de moldação através das técnicas de acabamento abordadas no capítulo 3.

As figuras 4.48 e 4.49 mostram o acabamento final da superfície de moldação dos moldes e, em particular, o resultado da indentação dos pontos de moldação do *master* nas suas abas. Por sua vez, nas figuras 4.50 e 4.51 mostra-se o acabamento superficial e o alinhamento dos moldes fabricados, em relação ao restante conjunto de moldes do *chassi* monocoque. Apesar de ser notória a linha de partição dos moldes, o seu alinhamento apresenta elevada qualidade, uma vez que possui uma transição suave e uniforme que não deixará marcas na peça final.

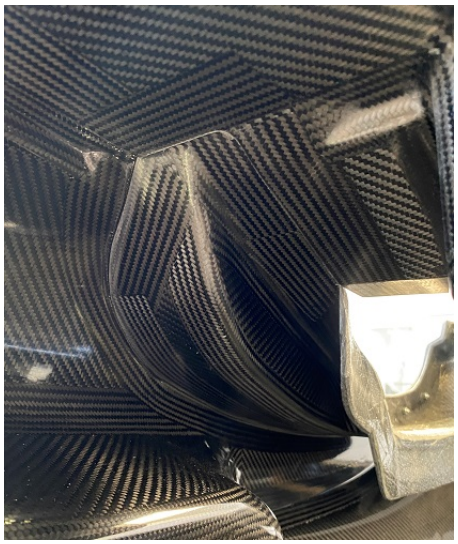
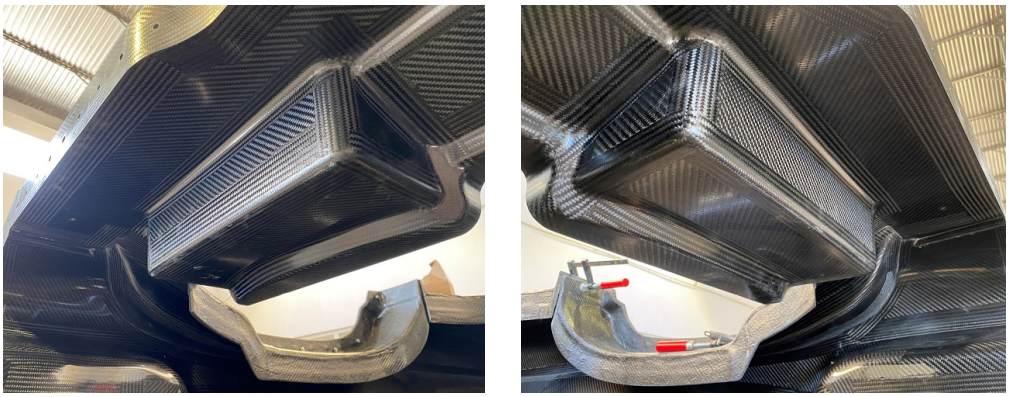


Figura 4.50: Ilustração do alinhamento da superfície de moldação do conjunto de moldes do *chassi* monocoque.



(a) Lado esquerdo (b) Lado direito

Figura 4.51: Resultado do alinhamento do conjunto de moldes da monocoque.

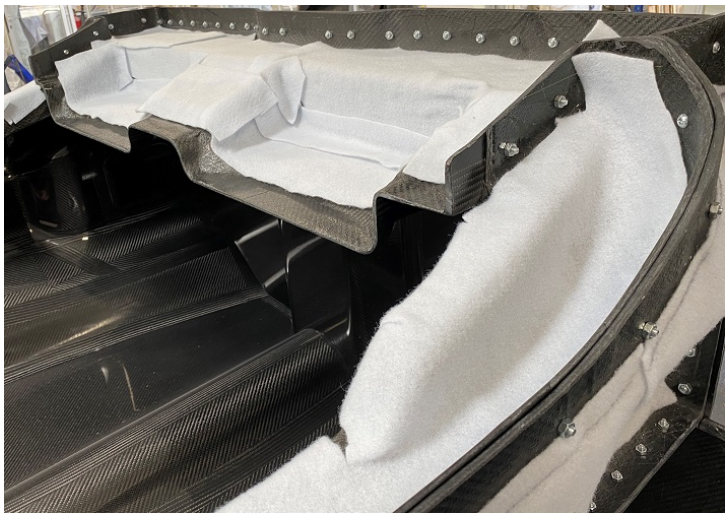


Figura 4.52: Elementos de fixação das abas.

Finalmente, é possível fixar os moldes fabricados nos restantes, previamente produzidos, e concluir a superfície de moldação da monocoque, como mostram as figuras 4.52 e 4.53. Após este procedimento, esta carece apenas da realização da pós-cura.

A pós-cura deste conjunto é feita em simultâneo com os restantes moldes da monocoque e com os respetivos elementos de aperto e fixação para garantir que deste tratamento não surgem deformações nas abas dos moldes que impeçam, posteriormente, a sua montagem.



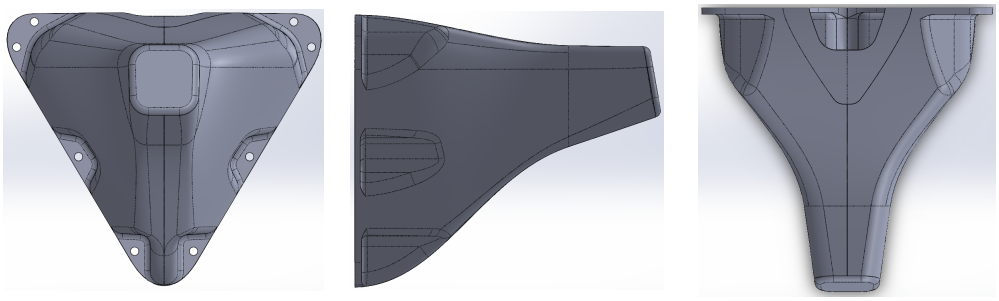
Figura 4.53: Vista superior da fixação do conjunto de moldes da monocoque.

4.2 *Crash Box* Traseira

A *crash box* é um elemento estrutural cuja função primordial é absorver o máximo de energia possível em caso de impacto.

Este molde apresenta etapas de produção idênticas às que foram tratadas anteriormente. Por isto, nesta secção do trabalho são apenas referidas diferentes particularidades encontradas ao longo

do desenvolvimento do *design* dos *masters* para este molde. A estratégia de maquinagem desenvolvida é também similar à que fora anteriormente apresentada, assim como os parâmetros utilizados, pelo que a solução exposta anteriormente pode ser extrapolada para este caso concreto. De qualquer forma, ao longo desta secção do trabalho são expostos os diversos resultados obtidos, referentes a cada etapa do processo. A figura 4.54 mostra a superfície de peça da *crash box* que será transformada em superfície de moldação do *master*.



(a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Vista de topo

Figura 4.54: Vistas da superfície de peça da *Crash Box*.

4.2.1 Partição da peça

A partição da *crash box*, ao contrário do molde anteriormente analisado, contou com alguns entraves devido às diversas restrições e limitações do processo. Neste caso, o entrave prende-se com a profundidade máxima de maquinagem, que levou à necessidade de criar um plano de partição adicional para além daqueles definidos por razões geométricas e de saída de peça. Inicialmente, foram definidos os planos apresentados na figura 4.55

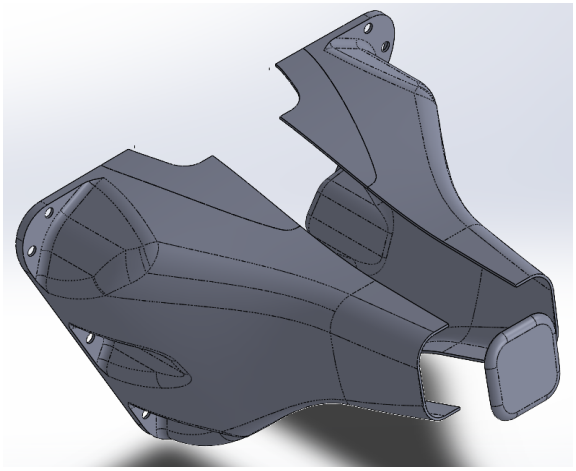


Figura 4.55: Partição inicial da superfície de moldação.

No entanto, a partir da análise das superfícies geradas após partição percebeu-se que as metades laterais, de caráter simétrico, possuem faces verticais de dimensão superior a 130 milímetros, o que impossibilita a sua maquinagem completa. Este entrave é evidenciado na figura 4.56.

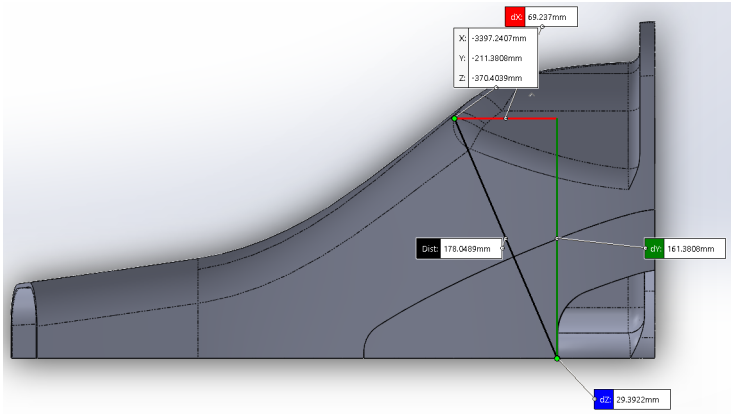


Figura 4.56: Dimensão da face vertical que impede a maquinagem da sua geometria.

Por este motivo, foi necessário definir um plano de partição adicional, capaz de modificar esta face a ponto de ser possível a sua maquinagem. Em contra-partida, esta partição conduz à necessidade de produzir mais um *master*. A partição final da peça utilizada no desenvolvimento dos *masters* pode ser observada na figura 4.57.

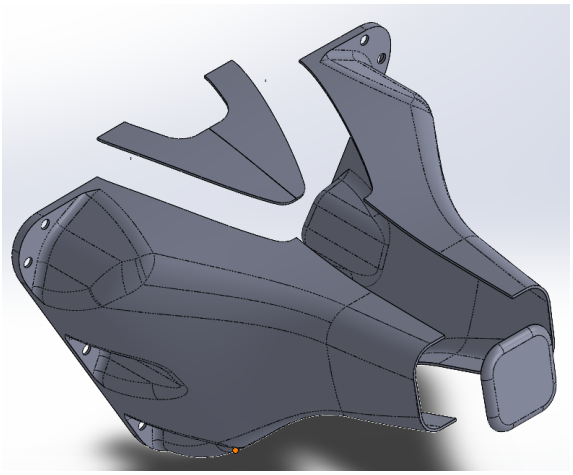


Figura 4.57: Partição final da superfície de moldação.

4.2.2 Caraterísticas da fronteira

A divisão da superfície da peça pelas linhas de partição implica a construção de abas no *master*, responsáveis por moldar as abas do molde que, por sua vez, permitem a fixação e aperto de todo o conjunto. Neste caso concreto, todos os *masters* devem conter estas abas ao longo de todo o perímetro da superfície de moldação, uma vez que toda a linha de final de peça de cada molde irá alinhar e contactar com as linhas de final de peça dos restantes moldes do conjunto. A figura 4.58 mostra a forma da superfície das abas de fixação necessárias para esta peça.

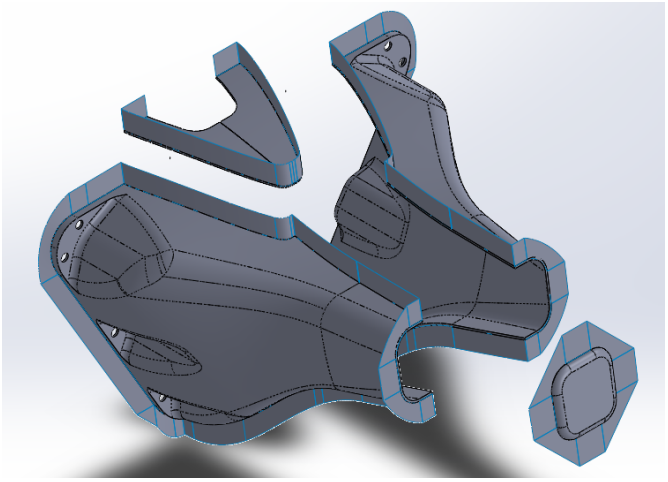
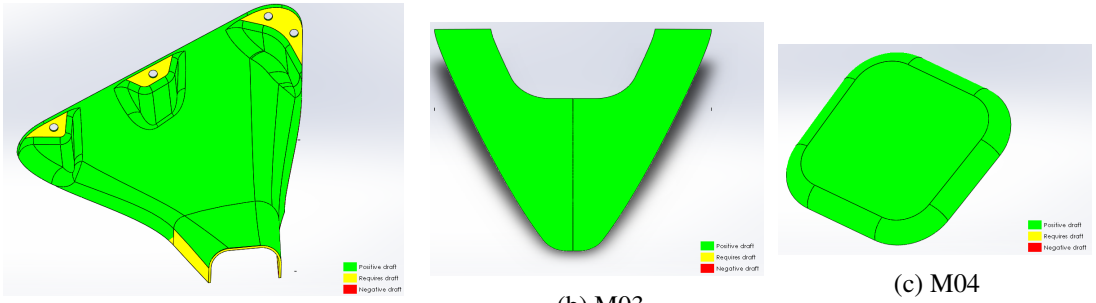


Figura 4.58: Superfícies das abas de fixação do molde da *crash box*.

4.2.3 Estudo da geometria

A estudo da geometria antecede uma vez mais a construção do *master*, de modo a prever possíveis alterações que sejam necessárias conceber à superfície de moldação, tanto a nível da sua geometria como a nível dos seus planos de partição. A figura 4.59 expõe a análise dos ângulos de saída das superfícies de moldação criadas a partir da partição da peça. Tal como mostra a figura, daqui em diante, o molde lateral da *crash box* será designado por M01/02, o molde de topo por M03 e o molde da tampa traseira por M04.



(a) M01/02 (b) M03 (c) M04

Figura 4.59: Análise do ângulo das superfícies da peça em relação ao plano de maquinagem e desmoldagem.

Da análise conclui-se que apenas a superfície de moldação do *master* do M01/02 possui faces com saída a zero. Contudo, neste caso, não é possível a alteração destas superfícies visto que esta iria afetar a geometria vizinha da superfície de moldação e por sua vez, alterar a geometria da peça final. De qualquer forma, a área destas superfícies de moldação com saída a zero é pequena, pelo que, seguindo uma correta aplicação de desmoldante, prevê-se que nem o *master* nem o molde terão complicações futuras.

