



TÉCNICO
LISBOA

**Projecto e manufactura de um componente em material
compósito reforçado por fibras de basalto para aplicação
num protótipo eléctrico de alta eficiência**

Diogo Tomé Fernandes Abreu Ribeira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis
Prof^a. Rosa Maria Marquito Marat Mendes

Júri

Presidente: Prof. João Orlando Marques Gameiro Folgado

Orientador: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Vogal: Prof. Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares

Novembro 2019

Resumo

Com o aumento da utilização de materiais compósitos verifica-se uma crescente consciencialização na utilização dos mesmos, maioritariamente devido à dificuldade de reutilização e reciclagem que estes apresentam. Nesta vertente, os materiais compósitos reforçados por fibras de basalto apresentam-se como uma possível solução, apresentando propriedades mecânicas superiores aos reforçados por fibras de vidro e, como vantagem mais relevante, a sua facilidade de reciclagem. No entanto, sendo no processo de manufactura das fibras apenas utilizada a rocha (basalto), sem aditivos, as propriedades mecânicas finais variam conforme o local onde esta é recolhida, justificando-se um estudo que permita a obtenção das propriedades mecânicas do compósito específico.

Esta dissertação visa avaliar a utilização de componentes mecânicos neste material compósito como substituição de outros originalmente produzidos em alumínio, neste caso, um suporte presente no sistema de direcção de um protótipo eléctrico. O ponto de partida para este estudo foi a análise do comportamento do suporte original sob influência de um carregamento específico. Uma vez obtidos esses dados, foram efectuadas simulações computacionais (Siemens NX 12) com as propriedades mecânicas do compósito utilizado obtidas através de ensaios experimentais, e um processo de optimização de modo a obter-se o empilhamento mais apto a ser utilizado no componente para resistir ao carregamento.

Os resultados são bastante satisfatórios, sendo obtida uma redução da massa do novo componente de quase 50% e também uma diminuição das tensões. No entanto, observou-se um aumento da deformação do componente ainda que em valores que não põem em causa a integridade do sistema de direcção.

Palavras-chave: Fibras de basalto, materiais compósitos, método de elementos finitos, componentes mecânicos, PSEM

Abstract

With the increased use of composite materials there is also a growing awareness of their use, mainly due to the difficulty of reuse and recycling that they present. In this respect, basalt fiber reinforced composite materials are a possible solution, having superior mechanical properties than glass fiber reinforced ones and, more importantly, their ease of recycling. Since no additives are used in the manufacturing process of the fibers, only rock (basalt), the final mechanical properties vary according to the place where it is collected, justifying a study to obtain the mechanical properties of the specific composite.

This dissertation aims to evaluate the use of mechanical components in this composite material as a replacement for others originally produced in aluminium, in this case, a support available in the steering system of an electric prototype. The starting point for this study was the analysis of the behaviour of the original support under the influence of a specific load. Once these data were obtained, computational simulations (Siemens NX 12) were performed with the mechanical properties of the composite obtained through experimental tests, and an optimization process in order to obtain the most suitable stacking to be used in the component to resist the loading.

The results are very satisfactory, with a reduction in the mass of the new component of almost 50% and also a decrease in stresses. However, an increase in component deformation has been observed although at values that do not compromise the integrity of the steering system.

Keywords: Basalt fibers, composites materials, finite element method, mechanical components, PSEM

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais por todas as oportunidades que me proporcionaram e principalmente por toda a ajuda e paciência ao longo de todos estes anos.

Agradecer ao professor Luís Reis por todo o espírito crítico e sugestões apresentados durante o desenvolvimento deste trabalho, por todo o auxílio prestado nos diversos ensaios experimentais que foi necessário realizar e por toda a ajuda na revisão da dissertação.

Agradecer à professora Rosa Marat por toda a disponibilidade demonstrada especialmente nas inúmeras deslocações à Escola Superior de Tecnologia de Setúbal para a manufactura dos provetes e do componente, por toda a orientação ao longo deste trabalho e pela ajuda na revisão do mesmo.

Agradecer à Escola Superior de Tecnologia de Setúbal pela cedência das infra-estruturas e dos materiais que tornaram este trabalho possível.

Agradecer ao Frederico Alves por todo o auxílio prestado no tópico das análises de elementos finitos.

Agradecer a todos os membros que estiveram no PSEM durante os anos em que fiz parte do projecto e a todos os amigos que de forma directa ou indirecta me apoiaram durante todos estes anos.

Por último, agradecer à Catarina por todas as conversas e momentos que partilhámos nos últimos anos e também por todo o apoio e tempo despendido na revisão deste trabalho.

Conteúdo

Resumo	iii
Abstract	iv
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiv
Lista de Acrónimos	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Materiais compósitos - Definição e enquadramento histórico	5
2.1.1 Matriz	6
2.1.2 Reforços	8
2.1.3 Laminado	8
2.2 Matriz Polimérica	9
2.2.1 Poliéster	10
2.2.2 Epoxy	10
2.3 Fibras	11
2.3.1 Fibras de carbono	11
2.3.2 Fibras de vidro	13
2.3.3 Fibras de basalto	15
2.3.3.1 Método de produção	16
2.3.3.2 Propriedades e campo de aplicação	17
2.4 Processos de manufactura	19
2.5 <i>Insert</i>	21
3 Determinação da geometria e materiais utilizados	22
3.1 Determinação da geometria	22

3.1.1	Situação actual	22
3.1.2	Componente original	23
3.1.3	Carregamentos aplicados	23
3.2	Análises computacionais	27
3.2.1	Método de elementos finitos	27
3.2.2	Simulação componente original	27
3.2.3	Resultados obtidos	30
3.2.4	Procura de novas soluções	31
3.3	Determinação das propriedades do compósito	35
3.3.1	Considerações iniciais	35
3.3.2	Apresentação das normas	36
3.3.2.1	Norma ASTM D 3039	36
3.3.2.2	Norma ASTM D 3518	37
3.3.3	Metodologia da preparação dos provetes	37
3.3.3.1	Manufatura dos provetes	38
3.3.3.2	Colocação dos extensómetros	41
3.3.4	Metodologia dos ensaios experimentais	42
3.3.5	Resultados experimentais	44
3.3.5.1	Apresentação e análise de resultados da norma ASTM D 3039	44
3.3.5.2	Apresentação e análise de resultados da norma ASTM D 3518	47
4	Componente Alternativo	50
4.1	Situação actual	50
4.1.1	Simulação final	51
4.1.1.1	Critério de falha	54
4.2	Processo de optimização	55
4.2.1	Considerações iniciais	55
4.2.2	Programa de optimização	56
4.2.2.1	Criação dos empilhamentos	56
4.2.2.2	Leitura dos ficheiros	57
4.2.2.3	Execução do programa	57
4.2.2.4	Resultados	58
4.3	Obtenção do componente	59
4.3.1	Molde	59
4.3.2	Manufatura do componente	60
4.3.2.1	Primeiro componente	61
4.3.2.2	Segundo componente	63
4.3.3	Preparação do componente	64
4.3.4	Colocação dos extensómetros	65

4.4	Metodologia dos ensaios experimentais	65
4.4.1	Setup experimental	66
4.4.2	Ensaio experimentais	67
5	Discussão de resultados	69
5.1	Resultados das simulações computacionais	69
5.1.1	Massa	69
5.1.2	Deformações	69
5.1.3	Tensões	70
5.1.4	Extensões	72
5.1.5	Carga crítica	73
5.2	Resultados dos ensaios experimentais	73
5.3	Análise comparativa dos ensaios experimentais com as simulações computacionais	74
5.3.1	Massa	74
5.3.2	Extensões	74
5.3.3	Falha do Componente	75
5.4	Análise comparativa do componente original com o componente alternativo	76
6	Conclusão	78
6.1	Conclusões finais	78
6.2	Propostas de desenvolvimento futuro	79
	Referências	80
A	Desenhos Técnicos	85
A.1	Suporte Original	85
A.2	Suporte Alternativo	86
A.3	Setup experimental - Chapa de suporte	87
A.4	Setup experimental - Suporte.L	88
B	Fichas Técnicas	89
B.1	Rótula radial GE 5 E	89
B.2	Fibra de Basalto	90
B.3	Resina Epoxy	91
B.4	Cera desmoldante	92
B.5	DP 490	93
B.6	Extensómetros de contacto	94
B.7	Cianoacrilato	95
B.8	Sikablock M700	96
B.9	Selante HP2002	97
B.10	Desmoldante HP7	98

C	Registo dos Ensaios Experimentais	99
C.1	Ensaio Experimentais	99
C.2	Ensaio de provetes - Norma ASTM D 3039	100
C.3	Ensaio de provetes - Norma ASTM D 3518	101
D	Tabelas de Pugsley	102
E	Análise de Convergência	104

Lista de Figuras

1.1	GP17 EVO [2]	2
2.1	Exemplo da disposição das fibras num compósito (Adaptado de [9])	8
2.2	Exemplo de diferentes empilhamentos - a) unidireccional; b) angle ply; c) cross ply; d) multidireccional [7])	9
2.3	Comparação de propriedades das resinas [11]	11
2.4	Tampa superior GP 19	13
2.5	Molde da tampa superior GP 19	15
2.6	Basalto (rocha) (Adaptado de [22])	15
2.7	Constituintes do basalto [21]	15
2.8	Esquema do método de produção de fibras descontínuas [24]	16
2.9	Esquema do método de produção de fibras contínuas [24]	16
2.10	Comparação dos módulos à tracção, flexão e compressão entre fibras de basalto e vidro [26]	18
2.11	Pastilhas de travão [27])	19
2.12	Barras utilizadas como reforço de estruturas de betão [28]	19
2.13	Esquema do processo de HLUV [30]	20
2.14	Esquema do processo de IR [30]	20
2.15	Processos de manufactura: (a) Processo de <i>hand lay-up</i> com vácuo (b) Processo de infusão de resina	21
2.16	Esquema de um <i>insert</i> : (a) Vista em corte do laminado (b) Vista de topo	21
3.1	Pormenor da localização do suporte do porta cubos	23
3.2	<i>Render</i> do suporte do porta cubos	23
3.3	Vista explodida dos componentes utilizados na montagem do suporte do porta cubos (parafusos de fixação e rótula radial)	23
3.4	Desenho técnico da vista frontal do protótipo GP17 EVO	24
3.5	Vistas do protótipo GP17 EVO com a representação dos pontos do CM e ($P_{suporte}$) - (a) Vista lateral (b) Vista de topo	24
3.6	Pormenor da localização dos carregamentos verificados no suporte do porta cubos	26
3.7	Componente original no programa Siemens NX12	28

3.8	Definição do material no programa Siemens NX12	28
3.9	Malha de elementos finitos utilizada e pormenor dos conectores	29
3.10	Representação dos constrangimentos aplicados	30
3.11	Ponto de aplicação dos carregamentos verificados	30
3.12	Deslocamentos verificados no componente original considerando a direcção do eixo zz	30
3.13	Representação das tensões verificadas no suporte	31
3.14	Pormenor da concentração de tensões na periferia do furo central	31
3.15	Introdução dos parâmetros para definição do compósito reforçado por fibras de basalto	32
3.16	Orientação dos elementos finitos: (a) Orientação aleatória (b) Orientação bem definida	33
3.17	Representação das diversas iterações até ao componente final (ficheiros prt)	34
3.18	Manufatura dos provetes: (a) Aplicação do agente desmoldante (b) Corte das secções rectangulares da fibra de basalto (c) 12 camadas de fibra impregnadas com resina (d) Aplicação do papel perfurado e <i>breather</i> (e) Saco de vácuo e bomba (f) Placa final depois de 24h em vácuo	39
3.19	Preparação dos provetes: (a) Marcação dos provetes segundo a norma ASTM D 3518 (b) Exemplo de um provete cortado para as dimensões necessárias (c) Preparação das extremidades do provete (d) Provetes após colagem dos reforços	41
3.20	Colagem dos extensómetros: (a) Exemplo de um extensómetro de contacto utilizado (b) Preparação do provete para colagem do extensómetro (c) Extensómetro colado no provete	42
3.21	Ensaio experimental: (a) Máquina de ensaios universal Instron 3369 (b) Exemplo de apresentação do software <i>Bluehill</i> (c) Provelte montado na máquina de ensaios (d) Aparelho portátil de aquisição de dados - 3500 da Vishay (e) Provelte fracturado no final do ensaio	44
4.1	Geometria final do componente alternativo (sem representação do <i>insert</i>)	50
4.2	Janela de definição do laminado a utilizar (laminado multidirecional genérico)	52
4.3	Malha de elementos finitos utilizada na geometria final: (a) Malha na zona 1 (b) Malha na Zona 2 (c) Malha na Zona 3 (d) Malha final	52
4.4	Janela de definição do laminado com o <i>insert</i>	53
4.5	Pormenor da orientação dos elementos finitos: (a) Orientação aleatória (b) Orientação bem definida	53
4.6	Representação dos constrangimentos aplicados à geometria final	54
4.7	Ponto de aplicação do carregamento verificado na geometria final	54
4.8	Introdução do critério de falha	55
4.9	Esquema do processo de optimização	56
4.10	Exemplo dos 15 primeiros vectores criados considerando o laminado de 10 camadas	57
4.11	Representação dos dados a substituir, no ficheiro <i>*.dat</i> , com representação de um laminado com 12 camadas todas elas com a orientação de 45°	57
4.12	Comando necessário para executar o solver a partir do MATLAB®	58

4.13	Localização dos dados relativos à massa do componente no ficheiro de <i>output</i>	58
4.14	Localização dos dados relativos às deformações segundo o eixo dos zz do componente no ficheiro de <i>output</i>	59
4.15	Informação final do processo de optimização com informação relativamente ao número de camadas, deformação verificada (mm) e empilhamento que deu origem	59
4.16	CAD do molde suporte do porta cubos	60
4.17	Utilização do molde para a produção do componente	60
4.18	Molde final do suporte do porta cubos	60
4.19	Manufatura do componente – Tentativa 1: (a) Pormenor do corte da fibra (b) Processo de maquinação do <i>insert</i> (c) Aplicação das 10 camadas de fibra de basalto (d) Aplicação da película perfura e do breather (e) Componente após 24 h de cura	62
4.20	Defeitos verificados no componente	62
4.21	Manufatura do componente – Tentativa 2: (a) Pormenor do corte da fibra com a geometria aproximada do componente (b) Impregnação das camadas (c) Colocação das camadas e do <i>insert</i> no molde (d) Aplicação de vácuo (e) Primeiras camadas e <i>insert</i> após cura (f) Componente finalizado	64
4.22	Preparação final do componente: (a) Furação do furo guia central (b) Processo de corte do excesso de fibra (c) Maquinação da caixa para a rótula radial	65
4.23	Posicionamentos dos extensómetros no componente	65
4.24	Máquina de ensaios universal - Instron 5566	66
4.25	Vistas do <i>setup</i> experimental projectado	67
4.26	<i>Setup</i> experimental: (a) Pormenor da maquinação da face a 10° (b) Componentes do <i>setup</i> experimental	67
4.27	<i>Setup</i> experimental montado na máquina de ensaios	68
5.1	Deformações em milímetros segundo: (a) o eixo xx (b) o eixo yy (c) o eixo zz	70
5.2	Tensão σ_{yy}	70
5.3	Tensão σ_{zz}	71
5.4	Tensão τ_{yz}	71
5.5	Representação dos extensómetros: (a) no componente manufacturado (b) no componente em CAD	72
5.6	Falha dos componentes	75
5.7	Tensão σ_{zz} observada para a carga de 2000 N	75
5.8	Componente alternativo vs componente original: (a) Vista frontal (b) Vista da base (c) Vista de topo (d) Componente original montando no protótipo GP 17 EVO (e) Componente alternativo montando no protótipo GP 17 EVO	76

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades da resina de poliéster (Adaptado de [3, 10])	10
2.2	Propriedades da resina de epoxy (Adaptado de [3, 10])	11
2.3	Propriedades das fibras de carbono (Adaptado de [3, 15, 16])	13
2.4	Propriedades das fibras de vidro (Adaptado de [3, 19, 20])	14
2.5	Propriedades das fibras de basalto (Adaptado de [21, 22, 24, 25])	17
3.1	Propriedades do Alumínio 7075-T6	28
3.2	Informação da malha utilizada no Siemens NX 12	29
3.3	Propriedades utilizadas nas simulações preliminares	32
3.4	Propriedades da lâmina do compósito de resina epoxy reforçado por fibras de basalto (Siemens NX 12)	33
3.5	Comparação das geometrias preliminares com a original	35
3.6	Dimensões dos provetes (L = largura da secção e H = espessura do provete) e massa . .	44
3.7	Propriedades para o cálculo da densidade média do compósito	45
3.8	Valores obtidos para o Módulo de Elasticidade dos provetes ensaiados	45
3.9	Valores obtidos para o coeficiente de Poisson dos provetes ensaiados	46
3.10	Valores obtidos para a extensão na fractura	47
3.11	Dimensões dos provetes (L = largura da secção e H = espessura do provete) e massa . .	47
3.12	Propriedades para o cálculo da densidade média do compósito	48
3.13	Valores obtidos para o Módulo de Corte dos provetes ensaiados	49
4.1	Propriedades da lâmina do compósito de resina epoxy reforçado por fibras de basalto (BFRP)	51
4.2	Informação da malha utilizada no Siemens NX 12	53
5.1	Valores de extensão obtidos nas simulações de elementos finitos	73
5.2	Valores de extensão obtidos nos ensaios experimentais	73
5.3	Erros experimentais das medições efectuados pelos extensómetros	74
5.4	Comparação entre o componente original e alternativo	77
D.1	Tabela de Pugsley com os parâmetros A,B e C para a determinação do valor de n_{sx} (Adaptado de [34])	102

D.2 Tabela de Pugsley com os parâmetros D e E para a determinação do valor de n_{sy}
(Adaptado de [34]) 103

Lista de Símbolos

Simbolos gregos

Δ	Varição
γ	Extensão ao corte
Ω	Resistência elétrica
ρ	Densidade
σ	Tensão normal
τ	Tensão de corte
ν	Coefficiente de Poisson
ε	Extensão
E	Módulo de elasticidade (ou de Young)
G	Módulo de rigidez ao corte

Simbolos romanos

A	Área
C	Comprimento
H	Espessura
L	Largura
u_x	Deslocamento segundo o eixo x
F	Força aplicada
M_x	Momento segundo eixo x
M_y	Momento segundo eixo y

Lista de Acrónimos

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BFRP	Compósito de matriz polimérica reforçado por fibras de basalto (<i>Basalt fiber reinforced polymer</i>)
CAD	Desenho assistido por computador (<i>Computer aided design</i>)
CMC	Compósitos de matriz cerâmica
CMM	Compósitos de matriz metálica
CMP	Compósitos de matriz polimérica
CM	Centro de Massa
CNC	Controlo numérico computadorizado (<i>Computer numerical control</i>)
HLUV	<i>Hand lay-up</i> com vácuo
IR	Infusão de Resina
MEF	Método de Elementos Finitos
NOF	Núcleo de Oficinas do Instituto Superior Técnico
PSEM	Projecto de Sustentabilidade Energética Móvel
RTM	Moldação por Transferência de Resina (<i>Resin transfer molding</i>)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Durante as últimas décadas tem-se assistido a um grande aumento na utilização de materiais compósitos por toda a indústria, com especial incidência na aeronáutica e automóvel. A utilização destes materiais por parte destas indústrias deve-se em grande medida à possibilidade de efetuar estruturas mais complexas e com menos peso do que quando são utilizados materiais como o aço e o alumínio. Actualmente existem no mercado diferentes tipos de fibras, podendo estas ser divididas em dois grandes grupos: as fibras naturais, provenientes de elementos naturais como plantas, animais ou do solo, e cujo o processo de produção é também sustentável não sendo usados, por exemplo aditivos, e as fibras sintéticas, como as fibras de carbono e vidro, onde todo o processo de produção das mesmas requer diversas etapas e a utilização de diversos produtos químicos de modo a serem obtidos produtos finais de qualidade.

O projecto PSEM (Projecto de Sustentabilidade Energética Móvel), é constituído por alunos do Instituto Superior Técnico e tem como objectivo o desenvolvimento e posterior construção de um protótipo de corridas 100% elétrico. A competição onde a equipa do PSEM se encontra actualmente, a GreenPower Education Trust - F24+, conta com diversos eventos distribuídos por todo o mundo (Estados Unidos da América, China, Reino Unido, entre outros). Os regulamentos da competição [1] obrigam a que os protótipos desenvolvidos por todas as equipas sejam equipados com o mesmo motor (240W) e com as mesmas baterias (2 baterias de 12V) que possuem algumas limitações em termos de eficiência e de densidade de carga, respectivamente, pelo que a aerodinâmica e peso representam importantes pontos para obter um protótipo de alta eficiência. Pela primeira vez a equipa do PSEM irá apresentar dois protótipos nas competições em que vai participar no ano de 2019: o GP 19, que será o protótipo contruído para as competições de 2019 e o GP 17, protótipo que foi usado em todas as competições em que a equipa participou durante os anos de 2017 e 2018 (GP17 EVO - figura 1.1). O interesse da utilização de materiais compósitos justifica-se não só pelas vantagens que estes apresentam, mas também por todo o *know-how* adquirido pela equipa ao longo dos anos nesta área, que permite que estes sejam produzidos “em casa” sem necessitar de meios externos. Este benefício

alia-se à vontade da equipa de realizar mais testes que permitam efectuar melhorias no seu protótipo mais antigo e desenvolver novas aplicações no protótipo a ser construído durante o ano de 2019. Com estes pontos em mente, e com o foco na utilização de materiais *eco-friendly* que contribuam para um futuro mais sustentável e que permitam à indústria dos materiais compósitos diminuir a sua pegada ambiental, surge então esta dissertação como uma oportunidade de melhor entender a possibilidade de aplicação de fibras naturais em componentes mecânicos.



Figura 1.1: GP17 EVO [2]

1.2 Objectivos

O objectivo desta dissertação é avaliar a possibilidade da aplicação de componentes produzidos utilizando fibras de basalto no protótipo GP17 EVO, tendo também em consideração a aplicabilidade das mesmas no protótipo mais recente, de forma a tornar os mesmos mais sustentáveis a nível ambiental, reduzindo a utilização de componentes em metal e fibra de carbono e vidro, e procurando que a performance dos mesmos seja influenciada positivamente. Para verificar a viabilidade desta mudança foi escolhido um componente do protótipo GP17 EVO, neste caso, o suporte superior do porta-cubos. Este componente apresenta-se como um caso de estudo interessante para esta dissertação uma vez que é um elemento de extrema importância para todo o sistema de direcção do protótipo, uma vez que é responsável por garantir um correcto alinhamento do mesmo e por suportar todas as forças que surgem do sistema protótipo+piloto, bem como de todas as irregularidades verificadas na pista durante as corridas, pelo que é fulcral existir um correcto dimensionamento do mesmo. Uma vez que se pretende testar outra iteração de um componente que se encontra em utilização é necessário respeitar alguns constrangimentos existentes, como os pontos de fixação do componente à estrutura do protótipo e o ponto de ligação do componente ao restante sistema de direcção. Durante o processo de design do novo componente foram tidos em consideração não só os constrangimentos acima mencionados, mas também a obtenção de uma geometria que facilitasse a fabricação do mesmo por materiais compósitos, neste caso um compósito reforçado com fibras de basalto. De forma a retirar conclusões sobre a viabilidade do componente, serão efectuados diversos

ensaios a provetes com diferentes empilhamentos de modo a determinar as propriedades mecânicas do compósito em questão, constituído por uma matriz polimérica reforçada por fibras de basalto. Uma vez obtidas as propriedades, será efectuada uma análise computacional do componente e verificar-se-á qual o empilhamento mais adequado aos carregamentos verificados. Depois de encontrada a solução que melhor satisfaça os requisitos, o componente será manufacturado com recurso a um molde. Este processo será finalizado quando se tiver obtido o componente final, pronto a ser ensaiado de forma a verificar a sua viabilidade para o caso em estudo.

1.3 Estrutura

A dissertação apresentada encontra-se dividida em 6 capítulos:

Capítulo 1

Neste capítulo é apresentada a motivação e é efectuado um enquadramento da temática, seguido dos objetivos da dissertação e uma descrição da sua estrutura.

Capítulo 2

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica dos materiais compósitos e seus constituintes (matriz e elementos de reforço). Será também efectuada uma análise comparativa de diferentes tipos de matrizes poliméricas e o seu campo de utilização e das fibras de carbono, vidro e basalto no que diz respeito aos processos de fabrico, campos de aplicação e vantagens e desvantagens. Por fim é efectuada uma breve explicação de alguns processos de fabrico utilizados para produzir materiais compósitos.

Capítulo 3

Neste capítulo será descrita toda a informação relevante relacionada com o componente original, como geometria e material, carregamento aplicado, bem como a simulação de elementos finitos cujos resultados obtidos serão o ponto de partida para o projecto do componente alternativo, sendo apresentadas as diversas interações efetuadas até ser obtida uma geometria que satisfizesse as necessidades. É também apresentado todo o procedimento executado que culminou na obtenção das propriedades mecânicas do material compósito que constitui o novo componente.

Capítulo 4

Neste capítulo serão efectuadas simulações numéricas detalhadas ao componente alternativo, com a geometria e propriedades obtidas anteriormente, onde é incluído um processo de optimização de modo a obter-se um empilhamento adequado aos carregamentos aplicados. Serão também descritos todos os procedimentos seguidos até à obtenção do componente final e dos ensaios experimentais executados de modo a confirmar a viabilidade do mesmo.

Capítulo 5

Neste capítulo serão apresentados e analisados os dados obtidos nas simulações computacionais e nos ensaios experimentais efectuados, sendo realizada uma comparação entre esses valores e, posteriormente, entre o componente original e o componente alternativo, de forma a perceber a influência das alterações efectuadas.

Capítulo 6

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões retiradas de todo o trabalho efectuado, bem como algumas propostas para desenvolvimentos futuros que possibilitem dar continuidade não só a este trabalho mas também à temática dos materiais compósitos reforçados por fibras de basalto.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Materiais compósitos - Definição e enquadramento histórico

Um material compósito pode ser definido como um material formado pela combinação de dois ou mais materiais distintos que originam um novo em que se verifica uma melhoria das propriedades (mecânicas, químicas, físicas) em relação aos seus constituintes. Os principais componentes dos materiais compósitos são o reforço e a matriz. O material de reforço é o responsável por conferir rigidez e resistência ao compósito, enquanto o material da matriz é o responsável pela aglomeração do reforço utilizado de forma a que a dissipação de cargas no compósito aconteça de forma correcta. Outra importante contribuição da matriz é a protecção do material de reforço de agentes exteriores que podem provocar danos e enfraquecer o compósito [3].

Os primeiros registos da utilização de materiais compósitos surgiram há vários milhares de anos, por volta de 3400 A.C na zona da Mesopotâmia (actualmente grande parte do Iraque e Síria), onde o povo que aí residia procedeu à junção de tiras de madeira em diferentes orientações de forma a obter um material final mais resistente para as suas construções [4]. Existem também relatos de o povo Egípcio ter fabricado algo que se assemelha a um material compósito quando por volta do ano de 1300 A.C, para a construção das suas casas, recorreu a um "tijolo" constituído por barro e palha aumentando assim a resistência do mesmo [5]. É até afirmado por *Nagavally* [6] que os arcos produzidos pelos mongóis, constituídos por madeira, osso e "cola animal", foram a arma mais poderosa até à invenção da pólvora, o que prova a grande influência dos materiais compósitos nas civilizações desde muito cedo. Foi só bastantes anos mais tarde, por volta de 1800, que, com o surgimento de diversos tipos de resinas, foi possível conhecer novos avanços neste campo. Foram efectuadas experiências por construtores de canoas que consistiam em unir diversas folhas de papel com recurso a resina natural, no entanto foram rapidamente abandonadas uma vez que os materiais não tinham propriedades que permitissem obter estruturas robustas. Uma vez identificado o problema, foi necessário descobrir soluções para o mesmo, tendo sido a partir do ano de 1930 que o campo dos materiais compósitos verificou grandes desenvolvimentos. Foram apresentadas as primeiras resinas poliméricas, como as resinas de poliéster, que ofereciam propriedades muito superiores às usadas até

ao momento, muito devido ao seu processo de cura. Este ponto marca então o começo de uma nova era na indústria dos materiais compósitos. No final dos anos 30 desenvolveram-se as primeiras fibras de vidro e, anos depois, em 1942, foi fabricada a primeira estrutura em fibra de vidro e resina poliéster. Com a 2ª Guerra Mundial em curso, a utilização destes materiais generalizou-se a toda a indústria militar de forma a reduzir o peso e aumentar a resistência de veículos usados durante a mesma. Anos mais tarde, todo o conhecimento já adquirido foi tornado acessível à população em geral e começou a observar-se a introdução de estruturas em compósito no quotidiano, como tubos em fibra de vidro para a indústria do petróleo. No início dos anos 50 desenvolveram-se novos métodos de manufactura como a pultrusão, a moldação por vácuo e o processo de *filament winding*, muito utilizado para a produção de estruturas cilíndricas. Estes métodos, com o aparecimento da fibra de carbono em 1961, tornaram o uso de materiais compósitos acessível a diversas indústrias como a aeroespacial, marítima, automóvel e até a civil, com a construção de diversas estruturas em compósito para ser utilizadas em pontes. Actualmente continua a verificar-se um grande desenvolvimento neste campo com a criação de impressoras 3D que permitem incorporar fibras de forma a reforçar os componentes impressos [4].

A indústria dos materiais compósitos irá continuar em acelerado desenvolvimento, perspectivando-se grandes avanços ao nível de reciclagem destes materiais, nas técnicas de produção de forma a torná-los energeticamente mais sustentáveis e na aposta na utilização de resinas amigas do ambiente de forma a reduzir o impacto ambiental destes materiais [4].

2.1.1 Matriz

Os materiais compósitos podem ser divididos segundo o material utilizado para a matriz. Desta divisão resultam três grandes grupos: os compósitos de matriz metálica (CMM), de matriz cerâmica (CMC) e de matriz polimérica (CMP). Tal como já foi referido, a matriz que compõe o compósito tem como principal função conferir estrutura ao mesmo, mantendo o reforço na posição desejada e promovendo uma correcta distribuição das cargas por todo o compósito. Apresentam-se de seguida as características de cada um dos tipos de matriz:

- **Matriz metálica** – Utilizada em compósitos que estão sujeitos a altas temperaturas de serviço. Estes apresentam também uma maior rigidez, e uma resistência à abrasão e estabilidade dimensional melhores do que o metal base. Os CMM apresentam um preço bastante mais elevado quando comparados com outros tipos de materiais compósitos, o que muitas vezes apresenta um entrave à sua utilização, apesar de recentemente se verificar um aumento da sua utilização na indústria automóvel. Alguns dos materiais que são utilizados como matriz neste tipo de compósitos são o alumínio, o magnésio e o titânio [7].
- **Matriz cerâmica** – Aplicada em compósitos que estão inseridos em ambientes agressivos, onde é verificada a existência de altas temperaturas e a presença de substâncias corrosivas. Os CMC são apresentados como forma de contornar o facto de os materiais cerâmicos apresentarem uma baixa tenacidade à fractura, uma vez que quando introduzidos reforços esse valor aumenta, permitindo usufruir das características anteriormente descritas de uma forma mais segura. Os

materiais mais comuns utilizados como matriz cerâmica são óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de zircónio (ZrO_2) [7].

- **Matriz polimérica** – Tipo de matriz mais utilizada no fabrico de compósitos, devido à facilidade de produção de peças bastante complexas com um custo inferior a nível de ferramentas necessárias e de mão de obra quando comparado com utilização de outras matrizes. Os materiais mais utilizados na produção dos CMP são como elemento de reforço as fibras e como elemento aglutinante um polímero (material composto por pequenas moléculas designadas por monómeros e agrupadas por ligações covalentes que se repetem sucessivamente dando origem a longas cadeias) termoplástico ou termoendurecível [3]. De seguida descrevem-se com mais detalhe os dois tipos de polímeros referidos tendo em consideração o tipo de reforço mencionado.

Nas matrizes compostas por polímeros termoendurecíveis as moléculas estão ligadas quimicamente através de ligações cruzadas irreversíveis, formando uma estrutura tridimensional rígida. É comum designar o polímero em causa por resina, e apenas quando este passa pela reacção de polimerização (cura), que é iniciada através da adição de um catalisador que reage com a resina para dar origem a um material rígido, é que se dá o nome de matriz. As resinas termoendurecíveis apresentam uma viscosidade reduzida o que permite uma boa impregnação das fibras e uma cadência de produção elevada. Apresentam também uma resistência térmica baixa, ou seja, com o aumento da temperatura a matriz deixa de ser rígida passando a ser mais macia, o que contribuiu para uma diminuição de algumas propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade. As resinas termoendurecíveis mais comuns são: epoxy, poliéster e viniléster [3, 8]

Nas matrizes compostas por polímeros termoplásticos, ao contrário do verificado nas termoendurecíveis, as moléculas não estão ligadas quimicamente, mas sim através de interacções físicas, como a força de Van der Waals ou ligações de hidrogénio. Este tipo de interacções é facilmente quebrado com a aplicação de calor permitindo um movimento das moléculas do polímero que se encontra macio e que pode ser moldado a uma qualquer forma pretendida. Este volta depois ao estado sólido quando a temperatura diminui, conservando a nova configuração. Este processo pode ser repetido diversas vezes sem que as propriedades do polímero sejam afectadas. Os polímeros termoplásticos apresentam uma viscosidade bastante elevada quando aquecidos, o que dificulta o processo de impregnação das fibras, pelo que é necessário grande cuidado e controlo durante o mesmo, o que muitas vezes aumenta o custo final do produto. No entanto, existe a possibilidade de os compósitos formados por matrizes compostas por polímeros termoplásticos serem reparados através de aplicação de calor que permite moldar novamente o componente em causa, algo que não é possível nos compostos por polímeros termoendurecíveis. Alguns dos polímeros termoplásticos mais comuns são: PEEK (*polyetheretherketone*) e PEI (*polyetherimide*) [3, 8]

2.1.2 Reforços

Como referido anteriormente, os reforços presentes nos materiais compósitos têm a responsabilidade de conferir robustez ao mesmo. Estes podem ser agrupados mediante o tipo de reforço utilizado, existindo dois grupos possíveis:

- **Partículas** – Estes elementos são introduzidos na matriz de forma aleatória com o objectivo de restringir o movimento da mesma na vizinhança de cada partícula. A matriz dissipa as cargas aplicadas para as partículas, que devido à sua maior resistência conseguem lidar melhor com as mesmas, contribuindo para uma maior robustez do compósito. As partículas podem apresentar diferentes formas e tamanhos (desde alguns nanómetros até alguns centímetros) [7].
- **Fibras** – As fibras são introduzidas na matriz utilizada formando camadas, podendo ser contínuas ou descontínuas. Como exemplificado na figura 2.1 dependendo da sua disposição em cada camada, também denominada por lâmina ou *ply*, estas podem ser agrupadas de diversas formas: unidirecional, quando a fibra tem uma orientação bem definida na mesma camada, apresentando também a máxima resistência nessa direcção; bidirecional, quando em diferentes camadas as fibras têm diferentes orientações; fibras descontínuas onde as fibras são distribuídas aleatoriamente; ou manta, onde na mesma camada existem fibras orientadas em duas direcções distintas. Nos materiais compósitos as fibras são orientadas com critério de forma a estarem mais aptas a resistir aos diversos carregamentos aplicados [7, 9].

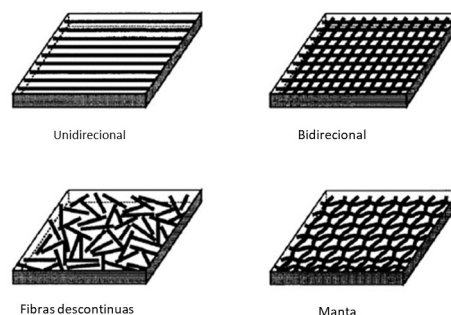


Figura 2.1: Exemplo da disposição das fibras num compósito (Adaptado de [9])

2.1.3 Laminado

Um laminado pode ser definido como um conjunto de camadas empilhadas segundo a direcção z (espessura) [8]. Os laminados podem ter na sua constituição lâminas que tenham reforços sob a forma de partículas ou fibras e qualquer um dos tipos de matriz já descritas anteriormente. Apresentam-se de seguida em maior detalhe os laminados constituídos por camadas que têm como reforço fibras e matriz polimérica.

