



Projecto

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

## ***Estudo de Pedal Inteligente***

**Rúben Leone Freitas Rosa**

Leiria, Setembro de 2014



Projecto

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

## ***Estudo de Pedal Inteligente***

**Rúben Leone Freitas Rosa**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Luís Manuel de Jesus Coelho  
Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Setembro de 2014

# ***À Minha Família***

*Pelo apoio incondicional e incessante*

*Pelo que sou*

*Aos meus pais e à minha irmã*

*Aos meus avós*

*À minha namorada*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# **Agradecimentos**

---

Ao Professor Doutor Luís Manuel de Jesus Coelho  
Por todo apoio, orientação e disponibilidade  
Ao longo da realização deste trabalho

Ao Gestor de Projeto João Vieira  
Pela força e energia transmitida  
Pelo apoio e orientação durante o desenvolvimento do projeto

Ao Diretor Executivo Manuel Domingues  
Pelo impulso em relação ao desenvolvimento nacional de produto  
Pela capacidade de gestão e implementação de inovação

À MD Moldes e colaboradores  
Pela abertura e integração de iniciativas académicas  
Pelo exímio espírito empresarial apresentado

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **Resumo**

---

O principal objetivo do trabalho foi aplicar o conhecimento inerente à área da Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto no desenvolvimento de um pedal de bicicleta inteligente.

A informação relativa a áreas abordadas anteriormente e durante o desenvolvimento do projeto encontra-se inserida de forma a enquadrar o desenvolvimento do mesmo a nível de inovação e soluções aplicadas, tanto a nível material como tecnológico. O desenvolvimento do projeto e as suas etapas de parametrização tridimensional foram restringidos através de conhecimento científico e criativo, adveniente da pesquisa e desenvolvido durante o decorrer do projeto, presente em cada etapa específica, como elementos de suporte de tomada de decisões.

Os processos de análise e prototipagem aplicados após a obtenção de um modelo tridimensional suficientemente estruturado, permitiram não só validar e analisar o trabalho executado a nível do corpo, como também retirar conclusões sobre o mesmo aperfeiçoando-o para a iniciação do projeto de moldes. O desenvolvimento relativo ao sistema validou a possibilidade de desenvolvimento e execução industrial do mesmo, através de experimentação e otimização das características de maior relevância.

Ao longo do trabalho estará presente a experimentação e adaptação de ferramentas criativas, analíticas e técnicas no desenvolvimento do projeto de forma a potenciar e adquirir soluções indicadas e cientificamente suportadas. Do desenvolvimento resultou a obtenção de modelos físicos e funcionais do pedal suficientemente restringidos e acabados em termos de Conceção e Desenvolvimento de Produto, para passarem a um âmbito de produção industrial.

*Palavras-chave: Pedal, Inteligente, Bicicleta, Iluminação, Eixo.*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# ***Abstract***

---

The main purpose of this work was to apply the knowledge from the area of Engineering of the Conception and Development of Product to the development of a smart pedal for a bicycle.

Information related to the areas addressed before and during the project development, can be found inserted in its development phase regarding innovation and solutions applied to the material and technological areas involved. The tridimensional parameterization steps and the development of the project were restricted through scientific and creative knowledge, taken of the research and development along the project development, and present in each specific phase as a way to support and validate decisions.

The analysis process and prototyping applied after obtaining a tridimensional model sufficiently structured, allowed not only the validation and analysis of the work at a physical level but also its optimization regarding its future insertion in an injection mold project. The development related to the system validated its possibility of development and industrial execution through experimentation and optimization of the most relevant characteristics.

Along the document, one will find the experimentation and adaptation of creative, analytical, and technical tools in the development of the project, in order to potentiate and acquire indicated and scientifically supported solutions. This development resulted in a physical functional models, sufficiently restricted, to allow its approach in an injection mold area.

*Keywords: Pedal, Smart, Bicycle, Lighting, Axle.*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice de Figuras

---

Figura 1 – Vista de topo e vista lateral do pedal Ergon [3].	7
Figura 2 – Conjunto de pedais de encaixe e exemplo em contexto [5].	7
Figura 3 – Exemplo de pedais híbridos [5].	8
Figura 4 – Exemplo da extensão do eixo nos pedais de encaixe.	9
Figura 5 – Exemplo da extensão do eixo em pedais de apoio convencional.	9
Figura 6 – Exemplo seccional de um pedal de formato antiquado.	10
Figura 7 – Exemplos seccionais de pedais de formato moderno.	11
Figura 8 – Pedais de liga de carbono Keywin [10].	12
Figura 9 – Pedal JCPC Odyssey [11].	13
Figura 10 – Curva Tensão-Deformação de poliamidas reforçadas com diferentes quantidades de fibra e o seu comportamento [16].	14
Figura 11 – Comportamento mecânico em função da percentagem de fibra considerando uma temperatura de 20º e uma humidade relativa de 50% [16].	14
Figura 12 – Pedal Pedalite executado em polímeros Dupont [18].	15
Figura 13 – Representação figurativa do processo de injeção de polímeros e etapas principais [17].	16
Figura 14 – Gráfico que correlaciona a pressão nos hidráulicos e na cavidade [17].	17
Figura 15 – Lei de Hartz's (direita) e Lei de Moore's (esquerda).	21
Figura 16 – Tamanho e tabelas referentes aos LED considerados.	22
Figura 17 – Exterior e interior do pedal Pedalite [18].	23
Figura 18 – Pedais Dosun J-1 [19].	23
Figura 19 – Filtros de difusão luminosa e painéis refletores.	24
Figura 20 – Representação do ângulo crítico.	24
Figura 21 – Representação da reflexão cúbica.	25
Figura 22 – Exemplo de sensores de inclinação.	26
Figura 23 – Alguns relógios de rastreio inteligente.	27
Figura 24 – Exemplos de aplicações em Android.	28
Figura 25 – Sistema de iluminação Greenwave [25].	29
Figura 26 – Sistema de fechadura Lockitron [26].	29
Figura 27 – Esquema do PIC18F4520 [27].	31
Figura 28 – Linha processual de Conceção e Desenvolvimento de Produto.	37
Figura 29 – Exemplo figurativo da Casa da Qualidade utilizada durante o processo.	40
Figura 30 – Representação do primeiro formato referente ao <i>Design Lock</i> .	43
Figura 31 – Modelo base guia utilizado no processo.	43
Figura 32 – Representação do desenho geométrico exterior e dos relacionamentos existentes...	44
Figura 33 – Linha temporal de desenvolvimento de projeto e etapas.	45

Figura 34 – Modelo Inicial do Corpo Principal. ....	46
Figura 35 – Modelo utilizado no método de subtração material aplicado aos reforços. ....	47
Figura 36 – Esforços representados em modelos precoces. ....	47
Figura 37 – Segundo modelo do corpo principal. ....	49
Figura 38 – Superfície concebida de forma a favorecer o processo de injeção. ....	49
Figura 39- Processo convencional de Conceção e Desenvolvimento de Produto versus processo aplicado ao projeto do pedal inteligente. ....	50
Figura 40 – Exemplos gráficos de resistências oferecidas ao sistema hidráulico para diferentes casos [17]. ....	51
Figura 41 – Exemplo das camadas envolvidas durante a injeção de um plano em consequência de uma determinada viscosidade material [17]. ....	51
Figura 42 – Exemplo esquemático do rácio e das possibilidades de deformação via arrefecimento e extração de uma peça com concentração de tensões. ....	52
Figura 43 – Representação gráfica de considerações geométricas durante a construção. ....	53
Figura 44 – Terceiro modelo concebido após as considerações descritas no documento. ....	53
Figura 45 – Quarto modelo do corpo principal com o posicionamento transacionado do ecrã e outros componentes. ....	54
Figura 46 – Quinto modelo do corpo principal. ....	55
Figura 47 – Modelo preliminar à fase de prototipagem inicial. ....	56
Figura 48 – Representação do ângulo de saída. ....	57
Figura 49 – Representação tridimensional do oitavo modelo do corpo principal. ....	58
Figura 50 – Nono modelo tridimensional de corpo principal. ....	59
Figura 51 – Esquema de injeção multicomponente de organização horizontal e prato rotativo [17]. ....	61
Figura 52 – Técnicas de mudança de molde singular ou conjunta [17]. ....	61
Figura 53 – Representação das localizações dos LED brancos e vermelhos (vista de topo). ....	66
Figura 54 – Representação da comutação dos LED face a um posicionamento (vista de topo). ....	67
Figura 55 - Representação dos LED ativos comandados pelo elemento de comando. ....	67
Figura 56 – Esquema do primeiro modelo de comunicação considerado. ....	68
Figura 57 – Representação de um dos possíveis modelos finais de comunicação. ....	70
Figura 58 – Representação esquemática interna do sistema de comando. ....	71
Figura 59 – Representação tridimensional do elemento de comando. ....	71
Figura 60 – Representação tridimensional do elemento de suporte ao comando. ....	72
Figura 61 – Esquema do circuito utilizado na primeira fase de desenvolvimento. ....	73
Figura 62 – PicKIT3 e placa de desenvolvimento utilizadas no projeto. ....	74
Figura 63 – Esquema do funcionamento da placa de desenvolvimento [27]. ....	75
Figura 64 – Sistema estabelecido durante o desenvolvimento. ....	78
Figura 65 – Funcionamento base da aplicação. ....	80
Figura 66 – Exemplo de princípios utilizados no cálculo do sistema de conversão energética. ....	81
Figura 67 – Taxa de descarga das baterias tamanho AAA consoante diferentes intensidades de corrente. ....	83
Figura 68 – Eixo convencional de pedal de bicicleta. ....	83
Figura 69 – Representação figurativa da influência da exposição dos rolamentos. ....	84

Figura 70 - Exemplo figurativo da Casa da Qualidade utilizada durante o processo.....	86
Figura 71 – Segundo modelo de eixo considerado representado tridimensionalmente. ....	87
Figura 72 – Tipologia de eixo considerada para análise.....	88
Figura 73 – Representação tridimensional e esquemática de rolamentos em agulha e esféricos..	89
Figura 74 – Representação tridimensional e posicionamento dos rolamentos. ....	90
Figura 75 – Representação tridimensional e posicionamento dos rolamentos com maior área de rosca. ....	90
Figura 76 – Curva Tensão-Deformação da liga de alumínio 6061-T6 à temperatura ambiente. [38]. .....	94
Figura 77 – Representação do peso, força máxima exercida e peso médio exercido no assento ao longo do estudo. ....	95
Figura 78 – Forças médias e máximas, binário e velocidade de eixo [42]. ....	96
Figura 79 – Correlação entre capacidade mecânica e dureza do aço inoxidável 1.4021 [44]. ....	96
Figura 80 – Deformação passível durante aplicação de uma força a um material dúctil face a um contacto com material rígido. ....	98
Figura 81 – Aplicação da regra dos três terços ao topo do pedal.....	99
Figura 82 – Exemplo de um acabamento geométrico resultante da tipologia considerada. ....	100
Figura 83 – Exemplo seccional de defeitos possíveis à disposição manual de um material como meio isolante.....	101
Figura 84 – Exemplo tridimensional do elemento de isolamento do eixo do pedal considerado. ....	102
Figura 85 – Ultimo modelo de isolamento do eixo estabelecido durante a parametrização do sétimo modelo de corpo principal. ....	102
Figura 86 – Primeiro modelo de ecrã protetor. ....	103
Figura 87 – Modelo de ecrã protetor com suporte de encaixe do elemento condutor de luz.....	104
Figura 88 – Representação da curvatura abandonada aplicada à moldura.....	104
Figura 89 – Modelo final de moldura e ecrã protetor. ....	106
Figura 90 – Ecrã modificado preparado para aparafusamento. ....	107
Figura 91 – Exemplo de uma ligação sem compatibilização (esquerda) e com compatibilização (direita).....	108
Figura 92 – Modelo final considerado para os elementos de reflexão exterior. ....	109
Figura 93 – Representação da directividade luminosa do LED. ....	109
Figura 94 – Representação da distância em função da área de incidência. ....	110
Figura 95 – Representação da Lei dos Cossenos no cálculo da distância. ....	110
Figura 96 - Exemplo seccional da reflexão luminosa e tridimensional do conjunto.....	111
Figura 97 – Primeiro modelo de montagem.....	112
Figura 98 – Fixações experimentais em perfil.....	113
Figura 99 - Representação do elemento de cobertura das baterias via encaixe. ....	114
Figura 100 – Processos e localização dos elementos refletores em modelos não preliminares. ...	114
Figura 101 - Posicionamento e montagem do segundo modelo de eixo. ....	115
Figura 102 - Fases da montagem considerada para o terceiro modelo do corpo principal. ....	116
Figura 103 – Componente de moldura e o seu formato de encaixe ao corpo principal. ....	116
Figura 104 - Exemplo explicativo de uma tipologia de encaixe, das suas proporções e comportamentos.....	117

Figura 105 – Considerações tidas em conta durante a construção das saliências para os parafusos. .....	119
Figura 106 – Tipologia final de fixação dos corpos principais. ....	119
Figura 107 – Representação da placa de circuito impresso como elemento único. ....	120
Figura 108 - Processo de pré montagem dos logótipos e dos componentes condutores de luz ao suporte. ....	120
Figura 109 – Processo de colocação dos componentes, logótipos e sistema.....	121
Figura 110 – Aparafusamento das duas metades do pedal. ....	121
Figura 111 – Processo de inserção do eixo, dos refletores e da moldura inclusiva do ecrã protetor. .....	122
Figura 112 – Esquema representativo de um processo de desenvolvimento sem análise versus com análise.....	123
Figura 113 – Representação do processo de simplificação do modelo e de aplicação de cargas até obtenção do modelo matemático.....	125
Figura 114 – Representação do processo de criação de malha e solvência dos parâmetros inseridos no modelo matemático. ....	126
Figura 115 – Esquema básico considerado para a análise do corpo principal.....	127
Figura 116 – Alcance das cargas de <i>design</i> medianas e da carga de <i>design</i> considerada no projeto. .....	128
Figura 117 – Esquemática da reformulação do cenário de análise. ....	128
Figura 118 – Filtragem pré análise aplicada a modelos precoces do corpo principal do pedal. ...	129
Figura 119 – Representação dos esforços em modelos precoces do corpo principal do pedal. ...	130
Figura 120 – Processos de simplificação, idealização e limpeza aplicados ao modelo tridimensional. ....	131
Figura 121 – Processo de criação de malha em SolidWorks Educational Edition 2013.....	131
Figura 122 - Processo de criação de malha em Ansys Workbench 9.1. ....	132
Figura 123 - Restrições aplicadas aos corpos em SolidWorks Educational Edition 2013. ....	132
Figura 124 - Restrições aplicadas aos corpos em Ansys Workbench 9.1. ....	132
Figura 125 – Representação das zonas de concentração de tensões (esquerda acima e abaixo) e das zonas de deslocação (direita acima e abaixo) obtidas em SolidWorks Educational Edition 2013. .....	133
Figura 126 - Representação das zonas de concentração de tensões (esquerda acima e abaixo) e das zonas de deslocação (direita acima e abaixo) obtidas em Ansys Workbench 9.1. ....	133
Figura 127 – Representação tridimensional dos reforços efetuados em PTC Creo 2.0.....	134
Figura 128 – Representação esquemática dos procedimentos tidos em conta durante a elaboração dos reforços.....	135
Figura 129 – Representação das zonas de concentração de tensões (esquerda acima e abaixo) e das zonas de deslocação (direita acima e abaixo) obtidas em SolidWorks Educational Edition 2013. .....	136
Figura 130 - Representação das zonas de deslocação (esquerda acima e abaixo) e das zonas de concentração de tensões (direita acima e abaixo) obtidas em Ansys Workbench 9.1.....	136
Figura 131 – Gráfico comparativo de concentração de tensões em MPa verificadas em ambos os programas utilizados.....	137

Figura 132 – Gráfico comparativo de deslocamentos em mm verificadas em ambos os programas utilizados. ....	137
Figura 133 – Gráfico representativo da redução percentual das deslocamentos verificadas através dos reforços.....	138
Figura 134 – Curva tendencial da redução do fator de concentração de tensões em função do arredondamento .....	138
Figura 135 – Criação de malha no modelo reformulado. ....	139
Figura 136 – Representação da concentração de tensões (esquerda) e das deslocamentos (direita). ....	140
Figura 137 - Representação da concentração de tensões exteriores (esquerda) e interiores (direita).....	140
Figura 138 – Representação das deslocamentos.....	141
Figura 139 – Malha do corpo principal, moldura e eixo do pedal em Ansys Workbench 9.1. ....	142
Figura 140 – Falha localizada verificada durante a análise do eixo. ....	142
Figura 141 – Representação da não deformação por parte do corpo principal e da cobertura externa do eixo.....	143
Figura 142 – Confirmação da reformulação da geometria e verificação de falha específica. ....	143
Figura 143 – Confirmação do suporte da parte interna do eixo.....	144
Figura 144 – Graus de representação demonstrados em escala de cores. ....	144
Figura 145 – Concentração de tensões na peça externa (esquerda) e interna (direita) do eixo...	145
Figura 146 – Impressão e montagem do modelo executado através de impressão tridimensional .....	147
Figura 147 – Componente de moldura elaborada através de impressão tridimensional .....	148
Figura 148 – Corpo principal elaborado através de impressão tridimensional .....	148
Figura 149 – Vista pormenorizada dos detalhes impressos tridimensionalmente.....	149
Figura 150 – Visualização das camadas resultantes da impressão tridimensional.....	149
Figura 151 – Protótipo do eixo considerado obtido através de torneamento CNC.....	151
Figura 152 – Isolamento modificado através da análise ao protótipo .....	152
Figura 153 – Esquema de estimativas de redução dos custos e dos custos da prototipagem .....	154

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## ***Índice de Tabelas***

---

Tabela 1 – Comparação de performance de LED comum versus LED com super brilho. ....	21
Tabela 2 – Tabela de propriedades de uma poliamida 66 sem e com reforço [13].....	63
Tabela 3 – Propriedades do aço inoxidável QT700 [45].....	97
Tabela 4 - Propriedades do aço inoxidável QT800 [45]. ....	97
Tabela 5 – Qualidade de adesão entre vários polímeros [17].. ....	105
Tabela 6 – Avaliação dos custos de tecnologias de prototipagem .....	150

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## ***Acrónimos***

---

LED - Díodo Emissor de Luz

SMD – Dispositivo Montado à superfície

AAA – Tamanho internacional *standard* de baterias

E.CDP – Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

3D – Tridimensional

CNC – Controlo Numérico Computorizado

SLS – Sinterização Seletiva Laser

STL – Formato de ficheiro nativo a estereografia computadorizada

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice

---

DEDICATÓRIA .....	I
AGRADECIMENTOS .....	III
RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABELAS .....	XV
ACRÓNIMOS .....	XVII
ÍNDICE.....	XVIII
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 ERGONOMIA DO PEDAL .....	5
2.1.1 ERGON .....	6
2.1.2 PEDAIS DE ENCAIXE .....	7
2.1.3 PEDAIS HÍBRIDOS .....	8
2.2 FORMATO DO PEDAL.....	8
2.2.1 EIXO DO PEDAL.....	8
2.2.2 GEOMETRIA CORPORAL .....	10
2.3 MATERIAIS .....	11
2.3.1 ALUMÍNIO.....	11
2.3.2 LIGAS DE CARBONO .....	12
2.3.3 REFORÇO A FIBRAS DE VIDRO.....	12
2.3.4 POLIAMIDA REFORÇADA .....	13

2.4 PROCESSOS.....	15
2.4.1 PROCESSO DE INJEÇÃO .....	16
2.4.2 ADIÇÃO DE AGENTES DE COMPATIBILIZAÇÃO .....	18
2.4.3 IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL ADITIVA.....	19
2.4.4 TORNEAMENTO POR CONTROLO NUMÉRICO COMPUTORIZADO ...	19
2.4.6 SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER DE POLÍMEROS .....	20
2.5 TECNOLOGIA .....	20
2.5.1 LED SUPER BRILHANTE .....	20
2.5.2 PEDAIS COM ILUMINAÇÃO LED .....	22
2.5.3 REFLEXÃO E DIFUSÃO LUMINOSA .....	23
2.5.3.1 POLICARBONATO .....	25
2.5.4 SENSIBILIDADE DE POSICIONAMENTO .....	26
2.5.5 FUNCIONAMENTO INTELIGENTE .....	27
2.5.6 CONTROLO E COMUNICAÇÃO COM DISPOSITIVOS INTELIGENTES	28
2.5.7 MICROCONTROLADORES DE INTERFACE DE CONTROLADOR PROGRAMÁVEL.....	29
2.5.8 PIC18F4520.....	30
2.5.9 LINGUAGEM C .....	32
3 - DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO.....	35
3.1 <i>DESIGN LOCK</i> .....	39
3.2 PARAMETRIZAÇÃO DO PRODUTO.....	44
3.2.1 PARAMETRIZAÇÃO DO CORPO PRINCIPAL DO PEDAL.....	45
3.2.1.1 MODELO 1 .....	46
3.2.1.2 MODELO 2 .....	47
3.2.1.3 MODELO 3 .....	48

3.2.1.4 MODELO 4 .....	53
3.2.1.5 MODELO 5 .....	54
3.2.1.6 MODELO 6 .....	55
3.2.1.7 MODELO 7 .....	56
3.2.1.8 MODELO 8 .....	58
3.2.1.9 MODELO 9 .....	59
3.2.1.10 MATERIAIS E PROCESSOS .....	60
3.2.2 PARAMETRIZAÇÃO DO SISTEMA INTERNO .....	64
3.2.2.1 FUNCIONAMENTO E COMUNICAÇÃO .....	68
3.2.2.2 ALIMENTAÇÃO .....	81
3.2.3 PARAMETRIZAÇÃO DO EIXO DO PEDAL .....	83
3.2.3.1 EIXO 1 .....	83
3.2.3.2 EIXO 2 .....	86
3.2.3.3 EIXO 3 .....	88
3.2.3.4 MATERIAIS E PROCESSOS .....	91
3.2.4 PARAMETRIZAÇÃO DO TOPO DO CORPO PRINCIPAL .....	97
3.2.5 PARAMETRIZAÇÃO DO ISOLAMENTO DO PEDAL .....	100
3.2.5.1 ISOLAMENTO 1 .....	100
3.2.5.2 ISOLAMENTO 2 .....	101
3.2.5.3 ISOLAMENTO 3 .....	101
3.2.5.4 ISOLAMENTO DO EIXO .....	102
3.2.5.4 ISOLAMENTO DE BATERIAS .....	103
3.2.6 PARAMETRIZAÇÃO DO ECRÃ PROTETOR E MOLDURA .....	103
3.2.6.1 MODELO 1 .....	103
3.2.6.2 MODELO 2 .....	106

3.2.6.3 MATERIAIS E PROCESSOS .....	107
3.2.7 PARAMETRIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE REFLEXÃO .....	108
3.2.7.1 MATERIAIS E PROCESSOS .....	111
3.2.8 DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE ASSEMBLAGEM .....	112
3.2.8.1 ASSEMBLAGEM 1 .....	112
3.2.8.2 ASSEMBLAGEM 2 .....	112
3.2.8.3 ASSEMBLAGEM 3 .....	114
3.2.8.4 ASSEMBLAGEM 4 .....	116
3.2.8.5 ASSEMBLAGEM 5 .....	118
3.3 ANÁLISE .....	123
3.3.2 FATOR DE SEGURANÇA .....	126
3.3.3 ANÁLISE ESTRUTURAL DO PEDAL INTELIGENTE .....	129
3.3.4 ANÁLISE ESTRUTURAL DO EIXO .....	141
4 - PROTOTIPAGEM .....	147
4.1 PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM APLICADOS AO PEDAL .....	147
4.2 ANÁLISE E CONCLUSÕES RELATIVAS AOS PROTÓTIPOS .....	152
5 - CONCLUSÃO .....	155
6 - TRABALHOS FUTUROS .....	157
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	157
BIBLIOGRAFIA .....	159

# **1 - Introdução**

---

A importância do conhecimento científico, processo e metodologias inerentes à Engenharia de Conceção e Desenvolvimento de Produto, aquando da elaboração de um objeto, são os tópicos centrais abordados neste documento.

Este projeto resultou de uma colaboração da ESTG, IP Leiria, com a empresa MD Moldes sendo que no momento em que se iniciou a abordagem, o briefing e conceito já haviam sido estabelecidos pela empresa MD Moldes em conjunto com o cliente.

Discretizar a totalidade do processo de Conceção e Desenvolvimento e as constituintes do objeto em etapas permite uma melhor perceção do percurso do projeto, das decisões tomadas ao longo do mesmo e das ferramentas utilizadas em cada caso específico.

Após o surgimento de uma ideia inicial e desenvolvimento suficiente da mesma é importante que se crie um conceito e/ou briefing, que vão permitir conter e trabalhar informação essencial e sucinta em relação aos aspetos técnicos e criativos da ideia e desconstruir a mesma, analisando-a de modo a obter pontos específicos, restrições, características, visões, ideias, etc., que possam estar associadas ao projeto desde o seu surgimento.

O conceito sugerido pelo cliente e trabalhado pela empresa, proponha essencialmente a criação de um pedal de bicicleta iluminado na borda exterior frontal e traseira, que contivesse a possibilidade de demonstrar a mudança de direção através de um sinal luminoso, sempre que o utilizador necessitasse. O briefing do projeto, objetivava o pedal em causa, como elemento capaz de oferecer uma segurança superior à do pedal de bicicleta comum, através da emissão luminosa.

A desconstrução e análise efetuada em conjunto com a empresa, permitiu identificar a procura de uma ligação sem fios entre o pedal e um aparelho de funcionalidades avançadas

capaz de controlar e monitorizar alguns aspetos através do seu sistema operativo (*Smartphone* e/ou outros aparelhos do mesmo grau tecnológico). Através de uma análise rápida dos critérios psicográficos, comportamentais e geográficos existentes na perspetivação do cliente, identificou-se que o público-alvo para o pedal inteligente se tratava de uma população cidadina de classe média-alta e alta que procura e detém produtos de tecnologia moderna dotados de inovação e que utiliza a bicicleta como meio de transporte casual ou de lazer.

O aspeto exterior do pedal também já se encontrava sugerido através de esquiço, do qual se pode identificar a necessidade de estabelecer um visual exterior que transmitisse a qualidade funcional e enfatizasse a zona luminosa do pedal. O acabamento do pedal, as suas componentes e a forma como as mesmas se enquadravam no corpo principal do pedal também já se encontravam geralmente delineadas, fornecendo algumas linhas guias para o seu desenvolvimento futuro.

Desta análise obtiveram-se também questões de abordagem importantes aquando da execução do Estado da Arte, estabelecendo as áreas de maior interesse a pesquisar. Dentro desta temática encontra-se incluída toda a matéria correspondente a técnicas, aparelhos ou áreas científicas abordadas no projeto, durante e anteriormente à execução do mesmo, de modo a enquadrar matéria ou conhecimento abordado na fase de desenvolvimento.

Seguidamente ao Estado da Arte, o documento apresenta o capítulo referente ao Desenvolvimento do Produto, que por sua vez descreve todo o caminho de projeto, ferramentas, processos e metodologias utilizados ao longo do desenvolvimento do pedal inteligente, acompanhando a evolução do mesmo. Também dentro desta secção se encontra descrita a análise tridimensional aplicada ao modelo e as reformulações resultantes desse processo.

No capítulo intitulado de Prototipagem, estão descritos os processos de prototipagem aplicados ao pedal, respetivamente aos estados evolutivos selecionados. Nesta parte do documento para além da caracterização dos processos também se apresentam as conclusões a nível de otimização retiradas dos mesmos.

O penúltimo capítulo do documento trata-se da Conclusão, onde se apresentam as considerações relativas ao modelo final do produto e as conclusões finais em relação ao desenvolvimento do projeto, às ferramentas, metodologias e reformulações executadas durante o mesmo.

Os Trabalhos Futuros são o último capítulo do documento incluindo a descrição do processo de projeto e das etapas a executar numa perspetiva futura, delineando o caminho de projeto as etapas e processos necessários até se atingir uma produção industrial.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **2 - Estado da Arte**

---

Neste projeto específico, o grau de inovação incitou a necessidade de criação de uma estratificação de temáticas investigadas, de modo a satisfazer o grau de aplicações tecnológicas similares às que se pretendiam para o pedal inteligente, oferecendo resposta às questões levantadas no início e durante o desenvolvimento do projeto. Foram incluídos na pesquisa, casos que respondessem não só a uma área física de inovação mas também tecnológica.

O início da elaboração do Estado da Arte antecedentemente ao desenvolvimento do produto, permitiu não só analisar boas resoluções, quer a nível estrutural quer a nível tecnológico; mas também estabelecer caminhos e resoluções possíveis para futuras problemáticas.

### **2.1 Ergonomia do Pedal**

A interface que o pedal oferece e a forma como a mesma influencia o utilizador a nível físico, trata-se de um dos fatores de maior importância quando se aborda a questão da atividade física, seja a nível desportivo, quotidiano ou de lazer. Quando se analisa uma qualquer atividade física executada por um membro corporal, dentro de um determinado número de ciclos, conclui-se que ocorrem efeitos específicos e sistemáticos relativamente a um risco ergonómico [1] [2].

Apesar do pedal agir maioritariamente como plataforma de apoio para o pé, assume também a responsabilidade de elemento limitador da distância existente entre o assento e o eixo de rotação da pedaleira e da dinâmica biomecânica que ocorre entre os mesmos ao pedalar (ângulo do pé, grau de rotação do tornozelo/joelho/anca, etc.). O formato e a maneira como a plataforma permite ao utilizador apoiar o pé vai influenciar e estar relacionada com um maior ou menor desgaste muscular e ósseo a nível das articulações da anca e joelho [1] [2].

Tendo este fator em conta como possibilidade de abordagem do formato, efetuou-se uma seleção de tipologias de pedais que oferecessem modelos diferenciados de boa resolução ergonómica.

### **2.1.1 Ergon**

O Ergon foi concebido tendo em conta não só a superfície de contacto com o pé, mas também a possibilidade de melhoria de todo o movimento envolvido na atividade cíclica. É elaborado num compósito superleve reforçado a fibra de vidro [3].

Este pedal usa o formato como elemento de resolução ergonómica, possuindo uma borda interna que permite o acomodamento correto do pé e aumenta o controlo e a transferência de forças exercidas, através de uma maior proximidade do pé ao eixo de rotação. A aplicação de uma superfície de comportamento antiderrapante contribui também para uma melhor aderência entre as superfícies de contacto do pé e do pedal, de modo a que não se possibilitem grandes deslocações em relação à superfície de apoio durante a atividade, ajudando a manter a postura desejada [3].

O fator-Q, que designa a relação entre a distância dos dois pedais e o movimento natural existente entre as junções ósseas das ancas, joelhos e pés, é solucionado através do uso de um eixo mais estreito combinado com um formato de pedal tangente a zona de enroscamento; permitindo ao pé, joelho e anca um alinhamento mais natural ao pedalar [3].

A plataforma onde o utilizador apoia o pé tem um ângulo de 6 graus em relação ao plano horizontal do eixo, de modo a melhorar o alinhamento ósseo da biomecânica existente entre o joelho, a anca e o pé, diminuindo essencialmente pontos de desgaste muscular a nível da perna e lesões a nível do joelho (ver Figura 1).



Figura 1 – Vista de topo e vista lateral do pedal Ergon [3].

## 2.1.2 Pedais de Encaixe

Os pedais de encaixe são um exemplo de ergonomia estabelecida através da sintetização do objeto ao movimento e da resolução estrutural tendo em conta a biomecânica do corpo. Este tipo de pedais possui uma ligação mecânica a uma sapatilha preparada para tal, transferindo o acomodamento do pé para um âmbito de calçado, focando-se apenas na liberdade de movimento [4] [5].

Tendo em conta outras tipologias de encaixe/fixação, esta oferece um maior fator de segurança permitindo a libertação automática do mecanismo assim que se atinge um certo ângulo, entre o pé e o pedal, como no caso de uma queda [4] [5] [6].

A eficiência da transferência de força exercida pela perna em relação ao mecanismo da bicicleta aumenta, visto que, existe um aproveitando não só da rotação e força exercidas no sentido decrescente, como também no crescente (ver Figura 2).



Figura 2 – Conjunto de pedais de encaixe e exemplo em contexto [5].

### **2.1.3 Pedais Híbridos**

Os pedais híbridos oferecem a tecnologia de encaixe num dos seus lados e a tecnologia convencional no outro, permitindo assim a escolha antes de iniciar a atividade ou a mudança a meio da mesma caso seja necessário mais rendimento numa parte específica do percurso, sendo que o seu fator de ergonomia reside não só no encaixe mas também na possibilidade de seleção (ver Figura 3) [5].



Figura 3 – Exemplo de pedais híbridos [5].

## **2.2 Formato do Pedal**

Esta secção baseou-se em métodos de observação e sintetização evolutiva em relação à forma e à estrutura relativamente aos pedais. Aquando do contraste entre modelos mais antiquados de pedais e modelos modernos traçou-se alguns elementos constantes e comuns que possibilitam um entendimento simplificado das resoluções mais indicadas e facilitadas a nível da mudança evolutiva deste objeto.

### **2.2.1 Eixo do Pedal**

Em relação ao diâmetro do eixo e em relação ao comprimento do mesmo em termos de extensão, foram identificadas maioritariamente duas constantes, sendo que ambas são aplicadas em situações diferentes para fins diferentes.

O comprimento do eixo é normalmente uma medida colinear e concêntrica ao eixo do pedal, estendendo-se até um determinado ponto após a sua entrada no corpo do pedal. Prolonga-se normalmente até ao centro do pé do utilizador, oferecendo na maioria dos casos uma superfície de apoio ou encaixe para além do mesmo (através do corpo do pedal), sendo um caso mais ocorrente em pedais de encaixe ou de fixação (ver Figura 4).

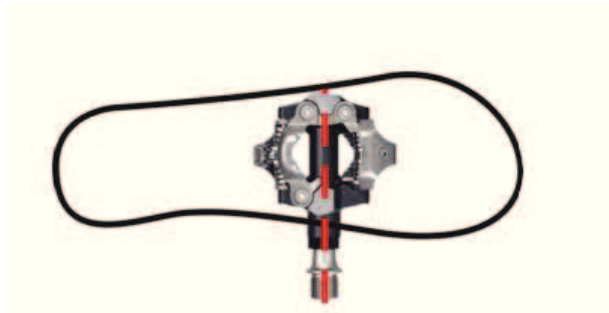


Figura 4 – Exemplo da extensão do eixo nos pedais de encaixe.

No caso dos pedais de apoio convencional, o eixo usa o corpo do pedal como elemento extensor de apoio indo normalmente para além da borda do pé (ver Figura 5).

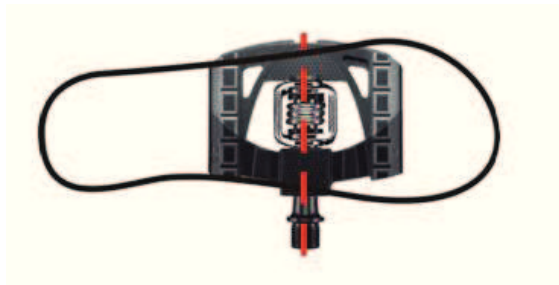


Figura 5 – Exemplo da extensão do eixo em pedais de apoio convencional.

O diâmetro da zona de enroscamento também pode variar de medida sendo que normalmente adota dois modelos principais, um com um roscado respetivo a um diâmetro de 14,28 mm (normalmente utilizado em pedivelas de peças múltiplas e mais atual) outro com um roscado respetivo a um diâmetro 12,7 mm (normalmente utilizado em pedivelas de corpo único). Também existem duas medidas de comprimento relativamente à zona de enroscamento, o largo e o estreito, tendo como diferença a proximidade e a influência ergonómica.

O formato de rolamentos internos do eixo, pode variar normalmente entre formatos cilíndricos, esféricos e de agulha. Estes rolamentos são maioritariamente utilizados em duas tipologias, os vedados e os normais. Aquando da sua utilização no pedal, os rolamentos normais são enclausurados através do corpo do pedal em si, ou através do uso de componentes adjacentes ao eixo durante a montagem; e os rolamentos vedados estão previamente encapsulados e lubrificados de modo a evitar a entrada de detritos prejudiciais ao seu desempenho.