4.2.4 Transformação em sólido

A transformação em sólido dos *masters* dos moldes da *crash box* seguiu os mesmos princípios apresentados para a peça anterior, a partir dos quais resultaram os corpos apresentados de seguida, da figura 4.60 à 4.63.

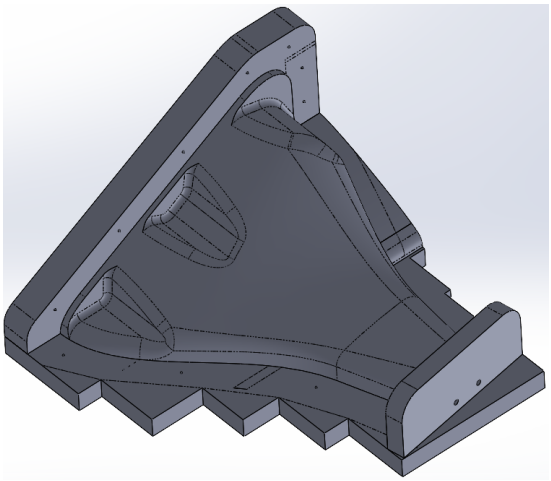
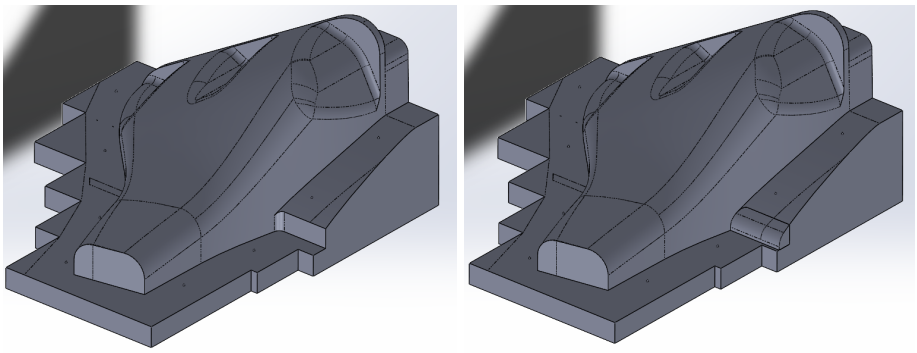


Figura 4.60: *Master* e abas do M01/02.

O *master* do M01/02 possui um detalhe importante que permitiu solucionar a incapacidade de obter, por maquinagem em três eixos, parte da sua aba lateral. A necessidade de implementar esta estratégia prende-se com dificuldade em maquinar a superfície da aba junto à face vertical do *master*, já referida anteriormente. De modo a resolver este problema, parte da aba lateral foi maquinada separadamente e de seguida colada no *master*, como mostra a figura 4.61.

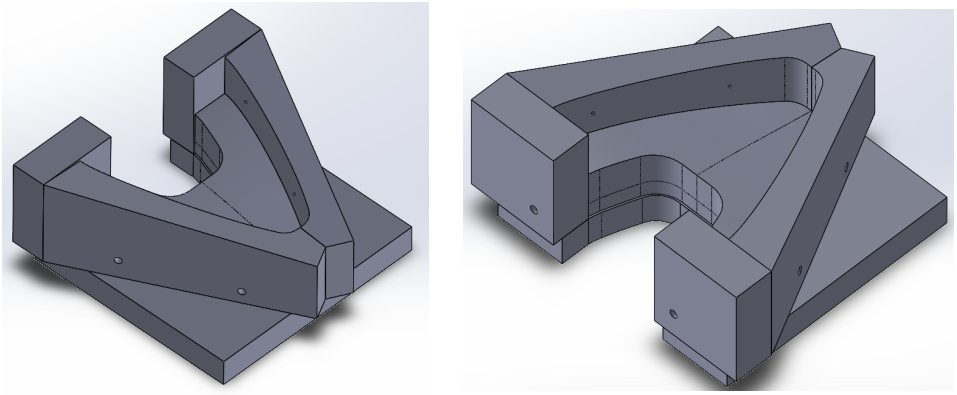


(a) *Master* do M01/02 sem abas móveis (b) Detalhe da aba do *master* do M01/02

Figura 4.61: Estratégia alternativa de produção da aba lateral do *master*.

Observando a figura 4.60 verifica-se que a base do *master* possui um corte em "escada". Este corte encontra-se interligado com a otimização do *stock* de maquinagem e, por sua vez, é também uma estratégia de otimização, mas a nível do desenho do *master*. Esta forma escadeada é resultado da extensão da base do *master* à forma do *stock* de maquinagem. Deste modo, é prescindida

a necessidade de realizar a maquinagem do contorno da base, o que acelera este processo, aumentando a sua produtividade. O mesmo acontece nos *masters* das figuras 4.62 e 4.63, porém, nestes a adaptação da base realiza-se sobre contorno um bloco de *stock* único retangular. Por este motivo, a base obtém também um formato retangular.



(a) Vista frente lateral (b) Vista traseira lateral

Figura 4.62: *Master* do M03.

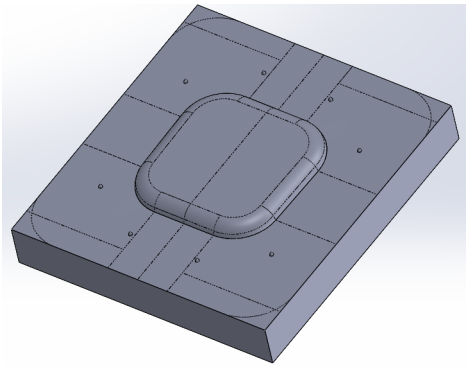
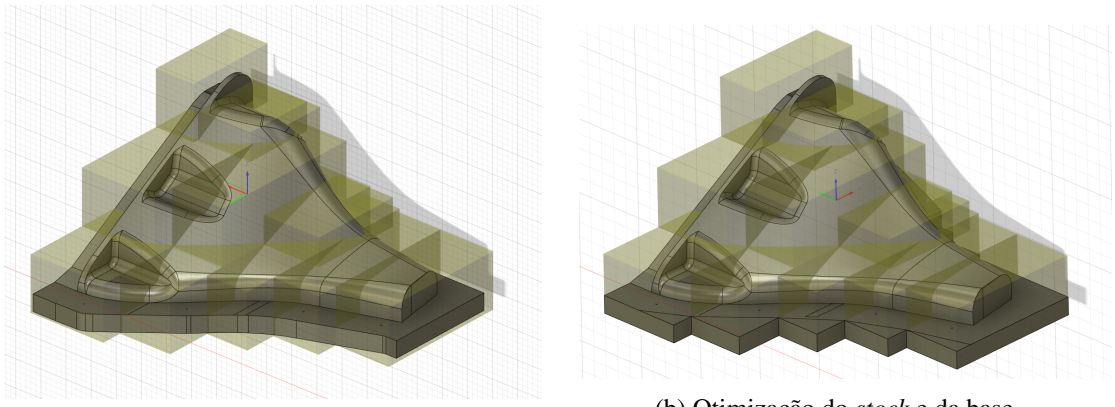


Figura 4.63: *Master* do M04.

4.2.5 Otimização do *stock* de maquinagem

Para este caso, a otimização do *stock* de maquinagem apenas se aplica ao *master* do M01/02, isto porque, os *masters* M03 e M04 apresentam pequena dimensão e uma geometria que pouco varia no plano. Por isso, a otimização não revela resultados que justifiquem este procedimento. A figura 4.64 mostra o *stock* de maquinagem do *master* do M01/02 e adptação da sua base à dimensão do *stock* desenvolvido, como referido anteriormente. O desenho 2D deste *stock* otimizado pode ser consultado no anexo C, em conjunto com as medidas de montagem.



(a) Otimização do *stock*

(b) Otimização do *stock* e da base

Figura 4.64: *Stock* de maquinagem do *master* do M01/02 e resultado da adaptação do desenho da base à forma dos blocos poliméricos.

Tabela 4.3: Resultados da otimização do *stock* de maquinagem do *master* do M01/02.

	Bloco Único		**Otimização**		**Resultados**	
	Volume (m^3)	Tempo de maquinagem	Volume (m^3)	Tempo de maquinagem	Redução de material	Redução de tempo
M01/02	65,6 x 10^{-3}	19h20min	30,9 x 10^{-3}	9h02min	53%	10h18min
M03	6,6 x 10^{-3}	1h56min	-	-	-	-
M04	1,9 x 10^{-3}	1h08min	-	-	-	-

Na tabela 4.3 são apresentados os resultados alcançados, consequentes da otimização do *stock* do *master* M01/02 e também os tempos de maquinagem relativos aos *stocks* não otimizados. Contudo, a tabela não expõe a redução do tempo de maquinagem conseguida após a reformulação do desenho da base do *master*. Por este motivo, é importante referir que esta otimização a nível da peça permitiu reduzir o tempo de maquinagem do *master* do **M01/02** para **7h02min**, o que representa uma redução de mais 2 horas no processo. No que toca ao *master* do **M03**, o tempo total das operações de maquinagem passou para **1h39min**, o que representa um redução de 17 minutos e para o *master* do **M04**, foi conseguido um tempo total de **1h01min**.

Para as operações de maquinagem das abas dos *masters* para esta peça, existiu em parte delas otimização do *stock* de maquinagem e em outra parte foi formulada a estratégia de corte em placa, apresentada anteriormente.

4.2.6 Maquinagem do *master*

A maquinagem dos *masters* da *crash box* seguiu os mesmos príncipios, a mesma sequência e os mesmo parâmetros utilizados para a maquinagem dos *masters* do MTT e do MTL. Neste seguimento, não se justifica apresentar novamente as estratégias utilizadas. Assim, são apresentados

os resultados de maquinagem intermédios e finais, passando por mostrar a solução utilizada para corrigir pequenos defeitos que surgiram na superfície do *master*, consequente do aprisionamento de bolhas de ar na cola dos blocos poliméricos do *stock*.

O processo de maquinagem do *master* do M01/02 é apresentado de seguida, para que o leitor possa conhecer os diferentes resultados reais de corte, resultantes da sequência apresentada anteriormente por meio de ilustrações de simulação computacional. Estes resultados são apresentados da figura 4.65 à figura 4.68.

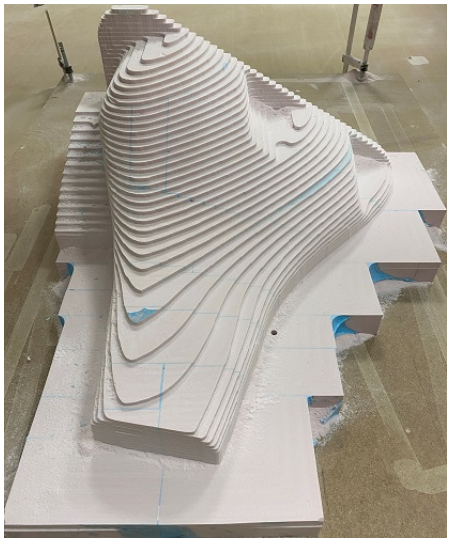


Figura 4.65: Resultado do desbaste do *master*.

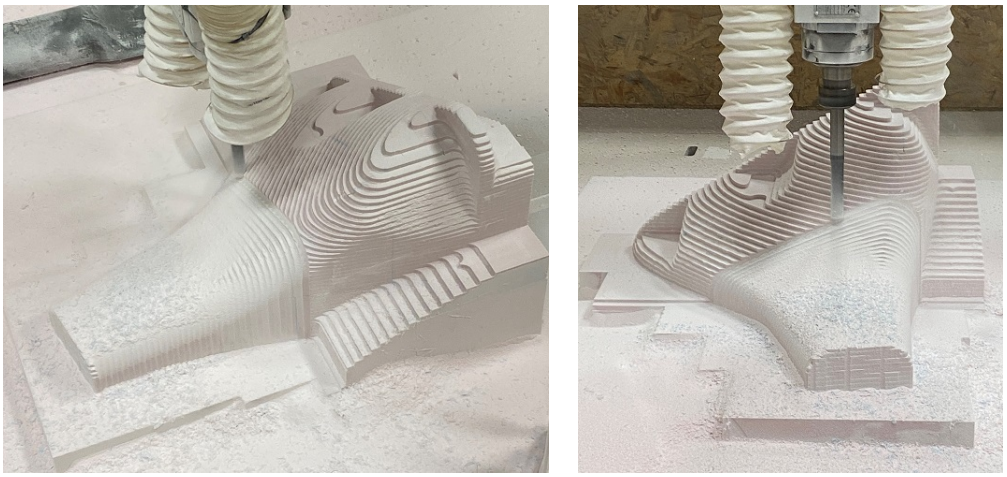


Figura 4.66: Transição de maquinagem do desbaste para a 1ª operação de acabamento.

A figura 4.65 apresenta o resultado da operações de desbaste sobre a superfície do *master*. Nesta figura é possível observar o caráter escadeado das linhas de corte, visto que este procedimento realiza passagens de corte sem alterar a sua posição no eixo *zz*, adapatando-se à forma do *master*. Já na figura 4.66 observa-se a transição do corte do desbaste e da 1ª operação de acabamento que acontece sem paragem entre operações uma vez que é utilizada a mesma ferramenta

de corte. O resultado da 1ª operação de acabamento é apresentado na figura 4.67, onde é possível identificar a uniformização das linhas de corte em paralelo ao longo da superfície da peça.



Figura 4.67: Resultado da 1ª operação de acabamento do *master*.

De seguida é realizada a troca de fresa para uma ferramenta de acabamento de topo esférico que efetua passagens em paralelo, tal como na 1ª operação de acabamento, mas com um avanço muito reduzido. Esta operação permite obter uma superfície com elevada qualidade como mostra a figura 4.68.

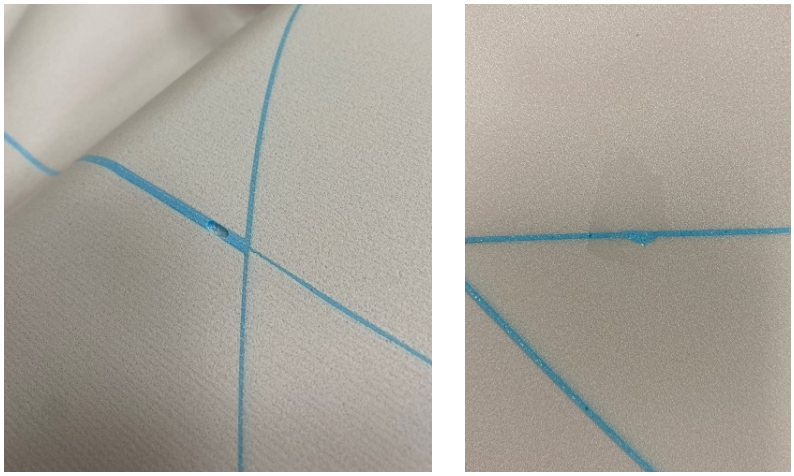


Figura 4.68: Resultado da 2ª operação de acabamento do *master*.