De forma a atingir a resistência desejada as camadas que constituem o laminado podem apresentar diferentes orientações, tendo em consideração que a resistência das fibras é máxima quando a força é

aplicada ao longo destas, e que camadas com fibras com orientações de 30° ou 45° apresentam uma boa resistência a solicitações de corte [9]. Assim sendo, dependendo da configuração escolhida, os laminados podem ser divididos nas seguintes categorias:

- Laminados unidireccionais – as fibras que constituem cada lâmina apresentam a mesma orientação em todas as camadas do laminado, por exemplo 0° (Figura 2.2 a).
- Laminados angle-ply – apresenta na sua constituição camadas alternadas com orientação de 0° e 90° sucessivamente (Figura 2.2 b).
- Laminados cross-ply – apresenta na sua constituição camadas alternadas com orientação de $+\theta$ e $-\theta$ sucessivamente, por exemplo $+45^\circ/-45^\circ$ (Figura 2.2 c).
- Laminados multidireccionais – o laminado apresenta na sua constituição fibras com diferentes orientações em cada camada, por exemplo $0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ (Figura 2.2 d).

É bastante comum os laminados serem projectados de forma a que sejam simétricos, ou seja, que as camadas que o constituem sejam empilhadas de forma a que se verifique uma simetria em relação ao plano médio do laminado. O objectivo desta configuração é evitar possíveis problemas que advêm da não existência de simetria, como torção ou empenos [7].

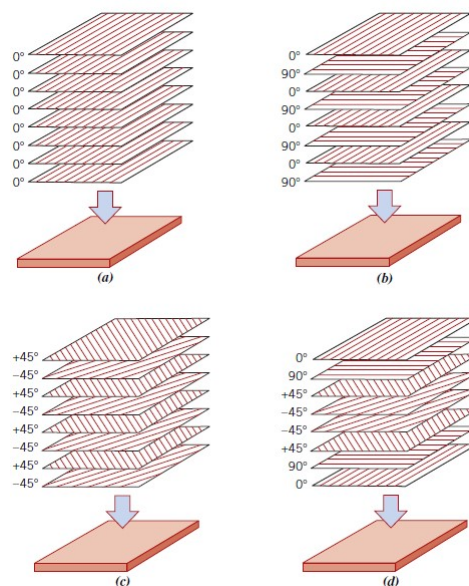


Figura 2.2: Exemplo de diferentes empilhamentos - a) unidireccional; b) angle ply; c) cross ply; d) multidireccional [7])

2.2 Matriz Polimérica

Efectua-se uma comparação entre dois dos tipos de matriz polimérica (poliéster e epoxy) mais utilizados no fabrico de compósitos, apresentando as propriedades mais relevantes, de forma a perceber quais os limites de aplicação.

2.2.1 Poliéster

A utilização das resinas de poliéster é algo bastante comum na indústria dos materiais compósitos desde os primeiros laminados produzidos. As resinas de poliéster podem ter algumas variantes devido à introdução de diferentes componentes (monómeros) durante a sua produção, podendo ocorrer pequenas variações nas propriedades. A grande utilização deste tipo de resinas deve-se principalmente ao seu baixo custo quando comparado com outras resinas de base polimérica. Existem, no entanto, outras vantagens na sua utilização, principalmente na indústria marítima devido à boa resistência em ambientes com a presença de água e também a diversos agentes atmosféricos, principalmente aos raios ultravioleta que muitas vezes provocam a degradação de materiais poliméricos resultando na perda ou redução de importantes propriedades que podem comprometer a estrutura do compósito. As resinas de poliéster exibem propriedades mecânicas razoáveis quando comparadas com outras resinas de base polimérica, alguma resistência ao calor (dependendo da variante considerada) e são fáceis de utilizar. No entanto, alguns dos aspectos negativos da utilização destas resinas são apresentarem uma grande contracção após a cura, algo que muitas vezes acarreta consequências negativas devido ao possível empeno ou perda de toleranciamento dos componentes, e o tempo de armazenamento destas ser pequeno, uma vez que a cura da resina é iniciada ainda que de forma muito lenta sem a presença de um agente catalisador [3, 10, 11]. Na tabela 2.1 procede-se à compilação dos valores mais comuns na bibliografia consultada, para algumas propriedades desta resina.

Tabela 2.1: Propriedades da resina de poliéster (Adaptado de [3, 10])

Resina	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Contracção após cura [%]
Poliéster	1,1 - 1,4	2 - 4	20,7 - 100	5 - 12

2.2.2 Epoxy

Com as limitações verificadas na utilização das resinas de poliéster, tornou-se necessário formular um material que permitisse ultrapassar as mesmas, tendo sido nesta base que surgiram as resinas de epoxy. À semelhança do verificado nas resinas de poliéster, também estas apresentam variações das propriedades consoante a variante que se está a utilizar. Como referido, as resinas de epoxy vêm colmatar algumas limitações que eram verificadas como, por exemplo, a fraca resistência à temperatura, com estas resinas a terem capacidade de suportar temperaturas a rondar 150°C. São também verificadas melhorias nas propriedades mecânicas, como verificado na figura 2.3, que mostra que após passarem pelo mesmo tempo de cura as amostras analisadas de resina de epoxy apresentavam valores superiores de resistência à tracção e de módulo de Young, que se consideram ser as propriedades mais relevantes quando se analisa este tipo de matrizes.

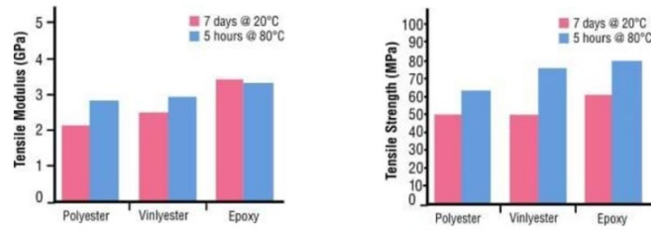


Figura 2.3: Comparação de propriedades das resinas [11]

Opostamente ao que é verificado com a resina de poliéster, é bastante mais complicado trabalhar com as resinas de epoxy, uma vez que a mistura resina/catalisador tem que ser correctamente efectuada. No entanto, ultrapassado esse passo crítico a contracção verificada nesta resina após a cura é bastante inferior ao da maioria das resinas, sendo que também apresenta uma superior impermeabilidade e resistência à corrosão. A desvantagem associada aos diversos pontos positivos mencionados é o seu preço ser bastante elevado, algo que a torna uma resina maioritariamente aplicada em situações exigentes como a indústria aeronáutica [3, 10, 11]. Apresentam-se de seguida, na tabela 2.2, os valores mais comuns na bibliografia consultada, para algumas propriedades desta resina.

Tabela 2.2: Propriedades da resina de epoxy (Adaptado de [3, 10])

Resina	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Contracção após cura [%]
Epoxy	1,1 - 1,3	2 - 5	50 - 100	1 - 5

2.3 Fibras

Nos tópicos seguintes irão ser apresentados três tipos de fibras, fibras de vidro, carbono e basalto. Os primeiros dois tipos (fibras de vidro e fibras de carbono) serão abordados de uma forma mais simplista, servindo de base de comparação, por serem as mais presentes na indústria, com as fibras de basalto. Os tópicos de comparação serão o processo de produção das fibras, as propriedades (mecânicas, químicas e físicas), o custo e o campo de aplicação.

2.3.1 Fibras de carbono

A produção das fibras de carbono é um processo bastante complexo e que exige a realização de diversas etapas. O processo inicia-se com um precursor, um polímero orgânico, que não é nada mais que uma “fonte” de moléculas de carbono e que, com todas as etapas que se seguem, se transforma em fibra de carbono. Existem dois tipos de precursores utilizados na produção das fibras de carbono, sendo o mais utilizado o polímero orgânico, poliácilonitrila, mais conhecido como PAN (polyacrylonitrile), que representa actualmente 90% das fibras de carbono produzidas [12], razão pela qual será o abordado. Este processo pode ser dividido em duas fases, a produção do precursor e a

produção efectiva das fibras de carbono. Para a produção do precursor a primeira etapa é designada por polimerização, para tal é produzida uma solução de um catalisador e diversos aditivos com uma determinada quantidade de monómeros de acrilonitrila que é continuamente agitada de forma a promover a reacção de polimerização que dá origem à poliacrilonitrila. Esta etapa é crucial uma vez que a qualidade do precursor influencia diretamente a qualidade final das fibras. Na etapa seguinte designada por fiação e coagulação, o produto final da etapa anterior, que é semelhante a uma pasta, é introduzido num líquido coagulante e de seguida extrudido de forma a serem formados filamentos de poliacrilonitrila com diferentes diâmetros. Nas etapas finais, denominadas tratamento final e enrolamento, os filamentos de poliacrilonitrila são lavados, secados e esticados o que promove uma correcta orientação dos mesmos. Por fim, é aplicado um tratamento final para prevenir que os filamentos se emaranhem ao serem enrolados em bobines, podendo estes ser enrolados em grupos de 1000 até 24000 filamentos em cada bobine, ficando assim finalizado o processo de produção do precursor [13, 14].

Uma vez obtido o precursor, inicia-se a produção efectiva das fibras de carbono. A primeira etapa é designada por estabilização (esta etapa também pode ser denominada oxidação). Nesta etapa, as bobines obtidas anteriormente são desfiadas de forma a que as fibras passem por uma série de compartimentos com temperaturas a variar entre os 200°C e os 300°C. Este processo promove a oxidação das fibras de poliacrilonitrila que absorvem moléculas de oxigénio presentes na atmosfera e, devido a este processo químico, as suas ligações atómicas rearranjam-se e é promovida a interligação das cadeias poliméricas. Esta etapa é algo demorada (30 a 120 minutos), e é possível observar o aumento do nível de oxidação das fibras uma vez que estas entram com uma cor branca e no final saem com uma cor preta. O processo seguinte é denominado carbonização, ocorre na presença de uma atmosfera inerte (sem oxigénio) e no interior de fornos a altas temperaturas (1000°C a 3000°C). Este processo é bastante importante uma vez que com o aumento da temperatura as moléculas e partículas que não sejam carbono são removidas das fibras, promovendo um reforço nas ligações entre átomos de carbono presentes nas fibras. As últimas etapas são o tratamento superficial e revestimento das fibras. No final do processo de carbonização, as fibras não apresentam uma superfície que permita a correcta aderência às resinas utilizadas, pelo que têm de passar por tratamentos que permitam debelar este problema. Um dos métodos mais utilizado consiste em fazer passar as fibras por uma solução que contenha hipoclorito de sódio ou ácido nítrico, que aumenta a rugosidade das fibras e assim aumenta a área de superfície de contacto na interface matriz-fibra. Por fim segue-se uma operação de revestimento das fibras, o que confere uma protecção às fibras bastante importante durante o seu processamento e manuseamento, terminando o processo de produção das fibras de carbono com o seu enrolamento em bobines ficando prontas para comercialização [12, 14].

As fibras de carbono apresentam algumas diferenças nas suas propriedades uma vez que estas dependem de todo o processo de produção, no entanto, geralmente apresentam valores elevados de módulo de Young quando comparado com metais que são amplamente usados na indústria, apresentam uma baixa condutividade térmica e uma condutividade eléctrica elevada. É também uma

importante propriedade destas fibras a sua elevada resistência a substâncias ácidas e alcalinas. Em relação ao preço, este é algo elevado devido em grande medida à complexidade que todo o processo de produção apresenta. De forma a sintetizar alguma desta informação, na tabela 2.3 procede-se à compilação dos valores mais comuns na bibliografia consultada, para diferentes propriedades destas fibras.

Tabela 2.3: Propriedades das fibras de carbono (Adaptado de [3, 15, 16])

Fibra	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Extensão na fractura [%]	Condutividade térmica [W/mK]
Carbono	1,76 - 1,93	230 - 588	3500 - 7000	1 - 2,2	3 - 55

Os compósitos reforçados por fibras de carbono apresentam uma grande variedade de aplicações, podendo ser utilizados nas mais variadas indústrias como automóvel, aeroespacial ou civil. Um exemplo de uma estrutura em fibra de carbono é a do protótipo da equipa do PSEM, como observado na figura 2.4.

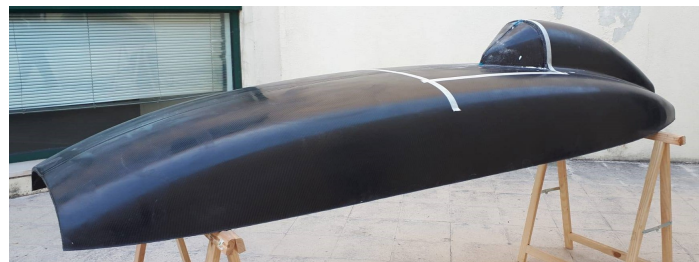


Figura 2.4: Tampa superior GP 19

2.3.2 Fibras de vidro

A produção das fibras de vidro é um processo mais simples e mais conhecido, uma vez que já é realizada há mais tempo. As fibras de vidro podem ser produzidas directamente a partir de areia de sílica (SiO₂), que é aquecida a temperaturas elevadas e depois arrefecida rapidamente de forma a evitar a cristalização, formando assim uma estrutura amorfa designada por vidro. O processo de produção das fibras de vidro compreende diversas etapas. A primeira é designada por mistura onde, tal como o nome indica, são misturados os diversos “ingredientes” usados no fabrico das fibras. Tal como referido anteriormente, as fibras de vidro podem ser produzidas a partir da areia de sílica, que é o principal constituinte da mistura, no entanto outros elementos são adicionados numa tentativa de reduzir a temperatura de trabalho (que é elevada), e de conferir outras propriedades às fibras. Uma vez misturados todos os “ingredientes”, é iniciada a segunda etapa, a fusão, onde a mistura é aquecida a temperaturas que rondam os 1400°C promovendo a sua fusão e uniformização. O material (vidro) fundido é transferido para um reservatório onde é mantido a temperatura elevada de forma a permanecer no estado líquido. Uma vez no reservatório, é iniciada a etapa seguinte, denominada fibração, onde as fibras são formadas. Para isso, o vidro fundido presente no reservatório é extrudido

através de canais, que são feitos de platina e que contêm no seu interior um grande número de orifícios de muito pequeno diâmetro, dando origem às fibras de vidro. Dependendo do pretendido as fibras podem ser contínuas ou descontínuas, passando depois da extrusão por diversos processos de transformação que dão origem aos mesmos. Uma vez obtidas as fibras com a configuração desejada, é iniciada a etapa do revestimento onde as fibras sofrem tratamentos de protecção, sendo o primeiro uma lubrificação para as proteger da abrasão e da quebra enquanto são manuseadas, e o segundo um revestimento com agentes aglomeradores que asseguram a compatibilidade e uma correcta aderência das fibras com as resinas utilizadas. Uma vez terminado este processo, as fibras seguem para a última etapa onde o revestimento aplicado às fibras é seco, sendo estas embaladas posteriormente, normalmente em rolos de diversas dimensões [17, 18].

Dado que a areia de sílica (SiO_2) é o principal constituinte das fibras de vidro, alterações nas percentagens deste elemento provocam alterações nas propriedades das fibras. Sendo assim, geralmente, as fibras de vidro apresentam valores de módulo de Young inferiores quando comparados com as fibras de carbono e certos metais, no entanto, apresentam determinadas características que tornam a sua utilização uma mais valia em diversas situações. As fibras de vidro apresentam condutividade térmica e eléctrica baixa, pelo que muitas vezes são utilizadas como material isolante e, tal como as fibras de carbono, apresentam também uma elevada resistência em meios quimicamente agressivos. Em relação ao preço, estas fibras apresentam um preço mais acessível que as fibras de carbono, o que muito se deve à maior facilidade de obtenção das mesmas. Na tabela 2.4 procede-se à compilação de alguns dos valores mais comuns na bibliografia consultada, para diferentes propriedades destas fibras.

Tabela 2.4: Propriedades das fibras de vidro (Adaptado de [3, 19, 20])

Fibra	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Extensão na fractura [%]	Condutividade térmica [W/mK]
Vidro	2,14 - 2,72	51,7 - 86	2415 - 4890	4,4 - 5,7	1 - 1,05

A fibra de vidro é amplamente utilizada nas mais diversas indústrias, por exemplo em aplicações marítimas em que problemas como a corrosão provocada pela água salgada pretendem ser evitados. É também extensivamente utilizada na indústria automóvel uma vez que se coloca como uma solução financeiramente sustentável para a produção de estruturas resistentes e com baixo peso. Também é normalmente utilizada pela equipa do PSEM para a produção de moldes, como o apresentado na figura 2.5, maioritariamente devido ao seu preço.

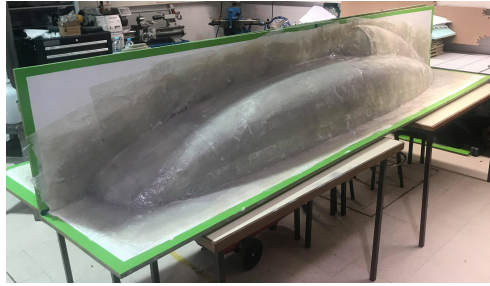


Figura 2.5: Molde da tampa superior GP 19

2.3.3 Fibras de basalto

Com a crescente preocupação ambiental e com a necessidade de preservar o planeta Terra cada vez mais presente na sociedade, a procura por alternativas às fibras tradicionais representa um passo importante na tentativa de mitigar o impacto destas no meio ambiente. Sendo assim, uma das soluções que melhor se posiciona como uma boa alternativa são as fibras de basalto.

As fibras de basalto são produzidas a partir da rocha vulcânica, basalto (figura 2.6), que é o mineral mais abundante no planeta Terra. O basalto é formado a partir do magma que é expelido para a superfície terrestre, onde arrefece rapidamente em contacto com o ar. É constituído por diversos elementos, como se observa na figura 2.7, sendo que os que apresentam uma maior percentagem são os óxidos de sílica, alumínio e ferro. A quantidade de cada um dos constituintes do basalto varia conforme o local onde o basalto é formado [21].



Figura 2.6: Basalto (rocha) (Adaptado de [22])

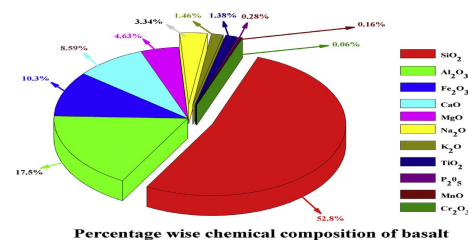


Figura 2.7: Constituintes do basalto [21]

O conceito de produção de fibras de basalto foi descoberto pelo francês Paul Dhé em 1923, ano no qual também obteve uma patente nos Estados Unidos da América. Desde a sua descoberta, as fibras de basalto foram classificadas como material com interesse militar, tendo sido feitas diversas tentativas para o seu desenvolvimento de forma a serem implementadas na indústria da defesa e aeronáutica durante a 2^o Guerra Mundial. No entanto, foi apenas décadas mais tarde e devido ao grande interesse demonstrado pela União Soviética, que o desenvolvimento das fibras de basalto conheceu novos avanços, quando na década de 50 foi desenvolvida no Moscow Research Institute of Glass and Plastic a primeira fibra de basalto, demonstrando o resultado de vários anos de pesquisa. No ano de 1985, é também criada a primeira instalação industrial de produção de fibras de basalto em Kiev, na Ucrânia, uma vez que os jazigos de basalto existentes nesse país apresentam boas características para serem usados na produção de fibras. Isto demonstra mais uma vez a grande aposta da União Soviética no

desenvolvimento das mesmas, algo que ainda se mantém até aos dias de hoje nos países da Europa de Leste [22].

2.3.3.1 Método de produção

O processo de produção das fibras de basalto é semelhante ao das fibras de vidro, verificando-se, no entanto, um menor gasto energético e ausência de aditivos [23]. Estas fibras apresentam diferentes métodos de produção mediante a necessidade de se produzirem fibras contínuas ou descontínuas. Estas diferenças nos métodos apenas são verificadas no final dos mesmos, pelo que todo o procedimento até esse ponto decorre de igual forma.

O processo de produção é iniciado com a recolha do basalto de um jazigo previamente seleccionado, sendo de seguida transportado para as instalações onde irá começar a produção das fibras. A primeira etapa consiste na preparação do material: a rocha é triturada e lavada, ficando com dimensões de 60-100mm se o objectivo for a produção de fibras descontínuas e 5-40mm se o objectivo for a produção de fibras contínuas, e livre de qualquer tipo de impurezas que possam existir. Uma vez finalizada a primeira etapa, o material preparado é introduzido num reservatório e direccionado para um forno onde irá ser fundido. A temperatura de fusão do basalto varia entre os 1400°C a 1600°C, pelo que a temperatura verificada no interior do forno se situa nesse intervalo. Uma vez que o basalto é opaco, absorve facilmente a radiação infravermelha. A utilização de queimadores a gás para promover a liquidificação é um processo bastante moroso e que torna difícil a temperatura ser uniforme em todo o material. Para tentar corrigir essa situação, muitas vezes são introduzidos eléctrodos no basalto líquido de forma a acelerar o processo e garantir que todo o material apresenta uma temperatura uniforme. É na etapa final que se verificam as diferenças dependendo se se pretende obter fibras contínuas ou descontínuas. Se o objectivo for obter fibras descontínuas, o basalto líquido é vertido para um equipamento, como o representado na figura 2.8, que consiste em 3 rolos que devido à rotação e conseqüente força centrífuga promovem a formação das fibras segundo um eixo horizontal. O método que permite a produção de fibras contínuas, representado na figura 2.9, consiste em introduzir o basalto líquido num prato de extrusão aquecido, feito de uma liga de platina-ródio, que contém orifícios (entre 200 e 500) de muito pequenas dimensões através dos quais o material é puxado por um cilindro de grandes dimensões, arrefecendo depois e dando origem às fibras de basalto. É também aplicado um tratamento nas fibras, à base de silano líquido, para promover a sua integridade e compatibilidade com a matriz, ficando o processo finalizado [22, 24].

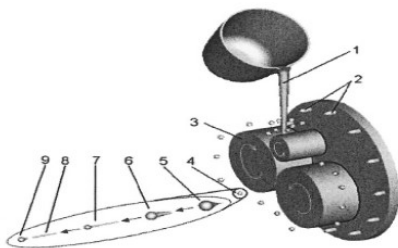


Figura 2.8: Esquema do método de produção de fibras descontínuas [24]

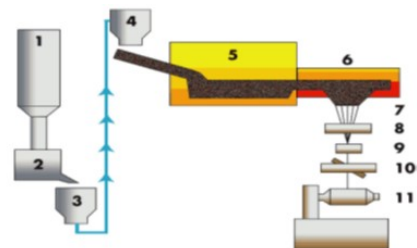


Figura 2.9: Esquema do método de produção de fibras contínuas [24]

2.3.3.2 Propriedades e campo de aplicação

Apesar da utilização das fibras de basalto ter inicialmente sido apenas destinada à indústria militar, a sua utilização está agora mais generalizada. Como já referido, os elementos que constituem o basalto variam conforme o local onde este é recolhido, e uma vez que na sua produção não são utilizados aditivos, existe alguma variação nas propriedades que as fibras de basalto apresentam [23].

Devido às suas propriedades e custo, as fibras de basalto são muitas vezes usadas em substituição das fibras de vidro, razão que justifica as muitas comparações que são feitas entre os dois materiais. Assim sendo as fibras de basalto possuem um valor de módulo de Young elevado quando comparado com as fibras de vidro e outros metais usados na indústria, como por exemplo o alumínio. Estas fibras são utilizadas não só devido à melhoria verificada nas propriedades mecânicas face a outras fibras, mas também devido às propriedades físicas, químicas, serem um bom material isolante eléctrico e acústico, e serem capazes de resistir a temperaturas bastante elevadas sem perda das suas propriedades. Como foi documentado em estudos experimentais, as fibras de basalto conseguem manter quase inalterada a sua resistência até 600°C, ao contrário do que é verificado com as fibras de vidro e carbono que apresentam uma acentuada redução a partir dos 200°C. Estas fibras são também caracterizadas por apresentar uma grande resistência em meios quimicamente agressivos (ácidos e alcalinos) [21]. De forma a apresentar valores que corroborem as informações acima apresentadas na tabela 2.5 procede-se à compilação de alguns dos valores mais comuns na bibliografia consultada, para diferentes propriedades destas fibras.

Tabela 2.5: Propriedades das fibras de basalto (Adaptado de [21, 22, 24, 25])

Fibra	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Extensão na fractura [%]	Condutividade térmica [W/mK]
Basalto	2,63 - 2,8	79,3 - 110	2800 - 4840	3,1 - 6	0,031 - 0,038

Uma característica das fibras de basalto que tornam a sua utilização apetecível é o facto de estas não representarem perigo para o ser humano, como referido em [21] e atestado por Singha [24], onde foram efectuadas experiências em laboratório de forma a aferir a toxicidade destas fibras. Ficou provado que, quando comparado com outros materiais com conhecida perigosidade, como o amianto, estas não representam perigo podendo ser manuseadas e manipuladas sem problema. Outro atributo das fibras de basalto é serem facilmente recicláveis, o que significa que qualquer compósito que contenha estas fibras pode ser reciclado com recurso à inceneração, sendo o produto final deste processo fibras de basalto que podem ser utilizadas novamente. O mesmo não sucede com os compósitos reforçados com fibras de vidro que, quando são incinerados as suas fibras derretem e ficam coladas nas paredes interiores destes equipamentos de tratamento. Por isso, esta capacidade é considerada uma grande vantagem pela indústria automóvel, o que se verifica pela utilização das fibras de basalto se estar a generalizar para a produção de alguns componentes como pastilhas de travão ou embraiagens [23, 25].

Estudos experimentais efectuados por *Lopresto et al.* [26] de forma a aferir as diferenças entre

algumas propriedades dos compósitos reforçados com fibras de basalto quando comparados com os reforçados com fibras de vidro, ambos com uma matriz de base epoxy e com uma fracção volúmica de fibras de aproximadamente 50%, obtiveram resultados bastante satisfatórios, concluindo que compósitos com fibras de basalto podem apresentar valores de módulos de elasticidade à tracção, compressão e flexão superiores em 35-42%, como representado na figura 2.10.

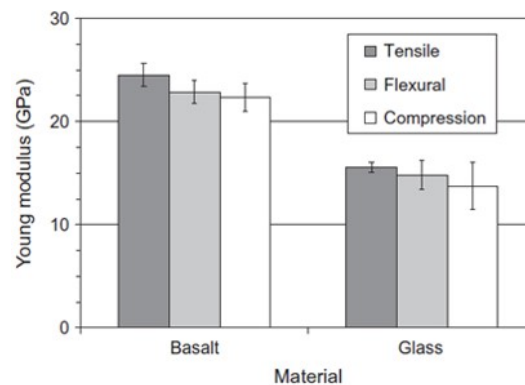


Figura 2.10: Comparação dos módulos à tracção, flexão e compressão entre fibras de basalto e vidro [26]

Devido a todas as vantagens já enunciadas, os compósitos reforçados com fibras de basalto têm vindo a ser utilizados nas mais diversas situações. Como já referido, uma das grandes indústrias que tem vindo a apostar neste material é a automóvel, com o fabrico de componentes como pastilhas de travão (figura 2.11) ou discos de embraiagem, onde se verifica grande desgaste devido à fricção e às altas temperaturas e por isso se mostra ser bastante vantajoso a utilização de fibras de basalto uma vez que estas possuem uma grande resistência térmica e à abrasão, verificando se um aumento 2-3 vezes do tempo de utilização quando comparado com os materiais normalmente utilizados. Outra aplicação que faz uso da boa resistência à abrasão e a agentes químicos destas fibras é o fabrico de tubos usados no transporte de substâncias corrosivas e de materiais muito abrasivos como pedras ou carvão, que podem permanecer muitos mais anos em utilização quando comparados os com tubos metálicos vulgarmente utilizados. Também na construção civil as fibras de basalto têm conhecido uma utilização crescente com a produção de vigas com perfis específicos para utilização em substituição das vigas convencionais em aço e também com a substituição das barras de aço, utilizadas como reforço no interior nas estruturas de betão, por barras constituídas por fibras de basalto (figura 2.12), resultando em melhores prestações ao nível da resistência à corrosão (especialmente à oxidação) e tendo também como vantagem o facto de apresentar uma expansão térmica semelhante ao betão. Actualmente, a utilização de fibras de basalto está a voltar às suas origens, a indústria militar, com a realização de diversos testes a painéis reforçados com estas fibras de forma a avaliar a possibilidade de estes serem usados como protecção balística em veículos militares [21, 23].



Figura 2.11: Pastilhas de travão [27])



Figura 2.12: Barras utilizadas como reforço de estruturas de betão [28]

2.4 Processos de manufactura

Com a descoberta dos materiais compósitos foi necessário desenvolver um conjunto de técnicas para produzir componentes utilizando os mesmos. Essas técnicas estão em constante aperfeiçoamento para que o componente final seja produzido da forma mais eficiente possível, de forma a reduzir os custos associados a esta indústria que são bastante elevados. Os processos de manufactura podem ser divididos em dois grandes grupos, os processos de molde aberto (*open molding*) e os de molde fechado (*close molding*). Os processos de manufactura através de molde aberto são caracterizados pela deposição da fibra e da resina num molde com a geometria pretendida que de seguida é deixado exposto ao ar sem a utilização de qualquer tipo de compactação ou de confinamento durante o processo de cura. Os processos através de molde fechado são caracterizados por apresentarem um passo extra depois da colocação da fibra e da resina: o material de reforço e a resina são introduzidos num molde e a cura é efectuada com recurso a vácuo ou a moldes que contenham duas partes, de forma a promover a compactação dos materiais [29].

Como exemplo de processos de manufactura através de molde aberto têm-se o *hand lay-up*, que é o processo de manufactura mais simples e realizado manualmente, que consiste em dispor as camadas de fibras e a resina, com o auxílio de instrumentos como pincéis e rolos, no molde desejado, sendo de seguida efectuada alguma pressão nas mesmas, de forma a compactar e promover a correcta impregnação das fibras, finalizando este processo com a cura a ser efectuada através da exposição ao ar. Outros processos também caracterizados por serem deste tipo são os processos de *spray-up*, que consiste na aplicação da fibra e da resina com recurso a uma espécie de pistola, sendo a fibra neste processo descontínua de forma a poder ser expelida através da pistola, e *filament winding*, um processo automatizado em que a fibra é puxada através da resina por um cilindro rotativo que por sua vez promove o enrolamento da mesma à sua volta produzindo formas cilíndricas e ocas, sendo por isso utilizado na produção de tubos. Relativamente aos processos denominados de molde, fechado um exemplo é a pultrusão, um processo automatizado muito utilizado para a produção de perfis de secção constante. Neste processo as fibras são puxadas de bobines de grandes dimensões através de um banho de resina e são posteriormente conduzidas através de um molde com a geometria pretendida, o que simultaneamente consolida as fibras e promove a sua cura com o aumento da temperatura. Outro processo também muito utilizado é o denominado *resin transfer molding* (RTM) que consiste em dispor as camadas de fibras num molde previamente tratado, sendo

esse molde posteriormente fechado e selado, ficando apenas uma abertura por onde será introduzida a resina sob pressão. Este processo é normalmente efectuado a uma temperatura elevada de forma a promover a correcta impregnação e cura do compósito [29, 30]. Também classificados no grupo dos processos de molde fechado encontram-se dois processos que apresentam semelhanças entre si, o processo de *hand lay-up* com vácuo (HLUV) e de infusão de resina (IR). Ambos os processos recorrem à aplicação de vácuo de forma a promover a compactação do compósito, sendo este efectuado através da introdução do molde e das fibras num saco fechado de onde o ar é posteriormente retirado. As diferenças entre os processos verificam-se na forma como a resina é introduzida. O processo de HLUV (figura 2.13) é uma extensão do processo de *hand lay-up* em que a resina é introduzida manualmente com a ajuda de instrumentos, sendo de seguida aplicado vácuo de forma a promover a compactação do compósito e remover não só eventuais porosidades que possam existir, mas também o excesso de resina que o processo convencional não consegue solucionar. No processo de infusão de resina, representado na figura 2.14, a introdução da resina no processo é efectuada pela acção do vácuo: as fibras são compactadas com vácuo sendo posteriormente efectuada uma ligação de modo a permitir que a resina seja puxada para o interior do saco fechado, de forma promover uma correcta impregnação das fibras. Este processo apresenta algumas desvantagens associadas como uma maior complexidade de execução e a possibilidade de ocorrerem zonas em que as fibras não ficam correctamente impregnadas, devendo por isso a viscosidade da resina ser baixa de modo a facilitar o escoamento da mesma através das fibras [29–31].

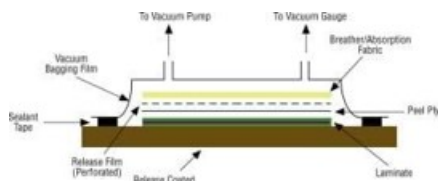


Figura 2.13: Esquema do processo de HLUV [30]

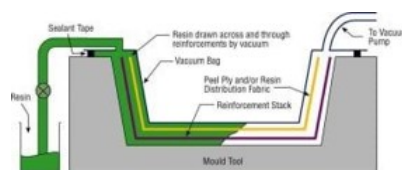


Figura 2.14: Esquema do processo de IR [30]

Estudos experimentais efectuados por *Scalici et al.* [31] permitiram analisar e comparar as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados por fibras de basalto tendo como matriz resina epoxy produzidos segundo os dois métodos acima descritos. Foram comparados provetes constituídos por 8 camadas unidireccionais de fibras de basalto, que foram produzidos de dois painéis com dimensão de 700x300 mm, segundo cada um dos processos anteriormente mencionados, como representado na figura 2.15. De forma a determinar algumas propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tracção, flexão e corte, tendo-se verificado que o processo de infusão de resina consegue garantir que quase todas as propriedades mecânicas do compósito produzido são ligeiramente superiores ao processo de *hand lay-up* com vácuo. Como exemplo são verificados valores de 40 GPa para o módulo de tracção longitudinal e 2,3 GPa para o módulo de corte no processo de IR e de 37,5 GPa e 2 GPa, respectivamente, para o processo de HLUV. Quando as variáveis em estudo são as espessuras do compósito e a percentagem de fibra é verificado que os provetes obtidos através do processo de infusão de resina apresentam uma percentagem de fibra mais elevada, 62% contra 57% no processo de HLUV, e uma espessura menor [31].

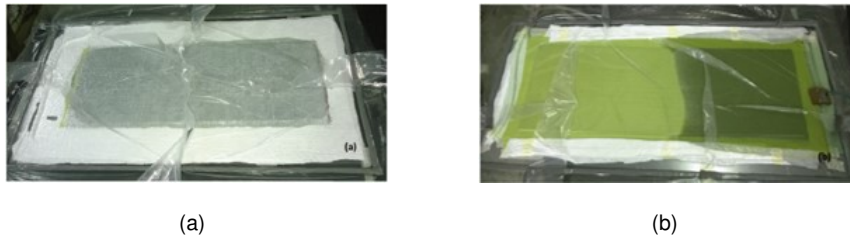


Figura 2.15: Processos de manufactura: (a) Processo de *hand lay-up* com vácuo (b) Processo de infusão de resina

2.5 *Insert*

Desde muito cedo que as mais diversas indústrias fazem uso de componentes em metal nas suas operações e, opostamente ao que é verificado nos materiais compósitos, é simples ligar diferentes componentes de forma a originar estruturas bastante complexas. Estas junções de diferentes componentes são muitas vezes efectuadas com recurso a ligações aparafusadas e soldadas, no entanto, com o aumento da utilização e muitas vezes com a substituição de componentes produzidos em metal por outros em material compósito reforçado por fibras foi necessário ajustar a forma como a ligação entre os diferentes componentes é efectuada. Como descrito por *Gebhardt and Fleischer [32]* uma das soluções viáveis é a introdução, durante a manufactura do compósito ou posteriormente, de uma pequena porção de metal denominada *insert*. O metal utilizado é muitas vezes de alta resistência de modo a conseguir suportar as elevadas cargas verificadas localmente na ligação entre componentes. No entanto, a introdução de *inserts* apresenta efeitos secundários indesejados como um aumento da espessura local do laminado, o que pode provocar a existência de flexão nessa zona o que muitas vezes se traduz em problemas na ligação, e também a possibilidade de existir delaminação na zona onde o *insert* é colocado devido à fraca adesão entre o metal e o compósito [32, 33]. De forma a minimizar estes problemas foram apresentadas diferentes soluções para evitar a existência de delaminação que consistem em aplicar tratamentos superficiais ou um revestimento que permitia aumentar a rugosidade dos inserts de forma a garantir uma melhor adesão entre o mesmo e o material compósito [32]. Podem ainda ser adoptadas algumas medidas como a apresentada por *Akbarpour and Hallström [33]* que consiste em “substituir” porções de camadas de fibras na zona onde se pretende colocar o *insert* de modo a garantir uma espessura igual à do laminado. Na figura 2.16 é apresentado um esquema da utilização de um *insert* num laminado genérico.