## 2.2.2 Geometria Corporal

No âmbito do corpo do pedal da sua construção geométrica e desenho tridimensional, verificou-se um grau de liberdade elevado nas situações analisadas sendo apenas restringido em relação aos mecanismos de encaixe ou a uma oferta adequada de área de apoio para o pé.

A relação entre a evolução da forma desde os pedais convencionais até aos pedais mais modernos, evidencia a existência da procura crescente de uma estrutura que satisfaça a leveza material e visual. No âmbito desportivo ou de alta performance, esta mesma procura é solucionada atualmente, através da combinação de secções com dimensões mais alongadas e estreitas, desafiando e aproveitando o máximo do desempenho mecânico dos materiais que evoluem de forma a preencher essas necessidades como se pode observar (ver Figura 6 e Figura 7) [7] [8] [9].

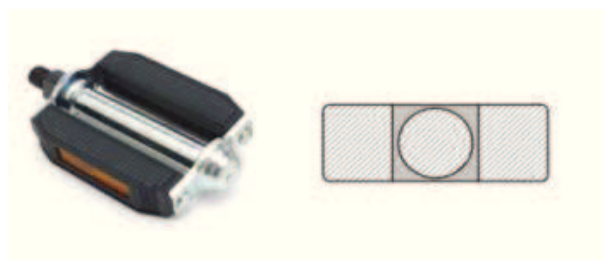


Figura 6 – Exemplo seccional de um pedal de formato antiquado.

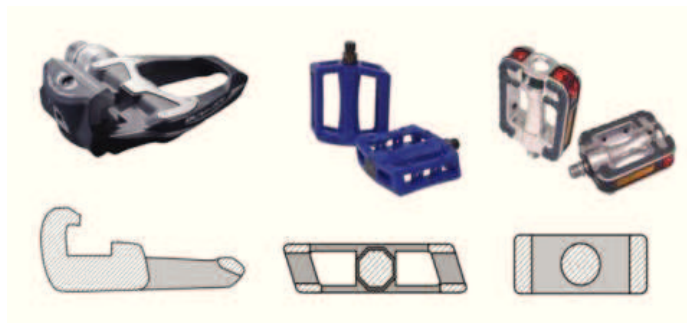


Figura 7 – Exemplos seccionais de pedais de formato moderno.

Os pedais de encaixe e similares têm a sua forma cada vez mais sintetizada e dependente dos mecanismos da pedaleira e do eixo, desvanecendo cada vez mais em termos de plataforma de apoio. Os pedais mais direcionados ao quotidiano e ao lazer espontâneo em ambiente citadino, ainda adotam a forma básica e retangular do pedal comum em conciliação com uma maior atenção ao detalhe e desafio das capacidades materiais [7] [8].

## 2.3 Materiais

O material e o desempenho do mesmo, foi um tema abordado de forma abrangente pois tendo a consciência que materiais diferentes servem propósitos diferentes e têm propriedades diferentes, decidiu-se que seria mais indicado estratificar esta temática de modo a permitir um melhor enquadramento da abordagem ao material.

### 2.3.1 Alumínio

Dos metais utilizados no fabrico dos pedais (excluindo metais incluídos em ligas de alto desempenho) este é o metal que estabelece o Estado da Arte, não só devido às suas propriedades mas também devido a sua elevada utilização como material estrutural de pedais. As suas propriedades mecânicas de resistência estrutural, resistência a corrosão, durabilidade e peso são os fatores que mais influenciam o uso deste metal neste tipo de aplicações.

No seu estado puro é mais dúctil que o aço, porém, à semelhança de outros materiais metálicos, a sua versatilidade de composição gera um enorme leque de possibilidades de

ligas capazes de comportar diferentes comportamentos mecânicos. Porém, na construção dos pedais é combinado sobretudo com camadas protetoras.

### 2.3.2 Ligas de Carbono

A marca Keywin utiliza ligas de carbono como material estrutural na construção de pedais. Atualmente, a gama mais avançada é a de carbono-titânio, aplicada como material estrutural no âmbito de um pedal de alta performance.

O pedal onde essa liga é aplicada é designado como Keywin *Carbon*, pesa 299 gramas (com *hardware* metálico incluído 85 gramas sem) e combina as propriedades das ligas de carbono com um formato de encaixe. Uma plataforma de 3045 mm<sup>2</sup> em conjunto com um peso de 14 mm de dimensão, localizado na parte inferior do pedal permite uma melhor eficiência ao pedalar (ver Figura 8) [10].



Figura 8 – Pedais de liga de carbono Keywin [10].

Neste caso, os mecanismos internos do pedal deixam o utilizador ajustar a distância de flutuação do pé em relação ao eixo bem como a rotação no plano horizontal para um melhor conforto [10].

### 2.3.3 Reforço a Fibras de Vidro

O pedal JCPC trata-se de um produto desenhado para as mais difíceis condições de ciclismo. Construído através de um corpo constituído por dois componentes em polímero reforçado com fibras, este pedal foi desenvolvido para simultaneamente, suportar altas cargas na sua estrutura e ter a leveza de um polímero (peso de 239 gramas para cada pedal) (ver Figura 9) [11].



Figura 9 – Pedal JCPC Odyssey [11].

### 2.3.4 Poliamida Reforçada

O termo poliamida é utilizado para designar um polímero termoplástico composto por monómeros de amida conectados por ligações peptídicas. A poliamida 66, ou Nylon 66, trata-se de um polímero resultante de hexametilenediamina e ácido adípico, adquirindo a designação de poliamida 66 devido à existência de 12 átomos de carbono em cada unidade de repetição. Este material é frequentemente utilizado em aplicações estruturais, devido à sua alta resistência mecânica, rigidez, resistência química e estabilidade dimensional. Na sua forma pura, é utilizado maioritariamente na produção de pedais sobre a forma de componentes de enjaulamento de rolamentos, elementos isolantes, tubagem, perfis, elementos de segurança desportiva, entre outros [12] [13] [14].

A adição de fibras de vidro a este material, cria um compósito de alta rigidez e resistência. Estes tipos de compósitos competem em muitos casos com elementos metálicos tendo as suas vantagens centralizadas no peso, economia e facilidade de fabricação (compósitos termoplásticos reforçados com fibras são facilmente processados através de métodos convencionais como a injeção) [14] [15].

As propriedades dos compósitos termoplásticos foram sujeitas a uma grande atenção por parte de estudos e análises, sendo que essas mesmas propriedades e a habilidade de transferir as concentrações de tensões através da interface entre a fibra e matriz, dependem bastante das condições de injeção (tais como os parâmetros respeitantes ao bico e fuso injetores, temperatura da zona moldante e formato da peça). Através da pesquisa, verificou-se também a existência de algumas questões problemáticas, associadas aos

defeitos materiais (vazios ou fendas) presentes ou induzidos numa das três regiões; a matriz, a fibra ou a interface entre ambas.

A análise da pesquisa efetuada, também permitiu concluir que a fração de volume das fibras, tamanho das mesmas, orientação e distribuição, também são elementos que afetam diretamente as propriedades mecânicas do material, sendo que uma das constantes mais importantes reside na adição de uma maior ou menor percentagem de fibras à matriz permitindo controlar as propriedades do material (ver Figura 10 e Figura 11) [16].

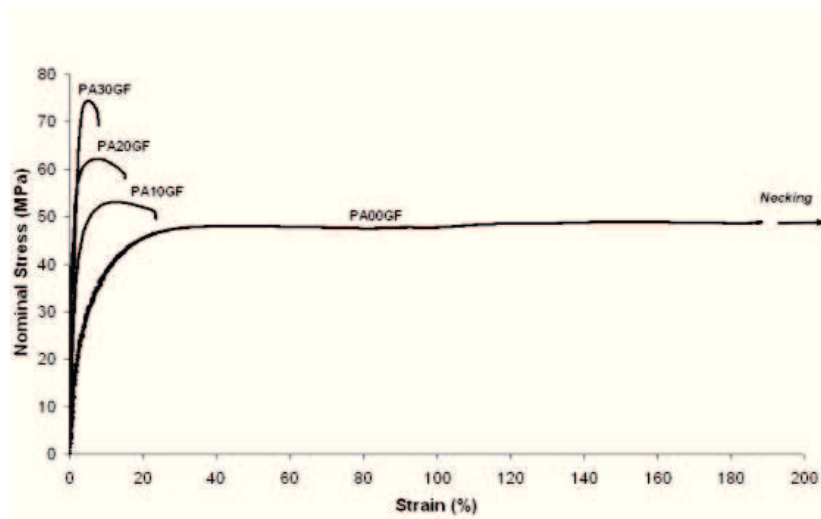


Figura 10 – Curva Tensão-Deformação de poliamidas reforçadas com diferentes quantidades de fibra e o seu comportamento [16].

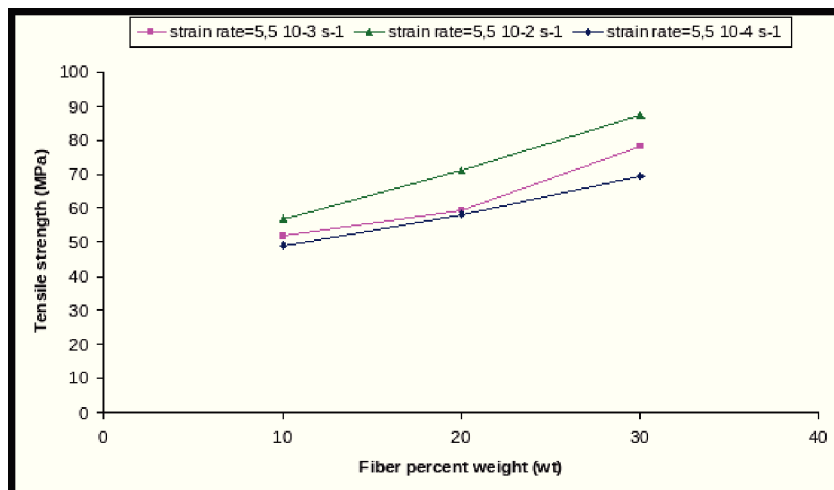


Figura 11 – Comportamento mecânico em função da percentagem de fibra considerando uma temperatura de 20° e uma humidade relativa de 50% [16].

Os fatores anteriores, auxiliaram à escolha material, visto que num plano futuro de produção e eficiência de custos, o controlo de propriedades mecânicas pode ser um elemento benéfico (por exemplo a possibilidade da redução de espessuras através aumento de percentagem fibra, ou a desconsideração total da necessidade de reforço).

A linha comercial DuPont *Zytel* (poliamida reforçada a fibra de vidro) é utilizada na construção dos pedais Pedalite. As suas características mais significativas residem na sua estabilidade dimensional, resistência ao impacto e bom comportamento face a variações de temperatura (ver Figura 12) [18].



Figura 12 – Pedal Pedalite executado em polímeros Dupont [18].

Na caixa de engrenagens do Pedalite encontra-se aplicada a resina de designação comercial Delrin 100P, que devido à sua alta durabilidade e ao seu coeficiente de fricção bastante baixo, dispensa lubrificação dos componentes. A resina de designação comercial DuPont Delrin 100 ST, encontra-se aplicada como material de suporte de eixo do Pedalite devido à sua resistência mecânica [18].

## 2.4 Processos

Dentro deste tópico, consideraram-se não só os processos utilizados durante a materialização de geometrias protótipo, mas também os processos de produção industrial considerados numa perspetiva futura, que tiveram conseqüentemente uma influência fulcral na geometria do pedal e no seu desenvolvimento estrutural. Como tal, apesar de não se encontrarem descritivamente aplicados durante o decorrer do projeto, estes processos são referenciados em fases chave ou alterações justificadas. Nesta parte do documento, encontra-se a descrição demonstrativa das suas características, capacidades e fatores de

maior influência e relevância considerados durante o desenvolvimento do projeto em questão.

### 2.4.1 Processo de Injeção

O processo de injeção envolve o aquecimento e o cisalhamento dos grânulos sólidos até a sua fusão, a transferência deste material fundido para um molde e a sua manutenção sob pressão até solidificar (ver Figura 13) [17].

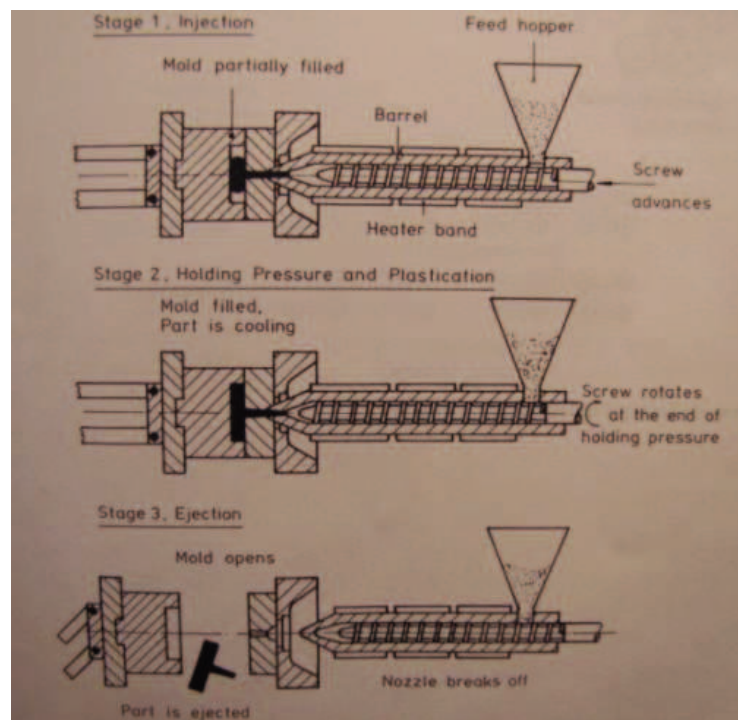


Figura 13 – Representação figurativa do processo de injeção de polímeros e etapas principais [17].

A viscosidade do polímero fundido determina em grande parte a pressão de injeção (alta viscosidade implica em menos fluxo e queda de pressão de maior grandeza) sendo uma função direta do seu peso molecular. Podemos considerar que a geometria da peça e as paredes moldantes de geometria inversa, vão influenciar também diretamente a pressão e qualidade de injeção [17].

Em termos reológicos, a pressão de injeção geralmente eleva-se da pressão mais baixa possível no sistema, até uma magnitude correspondente à soma da resistência de fluxo

existente no bico injetor, sistema de distribuição e zona moldante [17].

O material vai oferecer mais resistência aquando do seu fluxo, quanto mais complexa for a geometria, a configuração, colocação do bico e sistema de distribuição como se pode observar pela pressão existente na cavidade e a necessária pelo sistema hidráulico aquando da mudança de resistência ao fluxo (ver Figura 14) [17].

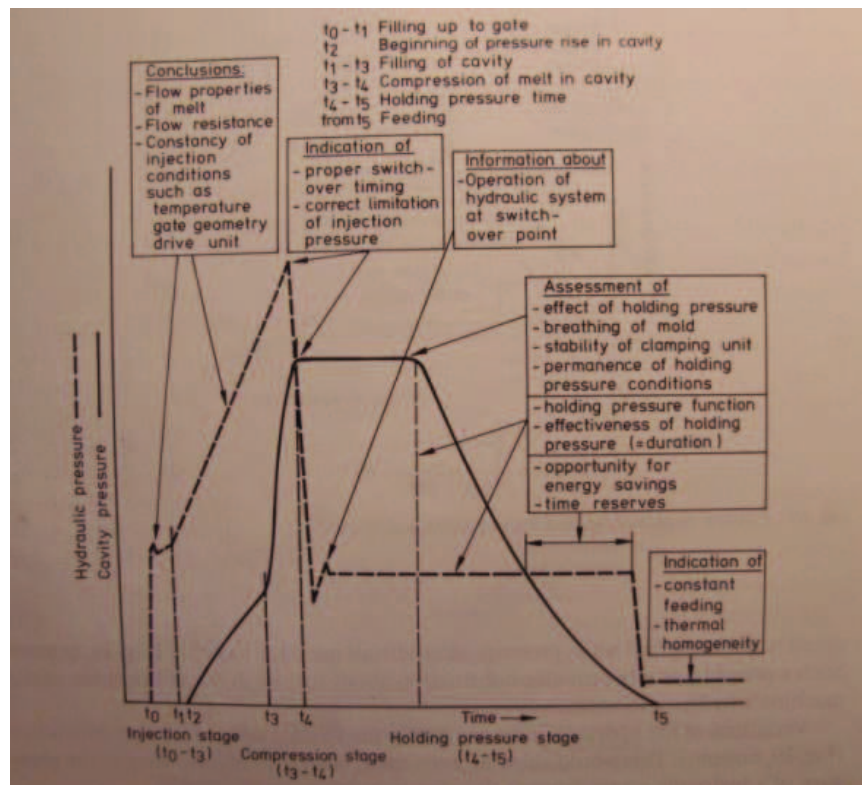


Figura 14 – Gráfico que correlaciona a pressão nos hidráulicos e na cavidade [17].

Este fator pode dificultar o acesso do material a certas zonas e anteriormente, o projeto de molde em si. Para além disso os parâmetros geométricos do produto afetam a constituição do molde em termos de complexidade de elementos móveis, balancés e outros.

Um dos maiores inimigos do processo de injeção é a concentração de tensões no material durante o processo. Quando o material funde em preparação para o processo, as ligações moleculares são temporariamente quebradas através do calor e rotação da extrusora. Através da aplicação de pressão o material é forçado a ocupar todas as partes da zona moldante. Durante este processo as moléculas são forçadas a deslocar-se através da

geometria da peça, sendo que as geometrias fluentes são mais fáceis de ocupar que geometrias abruptas. Estas últimas, aquando do arrefecimento da peça e restabelecimento de ligações moleculares podem causar a acumulação de tensões internas da peça causando falha prematura ou defeitos da mesma.

## 2.4.2 Adição de Agentes de Compatibilização

Os agentes de compatibilização surgem neste documento associados à otimização do processo de injeção multicomponente, de forma a adquirir uma boa qualidade de ligação superficial entre material. Estes elementos podem ser reativos ou não reativos e estão divididos em três categorias:

- Co polímeros de bloco (não reativos); onde o agente de compatibilização age como um surfactante e vai preferencialmente migrar para a zona de interface reduzindo a tensão superficial. Ao ser um surfactante, vai tendencialmente criar micelas. São na sua generalidade dispendiosos, não existindo grande oferta de mercado relativa aos mesmos necessitando para além disso, de quantidades consideráveis de adição (podendo alcançar a ordem dos 5%).
- Formação *in-situ* de blocos co polímeros (reativos); tendo como princípio a reação apenas na interface de modo a criar um co polímero de bloco enxertado *in situ* através da reação de grupos funcionais de dois polímeros diferentes, tem como vantagens a ajustabilidade reativa, alta eficiência e preço (geralmente mais barato que co polímeros de bloco).
- Co polímeros polares não reativos (interação especificamente através da polaridade); o conceito centra-se na redução da tensão de interface e aumento da adesão através da criação de interação polar específica (por exemplo ligação através de hidrogenação ou forças Van der Waals). O elemento de compatibilização tem de ser geralmente compatível com uma das fases (habitualmente não polar) criando interações específicas com a outra fase.

### **2.4.3 Impressão Tridimensional Aditiva**

O processo de impressão tridimensional aditiva trata-se de uma tecnologia que trabalha através de um processo de fabricação aditiva, onde um modelo de dimensões tridimensionais é criado através da deposição de sucessivas camadas de material.

Estas ferramentas são geralmente rápidas e fáceis de usar sendo que algumas delas oferecem mesmo a possibilidade de num simples processo, obter partes distintas em materiais diferentes com elevada precisão e liberdade geométrica.

A execução do processo de impressão dá-se através da criação e do carregamento de um ficheiro geralmente em formato .STL, para uma impressora que por sua vez efetua a leitura do ficheiro tridimensional e estabelece camadas correspondentes às secções transversais do objeto tridimensional.

Após o modelo estar impresso dá-se a extração da peça final, limpeza e acabamento da mesma, sendo que a morosidade desta etapa depende dos processos utilizados.

### **2.4.4 Torneamento por Controlo Numérico Computorizado**

O processo de torneamento CNC consiste na fabricação via torneamento de peças, comandada numericamente. Este processo é indicado para peças cuja forma geométrica seja de revolução, sendo que durante a maquinação o corpo se encontrará em rotação fixo a um suporte da máquina.

A possibilidade de controlo numérico computadorizado permite o corte e maquinação de formas tridimensionais de estrutura complexa, reduzindo simultaneamente a intervenção e possibilidade de erro humano numa produção única ou em série. Confere também uma agilidade maior de mudança de esquemáticas ou procedimentos de maquinação que permite executar geometrias diferentes ou processos sequenciais mais rapidamente.

## 2.4.6 Sinterização Seletiva a Laser de Polímeros

A Sinterização Seletiva a Laser de Polímeros (SLS) é um processo de impressão tridimensional que permite obter um corpo físico, através de um modelo virtual utilizando a sinterização de uma poliamida em pó. À semelhança do processo de impressão tridimensional aditiva, o processo de SLS também envolve a criação de um ficheiro em formato .STL que posteriormente vai ser seccionado transversalmente em camadas através de um programa especializado. Após a preparação da geometria virtual, o material é consolidado no interior de uma câmara de processamento (com ambiente inerte e termicamente controlado), através de sinterização utilizando um feixe laser de dióxido de carbono. As camadas de pó são acumuladas e a sinterização solidifica cada área transversal sequencialmente de modo a resultar num modelo tridimensional sólido.

## 2.5 Tecnologia

Em relação ao fator tecnológico do pedal inteligente, existiu a necessidade de alargar o tópico a outras situações de resolução, devido ao facto de não existir informação diretamente relacionada com o que se pretende criar com um formato coincidente, assim sendo, o alargamento do tópico resolveu apenas descrever as situações abordadas e as possibilidades que as mesmas oferecem aquando da criação de um sistema dito inteligente e não as especificidades de produto patentes nas mesmas.

### 2.5.1 LED Super Brilhante

O facto de ser necessário que a iluminação do pedal seja efetuada por componentes de baixo consumo e simultaneamente seja visível em ambiente diurno, apontou para o uso da tecnologia de díodos emissores de luz (LED) como solução. Em termos de quantidade de luz emitida os LED super brilhantes têm um maior *output*, com um maior *input* energético consequente, no entanto essa mesma relação é superior a outras tecnologias de iluminação dentro das dimensões inicialmente pretendidas para o projeto (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Comparação de performance de LED comum versus LED com super brilho.

Parametros	Tensão corrente (20 mA)	Tensão máx. corrente (20 mA)	Intensidade Luminosa
LED 1	3.2 V	4 V	2250 mcd
LED 2	3.2 V	4 V	13000 mcd
Led 1 - LED Branco 5 mm Modelo-T-13/4 Everlight			
Led 2 – LED Superbrilhante 5 mm Modelo 5A3 Velleman			

Através da observação da Lei de Haitz's, que descreve a observação e a previsão da melhoria contínua ao longo dos anos considerando os díodos emissores de luz, podemos observar que a cada década, o custo por unidade de lúmen decresce um fator de 10 e a quantidade de luz gerada aumenta por um fator de 20 para um determinado comprimento de onda (cor) de luz; o que em cruzamento com a Lei de Moore's, que descreve que o numero de transístores utilizados em circuitos integrados duplica a cada 18 a 24 meses; indica uma otimização contínua e aumento da produção de díodos emissores de luz assegurando o uso desta componente como elemento de emissão de luz e o futuro evolutivo do pedal inteligente dentro deste parâmetro (ver Figura 15).

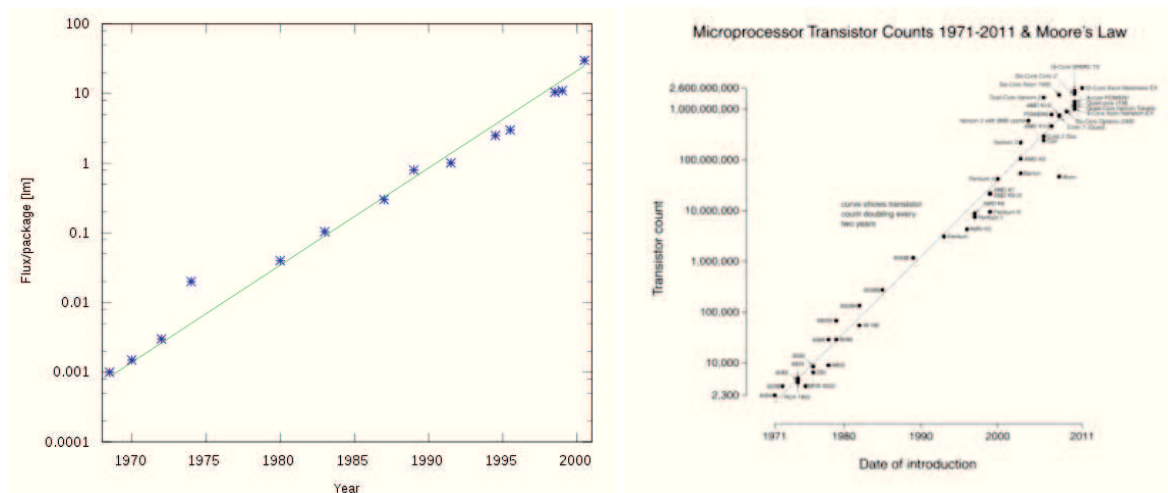


Figura 15 – Lei de Haitz's (direita) e Lei de Moore's (esquerda).

Apesar do preço e do consumo energético dos LED de alto brilho serem normalmente superiores aos dos LED regulares, a restrição relativa a uma iluminação de alta qualidade

e visibilidade apontou para a desconsideração desse fator. A procura de um tamanho reduzido por parte destes componentes sem sacrificar a intensidade luminosa conduziu à consideração inicial de LED vermelhos e brancos de 3 mm de diâmetro (ver Figura 16).

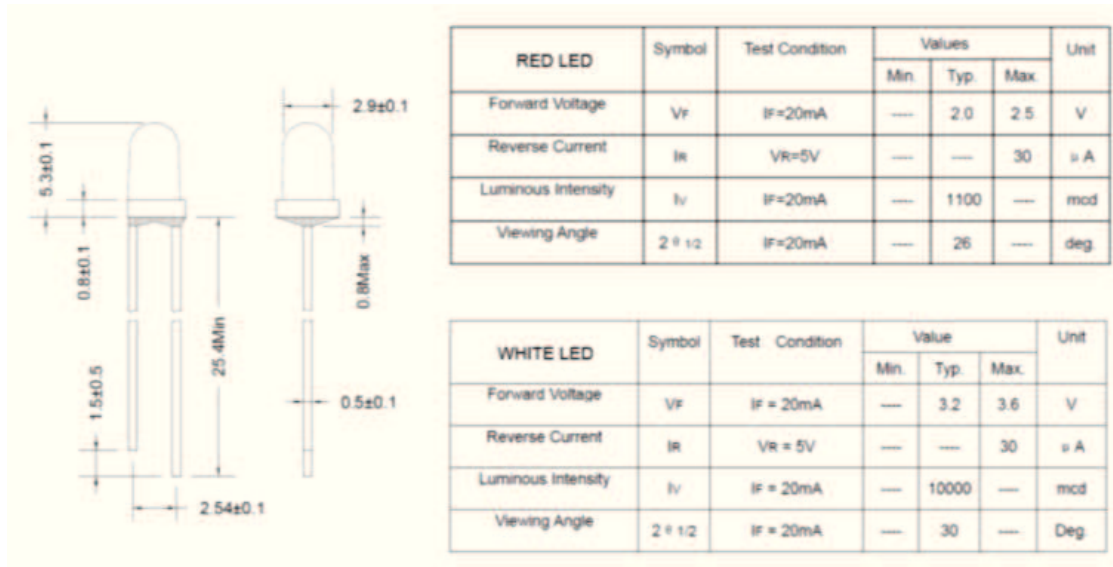


Figura 16 – Tamanho e tabelas referentes aos LED considerados.

## 2.5.2 Pedais com Iluminação LED

O Pedalite é um pedal que emite luz intermitente na borda exterior através de três LED (vermelho, amarelo e branco). Este pedal inicia o funcionamento dos LED assim que o utilizador começa a pedalar, através de um componente de conversão energética associado a um mecanismo interno, sendo que quando o utilizador interrompe a marcha o pedal continua a emitir luz intermitente até ao máximo de 5 minutos através da utilização de um elemento de acumulação de energia.

Este pedal não requer manutenção e os componentes relacionados com a iluminação são fabricados em polímeros da marca Dupont, sendo que a lente feita de policarbonato permite uma visibilidade até 1 quilómetro de distância (ver Figura 17) [18].



Figura 17 – Exterior e interior do pedal Pedalite [18].

O pedal Dosun J-1 também usa a tecnologia LED como componente emissor de luz e condensadores como componentes de armazenamento energético. Neste caso é necessário pedalar pelo menos trinta segundos para que os condensadores acumulem energia suficiente para funcionarem de forma autónoma, noventa segundos no máximo. Os dois LED estão localizados dentro de uma cobertura de plástico vermelho nos cantos exteriores do pedal (ver Figura 18) [19].



Figura 18 – Pedais Dosun J-1 [19].

### 2.5.3 Reflexão e difusão luminosa

No caso específico do projeto em questão, a quantidade de luz refletida é um fator de elevada importância na qualidade funcional do pedal em termos de visibilidade. O fato de os polímeros serem dos materiais mais versáteis em termos estruturais, faz com que os mesmos também sejam dos mais utilizados em filtros e em painéis refletores, permitindo obter resultados, que no âmbito dos filtros, se estendem desde a difusão até a uma concentração de raios luminosos, podendo mesmo alterar contrastes em zonas específicas através do material, da sua terminação de textura e até mesmo espessura. No caso dos refletores os polímeros também permitem os mais diversos tipos de reflexão, desde reflexão especular, difusa ou misturada (ver Figura 19).



Figura 19 – Filtros de difusão luminosa e painéis refletores.

A Lei de Snell também conhecida como lei da refração, resume-se a uma expressão que atribui um desvio angular sofrido por um raio de luz ao passar de um meio para outro com um índice de refração diferente.

Esta lei é utilizada para determinar a direção dos raios de luz através de meios refrativos com índices de refração distintos, podendo acontecer com um ângulo menor ou maior entre os meios, sendo esses ângulos mensurados em relação à linha normal representada pela fronteira perpendicular entre os meios.

A refração entre duas superfícies é denominada reversível quando todas as condições apontam para um ângulo comum movimentando a luz numa direção oposta. Geralmente só se aplica para meios isotrópicos (como por exemplo o vidro) sendo que em meios anisotrópicos o raio refratado divide-se no raio normal (que se comporta segundo a Lei de Snell) e no raio extraordinário (pode ser não coplanar ao raio incidente). O maior ângulo de incidência possível que resulta da refração num determinado material ou meio é denominado de ângulo crítico, sendo que neste caso o raio refratado vai viajar paralelamente ao limite entre os dois meios (ver Figura 20).

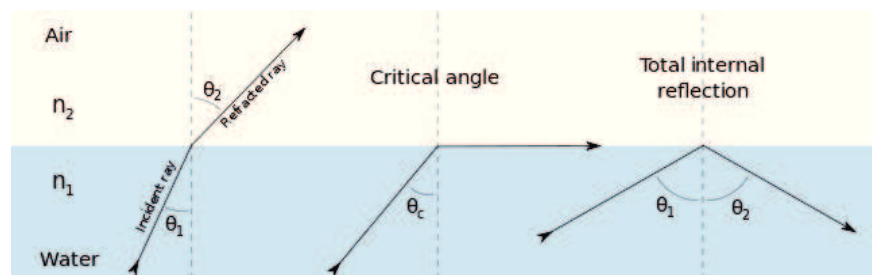


Figura 20 – Representação do ângulo crítico.

A lei de reflexão constata que um feixe de luz emitido numa superfície refletora planar vai ter um ângulo simétrico de saída e de entrada considerando um eixo de medição perpendicular ao plano de reflexão e coincidente com o ponto de incidência do feixe. A reflexão cúbica constata que dois elementos refletores colocados a um ângulo de  $90^\circ$  vão refletir os feixes de luz na mesma direção de entrada (ver Figura 21) [20].

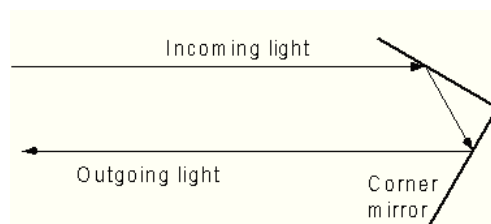


Figura 21 – Representação da reflexão cúbica.

### 2.5.3.1 Policarbonato

O policarbonato trata-se de um poliéster linear, obtido geralmente através da reação entre o bisfenol A e gás fosgênio, tendo como principal característica o seu alto grau de transparência, mesmo com espessuras consideravelmente altas. Para além disso a sua alta resistência ao impacto, boa estabilidade dimensional, boa resistência química e ao calor faz deste polímero um dos melhores tendo em conta o rácio entre a performance e preço material. A presença de grupos benzénicos na cadeia principal da molécula torna o policarbonato um polímero rígido, amorfo, e com baixa taxa de contração durante o arrefecimento, sendo cada vez mais aplicado em elementos de iluminação, lentes de óculos, entre outros.

São termoplásticos, permitindo a sua utilização em diversos processos produtivos (injeção, laminação, sopro, extrusão, etc.) e tem um grau de transparência que lhes atribui uma aparência estética semelhante à do vidro, sendo que possibilitam adicionalmente a aplicação de vários processos de acabamento material (polimento, pulverização, pintura, retificação, etc.) e maquinação (aplainamento, corte, perfuração, rebaixamento, torneamento).

## 2.5.4 Sensibilidade de Posicionamento

A sensibilidade de posicionamento de um objeto, sem que o mesmo tenha que recorrer a sistemas inteligentes exteriores, assenta no uso de sensores que trabalham através das deslocações de massas e das propriedades materiais, para executar determinadas tarefas. A deslocação de corpos em conjunto com a ativação de circuitos específicos consegue fazer com que um aparelho adquira funcionamentos diferentes em posições diferentes.

Para o caso específico em que só se necessita que o objeto reconheça duas posições relativamente a um eixo de rotação e que em cada uma delas execute uma função, os sensores de inclinação são uma das possíveis soluções.

Estes sensores existem sobre várias formas, sendo que os convencionais têm um corpo metálico que se desloca no seu interior, conectando apenas uma parte do circuito, podendo este mesmo ser composto por uma ou duas partes. Normalmente são sensores que servem somente para indicar quando um determinado componente atinge uma determinada posição mas também podem ser usados como interruptores (ver Figura 22) [21].



Figura 22 – Exemplo de sensores de inclinação.

Acelerómetros também constituem uma opção viável na questão de sensibilidade de posicionamento em relação a apenas um eixo, sendo uma tecnologia de melhor acabamento em termos de integração em circuito impresso. Estes componentes, funcionam basicamente através da medição de uma qualquer deslocação, à semelhança de uma massa corporal presa a uma mola aquando da existência de um movimento. Acelerómetros

piezoelétricos, piezoresistivos ou capacitivos, são comercialmente os componentes mais comuns de conversão do movimento mecânico para um sinal elétrico [22].

## 2.5.5 Funcionamento Inteligente

A tipologia de troca de informações, que os aparelhos existentes possibilitam, em relação a uma atividade física e de que forma essa mesma comunicação é efetuada constitui o Estado da Arte no âmbito de rastreo inteligente atualmente.

As pulseiras ou relógios de rastreo inteligente são capazes de rastrear, registrar e comunicar com o computador ou outros aparelhos, detalhes de uma atividade física. Através do cruzamento com aplicações existentes nos aparelhos inteligentes ou nos computadores, consegue-se multiplicar essa informação através da correlação entre os dados, habilitando opções de rastreamento que vão desde a intensidade de exercício físico, tipologia de exercício, medição de sinais vitais, rastreamento de percurso de atividade física, rastreamento da alimentação, quantidade de calorias perdidas, sugestão de novos exercícios e partilha nas redes sociais dos exercícios efetuados, sendo que a troca de dados pode ser feita através de descarga posterior de dados ou em tempo real, sempre colaborando com uma aplicação existente num aparelho inteligente ou computador (ver Figura 23) [23].



Figura 23 – Alguns relógios de rastreo inteligente.

As aplicações existentes nos telefones inteligentes, são soluções independentes de objetos sensoriais exteriores que apesar de terem o seu registo de informação dependente do aparelho em si, executam os pontos principais, tais como o rastreamento e registo de

mapeamento via GPS, seleção de atividades físicas e cálculos medianos dos resultados das mesmas (ver Figura 24) [24].



