

2014

Instituto Politécnico de Coimbra

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA

# Projeto de um Dispositivo Biomecânico para Ciclismo Adaptado em Alta Competição

**MESTRADO EM EQUIPAMENTOS E SISTEMAS MECÂNICOS**

AUTOR | André Henriques Gomes

ORIENTADOR | Prof. Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro

Coimbra, dezembro 2014



# **Projeto de um Dispositivo Biomecânico para Ciclismo Adaptado em Alta Competição**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

**Autor**

**André Henriques Gomes**

**Orientador**

**Prof. Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra



*“É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer.”*

*Aristóteles*

*Aos meus Pais*

*Fernando e Helena*

*À Minha irmã*

*Ângela*



## AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado a todas as pessoas ou instituições que deram a sua contribuição para que este trabalho fosse realizado, a quem o autor gostaria de expressar o devido reconhecimento. A todos eles deixo aqui o meu mais sincero agradecimento.

- Ao Professor Doutor Luís Roseiro, orientador científico do autor, pela amizade e confiança depositada. Pelo inestimável empenho na orientação do meu trabalho e a cordialidade com que sempre me recebeu. Estou muito grato também pela liberdade de ação que me permitiu, que foi decisiva para que este trabalho contribuísse para o meu desenvolvimento pessoal;
- Ao Telmo Pinão, pela amizade, esforço e preocupação que demonstrou, pelo que se empenhou em ajudar na realização dos teste e em criar o ponto de ligação entre o autor e as entidades patrocinadoras;
- Ao Eng.º Pedro Ferreira, pela amizade e pela ajuda disponibilizada na formatação do documento, guiando-me sempre no rumo certo, sendo sempre objetivo e conciso, sem esta ajuda preciosa tudo seria mais difícil;
- Ao Eng.º Vítor Maranha, pela amizade, pela ajuda prestada na aquisição dos dados e pelo auxílio em outras questões fulcrais, foi sem dúvida uma ajuda imprescindível;
- Ao Eng.º Paulo Amaro, pela amizade e por toda a disponibilidade em arranjar alguns dos materiais e ferramentas utilizadas;
- À minha namorada Tânia Fernandes, pela amizade, compreensão e pelo apoio incansável, principalmente nos momentos mais difíceis;
- Por fim, mas não menos importante, aos meus pais, família e amigos, pelo constante apoio em todas as fases importantes da minha vida, sendo esta apenas mais uma delas.

Quanto às entidades, ficam expressos os agradecimentos:

- Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, à empresa RC Fibre Components e à empresa Prototype, assim como a todos os indivíduos pertencentes às referidas entidades, em especial ao Ricardo Carvalho da RC Fibre Components, Sra. Aldina Ribeiro da RC Fibre Components e ao Ivo Santos da Prototype pela transmissão de conhecimentos e pelo agradável acolhimento.



**PROTOTYPE™**





## RESUMO

Este projeto tem o seu enquadramento no âmbito da biomecânica desportiva, aplicada ao ciclismo adaptado. Numa linha de apoio a um ciclista amputado transtibial, atleta da Seleção Nacional de ciclismo adaptado, foi desenvolvido um dispositivo de apoio para a prática da modalidade na classe C2 da União Ciclista Internacional, que consiste em pedalar com uma só perna. O protótipo do dispositivo foi desenvolvido em material compósito, otimizado com vista à redução da sua massa, testado em ambiente laboratorial e experimentado em contexto real. A disponibilização deste dispositivo ao atleta será seguramente uma mais-valia e um passo importante com vista à sua representação de Portugal nos Jogos Para-Olímpicos de 2016.

**Palavras-chave:** Biomecânica, Ciclismo Adaptado, Materiais Compósitos Laminados



## **ABSTRACT**

This project has been provided within the sports biomechanics, applied to the adapted cycling. As a line of support for a transtibial amputee cyclist, athlete of adapted cycling Portuguese Team, a leg support system for the sport in the C2 class of the UCI - International Cycling Union, which consists of pedaling with one leg, has been developed. The device prototype was developed in laminated composite material, optimized in order to reduce its mass, tested in the laboratory and experimented in a real context. The availability of this device to the amputee athlete will surely be an asset and an important step towards its representation of Portugal in the 2016 Paralympic Games.

**Keywords:** Biomechanics, Adapted Cycling, Laminated Composite Materials



# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>XIII</b>
<b>SIMBOLOGIA</b>	<b>XV</b>
<b>ABREVIATURAS</b>	<b>XVII</b>
<b>CAPÍTULO 1 - ENQUADRAMENTO</b>	<b>1</b>
1.1 - TELMO PINÃO - CAMPEÃO NACIONAL DE CICLISMO ADAPTADO	1
1.2 - PARA-CICLISMO	6
1.2.1 - COMPETIÇÃO EM CLASSE C2	7
1.3 - DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO EXISTENTES	9
1.3.1 - DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO UTILIZADOS POR OUTROS ATLETAS	9
1.3.2 - DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO DESENVOLVIDOS PARA O TELMO PINÃO	10
1.4 - OBJETIVOS	12
<b>CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO</b>	<b>13</b>
2.1 - PONTO DE PARTIDA	13
2.2 - PROTÓTIPOS INICIAIS E IDEIAS DISCUTIDAS	14
2.2.1 - DISPOSITIVO ARTICULADO	14
2.2.2 - DISPOSITIVO DE APOIO COM AVANÇO E TUBO EM COMPÓSITO	15
2.2.3 - APOIO EM ALUMÍNIO	16
2.2.4 - APOIO DUPLO EM COMPÓSITO	17
2.3 - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO FINAL	17
2.3.1 - CONSTRUÇÃO DA MEIA-CANA	18
2.3.2 - CONSTRUÇÃO DO SUPORTE DA MEIA-CANA	20
2.3.3 - RESULTADO	21
2.4 - EVOLUÇÃO DO PROTÓTIPO	21
2.4.1 - SELEÇÃO DE MATERIAIS	22

2.4.2 - MATERIAIS COMPÓSITOS	24
2.4.3 - EVOLUÇÃO DA MEIA-CANA	28
2.4.4 - EVOLUÇÃO NO SUPORTE DA MEIA-CANA	29
2.4.5 - PONTOS DE LIGAÇÃO	30
2.5 - FABRICO DO PROTÓTIPO FINAL	30
2.5.1 - FABRICO DA MEIA-CANA	31
2.5.2 - FABRICO DO APOIO DA MEIA-CANA	31
2.5.3 - RESULTADO	32
<b>CAPÍTULO 3 - VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO</b>	<b>33</b>
3.1 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO	33
3.1.1 - EXECUÇÃO DE DUAS CÉLULAS DE CARGA	34
3.1.2 - EXTENSOMETRIA	35
3.1.3 - CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA	41
3.1.4 - AQUISIÇÃO DE DADOS NA PEDALAGEM EM ROLO	49
3.2 - MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	50
3.2.1 - COMPONENTES A ESTUDAR	50
3.2.2 - CONDIÇÕES DE CARGA	51
3.2.3 - CONDIÇÕES DE FRONTEIRA	52
3.2.4 - PRÉ CONVERGÊNCIA DE MALHA	53
3.2.5 - OTIMIZAÇÃO	53
3.2.6 - CONVERGÊNCIA DE MALHA	55
3.2.7 - RESULTADOS NUMÉRICOS NO ESTUDO FINAL	56
3.3 - RESULTADO FINAL	58
<b>CAPÍTULO 4 - OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE LIGAÇÃO AO SELIM</b>	<b>59</b>
4.1 - PONTO DE ANCORAGEM SUPERIOR	60
4.2 - PONTO DE ANCORAGEM INFERIOR	60
4.3 - MAQUINAÇÃO DAS PEÇAS	61
4.4 - RESULTADOS	61
<b>CAPÍTULO 5 - VALIDAÇÃO FINAL EM ESTRADA</b>	<b>63</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>67</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - TELMO PINÃO (FACEBOOK, 2014)	2
FIGURA 1.2 - DISPOSITIVO DE COMPENSAÇÃO PARA CICLISMO ADAPTADO	2
FIGURA 1.3 - PRIMEIRO DISPOSITIVO DE COMPENSAÇÃO DESENVOLVIDO NO DEM (P. FERREIRA, 2013), (ROSEIRO, 2013)	3
FIGURA 1.4 - TELMO PINÃO E ANDRÉ VENDA (SARAIVA, 2011)	4
FIGURA 1.5 - CAMPEONATO NACIONAL DE PISTA (AE-ISEC, 2013)	4
FIGURA 1.6 - TEMPO PINÃO (VELHO, 2013)	5
FIGURA 1.7 - TELMO PINÃO. (UVP, 2014)	5
FIGURA 1.8 - CICLISMO COM DEFICIÊNCIA VISUAL (PAROLÍMPICO, 2012)	6
FIGURA 1.9 - CLASSES E SUBCLASSES DE PARA-CICLISMO (UCI, 2014)	7
FIGURA 1.10 - TIPOS DE BICICLETAS DE PARA-CICLISMO, A) HANDBIKE (WIKIPEDIA, 2006), B) TANDEM (PAKETABIKE, 2012),	8
FIGURA 1.11 - A) JUAN MENDEZ (EUROPE, 2012) E B) FABRIZIO MACCHI (SMLOSONE, 2014)	9
FIGURA 1.12 - DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO UTILIZADOS POR OUTROS ATLETAS: A) DISPOSITIVO EM FIBRA DE CARBONO COM ANCORAGEM AO ESPIGÃO DO SELIM, B) DISPOSITIVO EM MATERIAL COMPÓSITO COM ANCORAGEM AO QUADRO DA BICICLETA, C)DISPOSITIVO EM FORMA DE COPO EM MATERIAL COMPÓSITO, D) DISPOSITIVO EM MATERIAL COMPÓSITO COM ANCORAGEM EM ALUMÍNIO, E) DISPOSITIVO COM ANCORAGEM AO ESPIGÃO DO SELIM (EUROPE, 2012) E F) DISPOSITIVO COM ANCORAGEM AO QUADRO	10
FIGURA 1.13 - PRIMEIRO DISPOSITIVO CRIADO NO DEM/ISEC. (MARANHA.V, 2012)	11
FIGURA 1.14 - PRIMEIRO DISPOSITIVO COM ANCORAGEM EM ALUMÍNIO	11
FIGURA 1.15 - DISPOSITIVO PROJETADO EM 2013 (FRANCISCO AFONSO, 2013)	11
FIGURA 2.1 - TELMO UTILIZANDO O DISPOSITIVO COM ANCORAGEM EM ALUMÍNIO (FACEBOOK, 2014)	13
FIGURA 2.2 - DISPOSITIVO ARTICULADO	15
FIGURA 2.3 - VERSÃO COM UTILIZAÇÃO DO AVANÇO	15
FIGURA 2.4 - VERSÃO DO SUPORTE EM ALUMÍNIO	16
FIGURA 2.5 - VERSÃO DO SUPORTE EM COMPÓSITO	17
FIGURA 2.6 - MEIA CANA DO DISPOSITIVO JÁ EXISTENTE	18
FIGURA 2.7 - A) MOLDE EM GESSO DA COXA DO CICLISTA E B) SCANNER 3D "PICZA"	18
FIGURA 2.8 - PRIMEIRO MODELO 3D DA MEIA CANA	19
FIGURA 2.9 - A) ABAS DE REFORÇO DA MEIA CANA E B) INCLINAÇÃO DA MEIA CANA	19
FIGURA 2.10 - SUPORTE DA MEIA CANA AJUSTÁVEL	20
FIGURA 2.11 - PRIMEIRO PROTÓTIPO	21
FIGURA 2.12 - MATERIAIS CANDIDATOS, A) ALUMÍNIO, B) FIBRA DE CARBONO, C) FIBRA DE KEVLAR, D) FIBRA DE CARBONO E KEVLAR, E) FIBRA DE VIDRO, F) AÇO AO CARBONO, G) AÇO INOX E H) LIGA DE TITÂNIO	23
FIGURA 2.13 - ESQUEMA DA CONSTITUIÇÃO DE UM COMPÓSITO	25
FIGURA 2.14 - PRINCIPAIS TIPOS DE MATRIZES DOS MATERIAIS COMPÓSITOS (C.PEREIRA, 2013)	26
FIGURA 2.15 - CLASSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS QUANTO À MORFOLOGIA DO REFORÇO (C.PEREIRA, 2013)	27
FIGURA 2.16 - SEQUÊNCIA DE EMPILHAMENTO DE 4 LÂMINAS (ROSEIRO, 2004)	28
FIGURA 2.17 - MODELO 3D DA MEIA CANA COM REFORÇO NA ZONA DE LIGAÇÃO.	29
FIGURA 2.18 - MODELO 3D DO APOIO DA MEIA CANA	30
FIGURA 2.19 - A) MODELO FÍSICO EM PROTOTIPAGEM 3D DA MEIA CANA; B) MOLDE DA MEIA CANA; C) MODELO REAL DA MEIA CANA CONSTRUÍDO EM FIBRA DE KEVLAR E CARBONO.	31
FIGURA 2.20 - SANDWICH DE FIBRA DE CARBONO E AGLOMERADO DE CORTIÇA	32
FIGURA 2.21 - MODELO REAL DO APOIO DA MEIA CANA	32
FIGURA 2.22 - MODELO REAL DO PROTÓTIPO FINAL	32

FIGURA 3.1 - ZONA DE LIGAÇÃO ENTRE A MEIA CANA E O APOIO	33
FIGURA 3.2 - MODELO 3D DA CÉLULA DE CARGA	34
FIGURA 3.3 - PEÇAS POLIDAS	34
FIGURA 3.4 - ESTRUTURA DAS CÉLULAS DE CARGA MONTADAS NO DISPOSITIVO	35
FIGURA 3.5 - EXTENSÓMETRO (PORTNOI, 2014)	35
FIGURA 3.6 - PONTE DE WHEATSTONE (SILVA, 1997)	37
FIGURA 3.7 - A) DESENGORDURAMENTO DA SUPERFÍCIE E B) ALISAMENTO DA SUPERFÍCIE	38
FIGURA 3.8 - LINHAS DE REFERÊNCIA	38
FIGURA 3.9 - A) CONDICIONAMENTO DA SUPERFÍCIE E B) NEUTRALIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE	39
FIGURA 3.10 - A) COLOCAÇÃO DE FITA ADESIVA SOBRE O EXTENSÓMETRO E B) POSICIONAMENTO DO EXTENSÓMETRO	39
FIGURA 3.11 - A) APLICAÇÃO DE COLA CIANOACRILATO E B) CARREGAMENTO PARA COLAGEM DO EXTENSÓMETRO	40
FIGURA 3.12 - SOLDADURA DOS TERMINAIS	40
FIGURA 3.13 - PROTEÇÃO DA ZONA INSTRUMENTADA	41
FIGURA 3.14 - PONTOS DE APLICAÇÃO DE CARGAS	41
FIGURA 3.15 - CÉLULA DE CARGA PREPARADA PARA CALIBRAÇÃO	43
FIGURA 3.16 - PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA NATIONAL INSTRUMENTS	43
FIGURA 3.17 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS EM PROCESSO DE CALIBRAÇÃO	43
FIGURA 3.18 - PAINEL DE INTERFACE COM O UTILIZADOR PARA CALIBRAÇÃO	44
FIGURA 3.19 - CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA	44
FIGURA 3.20 - GRÁFICO DA RETA DE CALIBRAÇÃO DA CÉLULA A	47
FIGURA 3.21 - GRÁFICO DA RETA DE CALIBRAÇÃO DA CÉLULA B	47
FIGURA 3.22 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	48
FIGURA 3.23 - PAINEL DE INTERFACE COM O UTILIZADOR PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	48
FIGURA 3.24 - A) DISPOSITIVO INSTRUMENTADO COM AS CÉLULAS DE CARGA E B) TELMO PINÃO A REALIZAR TESTES EM ROLO	49
FIGURA 3.25 - GRÁFICO RESULTANTE DA FORÇA INDUZIDA NA PEDALAGEM EM PÉ	50
FIGURA 3.26 - A) ASSEMBLY DAS PEÇAS A ESTUDAR NUMERICAMENTE E B) PINO DE LIGAÇÃO ENTRE A MEIA CANA E O APOIO	51
FIGURA 3.27 - CARGA DISTRIBUÍDA AO LONGO DA MEIA CANA	51
FIGURA 3.28 - PESO PRÓPRIO DO MODELO CONSIDERADO	52
FIGURA 3.29 - RESTRIÇÕES DO MODELO	52
FIGURA 3.30 - GRÁFICO DA PRÉ CONVERGÊNCIA DE MALHA	53
FIGURA 3.31 - SKETCH PARA A EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO	54
FIGURA 3.32 - EXEMPLOS DE CENÁRIOS ESTUDADOS AUTOMATICAMENTE PELO ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO	54
FIGURA 3.33 - MODELO VIRTUAL RESULTANTE DA OTIMIZAÇÃO	55
FIGURA 3.34 - GRÁFICO DA CONVERGÊNCIA DE MALHA	55
FIGURA 3.35 - RESULTADO DAS TENSÕES DE VON MISES NO ESTUDO FINAL	56
FIGURA 3.36 - ZONA COM TENSÃO DE VON MISES SUPERIOR A 90 MPA	57
FIGURA 3.37 - DISTRIBUIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS RESULTANTES NA MEIA CANA E NO SEU APOIO	57
FIGURA 3.38 - A) PESAGEM DO APOIO ANTES DA OTIMIZAÇÃO E B) PESAGEM DO APOIO APÓS OTIMIZAÇÃO	58
FIGURA 4.1 - PONTOS DE ANCORAGEM	59
FIGURA 4.2 - MODELO 3D DA ABRAÇADEIRA DE DUPLO PARAFUSO	60
FIGURA 4.3 - MODELO 3D DO INTERFACE ENTRE ABRAÇADEIRA E O APOIO.	61
FIGURA 4.4 - RESULTADO DAS PEÇAS MAQUINADA PELA EMPRESA PROTOTYPE	61
FIGURA 5.1 - DISPOSITIVO TOTALMENTE TERMINADO	63
FIGURA 5.2 - PRIMEIRO TESTE EM ESTRADA	64

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 - QUADRO DE APOIO À DECISÃO.....	24
TABELA 3.1 - VALORES RESULTANTES DA CÉLULA A .....	45
TABELA 3.2 - VALORES RESULTANTES DA CÉLULA B .....	45
TABELA 3.3 - VALOR MÉDIO DE DEFORMAÇÃO NA CÉLULA A .....	46
TABELA 3.4 - VALOR MÉDIO DE DEFORMAÇÃO NA CÉLULA B .....	46



## SIMBOLOGIA

E - Módulo de elasticidade longitudinal.

$\rho$  - Massa específica

$\sigma_r$  - Tensão de rotura do material

$M_f$  - Momento fletor

N - Newton

F - Força

m - Metros

mm - Milímetro

Pa - Pascal

cm - centímetro

$\varepsilon$  - Deformação

$\sigma$  - Tensão normal

$\mu\varepsilon$  - Mícro deformação

R - Resistência elétrica

L - comprimento

$\Delta L$  - variação do comprimento

$\Delta R$  - variação de resistência

$R_0$  - resistência inicial

k - fator de ganho

I - momento de inercia



## **ABREVIATURAS**

CNC - Computer Numerically Controlled

DEM - Departamento de Engenharia Mecânica

2D - Duas Dimensões

3D - Três Dimensões

ISEC - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

C2 - Classe 2

a.C. - Antes de Cristo

PLA - Políácido láctico

BTT - Bicicleta de todo o terreno

CAD - Computer Aided Design

PC – Personal Computer



---

## CAPÍTULO

# 1

---

### ENQUADRAMENTO

Este capítulo pretende expor o enquadramento do presente trabalho, situando a sua origem e dando a conhecer o atleta adaptado que motiva a sua realização, assim como o seu percurso ao nível do ciclismo adaptado. Também se apresenta a origem do ciclismo adaptado, as suas principais características, e de modo mais detalhado o enquadramento da classe de competição C2 onde o atleta se posiciona e compete atualmente.

#### 1.1 - TELMO PINÃO - CAMPEÃO NACIONAL DE CICLISMO ADAPTADO

O atleta Telmo Pinão (vd., Figura 1.1) é natural de Casais Velhos, Freguesia de Pereira, Concelho de Montemor-o-Velho. Licenciado em Marketing pela Universidade de Aveiro, cedo despertou para os desportos motorizados, tendo sido atleta federado em moto 4. Foi precisamente numa das provas, em 2002, que Telmo sofreu um acidente que o obrigou a amputar parte da perna esquerda, tendo-lhe sido efetuada uma amputação transtibial.

*“Estava a fazer um passeio e ao sair de um trilho, fui projetado para outro carro que ia a passar. Depois de várias intervenções ao pé esquerdo, percebeu-se que era necessária uma prótese, 15 cm abaixo do joelho”*, conta Telmo Pinão.

Da moto 4, o Montemorense passou para o karaté. *“Ninguém com amputação praticava artes marciais”*, conta, no entanto, foi só na bicicleta que a sua vida desportiva mudou. *“Comprei uma bicicleta de montanha há dois anos, quando nunca pensei poder voltar a andar de bicicleta, só para ir ao café e voltar, mas ao nível da BTT comecei a levar a coisa mais a sério”*. O gosto antigo por esta modalidade levou-o a efetuar uma prótese artesanal com uma *“ligação direta ao pedal”* para o poder praticar. *“Comprei uma bicicleta de estrada e fui progredindo de mês para mês. Um dia, convidaram-me para uma prova em Águeda, inserida na ANDDEMOT, mas fiquei em 2.º lugar em cima da meta, porque não sabia que se podia fazer as rotundas ‘por dentro’ e decidi respeitar o código”*, recorda. No seguimento das suas

prestações, Telmo prosseguiu o seu caminho com um estágio num centro de alto rendimento em Rio Maior. (Jorge, s.d.)