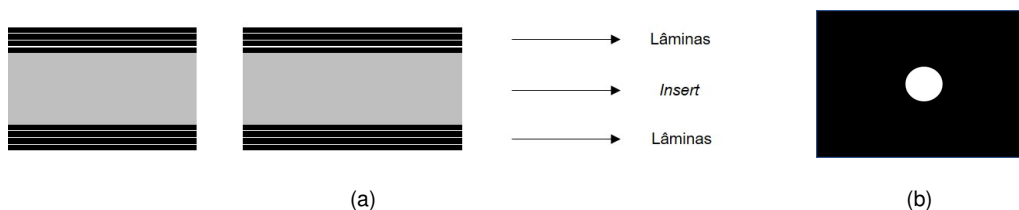


Figura 2.16: Esquema de um *insert*: (a) Vista em corte do laminado (b) Vista de topo

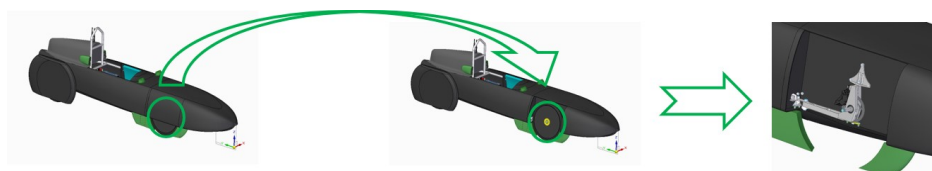
Capítulo 3

Determinação da geometria e materiais utilizados

3.1 Determinação da geometria

3.1.1 Situação actual

O componente em estudo, o suporte do porta cubos representado na figura 3.1, está acoplado ao eixo dianteiro do protótipo e está presente em ambos os lados do mesmo, ou seja, existem dois suportes no protótipo. Estes têm com principais funções fazer a ligação do sistema de direcção à estrutura do protótipo, permitir a rotação das rodas de forma a que o protótipo consiga descrever as curvas desejadas nos circuitos da competição e garantir que todo o sistema de direcção se encontra bem alinhado. O funcionamento do sistema de direcção é efectuado através do accionamento, por parte do piloto, de duas manetes presentes no interior do protótipo. O movimento que o piloto executa nas manetes é linear, sendo este transmitido aos braços de direcção que se encontram conectados aos porta cubos que devido aos componentes presentes no sistema, sofrem uma rotação, sendo esta executada em torno de um eixo, limitado na parte superior pelo suporte em estudo e na parte inferior por uma rótula. O principal cuidado aquando do projecto deste componente inicialmente pelo PSEM, foi a sua fiabilidade, pelo que nunca foram efectuados estudos muito aprofundados de forma a proceder-se a uma optimização em termos de geometria e que eventualmente pudesse resultar numa diminuição da massa do mesmo. Também não foi considerada a possibilidade de testar diferentes materiais para o mesmo, pelo que este trabalho pretende também assim colmatar alguns destes pontos menos explorados por parte da equipa.



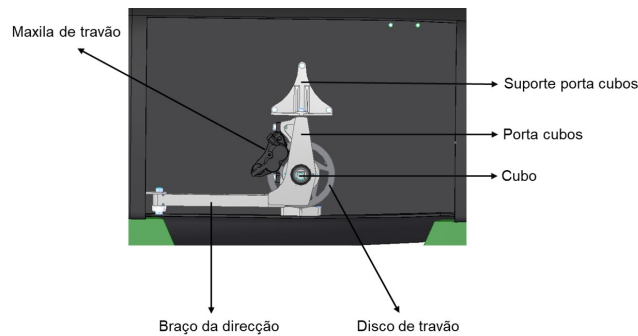


Figura 3.1: Pormenor da localização do suporte do porta cubos

3.1.2 Componente original

O suporte do porta cubos, apresentado na figura 3.2, cujo desenho técnico é apresentado no anexo A.1, foi projectado utilizando o software comercial de CAD - Solid Edge ST10 e apresenta três furos nas extremidades do mesmo para ligações aparafusadas, feitas com recurso a parafusos M5x12 mm, que fazem a sua conexão à estrutura do protótipo. Apresenta também uma caixa na zona central, com o diâmetro de 14 mm e profundidade de 4 mm, para montagem de uma rótula radial, cujas características são apresentadas no anexo B.1, fornecida por uma empresa patrocinadora do projecto, a SKF, que permite a rotação das rodas. A conexão do suporte aos restantes componentes do sistema de direcção é efectuada através de um parafuso M5x20 mm situado na zona central do mesmo, como é apresentado no esquema da figura 3.3. A produção deste suporte foi efectuada externamente à equipa através de um patrocinador do projecto, sendo produzido por maquinaria CNC a partir de um bloco de alumínio 7075-T6. O suporte do porta cubos foi usado no ano de estreia do protótipo, 2017, e também no ano de 2018 onde a equipa realizou o maior número de provas num ano desde o início da mesma, perfazendo um total de cinco.

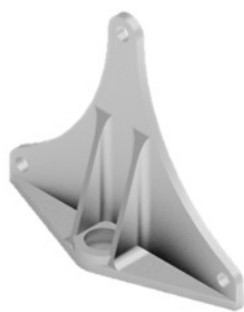


Figura 3.2: *Render* do suporte do porta cubos

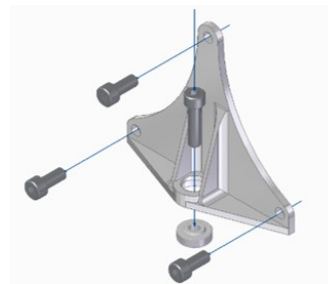


Figura 3.3: Vista explodida dos componentes utilizados na montagem do suporte do porta cubos (parafusos de fixação e rótula radial)

3.1.3 Carregamentos aplicados

O suporte do porta cubos é um componente vital para o protótipo e também um dos que a mais cargas está sujeito. Devido à necessidade de garantir um alinhamento preciso de todo o sistema de direcção, e uma vez que não existe nenhum tipo de suspensão no protótipo, o componente em causa é responsável por suportar todas as forças que surgem do sistema protótipo + piloto, bem como possíveis

impactos que possam surgir de irregularidades verificadas na pista durante as corridas. É portanto necessário ter conhecimento dos carregamentos a que este está sujeito de forma a existir um correcto dimensionamento do mesmo. Como representado na figura 3.4, o suporte do porta cubos encontra-se montado na estrutura do carro com um ângulo de 10° em relação ao eixo vertical, denominado ângulo de *camber*, que tem neste caso como principal função no protótipo a diminuição da área frontal do mesmo resultando num menor atrito aerodinâmico.

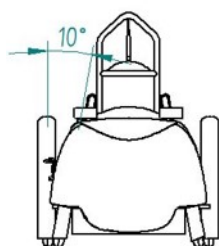


Figura 3.4: Desenho técnico da vista frontal do protótipo GP17 EVO

Com recurso ao software Solid Edge ST10, modelando e definindo correctamente o material de todos os inúmeros componentes que constituem o protótipo e introduzindo também um modelo de um piloto com uma massa a rondar os 55 kg, valor semelhante ao que o piloto irá ter, foi possível determinar o centro de massa (CM) do protótipo. Este valor é considerado uma aproximação uma vez que depende não só de eventuais alterações de massa do piloto mas também da forma como este está sentado, no entanto, é considerado uma aproximação bastante fiável. Foi também determinada a posição do ponto de contacto do restante sistema de direcção com o suporte do porta cubos, o qual se irá considerar para aplicação da força no suporte ($P_{suporte}$). Considerar-se-á o suporte localizado na parte direita do protótipo sabendo que os valores obtidos serão os mesmos, em valor absoluto, se fosse considerado o suporte do lado oposto. Foi considerado um referencial com a origem na parte frontal do protótipo como o representado nas figuras 3.5.

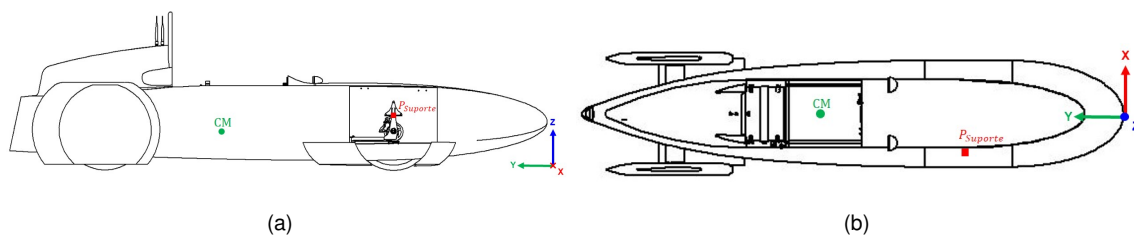


Figura 3.5: Vistas do protótipo GP17 EVO com a representação dos pontos do CM e ($P_{suporte}$) - (a) Vista lateral (b) Vista de topo

As coordenadas obtidas para a posição do CM (equação 3.1) representado por um ponto circular, e para a posição do ponto de contacto do componente com o restante sistema de direcção (equação 3.2), representado por um ponto quadrangular, são:

$$CM = 2,34e_x + 1631,39e_y + 227,44e_z \quad (3.1)$$

$$P_{suporte} = -148,32e_x + 799,98e_y + 285,86e_z \quad (3.2)$$

As coordenadas do CM e a massa do sistema protótipo + piloto vão ao encontro de alguns dados experimentais obtidos pela equipa através da pesagem do mesmo com recurso a 4 balanças debaixo de cada uma das rodas onde foi possível obter uma massa total a rondar os 110 kg e uma distribuição de cargas nos dois eixos de 53% sobre o eixo traseiro, algo que corrobora a coordenada do eixo ordenado y estar cerca de 20 cm deslocada do centro geométrico do protótipo, e 47% sobre o dianteiro. Tendo obtido um valor para a massa do sistema e de como esse valor se distribui, foi então possível calcular os carregamentos que se encontram aplicados no suporte. A força verificada em cada roda do eixo dianteiro calculada pela equação 3.3:

$$F_{roda} = \frac{massa_{sistema} * g * 0,47}{2} = \frac{110 * 9,81 * 0,47}{2} = 253,59N \quad (3.3)$$

onde, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ e representa a aceleração gravítica.

Tendo obtido o valor da força verificado em cada roda dianteira, este será modificado de modo a que o projecto do componente seja efectuado com maior segurança e que o componente final tenha uma maior fiabilidade e consiga lidar com as incertezas, como as irregularidades da pista e alguma possível queda que o protótipo possa ter durante o seu transporte e manuseamento. Entre as várias incertezas que estão associadas ao projecto e produção de um componente podem verificar-se problemas ao nível da qualidade dos materiais e produção dos mesmos, o conhecimento e controlo sobre os carregamentos envolvidos ou o impacto económico e em termos de segurança que a falha do componente pode acarretar. Sendo assim, recorreu-se ao método de Pugsley [34] de forma a calcular um factor de segurança de projecto. Este método considera cinco parâmetros de A a E, determinados a partir da tabela D.1 e da tabela D.2, apresentadas no anexo D, de forma a posteriormente calcular o factor de segurança do projecto, através da equação 3.4:

$$n_{projecto} = n_{sx} * n_{sy} \quad (3.4)$$

Analisando o caso em estudo verificou-se que as propriedades dos materiais a utilizar seriam calculadas através de ensaios experimentais e que o processo de manufactura do componente seria realizado por pessoas com alguma experiência, no entanto, considerou-se que $A=f$. Apesar de o valor do carregamento estático ser conhecido, desconhece-se qual o valor do carregamento máximo verificado em situação de corrida, pelo que se considerou $B=f$. Por último, como se pretende fazer uma análise extensiva com recurso ao método dos elementos finitos que é amplamente usado na engenharia com comprovada eficácia, considerou-se que o parâmetro $C=vg$. Relativamente à segurança para os utilizadores, em caso de falha do componente, o piloto do protótipo pode perder o controlo do mesmo e embater em algum obstáculo, no entanto, o protótipo contém estruturas de deformação que o protegem em caso de embate e as velocidades envolvidas não são muito elevadas, verificando-se uma velocidade máxima de aproximadamente 50km/h, considerando-se por isso o $D=s$. Relativamente ao impacto económico, a falha do componente pode causar a não participação numa

prova, algo que pode pôr em causa os objectivos propostos pela equipa e que pode colocar em causa a continuidade do apoio de alguns patrocinadores e, uma vez que grande parte da ajuda, quer a nível monetário, bens e serviços ou know-how, vem de patrocinadores, considerou-se que $E=s$. Analisando os parâmetros e as tabelas determinou-se que $n_{sx} = 2,1$ e que $n_{sy} = 1,3$ pelo que, através da equação 3.4, se obteve um $n_{projecto} = 2,73$.

Uma vez calculado o factor de segurança e tendo em consideração todas as incertezas associadas ao projecto, a fim de obter um componente final fiável, calculou-se um novo valor para a força que se irá considerar para os futuros cálculos tendo em consideração a F_{roda} , assim tem-se:

$$F_{final} = 253,59 * 2,73 = 692,30N \quad (3.5)$$

Uma vez obtida a F_{final} , a partir da equação 3.5, procedeu-se então ao cálculo do carregamento equivalente (força + momento) verificado no suporte do porta cubos. Considerando a força como estando aplicada no centro de massa do protótipo, e possuindo as coordenadas do mesmo e do ponto de contado para onde a força irá ser transferida sob a forma de carregamento equivalente, obtêm-se o vector dado pela equação 3.6:

$$\vec{S} = -0,15066e_x - 0,83141e_y + 0,05842e_z[m] \quad (3.6)$$

Uma vez obtido o vector, efectuou-se o produto entre o mesmo e a força considerada, obtendo-se os momentos verificados no suporte do porta cubos (equação 3.7):

$$\vec{F} * \vec{S} = (-692,30e_z) * (-0,15066e_x - 0,83141e_y + 0,05842e_z) = 575,58e_x + 104,30e_y + 0e_z[Nm] \quad (3.7)$$

Os valores da força e momentos obtidos estão de acordo com o referencial já mencionado na figura 3.5, e serão os utilizados nas análises que irão ser efectuadas posteriormente. Irá também ser considerado que os mesmo estão aplicados no ponto de ligação central que o suporte possui, onde fica localizada a rótula radial, como representado na figura 3.6:

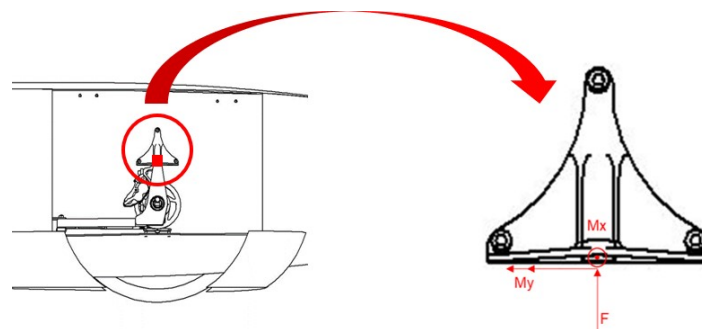


Figura 3.6: Pormenor da localização dos carregamentos verificados no suporte do porta cubos

3.2 Análises computacionais

De forma a avaliar e a proceder a uma comparação entre o componente original, fabricado em alumínio, e o novo componente que será produzido em compósito reforçado por fibras de basalto, utilizou-se um software comercial de elementos finitos, o Siemens NX 12, para efectuar a simulação do comportamento dos dois componentes de forma a avaliar eventuais problemas e soluções a implementar durante o projecto do novo componente.

3.2.1 Método de elementos finitos

O método de elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente utilizada na engenharia para a obtenção de soluções aproximadas para diversos problemas. Os diversos fenómenos e sistemas presentes no dia-a-dia podem ser definidos através de equações diferenciais e integrais, descrevendo as interações a que esse sistema está sujeito, no entanto, muitas vezes essas equações apresentam uma enorme complexidade e é necessário muito tempo para serem resolvidas. O MEF tem como base a divisão de um domínio contínuo, isto é, o sistema que se pretende analisar, em subdomínios denominados elementos finitos, aplicando as equações que governam o domínio de uma forma simplificada a cada um dos subdomínios. O conjunto de elementos do subdomínio é designado por malha, estando ligados através de nós de forma a descreverem uma boa aproximação do domínio. Quanto maior for esta divisão, ou seja, quanto maior for o número de elementos finitos, melhor vai ser a aproximação ao domínio considerado. O procedimento standard para uma análise estrutural de elementos finitos utilizando o programa Siemens NX 12 está dividida em três partes distintas:

- Obtenção de um modelo de CAD com a geometria que se pretende analisar (ficheiro part). Este passo gera um ficheiro com a extensão *.prt*
- Obtenção do modelo de elementos finitos da geometria que se pretende analisar (ficheiro fem). É neste passo que é gerada a malha e que são introduzidas todas as informações sobre o tipo e forma dos elementos, bem como as propriedades físicas a utilizar no modelo em estudo. Este passo gera um ficheiro com a extensão *.fem*
- Obtenção do modelo de simulação da geometria que se pretende analisar (ficheiro sim). É neste passo que são introduzidas todas as informações sobre as condições de fronteira e carregamentos verificados no modelo, bem como o tipo de análise que se pretende efectuar. Este passo gera um ficheiro com a extensão *.sim*

3.2.2 Simulação componente original

O componente original, como referido anteriormente, foi projectado para o protótipo que competiu pela primeira vez em 2017, pelo que a sua geometria já estava definida e foi efectuada com recurso ao software - Solid Edge ST10. Sendo assim, o primeiro passo, como representado na figura 3.7, passou pela importação da geometria do suporte do porta cubos para o software de elementos finitos de forma

a obter o ficheiro part. Neste caso, e como a modelação foi efectuada anteriormente, a geometria importada é tridimensional.



Figura 3.7: Componente original no programa Siemens NX12

Uma vez concluída a importação e a gravação do ficheiro, foi iniciado o processo para obter uma malha de elementos finitos. Para isso é criado um ficheiro fem onde toda a informação necessária no que concerne ao material, ao tipo e dimensão dos elementos é definida. O material do componente é alumínio 7075-T6, material que não está pré-definido no programa e por isso foi criado no mesmo como sendo um material isotrópico. Pela consulta do guia do programa [37] verificamos que para materiais isotrópicos as propriedades que necessitam de ser inseridas são a densidade (ρ), o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν), sendo também possível inserir o módulo de corte (G), no entanto, o programa consegue calculá-lo a partir das propriedades já introduzidas. Sendo assim, consultou-se o fabricante, KMS - Materiais Técnicos [35], que fornece o material à equipa, encontrando-se na tabela 3.1 os valores das propriedades necessárias:

Tabela 3.1: Propriedades do Alumínio 7075-T6

Material	Densidade [Kg/m ³]	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson	Módulo de Corte [GPa]
Alumínio 7075 - T6	2810	71,7	0,33	26,9

Com as propriedades do material introduzidas no programa, foram então definidos os *mesh collectors* que contêm toda a informação sobre as propriedades físicas e o tipo e dimensão dos elementos. Neste caso foram criados *3D collectors* (elementos sólidos tridimensionais), uma vez que a geometria definida era tridimensional, e definido o tipo de propriedades a considerar, neste caso as propriedades físicas definidas foram do tipo *PSOLID* uma vez que o material a considerar se trata de um sólido, foram então introduzidas as propriedades relativas ao mesmo, como apresentado na figura 3.8.

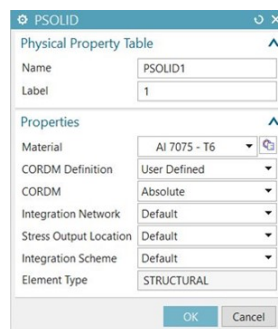


Figura 3.8: Definição do material no programa Siemens NX12

Uma vez definidas as propriedades, procedeu-se à criação da malha de elementos finitos, utilizando elementos sólidos *3D CTETRA* com 4 nós, por serem os elementos 3D que melhor se adaptam a geometrias mais complexas. Sendo assim, e depois de alguns testes, verificou-se que a melhor dimensão para os elementos escolhidos seria de 1 mm de forma a que os elementos presentes nos raios de curvatura do componente não apresentassem problemas. A informação da malha final utilizada na simulação do componente original é apresentada na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Informação da malha utilizada no Siemens NX 12

	Número de Elementos	Número de Nós
Suporte porta cubos em Alumínio 7075 - T6	76517	18851

De forma a simular o ponto de aplicação do carregamento verificado no componente, que fica situado no centro do furo central de ligação ao restante sistema de direcção, foram criados elementos de conexão, denominados *conectores*. Neste caso foram utilizados elementos *RBE 3*, por conseguirem fazer uma correcta distribuição das cargas aplicadas e não adicionarem nem massa nem rigidez extra à estrutura. Assim sendo, apresenta-se na figura 3.9 o resultado da aplicação da malha de elementos finitos e a forma como os conectores foram aplicados no componente.

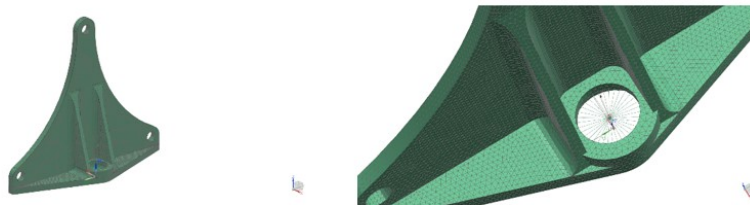


Figura 3.9: Malha de elementos finitos utilizada e pormenor dos conectores

Uma vez definidas todas as informações necessárias relativamente à malha a utilizar, procedeu-se à criação de um ficheiro *sim* onde será definido o tipo de análise a efectuar, e todas as informações sobre os carregamentos e constrangimentos verificados. O tipo de análise escolhido foi *SOL 101 Linear Statics - Global Constraints* devido às deformações previstas serem pequenas e se encontrarem na zona elástica do material. Definido o tipo de análise, procedeu-se à introdução das condições de fronteira. Assim sendo, definiram-se os três furos, onde as ligações aparafusadas estão localizadas, como estando fixos em toda a espessura do componente, ou seja, todos os graus de liberdade estão constrangidos. De forma a tornar a análise mais realista, e uma vez que a face posterior do componente se encontra encostada à estrutura do carro e que esta é considerada como sendo rígida, todos os graus de liberdade dessa face foram considerados como livres, com exceção para o deslocamento segundo o eixo *xx* ($u_x=0$) respeitando o referencial definido inicialmente. Posteriormente, foram introduzidos os carregamentos, segundo o representado na figura 3.6. De forma a facilitar a visualização, a informação descrita anteriormente é apresentada nas figuras 3.10 e 3.11, onde estão representadas as condições de fronteira impostas e os carregamentos aplicados, mas não a malha gerada, de forma a facilitar a

compreensão.



Figura 3.10: Representação dos constrangimentos aplicados

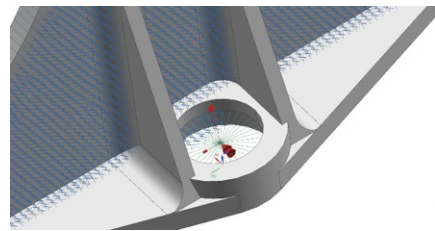


Figura 3.11: Ponto de aplicação dos carregamentos verificados

Por último, para a obtenção da solução desta análise foram utilizados os parâmetros recomendados pelo programa para os elementos tridimensionais definidos anteriormente e, como resultado da análise, foram determinados os valores dos deslocamentos, extensões e tensões.

3.2.3 Resultados obtidos

Uma vez efectuada a simulação foram analisados alguns resultados de forma a aferir o comportamento do suporte do porta cubos original. Procurou-se também perceber como iria ser a deformação no componente, de que modo isso afectaria o desempenho do mesmo e se isso acarretaria problemas para o protótipo, principalmente através dos valores dos deslocamentos e tensões verificadas como consequência do carregamento.

Assim sendo, o valor máximo para o deslocamento é verificado na zona central do componente onde está localizada a rótula radial, apresentando um valor máximo, para o carregamento anteriormente indicado, de aproximadamente 0,02 mm segundo a direcção positiva do eixo zz, como representado na figura 3.12. Os valores segundo os restantes eixos ordenados são desprezáveis quando comparados com este.

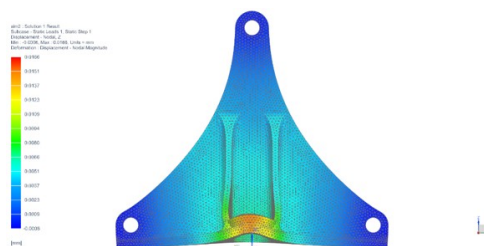


Figura 3.12: Deslocamentos verificados no componente original considerando a direcção do eixo zz

De forma a verificar a influência do carregamento aplicado ao nível das tensões verificadas no suporte original, analisaram-se os resultados da tensão de von-Mises, por estas representarem uma ponderação das tensões geradas nos diversos eixos ordenados pelo carregamento aplicado e permitirem apurar se o material do suporte ultrapassou a tensão de cedência (503 MPa) e se pode ocorrer a falha do mesmo. Nas figuras 3.13 e 3.14, apresentadas de seguida verifica-se que existe uma grande concentração de tensões na periferia do furo central do componente onde está situada a ligação do suporte ao restante sistema de direcção, sendo a tensão máxima verificada da ordem dos 67 MPa. Verificam-se também tensões mais elevadas, na ordem dos 25 MPa, junto aos furos das

ligações aparafusadas. Quando comparados com a tensão de cedência do material utilizado no suporte estes valores são bastante inferiores, não representando por isso um problema para o protótipo.

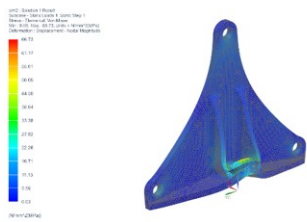


Figura 3.13: Representação das tensões verificadas no suporte

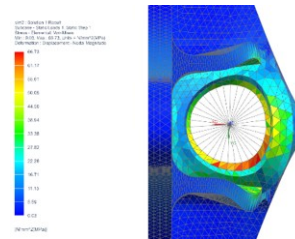


Figura 3.14: Pormenor da concentração de tensões na periferia do furo central

Os dados obtidos da simulação efectuada com elementos finitos ao componente original servirão de base ao projecto do novo componente, de forma a projectar um que seja mais eficiente e que conduza a melhorias para o protótipo da equipa.

3.2.4 Procura de novas soluções

Uma vez analisado o componente projectado originalmente procedeu-se à procura de novas soluções para um novo componente tendo em consideração o abandono dos metais e a adopção de materiais compósitos, neste caso, um compósito de matriz polimérica reforçado com fibras de basalto. Para isso foram pensadas e modeladas diversas iterações para o novo componente, tendo em consideração os constrangimentos já anteriormente mencionados, sendo estes os de manter o ponto de ligação ao restante sistema de direcção e as ligações à estrutura do protótipo, até se obter uma geometria final que oferecesse melhorias em relação à utilizada anteriormente, e que facilitasse o processo de manufactura. De forma a proceder-se a uma comparação entre as diversas geometrias possíveis de serem utilizadas, foram usados os mesmos parâmetros em cada uma delas, ou seja, foi considerado um laminado multidireccional genérico e simétrico e considerado o mesmo carregamento e as mesmas condições de fronteira verificadas no componente original. De modo a possibilitar a ligação entre o novo componente e o restante sistema de direcção foi considerada a existência de um *insert*, de geometria rectangular, na zona central da base do mesmo tendo este sido modelado como estando localizado no plano médio das camadas, ou seja, tendo o *insert* o mesmo número de camadas acima e abaixo dele. Este *insert* será fabricado a partir do mesmo alumínio utilizado no componente original, apresentando uma espessura de 5 mm, e cujas propriedades estão referidas na tabela 3.1. Foram então efectuadas análises computacionais a cada uma das iterações modeladas de forma a perceber as suas limitações e alterações que necessitavam de ser introduzidas. De forma a efectuar simulações computacionais preliminares para aferir a qualidade das iterações modeladas, foram seguidas as mesmas etapas anteriormente descritas de forma a efectuar a simulação computacional de elementos finitos. Por isso, e uma vez que agora a geometria não se encontrava já projectada, como sucedeu com o componente original, foi necessário proceder ao projecto da mesma utilizando as funcionalidades de CAD que o programa Siemens NX 12 possui, terminando este passo

com a obtenção de um ficheiro part. Uma vez obtida a geometria pretendida, iniciou-se a segunda etapa, ou seja, a criação de um ficheiro *ferm*, com recurso à *toolbox* que o programa possui com diversas ferramentas especificamente para a modelação de laminados, com a informação do material e da malha a utilizar, verificando-se neste passo algumas alterações ao efectuado na análise do componente original. Começando pelo material introduzido, tal como anteriormente referido, as propriedades das fibras de basalto variam conforme o local onde este é extraído, então, através da bibliografia consultada retiraram-se valores padrão para as propriedades necessárias, procedendo-se de igual maneira para a matriz polimérica considerada, neste caso resina de base epoxy, sendo todos os valores apresentados na tabela 3.3. Uma vez obtidos os valores para ambos os materiais, fez-se uso de uma ferramenta disponível no software onde é possível introduzir as propriedades da matriz e do reforço considerando ambos separadamente e como sendo materiais isotrópicos. Introduzindo também a fracção volúmica de fibras e a forma como as fibras se encontram dispostas em cada camada, o programa efectua os cálculos necessários de forma a obter as propriedades equivalentes do compósito (material ortotrópico).

Tabela 3.3: Propriedades utilizadas nas simulações preliminares

Material	Densidade [Kg/m ³]	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson
Resina Epoxy	1100	3,2	0,35
Fibras de Basalto	2630	79,3	0,26

A figura 3.15 apresenta a introdução dos parâmetros necessários à ferramenta para a determinação das propriedades do compósito reforçado por fibras de basalto (BFRP – *basalt fiber reinforced polymer*). Assim sendo, foi selecionado como tipo de disposição das fibras “*woven*”, indicando que na mesma camada existem fibras a 0° e 90°. Foi de seguida indicado que o material de matriz seria “*Epoxy*” e que o material do reforço seriam as “Fibras de Basalto”, indicando que o material é o mesmo considerando os 0° (*warp*) e os 90° (*weft*) e também considerando que existe o mesmo número de fibras em cada uma das direcções (*Balance Coefficient*). Posteriormente foi definido que a espessura de cada *ply* seria de 0,2 mm, valor considerado na bibliografia quando se consideram fibras de carbono com a mesma densidade, pelo que será usado para as simulações preliminares e, por último, considera-se que a fracção de fibras será de 60%. o valor situado entre os valores obtidos nos processos de HLUV e IR como referido anteriormente. As propriedades equivalentes da lâmina do material compósito calculadas através do programa são apresentadas na tabela 3.4.

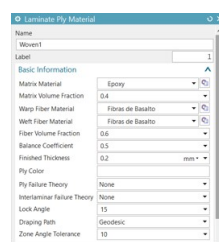


Figura 3.15: Introdução dos parâmetros para definição do compósito reforçado por fibras de basalto

Tabela 3.4: Propriedades da lâmina do compósito de resina epoxy reforçado por fibras de basalto (Siemens NX 12)

Material	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	G_{23} [GPa]	Coefficiente de Poisson	Densidade [Kg/m ³]
BFRP	28,41	28,41	2,80	2,72	2,21	0,08	2001

Uma vez criado o material do novo componente, procedeu-se à criação da malha de elementos finitos. Neste caso será considerada uma malha bidimensional, uma vez que, após nova consulta do guia do programa [36], se verificou ser o mais indicado, visto que podemos considerar que se está perante um estado de tensão plana, uma vez que quando comparado com as restantes dimensões, a espessura que o laminado irá apresentar será muito pequena, pelo que as tensões verificadas ao longo da espessura serão desprezáveis quando comparadas com as restantes. Também se justificaria a utilização de elementos tridimensionais se existissem variações relevantes na espessura do laminado, algo que também não é verificado no novo componente. Assim sendo, a malha de elementos finitos contempla a utilização de elementos *CQUAD4*, elementos quadrangulares de 4 nós, uma vez que estes são os que apresentam melhores propriedades para serem aplicados na estrutura considerada, por não exibirem um aumento de rigidez, como pode suceder ao serem utilizados elementos triangulares, e por apresentarem uma melhor aproximação para o mesmo número de elementos. Os elementos considerados têm 1 mm de dimensão de forma a se ajustarem correctamente à nova geometria. Ao contrário do verificado em materiais isotrópicos, em que o material apresenta as mesmas propriedades em todas as direcções, no caso de materiais ortotrópicos as propriedades são diferentes conforme a direcção que se considera. Assim sendo, é muito importante que quando se considera um material desta natureza, os elementos finitos que o constituem sejam orientados segundo a mesma direcção, conforme ilustrado na figura 3.16, de forma a que as propriedades ortotrópicas do material sejam respeitadas.

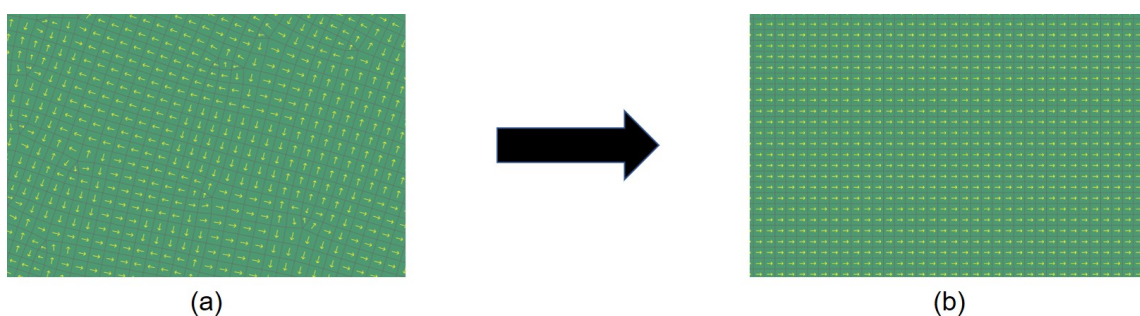


Figura 3.16: Orientação dos elementos finitos: (a) Orientação aleatória (b) Orientação bem definida

Uma vez definidas todas as informações necessárias relativamente à malha a utilizar, procedeu-se de seguida à criação de um ficheiro *sim*. O tipo de análise escolhido foi, à semelhança do aplicado no componente original, *SOL 101 Linear Statics - Global Constraints*, e todas as condições de fronteira e carregamentos foram mantidos sem alterações, tanto ao nível da localização como do valor. Uma vez tudo correctamente definido no software de elementos finitos, procedeu-se à análise de cada uma das iterações modeladas, apresentando-se as geometrias estudadas na figura 3.17.

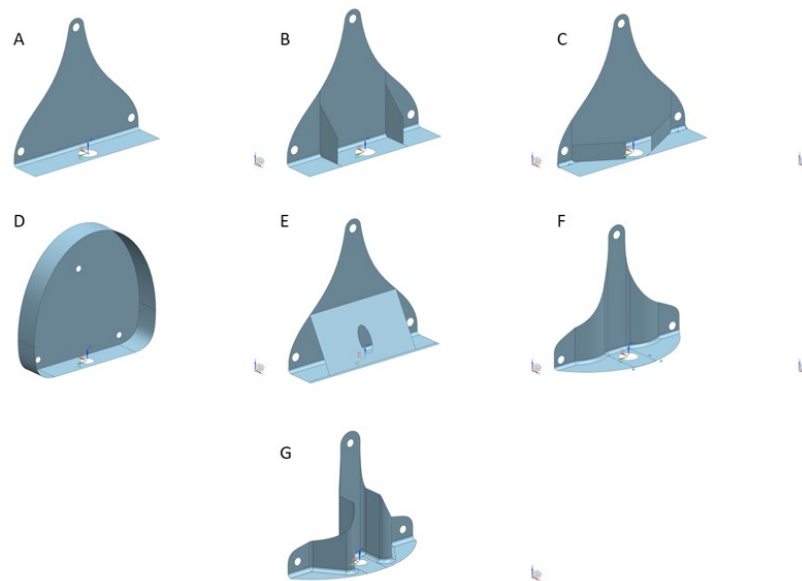


Figura 3.17: Representação das diversas iterações até ao componente final (ficheiros prt)

A - O ponto de partida (geometria A) foi considerado como sendo uma geometria semelhante à original, mas tendo em consideração o processo de manufactura da mesma, uma vez que serão utilizados materiais compósitos. Sendo assim, a geometria A apresenta uma forma bastante simples e fácil de produzir, no entanto, quando efectuada uma análise estrutural, verifica-se a existência de uma deformação muito elevada na base do componente, algo bastante prejudicial para todo o sistema de direcção e que por isso importa muito minimizar. É também verificada a existência de concentração de tensões na região do raio de curvatura entre a parte vertical e a base do mesmo, razões que contribuíram para a rejeição da primeira iteração.

B e C - Tendo em consideração os problemas observados na geometria A procedeu-se, nas iterações seguintes, de forma a evitar os mesmos. Assim sendo, foram introduzidos reforços para tentar minimizar a deformação verificada na base (geometria B e C), tendo os resultados obtidos nas simulações efectuadas indicado que a solução aplicada afectou positivamente a deformação verificada na base, diminuindo-a, no entanto, esta solução apresenta algumas complicações na manufactura da mesma, considerando que os reforços seriam aplicados com recurso a ligações coladas, algo que não sendo executado de uma forma muito cuidadosa poderia resultar na falha das mesmas, pondo em causa a integridade do componente.