Figura 24 – Exemplos de aplicações em Android.

## 2.5.6 Controlo e Comunicação com Dispositivos Inteligentes

Nos dias de hoje existe um largo grupo de periféricos e aparelhos que estabelecem ligações com dispositivos inteligentes ou computadores.

Os sistemas operativos são essenciais à constituição de um *Smartphone*, sendo que os mais utilizados atualmente são o Android, iOS, Windows Phone, e BlackBerry. As comunicações sem fios estabelecidas entre estes e outros aparelhos são normalmente efetuadas via *Bluetooth* ou face à existência de uma rede sem fios comum.

Um bom exemplo desta comunicação são as lâmpadas Greenwave que funcionam através de um sinal sem fios, emitido por um componente conectado a um *router*, permitindo estabelecer horários para ligar e desligar as lâmpadas, controlar cada lâmpada individualmente, ou em conjunto e ajustar a intensidade luminosa (ver Figura 25) [25].



Figura 25 – Sistema de iluminação Greenwave [25].

O Lockitron trata-se de um projeto que propõe uma comunicação através de uma rede sem fios local e receciona comandos de qualquer aparelho Android, seja através de mensagens codificadas ou intuitivas. Dispõe também de uma função de sensibilidade automática via *Bluetooth* para que quando o utilizador se encontre perto da porta de casa, a mesma se abra automaticamente (ver Figura 26) [26].



Figura 26 – Sistema de fechadura Lockitron [26].

## 2.5.7 Microcontroladores de Interface de Controlador Programável

Os microcontroladores de Interface de Controlador Programável (PIC), são uma tipologia de microcontroladores fabricados pela Microchip Technology.

Um microcontrolador trata-se de um componente eletrónico, que pode ser programado para funções específicas, através dos mais variados tipos de linguagem, contendo um

processador, memória e pinos de entrada e saída (com funções únicas ou multiplexadas) para periféricos. A linha de microcontroladores PIC produzidos pela Microchip, é composta de microcontroladores de 8, 16 e 32 bits. A linha de 8 bits inclui os microcontroladores PIC10 e PIC12 (componentes inclusivos de 8 pinos no máximo, com pequena capacidade de memória e periféricos simplificados) [27][28][29][30].

Os PIC16 baseiam-se em arquiteturas de 12 e 14 bits, sendo que os microcontroladores com arquitetura de 14 bits possuem como vantagens, uma maior memória de programa e dados, diversificados periféricos adicionais (temporizadores, interfaces seriais assíncronas, interfaces seriais síncronas, USB de baixa velocidade, conversores analógicos/digitais, etc.) quando comparados aos de arquitetura de 12 bits oriundos do primeiro modelo 16C54 (originalmente desenvolvido pela General Instruments) [27] [28][29][30].

Os microcontroladores PIC17 e PIC18 são a evolução dos PIC16 e utilizam instruções de 16 bits. A linha PIC18 (família do microcontrolador aplicado no desenvolvimento do projeto), usa instruções bastante similares às da linha PIC17 porém com um conjunto de instruções aumentado (58 instruções em PIC17 e 75 instruções em PIC18), pilha de *hardware* amplificada (16 níveis no PIC17 e 31 níveis no PIC18), memória aumentada, etc [27].

Ainda na linha de 16 bits da Microchip encontram-se os microcontroladores com barramentos de dados de 16 bits e instruções de 24 bits (PIC 24, PIC30 e PIC33), particularmente voltados para aplicações em que o processamento rápido de sinais é necessário (processamento de sinais de sensores, controle de motores, etc.). A linha de 32 bits é a mais recente e inclui microcontroladores com grande capacidade de memória de programa e dados e periféricos avançados sendo voltados para aplicações complexas, sobretudo nas áreas de comunicação e Internet [27] [28][29][30].

## **2.5.8 PIC18F4520**

O microcontrolador PIC18F4520, foi o microcontrolador selecionado como elemento principal de comando da placa de circuito integrado no âmbito do desenvolvimento do

projeto. Trata-se de uma versão reformulada e atualizada do PIC18F452 e inclui como características principais um módulo de detecção de baixa-tensão e cão de guarda programável, um módulo de oscilador interno de 8 MHz com possibilidade de configuração e acrescento externo de cristais e ressonadores cerâmicos, dois comparadores analógicos independentes, conversor analógico/digital com resolução de 10 bits e 13 canais de entrada, módulo de comunicação serial síncrona (MSSP) capaz de operar em modo SPI (mestre ou escravo, nos quatro modos de transmissão) e I2C (mestre ou escravo), dois módulos de captura/comparação/PWM (CCP) tendo um deles capacidades avançadas (ECCP), polaridade programável, até quatro saídas, além de *restart* e *shutdown* automáticos, um timer de 8 bits e três timers de 16 bits, porta paralela escrava para transferências de 8 bits em alta velocidade, três pinos de interrupção externa e quatro pinos de detecção de mudança de estado, trinta e seis pinos divididos entre cinco portas de entrada e saída, tensão de operação entre 4,5 V e 5,5 V, frequência máxima de operação 40 MHz (a 5 V) e disponibilidade de encapsulamentos variados (ver Figura 27) [27] [28][29][30].

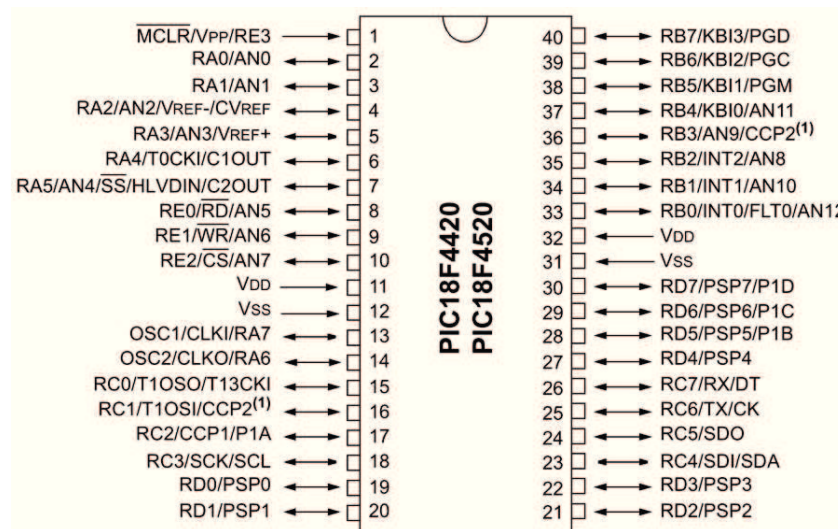


Figura 27 – Esquema do PIC18F4520 [27].

Esta linha de microcontroladores foi selecionada pois possui um avanço considerável e diversas funcionalidades adicionais, face aos PIC16. Os PIC18 utilizam uma arquitetura interna conhecida como Harvard (carateriza-se pela utilização de barramentos distintos para acesso à memória de dados ou de programa), tendo como vantagem principal a possibilidade de acesso simultâneo, por parte da CPU, à memória do programa e à

memória de dados, possibilitando a busca da instrução seguinte a ser executada e a leitura ou escrita de um dado originado durante a instrução executada no momento. Face à arquitetura de Von Neumann (arquitetura com espaço de endereçamento único para o programa e para os dados), a arquitetura Harvard é mais rápida, porém não é possível executar um programa diretamente da memória de dados; sendo que a arquitetura Von Neumann possibilita uma maior flexibilidade ao programador nesse sentido. Ambas foram otimizadas em relação às suas deficiências, possuindo hoje em dia desempenhos similares, sendo que a arquitetura Harvard continua a ser a preferida para a implementação em máquinas de alto desempenho [27][28][29][30].

## 2.5.9 Linguagem C

A linguagem C foi selecionada para o projeto como linguagem principal de programação a ser interpretada pelo programa MPLAB IDE v8.92, principalmente devido à sua simplicidade, acessibilidade, eficiência e liberdade relativamente a instruções permitindo intercalar comandos em linguagem *Assembly*.

Trata-se de uma linguagem de programação compilada (linguagem na qual o código fonte é executado diretamente pelo sistema operacional ou pelo processador, após ter sido traduzido por um processo de compilação executado por um programa de computador, o compilador), existindo poucas arquiteturas que não comportem a possibilidade de utilização de um compilador para linguagem C. É normalmente utilizada para controlar atividades de baixo nível, possibilitando a programação estruturada e permitindo o uso e repetição de variáveis léxicas, enquanto um sistema composto por uma coletânea de regras previne e auxilia à correção da maioria dos erros não intencionais. Todo o código executável é contido dentro de sub-rotinas, intituladas de funções, sendo que os seus parâmetros têm sempre um valor de retorno [30].

Esta linguagem, contém também um determinado número de palavras-chave fixas, utilizadas para o comando de funções, estabelecimento de variáveis, etc. e utiliza livrarias (conjunto de funções contidas num único arquivo tipicamente respetivo a um ficheiro de cabeçalho) como um método primário de extensão. Na sua forma básica a maioria dos

programas escritos em C terão o seguinte formato:

- Comandos de pré processamento: Comandos que indicam ao compilador que tipo de pré processamento necessita de executar, antes de executar a compilação. Por exemplo `#include <stdio.h>` é um comando de pré processamento que indica ao compilador a necessidade de incluir o ficheiro cabeçalho `stdio.h` antes de efetuar a compilação. Estes comandos podem ser diretivas incondicionais; `#include`, `#define` (define uma macro de pré processamento), `#undef` (indefine uma macro de pré processamento); diretivas condicionais, `#ifdef` (se a macro respetiva estiver definida), `#ifndef` (se a macro respetiva não estiver definida), `#if` (testar se uma condição é verdadeira), `#else` (alternativa face a `#if`), `#elif` (`#else` e `#if` numa só declaração), `#endif` (termino condicional do pré processamento) ou outras diretivas.

- Funções: Blocos constituintes de um programa em C. Qualquer programa contém uma ou mais funções, sendo obrigatoriamente uma delas a função principal ou `main()`. Para além de permitir a criação de blocos de programas para funções desejadas, a linguagem C, possui um segmento de funções integradas utilizadas para fins específicos.

- Variáveis: Podem ser globais ou locais e são utilizadas para manipular dados complexos. As variáveis locais só tem efeito no interior do bloco onde são definidas e as variáveis globais são definidas anteriormente e exteriormente às funções, podendo ser modificadas e visualizadas em qualquer função que as referencie.

- Declarações e Expressões: As expressões combinam as variáveis como constantes para criar novos valores. As declarações são expressões, designações, chamamentos de funções ou elementos de controlo de outras declarações que constituem o programa alvo.

- Comentários: Linhas sem influência direta no código da linguagem onde o programador pode incluir informação relevante.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

### **3 - Desenvolvimento do Produto**

---

Normalmente, um processo de Conceção e Desenvolvimento do Produto, comporta certas etapas básicas desde a ideia inicial até ao produto industrializado. Essencialmente as etapas principais existentes em qualquer projeto que envolva o desenvolvimento de um produto, são:

- **Ideia inicial:** Etapa que pode ser ou não impulsionada por ferramentas criativas na qual se dá o surgimento e registo da ideia inicial num qualquer suporte.

- **Exploração da ideia inicial:** Etapa que envolve ou não a utilização de ferramentas para a exploração, avaliação, proliferação e desenvolvimento inicial da ideia.

- **Concetualização:** Etapa que surge simultaneamente à ideia inicial e pode acompanhar a mesma através da exploração inicial, ou surgir só no final dessa etapa. É a etapa onde se reduz a complexidade da ideia a uma síntese breve e abrangente o suficiente para comportar a totalidade da ideia e os seus aspetos essenciais.

- **Avaliação ou aprovação:** Fase em que a ideia é submetida à avaliação através de processos criativos ou técnicos de modo a identificar se o desenvolvimento da mesma num âmbito de projeto faz ou não sentido.

- **Pesquisa:** Pode ser uma fase incluída na avaliação ou aprovação, ou uma fase posterior. Esta fase serve não só para suportar o valor da ideia, mas também para acompanhar o projeto em termos de inovação e desenvolvimento, suportando o mesmo com conhecimento já existente relativamente às áreas abordadas.

- **Definição:** Fase inicial do processo de parametrização, em que se define um modelo num qualquer suporte, capaz de comportar os requisitos mutáveis e algumas resoluções que

podem ser consideradas inicialmente e durante o desenvolvimento do processo.

- Parametrização: Fase de desenvolvimento do produto na qual se têm em conta resoluções técnicas e criativas e se criam parâmetros reais visando a construção de um produto relativamente a requisitos antecedentes, processos produtivos posteriores, entre outros.

- Análise: Etapa de avaliação dos parâmetros estabelecidos, dos modelos criados ou do processo desenvolvido até uma fase específica, validando e criando oportunidades de reformulação com bases científicas ou criativas.

- Construção: Etapa de translação do produto, do âmbito virtual (ideia mental, desenho bidimensional, representação tridimensional, etc.) para uma fase de prototipagem de modo a obter uma geometria material e uma nova abordagem ao território de análise, avaliação e aprovação.

- Industrialização: Fase que comporta todos os processos de consideração e seleção em relação a um produto de modo a que o mesmo seja projetado e otimizado considerando uma produção de âmbito industrial.

Considerando a complexidade de um processo de Conceção e Desenvolvimento de Produto é impossível afirmar a obrigatoriedade, imutabilidade ou sequencialidade do processo podendo existir a utilização de etapas num cenário individual ou simultâneo, dependendo da abertura proporcionada pelo projeto. Errado será também afirmar a veracidade canónica do processo de Conceção e Desenvolvimento de Produto descrito anteriormente; visto que existem muitas outras tipologias inclusivas de um maior ou menor número de etapas que favorecem territórios como a generalização ou a adaptação de ideias, indústrias, produtos, etc.

Ao longo deste documento, considerou-se que o elemento de importância a ser tido em conta pela área da Conceção e Desenvolvimento de Produto aquando da criação de um objeto num cenário determinado, não deve ser focalizado no seguimento de um modelo de

projeto, mas sim na adaptação das metodologias e processos como forma de fortalecimento e otimização do produto em questão.

O processo ou metodologia são dos elementos mais importantes, se não os mais importantes no âmbito de Concepção e Desenvolvimento de Produto; em grande parte porque processos diferentes atingem resultados diferentes e proporcionam territórios diferentes para a inovação, criação e adaptação de ferramentas processuais.

Neste projeto específico, considerando uma fase inicial de projeto, após a formulação e análise do conceito proposto e estruturado até a altura, deu-se início a uma fase de exploração (ver Figura 28).



Figura 28 – Linha processual de Concepção e Desenvolvimento de Produto.

A necessidade de existência desta fase surgiu do envolvimento no projeto após a fase conceptual, comportando a utilização de um objeto conseqüente da ideia inicial, que poderia não ser o mais indicado como elemento de transmissão da ideia inicial. Neste caso, o facto da fase de exploração surgir após a fase de pesquisa, fez com que se tivessem de considerar algumas restrições prematuras (sistema interno eletrônico e mecânico, dimensões, formato, etc.) o que impediu a liberdade total técnica e criativa, mas impulsionou uma resolução mais fortalecida tendo conta um panorama de seleção de forma definitiva.

Na fase de exploração foram utilizadas ferramentas como o esquiço, diálogo, *brainstorming*, experimentação dimensional, etc., de modo a extrair o máximo de possibilidades de resoluções relacionadas com a ideia inicial, registando-as num suporte bidimensional (esquiço) ou tridimensional (modelação tridimensional rápida) de modo a que as mesmas pudessem ser avaliadas, aprofundadas e seleccionadas.

O esboço, permitiu o desenvolvimento e ajuste de detalhes através do desenho, uma representação imediata do raciocínio e acompanhamento do desenvolvimento criativo, registrando e oferecendo *feedback* sobre esse mesmo registro.

Os processos de *brainstorming* e experimentação dimensional, permitiram perceber requisitos técnicos e criativos e considerar soluções primárias avaliando e progredindo em relação às características estabelecidas durante o surgimento da ideia inicial.

A representação tridimensional rápida, utilizando o programa Creo Parametric 2.0, foi utilizada numa segunda etapa de modo a transacionar os objetos conceituais para um formato mais conciso, propondo as dimensões e relações necessárias para transmitir o conceito dentro da informação obtida até então. Em termos de requisitos teve-se em conta as dimensões máximas e mínimas do corpo do pedal, o sistema mecânico inerente ao mesmo, o espaço para o sistema tecnológico interno, o posicionamento de componentes em áreas predefinidas, o acabamento polido aliado a uma superfície única e lisa, uma zona para aderência do pé, zonas para os refletores e um enquadramento específico para a zona luminosa.

Dentro deste âmbito foram sintetizados nove modelos conceituais de pedal, de modo a que se pudessem selecionar as restantes características restritivas e obter uma avaliação mais abrangente que permitisse criar um modelo mais próximo do *Design Lock*, em conjunto e com a colaboração do cliente. Os modelos abrangeram situações específicas consideradas nas fases de *brainstorming* e experimentação dimensional, tais como o minimalismo funcional, o carácter de lazer desportivo inserido num ambiente citadino, a possibilidade de personalização, etc. e foram desprovidos de definição a nível de detalhes, permitindo a intervenção do cliente numa peça menos parametrizada.

Ao longo deste processo, a colaboração com o cliente face a uma Conceção e Desenvolvimento de Produto industrial, conteve fases de propostas conceituais de maior definição, propondo modelos singulares ou um leque de modelos com características concebidas durante um desenvolvimento do projeto face a requisitos do cliente. Deixar esta fase mais ampla e permitir a influência direta do cliente no processo de avaliação e seleção,

permitiu justificar e avaliar certas características futuras do modelo, que caso contrário, poderiam ter sido eliminadas ou demovidas do processo como elementos de resposta aos requisitos do cliente.

Para além disso o envolvimento direto do cliente permitiu observar e delinear com maior poder de decisão características funcionais, tanto a evitar como a incluir, na futura construção do modelo; reforçando o conceito e as restrições a ter em conta. Esta característica do processo revela que o envolvimento direto e controlado do cliente durante a Conceção e Desenvolvimento de Produto a nível empresarial e industrial, permite um maior controlo e impulsiona um desenvolvimento mais consciente relativamente aos aspetos com um maior risco de projeto.

### **3.1 *Design Lock***

Após a obtenção do *feedback* do cliente, prosseguiu-se para o estabelecimento do *Design Lock*. Nesta fase, o objetivo ainda não assentou na criação de um objeto definitivo, mas sim de um objeto virtual que contivesse todas as restrições e requisitos até então identificados, mantendo uma adaptabilidade ao surgimento de novos aspetos.

Utilizou-se nesta fase a Casa da Qualidade como elemento de auxílio à área de exploração e criação de modelos adequados registando e avaliando simultaneamente os requisitos do cliente, (ver Figura 29).

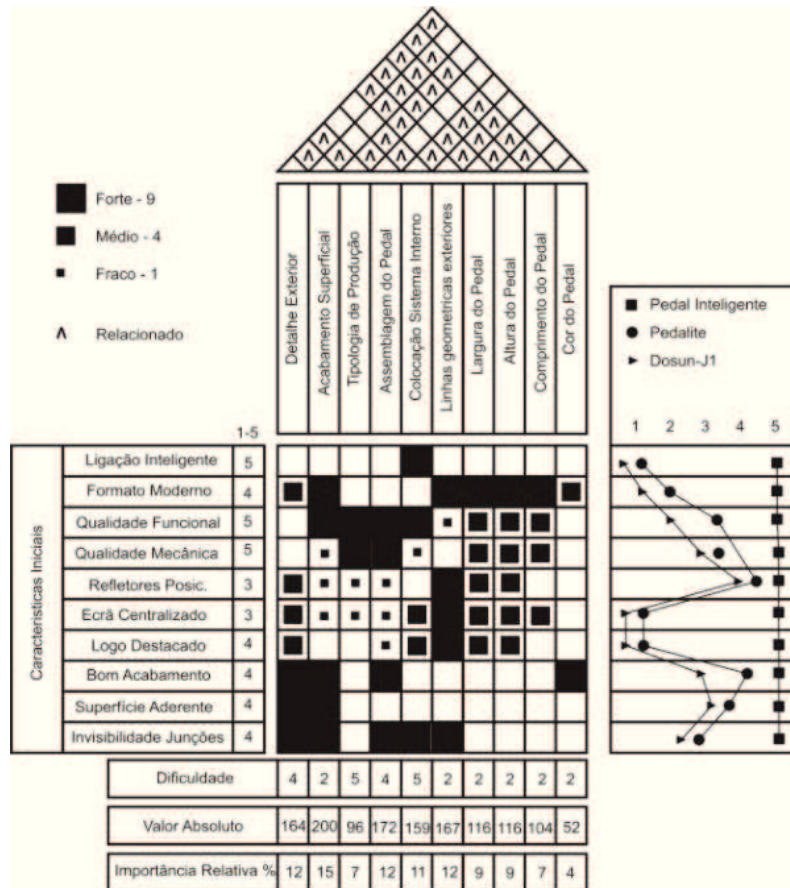


Figura 29 – Exemplo figurativo da Casa da Qualidade utilizada durante o processo.

Esta ferramenta, trata-se de uma matriz composta por uma rede de objetivos, estratégias e medidas que permitem responder de melhor forma aos requisitos do cliente identificando riscos, características importantes e críticas documentando simultaneamente a análise [31].

Normalmente nesta metodologia os campos utilizados focam-se nos requisitos dos clientes, o grau de importância destes para o cliente/empresa/necessidades futuras, planos de qualidade dos requisitos, características de qualidade/técnicas e metas alvo, de modo a se conseguir estabelecer uma matriz de correlações e relações, resultando em campos como o *benchmarking*, peso absoluto/relativo dos requisitos e fatores de dificuldade técnica [31].

No projeto em questão foram aplicadas três fases durante a execução do processo:

- Primeira Fase: Essencialmente a fase de constituição do modelo básico para o planeamento do produto e processo. Foram documentados os requerimentos e a visão do

cliente, oportunidades competitivas, medidas do produto, medidas competitivas do produto e a habilidade técnica da empresa de corresponder aos requerimentos do cliente.

- Segunda Fase: Esta fase foi direcionada para as áreas técnicas. O processo de desenvolvimento de um qualquer produto/serviço requer inventividade e criatividade por parte das equipas, sendo que esta metodologia permitiu um registo e documentação de especificações, que podem ser mais tarde avaliadas de modo a perceber qual das opções correspondem melhor ao que o cliente pretende.

- Terceira Fase: A terceira fase foi composta pela análise dos dados obtidos através da ferramenta e a sua inserção e utilização em âmbito de projeto.

Para além disso o processo acima descrito sofreu mutações de modo a servir melhor o projeto. As diferenças principais foram:

- Na segunda fase; em alguns requisitos, o processo transferiu-se para o âmbito da correlação existente entre o campo técnico e o campo criativo, ao invés da correlação entre o campo técnico e o cliente, de forma a definir um caminho de projeto e resolução dos requisitos.

- Na terceira fase; algumas das especificações do produto a nível de *design* e engenharia foram traduzidas para o planeamento de produção e montagem, projetando-se simultaneamente o controle e otimização contínua do mesmo.

Apesar de não ser habitualmente aplicada à geração de ideias e diversificação de possibilidades conceptuais, esta metodologia auxiliou este processo ao converter os requisitos do cliente em valores quantitativos, demonstrando o grau de importância que deve ser atribuído a cada aspeto inicial, aquando de uma fase criativa. Para além disso, permitiu perceber adicionalmente o desempenho do produto alvo ou conceito face a uma comparação com produtos concorrentes já existentes.

O facto de ser uma ferramenta extremamente adaptável, através da inclusão e exclusão de

campos de entrada e saída, permitiu que a mesma fosse utilizada ao longo do desenvolvimento do projeto, não como metodologia de análise profunda de uma determinada etapa, mas como metodologia de resposta rápida a questões chave inerentes ao projeto. Verificou-se também através desta experimentação, a capacidade de criar não só campos que se correlacionem, mas também matrizes da qualidade singulares que tenham correlações entre si, servindo não só uma determinada etapa e decisão mas acompanhando a mesma durante toda a sua resolução como metodologia de suporte.

Da aplicação desta metodologia retirou-se que o acabamento, detalhe e formato exterior do pedal seriam os elementos que necessitariam de maior atenção de forma a responder melhor aos requisitos do cliente. Para além disso deu-se também a perceção de uma qualidade alvo de excelência e de uma dependência elevada relativa aos aspetos técnicos do pedal.

Este processo, foi também importante para a empresa em termos de experimentação revelando uma ferramenta capaz de estabelecer uma relação de interesse inicial, valorização pelos requisitos do cliente e fortalecimento de interações.

Adicionalmente à informação já registada, do *feedback* do cliente em relação aos modelos criados, extraiu-se que o ecrã de passagem de luz deveria obedecer a uma composição longitudinalmente centrada, sendo essa mesma linha acompanhada pelo posicionamento de elementos refletores frontais e traseiros de modo a aumentar a segurança do utilizador. O acabamento da superfície de aderência deveria ser arenoso, ondulado ou ser composto por um material menos rígido. No corpo estrutural não deveria estar à vista nenhum tipo de aparafusamento ou encaixe das peças quando o mesmo se encontrasse totalmente montado (ver Figura 30).

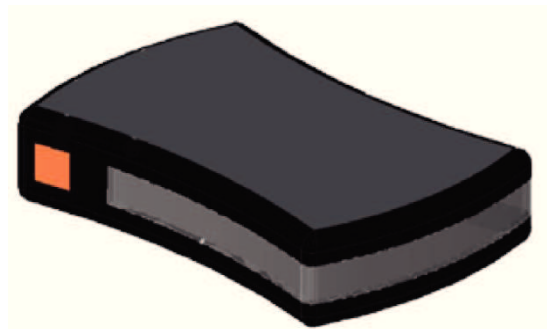


Figura 30 – Representação do primeiro formato referente ao *Design Lock*.

O eixo deveria ser adaptável à maioria das bicicletas e ter a melhor durabilidade possível sem sacrificar demasiado o formato do pedal. De forma geral o sistema e a comunicação deveriam ser intuitivos, de uso simples e ter o máximo de compatibilidade possível com aparelhos já existentes.

Caraterísticas como a possibilidade de personalização, inserção do pedal num formato mais desportivo ou complexificação da forma não tiveram aprovação por parte do cliente.

A existência de um logótipo iluminado composto por um polímero translúcido de tom azul devidamente enquadrado no topo do pedal, também foi uma constante no *feedback* do cliente. Tendo em conta os dados adquiridos estabeleceu-se um modelo conceptual/virtual de modo a servir como linha guia para as restantes resoluções (ver Figura 31).

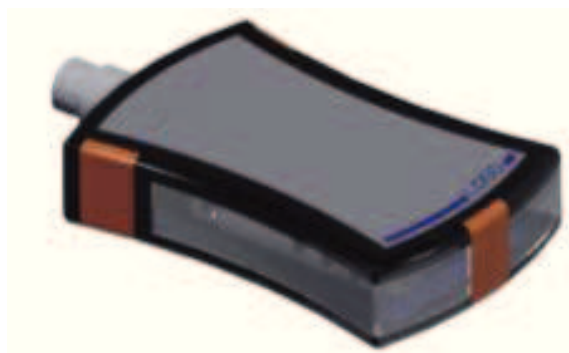


Figura 31 – Modelo base guia utilizado no processo.

Importante será salientar que por modelo conceptual/virtual entende-se um modelo capaz de sintetizar as caraterísticas principais identificadas até então para o produto, sem definir o mesmo através de uma parametrização completa optando por um desenho simples.

A constituição deste tipo de modelos ou objetos deve ser efetuada cuidadosamente, de modo a que os mesmos sejam somente a representação mais direta possível dos requisitos até então identificados, sem qualquer tipo de desenvolvimento acrescentado ou sugestão de resolução. O seu propósito é servir como ferramenta para o afinamento do pensamento relativo ao campo das restrições, criando uma área limitadora de modo a facilitar a construção de modelos futuros destinados a uma parametrização.

O desenho geométrico exterior referente ao corpo, assentou num modelo adaptável proveniente de quatro arcos, definidos por quatro circunferências intercetantes dos vértices de uma forma retangular [ABCD] (ver Figura 32).



Figura 32 – Representação do desenho geométrico exterior e dos relacionamentos existentes.

Nesta organização, o espaço geométrico alvo de maior adaptação aquando de qualquer alteração possível em termos de dimensões internas, seria o retângulo [ABCD] sendo que a dinâmica exterior pretendida seria mantida pelos arcos relativos aos vértices.

## 3.2 Parametrização do Produto

Após a obtenção do modelo de definição de características gerais, avançou-se para a fase de parametrização. Importante será referir que esta fase teve um início paralelo ao início da fase de exploração, de modo a transpor questões mais avançadas, que se pudessem colocar em fases anteriores e ser aproveitadas para uma resolução futura. Logo, apesar das fases se apresentarem sequencialmente o seu desenvolvimento foi simultâneo em várias etapas (ver Figura 33).



Figura 33 – Linha temporal de desenvolvimento de projeto e etapas.

A fase de parametrização assentou na decisão e definição dos parâmetros necessários (medidas, relações geométricas, espessuras, zonas de encaixe, reforço, etc.) especificando um modelo geometricamente completo. Como tal, apesar do documento presente demonstrar a parametrização como um processo contínuo e faseado em áreas específicas, existiram variadas reavaliações, experimentações e soluções consideradas ao longo do seu percurso contendo algumas fases necessárias de regressão.

A importância e o risco desta fase residiram na transação de um modelo conceptual/virtual para um modelo parametrizado. Durante esta etapa o facto do objeto conceptual/virtual se encontrar mal constituído em termos de características pode perpetuar as mesmas até uma fase futura, criando regressões e reformulações morosas, daí a elevada importância em relação à existência de uma ferramenta paralela que acompanhe esta transação e desenvolvimento e contenha os requisitos iniciais relativos ao modelo conceptual/virtual.

### 3.2.1 Parametrização do Corpo Principal do Pedal

O corpo do pedal e a sua construção geométrica foram durante a maioria do processo elementos resultantes de fatores externos, tais como os restantes componentes estruturais, mantendo a aparência exterior como um fator de finalização em todos os modelos. O facto de ser um produto complexo atribuiu ao pedal como conjunto, a especificidade de uma evolução conjunta e altamente dependente, sendo que o corpo principal foi um elemento sujeito a um desenvolvimento constante e com algumas etapas chave.

No desenvolvimento do corpo principal, denotou-se a evolução incremental e conjunta de todo o projeto e como tal nesta secção do documento foi apenas considerada integralmente a evolução do corpo principal e a forma como foi influenciada pelos restantes componentes.

### 3.2.1.1 Modelo 1

O primeiro modelo foi o culminar da modelação inicial. Este modelo caracterizou-se pela transposição parametrizada da ideia inicial do cliente e pelo cruzamento com o formato mais apreciado. Em termos de resolução técnica, este corpo inicial propôs a fixação do sistema considerando uma possível conversão energética e modelos iniciais de montagem e isolamento da totalidade do pedal (ver Figura 34).

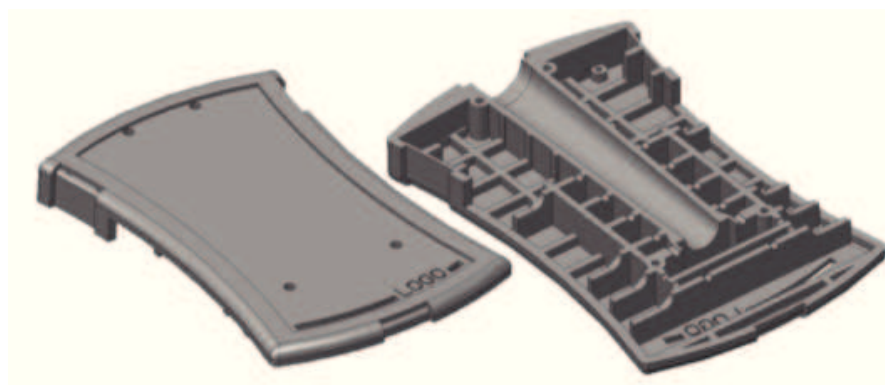


Figura 34 – Modelo Inicial do Corpo Principal.

Como a etapa relativa à seleção de material ainda se encontrava em aberto, os reforços efetuados ao corpo não foram resultantes de uma análise estrutural, mas sim de um acomodamento dos corpos internos, em consonância com o processo de montagem definido.

Este modelo serviu maioritariamente como ferramenta crítica de soluções inicialmente perspectivadas por parte do cliente, em termos de resolução do sistema, eixo, topo do pedal, localização do logo, etc. de modo a que o patamar de partida para cada uma dessas áreas não resultasse numa regressão tardia durante o processo. Deste pensamento crítico inicial,

resultaram territórios de exploração e necessidades restritivas fulcrais para estabelecer não só, o corpo estrutural do pedal, mas também o funcionamento do seu sistema interno e aparência externa.

### 3.2.1.2 Modelo 2

Um segundo modelo intermédio ao processo crítico permitiu perceber a necessidade inicial de reforço em certas zonas chave através de um método de análise (ver Figura 35).



Figura 35 – Modelo utilizado no método de subtração material aplicado aos reforços.

Descrito mais à frente num campo específico do documento encontra-se a tipologia de processo de análise estrutural aplicado a este modelo, que permitiu neste caso perceber em antemão quais as zonas que iriam sofrer maior esforço face à carga aplicada de modo a influenciar a construção de modelos futuros (ver Figura 36).

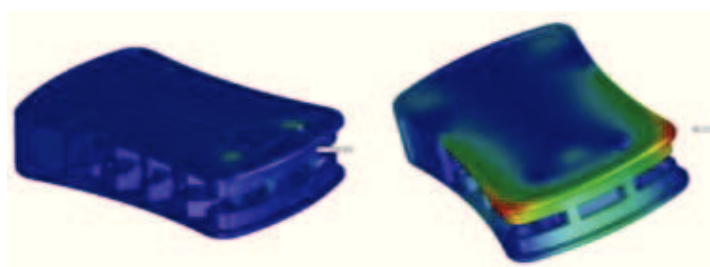


Figura 36 – Esforços representados em modelos precoces.

Com auxílio do programa SolidWorks Educational Edition 2013, efetuou-se o processo

através da análise das zonas que revelaram menor esforço face à carga testada, permitindo perceber numa fase precoce, que o comportamento do grupo de materiais possivelmente considerados, habilitava a construção do modelo e o seu reforço posterior, proporcionando desta forma uma maior liberdade construtiva, através da independência das duas fases. Este processo assentou na análise estrutural com auxílio a ferramentas internas de verificação geométrica do programa, identificando as zonas com maior alterabilidade geométrica e consequentemente as zonas de maior importância estrutural.

Uma análise posterior conjunta com o cliente e a receção do seu parecer crítico relativamente à construção do segundo modelo revelou que as soluções aplicadas em termos de montagem e sistema não seriam as que mais diretamente correspondiam aos requisitos definidos inicialmente. O formato exterior e a composição geométrica geral dos componentes foram validados como positivos, mas com necessidade de reformulação, nomeadamente a nível de qualidade perspectivada e de acabamento e aparência exterior.

Neste modelo do corpo principal, a superfície de contacto com o pé do utilizador foi considerada como um elemento produzido à parte que teria uma fixação através de encaixe ou colagem. A qualidade da resolução de adesão superficial e acabamento entre os dois corpos (corpo principal e superfície de topo) foi analisada induzindo à procura de um outro processo mais preciso, não dependente do erro humano, garantindo simultaneamente o bom acabamento entre os dois corpos (sem folgas, defeitos ou desalinhamento).

### **3.2.1.3 Modelo 3**

O terceiro modelo do corpo principal foi construído tendo em conta um processo de injeção de multicomponente, considerado através dos requisitos encontrados no segundo modelo, relativamente ao processo de junção do topo e do corpo principal, apresentando consequentemente um novo modelo de fixação entre as duas metades do corpo, e uma superfície de topo modificada, visto que as entradas dos elementos de fixação não poderiam ser executadas através do topo de modo a evitar a sua visibilidade e garantir o acabamento exterior estabelecido pelo cliente.

As entradas dos elementos de fixação do corpo foram reposicionadas do topo para uma situação complanar à entrada do eixo do pedal e a sua tipologia foi modificada aumentando o seu comprimento e área de efetividade de ligação. A superfície concebida neste modelo permitiu um favorecimento do processo de injeção multicomponente, utilizando as suas restrições como favorecimento da forma final (ver Figura 37 e Figura 38) [32].