Figura 1.1 - Telmo Pinão (Facebook, 2014)

Em 2012, numa sessão de fisioterapia, realizada no Hospital dos Covões/CHUC, foi colocada a hipótese de Telmo Pinão colaborar no projeto de um grupo de alunos da Licenciatura em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC). Este interesse e parceria entre o DEM/ISEC e o CHUC conduziu ao desenvolvimento de um dispositivo de compensação integralmente pensado e construído para o Telmo, com a utilização de materiais mais leves e garantindo uma pedalada estável e em segurança. Este dispositivo, que se apresenta na Figura 1.2 recebeu uma menção honrosa no Concurso Nacional de Inovação Tecnológica Engenheiro Jaime Filipe, em 2012.



Figura 1.2 - Dispositivo de Compensação para Ciclismo Adaptado

Em Março de 2012, Telmo Pinão esteve na palestra do XV Encontro Nacional de Estudantes de Terapia Ocupacional, tendo em vista a apresentação do Projeto “Prótese para Ciclismo Adaptado”, acima mencionado.

Posteriormente, devido ao facto de ter praticado durante muito tempo ciclismo com a prótese inicial, a articulação do joelho da perna amputada começou a evidenciar lesões que comprometeram a integridade estrutural. Deste modo, o Telmo foi forçado a abandonar a competição com as duas pernas, tendo transitado para a Classe C2 - pedalada com uma única perna, que se descreve com pormenor em baixo. O dispositivo de compensação que permitiu ao Telmo iniciar a competição nesta Classe foi também desenvolvido por um grupo de alunos no DEM e apresenta-se na Figura 1.3.



Figura 1.3 - Primeiro dispositivo de compensação desenvolvido no DEM (P. Ferreira, 2013), (Roseiro, 2013)

Os dois dispositivos desenvolvidos e atrás descritos estão documentados em (Roseiro, 2013) e (P. Ferreira, 2013), e foram apresentados no V Congresso Nacional de Biomecânica em 2013.

Nos dias de hoje Telmo é uma referência Nacional no ciclismo adaptado e que tem contado com o contributo do departamento de Engenharia Mecânica do ISEC no desenvolvimento de dispositivos mecânicos para com eles ultrapassar as suas limitações físicas no ciclismo (Alves, 2012). Telmo Pinão é o atual Presidente da APCA - Associação Portuguesa de Ciclismo Adaptado.

*"As sensações são boas, sinto-me com força, mas ainda é preciso algum treino para adaptar o corpo a estas novas posições na bicicleta. Mais uma vez, acredito que com o tempo e o treino correto, tudo é possível. E um lugar no pódio nos Jogos Paraolímpicos de 2016 é um objetivo",* referiu Telmo Pinão. (freebike, 2012)

Telmo Pinão, juntamente com André Venda, estão determinados em divulgar o ciclismo adaptado, com vista a atrair mais praticantes para esta modalidade, pois a falta de praticantes nacionais, entre outros motivos, limita a participação destes ciclistas em campeonatos internacionais. Para tal, em Novembro de 2011, realizaram uma viagem de Montemor-o-Velho

até Faro, de 475 Km em 4 dias (vd., Figura 1.4), com vista à angariação de fundos para a atividade e divulgar a modalidade do ciclismo adaptado.



Figura 1.4 - Telmo Pinão e André Venda (Saraiva, 2011)

Com alguma verba angariada para a cobertura das despesas, Telmo Pinão afirmou que “*o nosso objetivo foi concretizado, sentimos, durante a viagem e nos dias após a mesma, que a nossa mensagem chegou ao nosso público-alvo: pessoas portadoras de deficiência, os seus familiares, federações, associações, etc. E esse objetivo foi cumprido*”. (Saraiva, 2011)

Telmo participou nos Campeonatos Nacionais de Pista, no Velódromo de Sangalhos nos dias 23 e 24 de Fevereiro de 2013, alcançando o 1º lugar (vd., Figura 1.5), sagrando-se, assim, Campeão Nacional de Ciclismo Adaptado em Pista. (AE-Isec, 2013). Em 2014 renovou este título, também no Velódromo de Sangalhos.



Figura 1.5 - Campeonato Nacional de Pista (AE-Isec, 2013)

Em Agosto de 2013, na primeira edição do Campeonato Nacional de Para-ciclismo, Telmo Pinão representou a Efapel-Glassdrive, acabando por triunfar na Classe C2 (vd., Figura 1.6). A conquista deste título foi mais um degrau, que o aproxima do sonho dos Jogos Paralímpicos de 2016. (Velho, 2013)



Figura 1.6 - Tempo Pinão (Velho, 2013)

Em termos de provas internacionais, Telmo Pinão participou na Taça do Mundo de Para-ciclismo em Castiglione della Pescaia, Itália (vd., Figura 1.7), tendo obtido o 20.º lugar na prova de fundo da classe C2. (UVP, 2014)



Figura 1.7 - Telmo Pinão. (UVP, 2014)

## 1.2 - PARA-CICLISMO

O primeiro tipo de classificação de ciclismo para pessoas com deficiência física foi desenvolvido ainda no início do desporto para deficientes, que teve lugar em Inglaterra, 1944, criada por médicos e especialistas da área de reabilitação. Contudo, o para-ciclismo começou por ser praticado na década de 1980 por ciclistas deficientes visuais, que competiam utilizando bicicletas de “tandem” - bicicleta dupla (*vd.*, Figura 1.8), e foi introduzido como desporto paralímpico em Seul em 1988. Para além de atletas deficientes visuais, o desporto inclui pessoas com paralisia cerebral, amputações e outras deficiências físicas, competindo nas categorias masculina e feminina. O programa de competições inclui perseguições individuais, corridas de estrada, um contra-relógio de 1000 metros, provas de estrada em contra-relógios individuais e por equipas e provas de velocidade. As bicicletas podem ser de modelos convencionais ou triciclos, de acordo com o tipo de lesão. O ciclista com deficiência visual compete também em bicicletas “tandem”, com um guia que pedala no banco da frente. No caso das bicicletas acionadas através da mão, a designação é “handcycling”. (paralímpico, 2012)



Figura 1.8 - Ciclismo com deficiência visual (paralímpico, 2012)

As provas são disputadas num velódromo, em estrada e em contra-relógio. No velódromo, as bicicletas percorrem uma pista oval que varia entre 250 e 325m de extensão, sendo a velocidade uma constante fundamental. Na estrada, os ciclistas de cada categoria iniciam o percurso em simultâneo. As competições são as mais longas da modalidade, podendo chegar aos 120 km. São dois os requisitos fundamentais nesta competição: velocidade e preparação física. As disputas de contra-relógio exigem mais rapidez do que resistência.

### 1.2.1 - COMPETIÇÃO EM CLASSE C2

O desporto de Para-ciclismo está dividido em várias classes e subclasses, consoante o tipo e o grau de deficiência. As classificações utilizadas na prática do desporto adaptado baseiam-se em fatores de nivelamento entre os vários tipos de capacidades físicas e competitivas, colocando as deficiências semelhantes num determinado grupo. Isso permite criar oportunidades de competição entre indivíduos com vários graus de deficiência equivalentes. No fluxograma da Figura 1.9 podem-se identificar as classes e subclasses existentes no para-ciclismo, assim como, a classe em que Telmo Pinão está inserido. Este diagrama foi elaborado tendo como base o Guia de Classificação de para-ciclismo da UCI - União de Ciclismo Internacional (UCI, 2014).

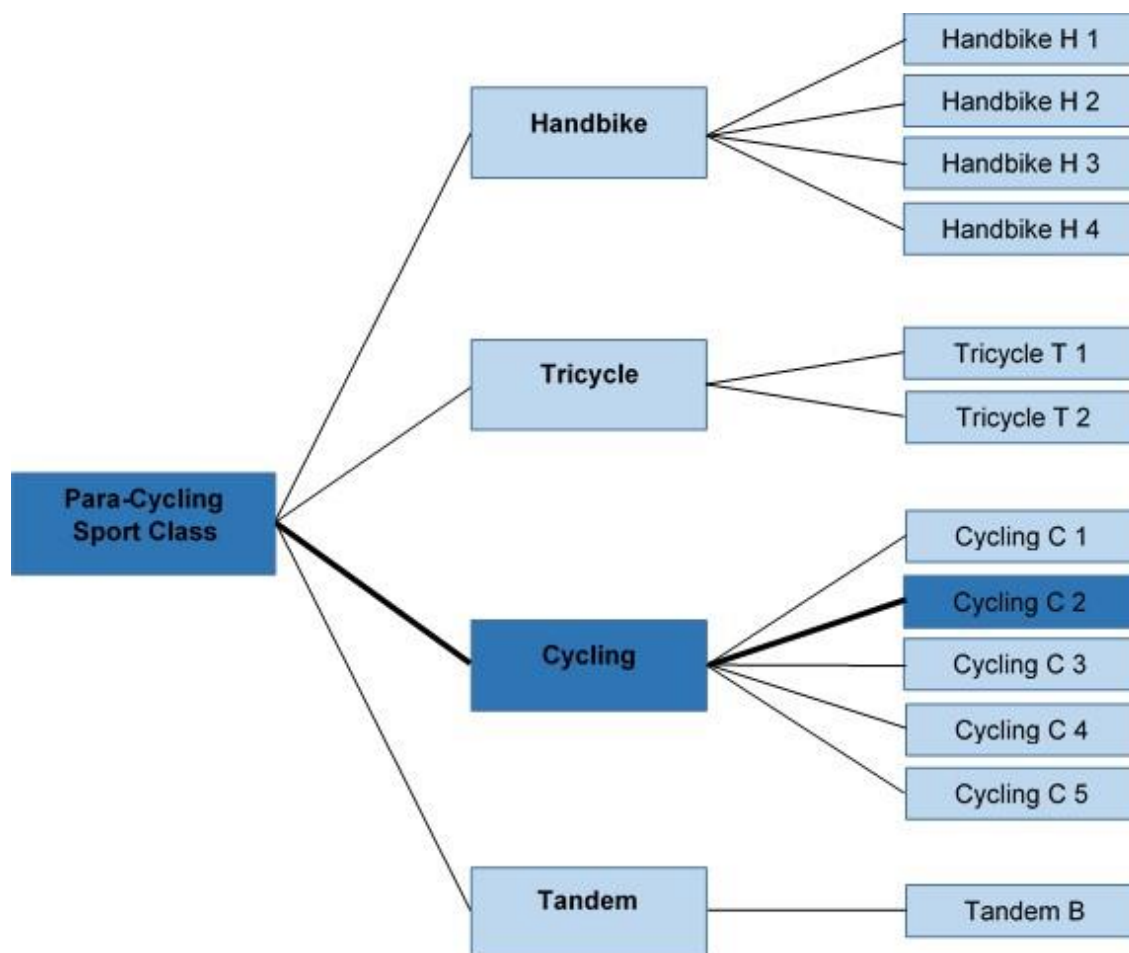


Figura 1.9 - Classes e subclasses de Para-ciclismo (UCI, 2014)

Na Figura 1.10 podem ser visualizados os vários tipos de bicicletas de para-ciclismo, existentes nas várias classes.



a)



b)



c)



d)

**Figura 1.10 - Tipos de bicicletas de para-ciclismo, a) Handbike (Wikipedia, 2006), b) Tandem (Paketabike, 2012), c) Cycling (Diariodemallorca, 2014), d) Tricycle (Melissainau, 2014)**

Na classe C2, os atletas pedalam apenas com o auxílio de um membro inferior, podendo usar um dispositivo à medida de cada competidor, com o objetivo de apoiar o coto da perna amputada. As distâncias para a classe C2 são de 12km em prova de contra-relógio e 65km na prova em linha. Existem diversos critérios para a avaliação e aprovação da colocação do atleta na Classe C2. De entre estes critérios destacam-se os seguintes (UCI, 2014):

- Hemiplagia, com espasticidade de grau 2 e comprometimento do membro inferior;
- Diplegia, com espasticidade de grau 2 e em ambos os membros inferiores;
- Diminuição e perda de força muscular;
- Ataxia moderada ou severa;
- Lesões neurológicas, completas ou incompletas;
- Poliomielite com lesão da coluna vertebral e lesões neuronais periféricas incompletas;
- Amputação de um membro inferior, com utilização de prótese;
- Outras ....

### 1.3 - DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO EXISTENTES

De modo a perceber o que utilizam em competição outros atletas na mesma situação, particularmente aqueles que disputam os campeonatos do mundo e participaram já em Jogos Para-Olímpicos, foi efetuada uma pesquisa de alguns dos dispositivos existentes. Importa referir que esta pesquisa incluiu os registos de patentes, nacionais e internacionais, não tendo sido encontrados registos deste tipo de dispositivos de compensação.

#### 1.3.1 - DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO UTILIZADOS POR OUTROS ATLETAS

O espanhol Juan Jose Mendez (*vd.*, Figura 1.11 - a) é um atleta que utiliza apenas a sua perna e braço direitos para a prática do ciclismo. Mendez recorre a uma bicicleta adaptada, com um copo ao nível do selim, onde o atleta insere a coxa esquerda para alcançar o equilíbrio e potência desejados.

Fabrizio Macchi (*vd.*, Figura 1.11 - b,) é um para-ciclista italiano a quem, ainda na sua juventude, foi diagnosticado um tumor ósseo e que após várias intervenções cirúrgicas e sucessivos tratamentos de quimioterapia, se viu confrontado com uma amputação da sua perna esquerda, acima do joelho. Macchi utiliza um dispositivo em fibra de carbono, com a forma de uma concha (wikipedia, 2014).



a)



b)

Figura 1.11 - a) Juan Mendez (Europe, 2012) e b) Fabrizio Macchi (smlosone, 2014)

Na Figura 1.12 apresentam-se outros dispositivos utilizados por atletas em circunstâncias semelhantes às do Telmo Pinão.

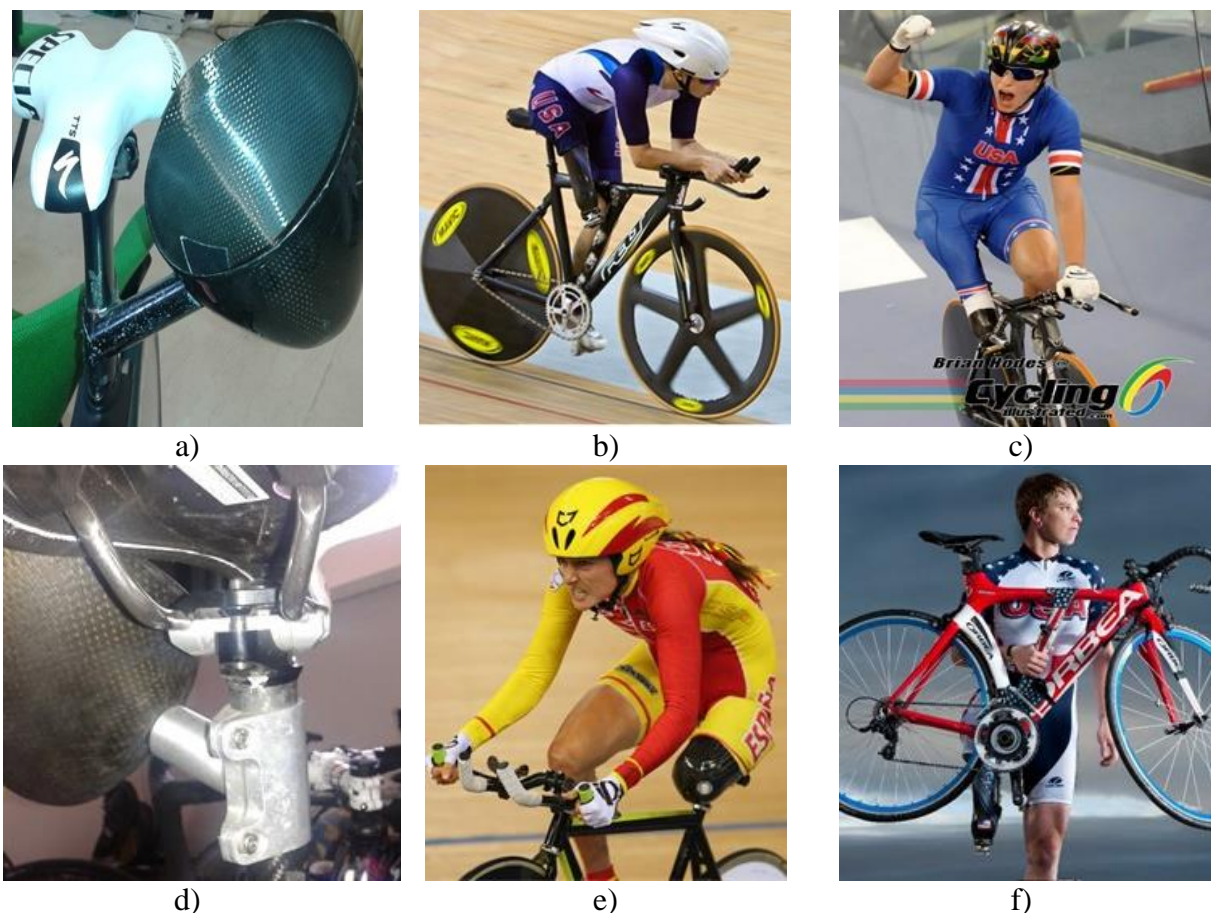


Figura 1.12 - Dispositivos de compensação utilizados por outros atletas: a) Dispositivo em Fibra de Carbono com Ancoragem ao Espigão do Selim, b) Dispositivo em material compósito com Ancoragem ao Quadro da Bicicleta, c) Dispositivo em forma de copo em material Compósito, d) Dispositivo em material compósito com ancoragem em alumínio, e) Dispositivo com ancoragem ao espigão do selim (Europe, 2012) e f) Dispositivo com ancoragem ao quadro

### 1.3.2 - DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO DESENVOLVIDOS PARA O TELMO PINÃO

Tal como referido atrás, em 2012 o DEM-ISEC desenvolveu e construiu o primeiro dispositivo para o apoio da perna de Telmo. Este dispositivo tem ancoragem no espigão do selim, permitindo vários graus de afinação, tal como se pode visualizar na Figura 1.13. Este dispositivo foi construído essencialmente em alumínio e Poliamida (Nylon). O apoio da perna tem a forma de uma meia-cana e o fato de ser construído em Nylon, associado à secção da viga resistente levava a alguma falta de rigidez assim como a alguma instabilidade do sistema mecânico. Refira-se contudo que este dispositivo foi construído em apenas uma semana, com os materiais existentes e sem grandes preocupações de projeto.

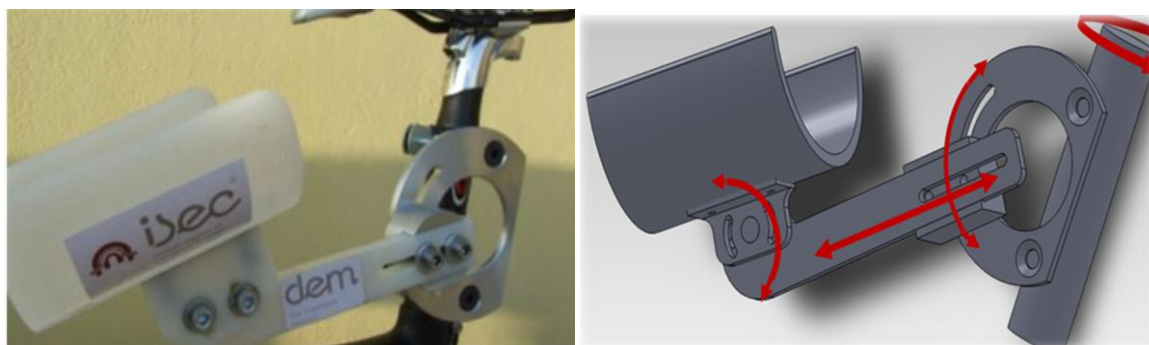


Figura 1.13 - Primeiro dispositivo criado no DEM/ISEC. (Maranha.V, 2012)

A Figura 1.14 mostra o atleta em testes e em prova com este dispositivo. No seguimento dos testes efetuados foi desenvolvido e construído um apoio da meia-cana totalmente em alumínio. Este dispositivo não contém os mesmos graus de liberdade em termos de afinação mas torna o sistema mecânico mais estável para o atleta.



Figura 1.14 - Primeiro dispositivo com ancoragem em alumínio

Em 2013 o dispositivo voltou a ser estudado, com vista à implementação de melhorias. Os estudos efetuados conduziram à possibilidade de testar um dispositivo com braço de ancoragem no espigão da bicicleta e uma estrutura tubular que abraçasse a perna do atleta (vd., Figura 1.15). Contudo, por razões de segurança, em particular por prevenção da eventual situação de queda, este dispositivo não evoluiu para construção, ficando apenas pela fase de projeto. Figura 1.15 - Dispositivo projetado em 2013



Figura 1.15 - Dispositivo projetado em 2013 (Francisco Afonso, 2013)

## 1.4 - OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho passa por desenvolver um dispositivo de compensação para apoio da perna amputada do atleta Telmo Pinão, permitindo-lhe competir internacionalmente na Classe C2 da UCI. O protótipo do dispositivo, além de ultra leve, deve proporcionar um elevado desempenho, ter em conta os aspetos de ergonomia e segurança do atleta, assim como a descompensação da massa do seu corpo.

O dispositivo deve permitir ao atleta pedalar em pé, levando-o, dessa forma, a utilizar a massa do seu corpo, aumentando o seu rendimento, particularmente em fases de aceleração, de primordial importância no contexto do rendimento em competição.

Um dos principais objetivos no desenvolvimento deste dispositivo é permitir ao atleta competir e alcançar os mínimos que necessita com vista à sua participação nos Jogos Para-Olímpicos de 2016, no Rio de Janeiro - Brasil.

---

## CAPÍTULO

# 2

---

## DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Este capítulo descreve o procedimento seguido no desenvolvimento do projeto, começando pela avaliação do dispositivo já existente, considerado como ponto de partida para o surgimento das primeiras ideias em modelação CAD 3D do protótipo inicial, passando pela construção e otimização do protótipo desenvolvido. Foram executados vários testes com o primeiro protótipo, que serviram de base para a evolução deste, e que incluiu todo um processo de projeto 3D, seleção de materiais, terminando pela construção do dispositivo final.