Após a maquinagem do *master* do M01/02 identificou-se uma falha de material polimérico na sua superfície de moldação, evidenciada na figura 4.69a. Esta porosidade resultou do aprisionamento de ar na "cola"produzida para montar o conjunto de blocos poliméricos do *stock* de

maquinagem. A mistura da resina epóxi com o catalisador leva à introdução de gases no seu interior, daí a necessidade de colocar o *stock* de maquinagem em vácuo durante a cura da "cola". Para este caso, o procedimento foi realizado em vácuo, no entanto, este não conseguiu remover todo o ar aprisionado na resina líquida, formando o poro identificado na figura 4.69a.

A solução para este defeito passa por preencher o poro com a mistura da resina líquida utilizada para colar o *stock*, que apresenta propriedades muito idênticas às do material do *master*. Após cura da resina, é feita uma nova passagem da 2ª operação de acabamento sobre a área em reparação, cujo resultado é apresentado na figura 4.69b. Apesar deste defeito não constituir um problema grave, visto ser de simples resolução, acaba por aumentar a demora do processo de maquinagem, o que não é desejável tratando-se de um processo contínuo.



(a) Poro superficial (b) Preenchimento do poro

Figura 4.69: Resolução de um defeito superficial provocado pelo aprisionamento de ar no interior da resina de colagem do *stock*.

Nas figuras 4.70 e 4.71 são apresentados os resultados de maquinagem dos *masters* designados nas suas legendas. Por último, a tabela 4.4 descreve a sequência de maquinagem a que cada *master* foi submetido e os tempos correspondentes a cada procedimento.

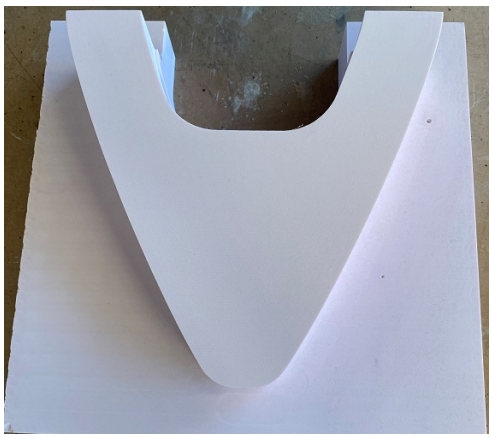


Figura 4.70: Resultado da maquinagem do *master* do M03.

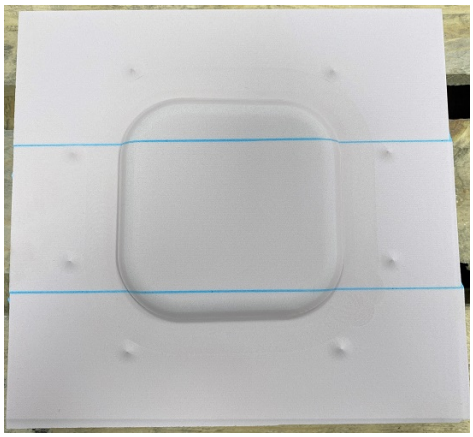


Figura 4.71: Resultado da maquinagem do *master* do M04.

Tabela 4.4: Descrição do tempo das operações de maquinagem dos *masters* do M01/02, M03 e M04.

Operações	**Tempo de maquinagem**		
	M01/02	**M03**	**M04**
Desbaste	2h05min	1h05min	10min
Acabamento da superfície de moldação	4h22min	25min	50min
Acabamento da superfície das abas	27min	5min	-
Contorno	8min	4min	1min
Total	7h02min	1h39min	1h01min

Após todo o processo de maquinagem dos *masters* são obtidas as abas que, apesar de não aparecerem individualmente nesta secção de texto, são mostradas de seguida sobre o respetivo *master* após acabamento e introdução dos elementos de fixação.

4.2.7 Operações de pós-maquinagem

As operações de pós-maquinagem apresentadas no capítulo 3 permitem obter uma superfície de moldação de baixa rugosidade, o que lhe confere elevada qualidade. Para além disso, são introduzidos, nesta etapa, os elementos de fixação das abas. O acabamento da superfície de moldação do *master* é importante para que o molde fabricado obtenha também uma superfície de moldação de alta qualidade, como referido anteriormente. Na figura 4.72 é possível identificar o elevado nível de acabamento conseguido na superfície do *master* do M01/02, e a montagem das abas sobre o seu corpo. Nesta etapa do processo é também aplicado, como referido anteriormente, selante e desmoldante na superfície de moldação do *master*.



Figura 4.72: Resultado final do *master* do M01/M02.

Por sua vez, a figura 4.73 apresenta o resultado da colagem de parte da aba lateral do *master* do M01/02, maquinada separadamente pelas razões anteriormente referidas. Esta estratégia teve um resultado positivo, visto que foram ultrapassadas as limitações do processo, foi conseguido um bom encosto entre as duas peças e um alinhamento perfeito das faces de moldação.

Na mesma figura é possível identificar o corte da superfície da aba junto à face vertical do *master*. Esta particularidade foi já analisada, anteriormente, durante a apresentação dos *masters* do molde de topo. Como referido, este corte de material acontece durante a operação de contorno de superfícies não planas, como é o caso da que se encontra na figura. Contudo, ao contrário do que se verifica nos *masters* do molde de topo, neste caso, a superfície "defeituosa"compõe parte da superfície de moldação do *master*, dado que será responsável por produzir a aba que irá fixar este molde ao M03.

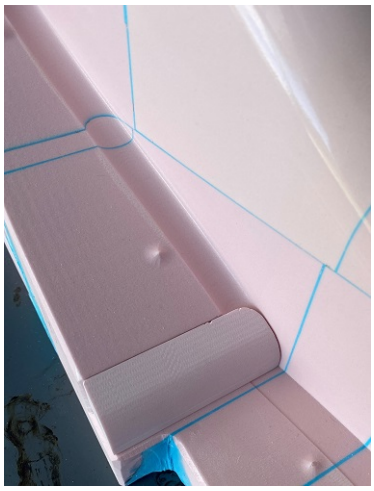


Figura 4.73: Pormenor do corte da aba do *master* do M01/02.

A resolução deste problema através de maquinagem compromete a rapidez do processo porque a solução encontrada requer a produção de uma aba adicional e posterior colagem sobre o *master*. Por este motivo, considerou-se que a solução para este defeito seria encontrada durante a laminação. Assim, no inicio da laminação, a cavidade de material em defeito é preenchida com tiras de fibra de carbono pré-impregnada, o que permite o seu enchimento ao nível do plano da superfície da aba. Este procedimento leva a que a aba do molde produzido contenha excesso de material. Contudo, este pode ser facilmente removido durante as operações finais de acabamento após cura, através da lixagem.

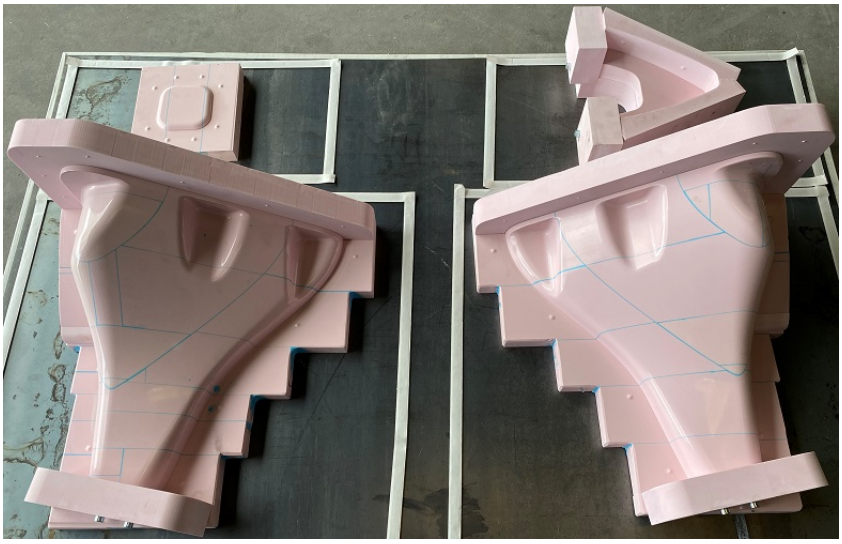


Figura 4.74: Resultado final do conjunto de *masters* para o molde da *crash box*.

4.2.8 Planificação

O projeto de planificação das laminas de fibra de carbono assume os precedentes referidos no capítulo 3 e também utilizados na produção do molde abordado anteriormente. A planificação da superfície dos *masters* do molde da *crash box* tem como resultado os desenhos apresentados nas figuras 4.75 e 4.76, referentes aos *masters* M01/02 e, M03 e M04, respetivamente.

A deformação de cada lamina após laminação sobre a superfície do *master* foi, individualmente, estudada para assegurar que todas obedecem à taxa de deformação máxima de 5%. Nos casos em que isto não se verifica é feito o ajuste da planificação ou a sua divisão, como foi o caso das planificações do *master* do M01/02 designadas por *top3* e *top4*, apresentadas na figura 4.75, previamente projetadas como lamina única. O *nesting* destas planificações foi realizado conjuntamente com a planificação de outros moldes de modo a obter a maior eficiência possível, quer a nível de tempo de corte quer a nível de rentabilidade do material.

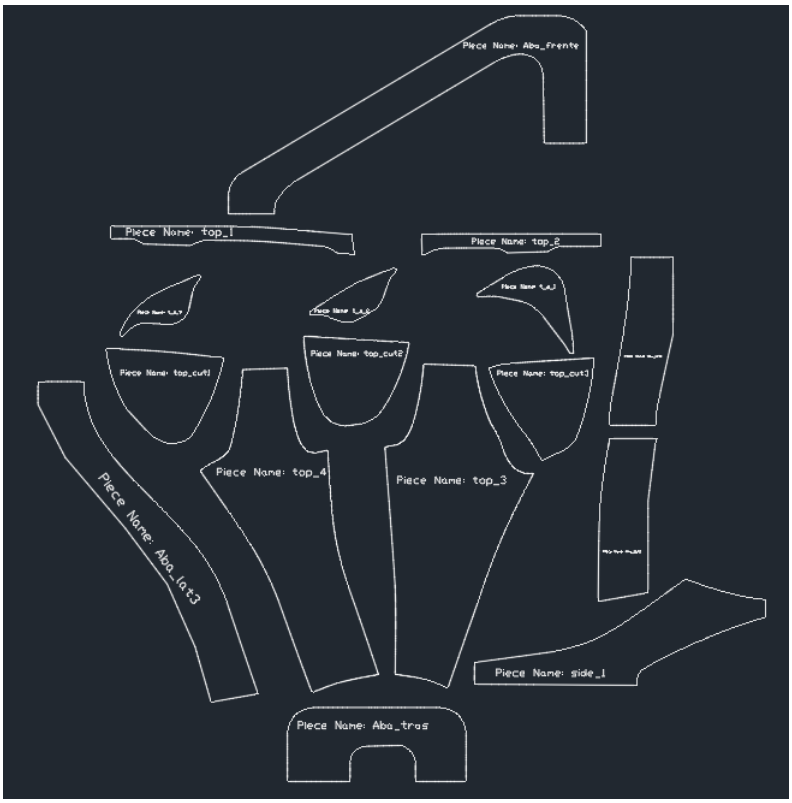


Figura 4.75: Planificação do *master* do M01/02.

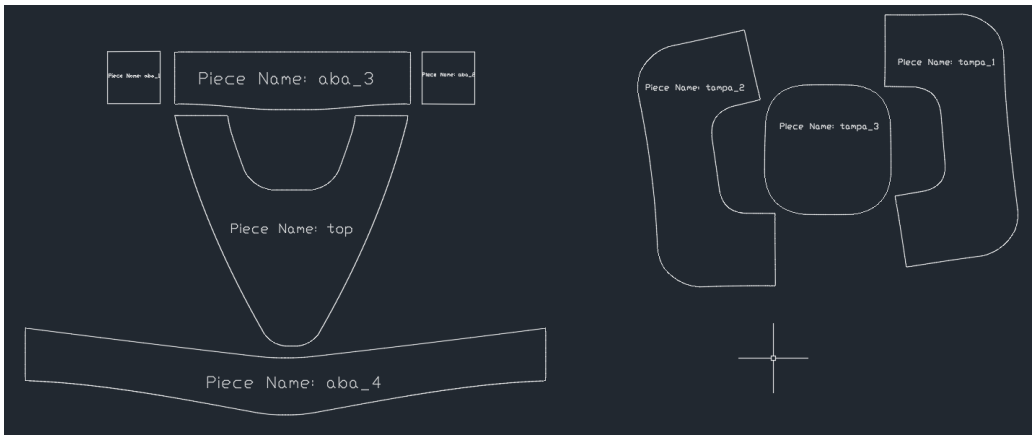


Figura 4.76: Planificação do *master* do M03, à direita, e do *master* do M04, à esquerda.

Na figura 4.77 observa-se o resultado após corte de parte das laminas de fibra de carbono, projetadas para a produção dos moldes da *crash box*, com a respetiva identificação. Adicionalmente, no anexo D podem ser consultados os desenhos de identificação das laminas à respetiva secção da superfície de moldação do *master*, importante para o processo de laminação.

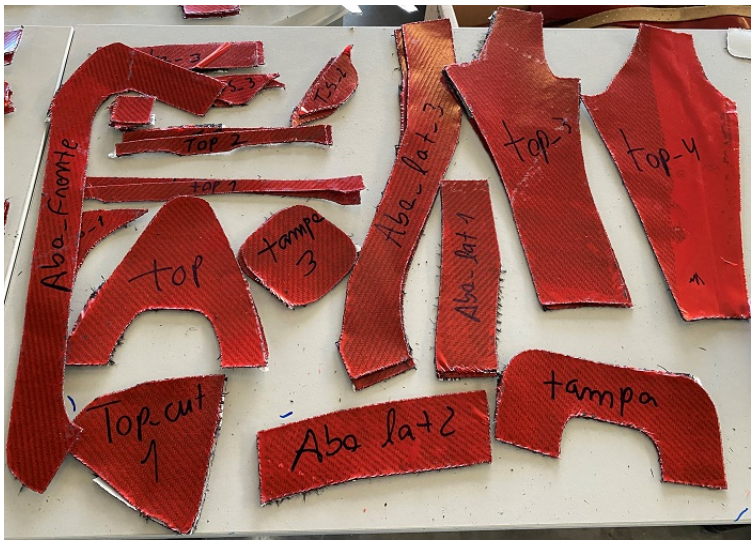


Figura 4.77: Laminas de fibra de carbono após corte.