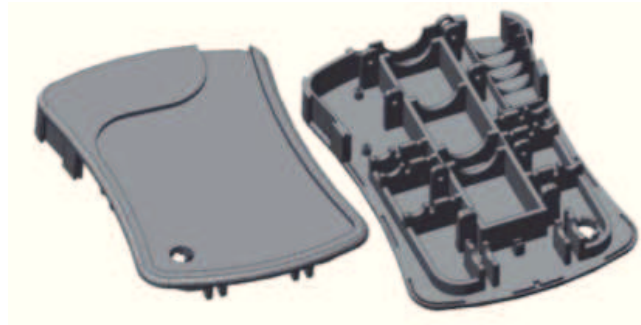


Figura 37 – Segundo modelo do corpo principal.

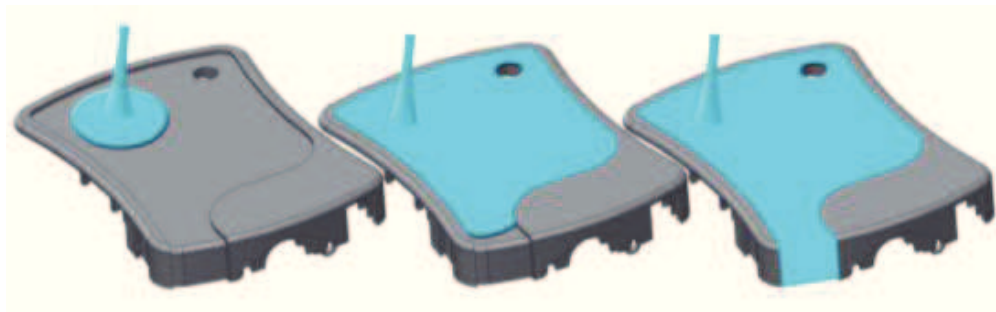


Figura 38 – Superfície concebida de forma a favorecer o processo de injeção.

O facto do desenho final deste modelo permitir a dependência e adaptação a fatores técnicos, aumentou o grau de liberdade face ao surgimento de novas restrições sem comprometer as características estéticas e funcionais estabelecidas no modelo conceptual.

Por vezes, quando o objeto se revela complexo, delinear e defenir o produto numa fase muito precoce do processo é prejudicial ao inserir demasiadas reformulações e retornos à fase conceptual, devido ao facto das restrições serem consideradas face a um produto demasiadamente definido.

A metodologia aplicada a este projeto, que considera as restrições como parte do processo

e não como elementos restritivos de um produto, possibilitou uma maior liberdade face a essas dificuldades, prolongando consequentemente a fase de parametrização (ver Figura 39).



Figura 39- Processo convencional de Conceção e Desenvolvimento de Produto versus processo aplicado ao projeto do pedal inteligente.

Para além disso, este modelo também apresentou uma nova organização e geometria em relação ao ecrã protetor, aos elementos refletores e a um isolamento na totalidade da montagem. A estrutura interna foi modificada para o uso da segunda tipologia de eixo e os reforços internos foram apenas resultantes de uma necessidade de encaixe e suporte do eixo, do sistema interno e da componente condutora de luz.

O abandono da conversão energética a nível do sistema, criou a necessidade de construção de uma nova geometria, de modo a permitir o acesso do utilizador num cenário de manutenção e alojar os elementos de alimentação, sendo que a criação deste acesso ao interior do pedal não revelou problemáticas em relação à parametrização dos restantes componentes ou ao desempenho estrutural do corpo principal.

Considerando a geometria do corpo do pedal, através de um pensamento conjunto e da aplicação da experiência na área do desenvolvimento de moldes, definiu-se que a espessura de parede considerada residiria entre um valor mínimo de 2,5 milímetros e um valor máximo de 3,5 milímetros. Esta decisão foi efetuada tendo em conta que partes com uma espessura de parede menor que 2,5 milímetros, demonstram normalmente um aumento na pressão de injeção, nos hidráulicos e na cavidade; visto que se dá um aumento da viscosidade do material devido ao arrefecimento causado pelas paredes da cavidade em relação à espessura diminuta do material (ver Figura 40 e Figura 41) [17].

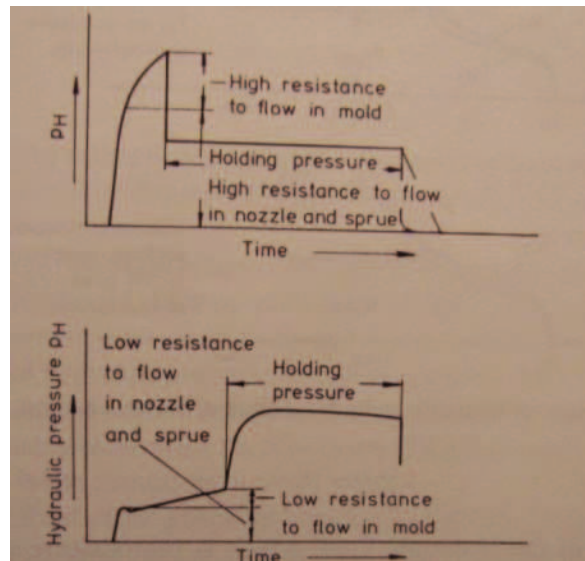


Figura 40 – Exemplos gráficos de resistências oferecidas ao sistema hidráulico para diferentes casos [17].

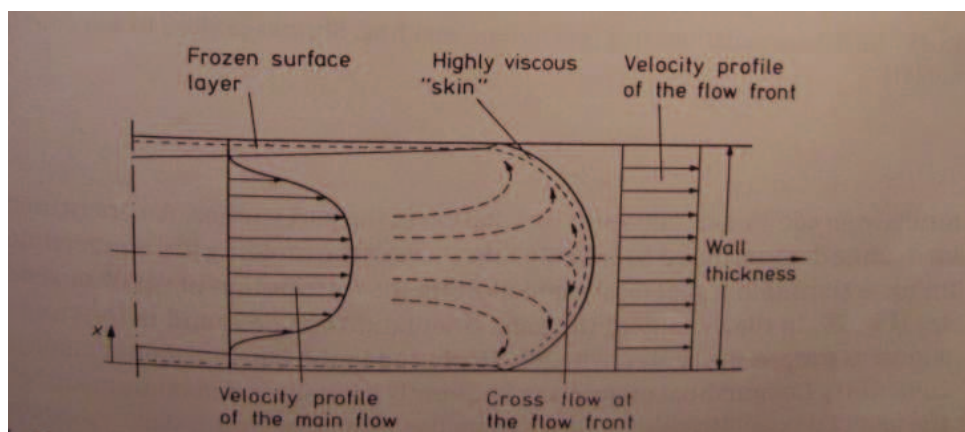


Figura 41 – Exemplo das camadas envolvidas durante a injeção de um plano em consequência de uma determinada viscosidade material [17].

A espessura máxima de 3,5 milímetros foi estabelecida como uma variável de rácio de economia do processo, exatidão dimensional, durabilidade do molde e rapidez produtiva, sendo que paredes de espessura superior requerem um ciclo de arrefecimento prejudicial à eficiência produtiva.

Apesar disso, o objetivo principal foi a utilização de uma espessura de parede constante sempre que possível ao longo da construção tridimensional. Uma peça de polímero cuja espessura de parede seja variável, vai experienciar diferentes rácios de arrefecimento e diminuição volumétrica, aumentando as probabilidades para o surgimento de defeitos

como o empenamento. Sempre que foi essencial uma variação de espessura de parede, foi aplicada uma mudança gradual de modo a evitar defeitos na peça.

As profundidades das paredes foram estabelecidas segundo um rácio teoricamente constante de forma a também evitarem deformações provenientes da contração volumétrica aquando do arrefecimento e possibilidade de deformação devido ao arrefecimento ineficiente da peça (ver Figura 42).



Figura 42 – Exemplo esquemático do rácio e das possibilidades de deformação via arrefecimento e extração de uma peça com concentração de tensões.

Considerou-se como altura máxima em relação aos reforços e restantes elementos 10 milímetros correspondentes a uma espessura de 3,5 milímetros de parede, com grandes possibilidades de redução futura, após a análise estrutural. Sendo uma peça de geometria complexa resultante da intersecção de várias paredes, a espessura resultante dos cantos também foi considerada como elemento crucial. Normalmente num canto perpendicular, a espessura diagonal é resultante do produto do valor nominal da espessura constante das paredes por 1,4 revelando uma espessura não constante, que em termos de construção tridimensional, visando um processo de injeção, pode resultar numa diminuição volumétrica diferencial, acumulação de tensões e falha prematura (ver Figura 43).



Figura 43 – Representação gráfica de considerações geométricas durante a construção.

Para além disso os cantos internos perpendiculares agem como um entalhe através do qual uma fenda se pode propagar, sendo sempre aconselhável a aplicação de um raio de concordância do produto da espessura das paredes por 0.5 a 0.6

### 3.2.1.4 Modelo 4

No quarto modelo concebido, apesar de não ter sido efetuado nenhum tipo de representação de reforços advindos da análise anterior, foram consideradas as questões relacionadas com os processos produtivos em relação à construção geométrica (ver Figura 44).

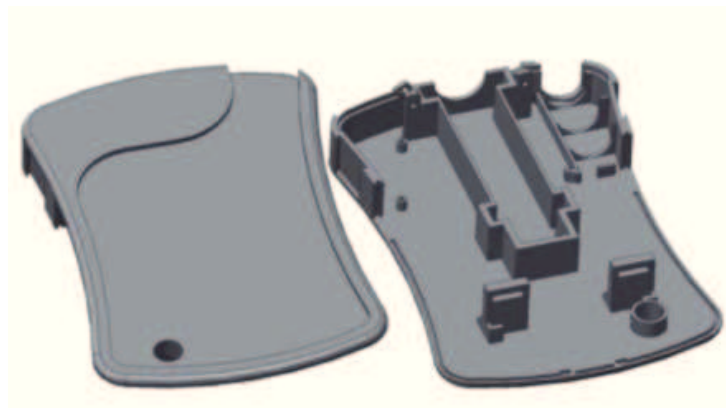


Figura 44 – Terceiro modelo concebido após as considerações descritas no documento.

Para além disso foram também considerados novos modelos de montagem, isolamento e disposição de componentes, descritos mais a frente nos respetivos campos. O segundo modelo de eixo foi incluído no projeto durante esta resolução. Nesta fase aprofundou-se

também a seleção do material de modo a obter uma noção de comportamento mecânico e das zonas de esforço face a uma geometria e carga aplicadas a um próximo modelo.

Atrasar a etapa de seleção de materiais neste caso não foi prejudicial, visto que colocar essa decisão num âmbito de necessidade geométrica ao invés de uma previsão funcional, permitiu selecionar o material que melhor correspondesse à geometria estabelecida, ao invés de estabelecer uma geometria resultante da performance material.

### 3.2.1.5 Modelo 5

O quinto modelo elaborado considerou uma fixação mais localizada em colaboração com uma montagem diferente por parte dos componentes. Esta mesma montagem, trouxe ao projeto novos meios de isolamento que, em combinação com os anteriores, criaram uma nova solução mais otimizada. O enquadramento dos refletores, do ecrã e de alguns componentes internos, tiveram neste modelo a sua fixação transposta para outra componente adicional, libertando a geometria da peça de alguma complexidade em relação à metodologia de montagem (ver Figura 45).

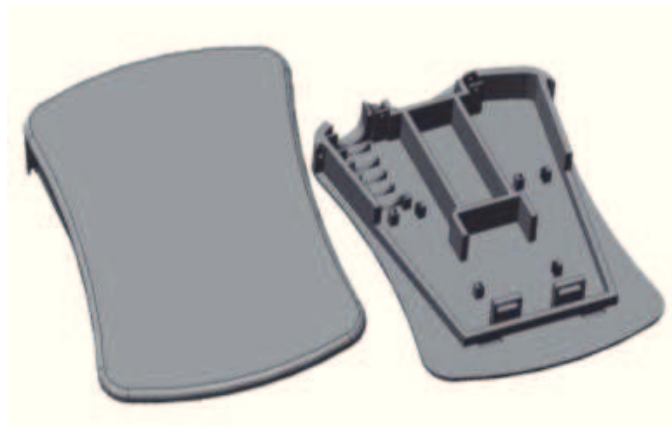


Figura 45 – Quarto modelo do corpo principal com o posicionamento transacionado do ecrã e outros componentes.

Este modelo foi principalmente efetuado para verificar a consonância entre o maior contacto superficial e a possibilidade de uma montagem por encaixe, como se pode verificar no tópico referente. No entanto, a baixa performance proporcionada por este tipo

de montagem, conduziu ao abandono deste tipo de fixação, não só como medida de resposta ao fator de segurança estrutural mas também como possibilidade de simplificação do processo de montagem da totalidade do pedal.

### 3.2.1.6 Modelo 6

Devido a um descontentamento de projeto face à tipologia de eixo observada no sexto modelo de corpo principal, a reformulação deste elemento conduziu à procura de uma nova tipologia para utilização futura. A característica de principal realce neste corpo foi o abandono total da possibilidade de encaixe como elemento de fixação principal e a utilização do processo de montagem reformulado no quinto modelo (ver Figura 46).

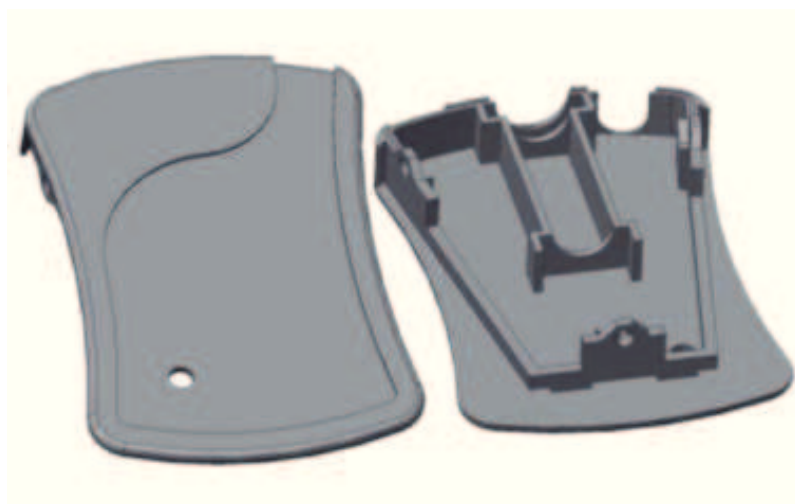


Figura 46 – Quinto modelo do corpo principal.

Apesar do formato de montagem já satisfazer os requisitos de projeto estabelecidos em termos de fixação, qualidade de produção e produto final visionados, a sua consideração na área de projeto de moldes revelou que a sua geometria poderia não ser a mais indicada, verificando-se maioritariamente dificuldades de extração não só relativas ao corpo principal como também a outros componentes adjacentes ao mesmo, o que apontou para um processo de reformulação geométrica.

O elemento de topo também sofreu reformulações em relação ao processo de injeção multicomponente e ao seu formato, o que influenciou consequentemente a geometria do

pedal no seu topo.

### 3.2.1.7 Modelo 7

Neste modelo já se incluiu o abandono da curvatura presente até ao sexto modelo, como elemento de otimização face a uma produção mais simplificada e direcionada a um processo de injeção multicomponente relativa ao corpo/topo e ao ecrã protetor/moldura. Este modelo do corpo principal, foi a geometria considerada na primeira fase de prototipagem através de impressão tridimensional aditiva, de modo a verificar e validar as soluções consideradas até então (ver Figura 47).



Figura 47 – Modelo preliminar à fase de prototipagem inicial.

Importante será realçar que o corpo principal representado considerou um novo modelo de eixo com possibilidade de enroscamento ao corpo e reforços advindos de uma análise estrutural, através de ferramentas incluídas em programas de análise. O facto da geometria do corpo apresentar uma complexidade mais avançada que os restantes, advêm do acréscimo de sincronização e cruzamento de todos os aspetos envolventes do processo e uma superior definição dos mesmos.

Através da análise estrutural ao corpo e ao eixo, verificou-se a possibilidade de redução da espessura da parede, de modo a otimizar o processo de produção do corpo, diminuindo o tempo de arrefecimento da peça, as pressões e velocidades necessárias para a injeção da

mesma a diminuição de espessura, mantendo os parâmetros dimensionais estabelecidos durante o desenvolvimento e uma resistência estrutural suficiente.

Após este modelo de resolução do corpo, foram utilizadas e reavaliadas as considerações da área de projeto de moldes aplicadas ao desenvolvimento do projeto, para a reformulação e otimização do corpo concebido, visionando uma produção industrial.

Considerando a eficiência na libertação das peças, verificou-se a necessidade de aplicação de um ângulo de saída aos reforços, detalhes internos do corpo e paredes. Este ângulo permite a libertação facilitada da peça, com o auxílio de elementos extratores, assim que o molde é aberto. É importante que todas as faces perpendiculares ao plano de topo considerado, tenham pelo menos 1° a 2° de ângulo de modo a possibilitar uma saída adequada (ver Figura 48).

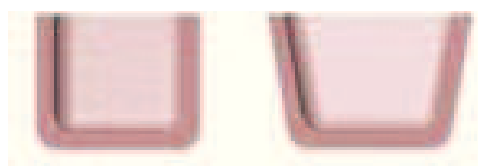


Figura 48 – Representação do ângulo de saída.

Outra questão abordada durante o projeto foram as marcas resultantes do arrefecimento não comum da peça. As zonas de maior espessura e o interior da peça, não arrefecem tão rapidamente como as de menor espessura ou paredes externas, sendo que esta diferença nas taxas de arrefecimento pode fazer com que as secções de maior espessura, se deformem para o interior e criem marcas ou defeitos na superfície externa. Estas marcas também representam tensões acumuladas na peça. Durante o processo, tentou-se não só manter a espessura da parede constante, de forma a evitar estes defeitos, mas também utilizar uma espessura de reforços diminuída (50% a 60% da espessura nominal da parede), considerando também o uso de uma textura como elemento de ocultação de possíveis marcas.

As linhas de partição visíveis também foram tidas em conta durante o desenvolvimento do projeto. Como resolução desta dificuldade o desenvolvimento do processo de

assemblagem, simplificação e definição de componentes auxiliou a colocação das linhas de partição em planos, ocultando as mesmas ao máximo.

### 3.2.1.8 Modelo 8

Durante a execução do oitavo modelo do corpo principal foram tidas em conta todas as questões relativas não só ao projeto de moldes, mas também à análise do protótipo (ver Figura 49).

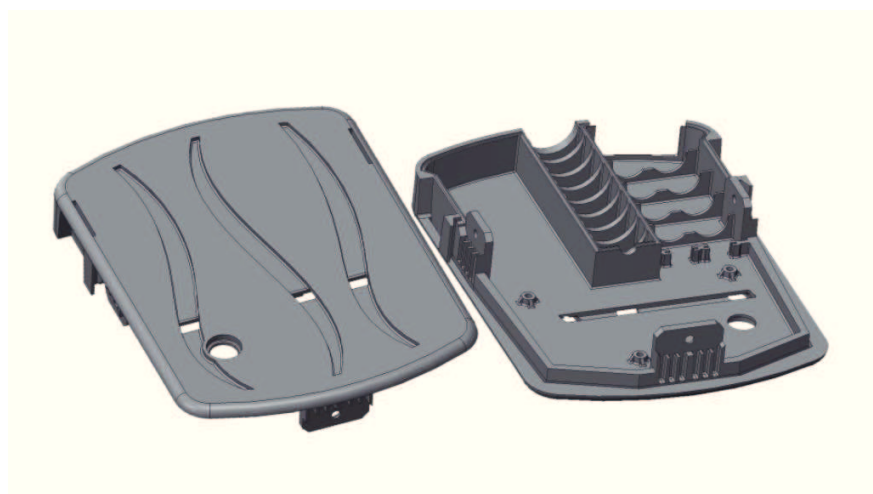


Figura 49 – Representação tridimensional do oitavo modelo do corpo principal.

Em termos de parametrização geométrica identificou-se da primeira fase de prototipagem que as dimensões do pedal se encontravam demasiado grandes (nomeadamente no seu comprimento) para que o mesmo pudesse ser funcional e agradável. A restrição e otimização da área requerida pelo sistema através da sintetização de funcionamento, permitiu reduzir a área disponibilizada para o mesmo, mantendo uma margem de segurança de modo a não sofrer regressões extremas enquanto simultaneamente se reduziram as dimensões do pedal.

As considerações de projeto de moldes tidas em conta durante a construção do sétimo modelo, também foram representadas aquando da construção tridimensional do oitavo modelo. Das análises estruturais, das possibilidades de otimização concluídas, e da procura relativa às cargas envolvidas na ação de pedalar, considerou-se uma redução do fator de

segurança até então estabelecido, abrindo oportunidade para reconsiderações geométricas e materiais. Tendo essas reformulações em conta a construção tridimensional dos reforços não foi executada, de forma a diminuir a taxa de material existente na peça e a possibilitar a inserção de todas as reconsiderações previamente à análise. As zonas de aparafusamento foram reforçadas conforme a sua disparidade de modo a proporcionar um melhor suporte de alinhamento e encaixe. Utilizando o *feedback* por parte do cliente alterou-se o formato de topo diminuindo a secção transversal ocupada pela geometria.

### 3.2.1.9 Modelo 9

Este modelo foi concebido após a avaliação conjunta com o cliente do primeiro protótipo estabelecendo o território de parametrização final do corpo, para um processo de prototipagem por SLS.

Após ponderação relativamente ao formato do pedal, função do produto e possibilidades de desenvolvimento do sistema, as dimensões do pedal foram reformuladas e reduzidas a nível de largura oferecendo um menor espaço para o alojamento da placa de circuito e das baterias (ver Figura 50).

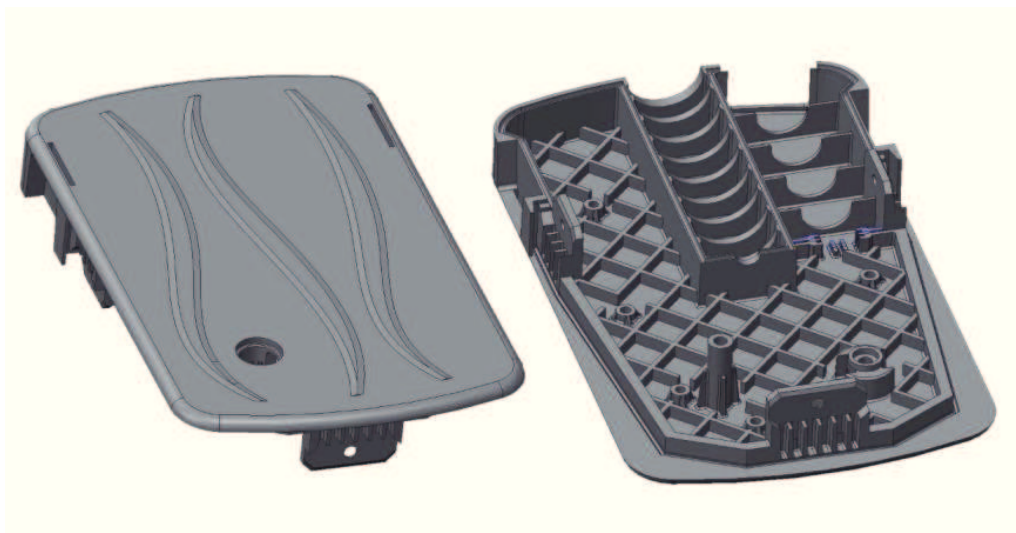


Figura 50 – Nono modelo tridimensional de corpo principal.

Este modelo foi submetido a análises, de modo a perceber a necessidade de reforço

considerando o material estrutural em causa (poliamida 66), de forma a adaptar o dimensionamento e a organização geométrica, do modelo de reforço estabelecido em análises anteriores, validando a resistência mecânica do material. Seguidamente à conclusão do processo de análise estrutural, o modelo em questão foi preparado para prototipagem via Sinterização Seletiva a Laser de modo a obter um segundo corpo para avaliação.

Relativamente ao processo de montagem, observou-se através do protótipo obtido por impressão aditiva tridimensional e de análises estruturais mais localizadas, que seria necessário oferecer um maior suporte de fixação de modo a evitar o aumento das folgas (para que o encaixe entre as componentes fosse facilitado após a prototipagem), atribuídas ao modelo tridimensional a ter em conta durante a fase de projeto de moldes a executar. Como tal foram criadas mais duas zonas de aparafusamento concêntricas à geometria do logo, que seriam ocultadas pelo mesmo uma vez que a montagem estivesse completa.

### **3.2.1.10 Materiais e Processos**

Como resposta a um requisito (identificado durante a execução do segundo modelo do corpo principal e representado no terceiro modelo), de boa adesão e acabamento superficial entre o corpo principal e a superfície de topo, foi selecionado um processo de injeção multicomponente, correspondente a uma combinação rígida-dúctil de materiais (corpo principal rígido; topo dúctil), sendo considerada como resolução mais compatível um método de injeção de placa rotacional, em conjunto com duas máquinas de injeção de organização horizontal. Este método aplica uma rotação a uma das partes do molde (normalmente o macho), de modo a transpor a peça rígida para a fase posterior (normalmente inclusiva de alterações geométricas) injetando o outro material (ver Figura 51) [17] [33].

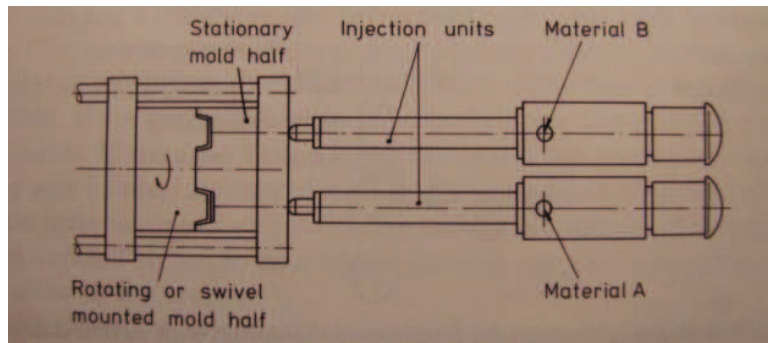


Figura 51 – Esquema de injeção multicomponente de organização horizontal e prato rotativo [17].

As unidades de injeção localizam-se paralelamente num mesmo eixo, sendo normalmente adotadas de unidades *standard* com uma alimentação, controlo e aquecimento independentes, o que permite um melhor controlo das propriedades do material.

Também foram consideradas como uma opção as técnicas de mudança de molde singular ou conjunta (ver Figura 52) [33].

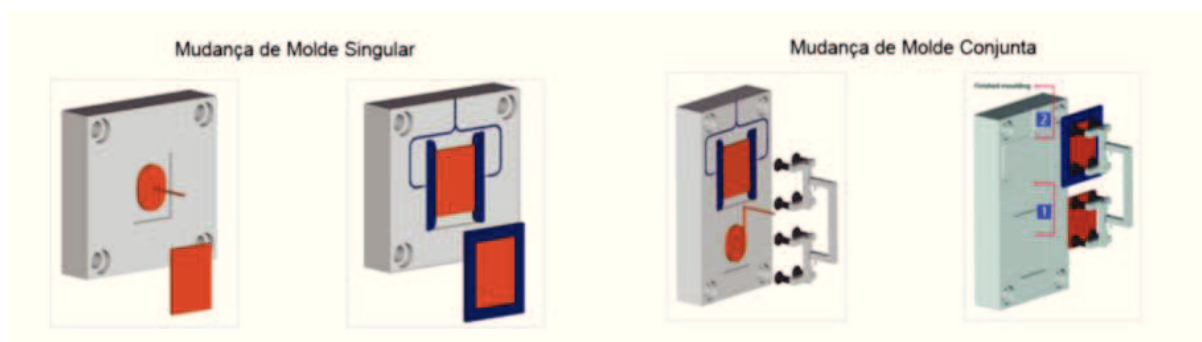


Figura 52 – Técnicas de mudança de molde singular ou conjunta [17].

Estas metodologias, mais especificamente a mudança de molde singular, têm a vantagem de apresentar menos restrições geométricas impostas por um processo de injeção multicomponente de duas partes, porém o facto de que em qualquer dos casos a peça tenha de abandonar o macho, insere novas dificuldades relacionadas com o tempo de reposicionamento do corpo e com as variáveis respetivas ao material e ao seu comportamento durante e após a injeção (tempo de arrefecimento, redimensionamento material, etc.) que para uma geometria consideravelmente complexa não se identifica como sendo a melhor resposta. Para além disso, em relação ao processo anterior, este requer a

criação de um novo macho adicional [32] [33].

A análise do terceiro modelo do corpo principal revelou a necessidade de uma seleção de materiais como meio de aquisição de restrições face à espessura de paredes, dimensão de reforços, profundidade de reforços, capacidade mecânica do corpo, entre outros.

Esta seleção foi posta efetivamente em prática durante a construção do quarto modelo do corpo principal, sendo iniciada anteriormente à criação do formato do corpo, tendo como vantagem principal o desenvolvimento do corpo através das propriedades materiais verificadas, criando uma aplicação final coerente com o comportamento mecânico do material. O facto da geometria do pedal ser remetente a um objeto associado a um arquétipo já existente e da inovação do projeto não permitir a alteração excessiva da geometria final, obrigou a que se construíssem e estabelecessem algumas geometrias anteriores ao processo de seleção de materiais, de modo a perceberem as localizações dos componentes, dimensões dos mesmos e requisitos de projeto. Neste caso o processo de engenharia inversa também foi uma ferramenta de grande auxílio, através da análise de casos semelhantes e seleção das situações mais otimizadas como elementos de referência. Observou-se, que desenhar um formato e selecionar um material em consequência do mesmo, pode favorecer o projeto não em termos de eficiência material, mas em termos de eficiência de construção, permitindo a manutenção e resposta mais direta a um formato estabelecido sem preocupações estruturais.

Os requisitos neste caso remeteram para um polímero que pudesse ser processado através de injeção, capaz de oferecer uma boa resistência mecânica e estabilidade dimensional de modo a oferecer a segurança e durabilidade requeridas. O processo de seleção de materiais conduziu à consideração de uma poliamida para o corpo principal e de um elastómero para o topo, em conjunto com um aditivo de melhoria de adesão de modo a promover a qualidade resultante da injeção de multicomponentes.

Dentro das poliamidas, verificou-se através de pesquisa e análise às propriedades do material, que no caso de uma poliamida 66 a deformação do material aplicado nas geometrias construídas, excedia minimamente o requerido pelo fator de segurança

estabelecido inicialmente e pelos parâmetros definidos (excluindo a eficiência do modelo de montagem considerado neste caso), sendo que se selecionou numa primeira fase, como material estrutural do corpo principal, uma poliamida 66 reforçada com 15% a 25% de fibra de vidro (ver Tabela 2) [13].

Tabela 2 – Tabela de propriedades de uma poliamida 66 sem e com reforço [13].

Property	Test conditions	Standard ISO	Units	Unreinforced		20% Fiber			
				PA66		PA66			
				Zytel® 101L DAM	50% RH	Zytel® 10G20HSL DAM	50% RH		
<b>MECHANICAL</b>	Yield stress	50 mm/min, 23°C	527-1/-2	MPa	83	53			
	Yield strain	50 mm/min, 23°C	527-1/-2	%	4.5	25			
	Stress at break (tensile)	5 mm/min, 23°C	527-1/-2	MPa			158	103	
	Strain at break (tensile)	5 mm/min, 23°C	527-1/-2	%			2.9	7	
		50 mm/min, 23°C			40	>50			
	Nominal strain at break	50 mm/min, 23°C	527-1/-2	%	22	>100			
	Tensile modulus	1 mm/min, 23°C	527-1/-2	MPa	3100	1200	7300	5000	
	Charpy impact strength (unnotched)	23°C	178/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	NB	NB	55	75	
		-30°C			NB	NB	50	45	
	Charpy impact strength (notched)	23°C	178/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	5	15	9	9.5	
-30°C				4	4	9	9		
Iod impact strength (notched)	23°C	188/1A	kJ/m <sup>2</sup>	5	13	8	9		
	-30°C			5	4	7	7		
<b>THERMAL</b>	Melting temperature	10°C/min	11267-1/-3	°C	263		263		
	Temperature of deflection under load	0.45 MPa	75-1/-2	°C	200		260		
		1.8 MPa			70		250		
	Vicat softening temperature	50N, 50°C/h	305	°C	240		256		
	Coefficient of linear thermal expansion	23°C-55°C	11269-2	10 <sup>-4</sup> /°C		1		0.35	
					Parallel (in flow direction)		1.1	1.11	
Normal (perpendicular to flow)									
<b>ELECTRICAL</b>	Comparative tracking index	23°C	IEC 60112	V	600		400		
	Electric strength (dielectric strength)	1 mm, 23°C	IEC 60243-1	kV/mm	31	28			
	Surface resistivity	23°C	IEC 60093	ohm	10 <sup>11</sup>	>10 <sup>10</sup>	>10 <sup>10</sup>	10 <sup>11</sup>	
	Volume resistivity	23°C	IEC 60093	ohm · m	10 <sup>12</sup>	10 <sup>10</sup>	>10 <sup>10</sup>	10 <sup>10</sup>	
	Relative permittivity	10 <sup>2</sup> Hz, 1 mm, 23°C	IEC 60250			3.8	10.9		
		10 <sup>6</sup> Hz, 1 mm, 23°C				3.5	4	3.9	4.4
Dissipation factor	10 <sup>2</sup> Hz, 1 mm, 23°C	IEC 60250		10 <sup>-4</sup>	30	2100			
	10 <sup>6</sup> Hz, 1 mm, 23°C				180	750	160	700	
<b>OTHERS</b>	Density		1183	kg/m <sup>3</sup>	1140		1290		
	Flammability classification <sup>a</sup>	1.5 min	UL 94/ISO1210		V2		H0		
	Glow wire flammability index	1.5 min	60695-2-1	°C	350				
	Oxygen index		4689-1-2			28	31		
	Water absorption	Equilibrium, 50% RH, 23°C	Similar to ISO 62			2.7		2.1	
		Saturation, immersed, 23°C				8.5		6.8	
	Rockwell hardness	Scale M, 23°C	2039/2			79	59	102	85
		Scale R, 23°C				121	108	122	115
	Ball indentation hardness	H 350/30	2039-1				85		
H 961/30		160					250	155	
Mould shrinkage <sup>b</sup>	Parallel (in flow direction)	2 min	294-4		1.3		0.45		
					Normal (perpendicular to flow)	1.3		1.1	

Em termos de posicionamento do(s) bico(s) de injeção numa fase futura de projeto de moldes tendo em conta a injeção multicomponente, considerou-se através do sétimo modelo, que a sua localização estaria na maior zona seccional da peça de modo a minimizar defeitos, evitando simultaneamente obstruções, minimizando o curso do material (de modo a evitar marcas estéticas no material) e utilizando um tamanho de bico (s) consistente com o tempo de produção e arrefecimento.

Após a execução da primeira fase de prototipagem e análise da mesma relativamente aos fatores de segurança aplicados e resultados obtidos, decidiu-se através de pesquisa e em conjunto com o cliente, que a alteração do fator de segurança (aproximando-o de um cenário mais realístico de utilização) seria benéfica no futuro, facilitando o cenário de projeto de moldes e diminuindo custo final da peça, através de redução geométrica. Esta análise e pesquisa permitiram também a alteração, relativamente à seleção material, de uma poliamida reforçada para uma a poliamida sem reforço, com um o acabamento mais próximo do inicialmente definido (visto que a adição de fibra não permite um acabamento tão polido do material) mantendo um suporte estrutural suficientemente resistente.

### **3.2.2 Parametrização do Sistema Interno**

O sistema interno em conjunto com o eixo do pedal e com os elementos de iluminação foram os corpos de influência mais crucial na estrutura interna do corpo principal. Tendo esse fator em conta, o sistema foi uma parte do projeto trabalhada desde o surgimento da fase de exploração (com auxílio da metodologia TRIZ), de modo a encontrar soluções adequadas para as contradições encontradas durante o seu desenvolvimento.

Numa visão clássica, a metodologia TRIZ (desenvolvida por Altshuller), é composta por diversos métodos de formulação e solução de problemas, constituindo uma base de conhecimento e padrões de evolução de sistemas técnicos, tendo como fundamentos a idealidade, a orientação à contradição e o uso de recursos existentes numa determinada situação. Segundo esta metodologia de resolução de problemas inventivos, um sistema evolui, direcionado à idealidade, através da superação das suas contradições, sendo estas

definidas como requisitos em conflito considerando um mesmo sistema técnico. A orientação à contradição deste método, consiste na resolução criativa das mesmas ao invés do seu impedimento [34].