### 2.1 - PONTO DE PARTIDA

Tendo em conta que a ideia base de desenvolvimento assentava no mesmo princípio de funcionamento, nomeadamente a utilização de uma meia-cana ancorada no espigão da bicicleta, o projeto iniciou-se pelo estudo e análise ao dispositivo já existente de modo a definir qual a posição ótima que o ciclista necessitava para o apoio da perna amputada. A Figura 2.1 mostra o atleta numa prova que ligou Coimbra a Fátima, em que utilizou o dispositivo existente.



Figura 2.1 - Telmo utilizando o dispositivo com ancoragem em alumínio (Facebook, 2014)

Importa referir que se discutiu a possibilidade de a ancoragem da meia-cana ser efetuada diretamente ao quadro, em vez de ser feita no espigão do selim. No entanto, essa ideia foi, desde logo abandonada visto ser do interesse do atleta que este dispositivo seja facilmente transponível para outras bicicletas. Veja-se por exemplo a transição da bicicleta de estrada para a bicicleta de BTT, que com esta metodologia necessita apenas da substituição do conjunto espigão-dispositivo.

## **2.2 - PROTÓTIPOS INICIAIS E IDEIAS DISCUTIDAS**

Ao longo do período de desenvolvimento do dispositivo existiram diversas ideias que foram sendo discutidas e alteradas até se obter o conceito e geometrias finais. Por se entender que este processo de abordagem se revelou determinante e promoveu uma aprendizagem importante para a implementação deste trabalho, opta-se por descrever de modo sucinto as várias soluções que foram surgindo e que contribuíram para o projeto do protótipo final.

### **2.2.1 - DISPOSITIVO ARTICULADO**

Esta versão do dispositivo surgiu da ideia de implementação de um movimento do joelho da perna amputada do atleta. Pretendia-se desenvolver um sistema mecânico que não fosse completamente estático, ou seja, que facilitasse a pedalagem de pé, visto haver a convicção de que para que o ciclista conseguisse pedalar em pé seria necessário que o dispositivo tivesse a capacidade de inclinar a meia cana e assim executar um movimento longitudinal paralelo ao quadro da bicicleta. De modo a testar esta ideia, foi construído um protótipo funcional, sem cuidados ao nível de massa, mas com todas as capacidades de articulação anteriormente impostas (*vd.*, Figura 2.2). Este protótipo foi testado pelo atleta, tendo conduzido à conclusão da não necessidade deste tipo de articulações. Se por um lado o dispositivo poderia permitir maior conforto e ergonomia ao atleta, o fato de integrar vários componentes para possibilitar os graus de liberdade tornam-no demasiado pesado e de difícil maquinação.

Esta etapa, assim como os resultados obtidos foram determinantes para a definição de avanço para um sistema mecânico completamente estático.



Figura 2.2 - Dispositivo articulado

### 2.2.2 - DISPOSITIVO DE APOIO COM AVANÇO E TUBO EM COMPÓSITO

A segunda versão do dispositivo considera uma geometria estática, dado ser entendimento de não haver ganhos com a introdução de articulações e/ou rigidez variável. Nesta versão o apoio da meia-cana seria feito através da adaptação de um avanço, utilizado habitualmente em bicicletas, e com recurso a um tubo curvado, em fibra de carbono.

Este dispositivo envolveu ainda a evolução importante da meia cana ao nível da ergonomia e do design. A meia-cana passou a ter a configuração da cocha do atleta, com dois ângulos de inclinação diferentes, em que a zona junto ao selim serviria de apoio à perna na pedalagem normal, quando sentado, e, a componente mais avançada da meia-cana serviria de apoio para a pedalagem de pé, tendo por isso uma inclinação mais acentuada (vd., Figura 2.3). Importa referir que a obtenção desta geometria foi possível com o recurso a diversas técnicas de moldação, em particular com a utilização de ligadura gessada, assim como o registo e observação de imagens correspondentes a testes em diversas posições.



Figura 2.3 - Versão com utilização do avanço

Este dispositivo, dados os seus constituintes, mostra ser relativamente leve e evidencia uma estética satisfatória, pelo fato de que o tubo em material compósito acompanha o formato da meia-cana. Contudo, a principal desvantagem tem a ver com a dificuldade de fabrico do tubo curvado em fibra de carbono e com a utilização de múltiplos componentes que permitem ligar a meia-cana ao espigão do selim. Além disso, o dispositivo seria demasiado oneroso, não apenas pela incorporação de materiais compósitos, mas principalmente por toda a maquinação envolvida no processo.

### 2.2.3 - APOIO EM ALUMÍNIO

O dispositivo seguinte incorpora um apoio maquinado para suporte da meia-cana. Este apoio é previsto em liga de alumínio, com maquinação em CNC, abandonando-se a possibilidade de ser feito em material compósito. O objetivo seria facilitar a ligação entre a meia-cana e o apoio, garantindo a fácil ancoragem entre o dispositivo e o espigão do selim (*vd.*, Figura 2.4).



Figura 2.4 - Versão do suporte em alumínio

Este tipo de dispositivo levaria à utilização de materiais menos onerosos, relativamente leves, embora com previsível relação resistência/massa e rigidez/massa superiores às do seu fabrico em material compósito. Contudo, seria de difícil maquinação, devido aos vários apertos que teriam de ser aplicados no centro de maquinação e necessitaria de um número elevado de horas de maquinação.

### 2.2.4 - APOIO DUPLO EM COMPÓSITO

Tendo em conta as discussões em torno dos dispositivos anteriores, entendeu-se como importante que o apoio fosse em material compósito. A introdução deste material permitiria garantir uma substancial redução de peso e uma boa relação entre massa e resistência e entre massa e rigidez. Seria previsível que a utilização de materiais compósitos neste tipo de dispositivo poderia aliar estabilidade com conforto na pedalagem.

A primeira geometria do dispositivo com material duplo em compósito está representada na Figura 2.5. Devido às formas dos perfis utilizados, o fabrico representa um custo que deve ser tido em conta, havendo a necessidade de fabricar moldes com as medidas corretas dos componentes estruturais, de modo a garantir o necessário controlo dimensional. Uma outra desvantagem tem enquadramento na dificuldade em fazer a ligação entre o perfil em material compósito e o espigão do selim. Apesar de todas as dificuldades, este modelo foi a base para o desenvolvimento do protótipo final, que se apresenta no ponto seguinte.

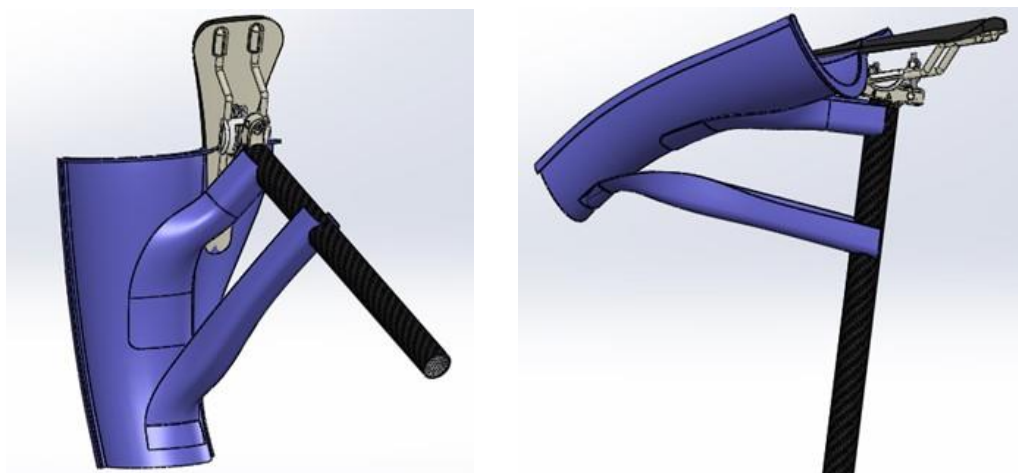


Figura 2.5 - Versão do suporte em compósito

### 2.3 - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO FINAL

O desenvolvimento deste protótipo divide-se em duas partes essenciais: a) projeto e construção de uma meia-cana, ergonómica e confortável, e que tenha em conta a massa, resistência e rigidez suficientes para garantir a estabilidade e segurança para o atleta; b) construção do suporte da meia-cana, se possível com regulação, dando ao atleta a possibilidade de o ajustar às suas características. Pretendia-se desta forma chegar às dimensões e posicionamento ideais, para proporcionar o máximo conforto e rendimento na pedalagem.

### 2.3.1 - CONSTRUÇÃO DA MEIA-CANA

O primeiro aspeto tido em conta foi o facto de a meia-cana em utilização ser em nylon com espessura elevada, podendo ser diminuída a sua massa, assim como tornar mais confortável e ergonómica a sua forma (vd., Figura 2.6). Assim, este desenvolvimento assentou na necessidade de construir algo mais adequado à perna do ciclista, garantindo uma redução de peso da meia cana.



Figura 2.6 - Meia cana do dispositivo já existente

O desenvolvimento da meia-cana iniciou-se com a ideia de trabalhar num possível molde da coxa do ciclista, e, através dele criar a possibilidade de se contruir uma meia-cana à medida da cocha, aumentando, assim, o conforto e a estabilidade. Para o fabrico do molde da coxa foram usados gesso e ligaduras. Depois de se obter o molde, este foi cortado em duas metades, para aceder ao seu interior. Posteriormente recorreu-se a uma metodologia de engenharia inversa, com a utilização de um Scanner Laser 3D, que permitiu obter o modelo 3D da coxa do atleta (vd., Figura 2.7).



a)



b)

Figura 2.7 - a) Molde em gesso da coxa do ciclista e b) Scanner 3D "PICZA"

Depois de analisar a geometria adquirida através do Scanner 3D concluiu-se que seria possível obter uma geometria equivalente através da modelação 3D, visto que a geometria obtida do Scanner continha uma forma cónica. Foi feito então um levantamento de diversos parâmetros dimensionais e antropométricos da coxa do atleta. Através deste procedimento foi possível proceder à elaboração do desenho da meia cana em 3D, feito através do software “Solidworks”. O primeiro modelo 3D é o representado na Figura 2.8.

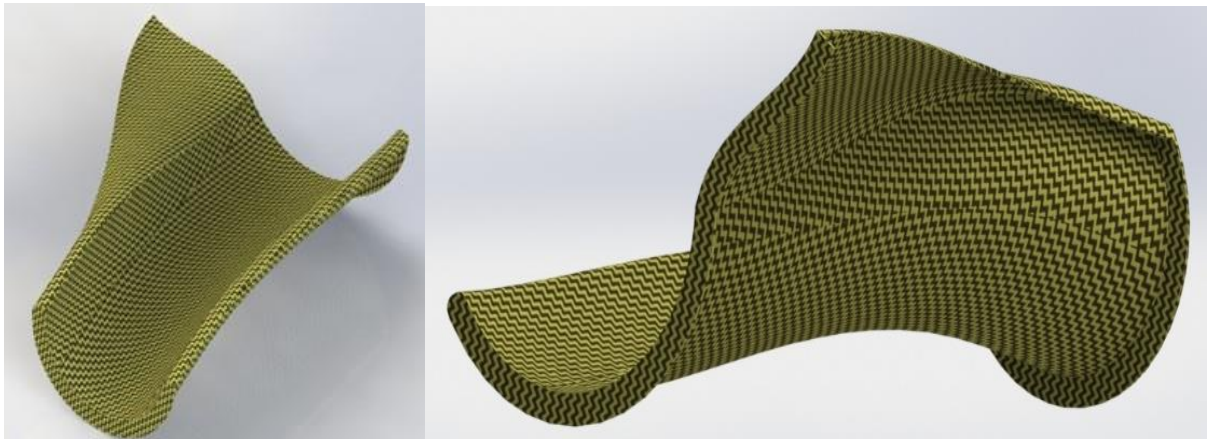


Figura 2.8 - Primeiro modelo 3D da meia cana

Para além das características dimensionais da perna de Telmo, foi tido em consideração a massa da meia-cana. Deste modo, e para diminuir a espessura da meia-cana mantendo a rigidez e resistência, foram criadas abas nas laterais e nos topos (vd., Figura 2.9 - a).

Outra questão importante incluiu a possibilidade do atleta poder pedalar confortavelmente em pé. Para tal foi criada uma inclinação de  $16^\circ$  na zona terminal da meia cana, como se verifica na Figura 2.9 - b.

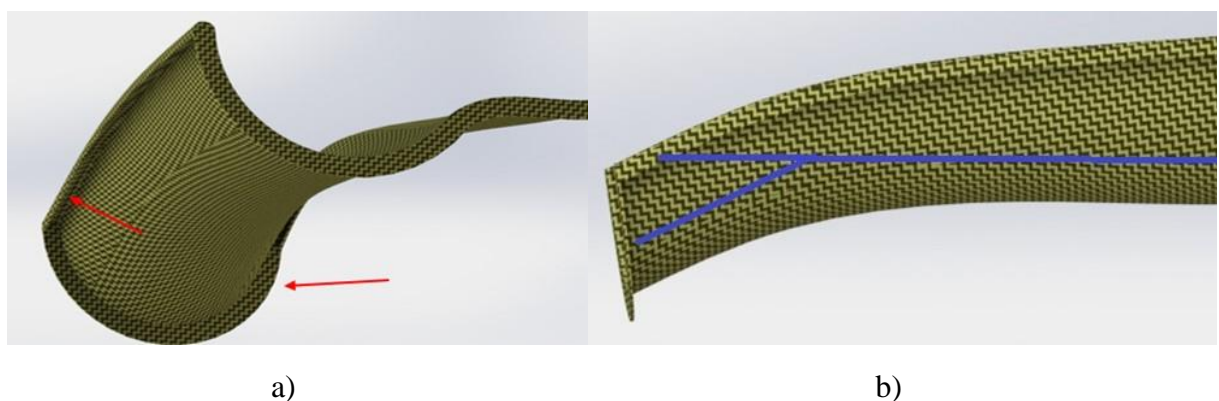


Figura 2.9 - a) Abas de reforço da meia cana e b) Inclinação da meia cana

Para além da meia cana em si foi também criada uma aba do lado esquerdo, junto ao selim, com o objetivo de garantir um maior apoio na zona da nádega, conseguindo assim maior conforto e estabilidade para o atleta.

Depois de definido o modelo 3D em Solidworks, foi obtido o modelo físico da meia-cana, com recurso a uma técnica de prototipagem rápida com adição de material, vulgarmente conhecido como impressão 3D. Isto permitiu obter um primeiro protótipo em PLA, substancialmente mais económico que o recurso a um procedimento de maquinação em CNC.

O modelo físico da meia-cana permitiu a construção de um molde em gesso para o fabrico do compósito laminado. Este procedimento teve o apoio da empresa RC Fibre Components, com sede em Anadia. Na construção deste primeiro protótipo foram utilizadas fibras de kevlar e de carbono. A introdução da fibra de kevlar no exterior da estrutura foi feita por razões de segurança, diminuindo a probabilidade de aparecimento de fibras rígidas em caso de eventual queda.

### 2.3.2 - CONSTRUÇÃO DO SUPORTE DA MEIA-CANA

Após a construção da meia-cana, importava proceder a testes e afinações. É importante salientar que a hipótese de desenvolver algo ultra leve, nesta fase, foi completamente descartado, isto é, tudo foi contruído com abstração da massa total do suporte da meia cana, dando, no entanto, relevo ao conforto e a um máximo de graus de liberdade do atleta.

Para a construção do suporte foi utilizado aço de construção, alumínio, parafusos e abraçadeiras metálicas com borracha nas zonas de aperto, para evitar danificar o espigão do selim. A Figura 2.10 mostra o protótipo de suporte que foi criado para a execução dos testes.



Figura 2.10 - Suporte da meia cana ajustável

### 2.3.3 - RESULTADO

A combinação da meia-cana produzida com o suporte conduziu a um dispositivo confortável e com os graus de liberdade suficientes (vd., Figura 2.11), para que o atleta conseguisse ajustar o dispositivo a seu gosto, embora com uma massa excessiva, que se deve ao facto do suporte da meia-cana ter sido construído em aço.

Com este primeiro protótipo foi possível obter o posicionamento ideal da meia-cana, verificando-se que não havia necessidade desta ser tão comprida. Por outro lado, também se chegou à conclusão que a aba criada no lado esquerdo da meia cana era desnecessária. De fato, após vários treinos do atleta com este primeiro protótipo, deduziu-se que a meia-cana lhe estava a causar incómodo na face interior da perna e, conseqüentemente a perturbar a pedalagem, optando-se por proceder a um ajuste dimensional da mesma.



Figura 2.11 - Primeiro Protótipo

## 2.4 - EVOLUÇÃO DO PROTÓTIPO

Com o primeiro protótipo produzido e avaliado experimentalmente pelo atleta, a evolução do protótipo foi o passo seguinte. Num primeiro momento, começou-se por proceder à seleção de materiais. Foram definidas características que os materiais devem respeitar, escolha de possíveis materiais candidatos à construção do dispositivo, tendo sido elaborado um quadro de apoio a decisão, que se expõe nesta secção.

Atendendo ao fato de se utilizarem materiais compósitos no fabrico do dispositivo, opta-se por efetuar nesta secção um enquadramento a este tipo de materiais e às suas principais aplicações.

Esta secção descreve também a evolução da meia-cana e do suporte da mesma, assim como os métodos utilizados nos pontos de ligação entre os vários componentes. Por fim é feita uma pequena análise aos resultados da evolução do protótipo.

#### **2.4.1 - SELEÇÃO DE MATERIAIS**

É de grande importância que o dispositivo em causa seja construído no material mais indicado, garantindo que este desempenhe, da melhor forma possível, as funções para o qual foi projetado. Para isso, houve toda uma seleção de materiais, na qual se estabeleceram as características principais que deviam respeitar, passando pela identificação dos materiais candidatos, bem como, a escolha do material mais apropriado.

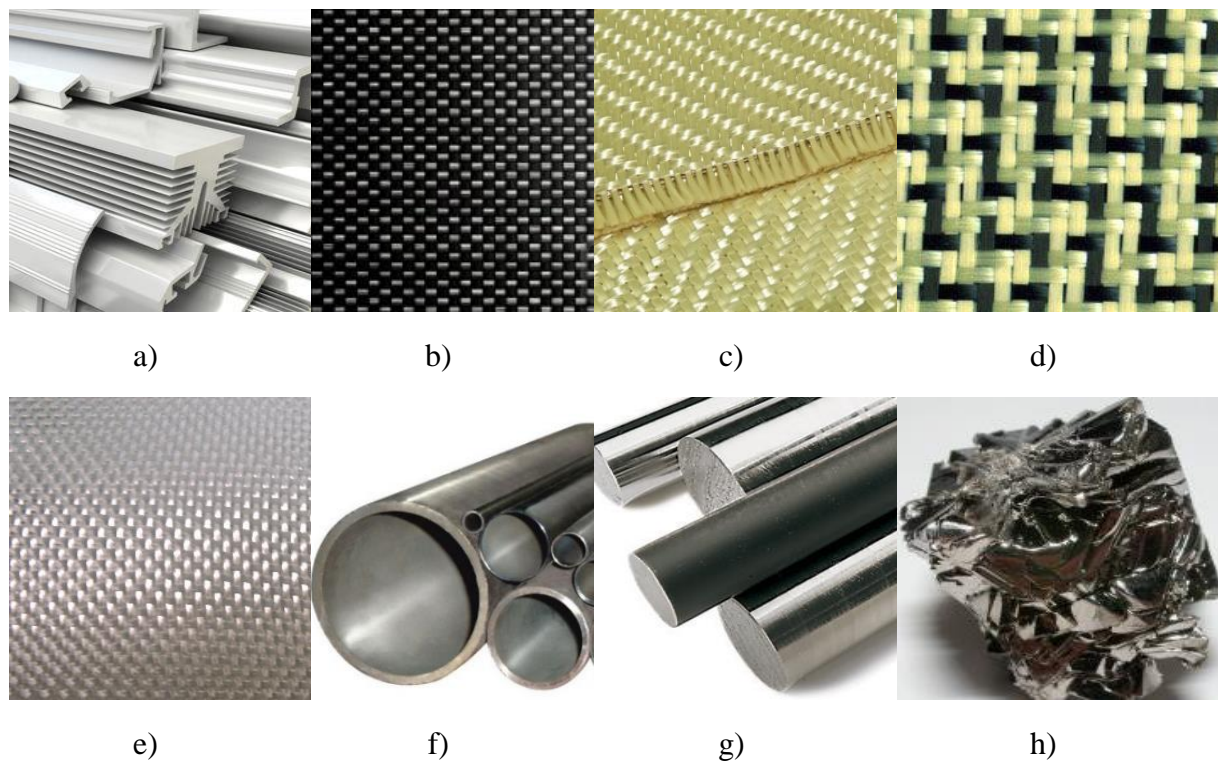
##### **Características principais e requisitos para os componentes**

As características principais para suporte à decisão de aplicação são as seguintes: resistência mecânica; rigidez; custo do material; massa específica; aspeto visual após aplicação. A escolha destes requisitos justifica-se, em grande parte, pelo seguinte:

- A resistência mecânica é importante dado tratar-se de sistema estrutural com utilização humana direta. É por isso importante garantir que o dispositivo não entre em cedência na sua utilização;
- A rigidez é importante de modo a garantir a necessária estabilidade da estrutura durante a pedalagem;
- Sendo o peso um outro requisito de elevada importância, visto tratar-se de um componente dedicado à alta competição, a massa do dispositivo é também um fator decisivo para alcançar bons resultados;
- O custo é igualmente um critério fundamental, pois, embora seja um dispositivo para alta competição, os meios disponíveis escasseiam e pretende-se que outros ciclistas não profissionais, mas com limitações motoras do mesmo tipo tenham acesso a estes dispositivos;
- É também de grande interesse obter um dispositivo esteticamente apelativo.