4.2.9 Laminação

Após corte das laminas de fibra de carbono procede-se à sua laminação sobre as superfícies de moldação do *master*, utilizando as diversas regras e princípios referidos no capítulo 3 e novamente revistos na secção do texto referente à laminação dos moldes topo traseira e topo lateral. A figura 4.78 revela os *masters* do M01/02 após laminação da última camada da sequência, prontos a receber o saco de compactação final.

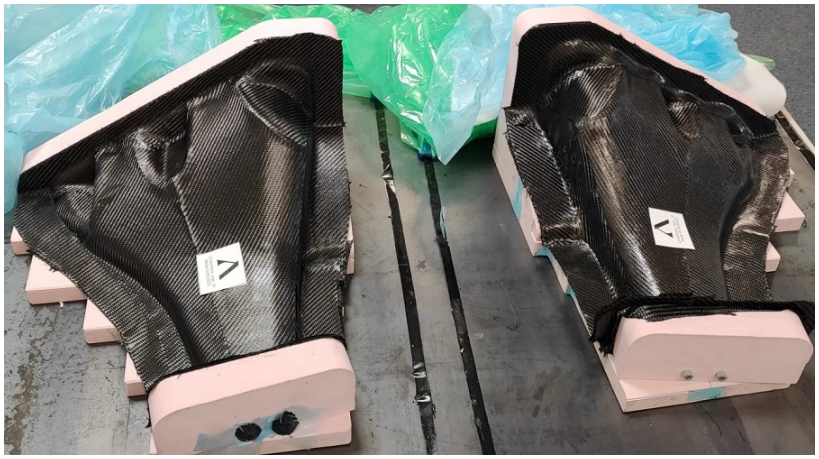


Figura 4.78: *Master* do M01/02 após ultima camada de laminado 205, com orientação a 0º.

Por fim, é aplicado o saco de vácuo de alta temperatura sobre os *masters* do M01/02, M03 e M04 como mostram as figuras 4.79, 4.80 e 4.81, respetivamente. Em seguida, sujeita-se a compactação ao *drop test*. Findo este processo, o laminado em vácuo segue para tratamento de cura.



Figura 4.79: Saco de compactação final do laminado do M01/02.



Figura 4.80: Saco de compactação final do laminado do M03.



Figura 4.81: Saco de compactação final do laminado do M04.

4.2.10 Desmoldagem

Tal como os moldes produzidos para o conjunto do *chassi* monocoque, estes são também submetidos a um processo de cura em vácuo a 55ºC durante 6 horas, em autoclave. Este realiza-se com rampas de subida de temperatura controladas e uma pressão exterior constante de 6 bar. A desmoldagem deve anteceder a pós-cura do compósito para que seja possível realizar um controlo de qualidade da peça, verficando o alinhamento do conjunto dos moldes 01/02, 03 e 04 e a qualidade da sua superfície de moldação, como referido no capítulo 3.

A desmoldagem requer a remoção das abas do *master*, uma vez que os seus pontos impõem uma contra-saída ao molde. Assim, a sua desmontagem é obrigatória para que se possa avançar com processo de desmoldagem, como mostram as figuras 4.82 e 4.83, referentes ao M01/02 e ao M03, respetivamente. O *master* do M04 não possui abas móveis pelo que este procedimento não se aplica, como indica a figura 4.86.



Figura 4.82: Remoção das abas do *master* do M01/02 para desmoldagem.

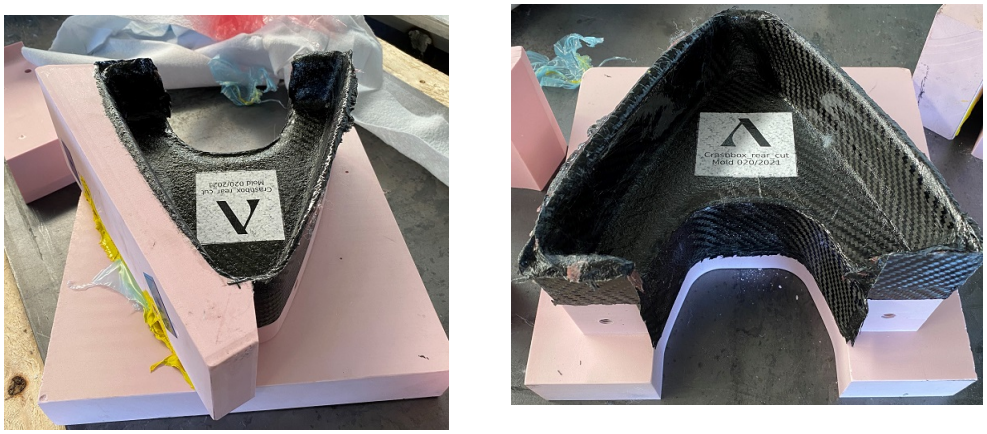


Figura 4.83: Remoção das abas do *master* do M03 para desmoldagem.

Na figura 4.84 é possível observar a qualidade de acabamento do molde 01/02 após cura e identificar o excesso de material presente na sua aba lateral, consequente do preenchimento da cavidade obtida durante a operação final de maquinagem. Esta aba é, posteriormente, submetida a operações de lixagem de modo a remover o compósito em excesso e, assim, obter uma superfície de encosto plana e uniforme.

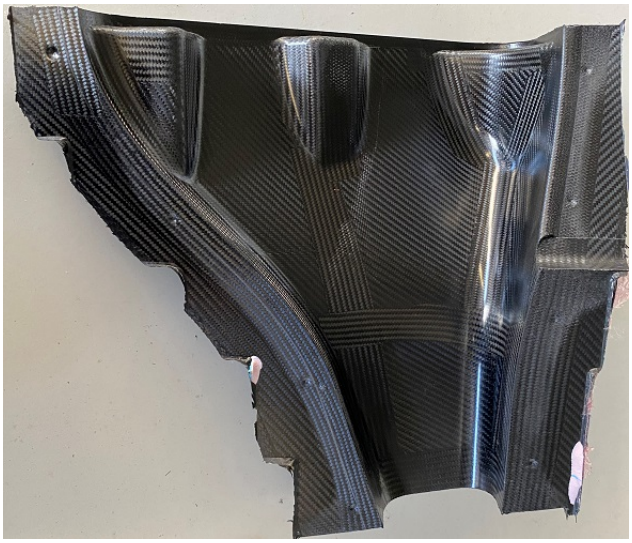


Figura 4.84: Superfície de moldação do M01/02.

Já na figura 4.85 observa-se a superfície de moldação do molde 03, onde se identifica a linha de final de peça projetada na aba e o resultado das indentações dos pontos projetados na aba do molde. Na figura 4.86 apresenta-se o molde 04, responsável por moldar a tampa traseira da *crash box*, após cura.

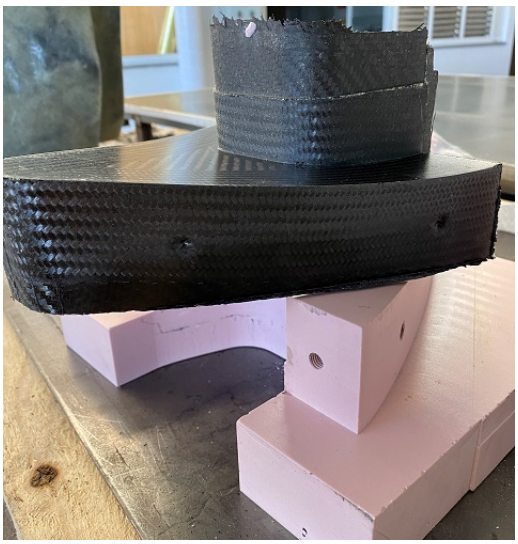


Figura 4.85: Superfície de moldação do M03.



Figura 4.86: Superfície exterior e de moldação do M04.

4.2.11 Acabamento e Pós-cura

A última etapa do processo tem como objetivo realizar o acabamento da superfície de moldação dos moldes produzidos, através das operações de lixagem, selagem e aplicação de desmoldante, referidas no capítulo 3. Para além disso, as abas são submetidas a operações de corte para remoção das esquinas vivas, como é visível por comparação da figura 4.84 com a figura 4.87. Terminadas estas operações, são realizadas as furações sobre as indentações das abas para que seja possível a fixação e aperto do conjunto, garantindo o alinhamento geométrico do molde. Deste modo, na figura 4.87 observam-se os moldes produzidos, agregados no conjunto que permite agora obter a forma da peça final da *crash box* traseira. Para além disso, é possível identificar a colocação do *breather*, de forma permanente, ao longo da superfície exterior do molde, visto que este elemento é necessário para o processo de fabrico da peça final e pode ser reutilizado por diversas utilizações.



Figura 4.87: Montagem e fixação dos moldes da *crash box*

Por fim, as figuras 4.88 e 4.89 mostram a forma final da superfície de moldação do molde da *crash box* traseira, onde é possível observar a elevada qualidade de acabamento superficial e o alinhamento do conjunto de moldes, cuja fronteira se encontra praticamente impercetível. Assim, resta submeter o molde ao tratamento de pós-cura, num forno ventilado, para que o compósito desenvolva a sua temperatura de transição vítrea. Desta forma, o material obtém propriedades que o tornam capaz de resistir à fadiga térmica inerente do processo de produção das peças finais.

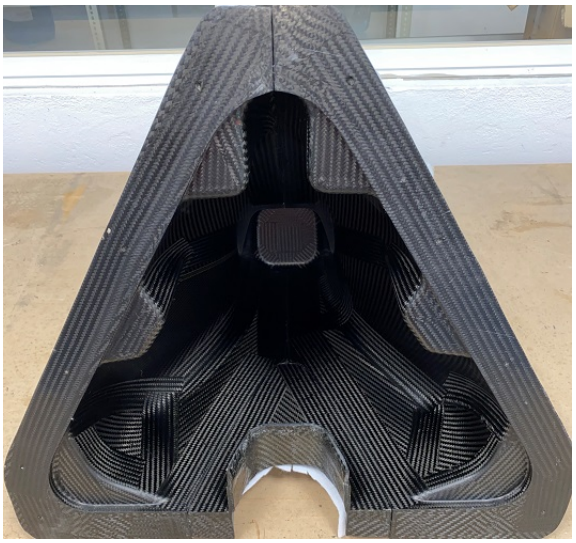


Figura 4.88: Resultado final da superfície de moldação do molde da *crash box* traseira.

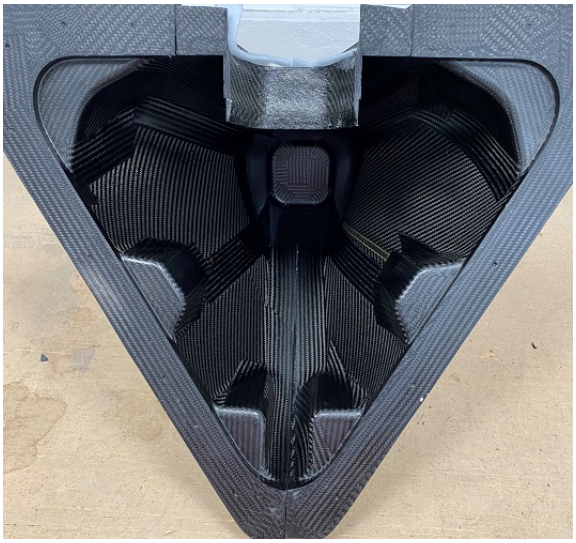


Figura 4.89: Resultado final da superfície de moldação do molde da *crash box* traseira.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

A realização deste projeto revelou-se um desafio muito gratificante, quer a nível académico quer a nível pessoal. A integração numa equipa multidisciplinar, dedicada e com um enorme *know how* acerca do universo dos compósitos contribuiu em grande escala para a aprendizagem e para o sucesso deste projeto.

A temática específica abordada neste trabalho carece de informação bibliográfica. Esta adversidade dificultou, principalmente, a iniciação ao projeto de desenvolvimento dos *masters* que levaram à produção dos moldes, uma vez que tanto o processo utilizado, como as suas particularidades eram inicialmente desconhecidas, daí a importância da referida integração. Uma vez satisfeitos os objetivos principais do projeto e, ainda, os objetivos suplementares que surgiram numa fase posterior, é possível afirmar que este trabalho foi realizado com sucesso. Este sucesso está intrinsecamente ligado à exigência de cada etapa do processo desenvolvido, desde o desenvolvimento do *master* até ao tratamento de cura do compósito. Posto isto, é de realçar que:

- O desenho do *master*, sendo a primeira tarefa, tem de ser cuidadosamente elaborado para garantir que este contém todos os elementos necessários à produção do molde. Além disso, o seu desenvolvimento deve estar intimamente relacionado com os recursos de maquinagem existentes;

- A estratégia de maquinagem é fundamental para fabricar um *master* com elevada qualidade de acabamento e que corresponda às exigências dimensionais do projeto;

- A par do procedimento de maquinagem, a otimização do *stock* aumentou a produtividade desta etapa de produção, com resultados que possibilitaram a poupança de mais de 50% de volume de material e a redução de mais de 10 horas do tempo de maquinagem;

- É importante que a construção do *stock* de maquinagem obedeça aos fundamentos indicados como, a utilização da resina adesiva recomendada pelo fabricante e a cura em vácuo;

- A planificação das laminas de carbono deve garantir uma taxa de deformação inferior a 5% por toda a superfície do laminado. Este critério é importante para que não surjam no molde

zonas com carência de reforço fibroso e, consequentemente, com propriedades mecânicas inferiores às demais secções do compósito;

- O *nesting* da planificação torna possível o corte das diversas laminas, numa máquina CNC de 2 eixos, enquanto é obtido o máximo rendimento do rolo de fibra prepreg utilizado para o efeito;
- É primordial que o processo de laminação respeite a sequência de colocação das laminas e de compactação do compósito, seguindo as regras indicadas. Desta forma, é possível assegurar a consistência das propriedades dos moldes de determinado conjunto;
- Após cura do compósito em autoclave, foram obtidos moldes de elevada qualidade, quer a nível estético como estrutural, capazes de produzir as peças para as quais foram projetados, cumprindo, assim, o objetivo principal deste projeto.