A metodologia TRIZ considera 40 princípios (soluções conhecidas) capazes de converter as contradições em soluções inventivas.

Inicialmente, no processo de desenvolvimento, estabeleceu-se em conjunto com o cliente o funcionamento necessário para o sistema de modo a satisfazer de melhor forma uma utilização perspeticada. Em âmbito de utilização, o pretendido em termos de iluminação emitida, seria uma visibilidade em uso diurno e noturno, indicando que a intensidade luminosa emitida pelos LED teria de ser suficiente para ser visível nos dois panoramas.

Apesar de inicialmente se terem considerado LED regulares como elementos de emissão luminosa, verificou-se em conjunto com o cliente, através de conhecimento, experiência na área e elementos de descrição técnica, que os mesmos não seriam capazes de atingir a performance necessária. Através da metodologia TRIZ e do princípio de mudança de cor, que se apresenta como elemento solvente das contradições existentes entre a melhoria da intensidade luminosa sem alteração de uma mesma fonte energética, perpectivou-se que a melhor opção residiria nos LED super brilhantes autoregulados por um fotoreistor, de modo a controlar o seu consumo energético face a um cenário diurno e noturno.

O objetivo foi colocar o foco de luz emitido pelo LED dentro do perimetro oferecido pela face da componente condutora de luz. Como tal, tendo em conta o ângulo de emissão luminosa dos LED selecionados, considerou-se uma distância de 3,5 mm a 5 mm, durante a modelação, de forma a oferecer tolerâncias para uma possível fabricação futura e desenvolvimento do circuito a nível industrial, considerando a possibilidade de alteração de componentes durante as otimizações relativas a essa fase.

Como elementos de resolução face ao posicionamento dos LED relativamente à placa de circuito impresso e ao corpo do pedal, teve-se em conta os seguintes requisitos de projeto e soluções consequentes, face à emissão luminosa:

- Através dos LED e da componente condutora de luz, a parte traseira e frontal do pedal teriam de emitir uma luz ao longo de toda a superfície do ecrã, criando uma iluminação coesa ao longo de toda essa secção. Para satisfazer esse requisito, aplicou-se o princípio da segmentação, dividindo o sistema em partes individuais, sendo considerados como parte do circuito quatro LED (dois LED vermelhos colocados na borda exterior e dois LED brancos na borda interior) de modo a permitir um enquadramento do elemento de condução luminosa, o mais próximo possível do ecrã, tendo em conta o posicionamento dos LED relativamente a placa de circuito (ver Figura 53).

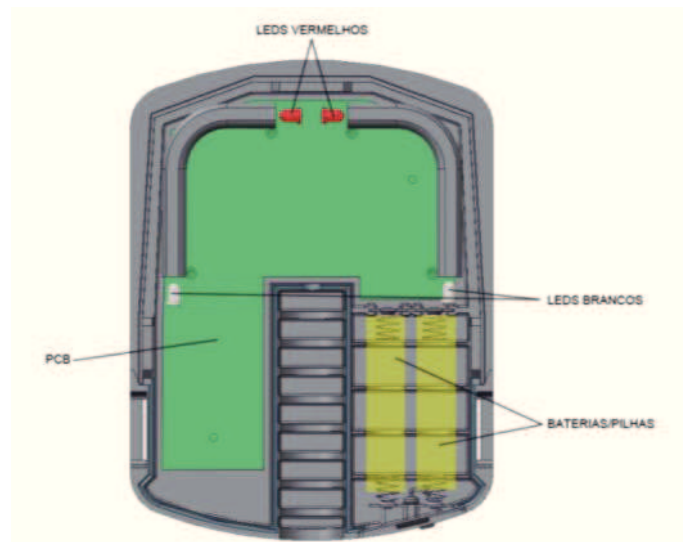


Figura 53 – Representação das localizações dos LED brancos e vermelhos (vista de topo).

- Face a uma possível posição num dito eixo Z, um dos LED brancos teria de se encontrar sempre aceso na parte frontal e um dos vermelhos sempre aceso na parte traseira, perspectivando-se como solução, o seu controlo através de um acelerómetro ou outro elemento de sensibilidade posicional, incluído na placa de circuito impresso (ver Figura 54).

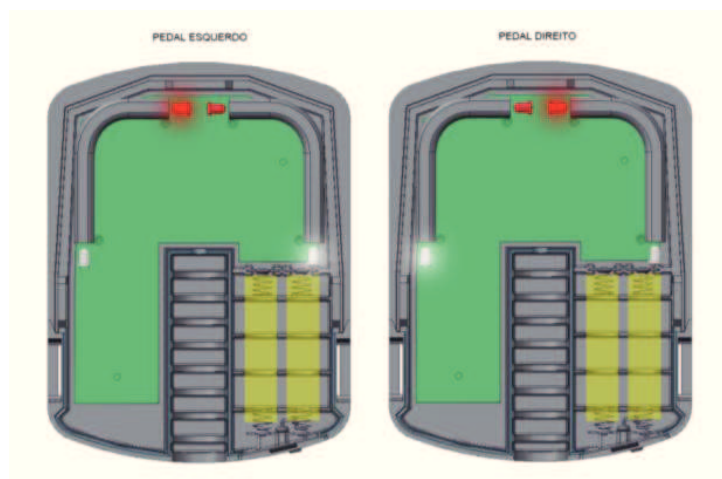


Figura 54 – Representação da comutação dos LED face a um posicionamento (vista de topo).

- Sendo que uma das funcionalidades do pedal seria a ativação de um sinal luminoso individual a cada um dos pedais, sempre que o utilizador necessitasse, decidiu-se que os LED inativos seriam responsáveis por essa função, criando uma emissão composta por uma mudança de intensidade luminosa com uma coloração ténue entre o vermelho e o branco ao longo da borda exterior do pedal (ver Figura 55).

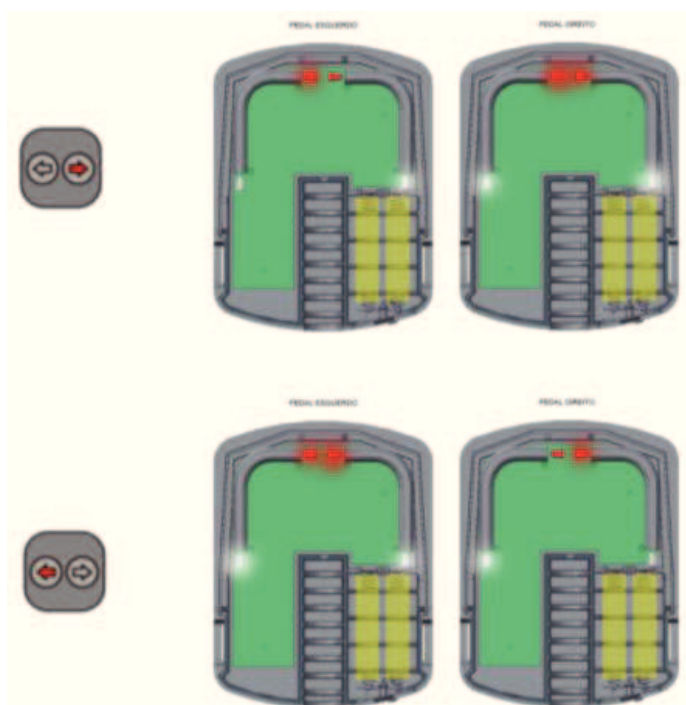


Figura 55 - Representação dos LED ativos comandados pelo elemento de comando.

### 3.2.2.1 Funcionamento e Comunicação

Outra situação de restrição e desenvolvimento do sistema foi a forma como o controlo do pedal seria efetuado. Inicialmente o desenvolvimento apontou para uma ligação direta via *Bluetooth* (Classe 2 até 10 metros de alcance ou Classe 3 até 1 metro de alcance) entre um *Smartphone* e um módulo de receção *Bluetooth* localizado no pedal permitindo, através de uma aplicação, o controlo direto dos pedais (ver Figura 56) [35] [36].

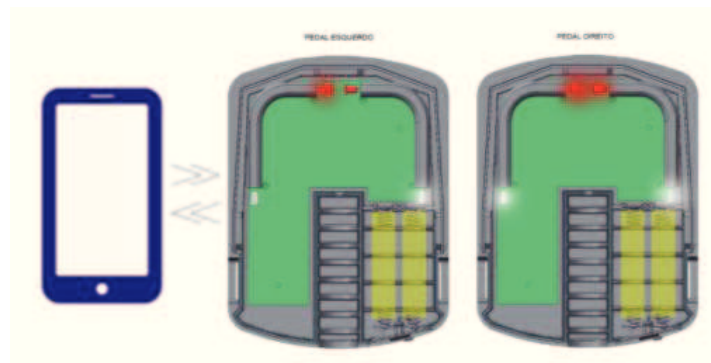


Figura 56 – Esquema do primeiro modelo de comunicação considerado.

Esta hipótese foi mais tarde posta em questão, não só pelo facto de envolver a existência de um suporte suficientemente bem concebido de forma a tornar segura a exposição ao alcance do utilizador, de um aparelho não preparado para impactos exteriores, mas também pelo facto da ligação *Bluetooth* comportar um emparelhamento, que passa convencionalmente pela emissão inicial de um sinal de procura, por parte do corpo principal, solicitando uma resposta de qualquer componente periférica com a qual terá de estabelecer, ou não, uma troca de dados e uma sequência de controlo, criando uma PAN (Rede de Área Pessoal). Estes fatores comportam como desvantagens restritivas a utilização prolongada de um *Smartphone*, a necessidade de emparelhamento e a obrigação proprietária de um aparelho dessa tipologia [35] [36].

Após alguma análise e sintetização das contradições, aplicou-se o princípio da extração presente no método TRIZ, que sugere a deslocação de uma parte ou propriedade interferente do objeto, concluindo que uma opção viável seria a criação de um aparelho intermediário especializado, contendo a possibilidade de emparelhamento com o

*Smartphone* e o comando direto dos pedais via rádio frequência.

Apesar da eliminação da complexificação de protocolos internos à comunicação, a rádio frequência comporta a desvantagem da interferência com outros aparelhos de comunicação semelhante, necessitando de um controlo e cuidado de desenvolvimento de circuito elevados. Através da sugestão do aparelho, tornou-se mais confortável o cenário de comando do pedal deixando não só, a ligação “inteligente” e todas as suas possibilidades como uma alternativa, mas alargando também o território para a criação de um novo corpo mais indicado para a função de interface de comando por toque.

Em termos de construção corporal, decidiu-se que este componente seria constituído por; uma interface externa que permitisse a seleção de apenas duas opções, por componentes de alimentação e pelo circuito interno respetivo para executar as suas funções.

Nos modelos de comunicação propostos ao cliente, consideraram-se duas opções. Uma conexão direta (via rádio frequência) através do corpo adicional de comando, deixando as possibilidades do *Smartphone* cingidas à sua aplicação interna, ou uma comunicação via emparelhamento *Bluetooth* do *Smartphone* com o elemento adicional de comando e controlo direto do pedal através dessa intermediação.

Na primeira opção, o uso independente do *Smartphone* e deste elemento de comando, impediu o controlo via *Smartphone* e o *feedback* direto de dados contidos na aplicação relativamente ao pedal (bateria, rotações, velocidade), sendo que neste caso seriam obtidos do cruzamento de informação com modelos pré estabelecidos (por exemplo, a duração da bateria seria indicada através de um modelo de um tempo médio de utilização e da taxa de descarga da mesma). A comunicação entre a componente adicional de comando e o pedal, seria efetuada via radiofrequência, permitindo a utilização imediata assim que o pedal estivesse ligado.

Na segunda tipologia de comunicação sugerida, o *Smartphone* estabeleceria uma conexão *Bluetooth* com o pedal através do comando, permitindo o rastreamento da bateria (para que o utilizador tivesse noção de quando seria necessário efetuar a manutenção do aparelho)

permitindo o controlo direto via rádio frequência através do comando ou o controlo direto do pedal via *Smartphone* caso o utilizador quisesse, funcionando o comando apenas como uma componente mediadora de comunicação após o emparelhamento ter sido estabelecido com o mesmo (ver Figura 57).

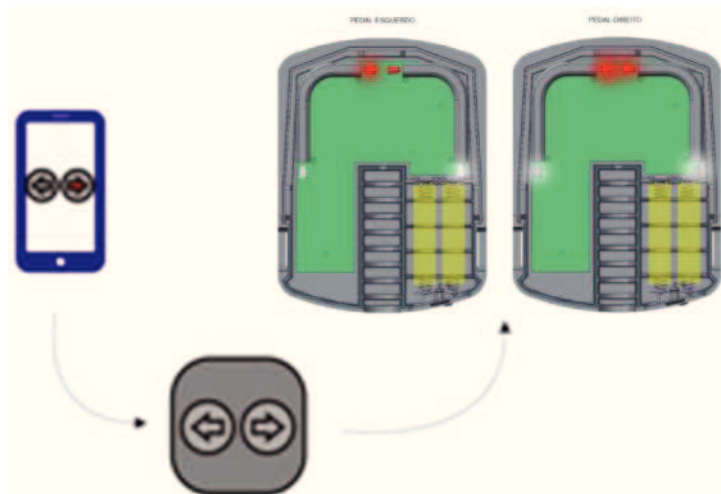


Figura 57 – Representação de um dos possíveis modelos finais de comunicação.

Assim que se obtiveram os requisitos principais do circuito, o seu funcionamento base e o *feedback* do cliente face às propostas, avançou-se para a fase de desenvolvimento inicial. Importante será realçar que todo este processo se deu, não sequencialmente, mas em conjunto com o desenvolvimento do corpo do pedal permitindo o dimensionamento do mesmo de forma adequada às restrições apresentadas pelo circuito. Nesta fase, o contacto com empresas especializadas no desenvolvimento de circuitos permitiu não só, equacionar os custos para o mesmo, mas também obter uma fonte de conhecimento relativa ao seu funcionamento devidamente estruturado, conjuntamente a um fornecimento adequado a uma produção industrial. Através da resposta destas entidades, decidiram-se e calcularam-se os custos aproximados considerando as especificações preliminares para cada componente e confirmou-se também, o funcionamento, o dimensionamento e posicionamento adequado da placa de circuito impresso e das suas componentes.

Simultaneamente ao anterior, iniciou-se a parametrização do elemento de comando. Este foi pensado como tendo um encaixe num elemento adaptável ao guiador da bicicleta de modo a estar colocado ao alcance do utilizador. O desenvolvimento do elemento de

comando teve o seu início simultâneo à construção do sexto modelo de corpo principal. Como tal a sua construção inicial (em termos de formato), não permitiu um grande desenvolvimento centralizando-se muito mais na sua qualidade, resolvendo adotar-se para isso, a funcionalidade e a sua relação intuitiva com o utilizador como elemento de valor principal, de modo a que fosse dotado consequentemente de simplicidade geométrica de modo a servir uma complementaridade aos corpos do pedal.

Em termos de sistema interno e em conjunto com entidades de desenvolvimento especializado de circuitos eletrónicos, confirmou-se que a simplicidade seria o melhor caminho e que a alimentação deste aparelho, seria otimizada se fosse efetuada através de baterias de tamanho *standard* AAA de forma a garantir uma acessibilidade de manutenção segura (ver Figura 58).

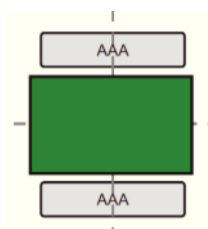


Figura 58 – Representação esquemática interna do sistema de comando.

Em termos de corpo do elemento de comando (visando a complementaridade aos corpos principais e o seu estágio de desenvolvimento precoce), o que se efetuou foi o enclausuramento do sistema através de uma forma geométrica simples e a criação de duas áreas de seleção de interface com o utilizador (ver Figura 59).



Figura 59 – Representação tridimensional do elemento de comando.

Para fixar este corpo de comando à bicicleta em si também foi desenvolvido um corpo de

abraço ou contacto magnético, de modo a permitir a fixação através de enroscamento ou de contacto magnético (ver Figura 60).



Figura 60 – Representação tridimensional do elemento de suporte ao comando.

Nesta fase inicial de desenvolvimento do sistema interno, a aplicação existente no *Smartphone* foi pensada de forma a permitir uma leitura e cruzamento de alguns dados de modo a obter informação relevante para o utilizador. Sendo que atualmente as aplicações estão em constante evolução, considerou-se que numa primeira fase de protótipo o essencial seria o rastreamento de bateria e de posicionamento através de GPS existente no *Smartphone*, de modo a que posteriormente se conseguisse obter informações relacionadas com essa atividade, tais como os percursos percorridos, médias de quantidade de calorias perdidas, médias de rotações por minuto, médias de velocidade, partilha em redes sociais, sugestões de percursos, entre outras possibilidades.

Após a primeira fase de prototipagem do corpo principal, verificou-se que o tamanho do pedal teria de ser reduzido introduzindo uma restrição à área disponibilizada para o sistema interno. Como tal desenvolveu-se uma reformulação, com o fim de redefinir o sistema e disponibilizar mais liberdade de adaptação do tamanho do pedal. Durante esta fase, o *feedback* do cliente apontou para o comando do sistema apenas através do uso do *Smartphone* e emparelhamento *Bluetooth*. A possibilidade de comando através de instruções de reconhecimento de voz, permitiu também eliminar o risco de disposição obrigatória do *Smartphone* no campo visual do utilizador. Para além disso a conclusão da análise por parte do cliente do processo de avaliação de custos anteriormente efetuado, revelou, durante esta reformulação, que os valores apresentados se encontravam acima do limite perspetivado inicialmente.

Após a redefinição e validação da simplificação do funcionamento básico do sistema, estabeleceu-se o reinício do seu desenvolvimento através de um modelo eletrônico de funcionamento do pedal (ver Figura 61).

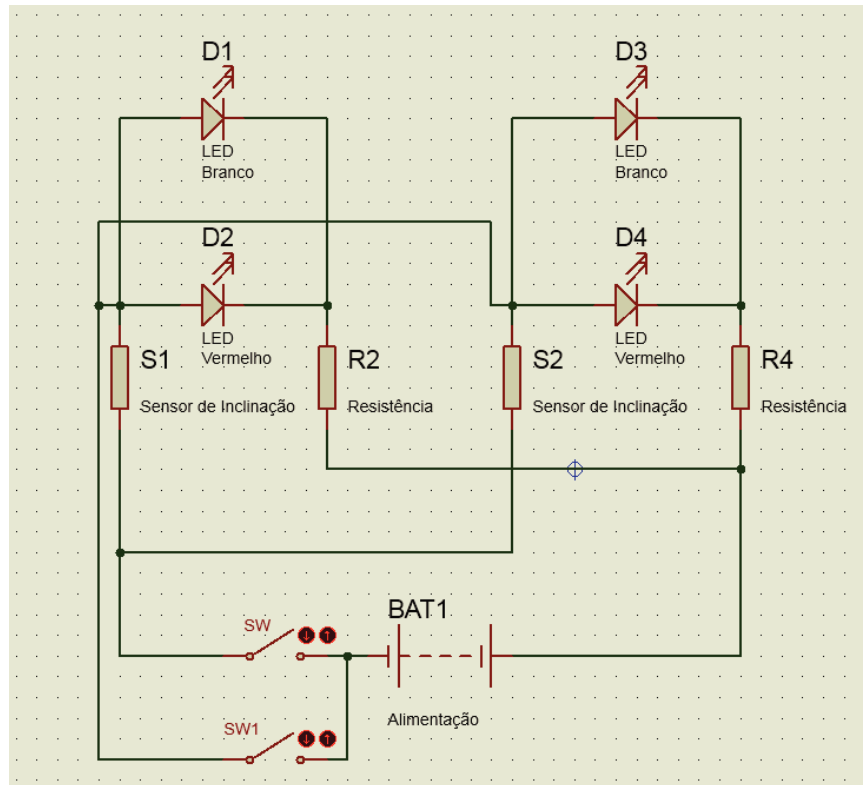


Figura 61 – Esquema do circuito utilizado na primeira fase de desenvolvimento.

Como se pode observar, foram utilizados dois interruptores (SW e SW1) sendo que um deles (SW) se destinava a simular o comportamento dos LED (D1, D2, D3 e D4) assim que o pedal fosse ligado à fonte de alimentação (BAT1). Neste caso o controle dos LED face ao posicionamento do pedal seria efetuado pelos sensores/interruptores de inclinação (S1 e S2) e o segundo interruptor (SW1), serviria para ignorar o controle dos sensores, simulando a função de pisca a ser comunicada via *Bluetooth* através do *Smartphone*. Os resistores (R2 e R4) serviram como elementos de controlo de intensidade de corrente para que os LED não falhassem. A construção deste circuito permitiu validar, em conjunto com o cliente, a intensidade luminosa dos LED super brilhantes em questão e a condução correta da luz através do elemento de transporte.

A fase inicial de desenvolvimento inclusivo do microcontrolador, implicou a experimentação, escrita e desenvolvimento de código com auxílio da utilização de uma placa de testes e desenvolvimento, inclusiva de um microcontrolador PIC16F1529 (ver Figura 62).

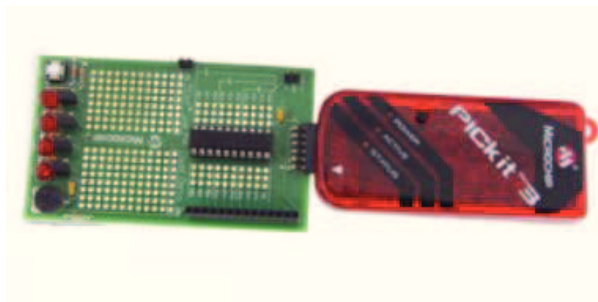


Figura 62 – PicKIT3 e placa de desenvolvimento utilizadas no projeto.

Como elemento de gravação/programação/depuração foi utilizado um dispositivo intitulado de PICkit 3. A utilização desta placa permitiu desenvolver o código base e validar o comportamento do pedal face a um valor de entrada (neste caso o interruptor SW1 incluído na sua esquemática de circuito) (ver Figura 63).

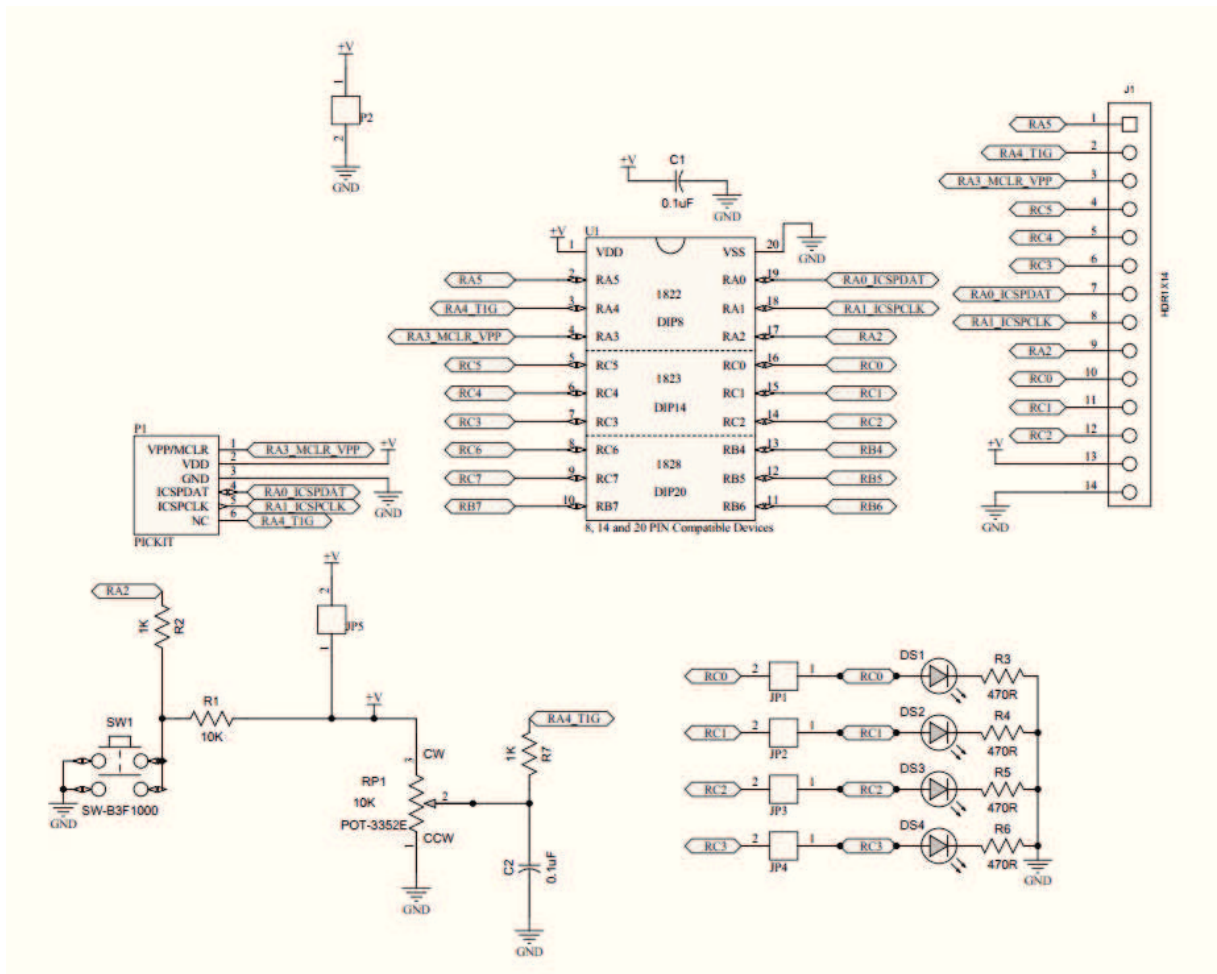


Figura 63 – Esquema do funcionamento da placa de desenvolvimento [27].

A linguagem desenvolvida em C utilizou a possibilidade de interrupção do pino RA2, face a uma mudança de nível de corrente, como elemento de transição para a execução do bloco de código respetivo à sequência de pisca.

```

#include <htc.h>
#include <stdlib.h>
#include <pic.h>
#define _XTAL_FREQ 1000000
#define DOWN 0
#define UP 1
#define SWITCH PORTAbits.RA2
#define PULL_UPS
__CONFIG(FOSC_INTOSC & WDTE_OFF & FWRTE_OFF & MCLRE_OFF & CP_OFF & CPD_OFF & BOREN_ON & CLKOUTEN_OFF & IESO_OFF & FCMEN_OFF);
__CONFIG(WRT_OFF & PLLEN_OFF & STVREN_OFF & LVP_OFF);

void estadoLeds(int estado)
{
    LATCbits.LATC3 = estado;
    LATCbits.LATC2 = estado;
    LATCbits.LATC1 = estado;
    LATCbits.LATC0 = estado;
}

void pausa(int valor)
{
    int i;
    for(i=0;i<valor;i++);
}

void piscarLeds(int numeroVezes)
{
    int i;
    LATC = 0;
    for(i=0;i<numeroVezes;i++)
    {
        pausa(5000);
        estadoLeds(UP);
        pausa(5000);
        estadoLeds(DOWN);
        //pausa(5000);
    }
}

void main(void) //INICIO DA FASE PRINCIPAL
{
    OSCCON = 0b00111000;
    TRISC = 0;
    TRISAbits.TRISA2 = 1;
    ANSELAbits.ANSA2 = 0;
    WPUA2 = 1;
#ifdef PULL_UPS
    WPUA2 = 1;
    nWPUEN = 0;
#endif
    INTCONbits.IOCIE = 1;
    IOCANbits.IOCAN2 = 1;
    GIE = 1;
    while (1)
    {
        estadoLeds(UP);
        continue;
    }
}

void interrupt ISR(void)
{
    if (IOCAF)
    {
        if (PORTAbits.RA2 == 1)
        {
            piscarLeds(5);
            IOCAF = 0;
        }
    }
}

```

Para além disso a criação de funções independentes, ao invés da sua total definição durante a função principal ou a função de interrupção, permitiu ajustar certos parâmetros mais facilmente e com maior acessibilidade (por exemplo o tempo de pausa entre os piscas dos

LED ou a duração dessa mesma sequência). Na escrita deste programa podemos observar que o primeiro grupo de linguagem é composto pelos comandos pré processamento, sendo que nestes são incluídas bibliotecas e definidas macros. Após isso são incluídos os comandos de configuração das diversas opções de operação internas aos microcontroladores, sendo que as configurações deste caso são específicas para o PIC16F1529. Existiram cinco funções definidas ao longo da linguagem estabelecida, a função *main*, a função *interrupt\_ISR*, a função *piscaLeds*, a função *pausa* e a função *estadoLeds*. A função *main* foi neste caso responsável pelo conjunto de instruções a ser executado assim que o microcontrolador iniciou o processamento da linguagem, sendo que para além de condicionar as interrupções, ligou os LED respetivos. A função *interrupt\_ISR* seria executada assim que fosse identificada uma interrupção segundo os parâmetros estabelecidos na função *main*. A função *piscaLeds* foi uma função “auxiliar” à função *interrupt\_ISR* sendo chamada durante a execução dessa mesma função, e estabelecendo a sequência entre o estado dos LED respetivos e a função *pausa*. A função *pausa* estabeleceu um valor e um comportamento alvo para esse mesmo valor, que segundo as propriedades definidas e configuradas durante a programação, obteve um certo comportamento de execução (neste caso efetuando uma pausa). A função *estadoLeds* foi uma função “auxiliar” à sintetização da escrita linguística em C permitindo controlar todos os LED simultaneamente através de uma única expressão.

Após validar o funcionamento da interrupção neste âmbito, o seguinte objetivo foi transpor o trabalho executado para um circuito com integração do PIC18F4520. Apesar das suas propriedades serem mais indicadas para projetos de controlo mais complexos, este microcontrolador foi selecionado devido à sua versatilidade e possibilidade de otimização futura do projeto em causa, deixando sempre em aberto a passagem para outros microcontroladores menos avançados e mais indicados à situação estabelecida.

A matéria disponibilizada no site da Microchip relativamente à programação de microcontroladores e as folhas de dados relativas aos seus componentes, facilitaram imenso o trabalho nesta etapa permitindo um acesso às ferramentas indicadas e a um desenvolvimento coerente.

O circuito estabelecido, durante a transposição do conhecimento desenvolvido no PIC16F1529 para o PIC18F4520, também aplicou um botão como elemento de interrupção comportando também interruptores posicionais (ver Figura 64).

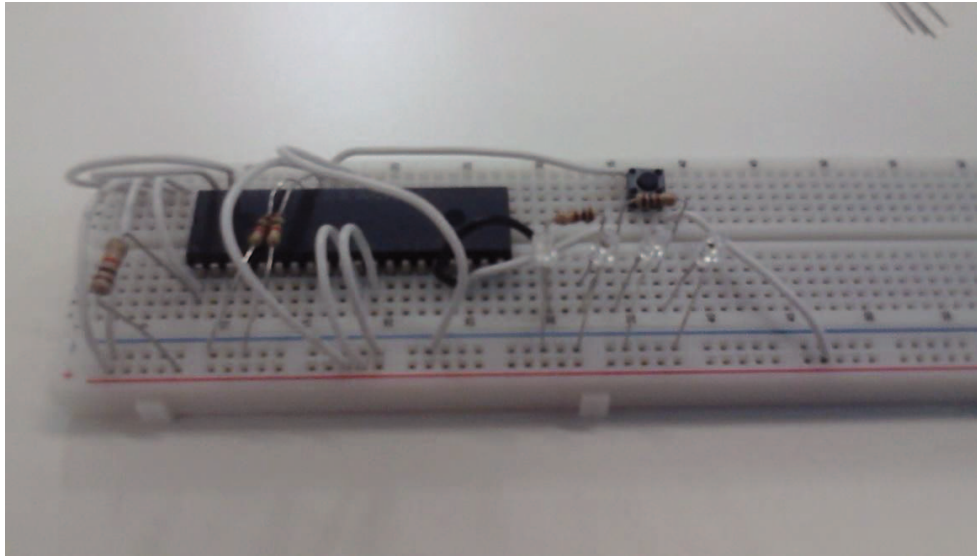


Figura 64 – Sistema estabelecido durante o desenvolvimento.

A linguagem desenvolvida para este caso foi bastante semelhante ao caso anterior comportando disparidades apenas nas instruções específicas de cada microcontrolador.

```

#include <p18f4520.h>
#include <stdio.h>
#pragma config OSC = INTIO67, WDT = OFF, MCLRE = ON
#pragma config DEBUG = ON, LVP = OFF, PWRT = ON
#define L0 LATCbits.LATC2
#define L1 LATCbits.LATC3

void main (void)
{
    ADCON1 = 0x0F;
    TRISbits.TRISC2 = 0;
    TRISbits.TRISC3 = 0;
    L0 = 1;
    L1 = 1;
    TRISbits.TRISB0 = 1;
    INTCON2bits.INTEDG0 = 0;
    RCONbits.IPEN = 0;
    INTCONbits.INT0IE = 1;
    INTCONbits.GIE = 1;
    while (1);
}

void pausa(void)
{
    unsigned char cnt1,cnt2;
    for (cnt1=150;cnt1;cnt1--)
        for (cnt2=150;cnt2;cnt2--);
}

void pisca (void)
{
    L0 = 1;
    L1 = 1;
    pausa();
    L0 = 0;
    L1 = 0;
    pausa();
}

#pragma code isr = 0x000008
#pragma interrupt ISR_INT0
void ISR_INT0(void)
{
    INTCONbits.INT0IF = 0;
    pisca();
    pisca();
    pisca();
    pisca();
    pisca();
    INTCONbits.INT0IF = 0;
    _asm GOTO main _endasm
}

```

Os comandos de pré processamento encontram-se no início, permitindo incluir ficheiros respetivos ao microcontrolador e a cabeçalhos de bibliotecas padrão em linguagem C. As configurações permitem estabelecer definições para o oscilador (interno), cão de guarda (desligado), pino de reset externo (ligado), habilitação de depuração (ligado), programação utilizando baixa tensão (desligado) e temporizador de partida (ON). No corpo da linguagem existem 4 funções principais, a *main*, a *pausa*, a *pisca*, e a *ISR\_INT0*. A função

*main* é a função principal ligando todos os LED (à exceção dos impossibilitados pelos sensores posicionais) condicionando e aguardando interrupções. A função *ISR\_INT0* é responsável pela sequência a ser executada quando uma interrupção tem lugar, retornando à função *main* quando finalizada. As funções *pausa* e *pisca* são funções “auxiliares” que permitem sintetizar linguisticamente variáveis e expressões relativas a sequências e temporização.

Foi mais tarde colocada uma saída adicional para ignorar as restrições dos sensores de posição de modo a possibilitar a sequência de pisca quando o utilizador a tivesse ativado. Após ter sido verificado o correto funcionamento desta opção, inseriu-se a comunicação *Bluetooth* no circuito estabelecido até então. Para isso utilizou-se um módulo *Bluetooth* HC-06, conectado às respetivas portas RX (recepção) e TX (transmissão) do microcontrolador, para estabelecer a comunicação com o *Smartphone*, em conjunto com uma aplicação desenvolvida utilizando a plataforma MIT App Inventor 2. A aplicação desenvolvida permitia a sua inicialização apenas caso o *Bluetooth* do *Smartphone* estivesse habilitado de modo a assegurar que o utilizador não se esqueceria de estabelecer essa mesma ligação, sendo que após isso habilitaria o controlo dos pedais através de duas setas indicadoras de direção e o acesso a um menu demonstrativo de propriedades futuras da aplicação (ver Figura 65).