### Identificação dos Possíveis materiais

Tendo em conta os grandes esforços a que o dispositivo está sujeito, considerou-se a resistência mecânica, como o parâmetro a maximizar, sendo a massa o parâmetro a minimizar. A lista de materiais candidatos é apresentada na Figura 2.12.



**Figura 2.12 - Materiais candidatos, a) Aluminho, b) Fibra de carbono, c) Fibra de kevlar, d) Fibra de carbono e kevlar, e) Fibra de vidro, f) Aço ao carbono, g) Aço Inox e h) Liga de titânio**

### Quadro de apoio a decisão

A seleção dos materiais foi feita a partir do quadro de apoio à decisão que se expõe na Tabela 2.1 e que considera uma classificação de 0 a 10 em vários fatores de ponderação.

Tabela 2.1 - Quadro de apoio à decisão

<b>Materiais</b>	<b>Resistência</b>	<b>Rigidez</b>	<b>Custo</b>	<b>Massa Específica</b>	<b>Aspeto visual</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Ponderação</b>	<b>(3)</b>	<b>(2.5)</b>	<b>(1)</b>	<b>(2.5)</b>	<b>(1)</b>	<b>10</b>
Alumínio	4	5	7	4	6	47,5
Fibra de carbono	8	8	4	10	9	84,0
Fibra de vidro	6	6	8	7	5	63,5
Fibra de kevlar	6	6	6	9	8	67,5
Fibra Kevlar e Carbono	7	7	5	9	7	68,0
Aço ao carbono	5	7	9	1	2	46,0
Aço Inox	5	7	7	1	5	47,0
Liga de titânio	7	9	1	5	5	62,0

Avaliados todos os fatores, com atribuição do valor 1 para uma situação desfavorável e 10 para uma situação muito favorável, para a aplicação em questão, a utilização da fibra de carbono é a que obtém a melhor pontuação, seguido da fibra de kevlar e carbono. Assim, foi decidido utilizar a fibra de carbono para a construção do apoio e utilizar a mistura de fibra de kevlar e carbono na meia-cana pois a fibra de carbono isolada, em caso rotura, pode laminar tornando-se bastante perigosa e colocar a integridade física do atleta em questão.

#### 2.4.2 - MATERIAIS COMPÓSITOS

Ao longo dos tempos, após o controlo do fogo e a invenção da roda, a fiação foi, provavelmente, um dos desenvolvimentos mais importantes da humanidade. O fabrico manual de tecidos flexíveis e a fiação de fibras, como o algodão e o linho, foram um grande avanço. Desta forma, os recursos naturais foram muito usados e, rapidamente apareceram os primeiros materiais compósitos. A conceção deste tipo de materiais é milenar, como por exemplo, as construções primitivas no Antigo Egipto, feitas através de blocos de lama, reforçados com palha, para aumentar a integridade estrutural, sendo esta das mais arcaicas combinações de materiais artificialmente feitos pelo Homem. Ainda nos dias de hoje a palha é utilizada para reforço de tijolos em muitos países.

A partir de 1960, desenvolveram-se as fibras de carbono e depois de 1968, o uso de materiais compósitos tornou-se mais comum, para melhorar o desempenho de veículos espaciais e aviões militares. O termo “material compósito” refere-se, a um material constituído por dois componentes, com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas, os quais são, geralmente, divididos em duas categorias principais: matriz e reforço (vd., Figura 2.13). Um material compósito pode ser assim definido como um agrupamento macroscópico de dois ou mais materiais de natureza diferente, não solúveis nem reativos entre si, que se completam de tal forma que as características mecânicas do conjunto são superiores às de cada um dos constituintes isoladamente. Um dos constituintes é descontínuo, sendo geralmente mais rígido e com propriedades mecânicas superiores, pelo que é designado por reforço. O outro constituinte é contínuo e, na maioria dos casos, tem a função de garantir a continuidade do conjunto, sendo designado por matriz.

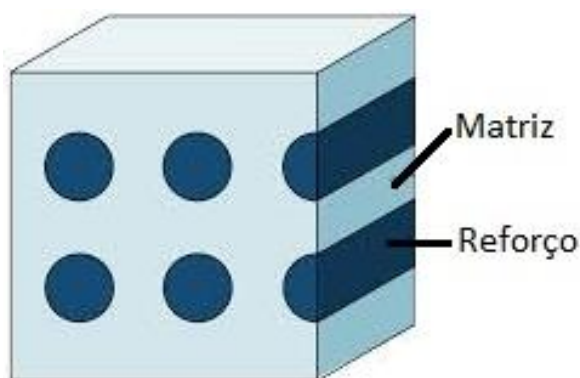


Figura 2.13 - Esquema da constituição de um compósito

De acordo com (Roseiro, 2004), os materiais compósitos apresentam excelentes características químicas, físicas e mecânicas por unidade de massa, com vantagens claras em relação aos materiais convencionais, nomeadamente ao nível da sua resistência e rigidez, assim como resistência à fadiga, ao impacto e à corrosão. Para a comparação com os metais são usados dois parâmetros para medir as vantagens mecânicas relativas dos materiais compósitos, (Kaw, 1997)

Rigidez específica	$\frac{E}{\rho}$	2.1
--------------------	------------------	-----

Resistência específica	$\frac{\sigma_r}{\rho}$	2.2
------------------------	-------------------------	-----

Onde  $E$  e  $s_R$  são o módulo de elasticidade longitudinal e a tensão de rotura na direção das fibras, respetivamente, e  $r$  é a massa específica. Para aferir a importância das características mecânicas destes materiais, por exemplo, a tensão de rotura de um compósito unidirecional de “carbono/epóxido” é praticamente igual à do aço, mas a resistência específica é três vezes superior. Os materiais compósitos permitem assim construir estruturas mais leves com desempenho equivalente.

A preocupação progressiva com o ambiente e com a diminuição de custos de fabrico, em conjunto com a reintrodução das fibras naturais nas tecnologias de compósitos reforçados, criou novos desenvolvimentos no uso destes materiais, nomeadamente na proteção do Homem em incêndios e situações de impacto, como por exemplo os coletes e os capacetes militares. Contudo, sempre estiveram presentes os materiais compósitos de origem natural, tais como a madeira, que é constituída por fibras de celulose dispostas numa matriz de lenhina, mas ainda, os ossos, que consistem em proteínas de colagénio dispostas numa matriz mineral. Os primeiros compósitos feitos a partir de fibras sintéticas surgiram no século XIX, quando o homem fez o primeiro polímero, fenol-formaldeído. Este, ao ser reforçado com fibra de linho, deu origem à baquelite, muito utilizada atualmente em equipamentos e quadros elétricos.

Os materiais compósitos podem ser classificados quanto à natureza dos constituintes, prioritariamente com base no material da matriz e com base na natureza dos reforços. O compósito mais vulgar é o de matriz orgânica (polímero) com reforço mineral em forma de fibra (vidro ou carbono) ou com reforço orgânico (aramida ou poliamidas). Também se pode utilizar como reforço metálico o boro ou o alumínio. Com uma aplicação limitada à indústria aeronáutica ou automóvel mais evoluída surge o material compósito com matriz metálica com reforço mineral (carbono ou carbonetos), metálico (boro) ou misto (boro revestido a carboneto de silício). Com utilização ainda mais limitada, aeroespacial têm sido desenvolvidos materiais com matriz cerâmica com reforço mineral (carbonetos ou nitretos) ou com reforço metálico (boro ou tungsténio). A Figura 2.14 apresenta esquematicamente a classificação dos materiais compósitos quanto à matriz que é utilizada.

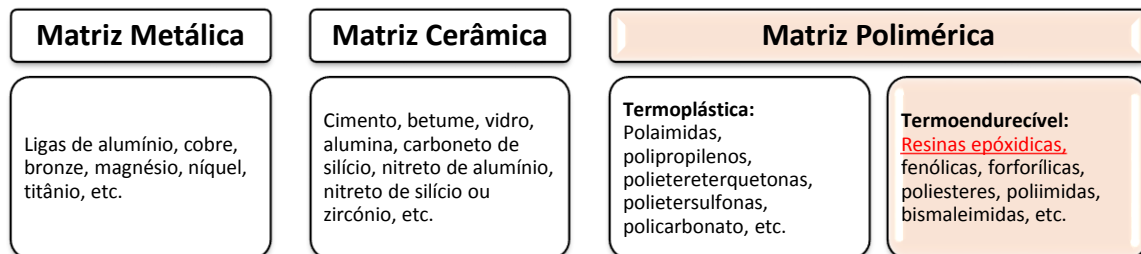


Figura 2.14 - Principais tipos de matrizes dos materiais compósitos (C.Pereira, 2013)

Os materiais compósitos podem também ser classificados quanto à geometria do reforço, que pode ser em partículas, de fibras curtas e de fibras longas. As partículas são usadas com o objetivo de melhorar a rigidez, o comportamento em temperaturas de funcionamento elevadas, a resistência ao desgaste por abrasão ou para reduzir o custo sem alteração significativa de propriedades. As fibras curtas e as fibras longas aleatoriamente dispostas conferem boas propriedades mecânicas, que podem ser consideradas quase isotrópicas. Finalmente, o reforço com fibras longas unidirecionais permite a obtenção de elevadas propriedades, nomeadamente na direção da colocação da fibra.

A classificação quanto à morfologia do reforço pode ser visualizado na Figura 2.15.

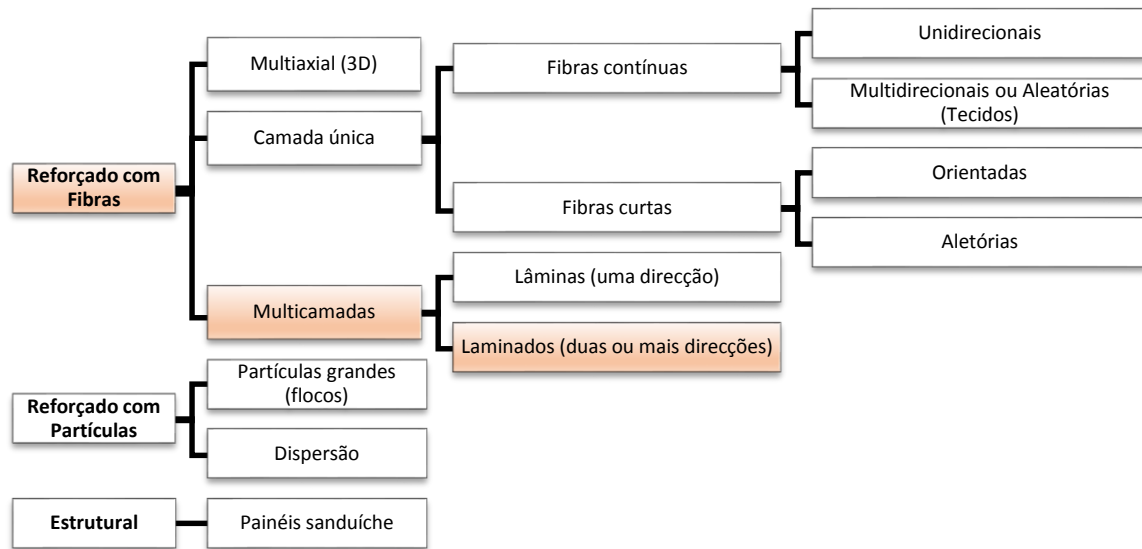


Figura 2.15 - Classificação dos compósitos quanto à morfologia do reforço (C.Pereira, 2013)

O sucesso da utilização de compósitos nas diversas aplicações depende da facilidade de acesso e uso das técnicas de fabrico exigidas por cada sector industrial. Cada vez mais, o fabrico de compósitos constitui um procedimento que pretende atingir valores ótimos de parâmetros como a forma, massa, força, durabilidade, rigidez, custos, etc. Assim, o crescente desenvolvimento de novas tecnologias de fabrico de compósitos é acompanhado pela alteração e melhoramento destes mesmos parâmetros. Estes novos materiais têm tido uma notável expansão pelo que estão a conquistar grande quota de mercado, especialmente em produtos onde a relação massa/resistência e massa/rigidez sejam fundamentais. A área da construção civil continua a ser a maior aplicação dos materiais compósitos, tal como era em 1500 a.C. em que os Egípcios e Israelitas usavam palha para reforçar tijolos de barro. (Ventura, 2009).

Na produção do dispositivo que conduziu à elaboração deste projeto, os materiais compósitos seleccionados consideram lâminas de matriz orgânica reforçada unidireccionalmente com fibras longas. O empilhamento destas lâminas, com diversas orientações e composição, permite a obtenção de placas ou de cascas, genericamente designadas por laminados, e que podem ser projetadas para suportar condições de carregamento previamente definidas. A Figura 2.16 representa uma sequência de empilhamento de 4 lâminas.

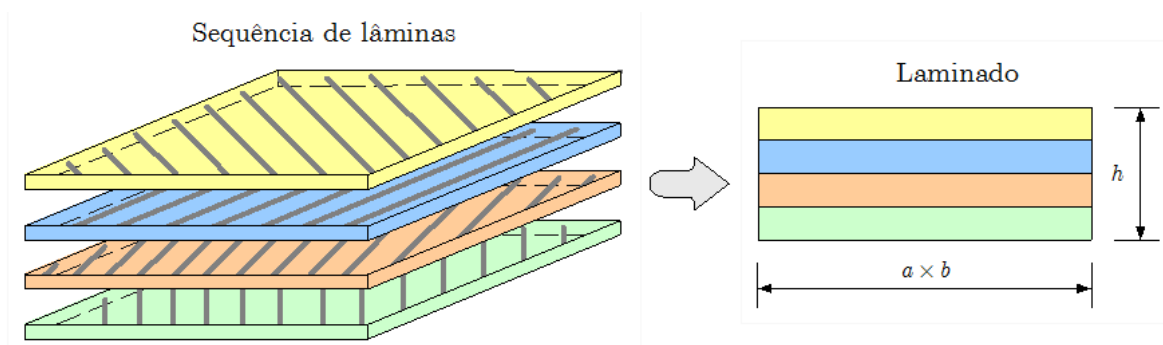
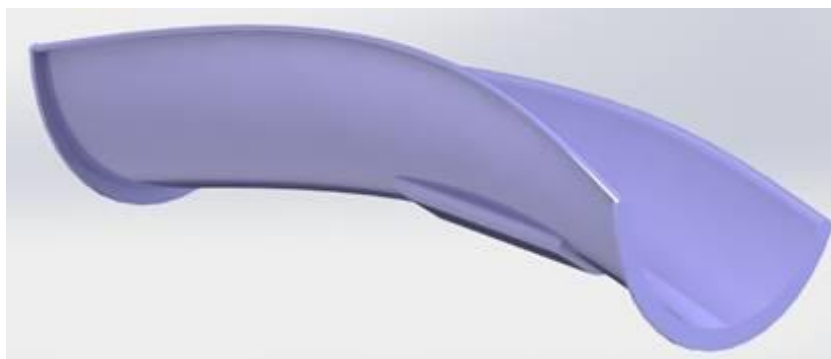


Figura 2.16 - Sequência de Empilhamento de 4 Lâminas (Roseiro, 2004)

Um dos principais problemas associados aos compósitos laminados tem a ver com a possibilidade de fratura por delaminação, que é bastante comum nos compósitos com fibras contínuas e ocorre devido às propriedades mecânicas ortotrópicas destes compósitos. Neste tipo de fratura, a propagação da fenda pode ocorrer entre as camadas do laminado e neste caso são denominadas de *fendas interlaminares*, ou entre as fibras, sendo denominadas de *fendas intralaminares*. As tensões que conduzem à delaminação podem surgir da própria estrutura geométrica do compósito, de tensões externas aplicadas, ou ainda devido à diferença nos módulos de elasticidade da matriz e das fibras. Sendo o mecanismo de fratura mais comum nos compósitos laminados de alto desempenho, a fratura por delaminação tem sido amplamente estudada (Silva.R, 2003).

### 2.4.3 - EVOLUÇÃO DA MEIA-CANA

Depois da fase de testes e treinos ao primeiro protótipo, surgiu a necessidade de acrescentar algumas melhorias à meia-cana. Os testes mostraram que a sua zona posterior não estava a servir de apoio à perna do atleta, visto a maior parte desse apoio ser efetuado pela parte da frente. Assim, procedeu-se ao encurtamento da zona posterior. Foi igualmente encurtada a parte interior da meia-cana, a fim de melhorar o conforto na utilização do dispositivo e simultaneamente permitir a redução do seu peso. Procedeu-se ainda à eliminação da aba longitudinal de apoio à nádega. Por fim, foi projetado e executado um rebaixo, aliado a um reforço da zona de ligação entre a meia cana e o suporte, a fim de reforçar e garantir a resistência do material à transferência de carga através dos parafusos, assim como para que estes não perturbassem ou magoassem o atleta. (vd.,Figura 2.17)



**Figura 2.17 - Modelo 3D da meia cana com reforço na zona de ligação.**

A meia-cana, após a remodelação da geometria e correção de projeto, viria a assumir algumas vantagens em relação ao anterior modelo, nomeadamente ao nível do conforto, rigidez, estabilidade e peso, mostrando ainda um aspeto visual mais apelativo. Estas vantagens refletem-se no melhor desempenho do dispositivo e no maior rendimento do atleta.

#### **2.4.4 - EVOLUÇÃO NO SUPORTE DA MEIA-CANA**

Através do suporte afinável, anteriormente construído (vd.,Figura 2.10), foi possível obter as distâncias corretas entre o espigão do selim e a meia cana, dimensões estas que proporcionam uma boa ergonomia ao atleta, aliado ao conforto e uma otimização do rendimento na pedalagem, tanto de pé como sentado.

Depois do estudo das vantagens e desvantagens das várias ideias que surgiram, concluiu-se que o ideal seria um apoio para a meia cana integralmente em material compósito, incluindo o interface entre o apoio e a meia cana. Para tal, foi fulcral uma forte interação com os responsáveis da empresa RC Fibre Componentes, que apresentaram, imediatamente, disponibilidade para colaborar na conceção e manufatura do suporte. O novo suporte foi projetado, tendo sempre em atenção a facilidade de fabrico dos moldes e a desmoldagem destes. Este suporte da meia-cana, que se apresenta na Figura 2.18, viria a ficar com uma rigidez considerável, aliada a uma boa resistência mecânica. Por ter um acabamento superficial em fibra de carbono e pelas formas com que o apoio foi projetado, este ficou com uma aparência bastante apelativa, acabando por não comprometer o design da bicicleta.

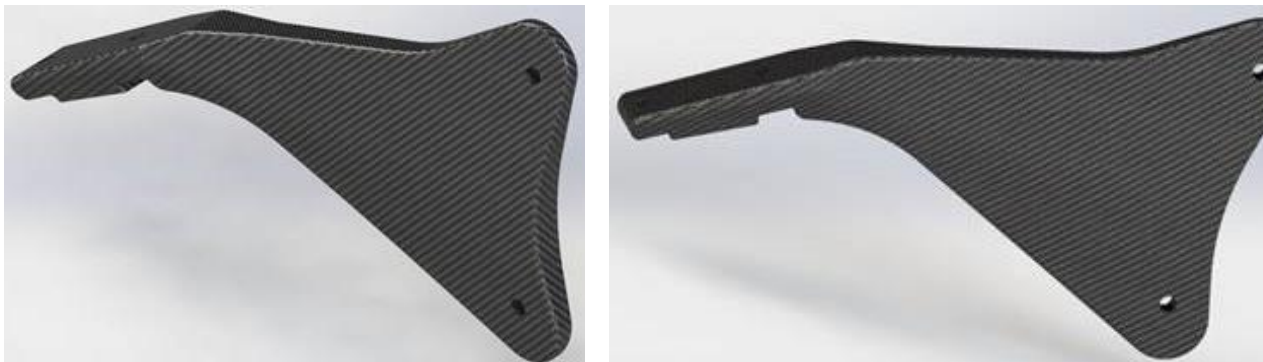


Figura 2.18 - Modelo 3D do apoio da meia cana

#### 2.4.5 - PONTOS DE LIGAÇÃO

Os diversos pontos de ligação, num primeiro momento entre a meia-cana e o seu apoio, assim como entre o apoio da meia-cana e o espigão do selim, foram também estudados dada a sua importância na rigidez e estabilidade do sistema. Um aspeto relevante que se teve em conta foi a relação entre a resistência da ligação e a massa associada.

Foi ponderada, primeiramente, a ideia de executar todo o dispositivo numa só peça. Esta possibilidade foi amplamente discutida com os técnicos da RC Fibre Componentes, tendo-se concluído que seria de difícil implementação pela necessidade de um molde complexo.

Uma segunda opção passou por ligar os componentes, através de resina epóxida. Após análise, verificou-se que esta opção comprometeria a possibilidade de posteriormente acoplar uma eventual célula de carga para aquisição das forças exercidas no dispositivo e obrigaria a maquinaria específica das abraçadeiras para a ancoragem ao espigão do selim. Assim, esta ideia foi também abandonada.

Por fim surgiu a ideia de utilizar parafusos para executar essas ligações, dado não comprometer a rigidez nem a possibilidade de aplicar células de carga e permitiria a ancoragem ao espigão do selim através de abraçadeiras padronizadas e ultra-leves, disponíveis em lojas de competição em ciclismo. Esta ideia tornaria o dispositivo mais económico, mesmo com a utilização de parafusos em ligas de titânio, sem comprometer a rigidez e a estabilidade do sistema, tendo sido a escolhida para implementação.

### 2.5 - FABRICO DO PROTÓTIPO FINAL

Todo o fabrico do protótipo foi executado na empresa RC Fibre Componentes, tendo-se procedido primeiro à construção da meia cana e depois ao apoio desta.

### 2.5.1 - FABRICO DA MEIA-CANA

De modo a facilitar a construção do molde para a meia cana, foi criado um novo modelo físico através de prototipagem rápida aditiva. A Figura 2.19 mostra o protótipo da meia-cana em PLA após impressão 3D, o molde já preparado e a meia-cana em carbono-kevlar.