Por fim, resta referir quatro propostas interessantes para a continuidade do desenvolvimento do tema tratado nesta dissertação:

- Num primeiro momento, seria interessante a continuidade do desenvolvimento dos moldes para a produção do automóvel;
- Após o desenvolvimento destes moldes, a segunda proposta passa por estudar e elaborar um plano de produção para as peças finais a partir dos moldes produzidos, definindo as suas planificações, o corte das laminas e o processo de laminação;
- Em terceiro lugar, surge o desenvolvimento deste projeto para um processo de produção de compósitos alternativo como, por exemplo, o método de infusão de resina;
- Por último, considera-se que deve ser estudada a introdução dos processos de fabrico aditivo na produção de peças em compósito. Este estudo teria como base o processo FDM (mais económico), a partir do qual seria produzido o *master*. Por sua vez, o molde seria fabricado por vazamento de resina epóxi líquida sobre o *master*. Após cura da resina, o molde em epóxi seria laminado de modo a produzir uma peça em compósito.

Bibliografia

[1] Albertino Arteiro. *Composite Systems: Constituent materials and semi-products*. 2020.

[2] R.P.L Nijssen. *Composite Materials: An Introduction*, volume One. Toray Advanced Composites, 2015.

[3] Potyrała P.B. *Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction*. 2011.

[4] CES Edupack software. Granta design limited. Cambridge, UK, 2020.

[5] Thingujam Jackson Singh and Sutanu Samanta. Characterization of kevlar fiber and its composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4):1381–1387, 2015. 4th International Conference on Materials Processing and Characterzation.

[6] Paulo Jorge da Costa Parente Novo. *Pultrusion of thermoplastic composites*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.

[7] Mohammad R.M. Jamir, Mohammad S.A. Majid, and Azduwin Khasri. Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications. In Mohammad Jawaid and Mohamed Thariq, editors, *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pages 155–170. Woodhead Publishing, 2018.

[8] Ng Lin Feng, Sivakumar Dhar Malingam, and Siva Irulappasamy. 4 - bolted joint behavior of hybrid composites. In Mohammad Jawaid, Mohamed Thariq, and Naheed Saba, editors, *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pages 79–95. Woodhead Publishing, 2019.

[9] Jones RM. Mechanics of composite materials. Washington, DC, Hemisphere Publishing Corporation, 1975.

[10] Pramod Chaphalkar and Ajit D. Kelkar. Classical laminate theory model for twill weave fabric composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(9):1281–1289, 2001.

[11] LOUIS C. DORWORTH. Porosity, voids and bridging in prepreg autoclave and vacuum bag-only laminates. *Composites World*, 2021. Retirado de:

https://www.compositesworld.com/articles/porosity-voids-and-bridging-in-prepreg-autoclave-and-vacuum-bag-only-laminates.

[12] Marya Raji, Hind Abdellaoui, Hamid Essabir, Charles-Amani Kakou, Rachid Bouhfid, and Abou el kacem Qaiss. Prediction of the cyclic durability of woven-hybrid composites. In Mohammad Jawaid, Mohamed Thariq, and Naheed Saba, editors, *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pages 27–62. Woodhead Publishing, 2019.

[13] P.K. Mallick. Thermoset–matrix composites for lightweight automotive structures. In P.K. Mallick, editor, *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pages 208–231. Woodhead Publishing, 2010.

[14] Leonardo Martinez. *Thermoset and Thermoplastic Composites*. Junho 2014. Retirado de : https://www.instron.us/en-us/our-company/press-room/blog/2014/april/thermoset-and-thermoplastic-composites-what-is-the-difference.

[15] U. Ramamurty. Mechanical testing methods of fibers and composites. In K.H. Jürgen Buschow, Robert W. Cahn, Merton C. Flemings, Bernhard Ilschner, Edward J. Kramer, Subhash Mahajan, and Patrick Veyssière, editors, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pages 5271–5274. Elsevier, Oxford, 2001.

[16] João Pedro Martins de Silva Luis. *Effect of out-time aging in composite prepreg material*. 2014.

[17] MARILYN W. WARDLE. 2.06 - aramid fiber reinforced plastics—properties. In Anthony Kelly and Carl Zweben, editors, *Comprehensive Composite Materials*, pages 199–229. Pergamon, Oxford, 2000.

[18] Laurence W. McKeen. 12 - effect of radiation on the properties of laminates and composites. In Laurence W. McKeen, editor, *The Effect of Radiation on Properties of Polymers*, Plastics Design Library, pages 393–408. William Andrew Publishing, 2020.

[19] Albertino Arteiro. *Composite Systems: Processing technologies*. 2020.

[20] Ru-Min Wang, Shui-Rong Zheng, and Ya-Ping Zheng. Forming technology of polymer matrix composites. In Ru-Min Wang, Shui-Rong Zheng, and Ya-Ping Zheng, editors, *Polymer Matrix Composites and Technology*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pages 253–548. Woodhead Publishing, 2011.

[21] K. Balasubramanian, Mohamed T.H. Sultan, and N. Rajeswari. Manufacturing techniques of composites for aerospace applications. In Mohammad Jawaid and Mohamed Thariq, editors, *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pages 55–67. Woodhead Publishing, 2018.

[22] CompositesLab. Spray-up, 2021. http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/open-molding/spray-up/.

[23] K.-T. Hsiao and D. Heider. 10 - vacuum assisted resin transfer molding (vartm) in polymer matrix composites. In Suresh G. Advani and Kuang-Ting Hsiao, editors, *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pages 310–347. Woodhead Publishing, 2012.

[24] A Goren and C Atas. Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding. *Archives of materials Science and Engineering*, 34(2):117–120, 2008.

[25] Ned Popham. 8 - resin infusion for the manufacture of large composite structures. In Richard Pemberton, John Summerscales, and Jasper Graham-Jones, editors, *Marine Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pages 227–268. Woodhead Publishing, 2019.

[26] FibreGlast. Vacuum bagging equipment and techniques for room-temp applications, 2021. Retirado em Fevereiro de 2021: https://www.fibreglast.com/product/vacuum-bagging-equipment-and-techniques-for-room-temp-applications.

[27] CompositesLab. Vaccum bag molding, 2021. Retirado em Fevereiro de 2021: http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/vacuum-bag-molding/.

[28] Saptadi Darmawan, Kurnia Sofyan, Gustan Pari, and Krisdianto Sugiyanto. Effect of activated charcoal addition on formaldehyde emission of medium density fiberboard 100-111. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 7, 01 2010.

[29] GeneralPlastics. Tooling molds user guide, 2019. Retirado de: https://www.generalplastics.com/wp-content/uploads/2019/12/General-Plastics-LAST-A-FOAM-Tooling-Molds-User-Guide.pdf.

[30] Trelleborg. Ep678 tooling board, 2020. Retirado de: https://www.trelleborg.com/en/applied-technologies/products-and-solutions/tooling-solutions-and-materials/epoxy-tooling-boards.

[31] Trelleborg. Ep700 tooling board, 2020. Retirado de: https://www.trelleborg.com/en/applied-technologies/products-and-solutions/tooling-solutions-and-materials/epoxy-tooling-boards.

[32] Toray Advanced Composites. Tooling prepeg processing guide: Composite tooling. *Ambertool ®*, 2019. Retirado de: https://www.toraytac.com.

[33] EasyComposites. Prepreg reinforcements, 2021. Retirado de: https://www.easycomposites.co.uk/prepreg-reinforcements.

[34] Toray Advanced Composites. Product data sheet: Toray ambertool®hx56. *Ambertool* ®, 2021. Retirado de : https://www.toraytac.com.

Anexo A

Propriedades da Resina Epoxídica 570A/570B

Base Group Limited
Ashville Way,
Whetstone, Leicestershire
LE8 6NU, UK
Tel: +44 116 286 5073
Fax: +44 116 275 3128
Email: info@base-group.co.uk
www.base-group.co.uk

570C KIT - LOW DENSITY TOOLING BOARD ADHESIVE
Consisting of 570 Part A and 570 Part B OR 571 Part B

570 Part A (Resin) combined with 570 Part B (Hardener) or 571 Part B (Pigmented hardener) delivers a medium speed, low density, epoxy system designed for use where a Coefficient of Thermal expansion (CTE) close to 978 Tooling Board is required. However it may be used in many other bonding applications. The system gels at room temperature, but requires a post cure to achieve maximum properties.

HANDLING PROPERTIES	VALUE	TEST METHOD
Resin Density, g/cc	0.76 (±0.03)	Theoretical value
Hardener Density, g/cc	1.02 (±0.03)	Theoretical value
Resin Viscosity @ 50ºC, cps	1,200 (±200)	ISO 2884
Hardener Viscosity @ 25ºC, cps	1,800 (±200)	ISO 2884
Mix Ratio By Weight (Resin: Hardener)	100 : 20	Calculated
Mix Ratio By Volume (Resin: Hardener)	100 : 15	Calculated
Gel Time @ 25ºC, 150g mass, minutes	60 (±5)	Internal method
Thin film Gel Time @ 25ºC, hours	4 - 5	Internal method

PHYSICAL PROPERTIES	VALUE	TEST METHOD
Colour (570A/570B)	Blue	Visual
Colour (570A/571B)	Green	Visual
Shore D Hardness	70 (±2)	ISO 868
Tg2 (DSC), RT Cure, ºC	45 (±5)	ISO11357
Ultimate Tg2 (DSC), ºC	101 (±5)	ISO11357

Store at 15-40ºC in a dry place. After use, tightly reseal.
The resin component may crystallize during storage. If crystallized, vent container and heat to 55-65ºC until crystals dissolve. Stir well after product has liquefied.
Always use clean dry tools for mixing and applying. Mix according to the mix ratio stated for the specific product as listed on the front page. Mix together thoroughly and use immediately. Material temperatures should not be below 18ºC when mixing.

SAFETY and HANDLING

Please refer to the Safety Data Sheets (SDS) for the most up to date Safety and Handling information.

Exposure to these materials represents hazards typical of all epoxy resins and amine hardeners. Exposure should be minimised and avoided through the use of proper Personal Protective Equipment (PPE) and appropriate manufacturing controls. All persons who use, store, or transport these materials should properly understand the handling precautions and recommendations as stated in the SDS.

The test data and results set forth herein are based on laboratory work and do not necessarily indicate the results that the buyer or user will attain. Base Group Limited makes no warranty expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular use. Under no circumstances will Base Group Limited be liable for incidental, consequential or other damages, alleged negligence, breach of warranty, strict liability, tort or any other legal theory arising out of the use or handling of this product.

Figura A.1: Ficha técnica da resina epóxi e catalisador 570A/570B.

Anexo B

Ciclos de cura e pós-cura da fibra de carbono pré-impregnada HX56

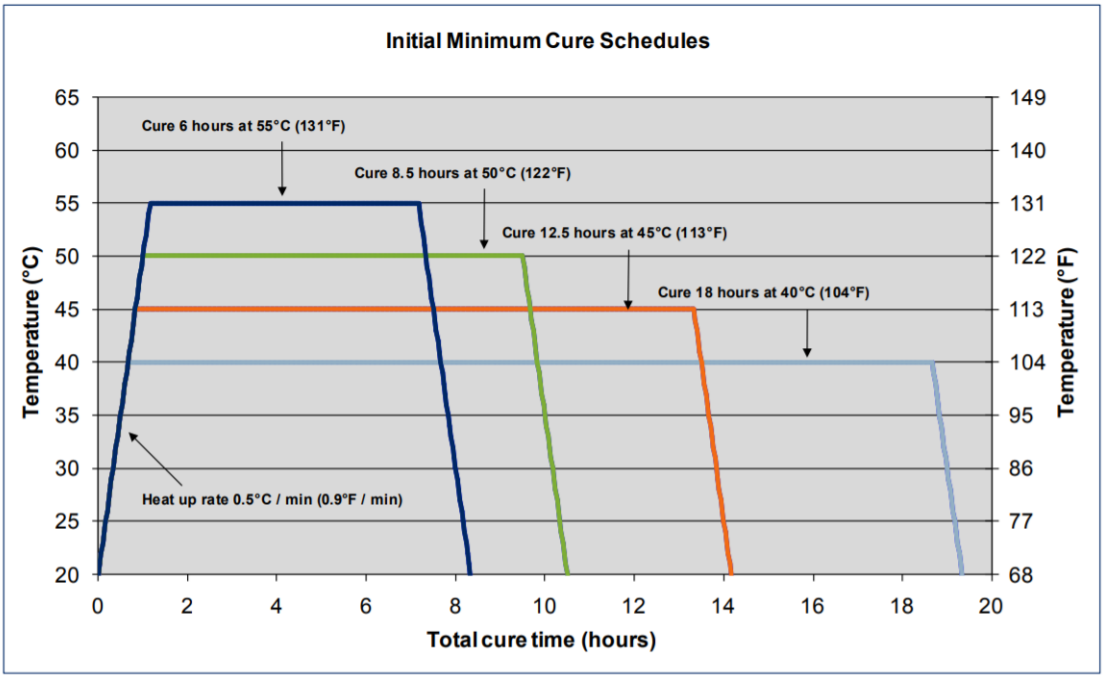


Figura B.1: Ciclo de cura para diferentes temperaturas de cura.

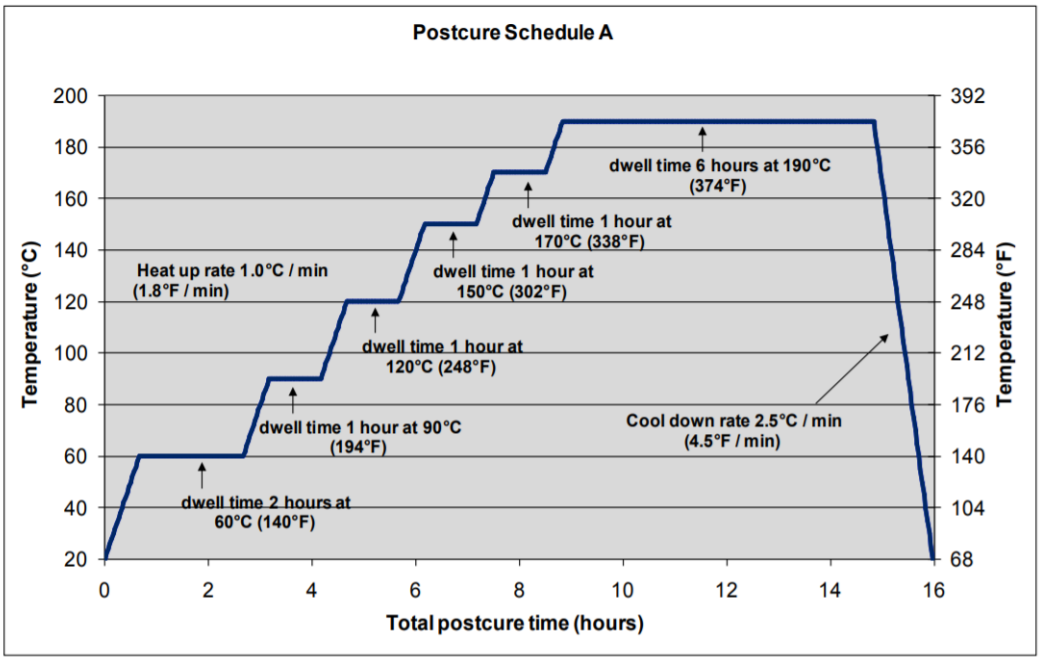


Figura B.2: Ciclo de pós-cura com estágios de uniformização de temperatura.