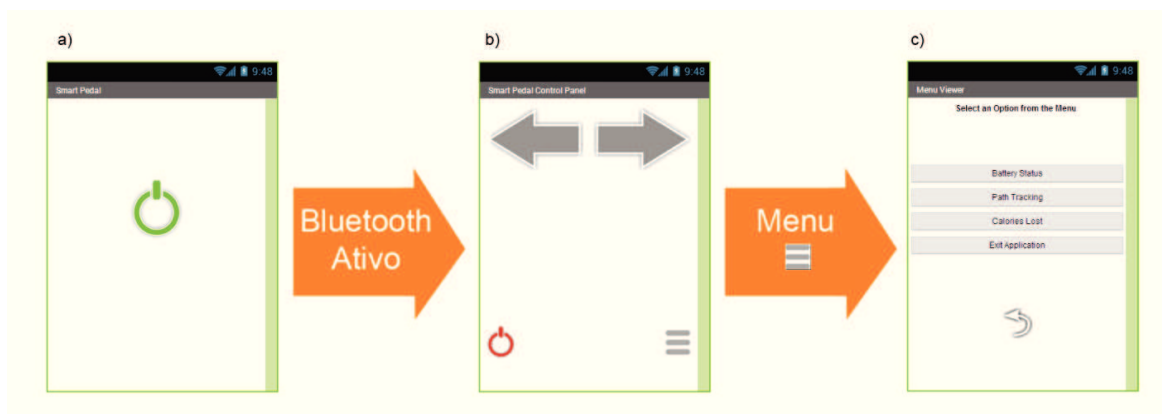


Figura 65 – Funcionamento base da aplicação.

Relativamente à inserção da capacidade de comunicação *Bluetooth* a programação em C estabelecida foi alterada apenas nos fatores de entrada e saída (o pino RC6/TX como saída

e o pino RC7/RX como entrada), configurações do microcontrolador (foram habilitadas as interrupções via *Bluetooth* e estabelecidas as configurações necessárias para o Transmissor/Recetor Síncrono/Assíncrono Universal Melhorado, tais como a velocidade de comunicação e os modelos de comunicação) e funcionamento otimizado do sistema (ativação da função de *sleep* do microcontrolador como possibilidade de poupança de energia mantendo o módulo *Bluetooth* como elemento de comando da função ligado/desligado). Para além disso, através do *feedback* do cliente relativamente a outras possibilidades de utilização, foi adicionado ao circuito e à programação a hipótese de controlo da função ligado/desligado através de um botão de pressão localizado no componente de logo do pedal. Esta opção permitiu ao utilizador ligar os LED do pedal e usufruir da sua função básica (excluindo a possibilidade de acionamento da sequência de pisca para indicar a direção).

### 3.2.2.2 Alimentação

Em termos de alimentação debateu-se inicialmente um sistema autossuficiente capaz de alimentar o pedal através de conversão energética, da cinética gerada pelo pedal, utilizando rodas dentadas como elementos de potência (ver Figura 66).

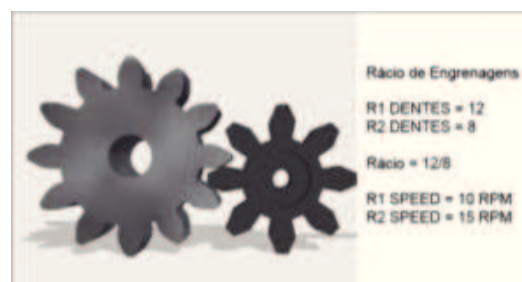


Figura 66 – Exemplo de princípios utilizados no cálculo do sistema de conversão energética.

As engrenagens representadas, possuem um rácio entre os seus dentes de 12/8 equivalente a um rácio de 1,5:1 (por cada volta da engrenagem de 12 dentes a engrenagem de 8 dentes efetua 1,5 volta), permitindo a sua aplicação num âmbito de potenciamento de rotações. O trabalho desenvolvido através dos rácios existentes entre as engrenagens demonstrou uma resolução mecânica suficiente para obter uma rotação que pudesse gerar energia elétrica

através do uso invertido de um pequeno motor de corrente direta. Considerando essa conversão energética, concluiu-se que o eixo do pedal teria de atingir um determinado número de rotações por minuto, obrigando a um pedalar que mantivesse uma velocidade constantemente acima de um valor definido pelo rácio das rodas dentadas. Apesar de se ter verificado a possibilidade de conversão energética, não se verificou a quantidade de energia convertida como sendo suficiente para carregar baterias de forma adequada e com a quantidade de corrente constante devida para manter um funcionamento otimizado do circuito pretendido.

A única solução que se encontrou no âmbito de conversão energética, que pudesse satisfazer os requisitos de qualidade pretendidos em termos de durabilidade, foi a utilização de condensadores ou ultra condensadores como elementos de armazenamento energético. Porém estes mesmos componentes, faziam com que o circuito tivesse um tempo de emissão luminosa limitado assim que o utilizador interrompesse a rotação do eixo. O fator de qualidade de funcionamento e tamanho, forçaram ao abandono desta hipótese e à aplicação do princípio de universalização da metodologia TRIZ, como elemento de solvência, resultando como possibilidade mais indicada o uso de baterias substituíveis. O uso de baterias recarregáveis enclausuradas no pedal também foi considerado, implicando neste caso uma ligação direta ao pedal, que obrigava a que o mesmo fosse deslocável da pedaleira ou eixo e que existisse um transformador à parte que estabeleceu-se a ligação de uma corrente doméstica ao pedal. Assim sendo, decidiu-se que a alimentação do pedal seria efetuada apenas através de baterias comuns.

De forma a permitir uma manutenção mais acessível ao utilizador o sistema de alimentação considerado não se focou em baterias especializadas, mas sim em modelos básicos de fácil acesso, nomeadamente pilhas de tamanho AAA.

Esta tipologia de baterias foi selecionada face aos requisitos gerais de alimentação do circuito, tendo cada uma delas uma taxa de descarga comum para determinadas saídas de corrente, a ser equacionadas de melhor forma, através de ligações paralelas ou em série, elementos de contenção de corrente, elementos de poupança energética, entre outros, de modo a obter o melhor tempo de duração sem sacrificar a qualidade da emissão luminosa

nem a durabilidade do circuito (ver Figura 67).

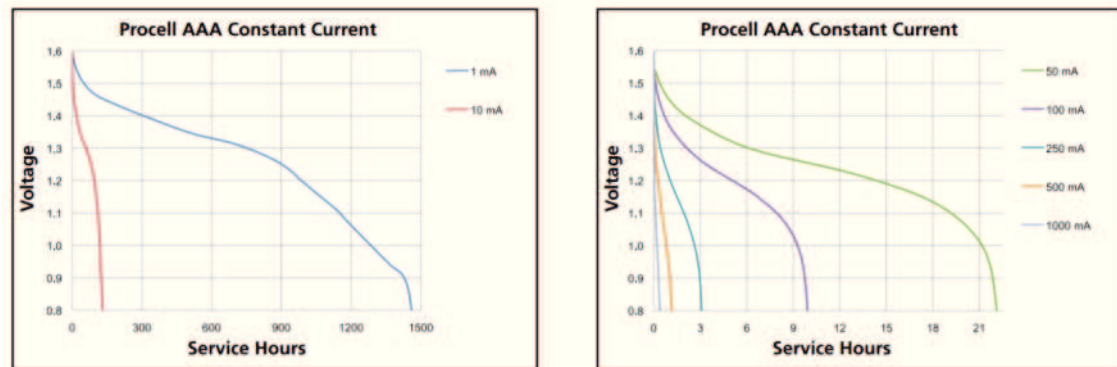


Figura 67 – Taxa de descarga das baterias tamanho AAA consoante diferentes intensidades de corrente.

### 3.2.3 Parametrização do Eixo do Pedal

Foram considerados principalmente três modelos ao longo do desenvolvimento do projeto para esta componente específica, todos eles correspondentes a um tamanho de 9/16 polegadas ou 14,28 milímetros com uma rosca de 20 tpi (voltas por polegada) de modo a enroscarem na maioria das pedivelas atuais.

#### 3.2.3.1 Eixo 1

Inicialmente, foi considerado um eixo convencional como solução aplicada aos três primeiros modelos do corpo principal (ver Figura 68).



Figura 68 – Eixo convencional de pedal de bicicleta.

Este eixo foi selecionado antes de uma análise das suas propriedades mecânicas e

funcionais, simplesmente para propósitos dimensionais e de definição de formato exterior de modo a obter um *Design Lock*. Assim que esta fase terminou, uma análise mais profunda a este componente revelou que não seria o mais adequado para o fim pretendido.

Normalmente, um objeto é criado, utilizado, e substituído por uma versão mais otimizada. Raras são as exceções que não são ultrapassadas, constituindo objetos de resolução forte, (em forma, custo, material, etc.) os arquétipos. São soluções bem constituídas para os problemas em questão, adquirindo a sua perpetuação ao longo da evolução de objetos correlacionados, que mesmo contendo um grau de inovação, não conseguem limitar a existência do arquétipo. Porém neste caso, a necessidade de aprimorar pela qualidade excluiu a consideração do modelo arquétipo de eixo de pedal de bicicleta do caminho de projeto. A dimensão do eixo convencional, não apresentou o melhor rácio, consumindo demasiado espaço necessário para os restantes componentes, tendo para além disso uma montagem que complicava o modelo de assemblagem do pedal e um desempenho mecânico, aquém do que se pretendia em termos de relacionamento com o corpo externo. Para além disso a escassez de produção relativa ao avanço e desenvolvimento destes componentes, também apresentou um fator negativo durante a sua análise. Identificou-se que os rolamentos associados a esta tipologia de pedal também não são os mais satisfatórios em termos de qualidade e desempenho, estando muitas vezes expostos a elementos exteriores ou utilizando isolamentos que dependem de peças de montagem comprometedoras ou do próprio corpo do pedal, deixando a sua lubrificação e superfície expostas o que causa deterioração, diminuindo a sua durabilidade e desempenho (ver Figura 69) [37].



Figura 69 – Representação figurativa da influência da exposição dos rolamentos.

O tempo de vida estimado para um pedal comum, faz com que os problemas de desgaste, deterioração e atrito existente entre as superfícies de contacto normalmente não sejam

considerados. Porém neste projeto específico, visando uma qualidade superior, foi tido em conta que o facto de os rolamentos permitirem uma maior taxa de penetração de detritos, aumentará conseqüentemente a rugosidade superficial criada pela deterioração dos rolamentos e que o atrito advindo das partículas intervenientes, poderá comprometer a qualidade e funcionalidade do eixo. O uso de um elemento *standard* de alojamento dos rolamentos, ao invés do seu contacto direto com o corpo do pedal, foi considerado mais à frente, porém esta solução apresentou uma complexificação de elementos e de montagem resultando na possibilidade de desalinhamento ou montagem imprópria, tais como; montagem com folga (a rotação do eixo em relação à estrutura de alojamento pode produzir calor e partículas prejudiciais aos rolamentos); montagem demasiado justa (a rotação causa falha prematura devido ao calor e à carga interna); alojamento com geometria alterada (normalmente os alojamentos considerados têm pouca espessura tornando-os danificáveis durante a montagem, contribuindo para a falha prematura) entre outros [37].

Tendo isto em conta iniciou-se uma nova procura e seleção através da metodologia de Casa da Qualidade aplicada apenas à componente do eixo (ver Figura 70).

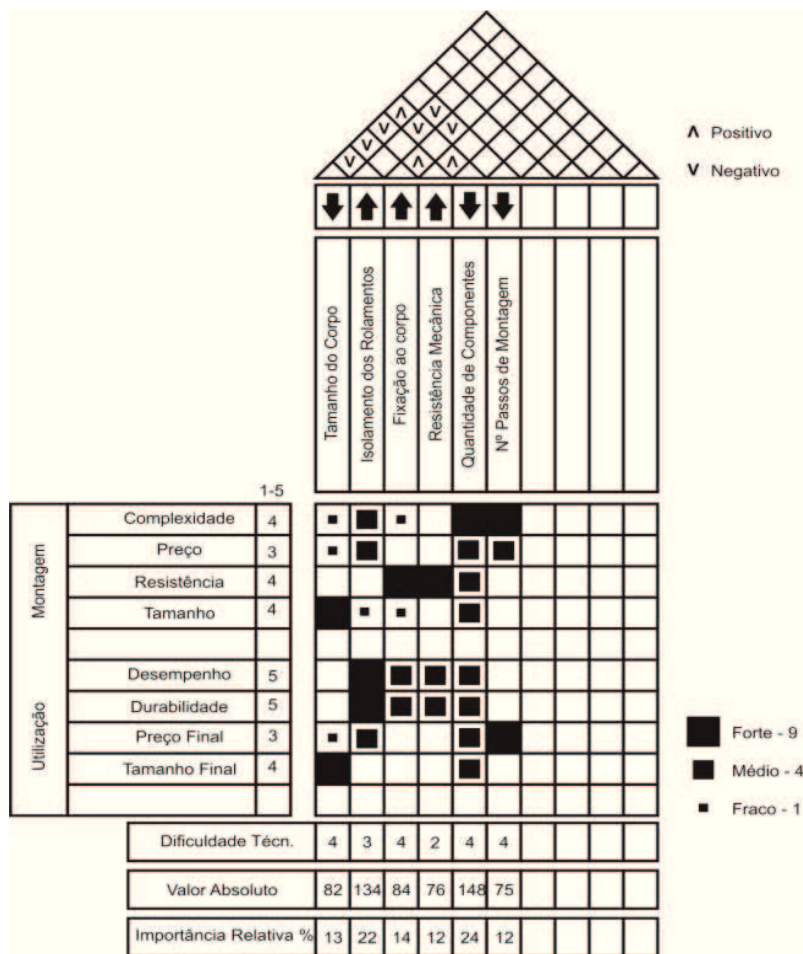


Figura 70 - Exemplo figurativo da Casa da Qualidade utilizada durante o processo.

A flexibilidade da Casa da Qualidade permitiu que esta metodologia fosse aplicada neste caso, removendo os sectores supérfluos de modo a corresponder mais diretamente aos aspetos técnicos necessários. Permitiu criar um quadro de decisão rápida, não só em relação ao segundo eixo, mas também em relação ao terceiro e a reformulações de eixo futuras, contendo as principais características necessárias a ter em conta consoante o seu desempenho técnico.

### 3.2.3.2 Eixo 2

Após a análise e durante a parametrização do quarto modelo de corpo principal, identificou-se que os fatores de maior importância a ter em conta seriam o isolamento dos rolamentos e a quantidade dos componentes (com valores respetivos de 22% e 24% de

importância relativa), conduzindo então ao pensamento, procura e representação tridimensional do segundo tipo de eixo considerado para o pedal. Este eixo era composto de uma geometria principal central e dois corpos de rolamentos vedados fixos através da alteração de diâmetro do eixo. A diferença fulcral deste modelo de eixo em relação ao anterior encontra-se na vedação prévia dos rolamentos através de produção especializada dos mesmos, que para além de garantir uma otimização durante a montagem prolonga a vida dos rolamentos face ao desgaste (ver Figura 71).



Figura 71 – Segundo modelo de eixo considerado representado tridimensionalmente.

O processo de engenharia inversa, em relação a modelos semelhantes já existentes, também foi utilizado na formulação tridimensional deste eixo. Este processo permite descobrir o funcionamento de um dispositivo, objeto ou sistema através da análise da sua estrutura, função ou operação. Tanto no caso da sua aplicação face à segunda tipologia de eixo, como na terceira tipologia, este processo foi utilizado para fins de aprendizagem e compreensão de questões chave de modo a posteriormente melhorar essas resoluções. Neste caso específico, a engenharia inversa foi um elemento auxiliar à perceção da metodologia de encaixe utilizada entre os rolamentos vedados, o eixo e o corpo do pedal e também do formato de montagem e fixação da totalidade do eixo ao corpo do pedal.

O facto de utilizar rolamentos vedados que permitem manter no exterior as poeiras e elementos prejudiciais e no interior a lubrificação necessária para melhorar o movimento das esferas internas fez desta tipologia de rolamentos a mais indicada para utilizar neste pedal [37].

A geometria do eixo e a tipologia de rolamentos foi utilizada em modelos posteriores porém a evolução do sistema interno e a mudança das tipologias de montagem, isolamento e disposição de componentes do pedal puseram em causa a sua performance em relação à fixação ao corpo do pedal. Como tal para corresponder melhor a este novo fator de restrição de forma e dimensão, iniciou-se uma análise, procura e desenvolvimento utilizando a informação e requisitos recolhidos até então.

### 3.2.3.3 Eixo 3

A tipologia de eixo considerada durante a parametrização do sétimo modelo do corpo principal continha uma vedação interna dos rolamentos numa chumaceira que funcionava simultaneamente como elemento de enroscamento no corpo do pedal. A diferença existente entre este tipo de rolamentos e os rolamentos expostos alojados num corpo, trata-se da qualidade oferecida. Nesta situação específica, a forma como o alojamento abriga as esferas tem uma qualidade comparável à de um rolamento vedado sendo que o facto de as esferas estarem previamente alojadas e do eixo ser montado anteriormente ao corpo do pedal evita falhas que poderiam ocorrer numa montagem simultânea do eixo e do pedal. O enroscamento abriu uma nova área de isolamento possibilitando o uso conjunto de um material isolante associado a esta secção, de modo a assegurar uma maior durabilidade em todo o pedal, não permitindo que elementos exteriores atingissem o seu interior. Para além disso o tamanho do eixo satisfaz o enquadramento geométrico dos corpos e sistema estabelecido até então e a possibilidade de enroscamento melhorou bastante a interface estrutural existente entre o corpo do pedal e o eixo (ver Figura 72).

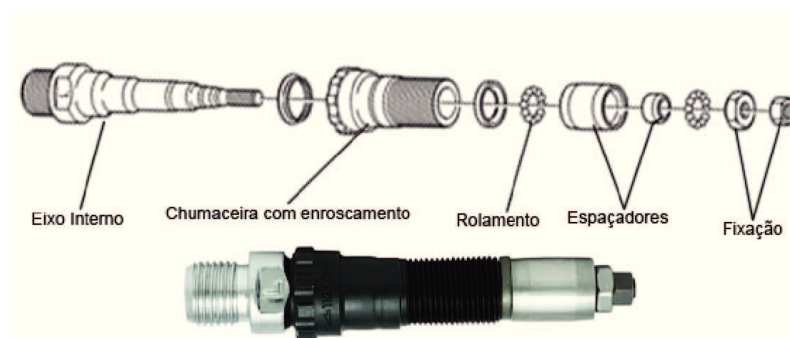


Figura 72 – Tipologia de eixo considerada para análise.

Após encontrar uma solução adequada, analisou-se este modelo de eixo de pedal, através de um processo de engenharia inversa com o auxílio da metodologia TRIZ, de modo a perceber as características mais e menos vantajosas, que poderiam ser aplicadas ao modelo de eixo e a desenvolver e obter respostas rápidas sobre a forma de soluções a aplicar no desenvolvimento de um novo modelo.

O problema principal encontrado no eixo analisado, foi o facto de os seus rolamentos esféricos não apresentarem uma vedação total face ao ambiente exterior, impedindo a entrada da maioria das partículas sólidas mas não de elementos líquidos. Como tal considerou-se a criação de um novo eixo baseado nas características positivas encontradas anteriormente. A dimensão dos rolamentos esféricos face a uma aplicação vedada tornava a geometria externa demasiado grande para a geometria do eixo considerado durante o desenvolvimento do corpo principal. Através da matriz de contradições TRIZ, observou-se que a melhor solução de forma a otimizar o volume de um objeto em movimento mantendo a durabilidade desse mesmo movimento, seria aplicar o princípio da assimetria. Como tal, substituiu-se a aplicação dos rolamentos esféricos por rolamentos em agulha (ver Figura 73).

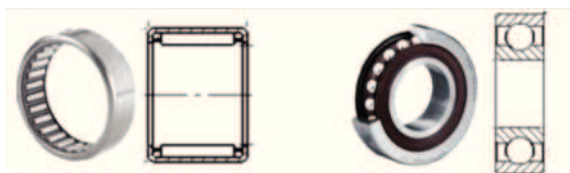


Figura 73 – Representação tridimensional e esquemática de rolamentos em agulha e esféricos.

Estes tornam o perfil de encapsulamento mais largo mas menos espesso, proporcionando uma melhor seção para a situação específica e apresentando uma maior superfície de enclausuramento dos rolamentos e do eixo do pedal, que foi favorecível no desempenho estrutural através do aumento de área de contacto [37].

O princípio da remoção ou extração, foi aplicado como meio de resolução da tipologia de aperto aplicada ao eixo analisado, convertendo-a para uma tipologia universal de ferramenta sextavada.

O princípio de inversão foi aplicado ao número de componentes existentes de modo a solucionar a complexidade do eixo mantendo uma produção simplificada, aplicando um agrupamento de componentes ao invés da segmentação dos mesmo o que permitiu estabelecer uma montagem simplificada.

Depois desta fase de otimização através da metodologia TRIZ, a representação tridimensional culminou num modelo evolutivo utilizado em conjunto com o sétimo modelo de corpo principal (ver Figura 74).

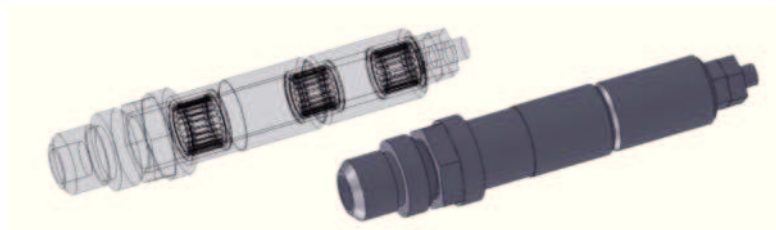


Figura 74 – Representação tridimensional e posicionamento dos rolamentos.

Após a primeira fase de prototipagem do corpo principal, foi considerada a necessidade de uma maior área de enroscamento de forma a obter uma melhor conexão entre o eixos e os corpos principais, bem como uma necessidade de simplificação da zona sextavada de modo a facilitar o processo de maquinação (ver Figura 75).



Figura 75 – Representação tridimensional e posicionamento dos rolamentos com maior área de rosca.

Observou-se adicionalmente que a discordância entre os parâmetros de análise e redefinição dos mesmos, permitiu garantir a integridade estrutural do corpo principal, transferindo qualquer deformação e falha advinda dos esforços exercidos para o eixo em si (como se pode observar no campo de análise), garantindo simultaneamente a integridade dos componentes internos e deixando território para que a reconsideração material não tivessem repercussões.

### **3.2.3.4 Materiais e Processos**

O material destinado à composição do eixo, passou por um processo convencional de seleção, envolvente de três etapas:

- Selecionar o material.
- Especificar o formato.
- Selecionar o processo produtivo.

Selecionar um material correto para uma aplicação ou estabelecer a mesma a partir desse material, conduz a menores custos de produto, maior eficiência de tempo até entrar no mercado, redução de falhas sobre serviço do componente e algumas vezes vantagens competitivas. Na fase de seleção, perceber qual o material indicado para um problema específico, é uma dificuldade crescente devido à expansão contínua da área dos materiais e processos de produção, porém o estabelecimento das seguintes características de seleção material auxiliou esta decisão:

- Propriedades materiais (a performance esperada por parte de um material).
- Custo e disponibilidade (deve conter uma disponibilidade e relação custo/performance adequadas).
- Produtibilidade (considerar um processo produtivo para o componente tendo em conta o material).
- Meio (considerar o ambiente em que a peça está inserida, os efeitos provocados na mesma em serviço, os efeitos provocados pela mesma e pelo seu processamento no

ambiente).

Para selecionar um material correspondente às características delineadas, aplicaram-se quatro princípios auxiliares de seleção, a translação, a limpeza, a avaliação e verificação. A translação constituiu-se pela construção dos requisitos de formato, restrições e objetivos. A limpeza foi o passo de eliminação de grupos materiais menos indicados para o trabalho e a avaliação passou por uma seleção dos materiais mais indicados dentro do grupo selecionado. A verificação proporcionou uma fase de validação através de análise às propriedades materiais e comportamento dos mesmos, validando o seu uso ou necessidade de reformulação.

Na fase de translação delineou-se que o material teria de suportar a carga de projeto considerada e proporcionar ainda alguma margem de fator de segurança sem sacrificar demasiado a geometria do pedal. Para além disso, a componente teria de conter a mais alta durabilidade possível sem causar um aumento extremo de preço e ser fabricável através de torneamento.

Para este componente em específico, após a fase de limpeza, o grupo material considerado centralizou-se nos metais. As propriedades dos metais são bem conhecidas, permitindo a elaboração de estudos estruturais tridimensionais bem fundamentados e com reduzida margem de erro. Para além disso o seu comportamento mecânico era o mais adequado à aplicação em causa.

Dado a geometria da peça, o processo produtivo considerado foi a fabricação via torneamento CNC (Comando Numérico Computorizado) com auxílio de fresagem CNC ou manual das geometrias não passíveis de fabricação através de torneamento.

Durante a formulação do terceiro modelo de eixo, em consonância com a análise estrutural, a passagem para um âmbito de industrialização, o contacto com empresas especializadas na produção deste tipo de elemento e a avaliação dos custos; identificou-se a necessidade de simplificação do processo produtivo e conseqüentemente da geometria do eixo, visto que os custos se encontravam acima do limiar perspectivado inicialmente. Para

auxiliar a resolução desta questão, para além da reformulação resultante no modelo final da terceira tipologia de eixo, foi considerada como constante a construção do eixo a partir de perfis *standard*, existentes no mercado, tendo como prioridade a eliminação de etapas desnecessárias no processo de torneamento CNC.

O processo de engenharia inversa, tornou não só a definição da geometria mais rápida (através de análise de metodologias de resolução e otimização como o TRIZ), mas também possibilitou um afinilamento mais rápido do campo de materiais.

Dentro dos metais, numa primeira fase, consideraram-se como possíveis materiais para o eixo, o aço, alumínio e titânio. Estes três materiais possuem grandes diferenças entre si em determinadas áreas sendo que, mesmo dentro das suas tipologias, a versatilidade de ligas e de comportamentos mecânicos é bastante alargada.

O titânio foi a primeira hipótese a ser abandonada, como material estrutural do eixo. Apesar de ser um material cada vez mais utilizado em aplicações de alta performance desportiva, devido ao seu bom comportamento em termos de suporte de carga, durabilidade e peso; o seu preço superior ao aço e alumínio, mesmo considerando uma quantidade elevada de produção; e a dificuldade superior de maquinação através de CNC inviabilizou a seleção do titânio como material.

Nas análises relativas aos primeiros modelos do pedal considerou-se como material estrutural do eixo o alumínio 6061-T6. Trata-se de uma liga endurecida por precipitação (alumínio 95% a 98%; sílica 0,4% a 0,8%; manganês 0,15%; ferro 0,7%; cobre 0,15% a 0,4%; magnésio 0,08% a 1,2%; crómio 0,04% a 0,35%; zinco 0,25% e titânio 0,15%), à qual a sigla T6 é atribuída devido a um processo de têmpera que endurece o material aumentando, os seus limites físicos de suporte de carga (ver Figura 76) [38].

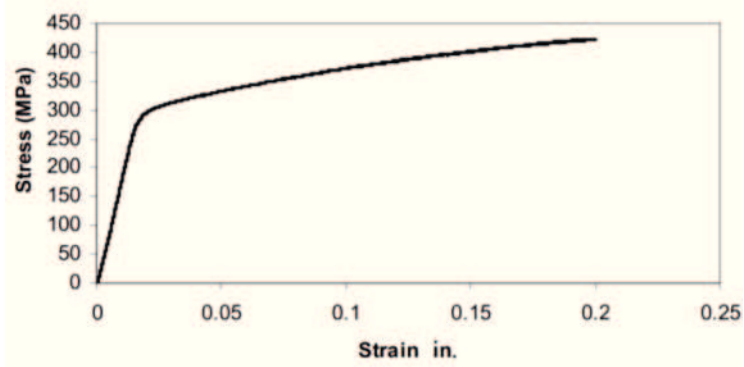


Figura 76 – Curva Tensão-Deformação da liga de alumínio 6061-T6 à temperatura ambiente. [38].

A seleção foi efetuada tendo em conta o seu peso inferior em relação ao aço e a facilidade de maquinação relativamente a um processo de CNC. No entanto observou-se, através de análises a modelos anteriores, que para obdecer a um método de estudo e fator de segurança comum ao corpo principal, o alumínio não seria suficientemente resistente em termos mecânicos.

Nesta fase, iniciou-se a reformulação do fator de segurança baseada na constante procura e análise de artigos científicos de abordagem a esforços envolvidos no pedalar, de modo a definir cargas e perspetivar comportamentos mecânicos envolvidos. Através da análise desses estudos observou-se uma elevada distinção entre as cargas relacionadas com o peso do utilizador e as cargas relacionadas com o esforço requerido pelo mesmo em determinadas situações (pedalar a subir, a descer e em terreno plano), o que reforçou a decisão de reformulação relativamente ao fator de segurança estabelecido. Verificou-se também uma constante relacionada com a distribuição do peso, considerando que durante a atividade o peso do utilizador se encontra distribuído entre os pedais, o assento e o guiador, existindo um intercâmbio de forças aplicadas a esses pontos de contacto consoante o posicionamento ou a situação externa do utilizador [39] [40].

Destes estudos retirou-se que apesar do esforço exercido não ser diretamente proporcional ao peso do utilizador, existe sem dúvida uma influência observada dentro de alguns estudos e traduzida através dos seus resultados (ver Figura 77) [41].

	Peso	Força Máx. Pedal	Força Média Assento
Sujeito 1	547 N	310 N	180 N
Sujeito 2	663 N	480 N	225 N
Sujeito 3	778 N	490 N	325 N

Figura 77 – Representação do peso, força máxima exercida e peso médio exercido no assento ao longo do estudo.

O estudo resultante no quadro superior, foi conduzido tendo em conta bicicletas ergométricas a uma rotação de 84 RPM, com 6% de inclinação resultando 7,2 m/s velocidade média (correspondente a 25 Km/h de velocidade média normal de um utilizador). Nesta análise os dinamómetros foram colocados na superfície de contacto do pedal com o pé do utilizador, no eixo do banco e na estrutura do guiador. O estudo foi executado simulando uma situação de subida, com um posicionamento sentado, observando-se que as forças exercidas no pedal se encontravam acima da média de forças considerando um terreno plano, mesmo apesar do peso do utilizador estar suportado pelo assento. Observou-se ainda, que quanto maior o peso do utilizador maior a força conseqüentemente exercida pelo mesmo nas zonas de contacto. Considerando o posicionamento específico do utilizador delineou-se também uma média de suporte, por parte do assento, de 35% do peso do utilizador, o que não é de todo complementar à força exercida no pedal em relação ao peso visto que são cargas diferenciadas [41].

Outros estudos, revelam análises anteriores de esforços verticais à superfície do pedal na ordem máxima dos 446 N (considerando um pedalar nivelado) e 669 N (considerando uma subida). Os estudos em si verificaram ainda que alguns sujeitos conseguiam aplicar forças elevadas (> 1000N) a apenas determinadas zonas do pedal em cenários diferentes, reforçando a importância da estabilidade e resistência acentuada do corpo principal. Aquando do estudo a força máxima mensurada foi de 880 N considerando atletas preparados (ver Figura 78) [42].

	Right Effective Force (N)	Right Crank Torque (N.m)	Left Effective Force (N)	Left Crank Torque (N.m)	Crank Velocity (rad.s <sup>-1</sup> )
Mean	224.57	38.07	246.99	41.42	15.19
SD	45.46	7.23	39.07	6.45	0.79
Max	851.38	143.88	880.03	148.62	17.69
S.D.	148.16	24.05	126.62	20.35	0.56

Figura 78 – Forças médias e máximas, binário e velocidade de eixo [42].

Foram utilizados dois transdutores de força associados aos pedais aplicados a uma bicicleta ergométrica equipada com a totalidade de equipamentos exteriores necessários para efetuar as leituras [42].

Apesar dos exemplos indicados, os dados sistemáticos são raros e como tal considerou-se para a análise uma força máxima de 1500 N aplicados à superfície do pedal, estabelecendo desta forma alguma margem de segurança considerando os valores máximos verificados e a natureza do eixo (citadina e de lazer quotidiano).

A conclusão deste processo de reformulação, apontou para a utilização do aço como material estrutural do eixo. Neste âmbito seleccionou-se um aço inoxidável martensítico 1.4021 (*Standard* Europeu), cujas propriedades mecânicas dependem em grande parte do tratamento térmico aplicado, sendo que são normalmente otimizados de forma a adquirirem uma dureza elevada (ver Figura 79) [43] [44].

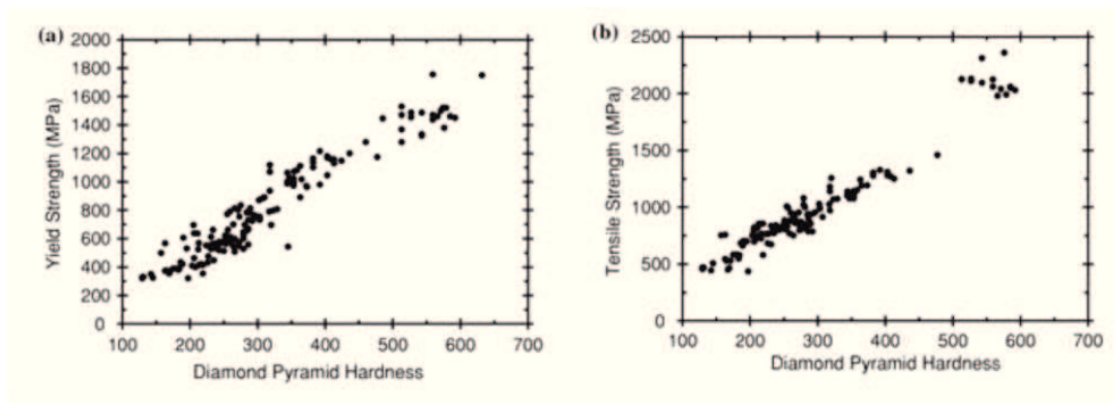


Figura 79 – Correlação entre capacidade mecânica e dureza do aço inoxidável 1.4021 [44].

O aço inoxidável 1.4021 pode ser termicamente tratado desde 745°C, até aos 1050°C, dependendo do objetivo deste processo. Duas designações generalizadas comercialmente são QT700 (temperado entre 650°C e 750°C) e QT800 (temperado entre 600°C e 700°C) com propriedades mecânicas distintas (ver Tabela 3 e Tabela 4 ) [43] [45].

Tabela 3 – Propriedades do aço inoxidável QT700 [45].

<b>Propriedade</b>	<b>Alcance QT700</b>	<b>Média QT700</b>
Tensão de Limite Elástico	> 500	680
Tensão de Ruptura	700 - 850	830
Densidade (kg/dm <sup>3</sup> a 20°C)	7,7	7,7
Módulo de Elasticidade (GPa a 20°C)	215	215

Tabela 4 - Propriedades do aço inoxidável QT800 [45].

<b>Propriedade</b>	<b>Alcance QT800</b>	<b>Média QT800</b>
Tensão de Limite Elástico	> 600	760
Tensão de Ruptura	800 - 950	930
Densidade (kg/dm <sup>3</sup> a 20°C)	7,7	7,7
Módulo de Elasticidade (GPa a 20°C)	210	210

### 3.2.4 Parametrização do Topo do Corpo Principal

Inicialmente esta componente do pedal foi considerada como um elemento à parte de modo a favorecer o processo de montagem. Porém após os primeiros modelos, considerando os requisitos relativos à qualidade e segurança do contacto dos corpos entre si, delineou-se que esta componente teria de ser obtida através de injeção multicomponentes de modo a garantir uma boa vedação, acabamento e relação estrutural.

De modo a possibilitar uma maior aderência, o acabamento considerado nesta fase passou pela texturização arenosa ou outros relevos geométricos mínimos. Tendo em conta a

composição material da superfície consideraram-se materiais dúcteis na área dos elastómeros, de modo a possibilitar alguma adaptação em conjunto com a aderência. A solução de superfície dúctil sobre um corpo rígido foi considerada ao longo do desenvolvimento dos restantes modelos, encontrando o seu ponto de redefinição numa proposta por parte do cliente em relação à criação de um relevo de maior saliência e da análise do desempenho do material em relação a hipóteses rígidas.

Durante a criação do sétimo modelo do corpo principal, observou-se que para uma aplicação considerando um corpo de topo com algum grau de saliência e ductilidade resultante de injeção multicomponente, a carga aplicada causaria uma deformação no corpo em âmbito elástico, podendo diminuir a durabilidade do componente em comparação com o uso de um material rígido (ver Figura 80) [46].



Figura 80 – Deformação passível durante aplicação de uma força a um material dúctil face a um contacto com material rígido.

O que se observa é a possibilidade de ocorrência de tensões de corte aquando de uma deformação do corpo mais dúctil. O esforço material, resultante da carga aplicada ao material dúctil e da resistência do material rígido, pode resultar em defeitos no corpo dúctil (marcas, cortes, etc.) e conseqüentemente em falha face um cenário prolongado ou face à aplicação de forças de elevada intensidade.