D - Tendo em consideração o problema encontrado, foi desenvolvida e testada uma nova iteração (geometria D) que propunha um componente produzido sem recurso a colagens de forma a evitar possíveis problemas, no entanto, esta solução foi rejeitada por apresentar um aumento na deformação verificada em relação às iterações anteriores e também por representar um aumento considerável de massa quando comparado com o componente original, o que, não sendo o principal objectivo o de existir uma diminuição da massa, é no entanto algo bastante valorizado.

E - De forma a tentar reduzir a deformação verificada na base do componente, voltou a ter-se em consideração as iterações anteriores que produziram melhores resultados nesse parâmetro. Na nova iteração (geometria E) foi considerada apenas a existência de um reforço e de maiores dimensões,

verificando-se após análise que os resultados dos deslocamentos e tensões eram melhores, no entanto, a montagem do componente no protótipo poderia apresentar uma dificuldade acrescida e, após uma análise mais aprofundada, ficou estabelecido que esta iteração seria rejeitada e que o componente a ser produzido em material compósito seria efectuado sem a aplicação de elementos colados, pelo que os reforços teriam que ser executados de outra forma.

F - Tendo em atenção o referido anteriormente, foi explorada uma geometria diferente (geometria F) do que até agora tinha sido testado. Nesta nova iteração foi tido em consideração a possibilidade de a geometria ser produzida num único passo, sendo para isso introduzidos pequenos reforços, na face vertical, de modo a contrariar as deformações verificadas na base do componente e aumentar a sua rigidez. Esta iteração mostrou ter potencial especialmente quando comparada com a geometria A, verificando-se, no entanto, ainda deformações e tensões algo elevadas, mas assumindo-se esta iteração como um bom ponto de partida para a obtenção de uma geometria final.

G - Tendo em consideração os resultados positivos obtidos na iteração anterior, foram feitas algumas alterações na forma da mesma de modo a obter melhores resultados, principalmente ao nível das tensões e deformações. Surge assim a geometria final do novo componente (geometria G) que apresenta a possibilidade de manufactura num único passo, sem recurso a colagens ou outra qualquer introdução de reforços, aliado a deslocamentos e tensões baixas quando comparado com outras iterações do componente, bem como a possibilidade de existir uma redução na massa quando comparado com o componente original.

Na tabela 3.5 apresenta-se um resumo das propriedades de cada uma das geometrias apresentadas anteriormente comparando com o geometria original fabricada em alumínio.

Tabela 3.5: Comparação das geometrias preliminares com a original

	Geometria original	A	B	C	D	E	F	G
Massa [g]	40	28,42	31,71	31,33	62,30	36,96	25,36	32,25
Deformação máxima [mm]	0,02	0,68	0,40	0,26	1,30	0,04	0,71	0,06
Tensão máxima [MPa]	66,73	207,50	131,56	115,48	542,95	32,26	243,67	37,18

3.3 Determinação das propriedades do compósito

3.3.1 Considerações iniciais

Como já referido, as propriedades das fibras de basalto variam conforme o local de onde a matéria prima é recolhida, pelo que para efectuar previsões credíveis do comportamento de estruturas reforçadas por fibras é importante proceder a uma caracterização do compósito que será utilizado. O material de reforço utilizado na produção do compósito foi uma manta de fibra de basalto com uma densidade de 220 g/m³, com a referência *BAS 220.1270.P*, fabricada pela Basaltex, apresentando-se as características da mesma no anexo B.2. Como agente aglutinante foi utilizada resina epoxy do

fabricante Sicomin, com referência a *SR 1500*, sendo utilizado o catalisador *SD 2505*, com o rácio de mistura de 100/33g de massa de resina para massa de catalisador. As características da resina e do catalisador usados são apresentados no anexo B.3. Uma vez definidos os materiais que constituem o compósito, foi seguido um conjunto de normas que permitiam ter um procedimento experimental fiável para a determinação das propriedades necessárias do mesmo. De seguida irá apresentar-se uma breve explicação das normas escolhidas e de todo o procedimento efectuado até à obtenção das propriedades do compósito.

3.3.2 Apresentação das normas

As normas seguidamente descritas foram escolhidas com base na sua aplicabilidade a materiais compósitos reforçados por fibras e também pelas propriedades que podiam ser determinadas através das mesmas. Assim, foram tomadas como referência as normas ASTM D 3039 [37] e ASTM D 3518 [38], por serem as normas usualmente utilizadas neste tipo ensaios.

3.3.2.1 Norma ASTM D 3039

A norma ASTM D 3039 é utilizada para determinar propriedades à tração de materiais compósitos de matriz polimérica. Utilizando como referência esta norma, podem ser avaliados compósitos reforçados por fibras contínuas ou fibras descontínuas tendo em consideração que estes têm que ser simétricos em relação ao plano médio do mesmo. A norma requer que o provete tenha uma secção constante e retangular de dimensões 25x2,5 mm, e um comprimento de 250 mm. As fibras deverão encontrar-se alinhadas com a direcção do deslocamento do travessão da máquina ou na perpendicular a este. É também referida a importância que o processo de preparação dos provetes tem, devendo ser utilizadas ferramentas de corte de diamante de forma a evitar problemas como delaminação ou entalhes, sendo também aconselhado o uso de reforços nas extremidades dos provetes a serem ensaiados e um controlo apertado da orientação das fibras. Após a preparação dos provetes é necessário medir as suas dimensões, de forma a calcular a área de secção que será utilizada nos cálculos, devendo esta medição ser efectuada em três zonas próximas da localização do extensómetro. É sugerida a execução de pelo menos cinco ensaios válidos de forma a obter resultados mais abrangentes, sendo a velocidade do ensaio de 2 mm/min. Tendo em consideração a norma é possível, através da realização de um ensaio de tração do provete, determinar o módulo de elasticidade do compósito utilizando a equação 3.8.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3.8)$$

Considerando os valores de tensão num intervalo bem definido onde se considera estar presente o domínio elástico do compósito, neste caso, quando a extensão longitudinal verificada é 0,001 e 0,003, sendo estes valores obtidos com o auxílio de extensómetros previamente montados no provete ensaiado, e assumindo que a variação é linear obtém-se o valor desejado.

É também referido pela norma um procedimento para o cálculo do coeficiente de Poisson do

compósito, sendo este efectuado através da equação 3.9

$$\nu = \frac{\Delta\epsilon_T}{\Delta\epsilon_L} \quad (3.9)$$

Considerando o quociente entre a variação da extensão transversal e a extensão longitudinal no provete, entre dois pontos definidos quando a extensão longitudinal verificada é 0,001 e 0,003.

3.3.2.2 Norma ASTM D 3518

A norma ASTM D 3518 é utilizada para determinar propriedades ao corte de materiais compósitos de matriz polimérica. Esta norma apresenta bastantes semelhanças com a norma anteriormente descrita, ao nível do procedimento de preparação dos provetes e das suas dimensões. No entanto as fibras presentes no compósito a ser ensaiado neste caso fazem ângulos de +/- 45° com a direcção do descolamento do travessão. A velocidade do ensaio também permanece inalterada, tendo em consideração que o provete deve obrigatoriamente ser instrumentado em ambas as direcções (longitudinal e transversal).

É referido na norma um procedimento para o cálculo do módulo ao corte do compósito, sendo este calculado através da equação 3.10:

$$G_{12} = \frac{\Delta\tau_{12}}{\Delta\gamma_{12}} \quad (3.10)$$

É novamente considerado um intervalo bem definido para o cálculo desta propriedade, sendo os extremos desse os valores verificados quando a extensão de corte (γ_{12}) tem como valores 0,002 e 0,006. Estes valores são obtidos através de leituras efectuadas pelos extensómetros colocados no provete e através da equação 3.11:

$$\gamma_{12} = \epsilon_x - \epsilon_y \quad (3.11)$$

Onde ϵ_x representa a extensão verificada na direcção longitudinal e ϵ_y a extensão na direcção transversal relativamente ao deslocamento do ensaio. O cálculo do valor da tensão de corte, τ_{12} , é realizado com recurso à equação 3.12, sendo esta calculada em cada um dos pontos de extensão de corte acima definidos.

$$\tau_{12} = \frac{P}{2A} \quad (3.12)$$

Onde P é o valor da força medida no ensaio em cada um dos pontos seleccionados e A o valor da área de secção do provete medido nas condições definidas pela norma ASTM D 3039.

3.3.3 Metodologia da preparação dos provetes

Será efectuada uma descrição pormenorizada de todo o processo de preparação dos provetes, explicando o processo de manufatura, preparação e instrumentação dos provetes de modo a estes estarem finalizados para os ensaios experimentais segundo as normas anteriormente referidas.

3.3.3.1 Manufatura dos provetes

De forma a garantir o número de provetes necessário para os ensaios experimentais foram produzidas duas placas de dimensão 340x230 mm, sendo posteriormente cortadas para as dimensões referidas nas normas. O processo utilizado na manufatura das placas foi o de hand lay up com vácuo, descrito no capítulo 2, sendo este o processo adoptado por ser aquele que, não comprometendo as propriedades do produto final, seria mais acessível de executar com os meios disponíveis. Todo o processo de manufatura das placas foi efectuado na Escola Superior de Tecnologia de Setúbal do Instituto Politécnico de Setúbal, utilizando os meios e os materiais disponíveis no Laboratório de Mecânica.

O processo de fabrico das placas de compósito pelo método de HLUV é um processo complexo e, por isso, de forma a garantir um produto final de boa qualidade foi necessário seguir um conjunto de acções que serão descritas de seguida:

1. Preparação da superfície onde irá ser efectuada a placa de compósito. Neste caso a superfície escolhida foi um vidro com as dimensões de 360x250 mm. A preparação da superfície é executada em duas etapas, a limpeza da mesma com recurso a um pano limpo e acetona e a aplicação de um agente desmoldante, cuja ficha técnica pode ser consultada no anexo B.4. (figura 3.18 (a)), neste caso cera, de modo a que a placa de compósito seja no final facilmente removida da superfície. São aplicadas seis camadas, conforme recomendado, com um intervalo de 30 min entre cada uma delas. O procedimento de aplicação das camadas é o seguinte: a camada aplicada anteriormente é removida com recurso a um pano limpo e volta a ser aplicada uma nova camada, repetindo-se este processo até a superfície ter o número de camadas indicadas. Como resultado deste processo obtém-se uma superfície suficientemente polida.
2. Corte do tecido de reforço (fibra de basalto). Estas são cortadas com dimensão de 340x230 mm (figura 3.18 (b)). O corte foi efectuado a partir de um rolo de grande dimensão. Para evitar a distorção da malha da fibra aquando o corte da mesma foram adicionadas tiras de fita adesiva de papel, de forma a fazer as secções com as dimensões indicadas. Foram cortadas doze secções rectangulares, de forma a satisfazer a espessura final do compósito indicada pela norma, sendo o corte efectuado a meio da fita adesiva. Foram também efectuados cortes, mantendo as dimensões referidas, dos restantes materiais necessários para a execução do processo HLUV, sendo estes película perfurada e feltro de respiração (*breather*) responsáveis, no caso da película perfurada, por permitir que o produto final seja facilmente desmoldado e deixar que o excesso de resina presente possa ser retirado aquando da aplicação do vácuo, para compactação da placa, e a camada de *breather* responsável por absorver esse mesmo excesso. Foi também efectuado o corte do saco de vácuo com as dimensões necessárias para que o vidro pudesse ser colocado no seu interior, como um envelope.
3. Preparação da matriz (mistura resina + catalisador). É feita a mistura de 180 g de resina com 59,4 g de catalisador, seguindo o rácio indicado pelo fabricante 100g/33g. É fulcral existir uma correcta

mistura dos dois componentes de forma a produzir uma mistura homogénea e evitar problemas no produto final, sendo esta mistura efectuada com recurso a uma espátula de madeira.

4. Manufatura da placa. Depois de se obter uma mistura homogénea, dá-se início à manufatura da placa de compósito. Para isso, as secções rectangulares previamente cortadas são dispostas sobre o vidro, depois das 6 camadas de desmoldante serem aplicadas, sendo impregnadas com o auxílio de um pincel uma de cada vez. As fibras são colocadas paralelamente e perpendicularmente à maior dimensão do vidro, uma vez que a fibra considerada é do tipo manta e apresenta na mesma camada fibras a $0^{\circ}/90^{\circ}$ com o entrelaçado da malha do tipo *plain*. Uma vez impregnadas todas as doze camadas de fibra de basalto (figura 3.18 (c)), é colocada sobre as camadas primeiramente a película perfurada e só depois as camadas necessárias de *breather*, de modo a que todo o excesso de resina que passe através da película perfurada seja retido nas mesmas (figura 3.18 (d)). Terminado este processo o vidro com as camadas de fibra é introduzido num saco de vácuo, sendo este de seguida fechado em todos os lados, com a fita adesiva de dupla face vulgarmente denominada *mastique*, e retirado o ar do seu interior, com o auxílio de um ponto de vácuo (válvula) onde é conectada uma mangueira que se encontra ligada a uma bomba de vácuo, de modo a promover a compactação das camadas de fibra de basalto. O ponto de vácuo é colocado através do saco permitindo uma ligação entre o interior e o exterior do mesmo.
5. Aplicação de vácuo. Uma vez fechado o saco de vácuo e retirado todo o ar do seu interior, ficando com uma pressão negativa de 700 mbar, sendo este mantido nestas condições durante 24 h, à temperatura ambiente, de modo a promover uma completa cura da resina (figura 3.18 (e)).
6. Obtenção da placa. Finalizado o tempo de espera, o saco de vácuo é aberto e a placa é retirada do seu interior (figura 3.18 (f)).

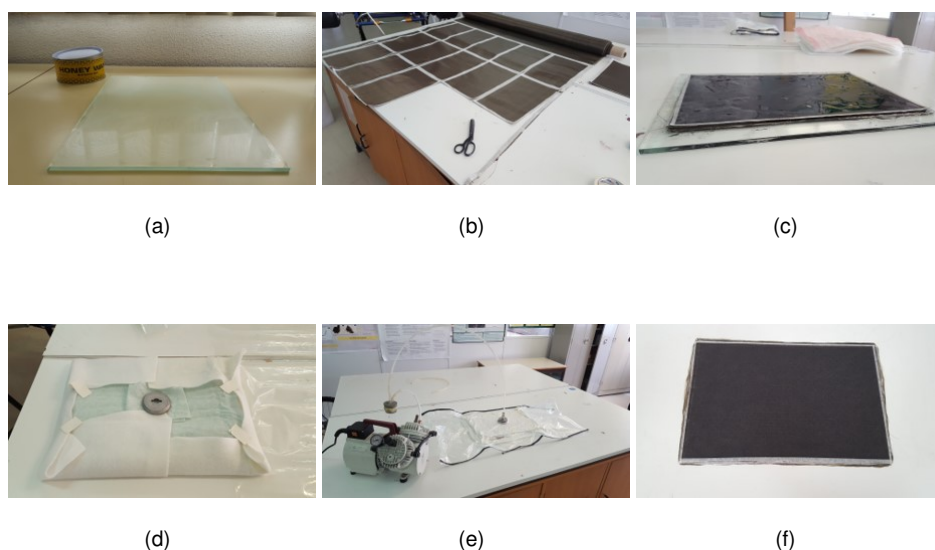
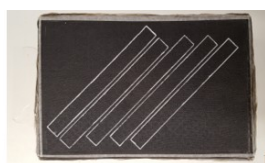


Figura 3.18: Manufatura dos provetes: (a) Aplicação do agente desmoldante (b) Corte das secções rectangulares da fibra de basalto (c) 12 camadas de fibra impregnadas com resina (d) Aplicação do papel perfurado e *breather* (e) Saco de vácuo e bomba (f) Placa final depois de 24h em vácuo

Obtidas as placas finais com as dimensões referidas anteriormente, deu-se início à execução dos provetes com a geometria definida nas normas, sendo verificadas pequenas alterações nos procedimentos, conforme se estavam a produzir os provetes para a norma ASTM D 3039 ou ASTM D3518. Todo o trabalho foi executado no Instituto Superior Técnico. Para tal, foi seguido um conjunto de operações expostas de seguida:

1. Marcação dos provetes. Com as placas de compósito completamente curadas, recorreu-se ao Solid Edge ST10 para a execução de templates dos cinco provetes necessários, para cada norma, sendo posteriormente marcados na placa de forma a apresentar linhas auxiliares que facilitassem o corte dos mesmos. Os provetes produzidos segundo a norma ASTM D 3039 são posicionados e alinhados com as direcções da fibra. Os provetes que serão ensaiados segundo a norma ASTM D 3518 tem que ser posicionados de uma forma diferente, tendo as fibras presentes nos mesmos de fazer um ângulo de 45° com a direcção de deslocamento aquando do ensaio de tração, sendo assim os provetes marcados com um ângulo de 45° em relação à maior dimensão do vidro (figura 3.19 (a)).
2. Corte dos provetes. Uma vez marcados os provetes nas placas, o processo seguinte é o de corte dos mesmo para as dimensões requeridas nas normas. Para isso foi usada uma multiferramenta *DREMEL 4000* onde foi acoplado um disco de corte de diamante do mesmo fabricante. No final do corte foram registadas a massa e as dimensões relevantes de cada um (figura 3.19 (b)).
3. Colagem de reforços. Com os cinco provetes necessários para cada norma cortados, a etapa seguinte é a colagem dos reforços nas extremidades dos mesmo, sendo para isso cortados paralelepípedos de alumínio com dimensões aproximadas de $60 \times 25 \times 2$ mm, como sugerido nas normas consideradas. As faces dos reforços de alumínio foram lixadas com recurso a lixa de gramagem 80 de forma a providenciar uma melhor superfície de colagem (maior rugosidade). As extremidades dos provetes passaram pelo mesmo processo mas neste caso a lixa usada foi bastante mais fina (gramagem 320) de modo a remover alguma imperfeição e também garantir uma superfície com rugosidade mais elevada para evitar problemas na colagem (figura 3.19 (c)). A colagem dos reforços aos provetes foi efectuada com recurso a um adesivo estrutural – *DP 490* do fabricante 3M (ficha técnica apresentada no anexo B.5), sendo de seguida aplicada pressão durante 24 h até o adesivo estar completamente curado (figura 3.19 (d)).



(a)



(b)



Figura 3.19: Preparação dos provetes: (a) Marcação dos provetes segundo a norma ASTM D 3518 (b) Exemplo de um provete cortado para as dimensões necessárias (c) Preparação das extremidades do provete (d) Provetes após colagem dos reforços

3.3.3.2 Colocação dos extensómetros

De forma a obter informação sobre a deformação longitudinal e transversal dos provetes durante os ensaios experimentais, foram colocados dois extensómetros nos mesmos. O extensómetro responsável por registar as extensões longitudinais era do tipo *clip gage* da Instron, o responsável por registar as extensões transversais em relação à direcção do deslocamento era um extensómetro de contacto comercializado pela empresa Tokyo Measuring Instruments Laboratory (TML). Foram utilizados extensómetros de contacto (figura 3.20 (a)) do tipo FLK-6-11 (provetes da norma ASTM D 3039) e FLA-5-11 (provetes da norma ASTM D 3518), ambos com resistência de 120Ω e com um *gauge factor* de 2,10 e 2,13, respetivamente, podendo ser consultadas as fichas técnicas de ambos no anexo B.6. O limite de extensão que pode ser medida por estes extensómetros é de $10000 \mu\epsilon$, após exceder-se este valor o extensómetro fica inutilizável. De seguida apresenta-se o procedimento seguido para a colocação dos extensómetros de contacto, uma vez que o procedimento de colocação do *clip gage* é bastante simples, sendo este apenas colocado quando o provete está montado na máquina de ensaios. Assim, as operações executadas para a colocação do extensómetro de contacto são as seguintes:

1. Soldar extensões de fio eléctrico. Estas extensões (40 cm) foram acrescentadas nos terminais do extensómetro de forma a permitir que este fosse conectado ao aparelho que permite a leitura dos valores medidos. Este procedimento foi efectuado de uma forma bastante cuidadosa para não danificar os extensómetros. Para isso foram cortados dois fios, com a dimensão referida para cada extensómetro sendo de seguida descarnados nas suas extremidades de forma a permitir que sejam soldados num dos extremos aos terminais do extensómetro e na outra serem ligados ao aparelho de leitura. No final do processo de soldadura foi efectuada, com auxílio de um multímetro, uma medição da resistência dos terminais do extensómetro de forma a verificar que estes se encontravam em boas condições e que não tinham sido afectados durante o processo.
2. Marcação. De uma forma grosseira, marcou-se a posição onde o extensómetro iria ser colado, tendo em consideração que se pretende que o extensómetro esteja na parte central do provete.
3. Preparação da superfície. A região marcada anteriormente foi lixada com recurso a uma lixa fina (gramagem 320) de forma a retirar alguma irregularidade que existisse e aumentar a rugosidade da mesma para garantir uma melhor adesão entre as superfícies aquando da colagem (figura 3.20 (b)), tendo em atenção que a área lixada deveria ser superior à dimensão do extensómetro.

Depois de lixada, a região foi limpa com recurso a um pano limpo e acetona, e foram feitas marcações precisas do local onde o extensómetro iria ser colocado, de forma a garantir um correcto posicionamento do mesmo em relação as fibras.

4. Colagem dos extensómetros. Uma vez terminada a preparação da superfície, foi cuidadosamente aplicada no centro da região marcada uma gota do adesivo selecionado após consulta da ficha técnica do extensómetro, cianoacrilato, cuja ficha técnica é apresentada no anexo B.7. De seguida foi colocado o extensómetro e aplicada pressão durante 1min, tempo necessário para a cura completa do adesivo (figura 3.20 (c)), com o auxílio de tiras de papel anti aderente de modo a evitar o contacto da cola com outras superfícies ou a com a pele e que alguma impureza ficasse colada no extensómetro e prejudicasse o seu funcionamento.

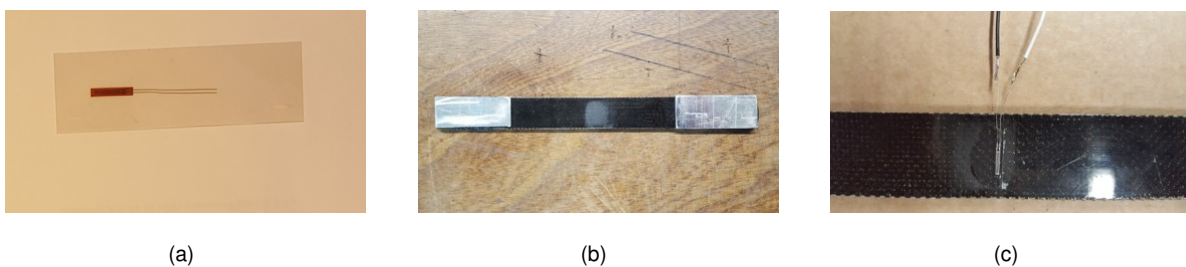


Figura 3.20: Colagem dos extensómetros: (a) Exemplo de um extensómetro de contacto utilizado (b) Preparação do provete para colagem do extensómetro (c) Extensómetro colado no provete

3.3.4 Metodologia dos ensaios experimentais

Uma vez finalizada a manufactura dos provetes, o passo seguinte foi o ensaio experimental dos mesmos. Os ensaios foram efectuados no Laboratório Mecânica Experimental situado no Instituto Superior Técnico, com recurso a uma máquina de ensaios universal Instron, modelo 3369 (figura 3.21 (a)), com uma célula de carga de 50 kN. A máquina em questão utiliza como software de controlo e aquisição de dados, o *Bluehill* (figura 3.21 (b)), onde é efectuada toda a parametrização necessária para os ensaios experimentais. Os ensaios a serem executados, a todos os provetes produzidos, são ensaios de tracção, tendo também sempre que possível respeitado todas as indicações das normas utilizadas.

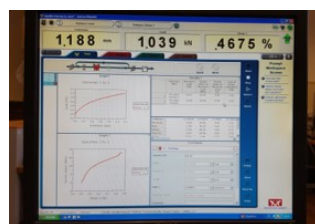
O procedimento seguido para os ensaios experimentais, segundo ambas as normas referidas, é idêntico, descrevendo-se de seguida as operações efectuadas:

1. Definição de parâmetros. No software *Bluehill*, são definidos os parâmetros necessários para o ensaio, como a velocidade e direcção de deslocamento do travessão, a dimensão dos provetes a serem ensaiados e as grandezas que se pretende serem registadas pelo programa.
2. Marcação dos provetes. Os provetes foram numerados de forma a serem claramente identificados para posteriormente ser efectuada uma correcta correspondência dos valores obtidos dos ensaios.

3. Colocação dos provetes. Os provetes são introduzidos nos dispositivos de fixação da máquina de ensaios, sendo neste caso utilizadas garras de ação mecânica em cunha para fixar as extremidades, onde se encontram colados os reforços de alumínio. É importante garantir que os provetes são colocados o mais alinhados possível com as garras e que durante o aperto destas os provetes não sofrem qualquer tipo de flexão ou torção, algo que pode introduzir erros nos resultados obtidos.
4. Colocação de extensómetros. Uma vez fixado o provete, procede-se de seguida à colocação do extensómetro do tipo *clip gage* na zona central do provete, com o auxílio de elásticos (figura 3.21 (c)). Este extensómetro é conectado diretamente à máquina de ensaios, sendo os valores obtidos registados continuamente no tempo, através do software *Bluehill*. No caso do extensómetro de contacto, previamente colado no provete, o procedimento efectuado foi um pouco diferente. Este extensómetro teve de ser conectado a um aparelho portátil de aquisição de dados, neste caso foi utilizado o modelo P-3500 da Vishay (figura 3.21 (d)), sendo as ligações efectuadas em quarto de ponte. Os valores obtidos através deste tipo de extensómetro são discretos e anotados manualmente.
5. Calibração. Finalizadas todas as ligações necessárias para o correcto funcionamento dos extensómetros, é efectuado um ajuste manual do *clip gage* para um valor de extensão inferior a 0.1% do seu “zero”, e posterior marcação do “zero” do sistema do deslocamento dos dispositivos de fixação, extensão e carregamento aplicado no programa *Bluehill*. No caso do extensómetro de contacto, o “zero” é efetuado no aparelho de aquisição de dados, sendo também necessário introduzir o parâmetro relativo ao *gauge factor*.
6. Realização do ensaio. É iniciado o ensaio, tendo em consideração a velocidade definida em cada uma das normas, sendo os valores do *clip gage* registados numa folha de cálculo que, quando o ensaio é finalizado, é guardada no computador pelo software *Bluehill*. Os valores da extensão registados pelo aparelho portátil de aquisição de dados são anotados manualmente, registando esse valor e o correspondente valor de força verificado no mesmo instante, que é apresentado no computador pelo software. O ensaio termina quando se verifica a fractura do provete (figura 3.21 (e)) ou quando este é parado manualmente.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.21: Ensaio experimentais: (a) Máquina de ensaios universal Instron 3369 (b) Exemplo de apresentação do software *Bluehill* (c) Provete montado na máquina de ensaios (d) Aparelho portátil de aquisição de dados - 3500 da Vishay (e) Provete fracturado no final do ensaio

3.3.5 Resultados experimentais

Finalizados os ensaios experimentais aos provetes foi necessário processar os dados adquiridos de forma a determinar as propriedades mecânicas pretendidas. Assim sendo, apresenta-se de seguida o procedimento efectuado segundo as duas normas referidas.

3.3.5.1 Apresentação e análise de resultados da norma ASTM D 3039

Como referido anteriormente, uma vez finalizado o corte dos cinco provetes, estes foram pesados com recurso a uma balança, e as suas dimensões foram medidas em três zonas distintas como referido na norma, com recurso a um paquímetro digital, tendo sido anotados todos os valores apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Dimensões dos provetes (L = largura da secção e H = espessura do provete) e massa

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
L1 [mm]	25,04	24,59	24,27	25,31	24,45
H1 [mm]	2,30	2,20	2,20	2,25	2,20
L2 [mm]	24,82	24,65	24,24	25,20	24,37
H2 [mm]	2,35	2,40	2,30	2,33	2,44
L3 [mm]	24,55	24,69	24,22	25,28	24,33
H3 [mm]	2,30	2,25	2,17	2,29	2,22
Massa [kg]	0,024	0,024	0,024	0,025	0,025

Uma vez obtidas as dimensões dos provetes, foram calculados os valores médios para cada uma das mesmas, sendo de seguida calculada a área de secção (A). Uma vez calculada a área de secção, e tendo conhecimento da massa e do comprimento de cada provete, é possível obter o valor da densidade do compósito, produzido pelo método de HLUV, neste caso o valor final apresentado representa uma média dos valores dos 5 provetes. Assim sendo são apresentados na tabela 3.7, os valores obtidos.

Tabela 3.7: Propriedades para o cálculo da densidade média do compósito

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
C [mm]	248	250	247	251	250
Lm [mm]	24,80	24,64	24,24	25,26	24,38
Hm [mm]	2,32	2,28	2,22	2,29	2,29
A [mm²]	57,46	56,27	53,90	57,85	55,76
Densidade [kg/m³]	1684,17	1706,09	1802,68	1721,63	1793,51
Densidade média [kg/m³]	1740,74				
Desvio Padrão [kg/m³]	81,61				

Os dados obtidos através do extensómetro montado para medir as extensões longitudinais, valores de extensão em função da força aplicada ao provete, estão todos registados de uma forma contínua numa folha de cálculo. De forma a aplicar a equação 3.8 para o cálculo do módulo de elasticidade, recorre-se aos valores obtidos no ensaio de forma a encontrar quais os valores de força aplicada quando as extensões eram 0,001 e 0,003. As curvas obtidas durante o ensaio experimental dos provetes são apresentadas no anexo C.1. Uma vez determinados os valores de força correspondentes em cada provete ensaiado, foi calculado o valor da tensão aplicada segundo a equação 3.13.

$$\sigma = \frac{F_{apl}}{A} \quad (3.13)$$

Tendo determinado os valores das tensões verificadas em cada um dos pontos das extensões considerados, foi possível obter o valor para o módulo de elasticidade de cada um dos provetes, sendo considerado para futuros cálculos o valor médio destes. Na tabela 3.8 são apresentados os valores de tensão obtidos bem como o valor do módulo de elasticidade (E).

Tabela 3.8: Valores obtidos para o Módulo de Elasticidade dos provetes ensaiados

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Tensão ($\epsilon = 0,001$) [MPa]	20,98	21,07	22,17	21,12	21,10
Tensão ($\epsilon = 0,003$) [MPa]	58,59	58,24	60,19	57,14	58,52
Módulo de Elasticidade [GPa]	18,80	18,58	19,01	18,01	18,71
Valor médio do Módulo de Elasticidade [GPa]	18,62				
Desvio Padrão	0,378				

De forma a poder determinar-se o valor do coeficiente de Poisson através da equação 3.9, foi necessário efectuar diversos passos intermédios, uma vez que existe uma limitação por parte do

sistema de medição utilizado para avaliar as deformações transversais dos provetes. Como referido, esse sistema, um extensómetro de contacto, não produz valores contínuos, sendo estes anotados de forma manual. Assim sendo, e de forma a obterem-se valores da extensão transversal que pudessem ser utilizados nos cálculos necessários, foram registados diversos valores durante os ensaios experimentais, tendo para cada valor de força verificado (começando no valor de 0 kN e com incrementos de 1 kN) sido anotados os valores das extensões verificadas no aparelho portátil de aquisição de dados, sendo no final possível efectuar uma aproximação dos mesmos por meio de uma função, de forma a conseguir obter-se um conjunto de pontos contínuo. As funções obtidas para cada um dos provetes ensaiados são apresentadas no anexo C.2. Uma vez obtida a função de aproximação que descreve a variação contínua da força aplicada em função do valor da extensão, é possível determinar o valor da extensão transversal quando o valor indicado pelo extensómetro do tipo *clip gage* é 0,001 e 0,003 e, assim, uma vez que para esses pontos se sabe qual o valor da força aplicada, é possível através de operações matemáticas determinar o valor da extensão transversal nesses dois pontos. Assim sendo na tabela 3.9 apresentam-se os valores das extensões transversais determinadas através das aproximações efectuadas, bem como o valor médio que será utilizado quando necessário em cálculos futuros.

Tabela 3.9: Valores obtidos para o coeficiente de Poisson dos provetes ensaiados

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Extensão ($\epsilon = 0,001$)	-0,000142	-0,000155	-0,000152	-	-
Extensão ($\epsilon = 0,003$)	-0,000326	-0,000418	-0,000329	-	-
Coefficiente de Poisson	0,092	0,131	0,088	-	-
Valor médio do Coeficiente de Poisson	0,104				
Desvio Padrão	0,0237				

É apenas apresentada informação relativa a 3 provetes uma vez que durante o processo de montagem ou na fase de calibração da máquina os extensómetros dos restantes provetes sofreram algum tipo de dano, o que impediu que fosse feita uma leitura dos valores medidos através do extensómetro de contacto. No entanto, analisando os resultados, é perceptível que estes não apresentam grandes disparidades nos valores pelo que os resultados se basearam apenas nestes 3 ensaios.

Uma vez finalizados os ensaios foram também registados os valores da extensão verificada no ponto de fractura dos provetes tendo sido registados os valores apresentados na tabela 3.10.

Tabela 3.10: Valores obtidos para a extensão na fractura

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Extensão na fractura	-	-	0,014	0,030	-
Valor médio da Extensão na fractura	0,022				

Apenas são apresentados os valores de extensão relativos aos provetes 3 e 4 nos quais não foram verificados problemas durante os ensaios experimentais, nos restantes provetes observou-se que a partir de um certo valor de força existiu escorregamento dos reforços de alumínio que foram colados nos extremos. No entanto, estes acontecimentos não põem em causa a validade dos valores obtidos para as propriedades mecânicas uma vez que apenas foram verificados num intervalo de força muito superior ao utilizado para o cálculo das mesmas.

3.3.5.2 Apresentação e análise de resultados da norma ASTM D 3518

De forma a obter os valores necessários para determinar as propriedades pretendidas foram ensaiados os restantes cinco provetes preparados. Assim sendo, o primeiro passo foi novamente uma medição das dimensões relevantes dos provetes, sendo as mesmas apresentadas na tabela 3.11.

Tabela 3.11: Dimensões dos provetes (L = largura da secção e H = espessura do provete) e massa

	Provete 6	Provete 7	Provete 8	Provete 9	Provete 10
L1 [mm]	22,75	25,01	24,94	24,69	24,85
H1 [mm]	1,90	2,04	1,93	1,93	1,95
L2 [mm]	22,75	24,85	24,89	24,56	24,80
H2 [mm]	1,91	2,05	1,95	1,91	1,92
L3 [mm]	22,67	24,76	24,98	24,57	24,41
H3 [mm]	1,94	2,07	1,96	1,92	1,94
Massa [kg]	0,019	0,022	0,021	0,021	0,021

De seguida foram novamente calculados os valores médios de forma a proceder-se à determinação da área de secção destes provetes e da densidade média do compósito produzido, apresentando-se os valores obtidos na tabela 3.12.

Tabela 3.12: Propriedades para o cálculo da densidade média do compósito

	Provete 6	Provete 7	Provete 8	Provete 9	Provete 10
C [mm]	250	250	250	249	249
Lm [mm]	22,72	24,87	24,94	24,61	24,69
Hm [mm]	1,92	2,05	1,95	1,92	1,94
A [mm²]	43,55	51,07	48,54	47,24	47,81
Densidade [kg/m³]	1744,99	1723,02	1730,41	1785,11	1764,02
Densidade média [kg/m³]	1749,05				
Desvio Padrão [kg/m³]	51,48				

Comparando com os valores obtidos para os provetes ensaiados segundo a norma ASTM D 3039, verificam-se ligeiras diferenças no valor obtido para a espessura do laminado. Esta alteração deve-se possivelmente à utilização de mais camadas de *breather* durante o processo de manufactura, uma vez que foi possível observar na placa utilizada anteriormente marcas originadas pela localização do ponto de vácuo, razão que levou à introdução de mais camadas de forma a evitar a repetição do sucedido. Provavelmente esta utilização de mais camadas responsáveis pela absorção de resina possibilitou retirar a mesma em maior quantidade, reduzindo assim o excesso e contribuindo para um compósito final com menor espessura e com uma massa inferior. O procedimento para o cálculo das propriedades pretendidas é semelhante ao descrito anteriormente, apresentando-se novamente as curvas obtidas a partir dos ensaios experimentais no anexo C.1. Mais uma vez, devido às limitações presentes nas medições efectuadas pelo extensómetro de contacto, e de forma a se poder aplicar a equação 3.11, o procedimento foi semelhante ao já aplicado. Sendo assim foram mais uma vez registados manualmente os valores medidos pelo aparelho portátil de aquisição de dados e de seguida efectuada uma aproximação com recurso a uma função matemática. Os valores de extensão retirados foram efectuados desde o início do ensaio, quando o valor de força era de 0 N e, posteriormente, em cada incremento de 500 N. No entanto, e para ser possível a aplicação da equação 3.11, foi também efectuada uma aproximação por meio de uma função matemática dos valores obtidos pelo extensómetro do tipo *clip gage*. Esta aproximação foi efectuada entre os valores de extensão 0 e 0,007 por se considerar ainda estar presente o domínio elástico do material como indicado na norma e por, apesar de estes dados serem apresentados de forma contínua, não permitem a sua utilização directa. Uma vez obtidas as aproximações através de funções para ambas as extensões, sendo as mesmas apresentadas no anexo C.3, foi efectuada a subtração de ambas de forma a se obter uma função equivalente para o valor de γ_{12} (equação 3.11). Por último é calculado o valor dessa função nos pontos de extensão referidos na norma (0,002 e 0,006), obtendo-se um valor de força que será usado para o cálculo do valor de τ_{12} segundo a equação 3.12. Tendo todos os valores determinados e fazendo uso da equação 3.10 é possível calcular os valores pretendidos para

o módulo de corte do compósito, apresentando-se os mesmos na tabela 3.13.