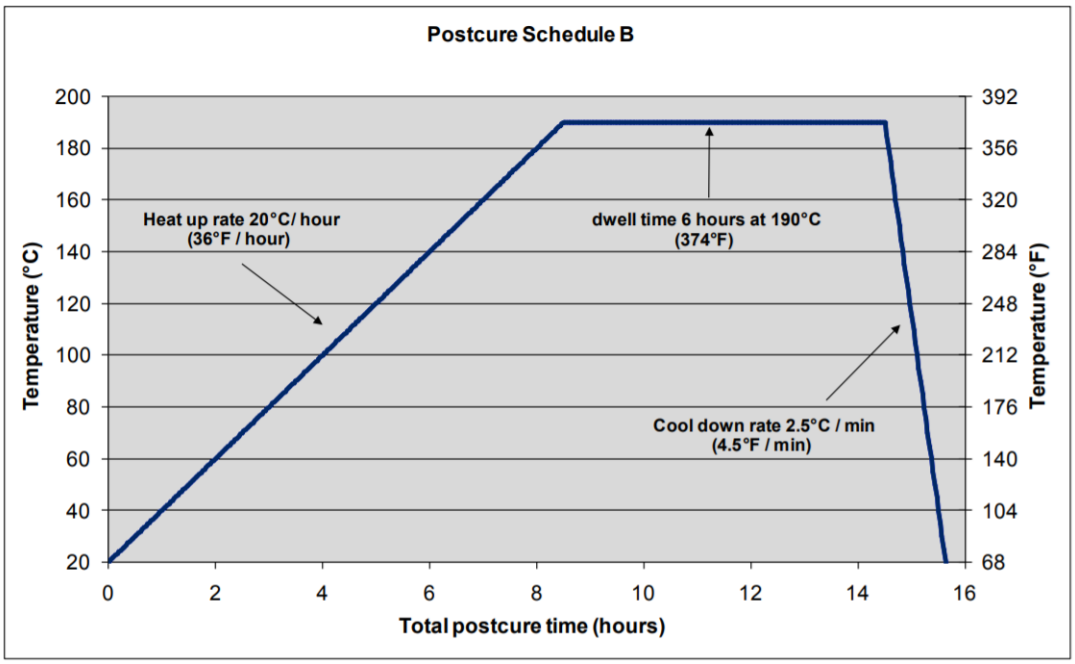


Figura B.3: Ciclo de pós-cura com rampa de aquecimento.

Anexo C

Desenhos 2D do *Stock* de maquinagem

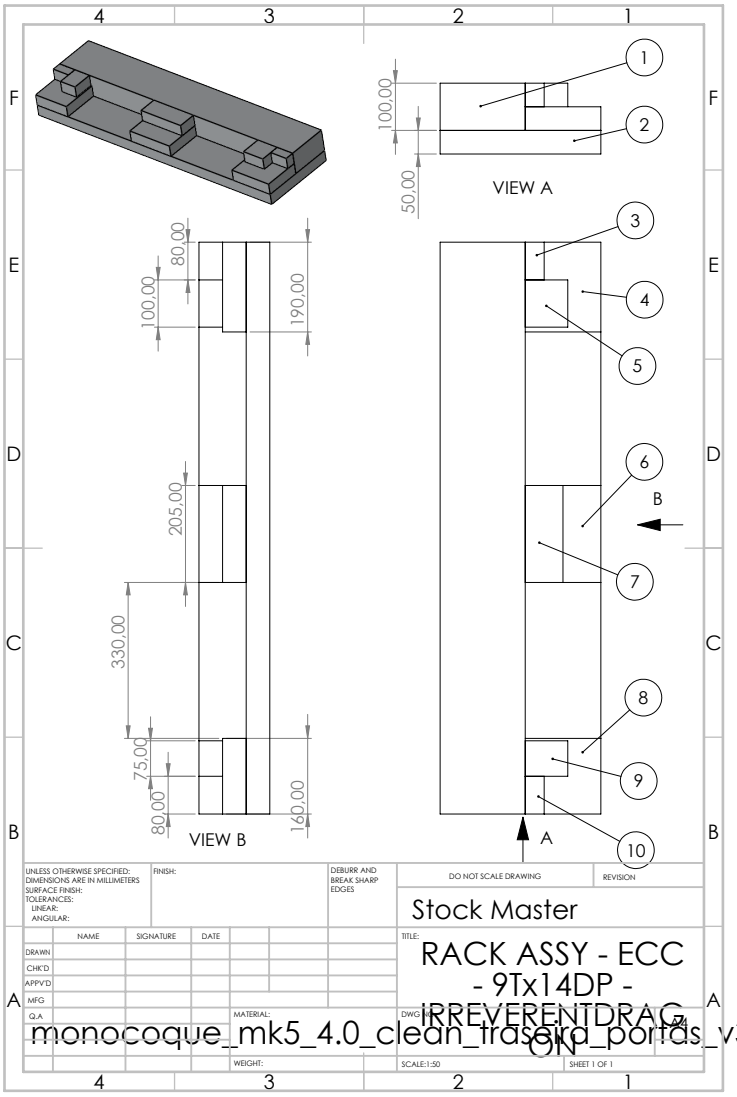


Figura C.1: Desenho do *stock* de maquinagem do *master* do molde topo traseira.

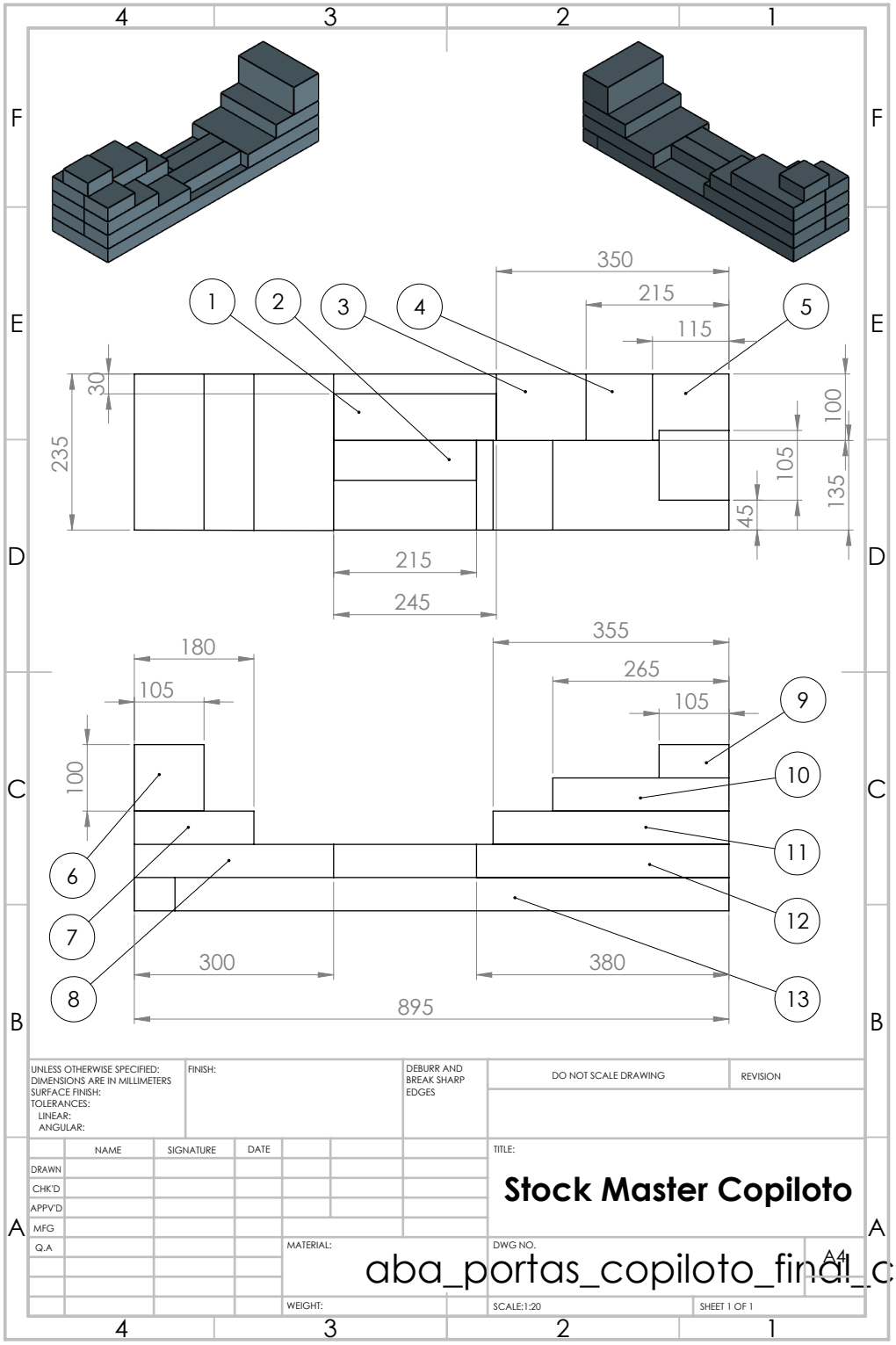


Figura C.2: Desenho do *stock* de maquinagem do *master* do molde topo lateral.

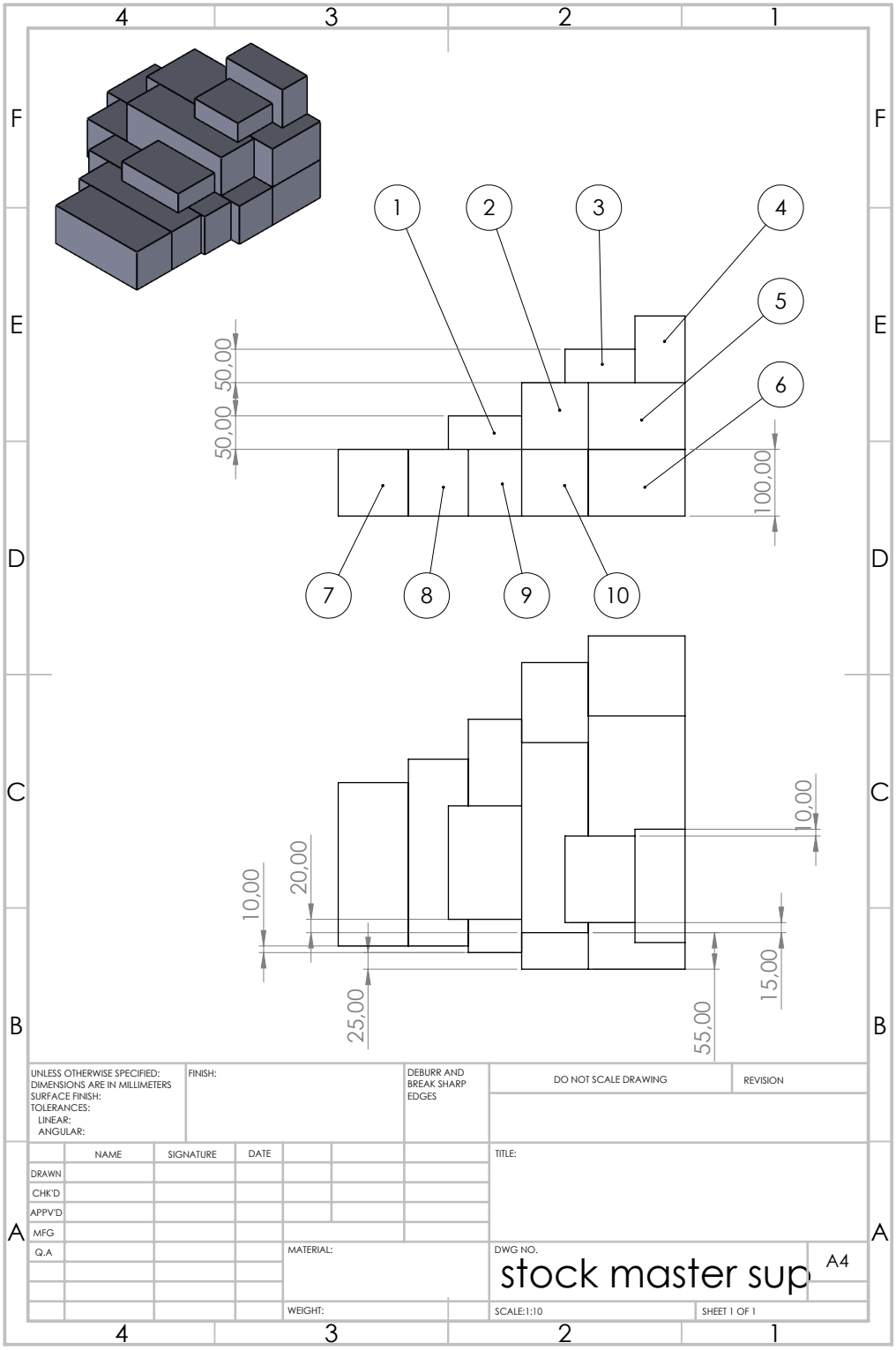


Figura C.3: Desenho do *stock* de maquinagem do *master* do M01/02 da *crash box*.