O abandono da ductibilidade do material ou do seu acabamento como geometria de maior saliência de promoção de aderência superficial entre o pedal e superfícies de contacto, colocou uma nova imposição face a selecção de material. Neste âmbito considerou-se vantajoso seleccionar uma poliamida sem qualquer tipo de reforço como segundo material em conjunto com um aditivo de promoção de adesão superficial, mantendo em aberto uma

diferenciação estrutural do material e o acabamento do mesmo, possibilitando ao mesmo tempo uma geometria projetada para a injeção conjunta de ambos num mesmo material, caso a situação de distinção fosse abandonada futuramente.

Em termos geométricos, o facto deste corpo se apresentar mais destacado da superfície de topo do pedal, atribui-lhe um valor de construção dimensional de maior importância, visto que a geometria resultante será visível exteriormente. A saliência e distinção de superfícies foi percebida como um elemento para além da função de aderência, considerando-se importante trabalhar um modelo que garantisse uma boa organização geométrica em termos visuais, visto que a opinião dos utilizadores finais se compõe de apreciações diferentes. Para isto utilizou-se o topo do pedal como uma tela bidimensional e aplicou-se a regra dos terços, como linha guia para a criação de várias propostas (ver Figura 81).

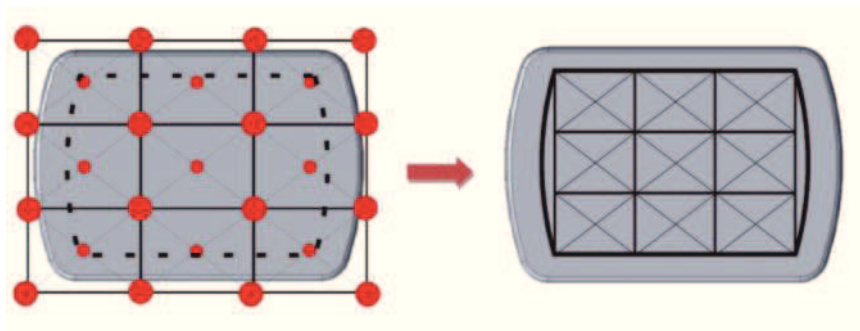


Figura 81 – Aplicação da regra dos três terços ao topo do pedal.

A ideologia foi a interpretação da grelha como elemento de oferta de pontos principais correspondentes a uma organização geométrica específica, de modo a tornar as resultantes geométricas em elementos com maior amplitude de satisfação, face a um público geral. Foram criadas, avaliadas e selecionadas diversas propostas em conjunto com o cliente, sendo que todas elas trabalharam em conjunto com a existência de um logótipo iluminado de modo a inclui-lo na composição.

O formato selecionado, apontou para uma composição de elementos de geometria curvilínea devidamente adaptados e construídos a partir da grelha estabelecida, utilizando um processo de injeção multi-componete através do interior do pedal como processo produtivo, de modo a criar uma forma específica (ver Figura 82).



Figura 82 – Exemplo de um acabamento geométrico resultante da tipologia considerada.

### **3.2.5 Parametrização do Isolamento do Pedal**

O campo de isolamento do pedal na sua totalidade, esteve sempre fortemente relacionado com o método de montagem, visto ser uma resultante do mesmo, sendo que os passos de otimização foram sempre paralelos nestes dois campos devido à sua interdependência.

O requisito principal em relação ao isolamento, para além da sua eficiência como elemento vedante, era a sua invisibilidade exterior no produto final.

#### **3.2.5.1 Isolamento 1**

Inicialmente, durante a parametrização transitória do segundo para o terceiro modelo do corpo principal, considerou-se um isolamento via aplicação de resina líquida, compressão dos corpos e cura. Porém uma análise posterior a esta tipologia de isolamento, revelou a necessidade de demasiado trabalho operacional envolvido considerando uma produção otimizada. Neste caso para garantir o bom acabamento do isolamento, a deposição teria de ser controlada por um elemento robótico (braço robótico ou outra máquina de deposição) de modo a que o fluxo e localização do material não sofresse qualquer desalinhamento ou alteração de perfil prejudicial ao acabamento sendo que a sua deposição manual por parte de um operador, comportaria o risco de resultar no escapamento de material para o exterior prejudicando o acabamento na zona de contacto (ver Figura 83).

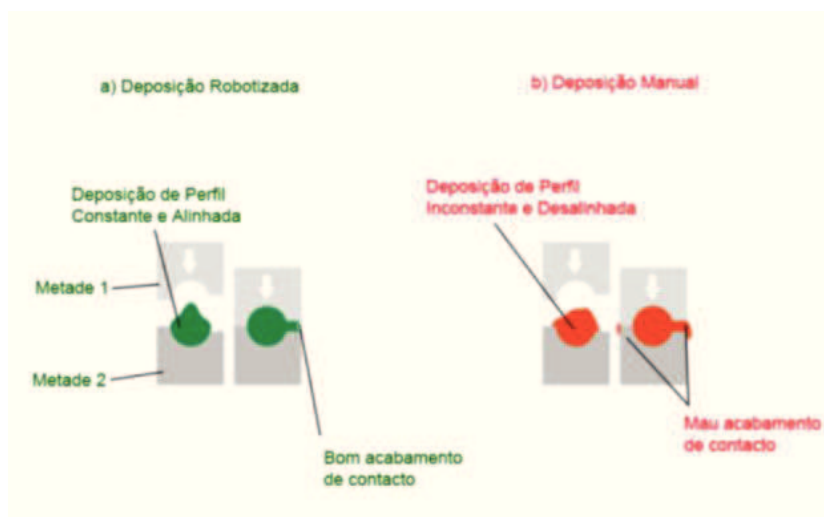


Figura 83 – Exemplo seccional de defeitos possíveis à deposição manual de um material como meio isolante.

### 3.2.5.2 Isolamento 2

A partir da parameterização do quinto modelo do corpo principal, o isolamento através de perfis sólidos foi colocado como uma opção de reformulação. Inicialmente este isolamento foi considerado como um possível perfil *standard* que poderia ser encaixado numa cavidade ao longo da borda exterior da peça, porém este modelo de isolamento, à semelhança do primeiro, inseria uma necessidade elevada de controlo considerando o processo de montagem aplicado a um âmbito industrial, sendo que o facto deste perfil ser um corpo livre até que as duas metades do corpo principal estivessem devidamente encaixadas, inseria a possibilidade de esmagamento durante essa montagem, caso o perfil se encontrasse mal posicionado em alguma secção do caminho prejudicando o isolamento final.

### 3.2.5.3 Isolamento 3

Verificando-se durante a parameterização do sexto modelo do corpo principal, a necessidade de controlar a mutabilidade do material durante a montagem, considerou-se o isolamento em si como uma componente à parte de formato específico resultante de um processo de injeção, sendo uma possibilidade mais tarde reforçada pela evolução tridimensional dos componentes.

### 3.2.5.4 Isolamento do Eixo

Inicialmente, nos três primeiros modelos de corpo principal, o isolamento relativo ao eixo do pedal, foi considerado como um elemento à parte localizado na borda interna do pedal; o que poderia prejudicar a rotação do eixo em deterioramento do isolamento do mesmo (ver Figura 84).

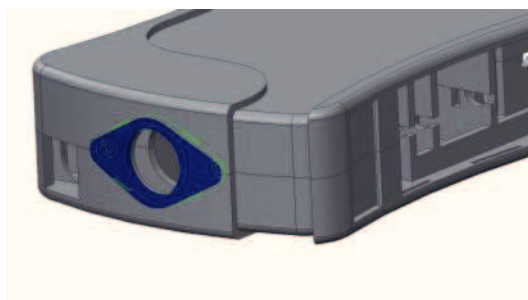


Figura 84 – Exemplo tridimensional do elemento de isolamento do eixo do pedal considerado.

O modelo estabelecido durante a parameterização do sétimo modelo de corpo principal, surgiu aquando da selecção da última tipologia de eixo, que permitiu a aplicação de uma fita isoladora na sua zona de enroscamento de modo a garantir o isolamento interno, sem provocar atrito ou resistência às componentes essenciais para a movimentação (ver Figura 85).

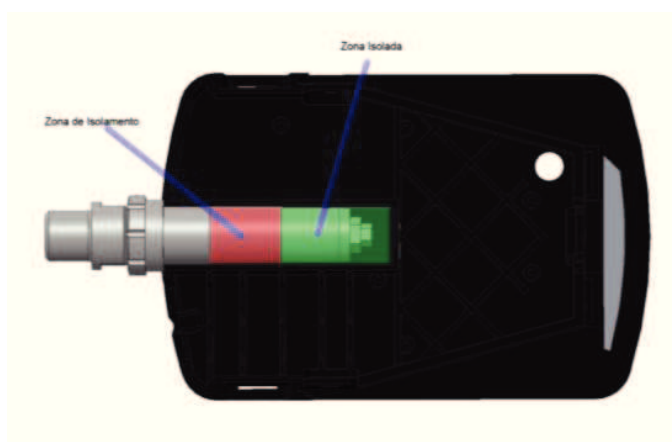


Figura 85 – Último modelo de isolamento do eixo estabelecido durante a parametrização do sétimo modelo de corpo principal.

### 3.2.5.4 Isolamento de Baterias

O isolamento referente às baterias e ao elemento de logótipo iluminado não conteve alterações desde o modelo inicial, sendo um isolamento à face que se localiza no contorno da forma. A passagem de todos os elementos para um processo de injeção permitiu considera-los como parte de uma única injeção, num cenário de produção futuro.

### 3.2.6 Parametrização do Ecrã Protetor e Moldura

#### 3.2.6.1 Modelo 1

Inicialmente para o ecrã protetor foram consideradas apenas duas superfícies de policarbonato (contactadas ou independentes) aprisionadas pelos topos nas duas metades do corpo principal. Nesta ideia inicial, adotou-se para o ecrã não só a função de elemento de proteção mas também de elemento estrutural (ver Figura 86).

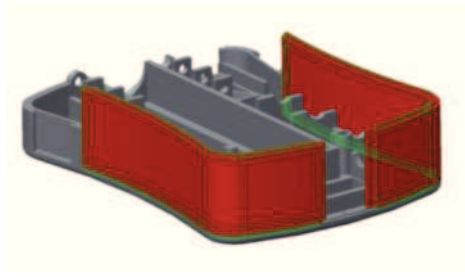


Figura 86 – Primeiro modelo de ecrã protetor.

A evolução do processo de montagem e dos componentes forçou a que o ecrã protetor assumisse a função de elemento de fixação da componente condutora de luz, de modo a que o processo de montagem fosse otimizado. Esta restrição foi principalmente advinda do facto da componente de condução de luz, inicialmente ter sido considerada como um corpo rígido, evoluindo durante o processo para um material maleável, o que implicou o controlo do formato da mesma através de encaixes, de modo a manter um direccionamento e percurso específico. Esses encaixes foram aplicados ao ecrã protector aumentando a

complexidade deste componente em deterioramento da simplificação do corpo principal ou da criação de um novo elemento (ver Figura 87).

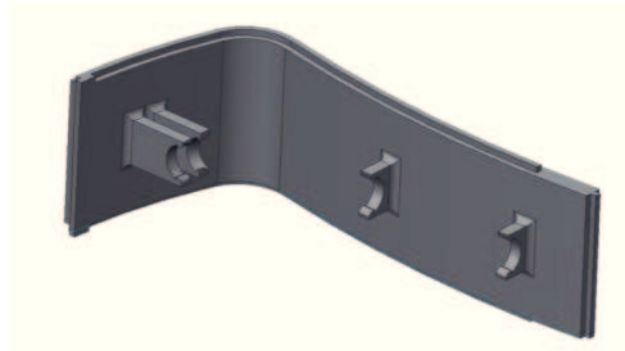


Figura 87 – Modelo de ecrã protetor com suporte de encaixe do elemento condutor de luz.

Decidiu-se mais tarde utilizar um processo de injeção de multicomponentes de modo a criar uma moldura exterior ao ecrã eliminando a dificuldade em relação ao isolamento existente entre este componente e os corpos principais e aumentando a sua eficiência.

A transição para este componente adicional veio permitir também um novo alojamento dos elementos refletores que foi mais tarde abandonado devido à complexificação da moldura.

O processo de multi-injeção desta componente conduziu à eliminação da curvatura da borda lateral exterior de modo a permitir uma maior simplicidade na extração de peça num futuro projeto de moldes (ver Figura 88).

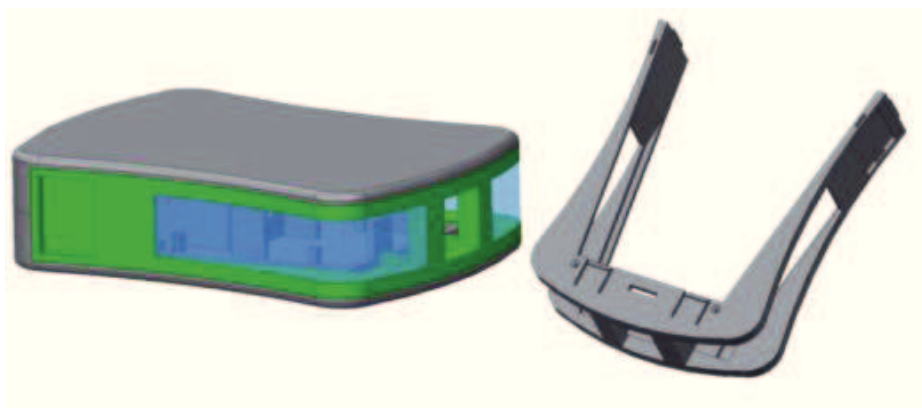


Figura 88 – Representação da curvatura abandonada aplicada à moldura.

Produzir a peça com curvatura implicava uma linha de molde longitudinal que colocasse os elementos de extração da peça num plano de topo, fator que iria causar dificuldades devido ao prolongamento da altura da mesma ou mau acabamento devido às visíveis linhas moldantes e dos elementos adicionais.

Após abandono da curvatura, o facto da extração da peça ser possível através do seu interior, manteve qualquer tipo de imperfeição invisível considerando a montagem total do pedal. Finalmente considerando a junção dos materiais observou-se através de alguns quadros de adesão que o policarbonato e as poliamidas tem uma fraca adesão superficial (ver Tabela 5).

Tabela 5 – Qualidade de adesão entre vários polímeros [17].

	ABS	ASA	CA	EVA	PA 6	PA 66	PC	PE-HD	PE-LD	PMMA	POM	PP	PPO mod.	PS-GP	PS-HI	PBTP	TPU	PVC-W	SAN	TPR	PETP	PVAC	PPSU	Blend PC + PBTP	Blend PC + ABS
ABS	+	+	+				+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+				+	+	
ASA	+	+	+				+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+			○		+	+
CA	+	+	+	○				+	+			+	+	+	+	+	+	+	+						
EVA		+	○	+				+	+			+	+	+	+	+	+	+	+						
PA 6					+	+		○	○			○		+	+										
PA 66					+	+	○	○	○			○		+	+										
PC	+	+					○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+
PE-HD	+	+	+	+	○		+	+	+	○	○	+	+	+	+	+	+	+	+					+	+
PE-LD	+	+	+	+	○		+	+	+	○	○	+	+	+	+	+	+	+	+					+	+
PMMA	+	+					+	○	○	+		○		+	+				+	+					
POM								○	○		+	○		+	+										
PP	+	+	+	+	○	○	+	+	+	○	○	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
PPO mod.	+	+	+									○	+	+	+	+	+	+	+					+	+
PS-GP	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+					+	+
PS-HI	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+					+	+
PBTP	+	+	+				+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+						
TPU	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+						+
PVC flex.	+	+	+	+			+	○	+			○	+	○	○	+	+	+	+						+
SAN	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+					+	+
TPR												+									+				
PETP	+						+									+	+	+	+		+			+	+
PVAC	○	○																					+		
PPSU																						○			
Blend PC + PBTP	+	+					+	+	+					+	+	+	+	+	+				+		
Blend PC + ABS	+	+					+	+	+				+	+	+	+	+	+	+				+		

+ good adhesion      + no adhesion      ○ poor adhesion      ++ limited adhesion

### 3.2.6.2 Modelo 2

O modelo final relativo ao ecrã protetor e à moldura, iniciado durante a parametrização do sétimo modelo do corpo principal, utiliza uma zona de encaixe, uma zona de prisão face aos corpos principais e uma superfície que vai reforçar a estrutura dos mesmos em termos de comportamento mecânico (ver Figura 89).

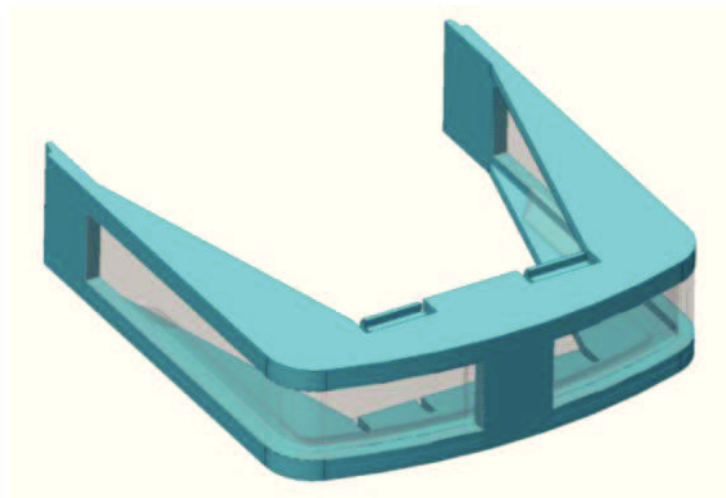


Figura 89 – Modelo final de moldura e ecrã protetor.

Para além disso os elementos de encaixe relativos ao elemento condutor de luz também foram transpostos para um corpo adicional como medida de otimização de emissão luminosa através da reflexão e simplificação de um futuro projeto de molde.

O abandono total dos processo de encaixe como soluções de montagem e o redimensionamento do pedal após a primeira fase de prototipagem, provocaram modificações relativas a este modelo apenas na sua geometria e formato de fixação. Foi utilizado um processo de aparafusamento interno como elemento final de montagem do ecrã e moldura redimensionados (ver Figura 90).

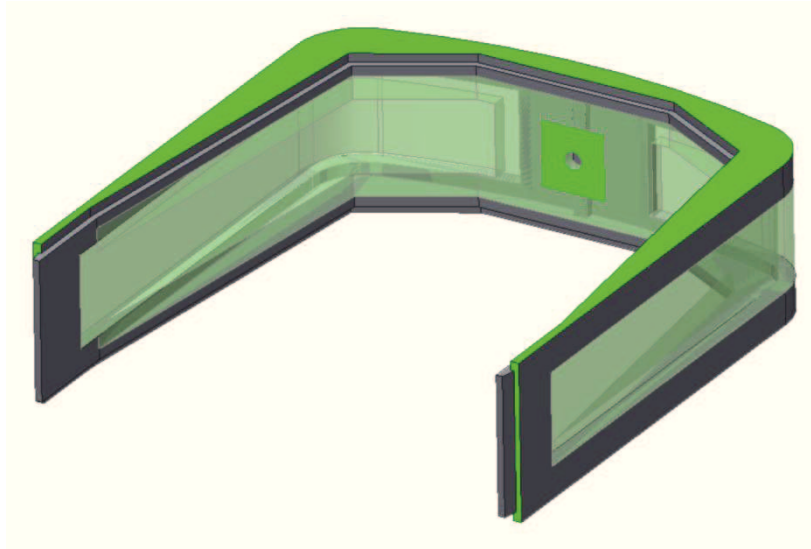


Figura 90 – Ecrã modificado preparado para aparafusamento.

### 3.2.6.3 Materiais e Processos

A necessidade de interligação material através de um processo de injeção multicomponente, observada durante a construção do primeiro modelo de ecrã e moldura, fez com que se considera-se a utilização de um agente promotor desta ligação sobre a forma de aditivo durante a injeção e ligação geométrica dos corpos, aproveitando ao máximo a diminuição volumétrica do material aquando do arrefecimento para aumentar a adesão entre os corpos.

Estes agentes de promoção de adesão, ou agentes de compatibilização ou acoplamento, agem como surfactantes tendo como objetivo, neste caso específico, a diminuição de tensões na interface entre dois polímeros de modo a aumentar não só a adesão mas também promover a dispersão aumentando a performance e acabamento superficiais (ver Figura 91).

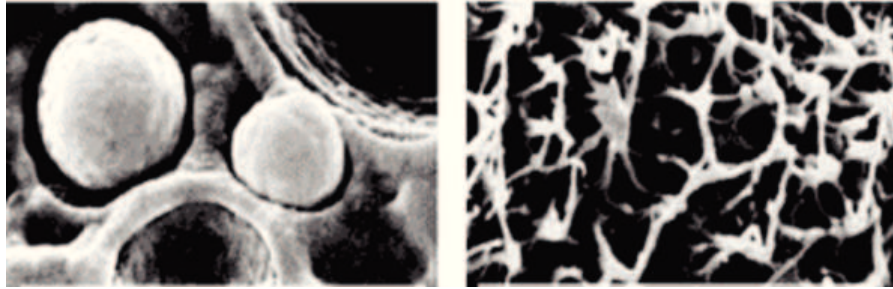


Figura 91 – Exemplo de uma ligação sem compatibilização (esquerda) e com compatibilização (direita).

Para o ecrã, considerou-se um policarbonato como material estrutural, devido ao seu alto grau de transparência e para a moldura considerou-se uma poliamida 66 igual à considerada para o corpo principal.

### **3.2.7 Parametrização dos Elementos de Reflexão**

Os elementos refletores do pedal foram divididos em dois grupos, a reflexão exterior e a reflexão interior.

Em termos de reflexão exterior, inicialmente considerou-se o uso de três elementos refletores, um localizado na parte frontal, um na secção traseira e um na borda exterior do pedal que permitisse a passagem da luz difundida no interior do pedal de modo a que, por exemplo, veículos provenientes de cruzamentos perpendiculares ao percurso do utilizador o pudessem localizar facilmente. O refletor da borda exterior, foi desconsiderado em modelos futuros visto que a sua funcionalidade não era essencial e complexificava o projeto de moldes relativamente à moldura e ao ecrã protetor.

Os refletores foram inicialmente considerados como elementos fixos entre a superfície da moldura e os corpos principais, porém a possibilidade de eliminação da sua dependência em relação ao isolamento e à moldura; incitou à separação destes mesmos elementos, simplificando o seu formato de fixação através da criação de um corpo adicional de encaixe capaz de oferecer uma melhor solução em termos de simplificação (ver Figura 92).



Figura 92 – Modelo final considerado para os elementos de reflexão exterior.

O componente de reflexão interior, surgiu durante o abandono do encaixe do componente condutor de luz ao ecrã protetor. A sua dependência geométrica relativa ao componente condutor de luz foi em grande parte influenciada pelos LED e pela necessidade de uma condução e emissão luminosa específicas. Anteriormente à parametrização deste componente verificou-se que a tecnologia LED seleccionada comportava um ângulo específico de emissão luminosa (ver Figura 93) [47].

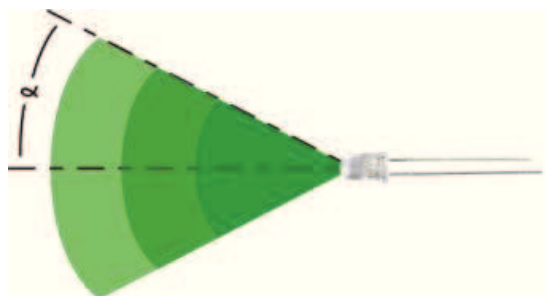


Figura 93 – Representação da directividade luminosa do LED.

Este ângulo estabeleceu uma relação directa face ao distanciamento da componente condutora de luz e dos LED e aos seus posicionamentos relativamente ao elemento de suporte do perfil condutor de luz. Para efectuar o correcto posicionamento do suporte, considerou-se que a componente condutora de luz, com uma secção de diâmetro específico, teria de recepcionar na limitação da sua área seccional, a emissão do luminosa do LED restringida pelo seu ângulo de directividade luminosa (ver Figura 94).



Figura 94 – Representação da distância em função da área de incidência.

Considerando uma simetria geométrica para o cone luminoso emitido pelo LED e para a secção cilíndrica da componente de condução de luz, a distância representada pela sigla *d*, vai ser conseqüentemente maior face a um ângulo mais fechado e menor face a um ângulo mais aberto, como se pode concluir através de relações trigonométricas bidimensionais como a Lei dos Cossenos (ver Figura 95) [47].

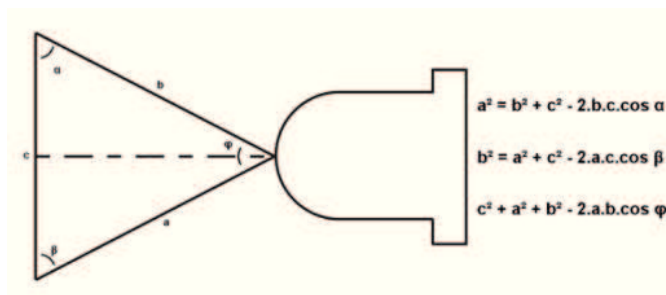


Figura 95 – Representação da Lei dos Cossenos no cálculo da distância.

Através da aplicação destas relações, delineou-se que distância máxima a que o LED se poderia encontrar da componente condutora seria 10 mm considerando um LED com um ângulo característico de 17° (de modo a não influenciar demasiado o tamanho exterior do pedal nem encurtar o comprimento da componente condutora de luz). A distância mínima do LED para que não existisse uma dissipação lateral excessiva seria 3,15 mm com um ângulo respectivo de 45°.

Depois da análise e delimitação posicional dos LED, estabeleceu-se o trajeto da componente condutora de luz de modo a iluminar o ecrã. A parametrização do componente de reflexão interior, destinou-se não só a refletir a luz refratada, dissipada de outra forma para o interior do pedal, mas também a fixar o elemento condutor permitindo uma simplificação de todos os componentes através da criação de um corpo adicional (ver Figura 96).

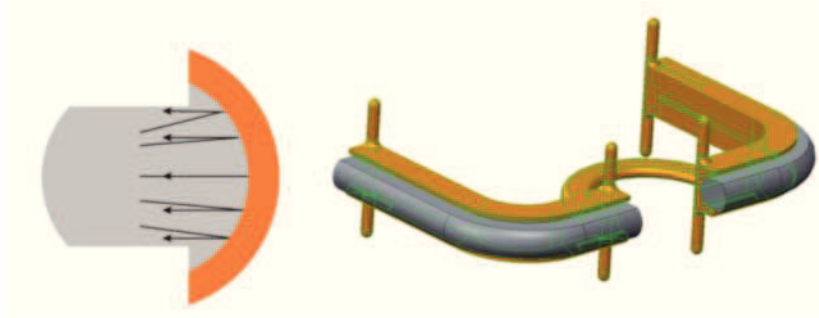


Figura 96 - Exemplo seccional da reflexão luminosa e tridimensional do conjunto.

O facto de a sua elaboração ter sido efetuada simultaneamente ao aparecimento da última tipologia de montagem simplificou imenso a forma de encaixe entre este componente e os corpos principais, revelando a criação de parâmetros dimensionais coesos e de relacionamento estruturado.

### 3.2.7.1 Materiais e Processos

Para os elementos refletores exteriores, em termos de materiais, foram considerados dois planos em acrílico sendo um deles completamente opaco, branco e plano (destinado a ser um elemento de fundo) e o outro alaranjado translúcido com um dos lados plano e o outro composto por uma divisão de estruturas angulares, construídas de modo a refletir a luz incidente, sendo que esse mesmo estudo seria orientado para uma entidade especializada e certificada no âmbito. Para o corpo de encaixe exterior foi considerada poliamida com ou sem reforço da mesma tipologia utilizada no corpo.

Considerando o elemento de reflexão interior, selecionou-se um policarbonato branco como material estrutural, de modo a refletir o máximo de luminosidade possível oferecendo uma estrutura de boa resistência mecânica.

Todas as partes projetadas relativamente a elementos de reflexão tiveram como alvo futuro um processo produtivo através de injeção.

## 3.2.8 Desenvolvimento de Processos de Assemblagem

O processo de assemblagem teve um papel crucial ao longo do desenvolvimento do pedal e foi influente na geometria de todos os componentes, sendo mesmo o fator de criação de alguns desses, durante a sua evolução. A complexidade de componentes existentes neste projeto, associou uma alta importância não ao seu processo de parametrização e produção mas também ao desenvolvimento do seu processo de assemblagem, visto que existe uma grande interdependência geométrica entre todos os componentes.

### 3.2.8.1 Assemblagem 1

Inicialmente a acompanhar a criação do *Design Lock*, considerou-se um processo de assemblagem em sanduíche com a maioria dos componentes a ter a sua entrada proveniente de um plano de topo (ver Figura 97).

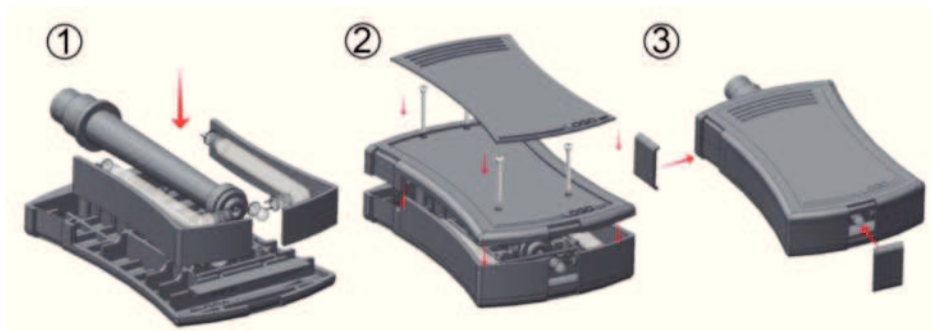


Figura 97 – Primeiro modelo de assemblagem.

Neste processo a primeira etapa considerada seria a assemblagem dos logos aos corpos e o posicionamento do sistema, eixo e ecrã protetor a uma das metades do corpo. Após isso seria colocada e fixada a outra metade através de quatro parafusos de modo a enclausurar os componentes internos e o ecrã, sendo por fim fixos os refletores e os topos através de encaixe.

### 3.2.8.2 Assemblagem 2

Como observado anteriormente, no início considerou-se o isolamento via deposição material em estado líquido, verificando-se a necessidade de complexificar os elementos de modo a criar zonas de fixação e adesão entre os mesmos e cavidades para a deposição do isolamento. Também nesta fase se impôs a necessidade de uma melhor adesão superficial entre as superfícies de topo e os corpos e a liberdade para a existência de uma manutenção e reparação total do pedal, inserindo uma contradição relativa à vedação total e definitiva dos parafusos e elementos de encaixe. A injeção de multicomponentes obrigou à transposição das zonas de fixação e ao redesenho da componente destinada a salientar o logótipo que foi sintetizada num formato cilíndrico. As fixações foram transpostas para o interior do pedal, abrindo a experimentação, a dois perfis cilíndricos ao longo dessa mesma zona, como elementos de fixação isolados por um elemento de topo (ver Figura 98).



Figura 98 – Fixações experimentais em perfil.

Os perfis sem rosca, enclausurados no interior do pedal foram considerados como hipótese substituta ao uso de parafusos de topo, face à diminuição de desgaste do material num cenário de manutenção.

Neste caso o sistema continuou a ser inserido num plano de topo, porém a inserção da necessidade de manutenção e o abandono da conversão energética em deterioramento de uma bateria, inseriu a necessidade de criação de uma nova zona de alojamento de uma componente adicional, fixa através de encaixe destinada a cobrir as baterias e a permitir a sua manutenção (ver Figura 99).

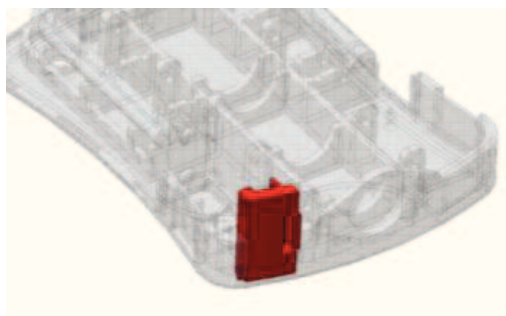


Figura 99 - Representação do elemento de cobertura das baterias via encaixe.

A reformulação do sistema para uma placa comum, ao invés das placas de circuito impresso independentes, encaixadas em zonas chave, também foi considerado durante esta etapa evolutiva devido à eliminação da necessidade de preservação de espaço vazio para o aumento ou diminuição das fixações anteriormente vindas de topo.

A fixação dos elementos refletores foi alterada, de modo a que os mesmos ficassem alojados entre ambos os corpos, para satisfazer uma melhor fixação e coerência com o tipo de assemblagem considerada (ver Figura 100).

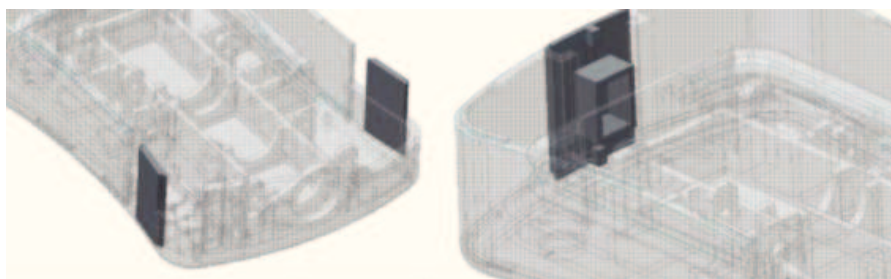


Figura 100 – Processos e localização dos elementos refletores em modelos não preliminares.

### 3.2.8.3 Assemblagem 3

Neste modelo observou-se a necessidade de transferir a zona de fixação do elemento condutor de luz, das duas metades do pedal para o ecrã protetor de modo a evitar a alteração ou esmagamento do perfil durante a montagem, visto que considerando um isolamento dependente de um tempo de cura teria de ser aplicada uma carga X de modo a garantir a vedação otimizada do mesmo o que permite pouca margem de erro em relação

ao posicionamento dos elementos internos de corpo dúctil.

Verificou-se mais tarde, que a solução dos perfis passantes como elementos de fixação não seria a mais adequada em termos de qualidade, durabilidade e produção, sendo que antes da aplicação do novo modelo de eixo considerou-se a sua substituição por elementos de aparafusamento *standard* em conjunto com modelos de encaixe.

O eixo selecionado para modelos futuros teve um processo de montagem semelhante ao anterior, sendo inserido entre as duas metades do pedal simultaneamente ao sistema (ver Figura 101).

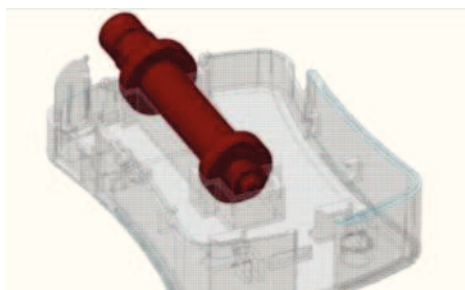


Figura 101 - Posicionamento e montagem do segundo modelo de eixo.

Em relação ao elemento de cobertura e acesso à bateria, alterou-se a sua fixação de uma metodologia de encaixe para uma metodologia de aparafusamento de modo a garantir uma maior segurança e durabilidade.

Os métodos de montagem mantiveram-se semelhantes ao modelo anterior sendo que a diferença mais significativa foi relativa às zonas de encaixe. A criação de encaixes em conjunto com aparafusamento foi uma hipótese concebida de modo a facilitar o processo de produção e reparação do pedal facilitando o acesso ao mesmo. Primeiramente a placa de circuito impresso do sistema seria colocada simultaneamente ao posicionamento do eixo, dos refletores e do ecrã protetor, para que numa segunda fase de montagem aquando da deposição do material isolante se executasse o encaixe e aparafusamento sequencial das duas metades do pedal já inclusivas do corpo do logótipo (ver Figura 102).