Tabela 3.13: Valores obtidos para o Módulo de Corte dos provetes ensaiados

	Provete 6	Provete 7	Provete 8	Provete 9	Provete 10
Tensão de Corte ($\gamma = 0,002$)[MPa]	10,61	-	12,95	-	12,70
Tensão de Corte ($\gamma = 0,006$)[MPa]	18,77	-	25,74	-	26,57
Módulo de Corte [MPa]	2041,49	-	3196,37	-	3465,48
Valor médio do Módulo de Corte [MPa]	2901,11				
Desvio Padrão [MPa]	756,52				

Foram novamente verificados alguns problemas com os extensómetros de contacto colocados em dois provetes, o que não permitiu uma leitura dos valores de extensão transversal, razão pela qual não são apresentados os valores dos mesmos. Existe uma pequena variação do valor calculado através do ensaio do primeiro provete relativamente aos restantes, algo que se pode dever a algum defeito no provete ensaiado ou no próprio extensómetro de contacto utilizado, no entanto após inspeção nenhum problema conseguiu ser identificado.

À semelhança do verificado nos ensaios dos provetes referentes à norma ASTM D 3039, pretendeu-se também registar os valores relativos à extensão de corte no ponto de fractura dos provetes, no entanto e devido às limitações já referidas ao nível dos extensómetros de contacto a obtenção de um valor aceitável para este parâmetro era complicada pelo que consultando a norma considerou-se o valor de 0,05 mm para todos os provetes por este ser o limite inferior a considerar aquando do cálculo.

Todos os valores obtidos apresentam algum erro devido ao seu carácter experimental, no entanto conseguem fornecer uma melhor aproximação das propriedades que o material compósito utilizado para a manufatura do componente terá do que se fossem utilizadas propriedades genéricas retiradas da bibliografia, como as utilizadas para as simulações preliminares. Serão então estas as propriedades utilizadas nas simulações finais que se seguem de forma a prever de uma forma mais precisa o comportamento do novo suporte do porta cubos quando sujeito ao carregamento anteriormente indicado.

Capítulo 4

Componente Alternativo

4.1 Situação actual

Uma vez obtidas as propriedades necessárias para a caracterização do material compósito, constituído por matriz polimérica reforçado com fibras de basalto, que será utilizado como base no novo componente, foi necessário voltar à simulação numérica de elementos finitos da geometria final escolhida (representada na figura 4.1 e cujo desenho técnico é apresentado no anexo A.2) e introduzir as propriedades determinadas a partir dos ensaios experimentais efectuados aos provetes. Esta nova simulação tem como objectivo ter uma melhor percepção do seu comportamento bem como explorar a possibilidade de ser efectuada uma optimização da mesma, de forma a obter a menor massa possível e aumentar a resistência aos carregamentos a que está sujeita sem comprometer a sua fiabilidade. Serão de seguida descritas as etapas necessárias à produção do novo suporte do porta cubos. A primeira etapa consistiu na realização de novas simulações no software de elementos finitos incluindo um processo de optimização do componente. Uma vez terminadas as novas simulações, foi necessário efectuar o projecto de um molde de forma a que a geometria escolhida pudesse ser produzida. A etapa seguinte corresponde à manufactura do componente sendo descritos todos os passos seguidos.



Figura 4.1: Geometria final do componente alternativo (sem representação do *insert*)

4.1.1 Simulação final

Uma vez que a geometria foi definida e modelada anteriormente, o primeiro passo da nova simulação foi executado já no ficheiro *fem*, ficheiro que contém informação relacionada com a malha utilizada e com as propriedades do material que será seleccionado. Tendo em consideração que estas propriedades foram determinadas a partir dos ensaios experimentais, foi necessária a criação de um novo material no programa de elementos finitos. O procedimento efectuado foi semelhante ao realizado nas simulações preliminares, no entanto desta vez, e como os dados obtidos dizem respeito ao compósito produzido, o material criado no software foi um material ortotrópico. Após nova consulta do guia do programa [36] verifica-se que para a criação de um material ortotrópico as propriedades que necessitam de ser inseridas são a densidade (ρ), os módulos de Young (E_1 e E_2), o coeficiente de Poisson (ν_{12}), e os módulos de corte (G_{12} , G_{13} e G_{23}). O valor do módulo de Young determinado através dos ensaios experimentais (norma ASTM D 3039) será o valor considerado para o valor de E_1 e E_2 uma vez que a fibra de basalto utilizada é do tipo manta e apresenta fibras nas direcções a 0° (E_1) e 90° (E_2). O valor do coeficiente de Poisson calculado nos ensaios experimentais corresponde ao que será utilizado e introduzido no programa. O valor considerado para a densidade resulta da média dos valores de densidade de cada uma das placas fabricadas. Por último, o valor do módulo de corte calculado através dos ensaios corresponde ao valor de G_{12} , no entanto, por simplificação e por consulta dos dados obtidos nas simulações preliminares, observou-se que os valores de G_{13} e G_{23} eram próximos do valor de G_{12} , razão pela qual no material utilizado nas simulações finais será considerado que $G_{12} = G_{13} = G_{23}$. Assim, os valores referentes a cada lâmina do compósito reforçado por fibras de basalto utilizado são apresentados na tabela 4.1:

Tabela 4.1: Propriedades da lâmina do compósito de resina epoxy reforçado por fibras de basalto (BFRP)

Material	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	$G_{12} = G_{13} = G_{23}$ [GPa]	Coeficiente de Poisson	Densidade [Kg/m ³]
BFRP	18,62	18,62	2,90	0,104	1750

Uma vez introduzidas as propriedades e finalizada a criação do novo material, novamente com recurso às ferramentas disponíveis pela *toolbox* dedicada à modelação de laminados que o software possui, foi atribuído o novo material criado aos elementos finitos que constituem a geometria em estudo. Na figura 4.2 apresenta-se a janela da ferramenta onde é efectuada a modelação do laminado. É nesta etapa que é definido o número de camadas que o compõem, a espessura de cada uma das camadas (0,18 mm, valor obtido a partir da espessura média das placas), bem como a orientação que as fibras possuem nas mesmas. É também atribuído o material, criado anteriormente, a cada camada, sendo também definido o esquema de empilhamento pretendido, neste caso, “simétrico”.

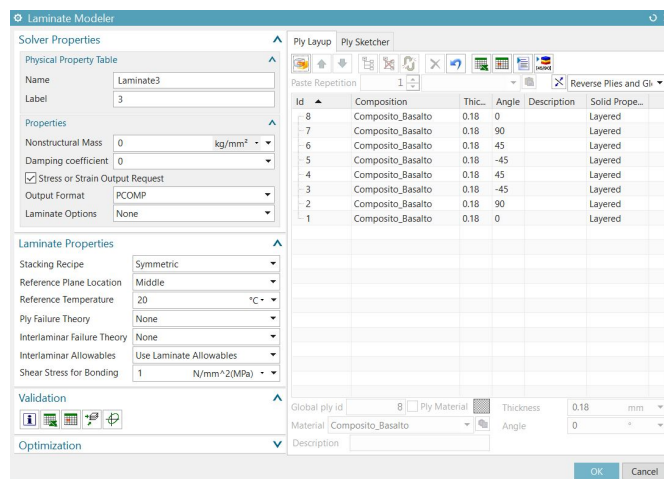


Figura 4.2: Janela de definição do laminado a utilizar (laminado multidirecional genérico)

De forma a facilitar a modelação do suporte do porta cubos, a malha utilizada foi dividida em três zonas distintas, representadas a verde na figura 4.3 (a), (b) e (c) . Por último, as três malhas foram ligadas com recurso a uma ferramenta disponível no software de elementos finitos denominada *Stitch Edge*, que permite que as malhas sejam “cosidas” (*stitch*), criando uma malha única como representado na figura 4.3 (d).

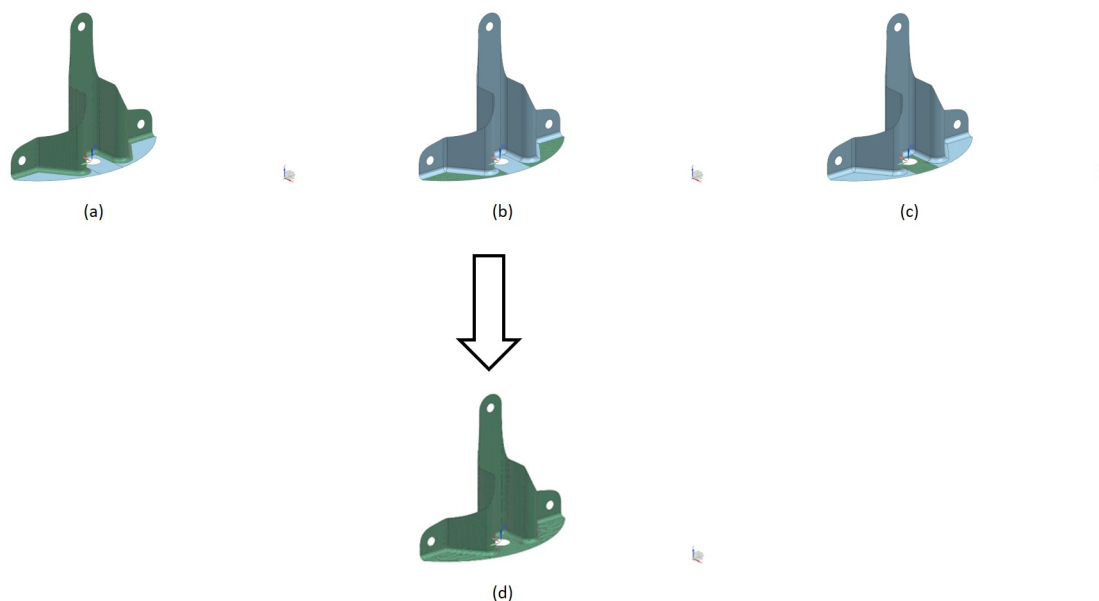


Figura 4.3: Malha de elementos finitos utilizada na geometria final: (a) Malha na zona 1 (b) Malha na Zona 2 (c) Malha na Zona 3 (d) Malha final

Como já considerado nas simulações preliminares, continuou a considerar-se a existência de um *insert* na zona central (figura 4.3 (c)) do componente, tendo este sido modelado com recurso à janela anteriormente utilizada, mas alterando o esquema de empilhamento desta malha para, apenas neste caso, “simétrico com núcleo”, mantendo assim as camadas de fibras anteriormente definidas mas considerado o *insert*. Assim sendo, o empilhamento verificado nessa zona central é o apresentado na figura 4.4:

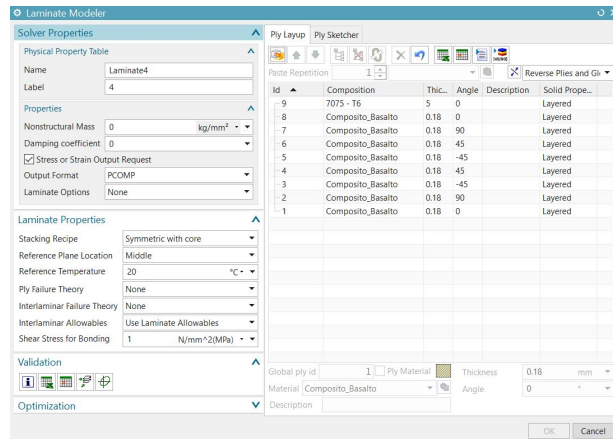


Figura 4.4: Janela de definição do laminado com o *insert*

A malha utilizada manteve-se inalterada, ou seja, a dimensão e tipo de elementos foram os mesmos que os utilizados aquando das simulações preliminares, sendo apresentada na tabela 4.2 a informação relativa à mesma.

Tabela 4.2: Informação da malha utilizada no Siemens NX 12

	Número de Elementos	Número de Nós
Suporte porta cubos reforçado por fibras de Basalto	6397	6681

Depois de atribuído um material diferente foi necessário garantir, tal como efectuado anteriormente, que a orientação dos elementos finitos era a correcta. A figura 4.5 (a) representa a fase inicial, onde a orientação dos elementos finitos é arbitrária, sendo na figura 4.5 (b) representada a fase final, onde os elementos se encontram orientados correctamente. A direcção indicada com recurso às setas amarelas é a direcção principal, que neste caso é a direcção que representa os 0° da fibra, sendo este o ponto de partida para a marcação das diferentes orientações necessárias.

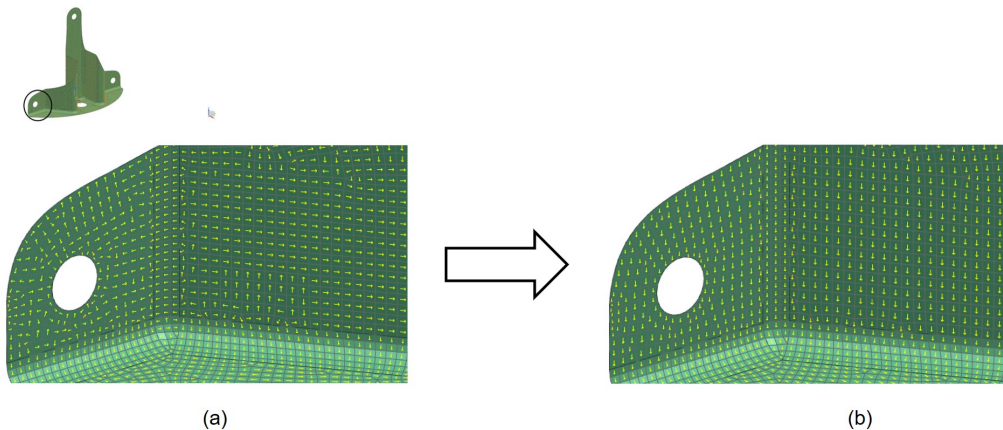


Figura 4.5: Pormenor da orientação dos elementos finitos: (a) Orientação aleatória (b) Orientação bem definida

Uma vez definidos correctamente a malha e o material, foi necessário proceder a uma actualização do ficheiro de simulação de modo a que as novas propriedades introduzidas no ficheiro *fem* fossem aceites pelo software para que as simulações seguintes fossem efectuadas tendo em consideração essas modificações. As condições de fronteira e as cargas aplicadas na geometria final mantêm-se também inalteradas apresentando-se, no entanto, nas figuras 4.6 e 4.7 a representação gráfica de forma a facilitar a visualização das mesmas aplicadas na nova geometria do componente, não sendo mostrada a malha gerada, de forma a facilitar a compreensão.

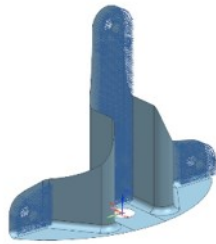


Figura 4.6: Representação dos constrangimentos aplicados à geometria final

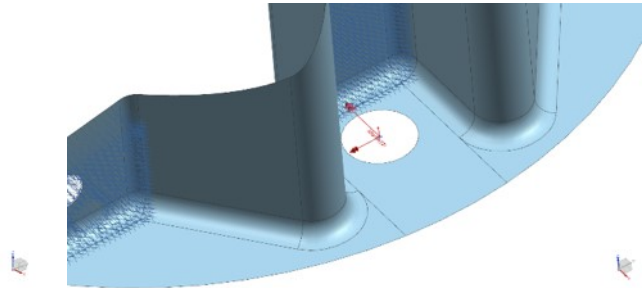


Figura 4.7: Ponto de aplicação do carregamento verificado na geometria final

Por último, todo o restante procedimento de simulação seguido nas análises preliminares manteve-se inalterado até à obtenção dos resultados pretendidos.

4.1.1.1 Critério de falha

De modo a conseguir obter-se uma estimativa da carga máxima (carga crítica) que o componente consegue suportar para um dado empilhamento, foi escolhido um critério de falha do compósito que permitisse obter essa informação. Existem diversos critérios passíveis de serem utilizados, no entanto e devido aos dados disponíveis, foi escolhido o critério da deformação máxima. Este critério considera que o laminado atinge o seu ponto de ruptura quando a extensão que é verificada numa lâmina ultrapassa um intervalo pré definido, seja à compressão (-) ou à tracção (+). Assim sendo para não existir ruptura têm que ser verificadas as seguintes condições:

$$-\varepsilon_L^{(-)} < -\varepsilon_1 < -\varepsilon_L^{(+)} \quad -\varepsilon_T^{(-)} < -\varepsilon_2 < -\varepsilon_T^{(+)} \quad \gamma_{12} < \gamma_{LT}$$

Onde, ε_1 , ε_2 e γ_{12} são as extensões verificadas nas camadas do laminado que constituem o componente. Uma vez escolhido o critério de ruptura e obtidas as extensões necessárias para a sua aplicação, este foi definido na *toolbox* como observado na figura 4.8. Finalizada a introdução da informação necessária, é efectuada a simulação. De modo a ser possível retirar a carga crítica do componente é necessário analisar um parâmetro gerado denominado *ply index failure*, sendo pretendido, para não existir falha no compósito, que seja sempre inferior 1, sendo no limite e o valor que é pretendido 1. Utilizou-se o valor limite de 1, ou seja, o valor para a carga crítica.

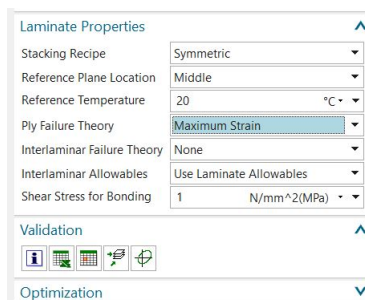


Figura 4.8: Introdução do critério de falha

4.2 Processo de otimização

4.2.1 Considerações iniciais

Uma vez obtidas as propriedades finais para o compósito que será utilizado no componente alternativo proposto, apresenta-se como tópico importante um estudo de otimização do laminado relativamente ao número de camadas necessárias, bem como à sua orientação, de modo a não só se obter a menor massa possível, mas também tornar o componente mais apto a resistir aos carregamentos aplicados através da melhor orientação das fibras de basalto em cada camada. Uma vez que a fibra disponível é fibra seca, que não é muito fácil de trabalhar e que pode ser facilmente distorcida, serão apenas consideradas as orientações de $0^\circ/90^\circ$ e $\pm 45^\circ$. Assim sendo, foi desenvolvido, propositadamente para este trabalho, um programa computacional utilizando o software *MATLAB*[®] *R2018b* que permite escolher qual o melhor empilhamento (número de camadas e respectiva orientação) para uma certa geometria definida, tendo em consideração as deformações máximas verificadas na mesma. Este programa é também responsável pela interacção com o *solver* de elementos finitos associado ao programa comercial utilizado denominado *NASTRAN*. De forma a facilitar o processo de otimização, evitar tempos de processamento elevados e também tendo em consideração a aplicabilidade do componente, foi definido à partida que o laminado do componente seria constituído por 10,12,14 ou 16 camadas do compósito considerado, e também que este seria simétrico de forma a evitar os problemas mencionados no Capítulo 2. Outra simplificação que será usada será a de apenas se considerar orientações de camadas a 0° e 45° uma vez que a fibra utilizada é manta e que, por isso, a cada rotação de 90° da mesma, as fibras ficam orientadas de igual forma. O laminado com 10 camadas ficaria no final com aproximadamente metade da espessura do componente original e, pela necessidade de existir suporte ao redor do *insert* que será colocado, de forma a evitar problemas no componente, justifica-se que se considere este número de camadas como ponto de partida. O número final de camadas (16) justifica-se pelo interesse em se obter um componente com massa inferior à original e, como a partir das simulações preliminares efectuadas foi possível verificar como evoluía a massa do componente tendo em consideração a variação das camadas, conclui-se que este número se posiciona como um limite máximo para atingir esse objectivo.

Os ficheiros necessários para efectuar o processo de otimização são gerados pelo software de elementos finitos e, por isso, apresentam uma formatação bastante própria. Assim, para um correcto

desenvolvimento do programa computacional, foi necessário efectuar-se um estudo detalhado dos mesmos para decidir em qual dos ficheiros se localizavam os dados relativos ao empilhamento a alterar (ficheiro de *input*). Foi também necessário fazer a mesma análise relativamente ao ficheiro de *output* de onde seriam extraídos os dados pretendidos para a análise de optimização (ficheiros de *output*).

4.2.2 Programa de optimização

O programa desenvolvido denominado “Programa_opt.m” funciona como programa de comando e faz uso de vários subprogramas para o seu correcto funcionamento, também desenvolvidos propositadamente, sendo estes “Replace_dados.m” e “Combinacoes.m”. O programa de comando funciona em paralelo com o software de elementos finitos de forma a avaliar as diversas possibilidades de empilhamento. Para isso é necessário ler as variáveis de projecto obtidas a partir do ficheiro gerado, *.dat, após ser efectuada uma simulação, onde é possível encontrar informação relativa à geometria, tipo de elementos, material utilizado e também estrangimentos e carregamentos aplicados. Tendo o ficheiro sido correctamente lido pelo programa, são efectuadas as substituições necessárias relativamente à orientação das camadas, guardando-as de seguida. Por último, é executado o *solver* de elementos finitos, onde é executada uma nova simulação tendo em consideração as alterações efectuadas, sendo apresentados os resultados relativos à massa, deslocamento máximo e qual o empilhamento que gerou ambos, sendo estes lidos a partir do ficheiro de saída *.f06. Todos os programas desenvolvidos e todos os ficheiros *.dat necessários para o processo de optimização têm que estar localizados na mesma directoria. Na figura 4.9 é apresentado um esquema das etapas executadas no programa de optimização.

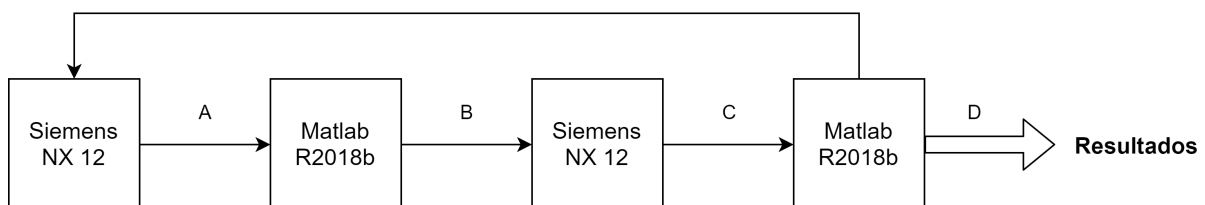


Figura 4.9: Esquema do processo de optimização

- | | |
|--------------------|--|
| A – Ficheiro *.dat | B – Empilhamentos alterados e execução do <i>Nastran</i> |
| C – Ficheiro *.f06 | D – Compilação e apresentação dos resultados |

4.2.2.1 Criação dos empilhamentos

Como referido anteriormente serão apenas considerados empilhamentos com número de camadas predefinidos. Assim sendo, e como se pretende testar todas as combinações possíveis de orientações de camadas que é possível efectuar tendo o laminado 10,12,14 ou 16 camadas, foi efectuado, com recurso a um programa genérico de *MATLAB*[®], denominado “allcomb.m”, o cálculo de todas essas possibilidades. Uma vez obtidas, são posteriormente lidas pelo programa “Combinacoes.m” que faz uma triagem dos valores obtidos escolhendo apenas os que se encontram nas condições pretendidas.

Neste caso, serem simétricos de forma a produzirem-se laminados simétricos, resultando em ficheiros como o representado na figura 4.10, que contêm os vectores associados às orientações de cada camada no laminado.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	45	45	0	0	0	0	0
3	0	0	0	45	0	0	45	0	0	0	0
4	0	0	0	45	45	45	45	0	0	0	0
5	0	0	45	0	0	0	0	45	0	0	0
6	0	0	45	0	45	45	0	45	0	0	0
7	0	0	45	45	0	0	45	45	0	0	0
8	0	0	45	45	45	45	45	45	0	0	0
9	0	45	0	0	0	0	0	0	45	0	0
10	0	45	0	0	45	45	0	0	45	0	0
11	0	45	0	45	0	0	45	0	45	0	0
12	0	45	0	45	45	45	45	0	45	0	0
13	0	45	45	0	0	0	0	45	45	0	0
14	0	45	45	0	45	45	0	45	45	0	0
15	0	45	45	45	0	0	45	45	45	0	0

Figura 4.10: Exemplo dos 15 primeiros vectores criados considerando o laminado de 10 camadas

4.2.2.2 Leitura dos ficheiros

Os ficheiros *.dat, sendo ficheiros gerados pelo software de elementos finitos, apresentam uma formatação específica. Assim sendo foi necessário desenvolver um programa, denominado “Replace_dados.m” que fizesse uma busca automática por linhas de forma a encontrar as localizações dos dados que se pretende substituir e, de seguida, efectuar a substituição pelos dados obtidos anteriormente relativos à orientação das camadas. Na figura 4.11 encontra-se representado um excerto do ficheiro *.dat, onde está apresentada, dentro de rectângulos, a informação que será sucessivamente reescrita até que todas as combinações de vectores, para cada número de camadas definido, sejam analisadas.

```

$*
$* PROPERTY CARDS
$*
$* Property: Laminat3
PCOMP      3      0.0000      20.0000  0.0000      SYM+
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES
$* Property: Laminat4
PCOMP      4      0.0000      20.0000  0.0000      +
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
+          35.000000  0.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
+          40.200000  45.0000      YES      40.200000  45.0000      YES+
$*

```

Figura 4.11: Representação dos dados a substituir, no ficheiro *.dat, com representação de um laminado com 12 camadas todas elas com a orientação de 45°

4.2.2.3 Execução do programa

De modo a que o programa de optimização, “Programa_opt.m”, seja executado é necessário utilizar comandos específicos, como o representado na figura 4.12, que permitem, através do programa de *MATLAB*® criado, ser executado o solver de elementos finitos para avaliar todas as hipóteses de empilhamentos possíveis.

```
system('"%NXNASTRAN directoria exec% \nastran.exe"')
```

Figura 4.12: Comando necessário para executar o solver a partir do MATLAB®

Onde, *%NXNASTRAN directoria exec%* é a directoria onde o ficheiro executável do *NASTRAN* está localizado. Uma vez executado, o programa efectua todas as iterações de uma forma automática até terem sido utilizados todos os vectores obtidos através do programa "Combinacoes.m". Quando esta etapa é terminada, o programa procede à eliminação de todos os ficheiros gerados durante as simulações efectuadas, mantendo apenas os ficheiros **.dat* necessários, na directoria que está a ser utilizada, de forma a não comprometer futuros processos de optimização.

4.2.2.4 Resultados

De forma a poder avaliar-se a qualidade das soluções geradas é necessário obter e comparar os valores, neste caso, da massa final da geometria e das deformações verificadas. Estes resultados são retirados a partir do ficheiro de *output* gerado após cada uma das simulações efectuadas, **.f06*. De forma a retirar os valores pretendidos, o programa consegue ler estes ficheiros de resultados, fazendo depois uma busca dos valores de interesse, através de uma procura por linhas até encontrar a entrada pretendida, assinalada com um rectângulo verde na figura 4.13, que é guardada.

DIRECTION					
MASS	AXIS SYSTEM (S)	MASS	X-C.G.	Y-C.G.	Z-C.G.
	X	2.413792E-02	0.000000E+00	4.330343E-03	1.200965E+01
	Y	2.413792E-02	8.752278E+00	0.000000E+00	1.200965E+01
	Z	2.413792E-02	8.752278E+00	4.330343E-03	0.000000E+00

Figura 4.13: Localização dos dados relativos à massa do componente no ficheiro de *output*

Para analisar as deformações máximas verificadas no componente apenas será efectuada uma análise das mesmas segundo o eixo dos *zz* uma vez que, como já foi verificado anteriormente, é segundo este eixo coordenado que se desenvolvem as maiores deformações. Tendo isto em consideração foram retirados todos os valores relativos às deformações segundo o eixo dos *zz*, analisando as mesmas de seguida de forma a averiguar qual seria o valor máximo. Os dados retirados são encontrados novamente no ficheiro **.f06*, representados na figura 4.14 por um rectângulo verde, sendo efectuada uma busca por linhas de forma a conseguir localizar os mesmos e retirar todos os valores pretendidos.

POINT ID.	TYPE	T1	DISPLACEMENT VECTOR					
			T2	T3	R1	R2	R3	
9673	G	0.0	4.605636E-04	3.903686E-02	-8.929979E-05	-1.194186E-06	1.490298E-05	
9674	G	0.0	2.996489E-04	3.911478E-02	-1.285890E-04	-8.829599E-07	3.431423E-06	
9675	G	0.0	1.364010E-04	3.927739E-02	-1.682581E-04	-9.534126E-07	-6.613983E-06	
9676	G	0.0	-2.852193E-05	3.952570E-02	-2.084562E-04	-1.436549E-06	-1.942376E-05	
9677	G	0.0	-1.944060E-04	3.986121E-02	-2.493138E-04	-2.547616E-06	-4.033455E-05	
9678	G	0.0	-3.603784E-04	4.028584E-02	-2.908861E-04	-4.808835E-06	-7.803358E-05	
9679	G	0.0	-5.252899E-04	4.080172E-02	-3.330602E-04	-9.455979E-06	-1.481326E-04	
9680	G	0.0	-6.875900E-04	4.141065E-02	-3.754029E-04	-1.995386E-05	-2.795586E-04	
9681	G	0.0	-8.452408E-04	4.211307E-02	-4.160610E-04	-4.892977E-05	-5.262561E-04	
9682	G	0.0	1.064945E-03	4.043776E-02	8.596396E-05	-3.659381E-05	3.979267E-04	
9683	G	0.0	9.337718E-04	4.011891E-02	5.230736E-05	-1.473797E-05	2.112484E-04	
9684	G	0.0	7.941753E-04	3.987831E-02	1.633477E-05	-6.974453E-06	1.117941E-04	
9685	G	0.0	6.478843E-04	3.971799E-02	-2.045713E-05	-3.561928E-06	5.868924E-05	
9686	G	0.0	4.963180E-04	3.963885E-02	-5.770254E-05	-1.919912E-06	2.996730E-05	
9687	G	0.0	3.406246E-04	3.964130E-02	-9.526341E-05	-1.136462E-06	1.371843E-05	
9688	G	0.0	1.817495E-04	3.972576E-02	-1.331356E-04	-8.442823E-07	3.186001E-06	
9689	G	0.0	2.052262E-05	3.989284E-02	-1.713887E-04	-9.136226E-07	-6.019512E-06	
9690	G	0.0	-1.422585E-04	4.014350E-02	-2.101145E-04	-1.374632E-06	-1.773808E-05	
9691	G	0.0	-3.057445E-04	4.047902E-02	-2.493809E-04	-2.431004E-06	-3.685014E-05	
9692	G	0.0	-4.689489E-04	4.090095E-02	-2.891752E-04	-4.577832E-06	-7.129265E-05	

Figura 4.14: Localização dos dados relativos às deformações segundo o eixo dos zz do componente no ficheiro de *output*

No final da análise de todas as orientações possíveis com 10,12,14 e 16 camadas o programa gera um ficheiro, como o apresentado na figura 4.15, onde os diversos empilhamentos são ordenados tendo em consideração o valor de deformação que apresentam, permitindo assim decidir qual o que melhor se ajusta às necessidades.

1	3	10	0,08692	0	0	0	45	0	0	45	0	0	0
1	2	10	0,086942	0	0	0	0	45	45	0	0	0	0
1	5	10	0,086955	0	0	45	0	0	0	0	45	0	0
1	9	10	0,087212	0	45	0	0	0	0	0	0	45	0
1	4	10	0,087619	0	0	0	45	45	45	45	0	0	0
1	6	10	0,087663	0	0	45	0	45	45	0	45	0	0
1	7	10	0,087666	0	0	45	45	0	0	45	45	0	0
1	10	10	0,087932	0	45	0	0	45	45	0	0	45	0
1	11	10	0,087945	0	45	0	45	0	0	45	0	45	0
1	17	10	0,088004	45	0	0	0	0	0	0	0	0	45
1	13	10	0,088006	0	45	45	0	0	0	0	45	45	0
1	18	10	0,088738	45	0	0	0	45	45	0	0	0	45
1	19	10	0,088771	45	0	0	45	0	0	45	0	0	45
1	21	10	0,088934	45	0	45	0	0	0	0	45	0	45
1	25	10	0,089446	45	45	0	0	0	0	0	0	45	45
1	1	10	0,090254	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.15: Informação final do processo de optimização com informação relativamente ao número de camadas, deformação verificada (mm) e empilhamento que deu origem

Analisando o ficheiro obtido e comparando as deformações verificadas com as massas obtidas para cada conjunto de camadas analisadas, conclui-se que o empilhamento que mais vantagens apresentava seria o empilhamento com 10 camadas, e com as orientações das camadas de $[0/0/0/45/0]_s$.

4.3 Obtenção do componente

4.3.1 Molde

Uma vez definido o empilhamento a utilizar, foi necessário proceder à criação de um molde que permitisse a manufatura do suporte do porta cubos. Assim, com recurso à ferramenta de CAD disponível no software Siemens NX 12, procedeu-se à criação de uma estrutura tridimensional, representada na figura 4.16, a partir da geometria bidimensional do componente que foi modelada anteriormente, de modo a que esta pudesse servir de estrutura de suporte e permitisse que as

camadas de fibra fossem colocadas sobre a mesma a fim de se obter uma forma final igual à projectada (figura 4.17)



Figura 4.16: CAD do molde suporte do porta cubos

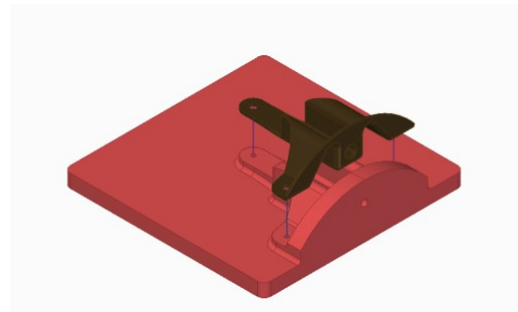


Figura 4.17: Utilização do molde para a produção do componente

Aquando do projeto do molde foi tido em atenção que este iria ser produzido com recurso a maquinação CNC pelo que a geometria deveria ter em consideração isso mesmo. O material utilizado foi uma placa de poliuretano maquinável fabricada pela Sika com a referência SikaBlock M 700, apresentando-se a ficha técnica do mesmo no anexo B.8. Este material foi escolhido devido à boa compatibilidade que apresenta para a produção materiais compósitos, facilidade de maquinação, boa estabilidade de maquinação e capacidade de produzir um bom acabamento superficial. A maquinação foi realizada pelo Núcleo de Oficinas do Instituto Superior Técnico (NOF), tendo o molde sido produzido a partir de um bloco inicial com dimensões 160x160x50 mm, sendo o resultado final apresentado na figura 4.18.