Anexo D

Desenhos de identificação das planificações para laminação

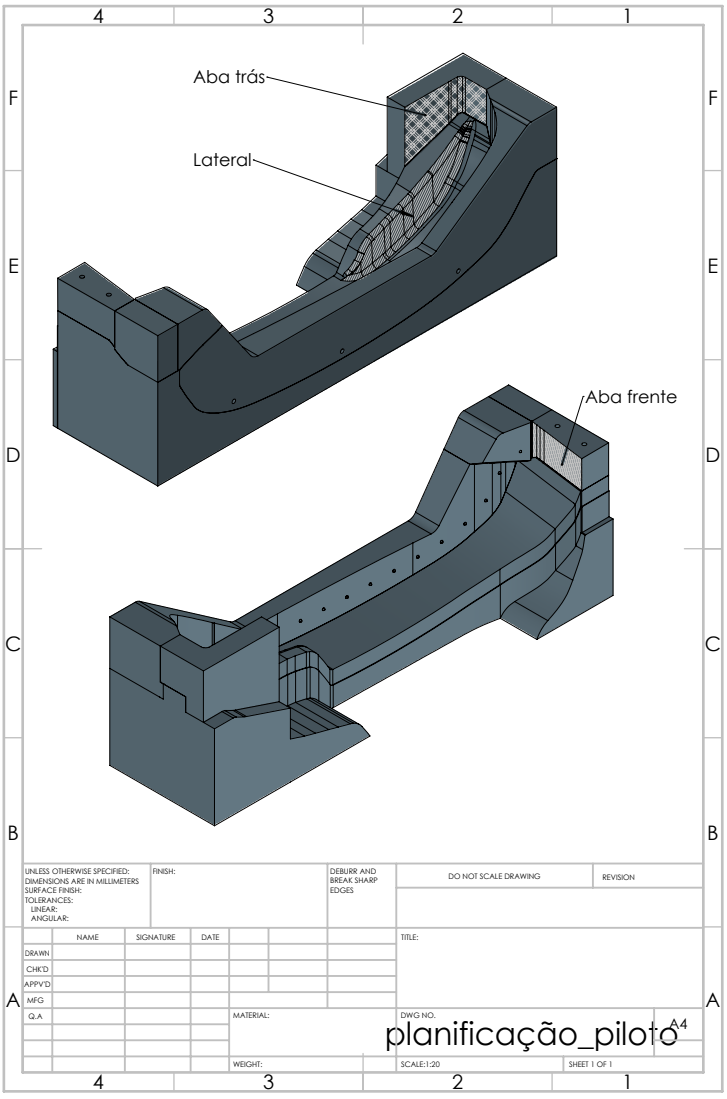


Figura D.1: Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do MTL - 1/3.

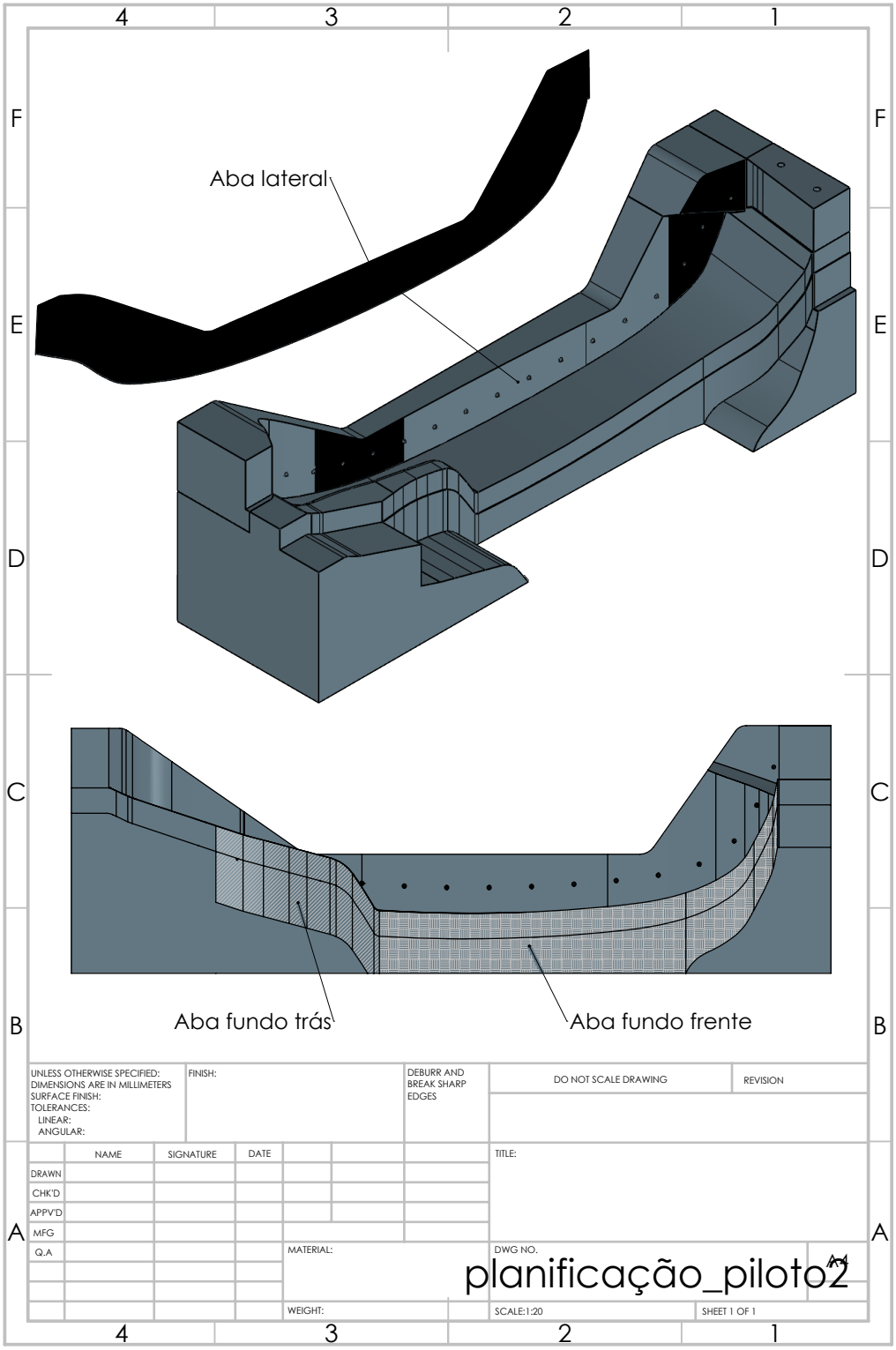


Figura D.2: Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do MTL - 2/3.

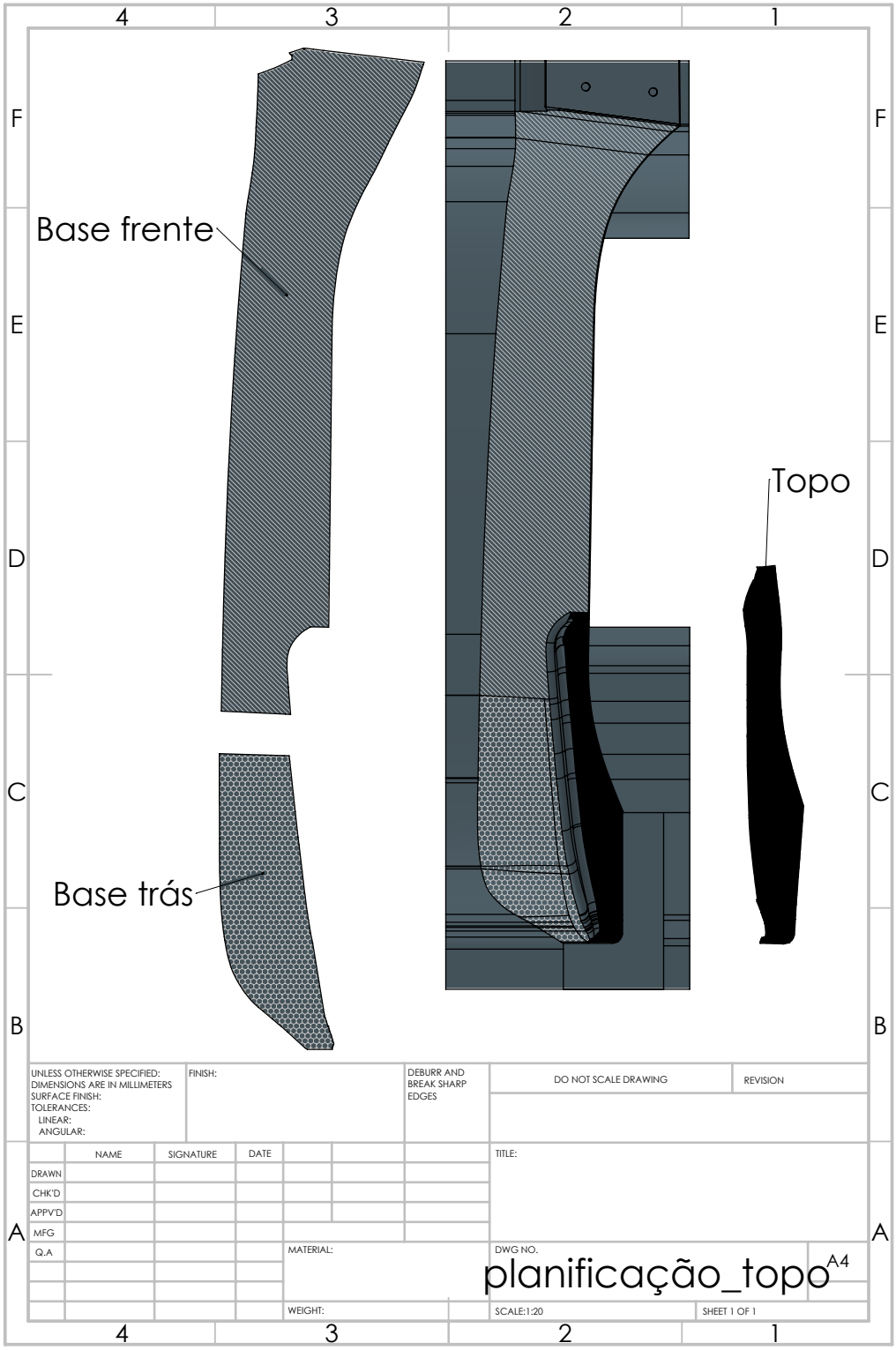


Figura D.3: Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do MTL - 3/3.

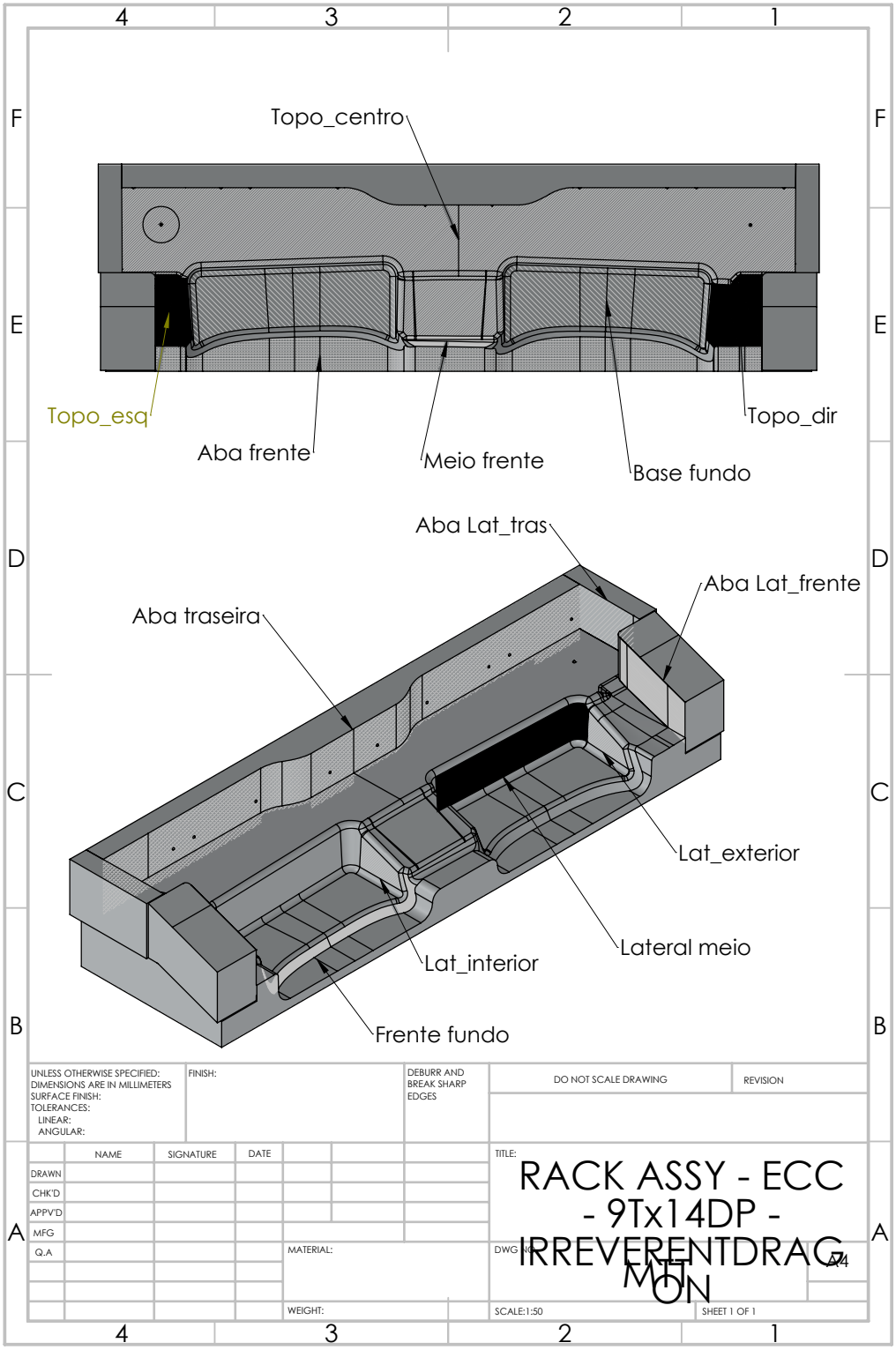


Figura D.4: Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do MTT.