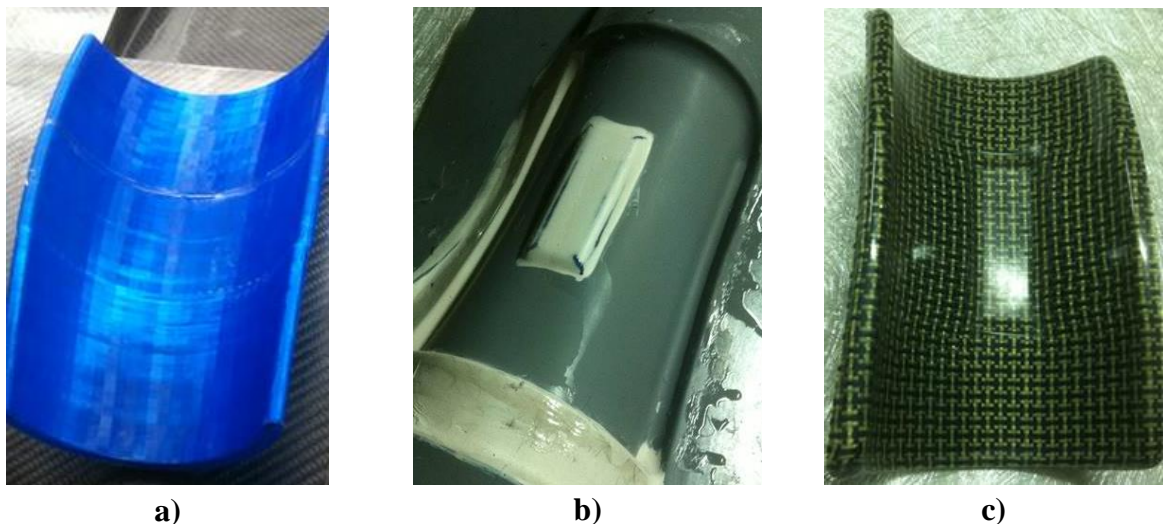
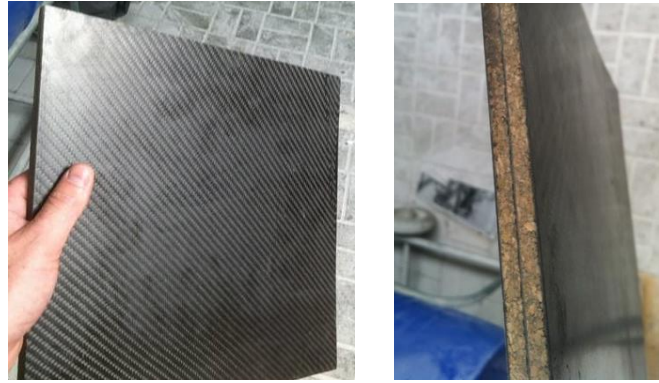


Figura 2.19 - a) Modelo físico em prototipagem 3D da meia cana; b) Molde da meia cana; c) Modelo real da meia cana construído em fibra de kevlar e carbono.

Como referido no capítulo 2.4.1 - Seleção de Materiais) para a construção da meia cana foi escolhido a mistura de fibra de kevlar e carbono. Importa referir que a orientação das fibras não foi completamente controlada e que a peça em questão não foi fabricada em autoclave. Contudo, tentou-se orientar as fibras o mais próximo possível de um empilhamento cruzado a  $0^\circ/90^\circ$  em que  $0^\circ$  corresponde ao eixo longitudinal da meia-cana. Foi conseguida uma peça de extrema resistência, com uma massa relativamente baixa e com aspeto visual apelativo.

### 2.5.2 - FABRICO DO APOIO DA MEIA-CANA

O apoio da meia cana em material compósito passou por diversas etapas e tentativas. De modo a tentar minimizar o peso do apoio, e atendendo ao tipo de solicitação do dispositivo, foi experimentada a manufatura de uma placa sandwich com núcleo em cortiça e placas exteriores em laminado de carbono. A Figura 2.20 mostra a tentativa de produção da placa sandwich. Contudo, a colagem entre as lâminas exteriores e o núcleo em aglomerado de cortiça não me mostrou eficaz, delaminando, tal como se mostra na figura. Deste modo, esta opção foi abandonada.



**Figura 2.20 - Sandwich de fibra de carbono e aglomerado de cortiça**

Posteriormente, e tendo como base o dispositivo de afinação, foi criado um molde que permitiu obter o dispositivo de apoio que se mostra na Figura 2.21. Apesar de ter material em excesso, especialmente resina, este apoio apresentou elevada resistência e rigidez, podendo vir a ser otimizado na sua geometria através da redução de material e consequente diminuição de volume.



**Figura 2.21 - Modelo real do apoio da meia cana**

### **2.5.3 - RESULTADO**

A Figura 2.22 mostra o dispositivo após ligação do apoio à meia-cana, resultado do protótipo final.



**Figura 2.22 - Modelo real do protótipo final**

Este capítulo descreve o procedimento para a avaliação, validação e otimização do protótipo desenvolvido. A avaliação do comportamento estrutural foi executado em ambiente laboratorial, com recurso a um rolo de treino. Paralelamente, de modo a avaliar a força exercida pelo atleta com a perna amputada, foram desenvolvidas duas células de carga para intercalar entre a meia-cana e o apoio. Posteriormente, com base na força máxima registada experimentalmente em condições limite, foi desenvolvido um modelo numérico de elementos finitos que permitiu otimizar a geometria do apoio.

### **3.1 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO**

Para proceder à avaliação do protótipo em laboratório entendeu-se ser importante monitorizar a força exercida pelo atleta na meia cana e no apoio desta. Optou-se por projetar e colocar duas células de carga nos dois pontos de ligação entre a meia cana e o apoio (vd.,Figura 3.1) e, assim, registar os valores das forças que a meia cana transmitia ao apoio.



**Figura 3.1 - Zona de ligação entre a meia cana e o apoio**

### 3.1.1 - EXECUÇÃO DE DUAS CÉLULAS DE CARGA

Dada a complexidade da geometria, as células de carga disponíveis em laboratório não preenchiam os requisitos para a sua colocação em condições de avaliação e registo. Optou-se assim por desenvolver duas células de carga. A opção passou por criar dois dispositivos em forma de U (vd., Figura 3.2), para uma maior facilidade de maquinação. O conceito das células de cargas desenvolvidas recorre ao aproveitamento da deformação das duas vigas que incorporam o dispositivo em forma de U.

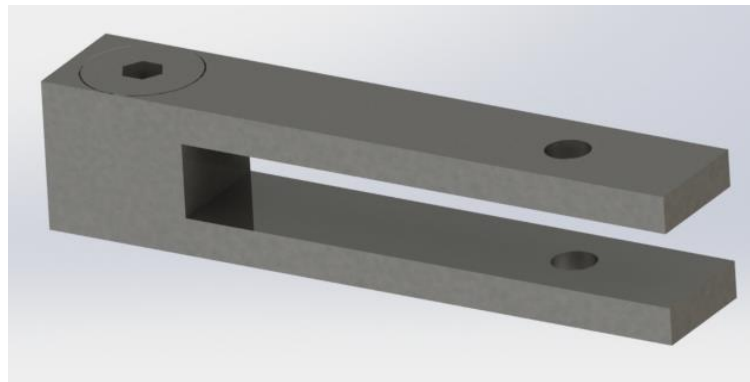


Figura 3.2 - Modelo 3D da célula de carga

Para o fabrico destes dispositivos foi utilizada uma liga de aço inoxidável, visto ser o material disponível no laboratório de mecânica aplicada e reunir propriedades mecânicas adequadas para esta aplicação. O procedimento de maquinação iniciou-se pelo corte do material e retificação numa fresadora convencional. Posteriormente foram executadas as devidas furações, abertura das roscas necessárias e retificação final numa fresadora, de modo a garantir a simetria dos componentes. Por fim, procedeu-se ao polimento das peças, apenas para garantir características estéticas (vd., Figura 3.3).

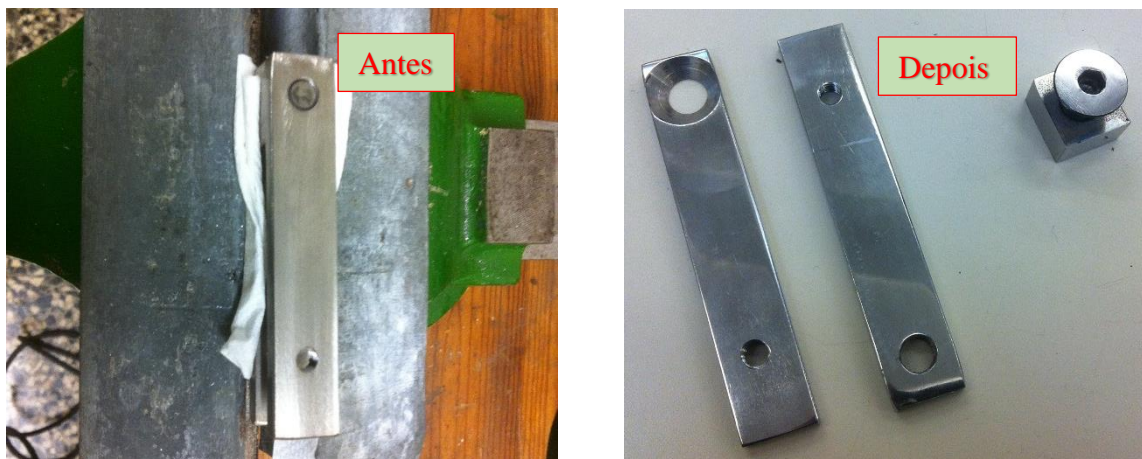


Figura 3.3 - Peças polidas

Procedeu-se à montagem das peças entre a meia cana e o apoio (vd.,Figura 3.4), tendo-se verificado os alinhamentos e rigidez do sistema. Com a componente estrutural concluída, prosseguiu-se para a parte de instrumentação.



Figura 3.4 - Estrutura das células de carga montadas no Dispositivo

### 3.1.2 - EXTENSOMETRIA

A extensometria elétrica por resistência pode ser definida como uma técnica experimental que permite avaliar a deformação originada num material sob carregamento ou sob efeito da temperatura, mediante a variação da resistência de extensómetros colados na superfície de medição. Um extensómetro é assim um a resistência elétrica embebida numa matriz que estabelece, após colagem, a ligação entre a resistência elétrica e o material a avaliar (vd.,Figura 3.5).

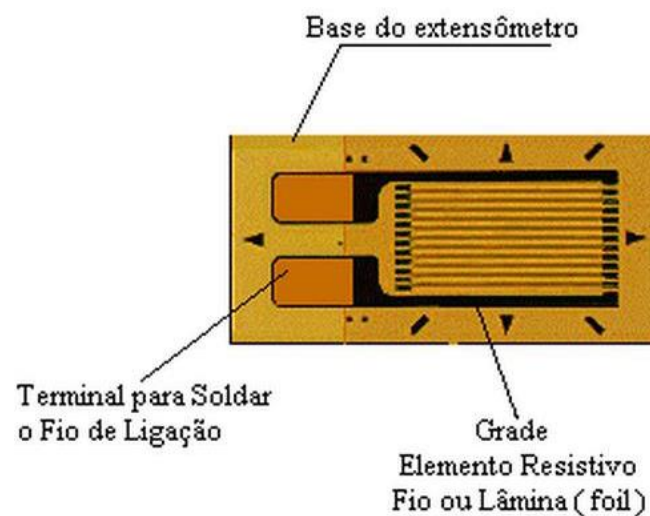


Figura 3.5 - Extensómetro (Portnoi, 2014)

Os extensómetros são uma ferramenta indispensável na avaliação experimental de tensões. Este tipo de metodologia possui diversas vantagens, onde se destacam: alta precisão de medida, baixo custo, excelente linearidade, excelente resposta dinâmica, fácil instalação, pode ser imerso em água ou em atmosfera de gases corrosivos (com tratamento adequado) e possibilita realizar medidas à distância. (Portnoi, 2014)

### **Princípio de funcionamento dos extensómetros**

Um extensómetro elétrico de resistência é constituído por um fio muito fino (grelha) colado sobre uma folha, também fina, designada por suporte do extensómetro, grande parte do comprimento do fio é distribuído segundo uma direção, designada por x na figura. Os terminais permitem a soldadura dos cabos de ligação ao instrumento de leitura.

Quando se pretende conhecer a deformação duma estrutura, segundo uma dada direção, cola-se um extensómetro na estrutura com os fios paralelos a essa direção. Qualquer deformação a que a estrutura fique sujeita, será transmitida aos fios através da camada de cola e do material de suporte do extensómetro. Ora, a variação de resistência elétrica do fio está relacionada com a sua deformação longitudinal e sabe-se que a resistência elétrica de um condutor de seção uniforme é dada pela equação seguinte.

$$R = \rho \cdot (L/A) \tag{3.1}$$

Um extensómetro transforma uma deformação numa variação proporcional da sua resistência elétrica. A relação entre a deformação ( $\epsilon = L/L_0$ ) e a variação de resistência de um extensómetro é dada pela equação 3.2.

$$K\epsilon = \frac{\Delta R}{R_0} \tag{3.2}$$

As variações de resistência num extensómetro são normalmente muito pequenas, resultantes das pequenas deformações dos componentes onde estão colados. Para analisar esses tipos de variação de resistência recorre-se a uma montagem em Ponte de Wheatstone. (Silva, 1997).

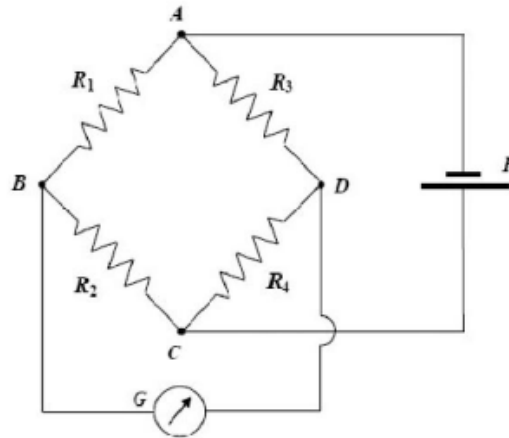


Figura 3.6 - Ponte de Wheatstone (Silva, 1997)

### Procedimentos usados na instalação de extensômetros

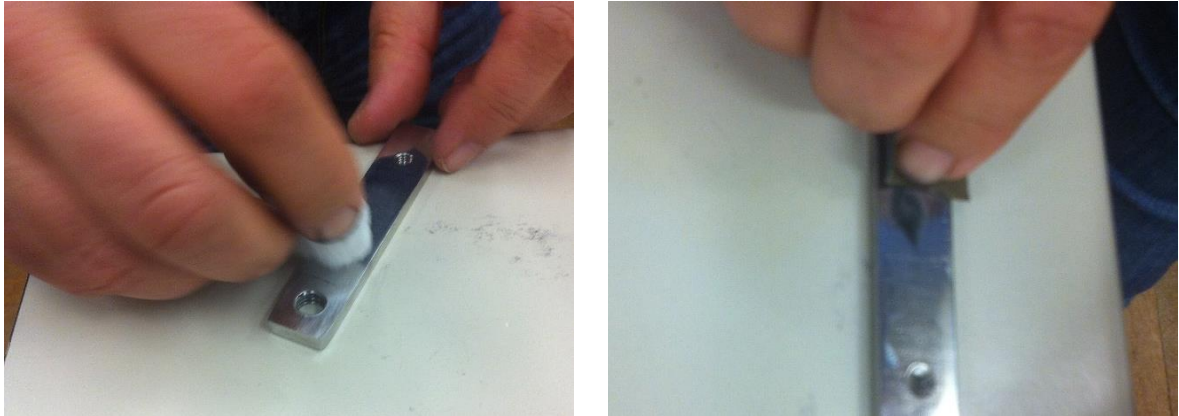
A fiabilidade das leituras efetuadas com extensômetros está diretamente relacionada com a aderência entre a superfície em estudo e a do extensómetro. Qualquer imperfeição ocorrida durante a fixação do extensómetro irá, posteriormente, gerar interpretações erróneas das deformações que tenham ocorrido. Desta forma, tornam-se necessários cuidados na instrumentação. Os extensómetros podem ser fixados em qualquer material sólido, desde que a sua superfície tenha sido perfeitamente preparada.

Assim sendo, para uma correta instalação dos extensómetros deve-se proceder de acordo com o que se enumera, e que foi aplicado na instrumentação das células desenvolvidas.

### Desengorduramento e alisamento da superfície

O primeiro passo de preparação da superfície é o desengorduramento. Esta etapa é realizada com o objetivo de remover da superfície gorduras, contaminantes orgânicos e resíduos químicos solúveis (vd., Figura 3.7 - a).

O segundo passo consiste na remoção de quaisquer impurezas ou contaminantes existentes, assim como a uniformização da superfície. Este procedimento deve ser executado com o apoio de lixa abrasiva, sendo a granulometria 400 indicada para garantir uma boa colagem (vd., Figura 3.7 - b) Posteriormente, com algodão limpa-se a superfície, de forma a garantir a remoção de qualquer partícula abrasiva ou impureza.



a)

b)

Figura 3.7 - a) Desengorduramento da superfície e b) Alisamento da superfície

### Criação de linhas de referência

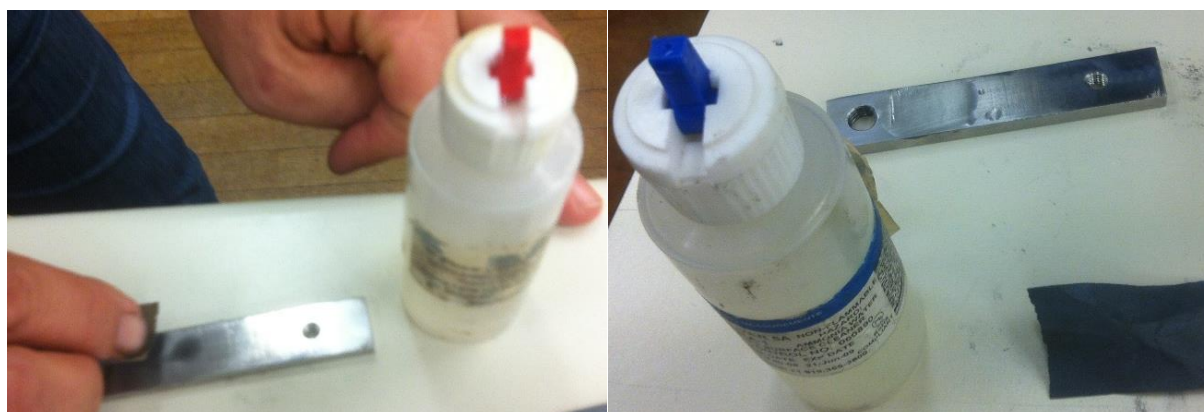
Numa terceira fase devem-se traçar linhas de orientação para o posicionamento do extensómetro, por forma a servirem de referência na operação de colagem e alinhamento do mesmo (vd.,Figura 3.8).



Figura 3.8 - Linhas de referência

### Condicionamento e neutralização da superfície

Dependendo do nível de impurezas e irregularidades da superfície a preparar, pode-se utilizar como auxiliar o recurso a um ácido fosfórico (vd.,Figura 3.9 - a). Neste caso, após a preparação, a superfície deve ser neutralizada com recurso a uma base (por exemplo amónia), e ser devidamente limpa com recurso a algodão ou compressa (vd.,Figura 3.9 - b).



a)

b)

Figura 3.9 - a) Condicionamento da Superfície e b) Neutralização da superfície

### Colagem dos extensómetros

A colagem dos extensómetros é um passo fundamental na instrumentação. Os extensómetros devem ser sempre manipulados com o devido cuidado, sendo colocados numa superfície limpa. O posicionamento do extensómetro é feito com recurso a fita-cola especial (não reativa). A fita é colada em cima do extensómetro e, após a retirada da superfície de apoio é posicionada na superfície de destino (vd., Figura 3.10 - a). Consegue-se assim garantir o devido alinhamento do extensómetro (vd., Figura 3.10 - b).



a)

b)

Figura 3.10 - a) Colocação de fita adesiva sobre o extensómetro e b) Posicionamento do extensómetro

Após o posicionamento, com o necessário cuidado levanta-se a fita adesiva juntamente com o extensómetro, de um dos lados, e procede-se à introdução da cola a utilizar. Neste procedimento está indicada a utilização de uma cola de cianoacrilato, vulgarmente designada por supercola (vd., Figura 3.11 - a). Deve ser mantida uma pressão, por exemplo com recurso a um dos dedos da mão, durante pelo menos um minuto (vd., Figura 3.11 - b). Após algum tempo, a fita adesiva pode ser removida.

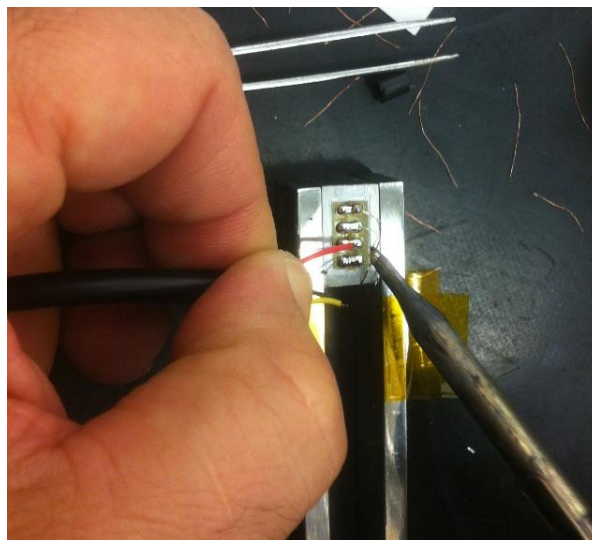


**Figura 3.11 - a) Aplicação de cola cianoacrilato e b) Carregamento para colagem do extensómetro**

### **Soldadura**

Como procedimento intermédio, se necessário devem ser soldados os fios de ligação do extensómetro. Este procedimento apenas é necessário em extensómetros que não sejam pré-cablados. Nestes casos deve recorrer-se à colagem de terminais que permitam estabelecer com segurança a ligação entre o extensómetros e os cabos de transporte do sinal (vd., Figura 3.12).