Figura 4.18: Molde final do suporte do porta cubos

4.3.2 Manufatura do componente

Uma vez obtido o molde foi necessário seguir um conjunto de etapas de forma a obter o componente final. Foram efectuados dois componentes tendo o procedimento seguido na manufatura dos mesmos apresentado algumas diferenças. Todo o processo de manufatura dos componentes foi executado no Laboratório de Mecânica situado na Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal. O método utilizado na manufatura do componente foi o HLUV, sendo descritas de seguida, as etapas necessárias para a obtenção dos mesmos:

4.3.2.1 Primeiro componente

1. Preparação do molde. Uma vez que o material utilizado no molde é bastante poroso, é necessário efectuar uma preparação da superfície do mesmo para que esta esteja apta a ser utilizada para a manufactura do componente. De forma a garantir que a superfície se encontra nas devidas condições foi aplicado um selante de moldes do fabricante MARBOCOTE com a referência HP2002, sendo aplicado conforme indicação da ficha técnica do mesmo (anexo B.9). Finalizada a aplicação do selante, foi aplicado um agente desmoldante de forma a permitir que o componente fosse retirado facilmente do molde, tendo para isso sido aplicado o desmoldante HP7 da MARBOCOTE, aplicando-se no total 4 camadas segundo as indicações do fabricante (anexo B.10).
2. Corte da fibra de basalto. Foram cortadas secções rectangulares (figura 4.19 (a)), com dimensão de 150x150 mm a partir de um rolo de grandes dimensões, sendo novamente utilizada fita adesiva de papel de forma a evitar a distorção da mesma durante o corte. Foram cortadas 10 camadas, tal como indicado pela optimização efectuada anteriormente, processo durante o qual se teve em consideração a orientação que as camadas teriam. O corte foi efectuado a meio da fita adesiva sendo posteriormente, e de forma bastante cuidadosa, retirado o excesso que se mantinha colado nas secções de fibra que serão utilizadas no fabrico do componente. Foram também preparados os restantes materiais necessários para o processo de HLUV, sendo estes a película perfurada, as camadas de *breather* e o saco de vácuo.
3. Preparação da mistura resina + catalisador. Foram misturados 80 g de resina com 26,4 g de catalisador, seguindo o rácio indicado pelo fabricante. Os dois componentes são misturados de forma a produzir uma mistura homogénea com o auxílio de uma espátula de madeira.
4. Manufactura do componente. Uma vez preparada a resina que servirá de matriz no componente, as secções de fibra foram impregnadas à parte e uma de cada vez com o auxílio de um pincel, tendo em atenção as orientações das mesmas, e colocadas no molde. Uma vez colocadas cinco camadas de fibra no molde foi necessário introduzir o *insert*, previamente maquinado numa fresadora manual (figura 4.19 (b)) e lixado com recurso a uma lixa grosseira (gramagem 40) de modo a evitar problemas na ligação do mesmo com a resina e com a fibra, garantindo que este fica correctamente posicionado, sendo de seguida colocadas as restantes camadas de fibra, de forma a perfazer 10 camadas no total (figura 4.19 (c)). Finalizado o processo de colocação de todas as camadas necessárias, foram colocados os materiais necessários para efectuar o processo de HLUV, começando pela película perfurada e seguindo-se as 4 camadas de *breather* (figura 4.19 (d)). Concluído este passo, o molde é colocado no interior do saco de vácuo que de seguida é fechado com recurso à fita adesiva de dupla face. É retirado todo o ar, através de uma ligação (bico de vácuo) efectuada entre o interior e o exterior do saco, com recurso a uma bomba de vácuo. O saco de vácuo é mantido com uma pressão negativa de 800 mbar durante 24 h, tempo necessário para promover uma correcta cura da resina.

5. Obtenção do componente. Finalizado o tempo de espera, o saco de vácuo é aberto e o molde é retirado do seu interior (figura 4.19 (e)).

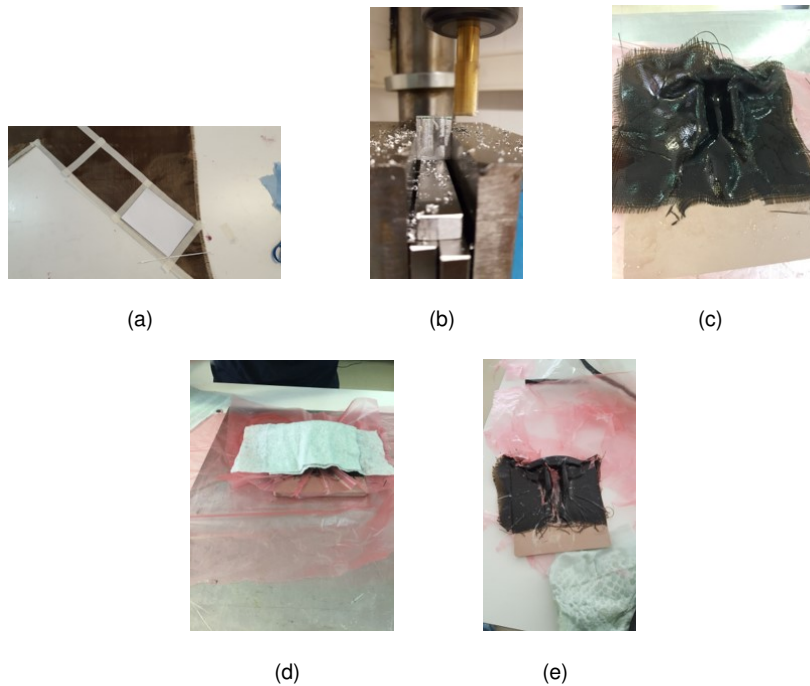


Figura 4.19: Manufatura do componente – Tentativa 1: (a) Pormenor do corte da fibra (b) Processo de maquinação do *insert* (c) Aplicação das 10 camadas de fibra de basalto (d) Aplicação da película perfura e do breather (e) Componente após 24 h de cura

Após inspeção do componente produzido verificou-se que o mesmo apresentava alguns defeitos, principalmente nas zonas que continham raios de curvatura, observando-se que a fibra não estava correctamente posicionada nos mesmos levando a que existisse uma acumulação anormal de resina nessas zonas, como ilustrado na figura 4.20. Outro dos defeitos verificados foi a presença de porções da película perfurada que ficaram presos ao componente e que não puderam ser retirados, o que pode resultar no enfraquecimento na ligação entre as camadas de fibras, traduzindo-se em problemas estruturais no componente.



Figura 4.20: Defeitos verificados no componente

Assim sendo, foi pensado outro procedimento para a manufatura de um novo componente, descrevendo-se de seguida os procedimentos com ênfase nas respectivas alterações.

4.3.2.2 Segundo componente

Devido à existência de defeitos no primeiro componente foi decidido efectuar uma segunda tentativa de modo a obter-se um componente de boa qualidade. Assim sendo, foram exploradas novas possibilidades para a manufatura do mesmo. O procedimento seguido foi semelhante ao descrito anteriormente pelo que apenas serão enunciadas as alterações efectuadas durante o mesmo. Da consulta da ficha técnica do agente desmoldante utilizado, verificou-se que não existia a necessidade de ser aplicado novamente, portanto esta etapa não foi repetida. Uma das alteração executadas verificou-se no corte das secções de fibra, tendo desta vez sido utilizada uma ferramenta disponível no programa Siemens NX 12 que permite obter a geometria 2D da forma que se pretende produzir, permitindo assim que a fibra cortada tivesse uma forma bastante mais aproximada da realidade e que sua a colocação no molde seja muito mais fácil, evitando assim problemas durante manufatura. Assim sendo, foram impressos *templates* com a forma pretendida, tendo os mesmos sido colocados sobre a fibra (figura 4.21 (a)), marcado o perímetro da geometria com fita adesiva de papel de forma a evitar a distorção da mesma. Foram cortadas 10 camadas de fibra respeitando as orientações indicadas. Outra solução aplicada foi a de executar o processo de manufatura do componente em dois passos de forma a facilitar a compactação das fibras. Dessa forma, no primeiro passo foram colocadas as primeiras 5 camadas de fibra, tendo estas sido impregnadas uma de cada vez com o auxílio de um pincel (figura 4.21 (b)) e posteriormente empilhadas e colocadas no molde de uma vez. Isto facilita moldação e torna menos provável a existência de distorção da fibra. Por fim foi colocado o respectivo *insert*, na posição correcta (figura 4.21 (c)). A fibra foi cuidadosamente pressionada junto de todos os raios de curvatura com o auxílio de pequenas espátulas de modo a evitar a repetição dos problemas verificados no primeiro componente, sendo de seguida efectuado o processo de cura durante 24h (figura 4.21 (d)). Uma vez terminado o tempo de espera (figura 4.21 (e)) foram introduzidas as restantes 5 camadas em falta e voltou-se a aplicar o vácuo durante o tempo de cura da resina. No final é retirado o molde do saco de vácuo e obtém-se o componente finalizado (figura 4.21 (f)).



(a)



(b)



(c)

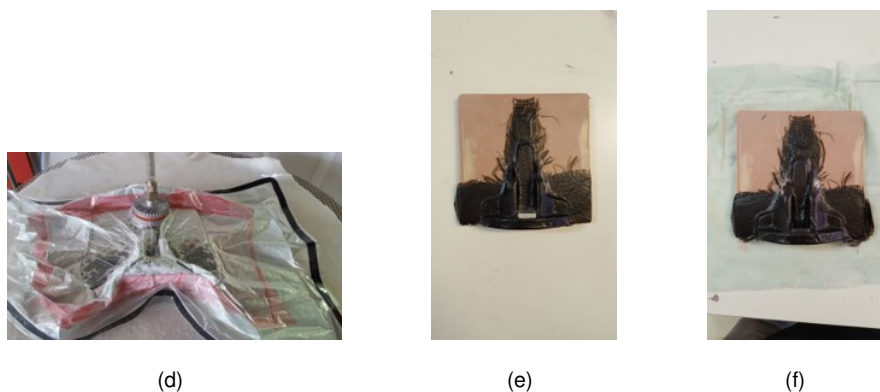


Figura 4.21: Manufatura do componente – Tentativa 2: (a) Pormenor do corte da fibra com a geometria aproximada do componente (b) Impregnação das camadas (c) Colocação das camadas e do *insert* no molde (d) Aplicação de vácuo (e) Primeiras camadas e *insert* após cura (f) Componente finalizado

4.3.3 Preparação do componente

Uma vez finalizada a manufatura dos componentes foi necessário executar um processo de acabamento dos mesmos de forma a eliminar todo o excesso de fibra resultante do processo de produção, e efectuar toda a furação necessária de modo a que a geometria produzida através do molde fosse igual à idealizada. Todo o procedimento de acabamento foi efectuado no Instituto Superior Técnico, sendo o processo de acabamento efectuado nos dois componentes produzidos. Assim sendo, o primeiro passo foi executar os furos na localização correcta com recurso aos furos previamente maquinados no molde (figura 4.22 (a)), servindo estes como furos guia. Estes são de diâmetro inferior aos finais, marcando apenas a localização dos mesmos. Este trabalho foi executado com recurso à fresadora manual existente no laboratório onde a equipa PSEM efectua o seu trabalho. Uma vez efectuados os furos guia, foi iniciado processo de remoção de todo o material compósito em excesso (figura 4.22 (b)) tendo esse corte sido efectuado com recurso a uma multiferramenta *DREMEL 4000* onde foi acoplado um disco de corte de diamante do mesmo fabricante. O componente foi cuidadosamente protegido, com recurso a uma fita adesiva azul, de modo a evitar que durante o processo de corte do material em excesso fosse introduzido algum defeito, como o corte acidental em alguma das camadas do mesmo. Por último toda a aresta que resultou do corte foi finalizada com uma lixa de gramagem 320 de modo a obter-se uma superfície lisa e sem imperfeições. Uma vez finalizado o processo de acabamento da geometria do componente foi necessário terminar o processo de furação do componente. Para isso os furos guia executados anteriormente foram novamente furados, passando agora para o diâmetro final de 5 mm, tendo o furo central do componente sido progressivamente efectuado até ao diâmetro final de 9,5 mm. Terminado o processo de furação, foi iniciado o procedimento para maquinação da caixa necessária para a rótula radial. Este processo foi efectuado com bastante cuidado de modo a não danificar o componente. Para tal foi utilizada uma fresa de 14 mm de diâmetro, sendo a profundidade do corte efectuado de 4 mm, valor igual à espessura da rótula utilizada, sendo todo este processo executado com recurso à fresadora manual (figura 4.22 (c)).

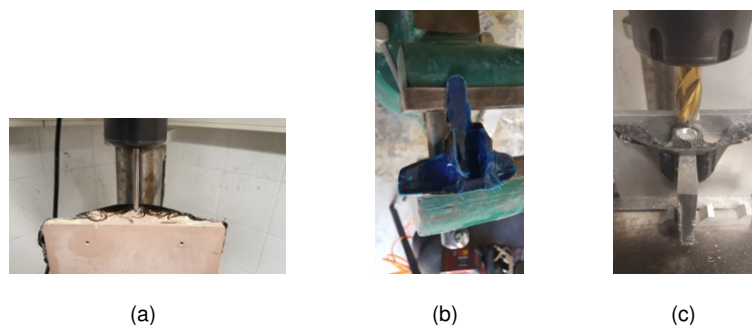


Figura 4.22: Preparação final do componente: (a) Furação do furo guia central (b) Processo de corte do excesso de fibra (c) Maquinação da caixa para a rótula radial

4.3.4 Colocação dos extensómetros

De forma a obter informação sobre a deformação verificada no componente quando lhe são aplicados carregamentos, este foi instrumentado com recurso, novamente, a três extensómetros de contacto comercializados pela empresa Tokyo Measuring Instruments Laboratory (TML). O modelo de extensómetros de contacto utilizado é o FLA-5-11, tendo estes uma resistência de $120\ \Omega$ e um *gauge factor* de 2,13, podendo ser consultada a ficha técnica no anexo B.6. Todas as características destes foram enunciadas anteriormente pelo que não serão repetidas. O procedimento de colocação dos extensómetros no componente é também o mesmo descrito anteriormente, pelo que apenas se irá indicar aspectos diferentes e relevantes. Após finalizado os procedimentos de preparação dos extensómetros e da superfície, foram efectuadas marcações, de uma forma grosseira, para a localização pretendida para os extensómetros, sendo as zonas escolhidas aquelas que apresentam mais interesse ao nível das deformações e tensões observadas a partir das simulações computacionais. Posteriormente estes foram colados, de acordo com o procedimento anteriormente referido, nas três zonas previamente marcadas (figura 4.23), sendo por último efectuadas medições de forma a ser possível conhecer a localização, em relação às dimensões do componente, dos extensómetros de contacto.

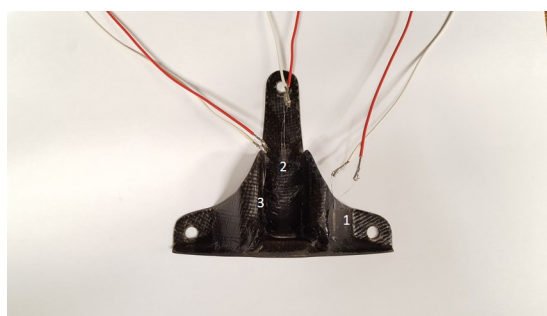


Figura 4.23: Posicionamentos dos extensómetros no componente

4.4 Metodologia dos ensaios experimentais

Uma vez finalizado a manufactura do novo suporte do porta cubos, o passo seguinte foi o ensaio experimental do mesmo, de modo a avaliar todo o projecto e manufactura e verificar se a solução

proposta apresenta vantagens quando comparada com a solução utilizada anteriormente. Os ensaios foram efectuados no Laboratório Ensaio Mecânicos (LEM2) situado no Instituto Superior Técnico, com recurso a uma máquina de ensaios universal Instron modelo 5566, figura 4.24, com uma célula de carga de 10 KN. A máquina em questão utiliza o mesmo software de controlo e aquisição de dados apresentado anteriormente, o *Bluehill*. O ensaio experimental efectuado apresenta como limitação a possibilidade de apenas ser reproduzida a carga vertical aplicada no componente, sendo, no entanto, esta a que maioritariamente contribui para a existência de deformação no componente. De modo a replicar as condições verificadas no componente quando este se encontra montado e em utilização no protótipo, foi projectado um *setup* experimental que através da máquina de ensaios disponível permitisse que tal acontecesse.



Figura 4.24: Máquina de ensaios universal - Instron 5566

4.4.1 **Setup experimental**

Uma vez que a máquina de ensaios Instron 5566 apenas executa movimentos de tracção ou compressão segundo o eixo vertical da mesma, foi necessário projectar um *setup* experimental que simulasse o componente aplicado no protótipo. Assim sendo, com recurso ao software de CAD, foi efectuado o projecto de alguns componentes que permitissem o ensaio do suporte do porta cubos. As peças desenvolvidas incluem uma base onde o componente será aparafusado, simulando a estrutura do protótipo, e uma estrutura em “L” que tem uma face com um ângulo de 10° , simulando o *camber* verificado nas rodas do protótipo. A ligação entre ambas é efectuada por meio de uma ligação aparafusada tal como acontece na realidade. Na figura 4.25 é apresentado o ficheiro de CAD do *setup* experimental idealizado e nos anexos A.3 e A.4 os desenhos técnicos dos componentes que constituem o mesmo.

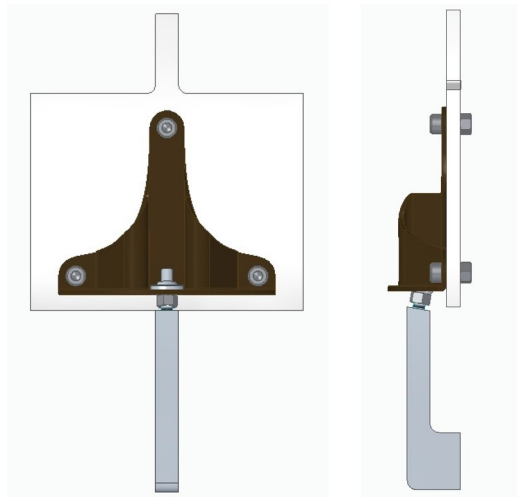
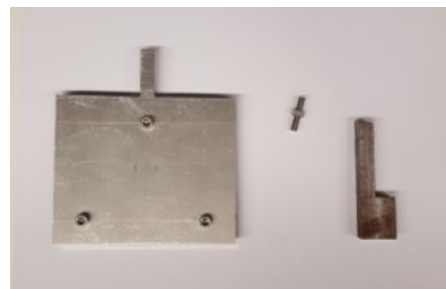


Figura 4.25: Vistas do *setup* experimental projectado

Depois de projectada e verificada a funcionalidade da preparação experimental, foi necessário efectuar a maquinação das peças que a constituem, tendo todo o trabalho sido executado com o auxílio da fresadora manual existente na oficina de trabalho da equipa PSEM. Assim sendo, para a base foi utilizada uma chapa de alumínio de 6 mm de espessura com dimensão 135x135 mm que foi maquinada utilizando uma fresa de 12 mm de forma a obter a configuração desejada. Os três furos existentes na mesma têm 5 mm de diâmetro. A estrutura em “L” foi maquinada a partir uma chapa de aço com 12 mm de espessura até à forma desejada, utilizando uma fresa de 12 mm de diâmetro. De modo a executar a face com o ângulo de 10° e também o furo roscado (M5) existente no centro da mesma foi efectuada a rotação da árvore da fresadora permitindo assim a execução dos mesmos (figura 4.26 (a)). Os elementos utilizados na ligação aparafusada são normalizados, sendo usado um varão roscado e uma porca, ambos M5. Todos os elementos que compõem o *setup* experimental são apresentados na figura 4.26 (b).



(a)



(b)

Figura 4.26: *Setup* experimental: (a) Pormenor da maquinação da face a 10° (b) Componentes do *setup* experimental

4.4.2 Ensaios experimentais

O procedimento seguido para a execução dos ensaios experimentais foi semelhante ao efectuado para os ensaios experimentais dos provetes. Ambos os suportes foram ensaiados, servindo o

componente que apresentava alguns defeitos como teste, de forma a verificar todo o *setup* produzido e verificando a funcionalidade do mesmo. O procedimento para os ensaios dos dois componentes apresenta pequenas variações, na medida em que no primeiro ensaio o componente não estava instrumentado e que o ensaio ocorreu a uma velocidade constante de 2 mm/min. Salvo as diferenças enunciadas o procedimento seguido nos ensaios foi o mesmo, tendo iniciado com a colocação de todo o *setup* experimental na máquina de ensaios (figura 4.27), e posterior ligação dos três extensómetros ao aparelho portátil de aquisição, com a diferença de que para efectuar a leitura dos valores medidos pelos três extensómetros colocados foi necessário a utilização de uma unidade portátil de comutação de extensómetros, da Vishay. Esta unidade permitia visualizar os valores das extensões medidas de uma forma mais automática, sendo para isso apenas necessário alterar o canal em que o extensómetro estava ligado, eliminando a necessidade de utilização de três aparelhos portáteis de aquisição de dados. Após todas as ligações estarem correctamente efectuadas, o ensaio foi realizado com incrementos manuais de força, de 500 N, começando no valor de 0 N, sendo o ensaio parado no final de cada incremento e registando-se manualmente os valores de extensão medidos em cada um dos extensómetros de contacto utilizados. Ambos os ensaios foram realizados até à fractura do componente registando-se o valor de força máximo atingido, indicado através do software *Bluehill*.



Figura 4.27: *Setup* experimental montado na máquina de ensaios

Capítulo 5

Discussão de resultados

De forma a avaliar como a nova solução apresenta vantagens ou desvantagens em relação ao componente existente, será efectuada uma comparação de diversos parâmetros (massa, deformação, tensão e extensão verificadas) de interesse para que seja possível formular uma conclusão e avaliar a aplicabilidade de componentes mecânicos produzidos utilizando materiais compósitos reforçados por fibras de basalto.

5.1 Resultados das simulações computacionais

As simulações numéricas, realizadas no software de elementos finitos, do suporte do porta cubos produzido, foram efectuadas tendo em consideração as propriedades obtidas a partir dos ensaios experimentais dos provetes e do laminado obtido a partir do processo de optimização, sendo de seguida apresentados os resultados obtidos.

5.1.1 Massa

O primeiro parâmetro a ser analisado foi a massa do componente. Com recurso a uma ferramenta disponível no programa foi possível obter uma previsão do valor final que o componente teria. A ferramenta utilizada foi o *Solid Properties Check* tendo sido obtida a massa de 22,1 g.

5.1.2 Deformações

Outro parâmetro analisado foi a deformação verificada quando é imposto o carregamento descrito anteriormente. Assim sendo, são apresentadas na figura 5.1 as deformações verificadas segundo os três eixos coordenados.

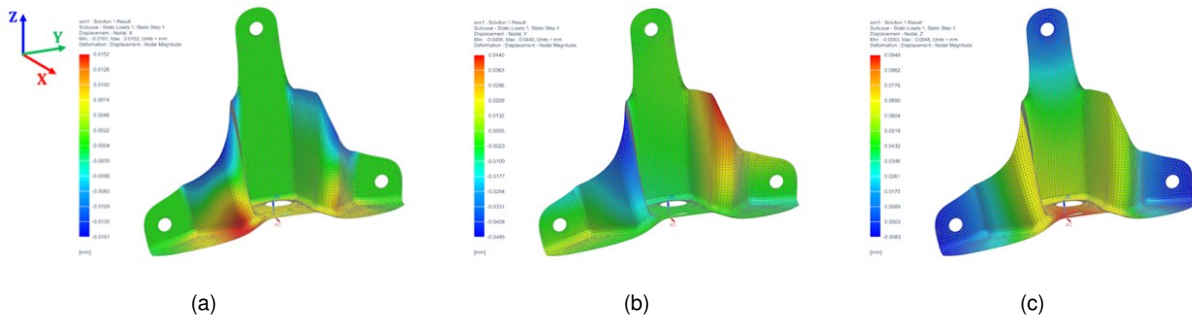


Figura 5.1: Deformações em milímetros segundo: (a) o eixo xx (b) o eixo yy (c) o eixo zz

Da análise da figura 5.1 é possível verificar que a deformação mais acentuada se verifica segundo o eixo zz, algo que é coerente com o carregamento aplicado, uma vez que a maior componente da força aplicada é segundo o eixo vertical, sendo a deformação segundo este eixo bastante superior comparativamente às restantes deformações verificadas, apresentando um valor máximo em módulo de 0,09 mm na zona central do componente, e um valor médio de 0,04 mm. A deformação verificada segundo o eixo yy é também, em grande medida, devida à força vertical aplicada, resultando num valor máximo em módulo de 0,04 mm. Por último, a deformação que menos relevância apresenta no componente é aquela que se verifica segundo o eixo xx, apresentando um valor máximo em módulo de 0,01 mm, ficando-se esta a dever em grande parte aos momentos aplicados no componente, principalmente segundo o eixo yy, resultando numa maior deformação no lado esquerdo do componente.

5.1.3 Tensões

Ao contrário do verificado nos materiais isotrópicos, é comum quando se pretende analisar a tensão a que um dado material ortotrópico, constituído por camadas, está sujeito que essa análise seja efectuada através das tensões que se verificam em cada camada e não no material como um todo. Assim sendo, foram analisadas as tensões, verificadas em todas as 10 camadas que constituem a base do componente, sendo nas figuras 5.2 e 5.3 apresentados os valores máximos verificados à tracção e à compressão em cada uma das *plies*, sendo na figura 5.4 os valores de tensão de corte apresentados em módulo.

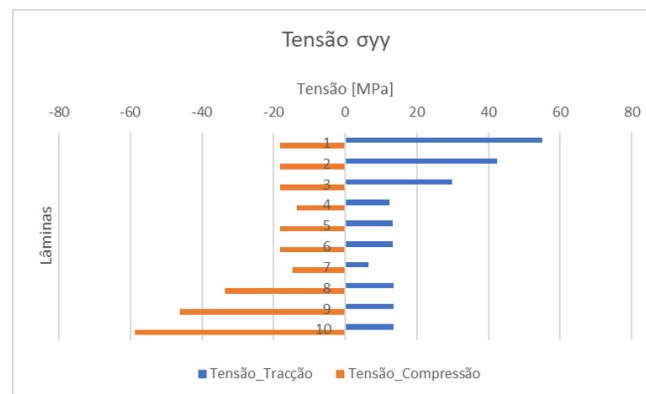


Figura 5.2: Tensão σ_{yy}

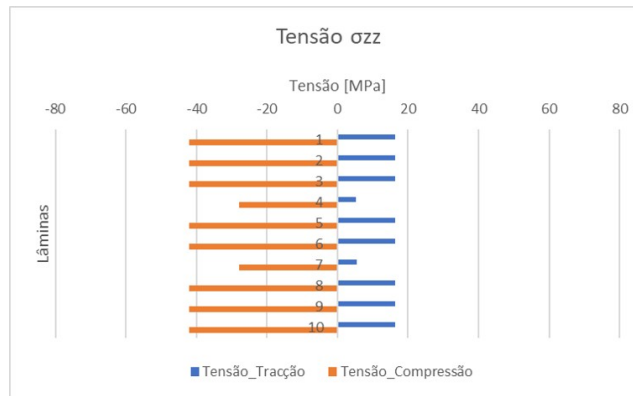


Figura 5.3: Tensão σ_{zz}

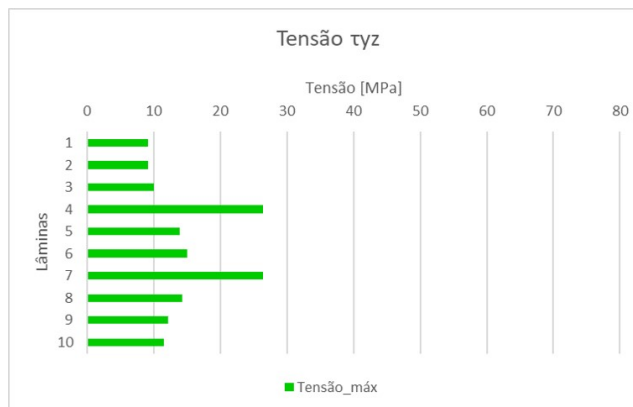


Figura 5.4: Tensão τ_{yz}

Nas figuras anteriores as lâminas numeradas de 1 a 10 correspondem às lâminas do empilhamento obtido a partir do processo de otimização e com o qual o componente foi manufacturado, isto é $[0/0/0/45/0]_s$.

São apresentadas as tensões que, segundo o referencial do componente, são as mais relevantes de considerar, neste caso σ_{yy} , σ_{zz} e τ_{yz} . Uma primeira análise dos três gráficos obtidos permite facilmente entender a contribuição que cada orientação das camadas representa face aos esforços envolvidos. Como expectável, existe uma grande contribuição por parte das *plies* que apresentam orientações de $0^\circ/90^\circ$ (lâminas 1,2,3,5,6,8,9 e 10) quando os esforços verificados são alinhados com essas mesmas direcções. Opostamente, é verificada nas lâminas com orientações de 45° (lâminas 4 e 7) uma resistência muito menor, como é observado no gráfico onde são ilustradas as tensões zz (σ_{zz}), sendo verificada uma redução de 66,12% nos valores à tracção e de 33,92% nos à compressão. Da análise do gráfico obtido para σ_{yy} é possível observar um comportamento característico dos materiais constituídos por camadas quando estes estão sujeitos a carregamentos que provocam a sua flexão: as lâminas situadas abaixo do plano médio do laminado estão sujeitas a esforços de compressão enquanto as lâminas situadas acima estão sujeitas a tensões de tracção, ou vice-versa, dependendo da direcção do carregamento. Confirma-se através da observação do gráfico τ_{yz} (figura 5.4) que, em situação de sollicitação de corte, as fibras com orientação de 45° são as responsáveis por suportar a maior parte da tensão, com um aumento de aproximadamente 50% quando comparadas com as fibras

orientadas a 0°/90°.

5.1.4 Extensões

Os valores das extensões serão analisados de forma a que seja possível, posteriormente, efectuar uma comparação com os valores obtidos através dos extensómetros de contacto colocados no componente ensaiado. Assim sendo, de modo a ser possível efectuar uma comparação mais precisa, o primeiro passo foi, através das medições efectuadas anteriormente da localização dos extensómetros no componente ensaiado, criar, no suporte modelado no software de elementos finitos, zonas com a mesma dimensão e localização dos extensómetros presentes no componente (figura 5.5 (a)), como representado na figura 5.5 (b). Uma vez criadas essas zonas, a “leitura” das extensões foi efectuada a partir dos valores verificados nos elementos que se encontravam nessas áreas pré-definidas.

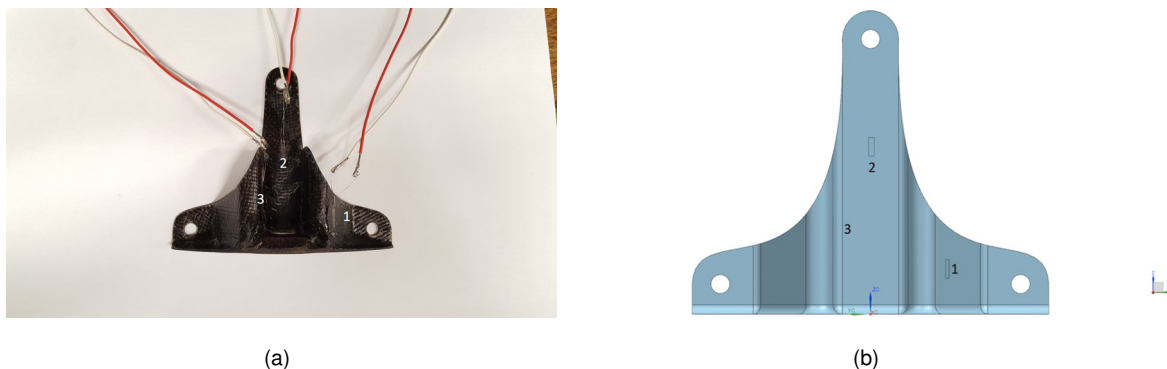


Figura 5.5: Representação dos extensómetros: (a) no componente manufacturado (b) no componente em CAD

Tal como já referido anteriormente os valores obtidos foram manualmente registados em intervalos de 500 N até à fractura do componente. Estes valores foram indicados pelo software *Bluehill* e eram referentes à carga aplicada pela máquina verticalmente, tendo que ser efetuadas as devidas ponderações tendo em consideração os 10° de *camber* das rodas, para serem introduzidos correctamente os valores de força nas simulações numéricas do componente, de modo a ser reproduzido o mesmo tipo de carregamento. De forma a garantir valores mais realistas foram efectuados 3 refinamentos da malha aplicada no componente, isto é partindo da malha original, onde os elementos que a constituíam tinham dimensão de 1mm, estes foram sucessivamente reduzidos de modo a se obter subdomínios de dimensão inferior que melhor descrevam a realidade. Assim, no primeiro refinamento os elementos considerados tinham metade da dimensão dos originais ou seja 0,5mm, procedendo-se de igual forma até ao último refinamento onde os elementos tinham uma dimensão de 0,125 mm. No anexo E apresentam-se os gráficos relativos aos diversos refinamentos da malha, com a indicação do número de elementos e nós que resultavam de cada um. Assim sendo, as extensões foram registadas tendo em consideração aquelas que se desenvolvem na primeira camada do empilhamento do componente e segundo a direcção z (orientação dos 0° da fibra), tendo sido registados os valores relativos ao último refinamento, e que são os apresentados na tabela 5.1:

Tabela 5.1: Valores de extensão obtidos nas simulações de elementos finitos

	0 N	500 N	1000 N	1500 N	2000 N
Extensão - Zona 1 [$\mu\epsilon$]	0	70,72	141,43	212,15	282,85
Extensão - Zona 2 [$\mu\epsilon$]	0	-675,99	-1351,99	-2027,98	-2703,97
Extensão - Zona 3 [$\mu\epsilon$]	0	-137,27	-274,55	-411,82	-549,094

5.1.5 Carga crítica

Como recurso ao critério de falha escolhido anteriormente foi também possível obter uma previsão da carga crítica do componente, sendo apenas considerada a influência da força no componente, o valor obtido através das simulações numéricas foi 4773 N.

5.2 Resultados dos ensaios experimentais

Os resultados experimentais obtidos correspondem aos dados retirados do ensaio dos dois componentes produzidos. O primeiro componente testado foi aquele que apresentava defeitos e, como anteriormente referido, este não foi instrumentado, sendo apenas retirada a força de ruptura do mesmo, que neste caso foi de 3388 N, sendo este valor o ponderado tendo em consideração os 10° de inclinação. Relativamente ao segundo ensaio, do componente sem defeitos e instrumentado, o valor obtido para a força de ruptura foi de 2365 N, tendo já sido também efectuada a devida ponderação a este valor. A diferença entre as cargas de ruptura dos dois componentes pode ter sido devida à execução dos componentes com procedimentos diferentes sendo que um deles, e o que apresenta a carga de ruptura inferior, foi fabricado em duas etapas, podendo isso ter introduzido algum defeito, como uma pior ligação entre as camadas de fibra ou impurezas que tenham ficado retidas entre as duas fases, levando a que, mesmo existindo defeitos no primeiro componente produzido, este tenha conseguido resistir melhor ao carregamento induzido. No anexo C.1 é apresentada a curva do ensaio experimental ao primeiro componente, sendo apenas esta apresentada devido ao segundo teste ter sido realizado de forma manual não sendo, por isso, registada a curva através do software *Bluehill*. Foram também retirados os valores dos três extensómetros colocados, sendo os mesmos apresentados na tabela 5.2:

Tabela 5.2: Valores de extensão obtidos nos ensaios experimentais

	0 N	500 N	1000 N	1500 N	2000 N
Extensómetro 1 [$\mu\epsilon$]	0	67	102	150	220
Extensómetro 2 [$\mu\epsilon$]	0	-876	-1390	-2093	-3055
Extensómetro 3 [$\mu\epsilon$]	0	0	-77	-190	-312

5.3 Análise comparativa dos ensaios experimentais com as simulações computacionais

5.3.1 Massa

Foram obtidas as massas dos dois componentes produzidos, sendo esta medição efectuada através de uma balança digital. A massa obtida para o primeiro componente efectuado foi de 24 g e para o componente que foi instrumentado de 22 g. Da análise destes valores é possível verificar que estes se encontram bastante próximos dos previstos pelo software de simulação numérica. A massa do primeiro suporte produzido é ligeiramente mais elevada do que a prevista devido ao excesso de resina que não foi retirada. No segundo componente o valor é igual (a escala mais pequena da balança utilizada são as unidades) atestando a boa qualidade do processo de manufactura do mesmo.

5.3.2 Extensões

De modo a verificar a qualidade das simulações de elementos finitos executadas, neste tópico será efectuada uma comparação dos valores obtidos em cada um dos tópicos anteriores. Assim sendo, o primeiro ponto de comparação será o valor das extensões, podendo a primeira conclusão a retirar ser que os valores são coerentes entre as simulações e a parte experimental. Da observação dos dados do primeiro e segundo extensómetros conclui-se que os valores obtidos nos ensaios apresentam alguma proximidade aos obtidos nas simulações. No que concerne ao terceiro extensómetro é possível observar que os dados obtidos são bastante disparees, algo que pode ser justificado por uma má colocação do extensómetro, podendo este ter ficado mal alinhando com a direcção das fibras presentes no componente ou, à semelhança do que já sucedeu nos ensaios dos provetes, por algum dano que o mesmo possa ter sofrido aquando do manuseamento ou montagem do componente na máquina. Outra possibilidade que pode ajudar a explicar a variação obtida entre os valores das simulações e os experimentais é durante o processo de manufactura alguma das camadas de fibra introduzida apresentar alguma distorção e não ter sido correctamente posicionada no molde, uma vez que nas simulações o programa considera o “caso perfeito” em que as fibras estão perfeitamente alinhadas e com nenhuma distorção. Por último, existe também a possibilidade de, apesar de todo o cuidado tido na preparação e montagem do setup experimental, que este não reproduza totalmente as condições verificadas nas simulações computacionais. Na tabela 5.3 são apresentados os valores dos erros experimentais associados às medições efectuadas que comprovam as afirmações anteriores.