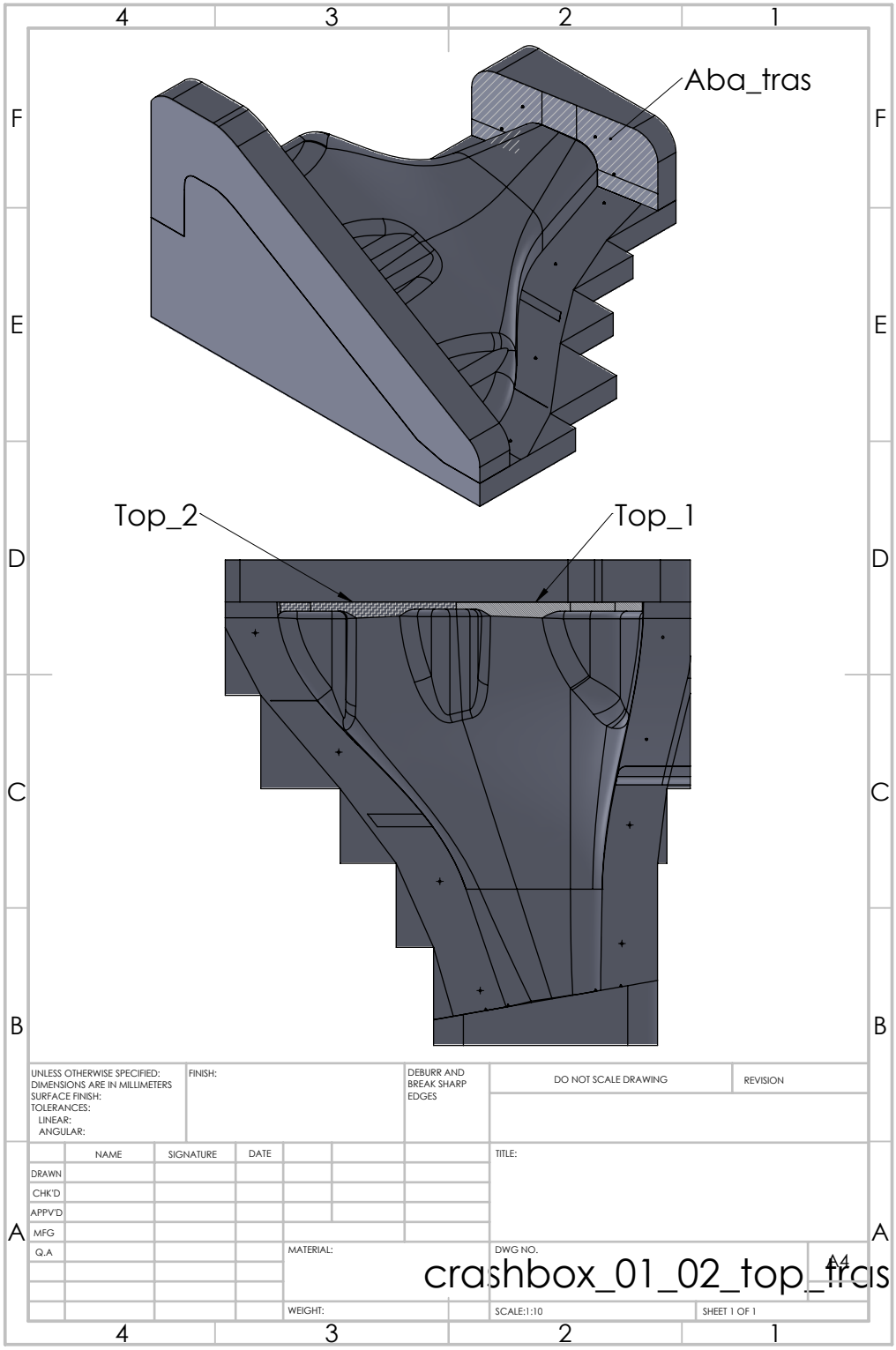


Figura D.5: Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do M01/02 - 1/3.

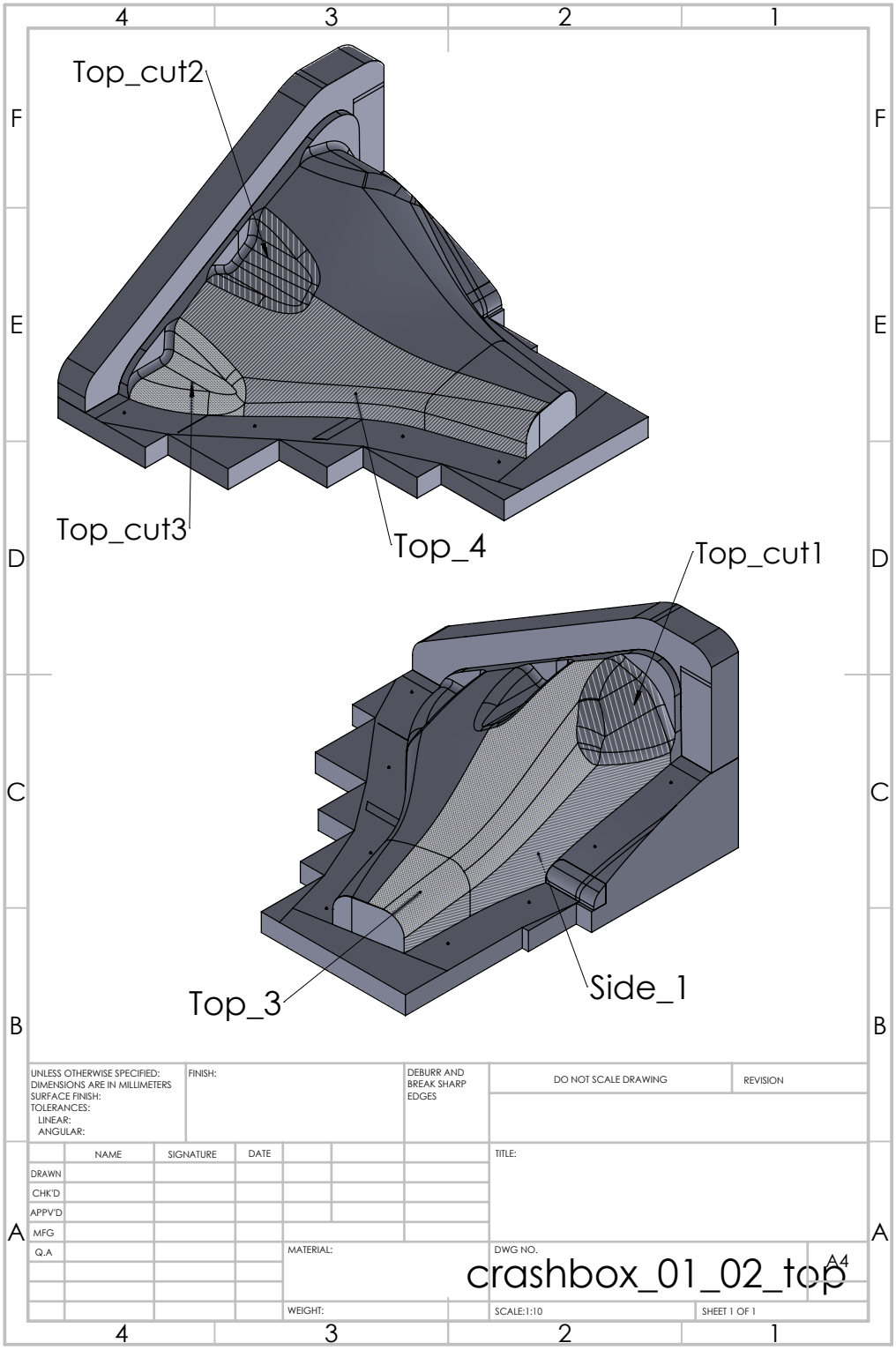


Figura D.6: Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do M01/02 - 2/3.

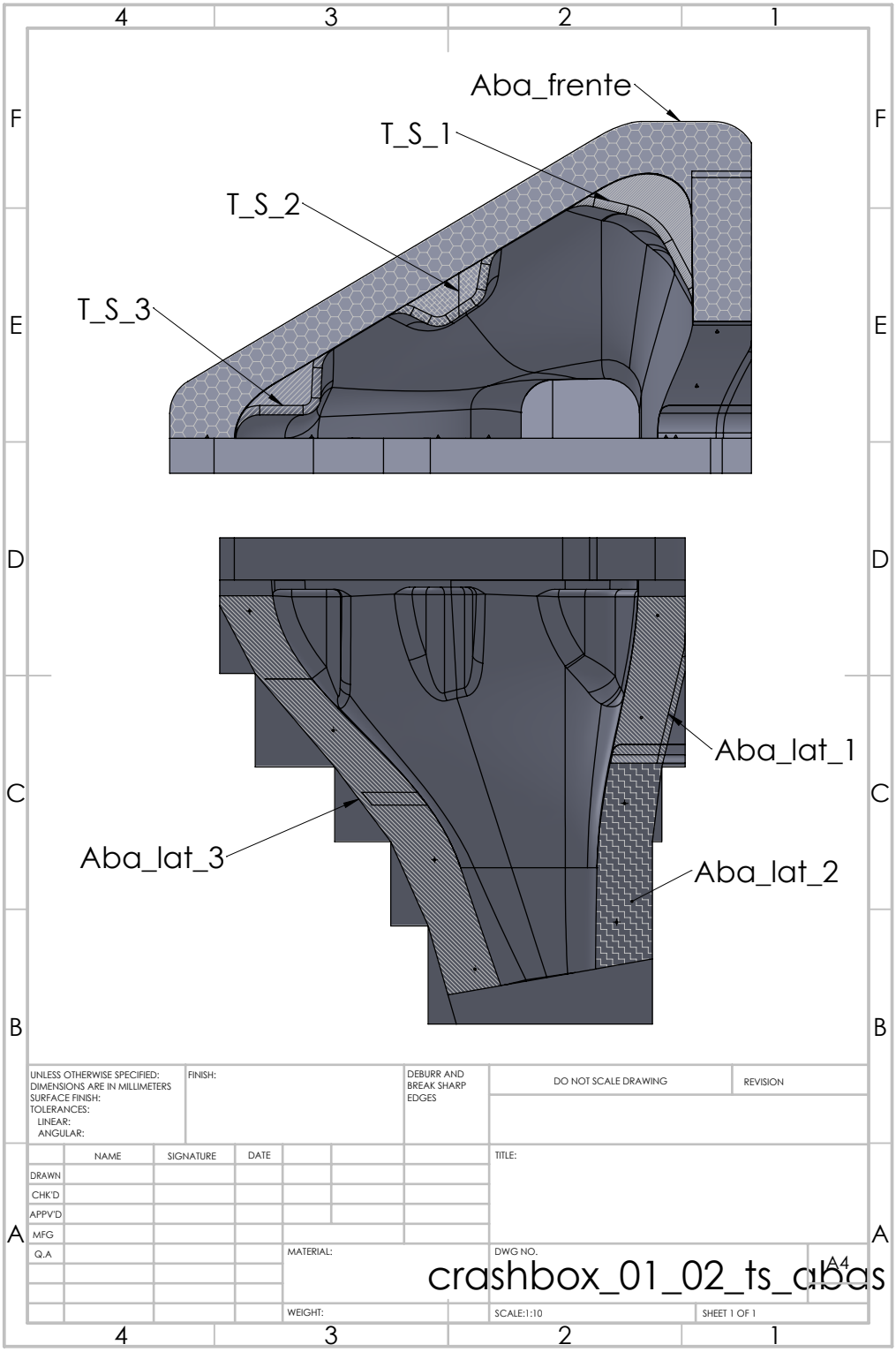


Figura D.7: Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do M01/02 - 3/3.

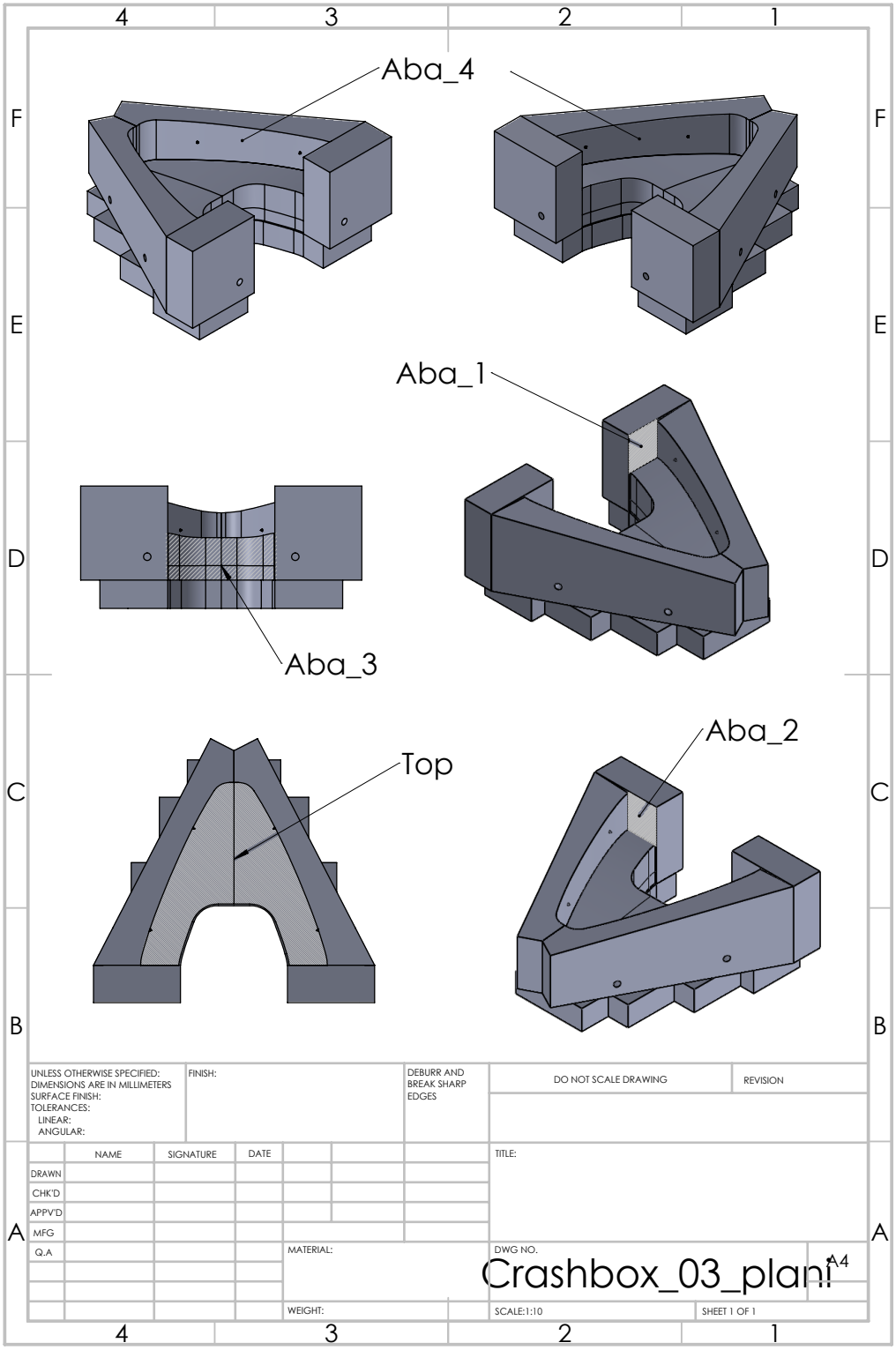


Figura D.8: Desenho de identificação da secção das laminas para o *master* do M03.