Finalmente, deve ser verificada a resistência nominal do extensómetro, de modo a verificar se coincide com a indicada pelo fabricante. Esta avaliação deve ser feita nos terminais, junto ao extensómetro e na extremidade do cabo de transporte de sinal.



**Figura 3.12 - Soldadura dos terminais**

### Proteção da zona instrumentada

No seguimento da instrumentação, deve proceder-se à proteção da zona envolvente dos extensómetros. No caso das células de carga desenvolvidas, a proteção foi executada com manga termo retrátil (vd., Figura 3.13).



Figura 3.13 - Proteção da zona instrumentada

### 3.1.3 - CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA

A calibração de células de carga é um processo fundamental e que requer registo de dados com alguma precisão. Uma célula de carga é um dispositivo que converte uma solicitação ou força que atua sobre ele, num sinal analógico elétrico. Para proceder à calibração das células de carga é fundamental garantir que as cargas efetuadas são induzidas sempre num determinado ponto e com a mesma direção. Neste caso esse ponto localiza-se nos furos introduzidos nas extremidades das vigas, tal como ilustra a Figura 3.14.

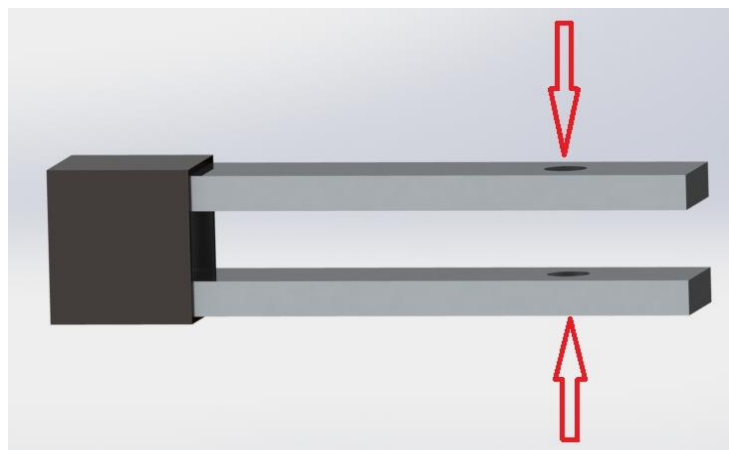


Figura 3.14 - Pontos de aplicação de cargas

Tal como exposto atrás, estas células de carga baseiam-se na deformação existente na direção do eixo da viga. O posicionamento dos extensómetros foi feito na zona de maior deformação (junto à ligação do U), mas garantindo a necessária distância de segurança em relação à zona de ligação.

Optou-se por recorrer à instalação de dois extensómetros em cada célula de carga, um em cada uma das vigas, tendo sido colado um na zona de tração e outro na zona de compressão. Deste modo, os dois extensómetros podiam ser ligados em meia ponte do tipo  $(+\varepsilon; -\varepsilon)$ , garantindo-se assim maior estabilidade de sinal. Outra possibilidade seria utilizar a informação dos dois extensómetros ligados em quarto de ponte, que apesar de não garantir tanta estabilidade de sinal, teria vantagens por contornar eventuais desalinhamentos de montagem e posicionamento. Optou-se por recorrer à segunda opção, registando os valores dos dois extensómetros e estabelecendo a média destes valores.

A distância do ponto de aplicação da solicitação P ao extensómetro é de 40 mm. Assim, o valor do momento fletor nesta secção é de 40P N.mm. Assim, desprezando a componente de corte, o valor da tensão normal de flexão na zona de medição pode ser obtida por

$$\sigma_x = \frac{M_f}{I_y} z_{\max} \quad 3.3$$

onde  $I_y = 166,67 \text{ mm}^4$  (momento de inércia da secção) e  $z_{\max} = 2,5 \text{ mm}$  (distância da linha neutra à fibra exterior), correspondente ao posicionamento do extensómetro.

Considerando simetria entre as duas vigas da célula de carga, e tendo em conta o valor do momento de inércia da secção retangular das vigas e a distância da linha neutra à zona de colagem do extensómetro, a tensão nos extensómetros é dada por

$$\sigma_x \approx 0.6P \text{ [N.mm]} \quad 3.4$$

Considerando a aplicação da lei de Hooke, e tendo em conta o material das vigas, a deformação nos extensómetros será dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \approx 3.15P \text{ [\mu\varepsilon]} \quad 3.5$$

Onde  $E = 200 \text{ GPa}$  (módulo de elasticidade do material).

Experimentalmente, para garantir que as forças fossem corretamente induzidas nos pontos de aplicação atrás definidos, procedeu-se à montagem de dois parafusos nos furos roscados, destinados à aplicação de carga. Um dos parafusos foi encastrado, através de uma prensa, sendo a carga aplicada no outro parafuso com recurso a uma pequena plataforma (vd., Figura 3.15).



Figura 3.15 - Célula de carga preparada para calibração

Para a aquisição de dados, foi utilizada uma placa de aquisição da National Instruments, modelo NI 9219, inserida num chassis NI USB-9162 (vd., Figura 3.16).



Figura 3.16 - Placa de aquisição de dados da National Instruments

Foi utilizado o software LabView para o desenvolvimento do sistema de aquisição, cujo diagrama de blocos se apresenta na Figura 3.17. As células de carga foram classificadas por A e B e os extensómetros de cada célula por 1 e 2.

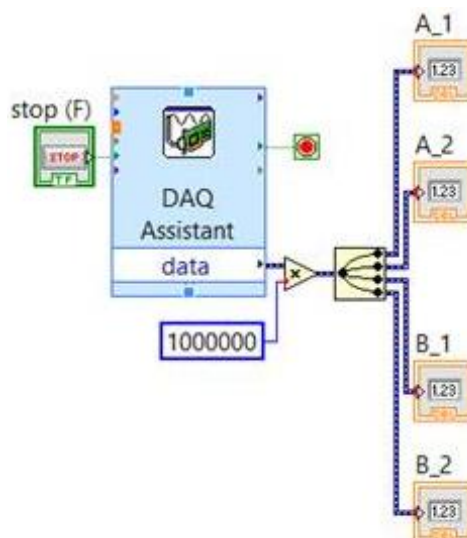
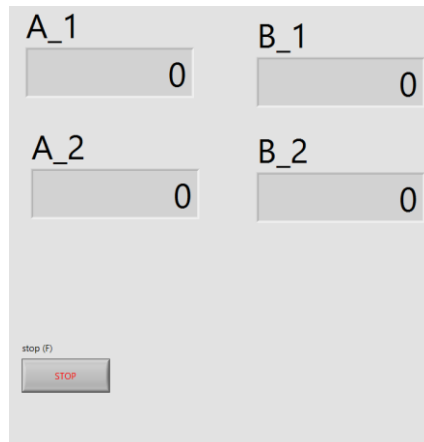


Figura 3.17 - Diagrama de blocos para aquisição de dados em processo de calibração

O painel de interface do sistema de aquisição, que inclui a utilização de um PC, é apresentado na Figura 3.18.



**Figura 3.18 - Painel de interface com o utilizador para calibração**

A calibração de cada célula de carga foi efetuada com a colocação gradual de massas calibradas na plataforma de ligação ao parafuso de aplicação de força. O registo das deformações foi efetuado em cada valor de carga aplicada, primeiro na adição de massas e posteriormente na retirada de massas, a calibração compreende o registo em subida e em descida das forças aplicadas. A Figura 3.19 mostra o procedimento de colocação de massas calibradas.



**Figura 3.19 - Calibração da célula de carga**

Foram realizados três testes de aumento de carga e três testes de alívio de carga, para cada célula. A Tabela 3.1 resume os resultados obtidos, através da célula A e a Tabela 3.2 apresenta os resultados da célula B. Em ambas as tabelas se pode observar a coerência das deformações registadas. Assim, procedeu-se à soma do módulo das deformações dos extensómetros 1 e 2 para cada patamar de força, cujo registo se apresenta também nestas tabelas.

Tabela 3.1 - Valores resultantes da célula A

F [N]	$\mu\epsilon$			
	A1	A2	ABS A2	A1+ABS A2
20	58	-60	60	118
40	125	-120	120	245
60	190	-185	185	375
80	250	-255	255	505
100	325	-320	320	645
100	325	-320	320	645
80	250	-250	250	500
60	190	-183	183	373
40	125	-120	120	245
20	62	-58	58	120
20	72	-65	65	137
40	130	-126	126	256
60	190	-190	190	380
80	250	-254	254	504
100	320	-324	324	644
100	320	-324	324	644
80	250	-254	254	504
60	192	-188	188	380
40	126	-124	124	250
20	65	-68	68	133
20	70	-65	65	135
40	130	-128	128	258
60	190	-195	195	385
80	255	-255	255	510
100	330	-335	335	665
100	330	-335	335	665
80	255	-260	260	515
60	195	-195	195	390
40	132	-134	134	266
20	60	-65	65	125

Tabela 3.2 - Valores resultantes da célula B

F [N]	$\mu\epsilon$			
	B1	B2	ABS B2	B1+ABS B2
20	64	-65	65	129
40	138	-133	133	271
60	210	-210	210	420
80	280	-282	282	562
100	360	-360	360	720
100	360	-360	360	720
80	280	-282	282	562
60	210	-208	208	418
40	138	-130	130	268
20	65	-65	65	130
20	72	-63	63	135
40	137	-132	132	269
60	207	-202	202	409
80	276	-278	278	554
100	357	-356	356	713
100	357	-356	356	713
80	276	-277	277	553
60	207	-202	202	409
40	140	-131	131	271
20	70	-60	60	130
20	70	-65	65	135
40	139	-140	140	279
60	206	-210	210	416
80	275	-285	285	560
100	355	-362	362	717
100	355	-362	362	717
80	275	-280	280	555
60	206	-212	212	418
40	134	-140	140	274
20	66	-68	68	134

Para elaborar o gráfico com a reta de calibração foi primordial chegar ao valor médio das deformações dos três ensaios, por cada patamar de 2 N. Para tal, foi elaborada a Tabela 3.3 para o valor médio de deformação na célula A e Tabela 3.4 para o valor medio de deformação na célula B.

**Tabela 3.3 - Valor médio de deformação na célula A**

A	με						Média
	Aumento de carga	Diminuição de carga	Aumento de carga	Diminuição de carga	Aumento de carga	Diminuição de carga	
20	125	135	133	137	120	118	128,0
40	266	258	250	256	245	245	253,3
60	390	385	380	380	373	375	380,5
80	515	510	504	504	500	505	506,3
100	665	665	644	644	645	645	651,3

**Tabela 3.4 - Valor médio de deformação na célula B**

A	με						Média
	Aumento de carga	Diminuição de carga	Aumento de carga	Diminuição de carga	Aumento de carga	Diminuição de carga	
20	134	135	130	135	130	129	132,2
40	274	279	271	269	268	271	272,0
60	418	416	409	409	418	420	415,0
80	555	560	553	554	562	562	557,7
100	717	717	713	713	720	720	716,7

Os gráficos da Figura 3.20e Figura 3.21 estabelecem a relação entre o valor das forças induzidas nas células de carga e a média da deformação registada.

As retas de calibração das células são traduzidas de acordo com as seguintes expressões:

Célula A:

$$y = 6.4983x - 6 \quad x = \frac{y+6}{6.4983} \quad 3.6$$

Célula B:

$$y = 7.2733x - 17.7 \quad x = \frac{y+17.7}{7.2733} \quad 3.7$$

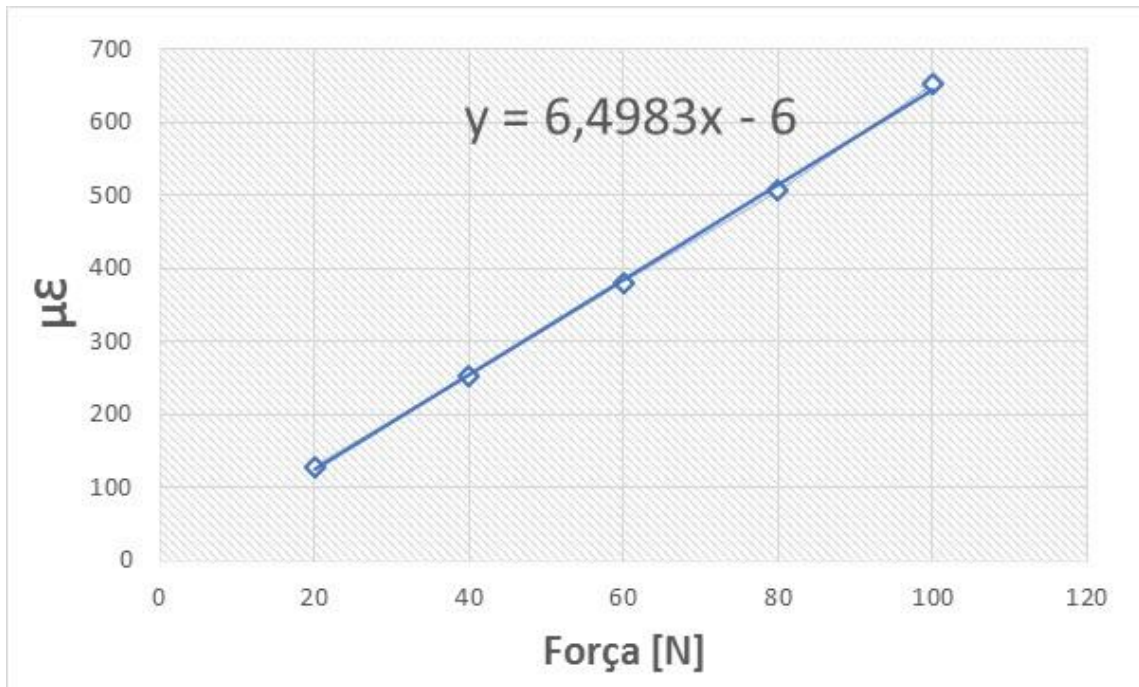


Figura 3.20 - Gráfico da reta de calibração da célula A

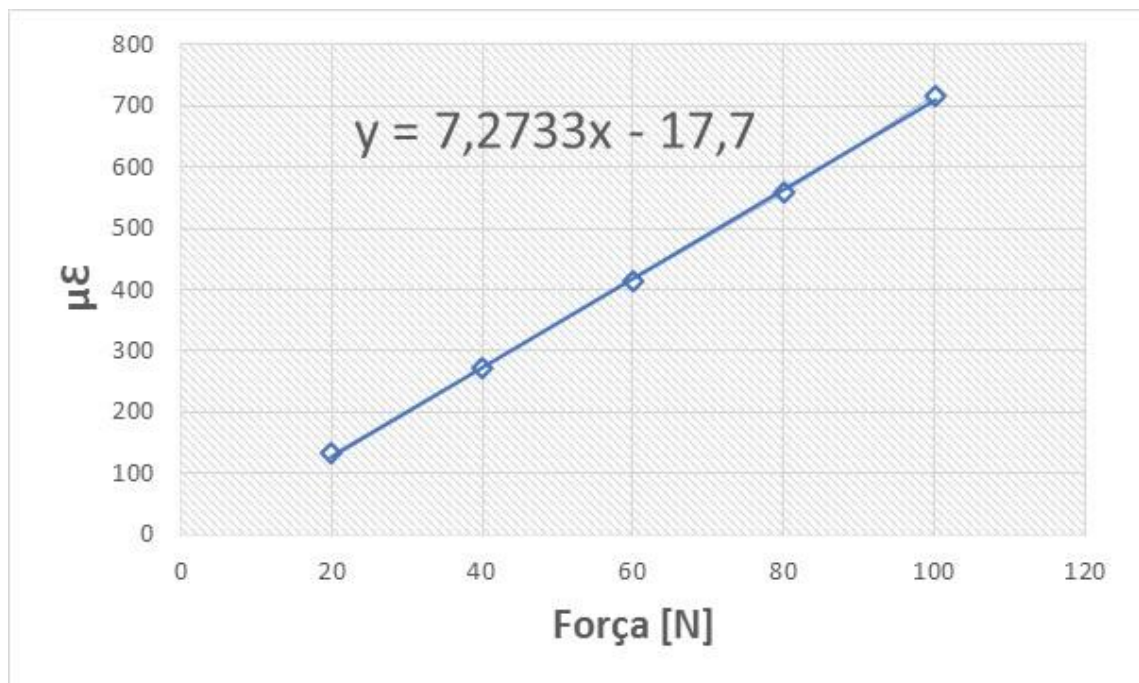


Figura 3.21 - Gráfico da reta de calibração da célula B

No seguimento da calibração efetuada, foi desenvolvido um novo diagrama de blocos (vd., Figura 3.22), em que foram tidas em conta as equações de calibração de cada célula, tendo sido criada uma aplicação que permite o registo dos dados adquiridos.

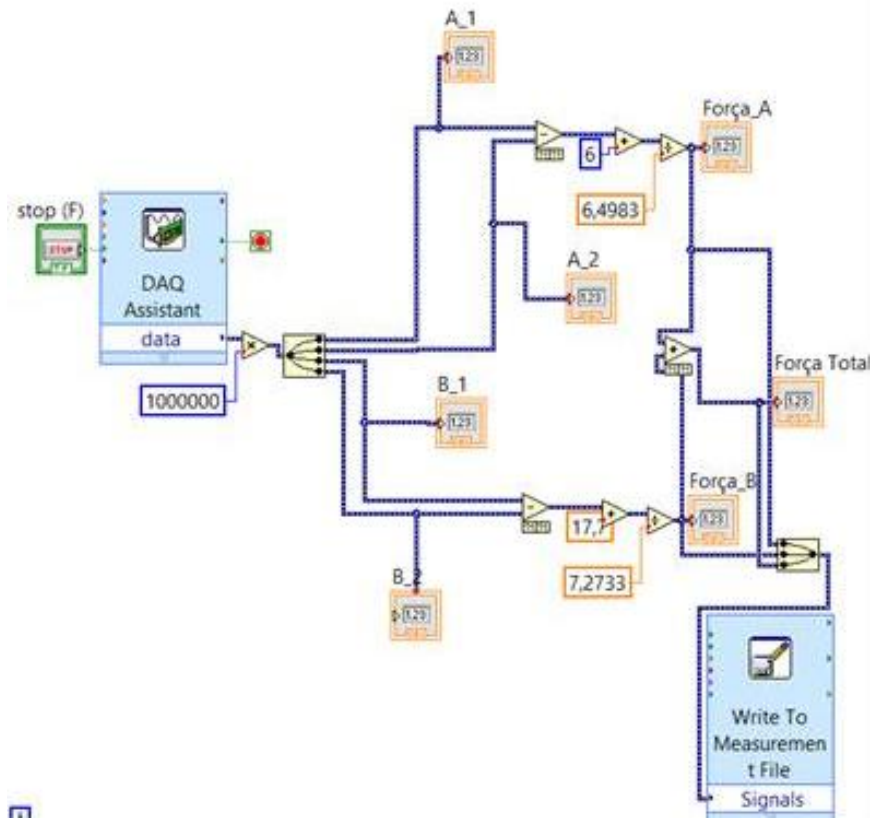


Figura 3.22 - Diagrama de blocos para aquisição de dados

Também foi elaborado um novo painel de visualização (vd.,Figura 3.23), que permite a visualização das forças induzidas nas duas células de carga e a deformação sofrida em cada extensómetro.

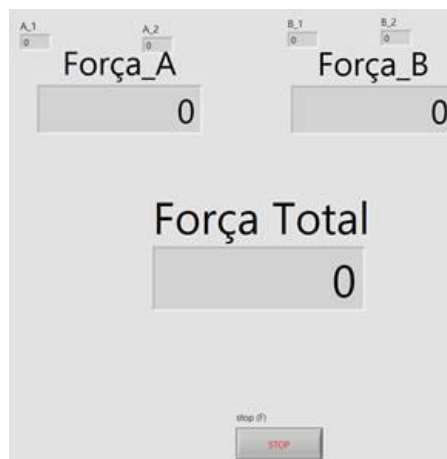


Figura 3.23 - Painel de interface com o utilizador para aquisição de dados

### 3.1.4 - AQUISIÇÃO DE DADOS NA PEDALAGEM EM ROLO

Para realizar os ensaios em laboratório foi utilizado o sistema de fixação das células de carga ilustrado na Figura 3.24 - a. Este sistema permite que a aplicação de carregamentos seja transmitida à célula de carga de forma correta, pois entre as células de carga e a meia cana foram introduzidas anilhas. O mesmo procedimento foi efetuado entre as células de carga e o apoio da meia-cana, dado que estas anilhas permitem que os esforços sejam aplicados nos pontos corretos das células de carga. A Figura 3.24 - b mostra o atleta Telmo Pinão a realizar os testes em rolo, já com o novo dispositivo instrumentado com as células de carga.



Figura 3.24 - a) Dispositivo instrumentado com as células de carga e b) Telmo Pinão a realizar testes em rolo

Foram realizados um total de sete ensaios, em três regimes diferentes. O primeiro ensaio foi realizado enquanto o Telmo procedia ao aquecimento. De seguida, foram realizados três ensaios em regime normal, ou seja, na pedalagem sentado. Por último, foram executados mais três ensaios, mas em alto regime, isto é, na pedalagem de pé.

Como seria de esperar, os ensaios, realizados na pedalagem em pé, foram claramente os que mais solicitaram o dispositivo, tendo-se obtido um valor máximo na ordem dos 630 N, como demonstra o gráfico da Figura 3.25.