Tabela 5.3: Erros experimentais das medições efectuados pelos extensómetros

	0 N	500 N	1000 N	1500 N	2000 N
Erro 1 [%]	0	5,25	27,88	29,29	22,22
Erro 2 [%]	0	29,58	2,81	3,21	12,98
Erro 3 [%]	0	100	71,95	53,86	43,18

5.3.3 Falha do Componente

Como os dois componentes produzidos foram ensaiados até à sua falha foi possível analisar o modo como esta se desenvolveu, sendo na figura 5.6 possível observar que a zona onde se verificou a falha dos dois componentes produzidos é aproximadamente a mesma, indicada pela forma oval.

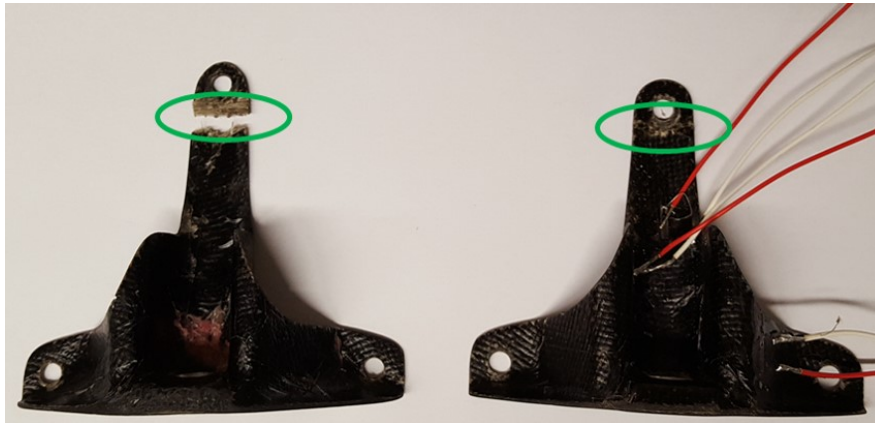


Figura 5.6: Falha dos componentes

De modo a conseguir apresentar-se uma explicação para a fractura dos dois componente, numa localização muito próxima em ambos, recorreu-se às simulações numéricas de modo a tentar explicar-se este acontecimento. Sendo assim, apresenta-se na figura 5.7 a simulação do componente para uma carga vertical de 2000 N, este valor foi o escolhido por ser o último valor em que foi recolhida informação dos extensómetros de contacto colocados no componente.

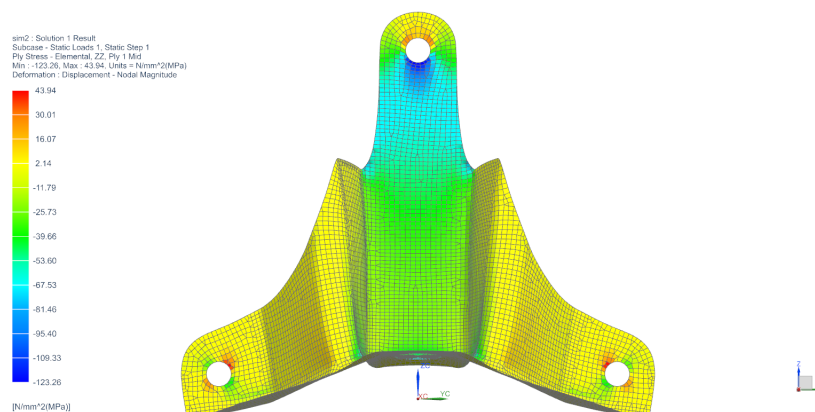


Figura 5.7: Tensão σ_{zz} observada para a carga de 2000 N

Na figura 5.7 é apresentada informação relativamente às tensões zz verificadas no componente para a carga referida. Assim sendo, é possível observar que existe uma concentração de tensões junto ao furo superior, com valores de aproximadamente 120 MPa (à compressão), sendo que o valor médio verificado no componente é de aproximadamente 20 MPa. Uma vez que a falha de ambos os componente acontece aproximadamente na mesma zona pode concluir-se que a principal causa da mesma seria a concentração de tensões pelo que seria esta a região onde mais facilmente se verificaria a existência de problemas.

Outra questão que é importante analisar prende-se com a fractura dos componentes que apesar de ter ocorrido na mesma zona aconteceu para valores diferentes de força aplicada, sendo que a diferença foi de aproximadamente 1000 N, um valor algo elevado para a análise em questão. O componente que apresentou uma carga de ruptura inferior foi aquele cujo processo de manufactura foi executado em duas fases, algo que pode ter introduzido defeitos como, por exemplo, uma diminuição de adesão entre as 5 camadas de fibra colocadas na primeira etapa e as restantes, ou eventualmente algum tipo de contaminação durante o processo de remoção do saco de vácuo e dos consumíveis da primeira para a segunda etapa são algumas hipóteses que podem ajudar a explicar a diferença verificada entre as cargas de ruptura. Comparando o valor previsto para a carga de ruptura na simulação de elementos finitos com os valores obtidos experimentalmente estes apresentam valores inferiores, algo que podem mais uma vez ser justificado com o facto de a simulação considerar que se está perante a situação perfeita em termos da disposição e orientação das camadas no componente algo que por vezes não sucede na realidade.

5.4 Análise comparativa do componente original com o componente alternativo

Devido à impossibilidade de ser efectuado um ensaio experimental ao componente original, tendo em consideração que as simulações conduzem a resultados próximos dos verificados experimentalmente, será efectuada uma comparação de alguns parâmetros obtidos através das simulações numéricas de ambos de forma a ser possível avaliar a influência das alterações desenvolvidas. Na figura 5.8, são apresentados os dois componentes (original e alternativo) de modo a evidenciar as suas alterações a nível geométrico.

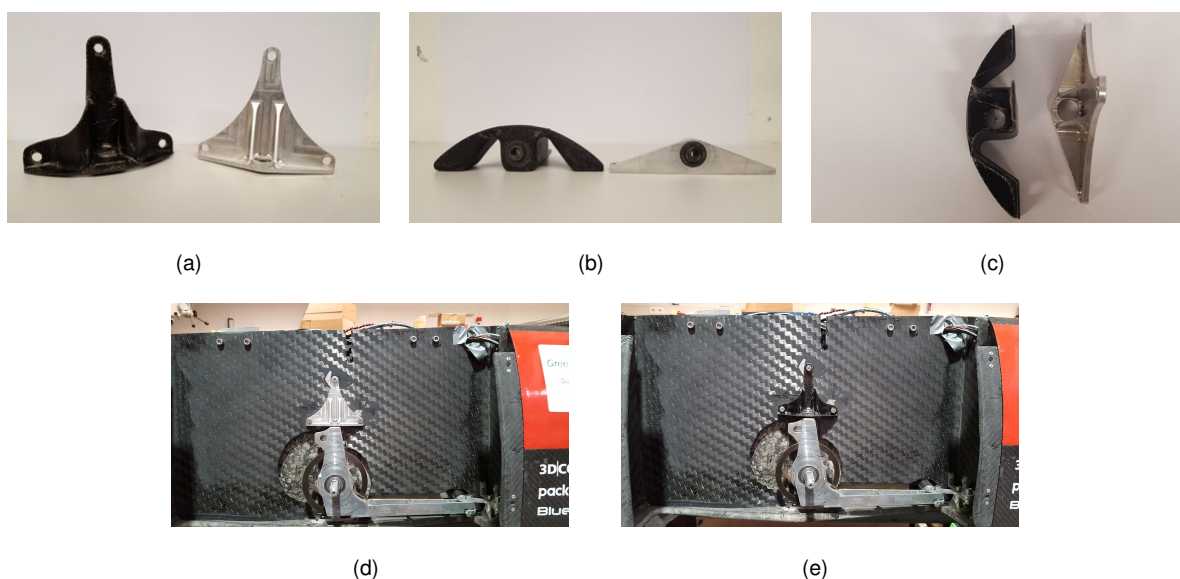


Figura 5.8: Componente alternativo vs componente original: (a) Vista frontal (b) Vista da base (c) Vista de topo (d) Componente original montando no protótipo GP 17 EVO (e) Componente alternativo montando no protótipo GP 17 EVO

Uma vez evidenciadas as diferenças ao nível da forma dos componentes foi efectuada uma comparação de alguns parâmetros dos mesmos de modo a verificar-se as consequências das alterações efectuadas. Assim sendo, na tabela 5.4 apresentam-se alguns dos parâmetros considerados, tendo em consideração o carregamento calculado anteriormente e que é verificado no componente.

Tabela 5.4: Comparação entre o componente original e alternativo

	Massa [g]	Deformação máxima [mm]	Tensão máxima [MPa]
Componente Original	40	0,02	66,73
Componente Alternativo	22	0,09	45,85
Variação [%]	-45	350	-31,29

Analisando os valores obtidos, verifica-se que o valor da massa do componente alternativo proposto é bastante inferior. Este valor assume uma relevância ainda maior se se considerar que existem dois suportes no protótipo GP17 EVO e quatro no GP19, resultando numa redução de 45% da massa total destes componentes nos protótipos. No que concerne às tensões verificadas nos componentes, são verificados valores inferiores no componente produzido por material compósito, o que pode levar a uma vida mais prolongada deste componente. No entanto realça-se que ambos os valores estão localizados num patamar bastante inferior ao do valor da tensão de cedência de ambos os materiais considerados. A deformação apresentada corresponde ao valor máximo verificado segundo a direcção vertical (z), sendo esta mais elevada no componente alternativo, uma vez que a capacidade dos compósitos reforçados por fibras de resistir a cargas é menor quando comparada neste caso com o alumínio uma vez que este apresenta um valor de módulo de Young superior. É também possível relacionar o aumento da deformação com as diferenças verificadas na geometria dos dois componentes, uma vez que a geometria original poderia estar mais apta a resistir ao carregamento aplicado. No entanto os valores considerados são pequenos e a alteração verificada nos mesmos não produz consequências negativas em todo o sistema de direcção. A situação ideal seria a redução da deformação verificada, no entanto, as vantagens acrescentadas pelo novo componente compensam em larga medida as desvantagens que possam ter sido acrescentadas. Uma possibilidade de manter algumas das vantagens conseguidas com a utilização do material compósito seria por exemplo a substituição do elemento de reforço, se fosse considerada a utilização de fibras de carbono o aumento da deformação verificado poderia ser minimizado ou mesmo revertido, uma vez que o módulo de Young, dos compósitos reforçados por fibras de carbono, apresenta em geral um valor mais elevado o que aumentaria a rigidez global do componente.

Capítulo 6

Conclusão

6.1 Conclusões finais

Analisando o trabalho desenvolvido durante esta dissertação é possível afirmar que a hipótese da utilização de materiais compósitos reforçados por fibras de basalto em componentes mecânicos como substituição de outros produzidos em metal, neste caso alumínio 7075 – T6, se apresenta como uma alternativa bastante viável.

Devido a todas as variáveis presentes e que são difíceis de controlar, como irregularidades na pista, alguma queda acidental do protótipo durante o seu manuseamento ou alguma imperfeição durante o processo de manufactura do componente projectado, todo o estudo efectuado teve em consideração um sobredimensionamento do carregamento aplicado sendo por isso o resultado obtido conservador de forma a evitar problemas durante a utilização do componente.

De forma a obter-se um componente alternativo que fosse facilmente manufacturado através de materiais compósitos foram efectuadas diversas iterações, em CAD, até ser obtida uma geometria final. Esta escolha foi realizada considerando como ponto de partida os dados obtidos da análise de elementos finitos realizada ao componente em alumínio e utilizando propriedades genéricas retiradas da bibliografia para as simulações do compósito.

Para os resultados das simulações numéricas serem confiáveis foram efectuados ensaios experimentais a provetes de modo a serem obtidas as propriedades mecânicas do compósito utilizado. Durante estes ensaios surgiram alguns problemas que impossibilitaram o ensaio dos cinco provetes pretendidos, no entanto foram sempre efectuados no mínimo três considerados válidos, sendo utilizado o valor médio nas simulações.

Foi também desenvolvido um processo de optimização de forma a obter-se um empilhamento apto a resistir ao carregamento aplicado, sendo este processo algo demorado, cerca de 3h, de modo a serem consideradas e analisadas todas as possibilidades de empilhamento possíveis. Uma vez obtido o empilhamento optimizado o passo seguinte foi a manufactura do componente com recurso a um molde. Neste processo verificaram-se algumas dificuldades com o primeiro componente produzido devido a problemas relacionados com a colocação da fibra, sendo necessário produzir um segundo

componente, utilizando um procedimento alternativo, de forma a eliminar os problemas verificados no primeiro. Ambos os componentes foram ensaiados, sendo instrumentado apenas aquele que apresenta boas condições. Foi, no entanto, possível obter a carga de ruptura dos dois componentes sendo que estas apresentam valores bastante díspares. A falha do primeiro componente aconteceu com 3388 N enquanto o segundo conseguiu resistir até 2365 N, atribuindo-se esta diferença aos diferentes procedimentos seguidos na manufactura. Foi também possível verificar, comparando os valores obtidos pelos extensómetros colocados com os registados na análise de elementos finitos, que estes se apresentam próximos, como um erro máximo de aproximadamente 25%, com excepção dos relativos a um dos extensómetros no qual foram registados problemas, pelo que os valores medidos apresentam grandes discrepâncias.

Os dois componentes o original e o alternativo, foram comparados tendo por base os valores obtidos para cada um deles a partir do software comercial de elementos finitos devido à impossibilidade de se efectuar um ensaio experimental ao componente original. Esta abordagem é aceitável uma vez que depois de toda a comparação efectuada entre os ensaios experimentais e simulações numéricas executadas se verificou pouca variação entre eles. Verificou-se, então, uma redução de aproximadamente 50% da massa no componente reforçado por fibras de basalto relativamente ao componente de alumínio. Efectuando uma comparação das tensões verificadas no componente constata-se que o valor máximo registado é também inferior no componente alternativo, verificando-se uma redução de 45%. Registou-se, no entanto, um aumento da deformação do componente quando o mesmo se encontra sob influência do carregamento considerado, sendo o aumento verificado de 0,02 mm para 0,09 mm, valores bastante pequenos que não se afiguram como problemáticos para a integridade do sistema de direcção do protótipo.

6.2 Propostas de desenvolvimento futuro

Como forma de tentar apresentar uma explicação mais detalhada de algumas situações verificadas durante esta dissertação, e também na perspectiva de continuar a apresentar desenvolvimentos na temática dos materiais compósitos reforçados por fibras de basalto, apresentam-se as seguintes ideias:

- Efectuar um processo de optimização mais aprofundado que tivesse em consideração a possibilidade de considerar diferentes empilhamentos em diferentes áreas da geometria do componente, como tentativa de efectuar uma redução ainda maior da massa e também aumentar a rigidez do mesmo.
- Efectuar uma análise abrangente, com a execução de provetes e respectivos ensaios experimentais, de forma a conseguir verificar se existe influência do procedimento seguido durante a manufactura do compósito, ou seja, se existe alteração significativa das propriedades mecânicas. Por exemplo, de um compósito com 10 camadas se a manufactura do mesmo for realizada num único passo ou em dois passos, isto é, primeiro 5 camadas e respectiva cura e posteriormente as restantes 5.

- Uma vez que a equipa procura participar em cada vez mais provas seria interessante efectuar uma análise de fadiga, de forma a obter uma estimativa do número de ciclos a que o componente pode ser sujeito.
- Tendo em consideração a possibilidade de reciclagem das fibras de basalto, seria interessante efectuar um estudo ao nível da compatibilidade e propriedades mecânicas quando combinadas com bio-resina de forma a obter um compósito com menor impacto ao nível ambiental.

Referências

- [1] Technical and sporting regulations 2019. <https://www.greenpower.co.uk/sites/default/files/uploads/Technical%20and%20Sporting%20Regulations%202019%20V1.2.pdf>, . (Consultado em Dezembro de 2018).
- [2] Psem. http://psem.ist.utl.pt/en_pt/about_us.html/, . (Consultado em Dezembro de 2018).
- [3] E. J. Barbero. *Introduction to composite materials design*. CRC press, 2017.
- [4] History of composites. <http://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/>. (Consultado em Maio de 2019).
- [5] C. T. Herakovich. Mechanics of composites: a historical review. *Mechanics Research Communications*, 41:1–20, 2012.
- [6] R. R. Nagavally. Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5:87–92, 2016.
- [7] W. D. Callister and D. G. Rethwisch. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, volume 7. John wiley & Sons Inc, 9 edition, 2014.
- [8] P. K. Mallick. *Fiber-reinforced Composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press, 3 edition, 2007.
- [9] J. N. Reddy. *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*. CRC press, 2003.
- [10] K. K. Chawla. *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [11] Resins systems. <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/resin-systems/>. (Consultado em Junho de 2019).
- [12] How is carbon fiber made? <http://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>, . (Consultado em Junho de 2019).
- [13] Pan - how is made? <http://www.toray-cfe.com/en/54-categories-en/product/64-polyacrylonitrile-pan-how-is-it-made.html>. (Consultado em Junho de 2019).

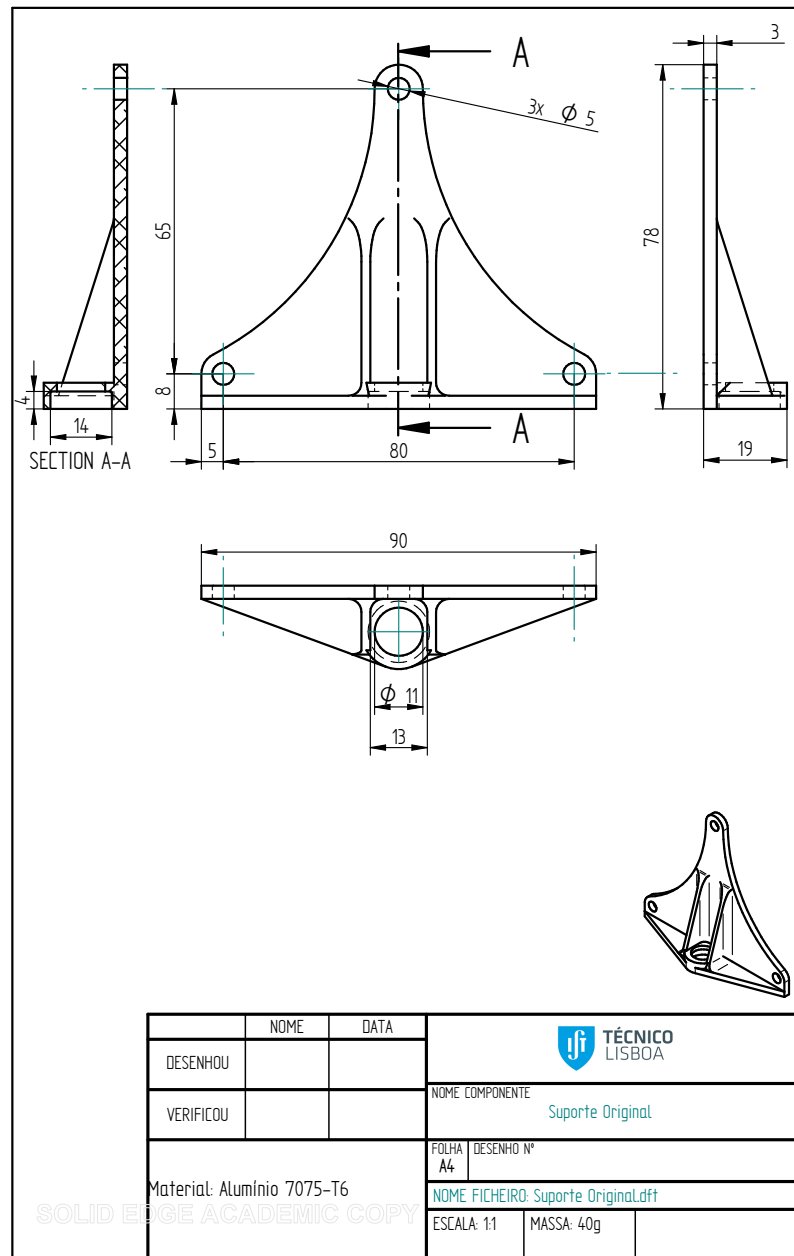
- [14] The making of carbon fiber. <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-carbon-fiber>, . (Consultado em Junho de 2019).
- [15] Carbon fiber - mechanical properties. http://www.torayca.com/en/lineup/product/pro_001_01.html, . (Consultado em Junho de 2019).
- [16] Carbon fiber - mechanical properties. <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Carbon-Fiber>, . (Consultado em Junho de 2019).
- [17] The making of glass fiber. <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber>, . (Consultado em Junho de 2019).
- [18] How products are made - fiber glass. <http://www.madehow.com/Volume-2/Fiberglass.html>. (Consultado em Junho de 2019).
- [19] Glass fiber - properties. <https://www.vetrotextextiles.com/technologies/fiberglass-manufacturing/fiberglass-properties>. (Consultado em Junho de 2019).
- [20] S. T P, S. Satheeshkumar, and N. J. Glass fiber-reinforced polymer composites - a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33:1258–1275, 06 2014.
- [21] V. Dhand, G. Mittal, K. Y. Rhee, S.-J. Park, and D. Hui. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B Engineering*, 12 2014.
- [22] A. R. Bunsell. *Handbook of properties of textile and technical fibres*. Woodhead Publishing, 2018.
- [23] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, and A. Valenza. A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 74:74–94, 2015.
- [24] K. Singha. A short review on basalt fiber. *International Journal of Textile Science*, 1(4):19–28, 2012.
- [25] The basalt fiber history. <http://www.basaltft.com/hist.htm>, . (Consultado em Julho de 2019).
- [26] V. Lopresto, C. Leone, and I. De Iorio. Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Composites Part B: Engineering*, 42(4):717–723, 2011.
- [27] Application of basalt fiber - automotive. <https://basfiber.com/application/automotive>, . (Consultado em Julho de 2019).
- [28] Application of basalt fiber - construction. <https://basfiber.com/application/construction>, . (Consultado em Julho de 2019).
- [29] Composite manufacturing processes. <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/>, . (Consultado em Julho de 2019).
- [30] Composite manufacturing processes. <https://netcomposites.com/guide/manufacturing/>, . (Consultado em Julho de 2019).

- [31] T. Scalici, G. Pitarresi, D. Badagliacco, V. Fiore, and A. Valenza. Mechanical properties of basalt fiber reinforced composites manufactured with different vacuum assisted impregnation techniques. *Composites Part B: Engineering*, 104:35–43, 2016.
- [32] J. Gebhardt and J. Fleischer. Experimental investigation and performance enhancement of inserts in composite parts. *Procedia CIRP*, 23:7–12, 2014.
- [33] S. Akbarpour and S. Hallström. Reinforcement around holes in composite materials by use of patched metal inserts. *Composite Structures*, 225:111084, 2019.
- [34] S. R. Schmid, B. J. Hamrock, and B. O. Jacobson. *Fundamentals of machine elements: SI version*. CRC Press, 2014.
- [35] Fornecedor alumínio. <http://www.kms.com.pt/index.html>.
- [36] Guia siemens nx 12. https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help/#uid:index. (Consultado em Agosto de 2019).
- [37] ASTM D 3039 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards, 2014. (Consultado em Junho de 2019).
- [38] ASTM D 3518 - Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of +/- 45° Laminate, American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards, 2001. (Consultado em Junho de 2019).

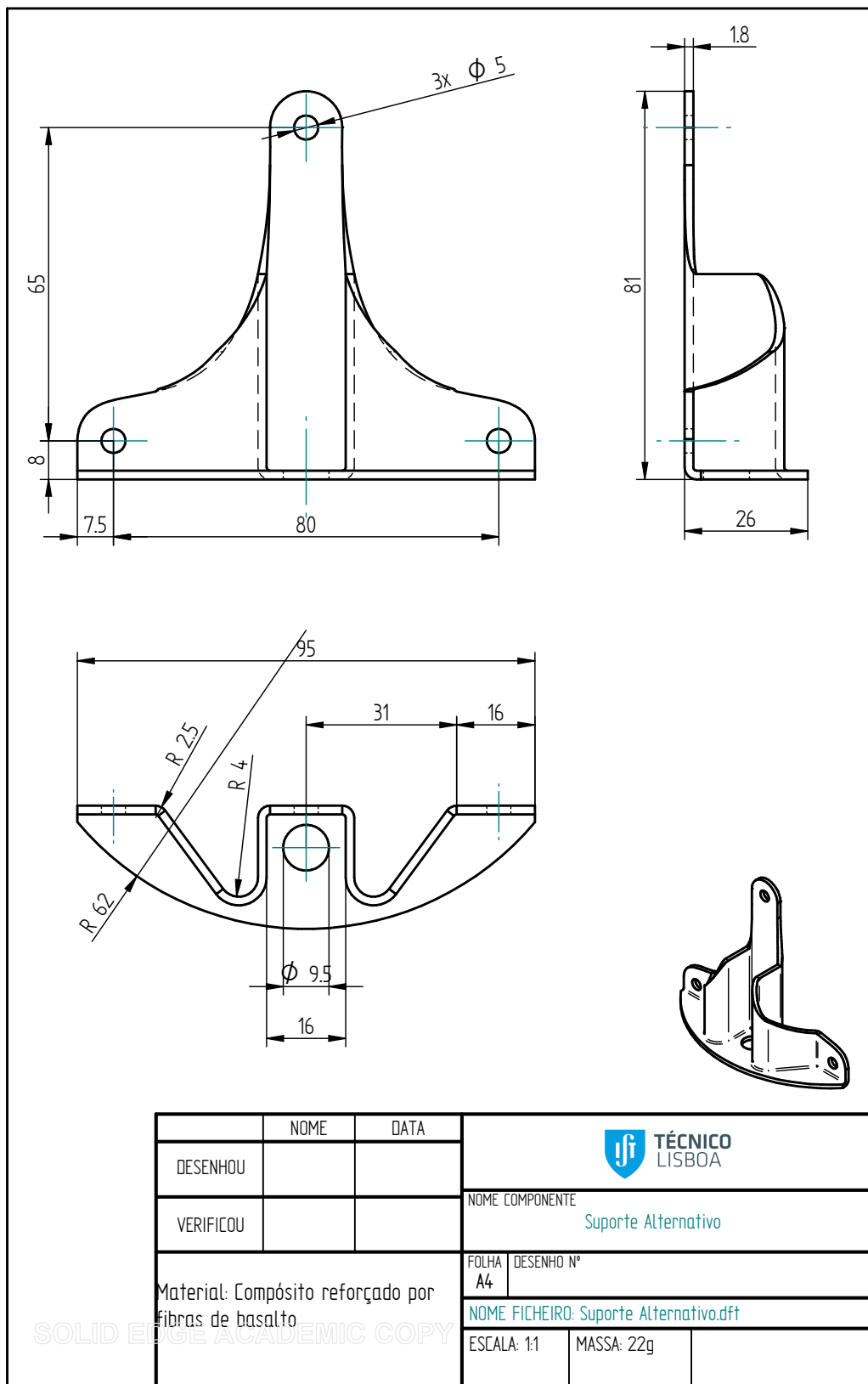
Anexo A

Desenhos Técnicos

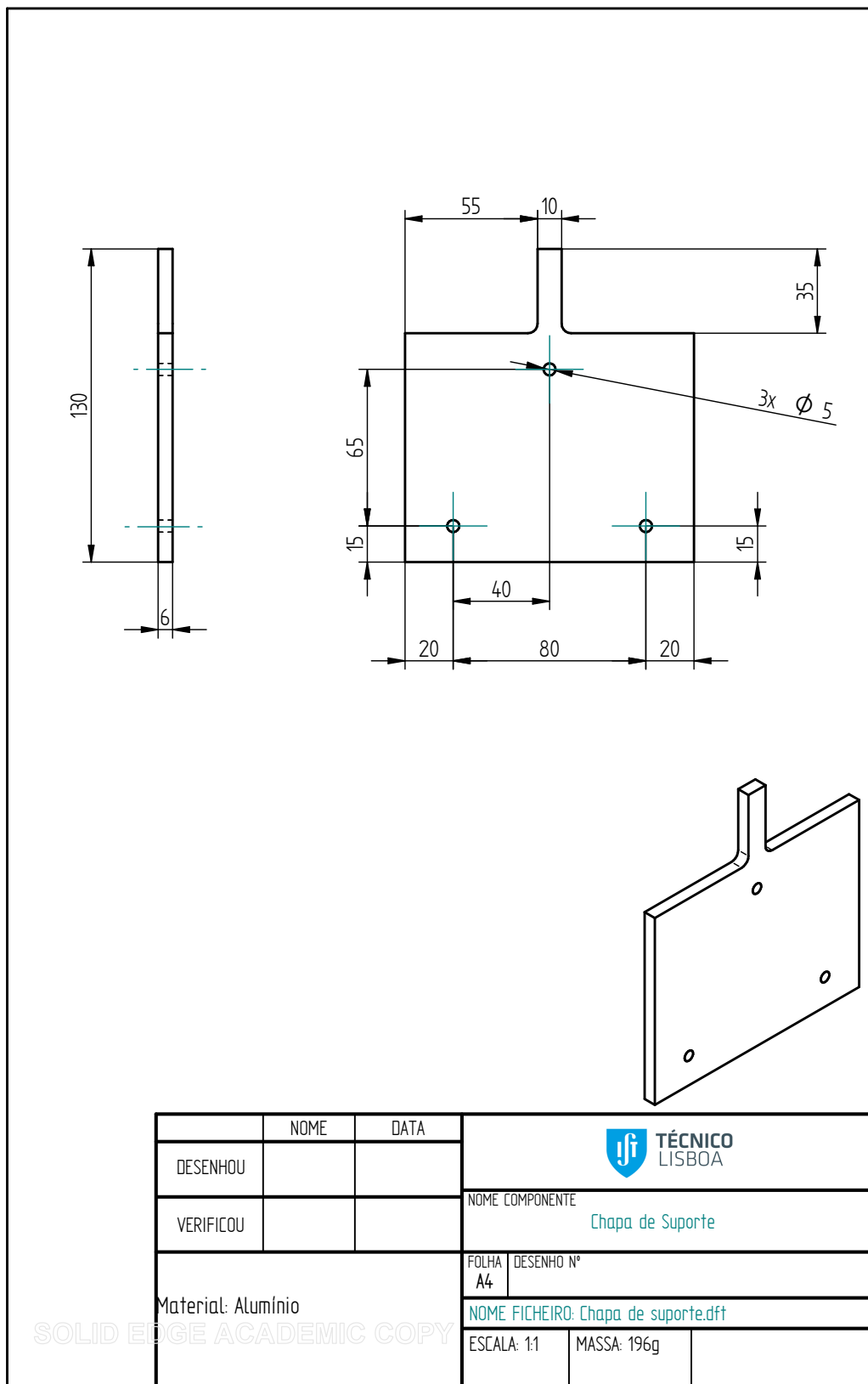
A.1 Suporte Original



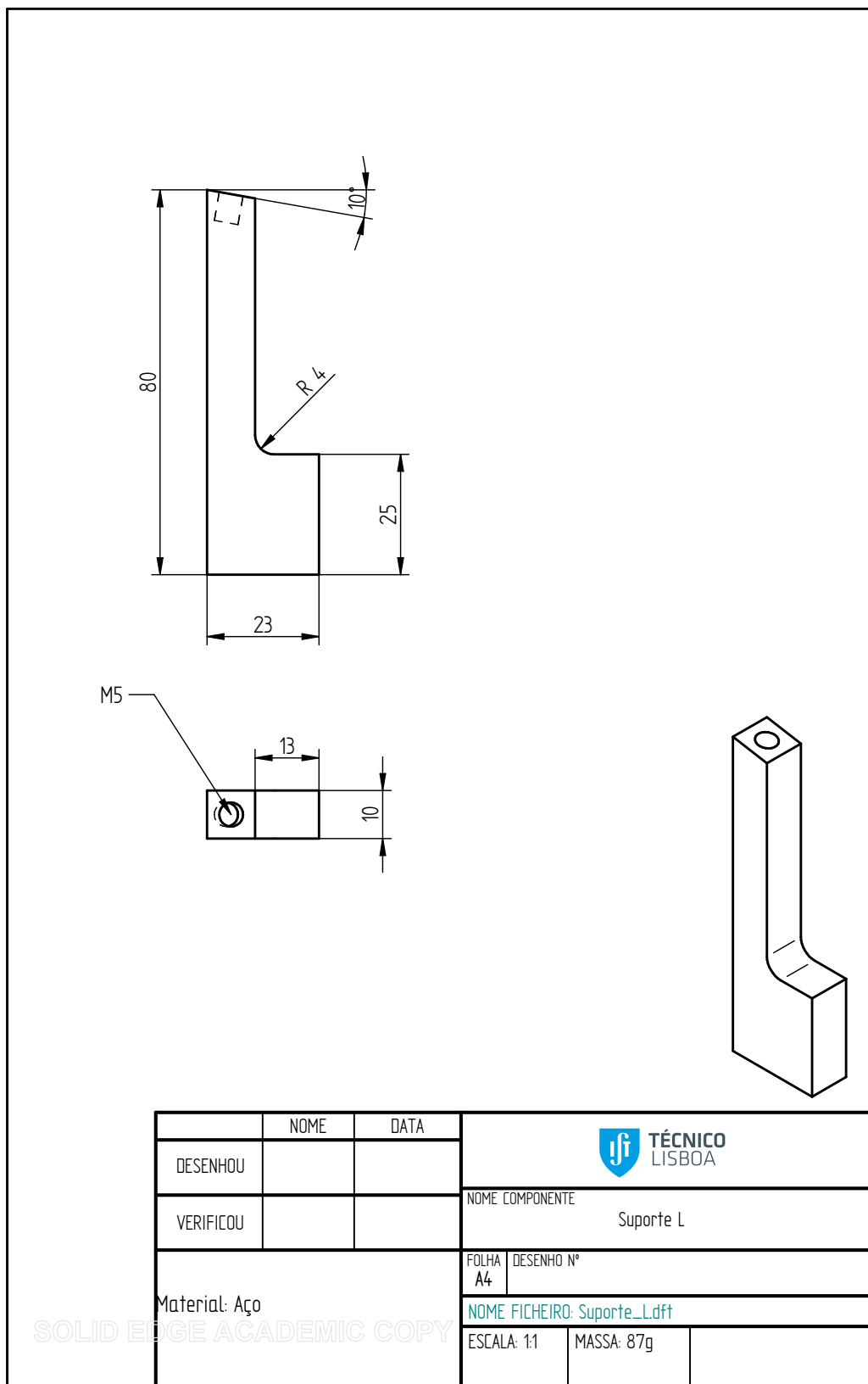
A.2 Suporte Alternativo



A.3 Setup experimental - Chapa de suporte



A.4 Setup experimental - Suporte_L



Anexo B

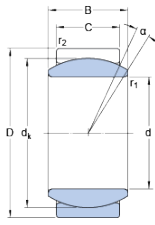
Fichas Técnicas

B.1 Rótula radial GE 5 E

GE 5 E

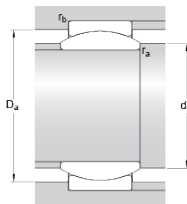
Lubrificante	Relubrificação regular – graxa
Modelo de aplicação	Aço/aço
Solução de vedação	-

Dimensões



d	5	mm
D	14	mm
B	6	mm
C	4	mm
α	13	°
d_k	10	mm
r_1	min. 0.3	mm
r_2	min. 0.3	mm

Dimensões do encosto



d_a	min. 6.6	mm
d_a	max. 8	mm
D_a	min. 9.5	mm
D_a	max. 12.6	mm
r_a	max. 0.3	mm
r_b	max. 0.3	mm

Dados de cálculo

Classificação de carga dinâmica básica	C	3.4	kN
Classificação de carga estática básica	C_0	17	kN
Fator de carga dinâmica específica	K	100	N/mm ²
Fator de carga estática específica	K_0	500	N/mm ²
Constante do material	K_M	330	

Massa

Massa da rótula	0.004		kg
-----------------	-------	--	----

B.2 Fibra de Basalto



ISO 9001

A Division of FIOCART nv

Technical Data Sheet

Fabric Type BAS 220.1270.P

Woven fabric for composite applications, is entirely made of 100% BCF (basalt continuous filament) direct (unassembled) roving.

The first code 220 is the surface density in g/m²

The second code 1270 is the width of the fabric in mm.

The third code indicates the weave.

Property	Standard/Method	Unit	Value	Tolerance
Base material				
Density of unsized filament matl		kg/dm ³	2.67	+ 5%
Moisture content of basaltic rock		%	0.1	+ 0.05
Melting point		°C	1350	+ 100
Fabric				
Specific surface weight	ISO 3374:2000	g/m ²	220	
Weave type			Plain	
Yarn density/type:				
- warp		ends/cm	7.2	
- weft		ends/cm	7.2	
- linear density				
Width	ISO 5025:1997	mm	1270	-0/+20
Thickness	ISO 4603:1993	mm	0.13	
Sizing type			Silane	
Breaking load:	ISO 4606:1995 – Type II			
- warp		N/25mm	>1800	
- weft		N/25mm	>1800	
Continuous temperature range		°C	-250°C – 550°C 1200°C fire barrier	
Moisture content (fabric)	ISO 3344:1997	%	<0.3	
LOI, also sizing content	ISO 1887:1995*	%	0.4 – 0.6	
Combustibility	NF P92-503:1995	M0	Pass	
UV stability	ISO 105-B02		6	
Colour fastness	ISO 1005-BX12		6	

* after drying according ISO 3344:1997

Packaging

Fabric length is approximately 100 lm per roll. Other length on request. Roll tube has internal diameter of 55 mm. Identification label. Standard packing.

Product Stability:

BASALTEX™ Products have not been designed for full external exposure conditions and cannot be guaranteed for use in such situations. However, these BASALTEX™ products have considerable tolerance to damp conditions and occasional water immersion. After drying out, the product will give the same level of performance as the original sample.

Stability over time:

Said products not being subjected to excessive heat, wear and abrasion, all evidence obtained to date indicates that their performance should not significantly change over a significant period of time. It is the responsibility of the developer of the end-product, finished device or system to test its performance in the end-application.

B.3 Resina Epoxy



SR 1500 Epoxy laminating system

Description

This modified epoxy resin has been formulated to be cristalization free and low toxicity.

The formulation bases of SR 1500 are bisphenol A and F

This epoxy system has very good wet-out, degazing properties and an excellent adhesion to all type of reinforcements (glass, aramid, carbon, polyester...)

Adjustable working time depending on the choice of the hardener

Respecting the ratio resin / hardener, the hardeners are mixable by weight, to achieve the most adapted reactivity for the application.

Glass transition : 75 - 81°C

The parts can be in service after 7 to 14 days @ 23°C for the hardeners **SD 2507**, **SD 2505** and **SD 2503**.

Post-cure @ a minimum of 40°C for a Tg above 55°C.

Developped for : ship building, aeronautic, automotive prototypes, tool making.

Other applications : putty for coating with microspheres, syntactic core material, casting volume depending on the hardeners.(see technical data sheet of **SD 4871** or **SD 597.20**)

Epoxy resin SR 1500

Aspect / color		Light yellow liquid
Viscosity (mPa.s)	@ 20 °C	2 100
	@ 25 °C	1 180
Density (g/cm ³)	@ 20 °C	1.13
Storage		Cristalization free

Hardeners SD 250x or SD 6131

Hardeners		SD 2507	SD 2505	SD 2503	SD 6131
Type of reactivity		"fast"	"standard"	"slow"	"very slow"
Aspect / color		Yellow liquid	Yellow liquid	Yellow liquid	Red liquid
Viscosity (m.Pas)	@ 20°C	1 800	280	180	80
	@ 25°C	1 400	210	125	55
Viscosity of the mix (mPa.s)	@ 20°C	1 700	800	700	650
	@ 25°C	1 160	550	510	470
Density (g/cm ³)	@ 20°C	1.09	1.00	1.00	0.98
Mixing ratio by weight		100 g / 33 g	100 g / 33 g	100 g / 33 g	100 g / 31 g
Mixing ratio by volume		100 ml / 35 ml	100 ml / 37 ml	100 ml / 37 ml	100 ml / 36 ml

B.4 Cera desmoldante

PRODUCT INFORMATION



Product Description

Honey Wax® is a unique, high gloss paste wax for use by composite fabricators as a mold release agent. It is compounded with the purest grade carnauba wax, plus special binders and spreading agents.

Honey Wax® reduces man hours due to its exceptional ease of application and buffing. It is an excellent mold release agent providing reproducibility, glossiness, and a non-staining, hard releasing film which are important to the fabricator. It is easier to apply and remove than other processed waxes and the residual film is resistant to abrasion. **Honey Wax**® creates a durable wax surface that remains intact for multiple pulls.

Uses

For New Or Reconditioned Tooling Surfaces.

Direction for Use

Recommended Procedure

1. The mold surface should be thoroughly cleaned of all contaminants such as oils, grease, wax, dirt, or previous release agents by hand buffing with **BuffAway™ 2000** polish followed by **KantStik® Mold Cleaner**. The cleaned surface should be completely dry. Then apply 2 coats of **KantStik® Sealer 1.0** to seal surface porosity.
2. Apply a thin, even film of **Honey Wax**® using circular motions and making sure there is complete uniform coverage. Use the applicator sponge or a clean, dry rag.
3. The coating should be left to haze completely. This process should take approximately 1-10 minutes depending upon ambient temperatures and humidity.
4. Buff the surface to a luster using a fresh, clean absorbent cloth or microfiber towel as soon as the wax film is totally dry.

5. Wait approximately 10 to 15 minutes before applying another coat of **Honey Wax**®. Five to seven applications initially will effectively fill the pores and coat the mold surface (The number of coats depends upon the porosity of the mold). Once a part is pulled, apply two more coats of **Honey Wax**®.
6. For the third part, a single application will suffice. From this point on, multiple pulls can be achieved.
7. If a new mold is being put into service and molding is done with a polyester resin, it is recommended that PVA be used over the 5-7 coats of **Honey Wax**® for the first 2 molding cycles. This is not necessary if the mold is seasoned and being reconditioned.

Storage and Handling

This product contains flammable solvents. Reseal the lid after each use. Store in a cool, dry place. Use in a well-ventilated area. Consult SDS prior to use. Shelf life is 36 months from date of manufacture.

Packaging

Honey Wax® is available in:

- 14-ounce can, 12 cans per case Part # P52314REAXX2

Technical Assistance

Call: 800-227-5538 or 1 (717) 786-7355
Email: TimeSaver@StonerSolutions.com
Visit: StonerSolutions.com

NO RISK GUARANTEE. Stoner Molding guarantees 100% satisfaction or your money back. If you're ever dissatisfied with any Stoner Molding product, simply return the unused portion for a full refund.



Stoner Molding Solutions
You Mold It. We Release It.

B.5 DP 490

3M Scotch-Weld™ EPX™ Adhesive DP490

Product Data Sheet

Updated : March 1996
Supersedes : November 1993

Product Description

DP490 is a black, thixotropic, gap filling two component epoxy adhesive with particularly good application characteristics.

It is designed for use where toughness and high strength are required and shows special benefits in the construction of composite assemblies.

The product has excellent heat and environmental resistance.

Physical Properties

Not for specification purposes

	BASE	ACCELERATOR
Specific Gravity	1.00	1.00
Consistency	Non-sag paste	Non-sag paste
Mix Ratio By Weight By Volume	100 100	50 50
Colour	Black	Off-White
Work Life	1.5 hours minimum at 23°C	
Time to Handling Strength	4 to 6 hours at 23°C	
Time to Full Strength	7 days (test to full performance at one week)	
Shelf Life	15 months from date of despatch by 3M when stored in the original carton at 21°C (70°F) & 50 % Relative Humidity	

Performance Characteristics

Not for specification purposes

Performance Characteristics of the Cured Adhesive.

Two cure cycles were evaluated as follows:

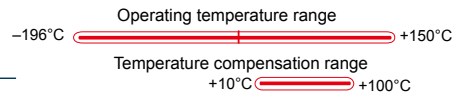
Cure Cycle 1	7 days at 23°C
Cure Cycle 2	24 hours at 23°C, 1 hour at 80°C

B.6 Extensómetros de contacto

Developing Strain Gauges and Instruments

FOIL STRAIN GAUGES

series **F**



Suffix code for temperature compensation materials
 -11: Mild steel ■ -17: Stainless steel ■ -23: Aluminium ■
 For ordering, the above suffix code should be added to the basic gauge type.

Applicable adhesives

CN	-196 ~ +120°C
P-2	-30 ~ +150°C
EB-2	-60 ~ +150°C

GENERAL USE

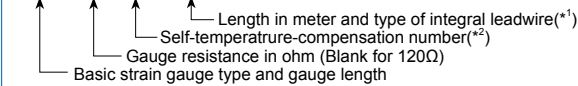
Gauge pattern	Basic type	Gauge size		Backing		Resistance Ω
		L	W	L	W	

These gauges employ Cu-Ni alloy foils for the grid and special plastics for the backing. The plastics backing exhibits excellent electrical insulation performance, and is color-coded to identify the objective material for self-temperature-compensation. Various types of strain gauges such as "for residual stress measurement" are available in addition to general use gauges.



Example of type number designation

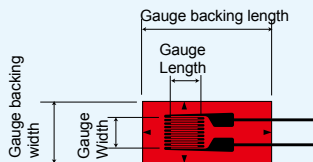
FLA-5 -350 -11 -3LJB/-3LJBT (2-wire/3-wire)



*1: Not mentioned for gauges without leadwire
 *2: The following numbers are available for F series gauges
 -11: Mild steel (11ppm/°C)
 -17: Stainless steel, Copper alloy (17ppm/°C)
 -23: Aluminium (23ppm/°C)

Single element : FLG/FLA/FLK

Each package contains 10 gauges.



	FLG-02	0.2	1.4	3.5	2.5	120
	FLG-1	1	1.1	6.5	2.5	120
	FLA-03	0.3	1.4	3	2	120
	FLA-05	0.5	1.2	5	2.2	120
	FLA-1	1	1.3	5	2.5	120
	FLA-2	2	1.5	6.5	3	120
	FLA-3	3	1.7	8.8	3.5	120
	FLA-3-60	3	1.2	8	3	60
	FLA-5	5	1.5	10	3	120
	FLA-6	6	2.2	12.5	4.3	120
	FLA-10	10	2.5	16.7	5	120
	FLA-30	30	2	36.1	5.1	120
	FLK-1	1	0.7	4.5	1.4	120
	FLK-2	2	0.9	5.5	1.5	120
	FLK-6	6	10	11.2	2.2	120
	FLK-10	10	1.6	16.2	3.8	120
	FLA-1-350	1	1.6	4.5	3	350
	FLA-2-350	2	1.9	6.1	3.5	350
	FLA-3-350	3	1.6	7.2	3	350
	FLA-5-350	5	1.8	9.4	3.8	350
	FLA-6-1000	6	4.6	13.5	7	1000

B.7 Cianoacrilato

SODAL



Ficha Técnica

84A Cyanofix

Revisão: 29-08-2018

Página 1 De 1

Especificações

Base	Ciano-acrilato
Consistência	Fluído
Sistema de cura	Cura química
Resistência à temperatura**	-40°C a +120°C
Tempo de abertura	4 sec.
Temperatura de aplicação	15 °C → 25 °C
Tempo de secagem (23°C e 50% H.R.)	1 min.

* Estes valores podem variar em função de fatores ambientais, tais como temperatura, humidade e tipo de substratos. ** A informação refere-se ao produto totalmente curado.

Descrição do produto

84A Cyanofix é uma cola super-rápida, isenta de solventes.

Propriedades

- Elevada força adesiva
- Cura rápida

Aplicações

- Adequada para a colagem rápida de, p.ex., plásticos, metal, madeira, porcelana, cortiça, pele, cerâmica, cartão, papel e borracha.

Embalagem

Cor: transparente
Embalagem: tubo de 3 g, frasco de 20 g

Prazo de validade

Para o tubo de 3 g, pelo menos, 24 meses e para o frasco de 20 g, 12 meses na embalagem fechada, com uma temperatura tão baixa quanto possível (preferivelmente no frigorífico).

Substratos

Substratos: diversas superfícies perfeitamente ajustáveis
Natureza: rígida, limpo, seco, sem pó, nem gordura.
Preparação da superfície: Não necessita pré-tratamento
Recomendamos um teste de compatibilidade preliminar.

Método de aplicação

Método de aplicação: Aplique o adesivo, gota a gota, num dos materiais a colar. Una os materiais diretamente e pressione durante pelo menos 1 min.

Limpeza: Antes da cura, 84A Cyanofix pode ser removido das ferramentas e dos substratos com Removedor de Adesivo 90A. Uma vez curado, 84A Cyanofix apenas pode ser removido mecanicamente.

Reparação: Com o mesmo material

Recomendações de Saúde e de Segurança

Respeite as normas habituais de higiene no trabalho. Tenha o cuidado de não ter cola entre os dedos ou pálpebras. 84A Cyanofix pode causar lesões oculares graves. Manter fora do alcance das crianças. Consulte a etiqueta e a ficha de dados de segurança para mais informação.

Observações

- Após utilização, limpe o injetor com uma agulha e feche a tampa.

Observação: Esta ficha de dados técnicos substitui as versões anteriores. As diretivas presentes nesta documentação são o resultado dos nossos ensaios e da nossa experiência, e são submetidas de boa-fé. Dada a diversidade de materiais e substratos existentes, e ao grande número de possíveis aplicações, que estão fora do nosso controle, não podemos aceitar qualquer responsabilidade pelos resultados obtidos. Uma vez que o projeto, a qualidade do substrato e as condições de aplicação estão fora do nosso controle, não são aceites quaisquer obrigações sob esta publicação. Em qualquer situação, recomendamos a realização de experiências preliminares. Soudal reserva-se o direito de modificar produtos sem aviso prévio.

Soudal Produtos Químicos, Lda
Tel: +351-219.244.803

Estrada Terras da Lagoa
Fax: +351-219.244.805

PT- 2635-060 Rio de Mouro
www.soudal.com

B.8 Sikablock M700

Product Data Sheet
Version 02 / 2016

SikaBlock® M700

Model board

Areas of Application

- Manufacture of data control models and cubings
- Manufacture of master models
- Manufacture of moulds for low pressure reaction injection moulding
- Vacuum forming moulds for lower number of pieces

Product Benefits

- Very high dimensional stability
- High compressive strength and edge stability
- Good solvent resistance
- High heat distortion temperature
- Easy machinability
- Low dust formation when milled
- Very dense, fine surface
- Easy to seal and good to varnish

Description

- Basis Polyurethane, light brown
- Adhesive **Biresin® Kleber braun Neu**, two component PUR system, brown
- Filler **Biresin® Spachtel braun Neu**, two component polyester system, brown

Physical Data (approx.-values)

SikaBlock® M700			
Density	ISO 845	g/cm ³	0.7
Shore hardness	ISO 868	-	D 66
Flexural strength	ISO 178	MPa	26
E-Modulus	ISO 178	MPa	1,000
Compressive strength	ISO 604	MPa	25*
Impact resistance	ISO 179 Ue	kJ/m ²	7
Heat distortion temperature	ISO 75 B	°C	90
Linear thermal expansion coefficient α_p	DIN 53 752	K ⁻¹	55×10^{-6}

* at 10% compressive strain

Processing Data

Adhesive / Filler		Biresin® Kleber braun Neu	Biresin® Spachtel braun Neu
Mixing ratio A : B	in parts by weight	100 : 65	100 : 2
Potlife	min	20	5
Setting time	h	8 - 10	> 20 min

Packaging

Board materials	SikaBlock® M700	1500 mm x 500 mm x 30 mm, 30 pieces / pallet 1500 mm x 500 mm x 50 mm, 36 pieces / pallet 1500 mm x 500 mm x 75 mm, 24 pieces / pallet 1500 mm x 500 mm x 100 mm, 18 pieces / pallet 1500 mm x 500 mm x 150 mm, 12 pieces / pallet
Adhesive	Biresin® Kleber braun Neu , resin (A) Biresin® G53 , hardener (B)	1.5 kg net 4 kg; 0.975 kg net
Filler	Biresin® Spachtel braun Neu , resin (A) BPO-Paste , hardener (B)	2 x 8.34 kg net cartridges (A) 6 x 1.76 kg net tins (A) in a box 2 x 0.16 kg net sticks (B) (for cartridges - A) 6 x 0.04 kg net tubes (B) in a box (for tins - A)

SikaBlock® M700 1 / 2



BUILDING TRUST



B.9 Selante HP2002



TECHNICAL DATA SHEET

MARBOCOTE HP2002 Tool Sealer

Product Description:

Marbocote® HP2002 Tool Sealer is designed to seal all types of highly porous substrates including epoxy and polyurethane tooling board, MDF, gelcoated and non-gelcoated polyester and epoxy composite moulds. Marbocote HP2002 Tool Sealer is a high solids moisture cure system in a hydrocarbon/alcohol solvent blend that gives a high gloss finish to the surface. Marbocote HP2002 Tool Sealer is applied by a simple wipe-on or spray-on technique; there is no need for rubbing or polishing. The fast-dry formulation also acts as a mould primer for semi-permanent mould release agents (such as Marbocote HP7) and can be used to re-condition/enhance the gloss of old moulds.

Product Benefits:

- High Sealing Capability
- High gloss without polishing
- Easy, quick application
- Fast cure
- Non-contaminating
- No aromatic solvents
- Low odour

Physical Properties:

Appearance	-	Clear, colourless liquid
Odour	-	Hydrocarbon/alcohol
Specific Gravity	-	0.792g/cc
Flash Point	-	<21°C
Solvents	-	Aliphatic Hydrocarbon Diisobutyl ketone, methanol,
Coverage	-	20 - 25m ² / L
Shelf life	-	6 months
Storage	-	Flammable store (see Safety Data Sheet for further details).

Caution:

The polymeric resin used in Marbocote HP2002 Tool Sealer reacts with moisture. Please ensure can is resealed immediately after use.

Do not mix with other products or solvents. Application of the HP2002 should be conducted in a dust free area with good ventilation.

Application:

Please read Safety Data Sheet before use.
Before applying the HP2002 Tool Sealer, clean the mould or tool surface with Marbocote Mould Cleaner

to remove traces of dust, dirt, oils or release agent. The mould must be clean and dry before use. Mould cleaning and sealing should be performed in a well-ventilated area.

For a superior gloss finish, wipe application is preferred. For the best finish, it is important that the coating procedure be performed in a dust free environment and using lint free cloths

Wipe Application:

1. Apply Marbocote HP2002 Tool Sealer to clean, dry cloth. The choice of cloth is important; as the HP2002 resin reacts with water, the cloth must be dry. A smooth, soft cloth with a high synthetic content, such as Kimberley-Clark® Wypall® X60, is ideal. Fold the cloth so that a smooth, flat surface is presented to the mould surface
2. Wipe wet cloth over mould surface covering an area of approximately 0.2m². Vigorous rubbing or polishing is not required. Frequently re-wet the cloth to ensure complete wet film is formed on substrate surface.
3. Repeat steps 1 and 2 on the adjacent area, frequently reapplying the product to the cloth. Take care to minimize the overlap area where previously applied product has dried but not cured sufficiently.
4. Repeat until mould is completely coated. Change the cloth if it becomes dirty.
5. When applying to relatively non-porous surfaces (such as carbon composite), allow **at least 20 minutes** at room temperature between coats. For highly porous surfaces, such as MDF and tooling board, repeat Steps 1-4 above allowing **only 2-3 minutes** between coats to allow for solvent evaporation. When the HP2002 Sealer builds-up sufficiently, the board will start to obtain a gloss finish; at this point, the 20 minutes between coats will be required to ensure a high gloss finish is maintained.
6. Reapply product until the mould is sealed (i.e. a gloss surface starts to become evident). This can vary from only 1 to 2 coats for composite moulds to 8 – 12 coats for highly porous tooling board. See *NOTE* below
7. When dry, allow final film to cure for at least 2 hours at room temperature or 10 min at 60C before applying the release agent top-coat.

Marbocote Ltd

Unit 9, Dalton Way, Middlewich
Cheshire, CW10 0HU, UK

Tel: +44 (0)1606 738737

Fax: +44 (0)1606 738846

Email: info@marbocote.co.uk

Note: The user will determine the suitability for use of this product. The recommendations / data given above are based on information we believe to be accurate. They are intended to be used only as a guide for selection for end-use evaluation and do not constitute a product specification. Marbocote cannot assume responsibility for results obtained by use of this product as we have no control over end-use applications or handling. Marbocote therefore specifically disclaims any damage or loss of any kind in relation to the use of this product.

www.marbocote.co.uk

B.10 Desmoldante HP7



TECHNICAL DATA SHEET

HP7 RELEASE SYSTEM

Product Description:

Marbocote HP7 is specifically designed to be used as a top-coat for the HP Mould and Tool Sealers and is especially suited to epoxy moulding. Marbocote® HP7 can also release all types of composite moulding resins, such as phenolic, polyester (GRP) or vinyl ester, from steel, aluminium or composite moulds. Marbocote HP7 is formulated from an advanced polymeric resin diluted in a non-chlorinated organic solvent blend. Marbocote HP7 is applied by a simple wipe-on technique; there is no need for rubbing or polishing. The Marbocote HP7 is durable and capable of giving many releases per application. It will not contaminate the released surface.

Product Benefits:

- Easy, fast application
- High gloss
- Non contaminating
- Non-chlorinated solvents
- Low odour
- Minimal mould build-up
- Versatile, can be used on all mould surfaces
- Durable; provides multiple releases per application

Physical Properties:

Appearance	-	Clear, colourless liquid
Odour	-	Hydrocarbon
Specific Gravity	-	0.724 g/cc
Flash Point	-	<21°C
Solvents	-	Aliphatic hydrocarbon
Coverage	-	20 - 25m ² / L / coat
Shelf life	-	One year
Storage	-	Flammable store (see Safety Data Sheet for further details).

Note:

The polymeric resin used in Marbocote HP7 reacts with moisture. Please ensure can is resealed after use. Marbocote HP7 is supplied ready to use, no shaking or mixing is required. Do not mix with other products or solvents.

Issue 4
04.12.14

Note: The user will determine the suitability for use of this product. The recommendations / data given above are based on information we believe to be accurate. They are intended to be used only as a guide for selection for end-use evaluation and do not constitute a product specification. Marbocote cannot assume responsibility for results obtained by use of this product as we have no control over end-use applications or handling. Marbocote therefore specifically disclaims any damage or loss of any kind in relation to the use of this product.

Application:

Please read Safety Data Sheet before use.

If a wax or silicone based release agent has been used previously, remove all traces of previous product using a solvent based cleaner such as Marbocote Cleaner.

Marbocote HP7 can only be applied to non-porous surfaces. If necessary, seal the mould or tool with HP Sealers prior to using HP7 top-coat. If desired, polish mould to desired level of gloss. Marbocote HP7 can be applied over existing semi-permanent release agents without a further cleaning step. However, the mould should be clean and dry before use. Mould cleaning and release agent application should be performed in a well ventilated area.

Choice of cloth is important; as the HP7 resin reacts with water, the cloth must be dry. A smooth, soft cloth with a high synthetic content, such as Kimberley-Clark® Wypall® X60, is ideal. Fold the cloth so that a smooth, flat surface is presented to the mould surface.

1. Apply Marbocote HP7 to a clean, dry cloth. Do not over-apply; the cloth must not be dripping.
2. Wipe wet cloth over mould surface covering an area of approximately 0.5 - 1m². Vigorous rubbing or polishing is not required. The film should stay wet for up to 20-30 seconds.
3. Repeat steps 1 and 2 until the mould is completely coated. Ensure a good overlap of the coated areas to provide complete coverage.
4. When dry, allow a further 5-10 minutes between coats for the film to partially cure.
5. Repeat Steps 1-4 above for a further 2 coats (3 in total).
6. When dry, allow final film to cure for at least 20 minutes at room temperature before moulding. Allowing a longer cure or heat curing (e.g. 5 min at 60°C) will improve film durability.

Reapplication:

When release becomes hesitant, reapply one coat of Marbocote HP7 in the same manner as described above.

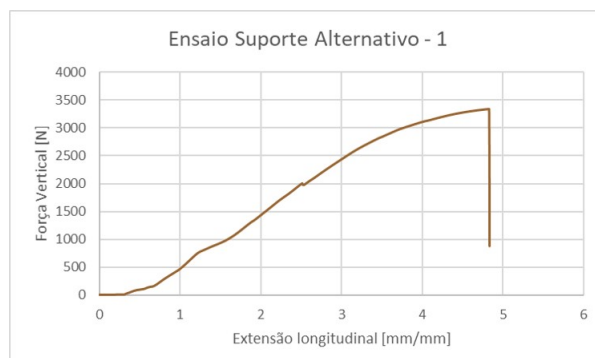
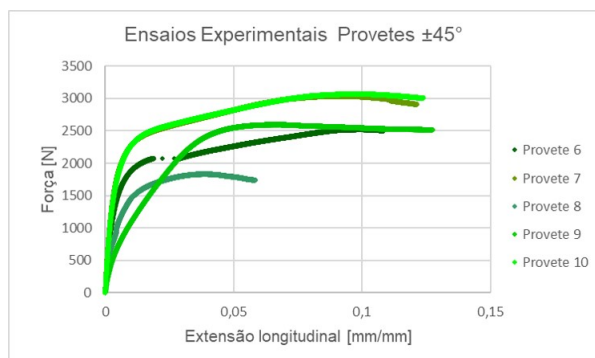
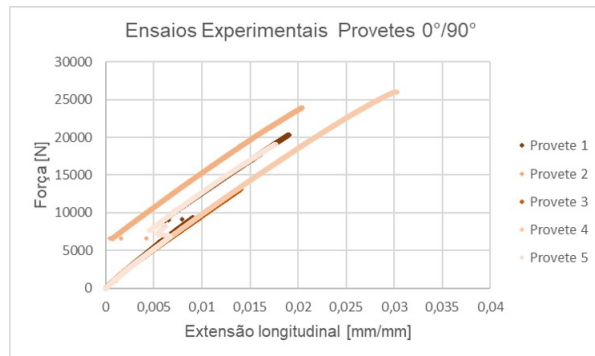
Marbocote Ltd
Unit 9, Dalton Way, Middlewich
Cheshire, CW10 0HU, UK
Tel: +44 (0)1606 738737
Fax: +44 (0)1606 738846
Email: info@marbocote.co.uk

www.marbocote.co.uk

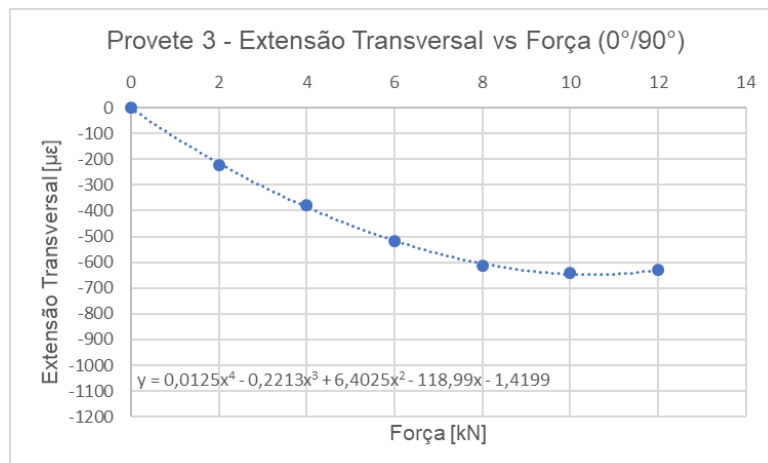
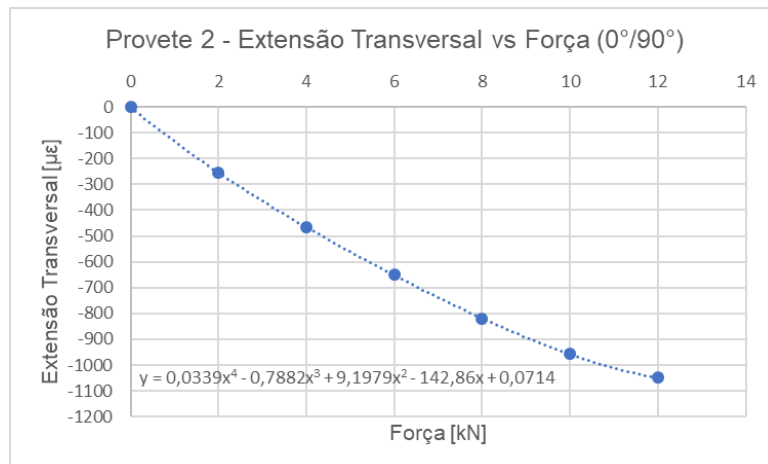
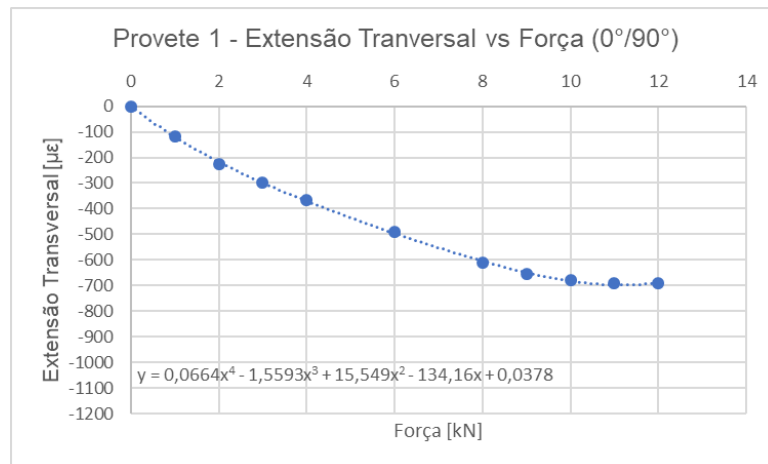
Anexo C

Registo dos Ensaio Experimentais

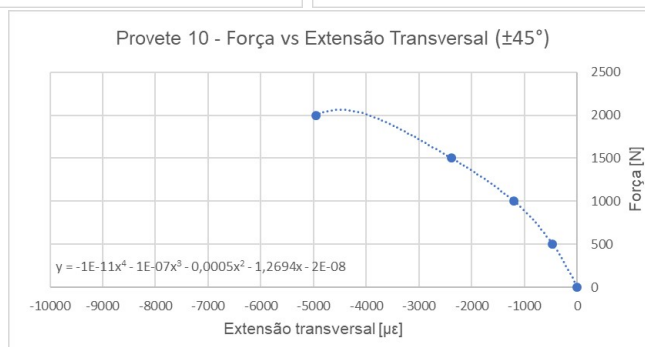
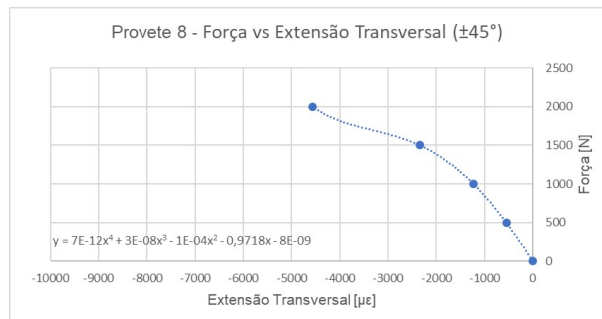
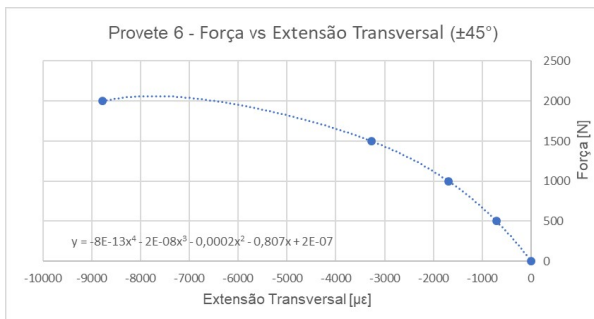
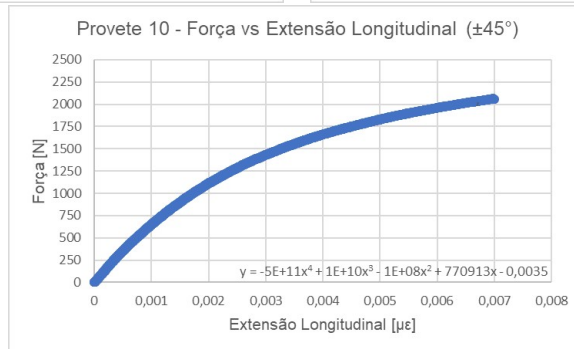
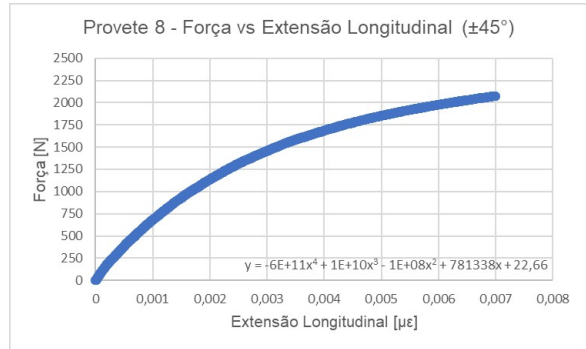
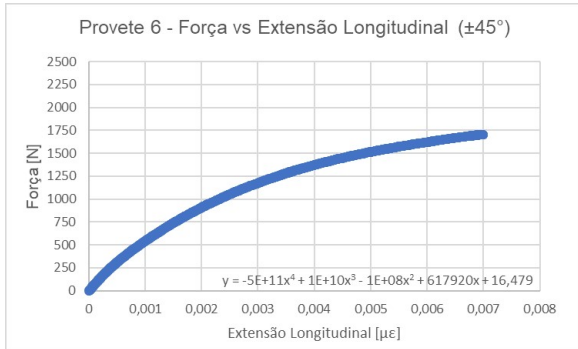
C.1 Ensaio Experimentais



C.2 Ensaios de provetes - Norma ASTM D 3039



C.3 Ensaio de provetes - Norma ASTM D 3518



Anexo D

Tabelas de Pugsley

Tabela D.1: Tabela de Pugsley com os parâmetros A,B e C para a determinação do valor de n_{sx} (Adaptado de [34])

A	C	B			
		vg	g	f	p
vg	vg	1.1	1.3	1.5	1.7
	g	1.2	1.45	1.7	1.95
	f	1.3	1.6	1.9	2.2
	p	1.4	1.75	2.1	2.45
g	vg	1.3	1.55	1.8	2.05
	g	1.45	1.75	2.05	2.35
	f	1.6	1.95	2.3	2.65
	p	1.75	2.15	2.55	2.95
f	vg	1.5	1.8	2.1	2.4
	g	1.7	2.05	2.4	2.75
	f	1.9	2.3	2.7	3.1
	p	2.1	2.55	3	3.45
p	vg	1.7	2.15	2.4	2.75
	g	1.95	2.35	2.75	3.15
	f	2.2	2.65	3.1	3.55
	p	2.45	2.95	3.45	3.95

vg - muito bom g - bom f - razoável p - pobre

A - Qualidade de materiais, manufactura, manutenção e inspecção

B - Controlo sobre os carregamentos aplicados

C - Precisão da análise de tensões, dados experimentais ou experiência com componentes semelhantes

Tabela D.2: Tabela de Pugsley com os parâmetros D e E para a determinação do valor de n_{sy} (Adaptado de [34])

E	D		
	ns	s	vs
ns	1	1.2	1.4
s	1	1.3	1.5
vs	1.2	1.4	1.6

vs - muito severo s - severo ns - não severo

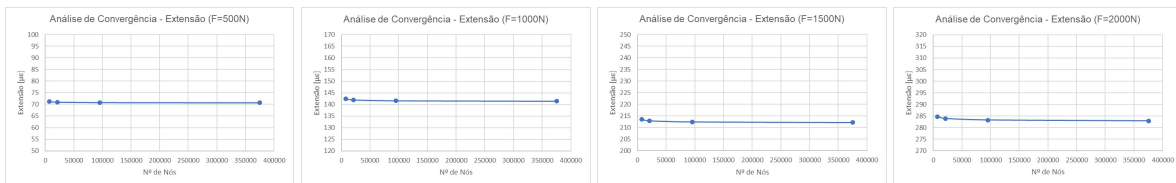
D - Perigo para pessoas

E - Impacto económico

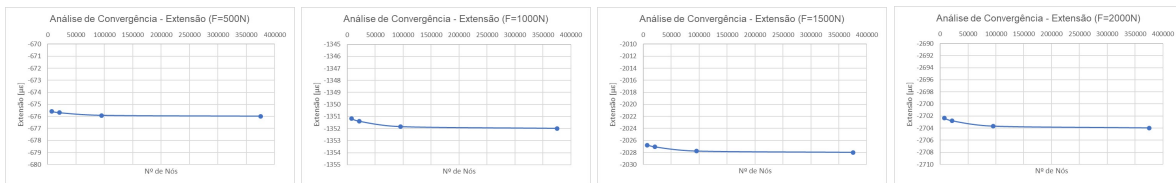
Anexo E

Análise de Convergência

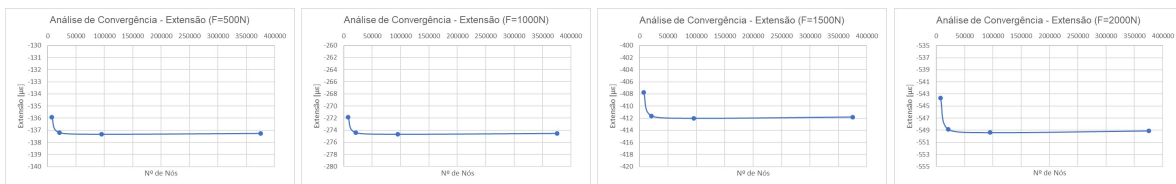
Extensômetro 1



Extensômetro 2



Extensômetro 3



Refinamento	Número de Elementos	Número de Nós
0	7297	7360
1	21160	21102
2	95097	95331
3	374959	375339