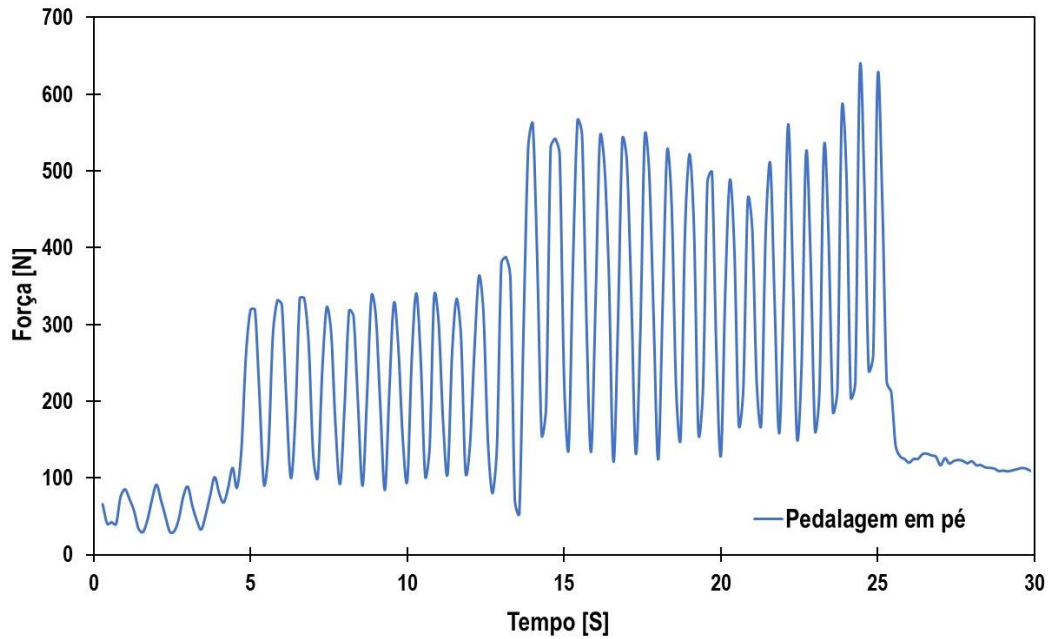


Figura 3.25 - Gráfico resultante da força induzida na pedalagem em pé

É importante realçar que cada ensaio realizado teve uma duração de cerca de noventa segundos, e no gráfico anterior apenas estão representados trinta segundos de um desses ensaios.

## 3.2 - MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Tendo em conta as etapas de desenvolvimento dos dois componentes do dispositivo de apoio, que assentou em primeiro na execução experimental do protótipo, importava estimar numericamente o comportamento estrutural do dispositivo, de modo a poder desenvolver algum trabalho de otimização. Neste sentido, foi desenvolvido um modelo numérico de elementos finitos, com recurso ao software Solidworks Simulation.

### 3.2.1 - COMPONENTES A ESTUDAR

Foram estudados os dois principais componentes do dispositivo. O modelo de elementos finitos considera o contacto entre os dois componentes, assim como a ligação entre as duas partes, modelada através da colocação de 2 pinos de ligação (vd., Figura 3.26 - b).

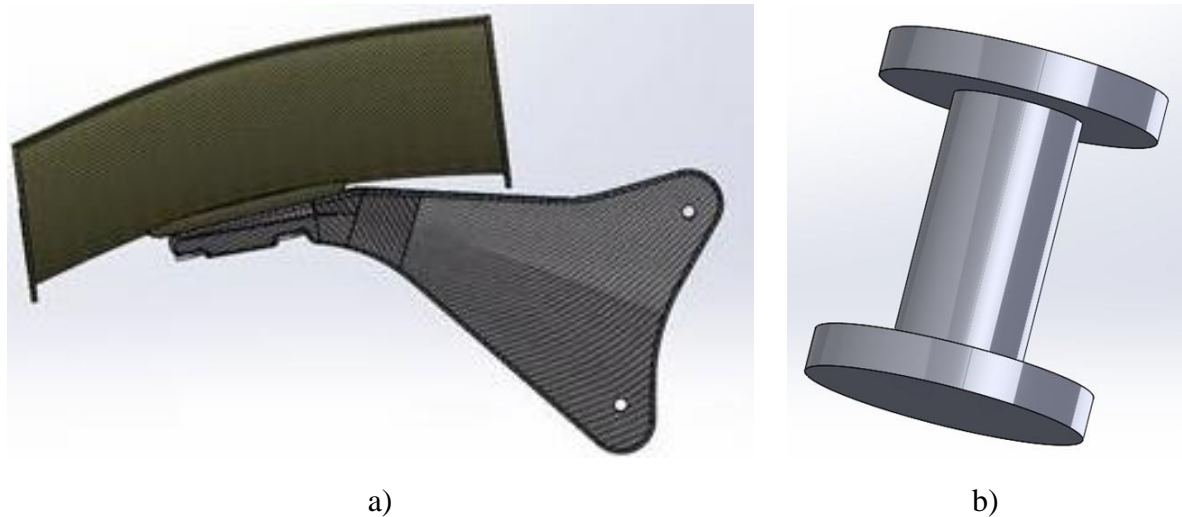


Figura 3.26 - a) Assembly das peças a estudar numericamente e b) Pino de ligação entre a meia cana e o apoio

### 3.2.2 - CONDIÇÕES DE CARGA

As condições de solicitação do modelo consideram a força de 630 N, registada no pico máximo do ensaio experimental realizado pelo atleta. Optou-se por colocar esta carga de forma distribuída ao longo da meia cana, simulando o assentamento da perna do atleta (vd., Figura 3.27)

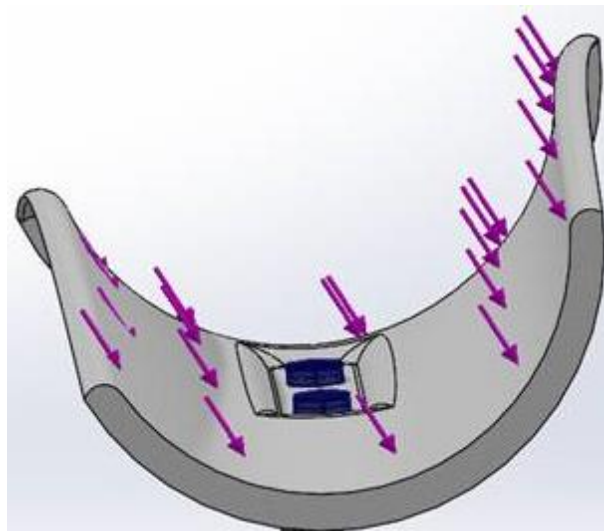


Figura 3.27 - Carga distribuída ao longo da meia cana

É importante salientar que foi feita uma orientação da força aplicada na meia cana, com uma inclinação que simula possíveis esforços laterais produzidos pelo ciclista durante a pedalada. Considera-se também na avaliação o peso próprio dos componentes do modelo (vd., Figura 3.28).

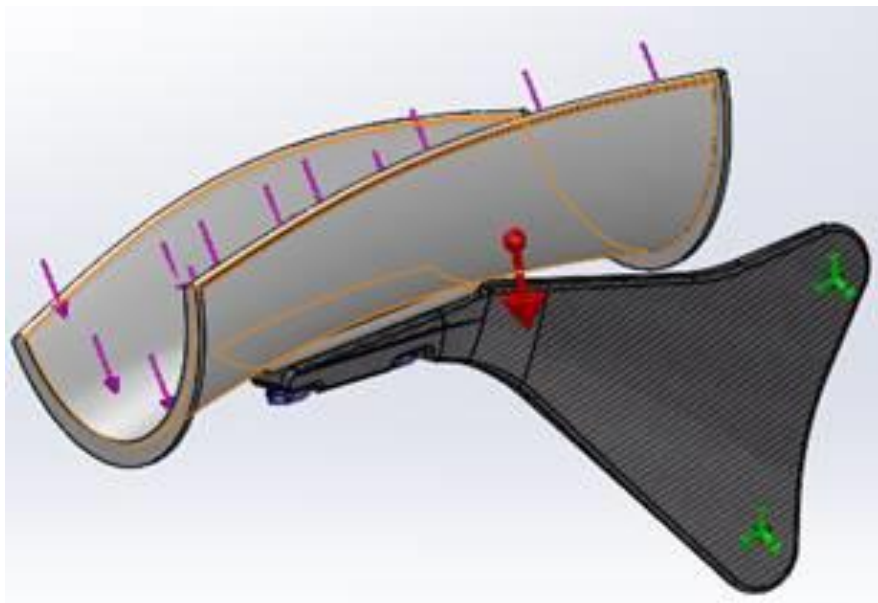


Figura 3.28 - Peso próprio do modelo considerado

### 3.2.3 - CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

As condições de fronteira do modelo consideram a ligação dos dois pontos de ancoragem ao espigão do selim. Restringem-se todos os graus de liberdade nos furos de ligação ao selim, tal como se mostra na Figura 3.29.

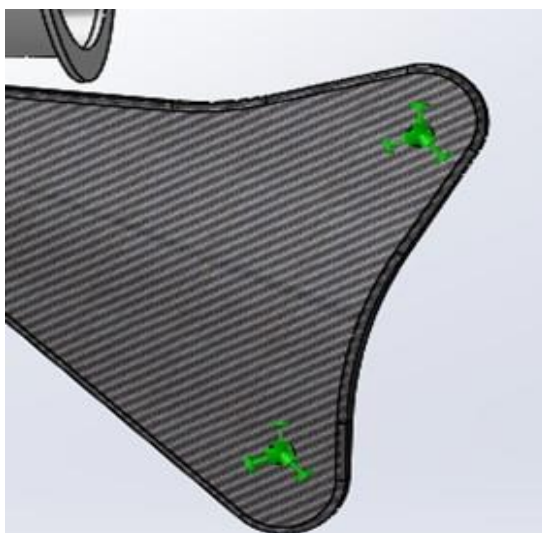


Figura 3.29 - Restrições do modelo

### 3.2.4 - PRÉ CONVERGÊNCIA DE MALHA

O modelo considera a utilização de um elemento sólido tetraédrico parabólico com 10 nós e três graus de liberdade por nó, correspondentes às três translações. Este elemento considera a introdução de fibra cruzada carbono/kevlar nas características do material. Para efetuar a pré convergência de malha, foram realizados dez estudos em que se variou a dimensão média do elemento, e consequentemente o número de elementos do modelo. Para cada uma das situações se registou o valor do deslocamento máximo, tendo sido elaborado o gráfico de convergência de malha que se representa na Figura 3.30. A análise ao gráfico permite identificar que a convergência se inicia a partir de 78464 elementos, que corresponde a uma dimensão de 4 mm para o elemento.

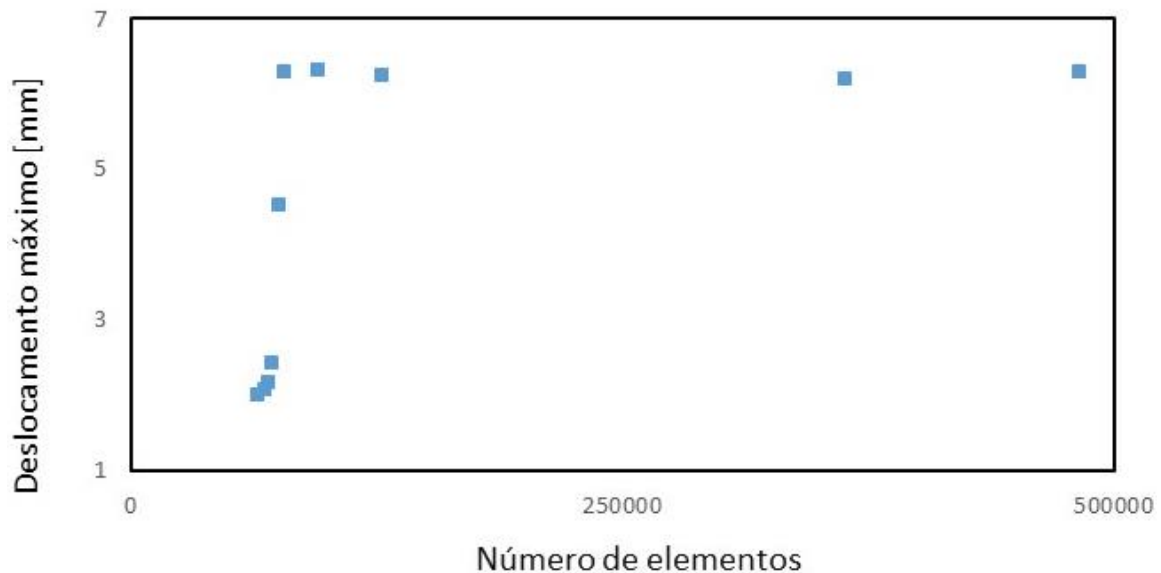


Figura 3.30 - Gráfico da pré convergência de malha

### 3.2.5 - OTIMIZAÇÃO

Tendo como base o modelo atrás definido foi definido um estudo de otimização ao apoio da meia-cana de modo a reduzir a sua massa. Tal como se representa na Figura 3.31, entendeu-se como possível proceder à retirada de material na zona central do apoio, correspondente a um triângulo com dimensão variável.

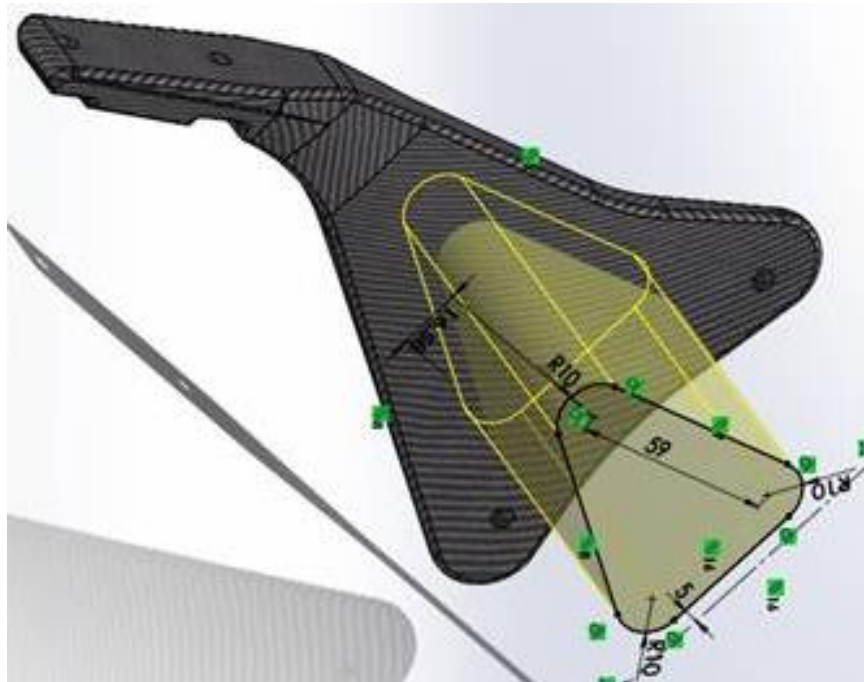


Figura 3.31 - Sketch para a execução da otimização

O estudo de otimização considera como variáveis as dimensões do triângulo de projeção para a retirada de massa. Como constrangimentos da otimização impõe-se o limite máximo de 0,6 mm para deslocamento na extremidade do apoio da meia cana e um limite máximo de 220 MPa nas tensões de von Mises. Foram ainda definidos constrangimentos de caráter geométrico, de modo a que a espessura fosse mantida em padrões aceitáveis. A função de otimização considera a minimização do volume do apoio.

A Figura 3.32 ilustra alguns dos cenários obtidos automaticamente pelo software de cálculo.

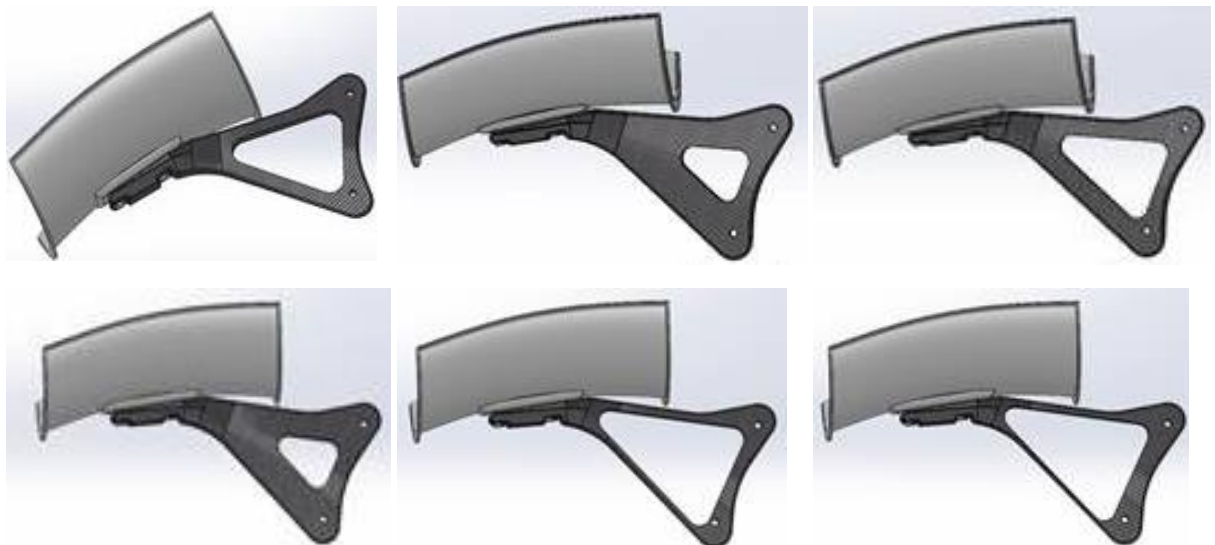


Figura 3.32 - Exemplos de cenários estudados automaticamente pelo estudo de otimização

A Figura 3.33 apresenta o resultado final da otimização.

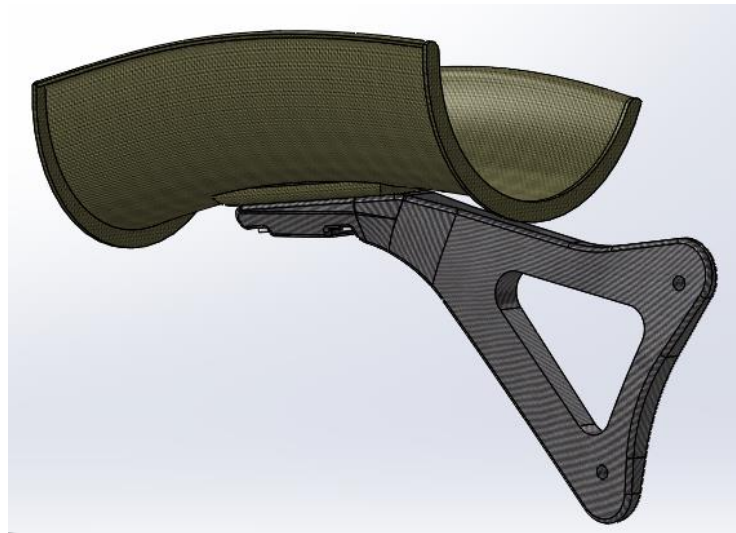


Figura 3.33 - Modelo virtual resultante da otimização

### 3.2.6 - CONVERGÊNCIA DE MALHA

Com a otimização concluída, torna-se necessário executar o estudo final. Atendendo a que a geometria da estrutura do apoio da meia cana foi alterada, entendeu-se por conveniente proceder a novo estudo de convergência de malha. Seguindo a mesma metodologia que havia sido seguida no estudo de pré-convergência. O gráfico da Figura 3.34 representa a curva de convergência do modelo.

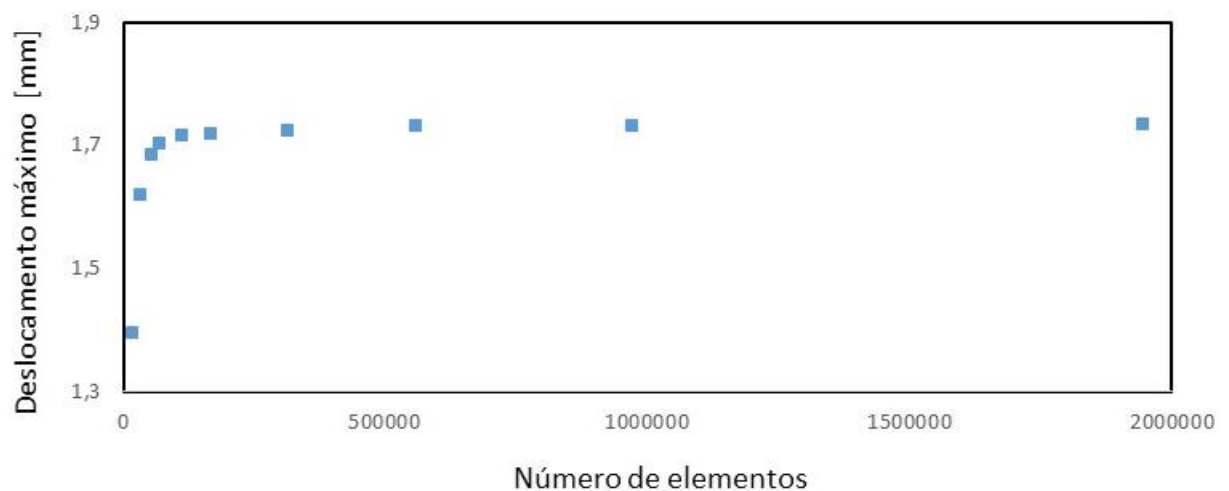


Figura 3.34 - Gráfico da convergência de malha

Concluiu-se assim que a malha mais indicada para o estudo final teria a dimensão de 2 mm, o que corresponde a 313187 elementos. Apesar de se observar a existência de convergência a partir de 3 mm, considerou-se mais indicado utilizar o elemento de 2 mm dado que este valor corresponde à espessura mínima de algumas zonas do dispositivo.

### 3.2.7 - RESULTADOS NUMÉRICOS NO ESTUDO FINAL

Depois de a otimização ter sido feita partiu-se com o modelo final para um último estudo com as solicitações e restrições impostas anteriormente, com o objetivo de ser estimado mais uma vez o comportamento estrutural do dispositivo.

#### DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE VON MISES

A Figura 3.35 ilustra a distribuição das tensões de von Mises no dispositivo. Na amplitude de escala definida, as zonas mais avermelhadas mostram a localização da concentração de tensões na ordem, que corresponde ao valor máximo da tensão de von Mises, cerca de 217 Mpa.

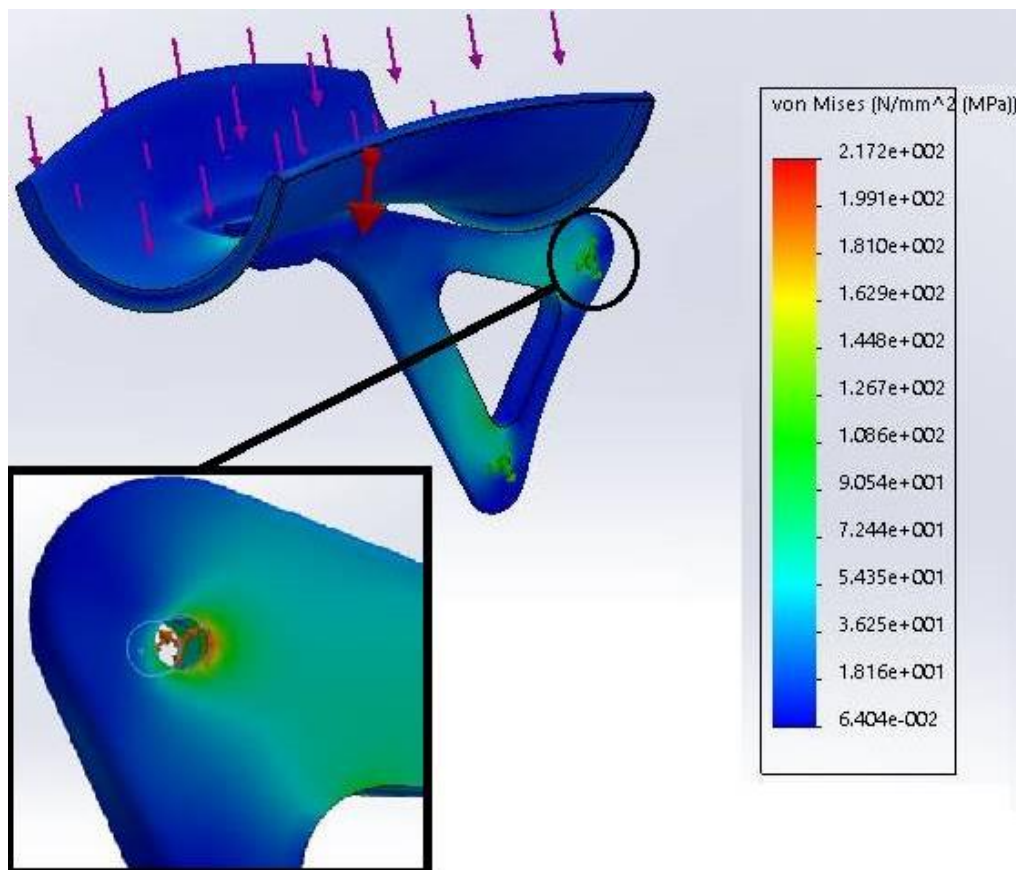


Figura 3.35 - Resultado das tensões de von Mises no estudo final

Na Figura 3.36 está representada a zona do dispositivo onde as tensões de von Mises são superiores a 90 MPa. Pode-se observar que, à exceção dos pontos de encastramento, todo o modelo está submetido a tensões inferiores a 90 MPa.

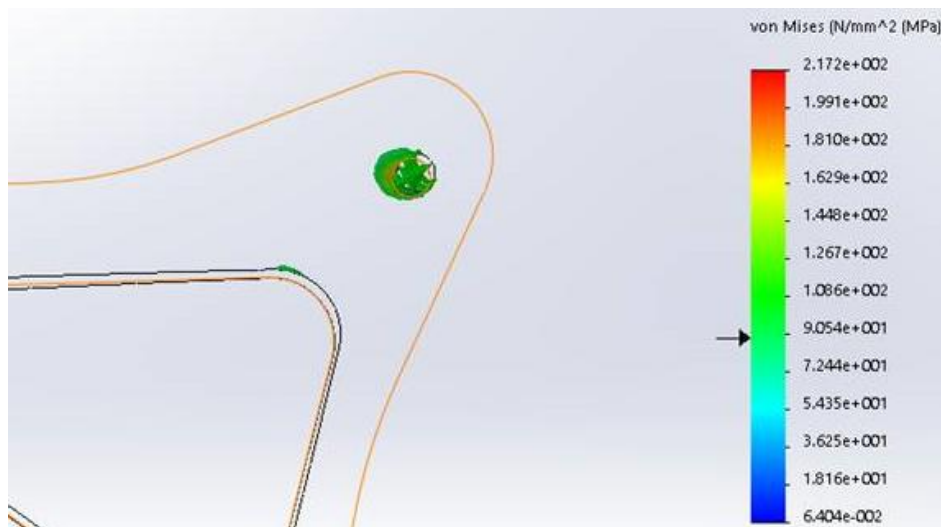


Figura 3.36 - Zona com tensão de von Mises superior a 90 Mpa

O valor máximo de tensões é de 217.2 MPa e ocorre na zona de encastramento, tal como seria de esperar. Este resultado mostra que deve ser tido o devido cuidado no reforço desta zona quando for produzido o protótipo otimizado.

## DESLOCAMENTOS

Relativamente à distribuição dos deslocamentos resultantes, verifica-se que a zona mais crítica se encontra nas extremidades da meia cana, com um valor máximo de 1.724 mm. Este valor é aceitável para as considerações do modelo, mostrando que o dispositivo é suficientemente rígido. Além disso, a obtenção deste resultado tem por base a solicitação com uma inclinação na força aplicada.

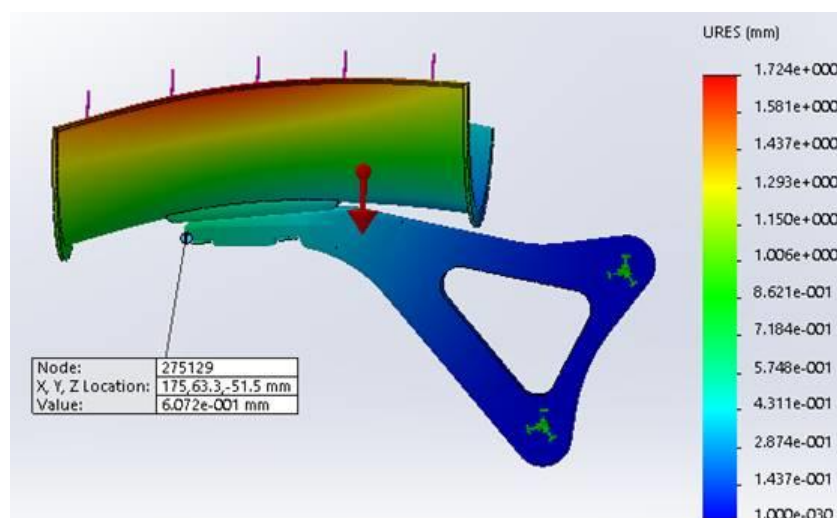


Figura 3.37 - Distribuição dos deslocamentos resultantes na meia cana e no seu apoio

### 3.3 - RESULTADO FINAL

A Figura 3.38 mostra as imagens do protótipo final, sendo visível a redução de peso obtida com o processo de otimização, em cerca de 20%.



a)



b)

**Figura 3.38 - a) Pesagem do apoio antes da otimização e b) pesagem do apoio após otimização**

---

## CAPÍTULO

# 4

---

### OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE LIGAÇÃO AO SELIM

No seguimento dos estudos numéricos, entendeu-se como necessário proceder à otimização das zonas de ancoragem do dispositivo ao espigão do selim. De fato, tal como os resultados numéricos demonstram, estes pontos apresentam as tensões mais elevadas, em parte devido à concentração de tensões, dado que são zonas de descarga da solicitação (*vd.*, Figura 4.1).



**Figura 4.1 - Pontos de ancoragem**

#### 4.1 - PONTO DE ANCORAGEM SUPERIOR

A fim de diminuir a concentração de tensões e aumentar a resistência e rigidez da zona de ancoragem superior, visto ser o ponto mais crítico de todo o modelo, decidiu-se projetar uma nova abraçadeira. Esta abraçadeira incorpora duas particularidades importantes: a área de contato com o apoio, que passou aproximadamente para o dobro da área utilizada nas abraçadeiras anteriores e o aumento de apenas um parafuso de fixação para dois parafusos de fixação, diminuindo assim a concentração de tensões e aumentando a resistência e rigidez do conjunto. Na Figura 4.2 está representado o modelo 3D da nova abraçadeira projetada.

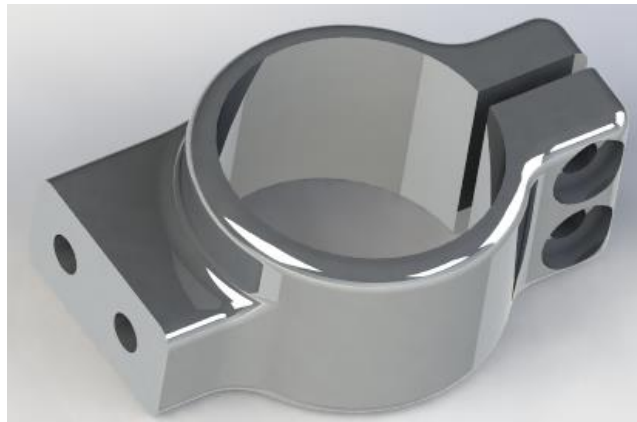


Figura 4.2 - Modelo 3D da abraçadeira de duplo parafuso

#### 4.2 - PONTO DE ANCORAGEM INFERIOR

O ponto de ancoragem inferior, embora alvo de concentração de tensões, apresentava uma gama de valores inferior ao da ancoragem superior. Deste modo, pensou-se então em desenvolver uma interface entre a abraçadeira e o apoio da meia cana (vd., Figura 4.3), visto que desta forma se iria conseguir um método de fixação mais leve em relação à abraçadeira criada para o ponto de ancoragem superior. Por outro lado esta interface tinha como objetivo o aumento da área de contato, garantindo assim a diminuição da concentração de tensões e o aumento da resistência e da rigidez, em particular a solicitações de flexão no plano perpendicular ao do plano principal do apoio.

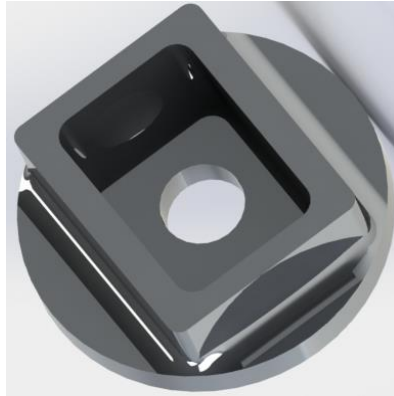


Figura 4.3 - Modelo 3D do interface entre abraçadeira e o apoio.

### 4.3 - MAQUINAÇÃO DAS PEÇAS

A maquinação das peças foi executada em CNC tendo-se recorrido ao apoio de um dos patrocinadores do atleta Telmo Pinão, a empresa PROTOTYPE, que se dedica ao desenvolvimento de componentes para ciclismo de alta competição. O material selecionado para o fabrico destas peças foi a liga de alumínio 7075-T6, que apresenta uma tensão de cedência de aproximadamente 500 MPa.

### 4.4 - RESULTADOS

Depois de se proceder a toda a montagem das novas peças, verificou-se um grande aumento da estabilidade e robustez do conjunto. Importa referir que, para além da maquinação e do material, a empresa PROTOTYPE também cedeu parafusos em liga de titânio, diminuindo assim ainda mais o peso do dispositivo. A Figura 4.4 exhibe, o resultado do conjunto, com as novas peças montadas.



Figura 4.4 - Resultado das peças maquinada pela empresa PROTOTYPE



---

## CAPÍTULO

# 5

---

### VALIDAÇÃO FINAL EM ESTRADA

No seguimento da execução do protótipo final do dispositivo, importava proceder a testes em contexto real para aferir o desempenho e conforto do dispositivo para o atleta. Deste modo foi convidado o atleta Telmo Pinão que procedeu a diversos testes de estrada com o dispositivo. A Figura 5.1 mostra o dispositivo final já conectado ao espigão do selim e colocado na bicicleta.



**Figura 5.1 - Dispositivo totalmente terminado**

A Figura 5.2 mostra alguns dos teste de estrada que foram efetuados, e que incluíram retas, subidas e descidas, com pedalada sentada e em pé. No seguimento dos testes o atleta reportou que este novo dispositivo era extremamente rígido e estável comparativamente com o dispositivo anterior, cumprindo os requisitos que ambicionava, incluindo a componente estética e a integração da bicicleta de alta competição que é por ele utilizada.



Figura 5.2 - Primeiro teste em estrada

---

## **CAPÍTULO**

# **6**

---

## **CONCLUSÃO**

No âmbito da Engenharia Mecânica, a área de projeto de equipamentos e sistemas mecânicos tem assumido elevada importância no contexto de inovação e desenvolvimento. Neste domínio podem ser aplicados todos os conhecimentos e competências adquiridas ao longo do percurso académico, sendo sem dúvida uma área bastante interessante e muito abrangente. Esta abrangência agrega diversas áreas emergentes, onde se enquadra a Biomecânica, sendo neste domínio do conhecimento que se desenvolveu o projeto que foi descrito ao longo deste relatório.

Foi desenvolvido e testado um protótipo de um dispositivo de apoio para a prática de ciclismo adaptado direcionado para um atleta amputado transtibial, que pratica ciclismo adaptado de alta competição. O desenvolvimento deste dispositivo foi uma “aventura” que envolveu a aquisição e aplicação de diversas competências, nomeadamente numéricas e experimentais e que exigiu a superação de algumas dificuldades. Uma das principais dificuldades assentou na decisão a tomar relativamente ao tipo de dispositivo a desenvolver. Estático ou articulado, envolvendo totalmente a coxa ou servindo apenas de apoio, com materiais compósitos ou metálicos, foram algumas das hipóteses que importou testar para decidir.

Este trabalho exigiu a procura de apoio junto do tecido industrial, em particular em empresas de produção e fabrico de materiais compósitos e de ligação ao ciclismo de alta competição. Este apoio foi fulcral para o sucesso do trabalho, tendo sido de elevada importância no contexto da aprendizagem e competências que foram adquiridas ao longo do desenvolvimento do projeto.

Além do desafio concetual, diversas metodologias de aplicação tiveram de ser introduzidas no desenvolvimento do trabalho. Neste âmbito destaca-se a necessidade de executar moldes para fabrico dos componentes sem recorrer a maquinaria assistida por computador, que permitiu a introdução da prototipagem rápida no processo de desenvolvimento.

Também se pode destacar a necessidade de avaliar as forças exercidas pelo atleta durante a pedalada, que transformou aquilo que inicialmente era um problema numa mais-valia, permitindo a aplicação de metodologias de instrumentação e de análise experimental de tensões.

Este projeto permitiu ainda o recurso à simulação numérica, através do método dos elementos finitos, que além da avaliação estrutural do dispositivo, foi introduzida como metodologia de otimização, permitindo a redução da massa do protótipo inicial.

Em suma, cumpre afirmar que este projeto foi uma experiência imensamente gratificante e bastante enriquecedora, e que além de permitir o contacto com a realidade do meio industrial, possibilitou a aquisição de um conjunto de competências de extrema importância tanto ao nível da aprendizagem profissional como em termos pessoais. O sucesso obtido no dispositivo final e a possibilidade de contribuir para a melhoria do desempenho do Atleta Telmo Pinão, na prática do ciclismo adaptado, foram aspetos que justificaram todo o esforço e dedicação apostas a este trabalho e que deixam a certeza de uma escolha acertada.

## BIBLIOGRAFIA

AE-Isec, 2013. *Noticia*. [Online]

Available at: <http://aeisec.pt/index.php/component/k2/item/48-telmopinao.html>

[Acedido em 20 3 2014].

Alves, A., 2012. *Diario das beiras*. [Online]

Available at: <http://www.asbeiras.pt/2012/12/equipa-do-isec-cria-protese-e-apoio-lateral-para-atleta-amputado-da-perna-esquerda/>

[Acedido em 13 3 2014].

C.Pereira, 2013. *Fadiga em Elementos Tubulares de Matriz Epoxídica Reforçada com Fibras de Carbono sujeitos a Solicitações de Torção e Flexão*, Coimbra: isec.

Diariodemallorca, 2014. *Diariodemallorca*. [Online]

Available at: <http://www.diariodemallorca.es/sociedad-cultura/2011/08/11/penya-establiments-organiza-nacionales-ciclismo-adaptado/694166.html>

[Acedido em 25 6 2014].

Europe, B. L. I., 2012. *Zimbio*. [Online]

Available at: <http://www.zimbio.com/photos/Juan+Jose+Mendez>

[Acedido em 26 6 2014].

Facebook, 2014. *Telmo*. [Online]

Available at:

[https://www.facebook.com/telmo.pinao/media\\_set?set=a.147813211905585.22016.100000307206396&type=3](https://www.facebook.com/telmo.pinao/media_set?set=a.147813211905585.22016.100000307206396&type=3)

[Acedido em 22 8 2014].

Francisco Afonso, M. N., 2013. *Otimização de um Apoio de Perna para a Bicicleta dum Ciclista Para-Olímpico*, Coimbra: DEM-ISEC.

freebike, 2012. *freebike*. [Online]

Available at:

[http://www.freebike.pt/v1.5/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1021:telmo-pinao-participa-domingo-na-2o-prova-taca-portugal-maratonas-btt&catid=45:noticias&Itemid=51](http://www.freebike.pt/v1.5/index.php?option=com_content&view=article&id=1021:telmo-pinao-participa-domingo-na-2o-prova-taca-portugal-maratonas-btt&catid=45:noticias&Itemid=51)

[Acedido em 13 3 2014].

Jorge, E., s.d. *Forum Deficiente*. [Online]

Available at: <http://www.deficiente-forum.com/ciclismo/cisclista-telmo-pinao/>

[Acedido em 10 7 2014].

Kaw, A., 1997. *Mechanics of Composite Materials*,. s.l.:CRC Press.

Maranha, V, A. C., 2012. *Otimização de uma prótese e pedal instrumentado para a prática de ciclismo*, Coimbra: ISEC.

Melissainau, 2014. *Melissainau*. [Online]

Available at: <http://melissainau.com/2012/04/25/the-quest-for-the-magic-tricycle/>

[Acedido em 25 6 2014].

P. Ferreira, L. R. V. L. I. C. J. A. e. T. P., 2013. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA PRÓTESE PARA CICLISTAS COM AMPUTAÇÃO TRANSTIBIAL. 5º CONGRESSO NACIONAL DE BIOMECÂNICA.

Paketabike, 2012. *Paketabike*. [Online]

Available at: <http://paketabike.wordpress.com/tag/magnesium-tandem-bicycle/>

[Acedido em 25 6 2014].

parolímpico, C., 2012. *Comité parolímpico*. [Online]

Available at:

<http://www.comiteparalimpicoportugal.pt/Paginas/detalhemodalidade.aspx?IDMod=4&Source=/Paginas/modalidades.aspx>

[Acedido em 25 6 2014].

Portnoi, M., 2014. *ee cis*. [Online]

Available at: <http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>

[Acedido em 12 8 2014].

Roseiro, 2004. *Detecção do Dano e Identificação Estrutural com Redes Neurais Artificiais*. s.l.:Universidade de Coimbra.

Roseiro, L. F. P. L. V. C. I. A. J. e. P. T., 2013. Dispositivo Mecânico para a Prática de Ciclismo Adaptado com Competição em Classe C2. 5º *Comgreço Nacional de Biomecânica*.

Saraiva, P., 2011. *Pcand*. [Online]

Available at: <http://www.pcand.pt/noticias/pedalando-pelo-ciclismo-adaptado>

[Acedido em 14 3 2014].

Silva, R., 2003. *Compósito de resina poliuretano derivado de óleo mamona e fibras vegetais*, S.Paulo: Universidade de S.Paulo .

Silva, A. V. \. J. D., 1997. *INTRODUÇÃO À EXTENSOMETRIA ELÉCTRICA*. [Online]

Available at: <file:///C:/Users/User/Downloads/Extensometria%20Pdf.pdf>

[Acedido em 12 8 2014].

smlosone, 2014. *smlosone*. [Online]

Available at: <http://www.smlosone.ti.ch/node/378>

[Acedido em 6 7 2014].

UCI, 2014. Guia de Classificação de para-ciclismo. *Guia de Classificação de para-ciclismo*, 4 8.

UVP, 2014. *Federação Portuguesa de Ciclismo*. [Online]

Available at: [http://www.uvp-fpc.pt/index\\_noticia\\_ver.php?id\\_noticia\\_new=3572&pag=1](http://www.uvp-fpc.pt/index_noticia_ver.php?id_noticia_new=3572&pag=1)

[Acedido em 3 6 2014].

Velho, C.-M. o., 2013. *Câmara municipal de Montemor o Velho*. [Online]  
Available at: [http://www.cm-montemorvelho.pt/aconteceu\\_2013/20130805\\_1.asp](http://www.cm-montemorvelho.pt/aconteceu_2013/20130805_1.asp)  
[Acedido em 2 4 2014].

Ventura, A. M. F., 2009. *Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas*, Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Wikipedia, 2006. *Commons*. [Online]  
Available at: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Philipp\\_Bonadimann\\_Handbike-2.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Philipp_Bonadimann_Handbike-2.jpg)  
[Acedido em 25 6 2014].

wikipedia, 2014. *wikipedia*. [Online]  
Available at: [http://it.wikipedia.org/wiki/Fabrizio\\_Macchi](http://it.wikipedia.org/wiki/Fabrizio_Macchi)  
[Acedido em 3 7 2014].