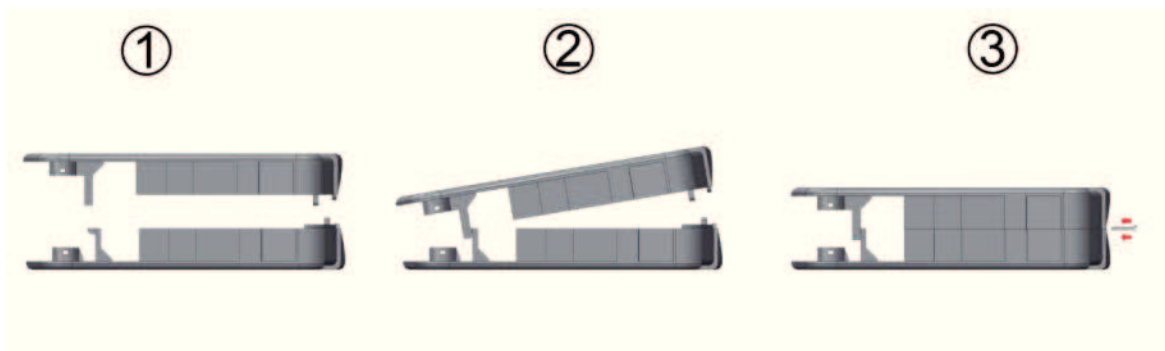


Figura 102 - Fases da montagem considerada para o terceiro modelo do corpo principal.

### 3.2.8.4 Montagem 4

Anteriormente a este modelo foram criados outros, que utilizavam só métodos de encaixe, porém para garantir uma boa fixação conjunta a um bom isolamento estas fixações impediriam a reabertura do pedal. Foi identificada uma dificuldade de montagem relativa ao encaixe de todos os componentes em consonância com a montagem de topo das duas metades do corpo principal. Este tipo de montagem deixava muita abertura em termos de margem de erro relativa ao alinhamento e ao isolamento.

Como tal, através da aplicação do princípio de segmentação do TRIZ para melhorar a complexidade do objeto mantendo uma produção simples, decidiu-se criar uma nova componente que atuaria como moldura onde seria aplicada a injeção de multicomponentes conjunta com o ecrã protetor permitindo também o alojamento dos refletores através de encaixes (ver Figura 103).

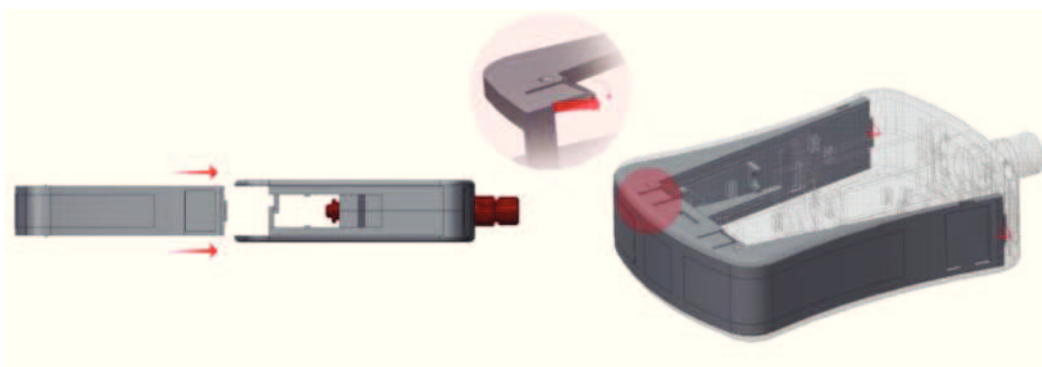


Figura 103 – Componente de moldura e o seu formato de encaixe ao corpo principal.

A criação desta componente impulsionou a evolução do isolamento para um elemento sólido, permitindo uma maior qualidade de produto final e uma otimização no processo de montagem.

No entanto a utilização de encaixes no interior do pedal revelou uma fixação fraca face à carga aplicada. De facto a segurança proporcionada por qualquer assemblagem consideradas que tivesse de proporcionar facilidade de entrada e saída adequadas à manutenção, inseriu um grau de liberdade entre os componentes que não garantiu uma fixação segura em âmbito de utilização.

Não desconsiderando as constantes relativas à secção geométrica, às restantes componentes e ao material, considerou-se como fator prejudicial ao funcionamento e à durabilidade do pedal o uso de encaixes como método de fixação estrutural. Esta conclusão foi alcançada através da análise de vários métodos de encaixe relativamente à possibilidade de uma manutenção e uso contínuos. Considerando a Figura 104 como exemplo básico de um dos tipos de encaixe considerados, observa-se que a criação de um encaixe que permita uma deflexão suficiente para uma desmontagem e montagem servindo ao mesmo tempo como elemento de fixação estrutural tem uma qualidade de fixação inferior à de um parafuso em termos de restrição de deslocamentos (ver Figura 104) [46] [48] [49].

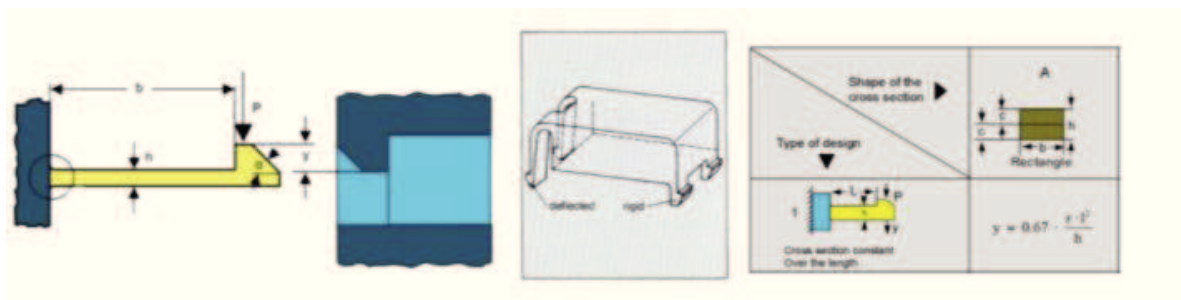


Figura 104 - Exemplo explicativo de uma tipologia de encaixe, das suas proporções e comportamentos.

Também no caso observado, para uma mesma espessura, um encaixe que permita uma maior distribuição do esforço e uma melhor deflexão, terá de apresentar um maior comprimento e uma menor resistência consequente, porém um encaixe que satisfaça uma aplicação estrutural segura terá de apresentar uma maior resistência, tornando-se prejudicial num cenário de manutenção que exige, por parte do material, um determinado

comportamento e durabilidade. De facto, durante o processo, estabeleceu-se como sendo possível a criação de encaixes simultaneamente otimizados para uma aplicação estrutural de alta resistência em âmbito de manutenção, porém a criação destes elementos complexificou demasiado um futuro projeto de moldes através da previsão de elementos comprometedores da qualidade do molde, face a possibilidades mais simples adquiridas através do aparafusamento [46] [48] [49].

Apesar de terem uma melhor qualidade de fixação e apresentarem uma solução mais simplificada, as ligações aparafusadas também são prejudiciais ao corpo num âmbito de manutenção considerando um enroscamento de contacto direto com o polímero, pelo que se deve deixar em aberto, no projeto de moldes, a utilização de insertos metálicos para diminuir o deterioramento.

### **3.2.8.5 Assemblagem 5**

Decidiu-se nesta fase, relativamente aos parafusos, que estes deveriam ser parafusos de formação de rosca, de tipologia de cabeça plana, tendo como propriedade principal a formação da rosca fêmea diretamente no material através de deformação a frio do mesmo sendo mais indicados para uma ligação mais duradoura em materiais termoplásticos.

O diâmetro exterior da saliência de alojamento do parafuso deve proporcionar largura suficiente para resistir à concentração de tensões efetuada pela rosca sendo que a quantidade de penetração da mesma na parede do material não deverá ser exagerada de modo a evitar falhas materiais sobre condições extremas e a saliência deve ter um diâmetro alargado na sua entrada para permitir um alinhamento e entrada facilitada do parafuso.

Normalmente os fornecedores do polímero estrutural ou dos parafusos possuem dados guia para a determinação das dimensões das saliências num material específico, sendo no entanto sempre importante considerar reforços laterais sobre a forma de *ribs* e arredondamentos da base como fatores de reforço em relação a possíveis deformações materiais (ver Figura 105).

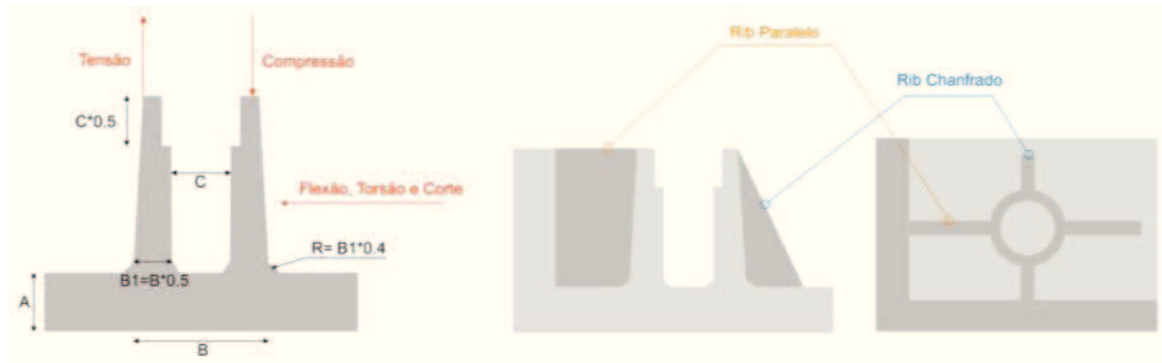


Figura 105 – Considerações tidas em conta durante a construção das saliências para os parafusos.

No seguinte modelo consideraram-se três zonas principais de fixação entre as metades do pedal (ver Figura 106).

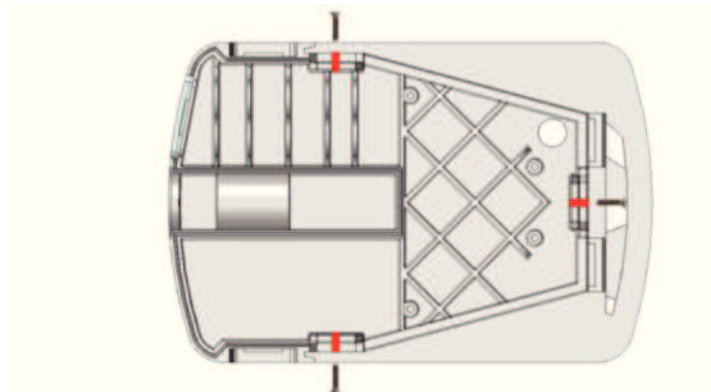


Figura 106 – Tipologia final de fixação dos corpos principais.

Estas três zonas foram localizadas numa borda interna de forma a permitirem o cruzamento dos dois corpos principais e a fixação conjunta dos mesmos.

Tanto na criação destas três zonas como na criação de outras saliências destinadas ao aparafusamento das placas de circuito impresso e baterias foram tidas em conta algumas restrições de modo a projetar e controlar a qualidade da fixação [49].

Em relação à moldura esta teve a sua forma simplificada e o alojamento dos refletores removido, de maneira a permitir uma melhor extração visionando um processo de injeção de multicomponentes futuro. Foram criados dois corpos de alojamento para os componentes refletores que encaixavam posteriormente nos corpos principais.

O eixo considerado para este modelo também foi modificado, utilizando-se um eixo com possibilidade de enroscamento o que permitiu um afastamento das zonas de fixação através da existência de um contacto superficial mais resistente na zona do eixo. A montagem do sistema manteve-se a mesma, considerando finalmente uma placa de circuito impresso como elemento comum para todo o sistema (ver Figura 107).

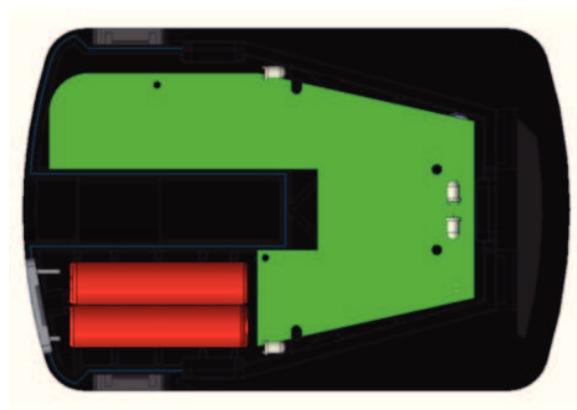


Figura 107 – Representação da placa de circuito impresso como elemento único.

A montagem deste modelo funcionou como resolução final relativa a um processo produtivo visando uma escala industrial. Considerando uma produção industrial, inicialmente à parte da montagem relativa ao corpo principal, seriam executadas as montagens secundárias, nomeadamente do logotipo do seu isolamento e encapsulamento do LED SMD, do componente condutor de luz e do seu refletor e dos refletores frontais e traseiros (ver Figura 108).

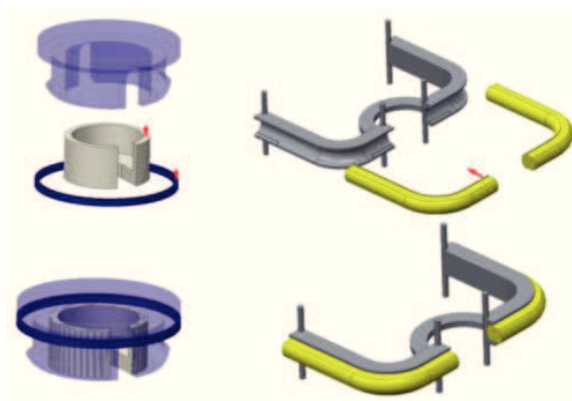


Figura 108 - Processo de pré montagem dos logotipos e dos componentes condutores de luz ao suporte.

Após isso seria colocado e fixo o sistema numa metade respectiva do pedal destinada para o seu aparafusamento, seguido da colocação da componente de condução de luz e dos logótipos de modo a posicionar os LED SMD no seu interior (ver Figura 109).

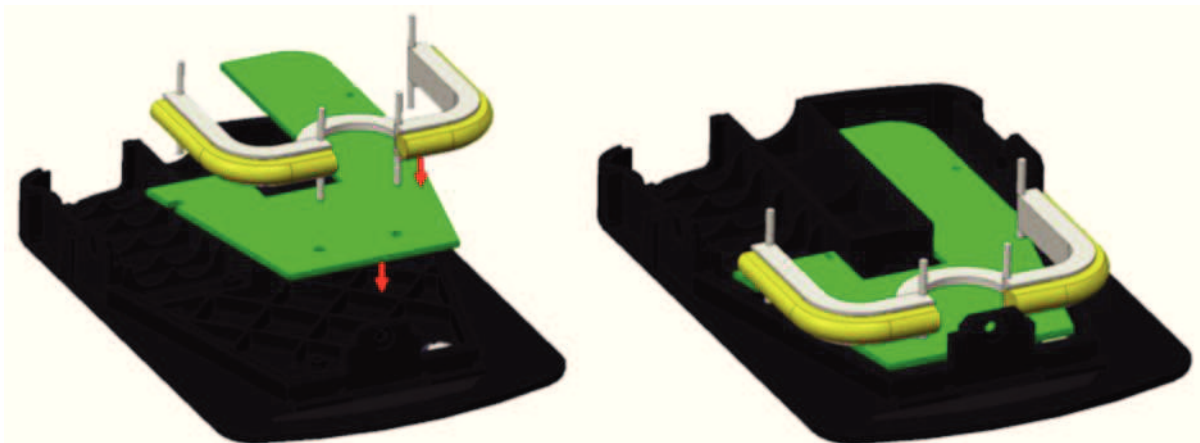


Figura 109 – Processo de colocação dos componentes, logótipos e sistema.

O isolamento seria colocado previamente à colocação da segunda metade do pedal de modo a permitir que o aparafusamento de união também contribui-se para a fixação do mesmo (ver Figura 110).

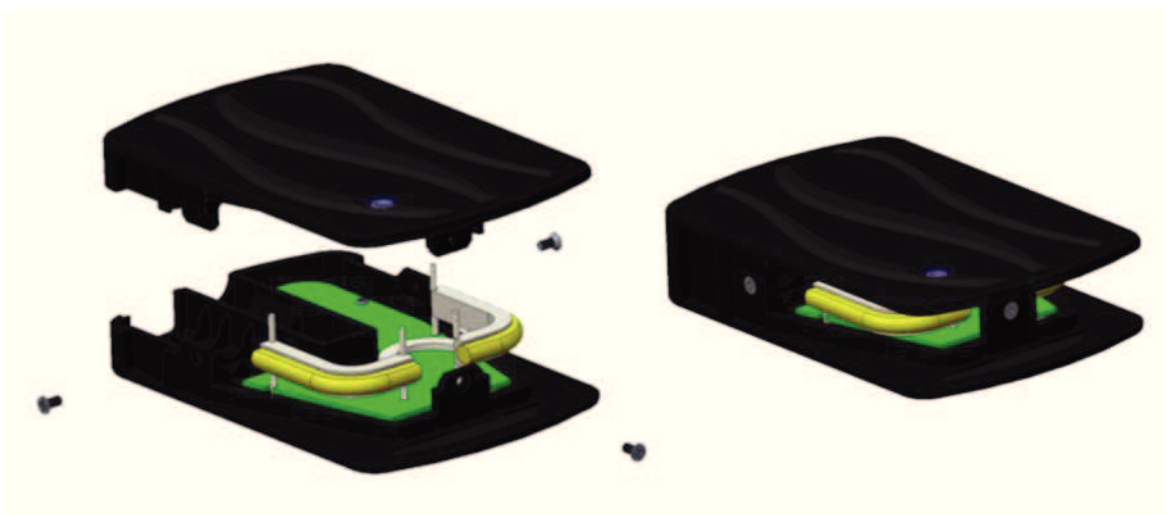


Figura 110 – Aparafusamento das duas metades do pedal.

Finalmente seriam fixos os elementos refletores e a moldura (resultante de injeção

multicomponente conjunta com o ecrã protetor), através de encaixe. O eixo (já com a fita isoladora), as baterias e a tampa das mesmas seriam os últimos componentes a serem colocados no processo de montagem (ver Figura 111).

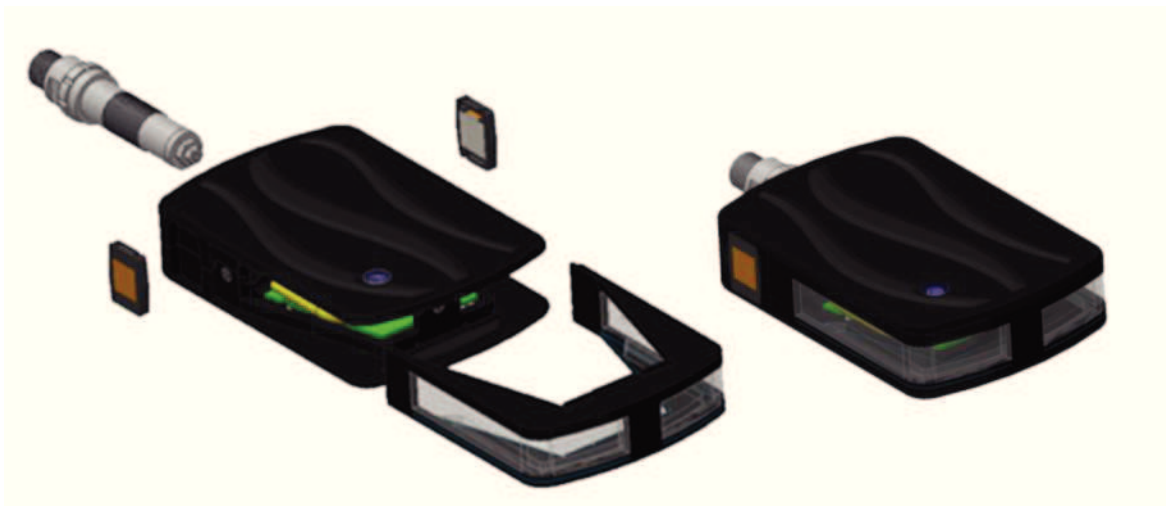


Figura 111 – Processo de inserção do eixo, dos refletores e da moldura inclusiva do ecrã protetor.

Este processo de montagem e fixação dos corpos revelou-se eficiente necessitando apenas de alguns ajustes relativos a tolerâncias de encaixe e alinhamento de componentes.

### 3.3 Análise

A análise estrutural trata-se de um processo de análise de elementos finitos, versátil, rápido e numericamente eficiente, cada vez mais utilizado num âmbito variado de análises e estudos. O intuito principal desta ferramenta é permitir o desvio dos ciclos contínuos relativos às fases de *design*-prototipagem-teste transformando esta linha processual para que o protótipo funcione apenas como ferramenta de validação final pré-produção (ver Figura 112) [50].

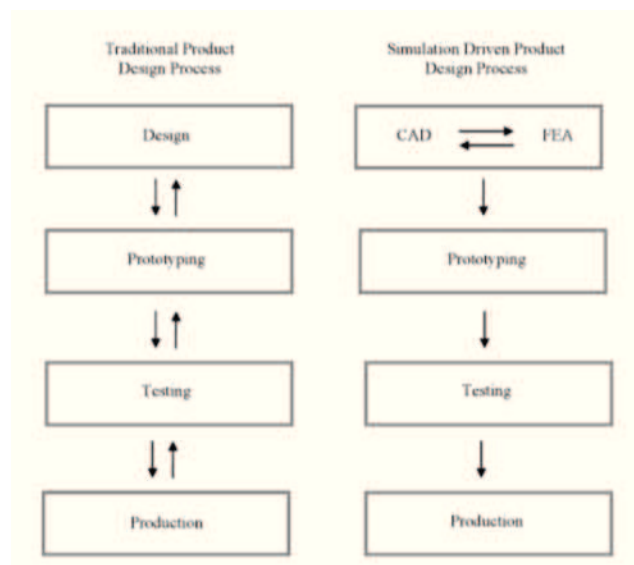


Figura 112 – Esquema representativo de um processo de desenvolvimento sem análise versus com análise.

Porém no projeto abordado, a análise estrutural não foi executada só como avaliação de um modelo final, mas também como validação evolutiva constante de modelos e características incluídas nos mesmos, criando uma correlação e acompanhamento dos restantes processos de pensamento evolutivo aplicados, permitindo a obtenção de etapas de resolução e solvência de problemas e criando uma estrutura processual adaptável a outras ferramentas de Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto (ECDP) que pudessem ser aplicadas futuramente na abordagem do projeto. A interligação com a totalidade do processo permitiu também perceber a utilidade desta ferramenta para processos futuros de ECDP internos à empresa. À utilização paralela de ferramentas de ECDP, sucedeu-se uma avaliação da sua performance e desempenho, permitindo não só perceber (através

da versatilidade das ferramentas), uma capacidade de inovação e adaptação das mesmas como também uma possibilidade de otimização da sua performance tornando-as exímias em certos cenários de experimentação e análise.

Denota-se cada vez mais uma extensão do território da representação tridimensional e da fundamentação científica à fase de prototipagem final eliminando cada vez mais o uso intermediário dessa ferramenta como elemento de decisão de projeto, verificando-se um crescimento da sua utilização sobre a forma de metodologias de previsão e condicionamento de resultados num âmbito pré-execução [50].

O primeiro passo numa análise de elementos finitos é a definição de um modelo (não obrigatoriamente final) sobre a forma de uma parte ou conjunto tridimensional

O segundo passo passa pela consideração de materiais, restrições físicas, e cargas a serem aplicadas ao estudo tridimensional. A pré análise profunda desta fase é essencial, de modo a que se possa definir corretamente um cenário que habilitará a obtenção dos resultados requeridos.

O próximo passo incide na conversão do formato da parte ou conjunto para uma malha, ou noutras palavras, a sua separação em entidades de formato dimensional reduzido e simples, os elementos finitos. Após se ter considerado a pré análise e definido corretamente o estudo, será possível executar a sua resolução obtendo resultados para confirmação /otimização.

Durante a construção de um modelo tridimensional matematicamente definido (um sólido definido por uma geometria mensurável) é importante ter em consideração que a geometria desse corpo terá de possibilitar a criação de uma malha correspondente à criação adequada de elementos finitos, de modo a proporcionar dados de interesse (tensão, deformação, comportamentos térmicos, comportamentos dinâmicos, etc.) com uma exatidão aceitável. A obtenção desses dados pode implicar na necessidade de simplificação geométrica da peça, (remoção de aspetos geométricos insignificantes para a análise, como por exemplo arredondamentos estéticos, chanfros, logótipos, etc.) idealização da peça, (representação de

barras através de linhas ou de paredes finas através de superfícies) ou aplicação de um processo de limpeza à peça (utilização de ferramentas internas aos programas de desenho assistido por computador de modo a verificar e resolver problemas como intersecções, paredes corrompidas, multiplicação de entidades, etc.) [50].

Estes processos podem ser considerados também como prevenção de criação de malhas excessivamente complexas, que aumentarão a duração de análise, tornando-a em alguns casos incongruente face à relevância dos resultados (ver Figura 113).

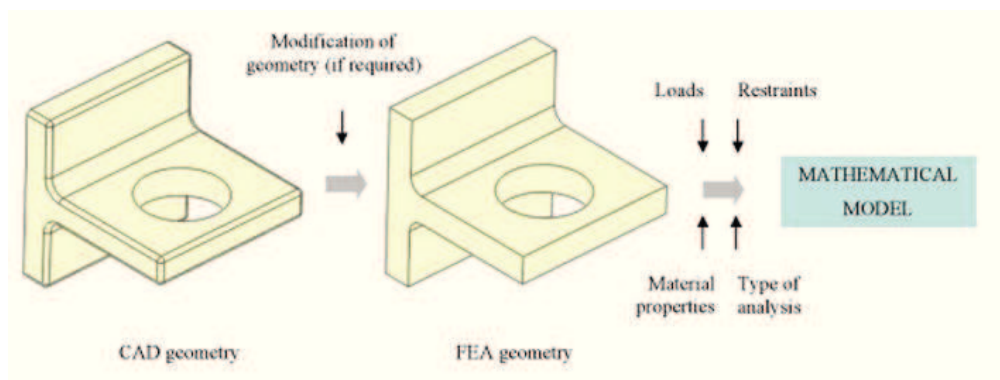


Figura 113 – Representação do processo de simplificação do modelo e de aplicação de cargas até obtenção do modelo matemático.

Após a simplificação do modelo inicia-se o processo de discretização. As cargas e restrições aplicadas à geometria são todas discretizadas e aplicadas aos nós da malha de elementos finitos [50].

Depois da resolução do estudo, dá-se uma das fases mais complexas de todo o processo, que reside na análise dos resultados obtidos, requerendo uma percepção conjunta de todo o processo de simplificação e erros consequentes (ver Figura 114).

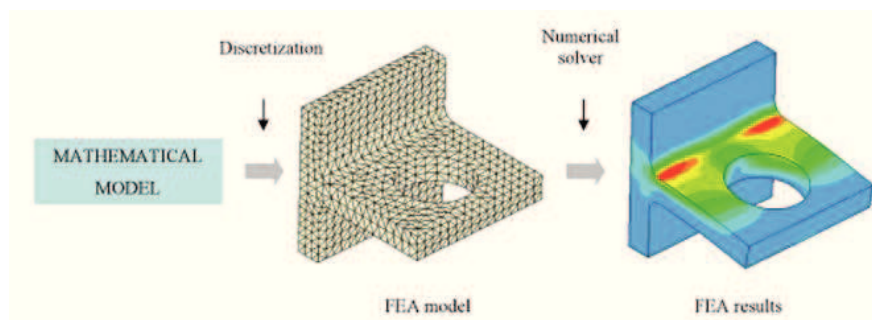


Figura 114 – Representação do processo de criação de malha e solvência dos parâmetros inseridos no modelo matemático.

Os resultados de uma análise desta tipologia são demonstrados sobre a forma de deslocamentos, tensões, etc., e a aprovação desses mesmos resultados deverá passar por um conjunto de critérios estabelecidos de limites aceitáveis e máximos, consoante as propriedades do material ou a aplicação em si.

As limitações deste tipo de análises estão maioritariamente focadas na interpretação das propriedades e dados inseridos aquando de um determinado estudo tridimensional (por exemplo; a interpretação linear do material, que interpreta a curva tensão deformação como linear, criando uma margem de erro face à análise das zonas de falha material em comparação com um estudo real. A interpretação de cargas e restrições estáticas como elementos imutáveis implica que as cargas tenham uma aplicação suficientemente lenta para ignorar o comportamento dinâmico – variação com o tempo – do material). Apesar de existirem algumas falhas comparando com análises reais, são sem dúvida análises mais rápidas, mais interativas, muito mais económicas (pois não necessitam de modelos ou amostras reais) e que permitem uma análise e desenvolvimento que na maioria das aplicações mecânicas pode ultrapassar erros, através da utilização de fatores de segurança superiores [50].

### 3.3.2 Fator de Segurança

O fator de segurança é um termo que descreve a capacidade estrutural de um corpo para além de uma qualquer capacidade definida; sendo:

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Tensão Máxima Suportada}}{\text{Carga de Design}}$$

$$\text{Margem de Segurança} = \text{Fator de Segurança} - 1$$

Existem duas formas de obter a definição de um fator de segurança. Uma através do rácio entre uma carga máxima alvo e uma carga média alvo (carga a suportar pelo corpo numa utilização normal). A outra em relação a um valor constante imposto por uma lei, standardização, especificação ou costume que deve ser encontrado ou excedido.

Relativamente ao fator de segurança aplicado ao corpo principal do pedal, inicialmente, (devido à indefinição dos restantes componentes e à inconclusão da pesquisa relativamente às forças envolvidas na atividade), colocou-se o corpo numa situação de esmagamento, considerando-se uma carga máxima exercida sobre a superfície superior do pedal e restringindo-se toda a superfície inferior através do apoio da mesma. A carga média considerada foi hipoteticamente advinda de uma massa de 100 Kg, considerando-se o triplo dessa carga como valor máximo, traduzindo-se numa força de aproximadamente 2941 N distribuída na área superficial do topo do pedal (ver Figura 115).

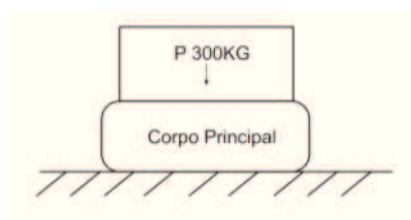


Figura 115 – Esquema básico considerado para a análise do corpo principal.

A ocorrência de outros esforços e comportamentos materiais (numa situação real) fora do limite do cenário inicialmente considerado foi inevitável nesta fase. Porém, a superioridade do fator de segurança face à carga média considerada foi tido em conta como vantagem e elemento de prevenção face às cargas justificadas e comportamentos dinâmicos a ser considerados futuramente, tentando-se cobrir inicialmente cargas superiores às possivelmente consideradas em estudos posteriores de modo a evitar regressões significativas (ver Figura 116) [51].

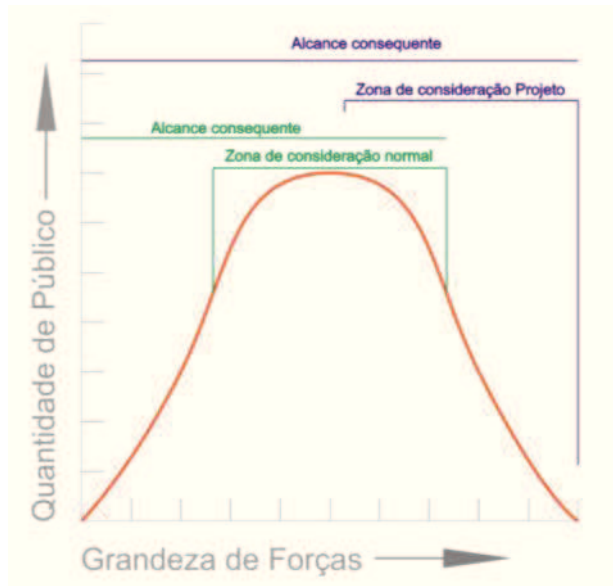


Figura 116 – Alcance das cargas de *design* medianas e da carga de *design* considerada no projeto.

A deslocação máxima permitida em termos de deformações inseridas no limite elástico do corpo foi inicialmente estabelecida como sendo 0.15 mm face a cargas máximas, de modo a proporcionar segurança e estabilidade estrutural suficiente para manter o sistema eletrónico interno seguro e as zonas de fixação por encaixe sem deslocações excessivas. À semelhança da carga máxima considerada; o valor de deslocação máximo foi estabelecido visionando a tentativa de cobertura a cenários futuros.

Durante a selecção material e início da análise estrutural da segunda tipologia de eixo, deu-se a reformulação do cenário de análise relativamente às zonas de restrição e de aplicação de cargas de modo a corresponder melhor a um cenário de utilização real (ver Figura 117).

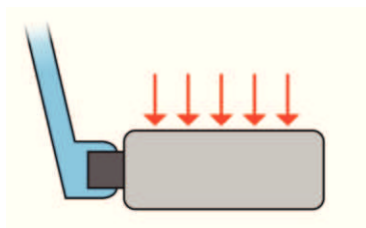


Figura 117 – Esquemática da reformulação do cenário de análise.

Neste caso as restrições foram aplicadas às zonas do eixo destinadas a enroscar na pedaleira e a carga continuou aplicada a uma das superfícies de topo do pedal. A pesquisa executada durante a procura material relativa ao eixo, permitiu a obtenção de dados relevantes considerando as cargas envolvidas na atividade, contribuindo para a reformulação desses valores, otimizando conseqüentemente o fator de segurança e o produto de modo a corresponderem a um cenário mais próximo da realidade. Verificou-se adicionalmente que os valores utilizados em análises anteriores comportaram-se como perspetivado e tiveram um impacto positivo na otimização desta fase, permitindo reduções e reconsiderações materiais através da alteração para cargas menores. O fator de segurança foi reformulado para 1500 N de carga máxima considerando uma carga média alvo de 500 N. O alvo de deslocamentos foi adaptado para um âmbito de alcance inferior a 1 mm, graças às folgas atribuídas e aos elementos de dissipação (anilhas borracha) considerados para a fixação da placa de circuito eletrónico.

### 3.3.3 Análise Estrutural do Pedal Inteligente

Anteriormente à análise dos modelos finais foram aplicados processos de análise a modelos anteriores de modo a verificar e solucionar situações específicas. Uma dessas análises permitiu perceber através de uma geometria reforçada, quais as zonas do pedal que necessitariam de um maior atenção face à consideração de uma carga e das restrições aplicadas considerando um eixo e as fixações entre as metades dos pedais.

Estes modelos passaram pelos processos de pré análise de modo a criar uma malha otimizada (ver Figura 118).



Figura 118 – Filtragem pré análise aplicada a modelos precoces do corpo principal do pedal.

Apesar de não contribuírem diretamente para resultados finais, contribuíram para a noção de uma menor necessidade de reforço estrutural (considerando uma poliamida reforçada), um maior cuidado relativo à zona de fixação e a consciência da existência de uma maior deslocação nas bordas do pedal face à maioria das cargas testadas (ver Figura 119).

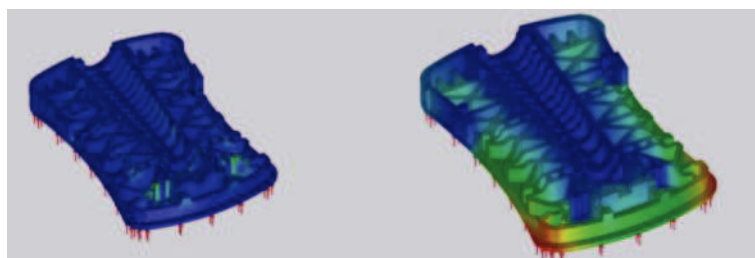


Figura 119 – Representação dos esforços em modelos precoces do corpo principal do pedal.

Em análises e modelos futuros a deformação dos cantos foi suportada pela componente de moldura e ecrã, porém foi através destas análises aliadas a outros fatores que se criou a necessidade de existência desse elemento. Outras análises ao longo do desenvolvimento permitiram verificar a eficiência dos encaixes modelados e confirmar o seu funcionamento contribuindo para situações chave, como o abandono ou inserção dos mesmos em zonas específicas.

A maioria das análises precoces contribuíram maioritariamente, para a perceção do comportamento e da resistência mecânica oferecida pelo material aquando das soluções geométricas experimentadas, auxiliando o processo evolutivo e de tomada de decisões, sendo que nem todas elas seguiram os mesmos parâmetros ou foram executadas simultaneamente em ambos os programas.

Aquando da aplicação da análise de elementos finitos ao sétimo modelo do pedal inteligente foram aplicados dois programas de análise, o Ansys Workbench 9.1 e o SolidWorks Educational Edition 2013, nas suas plataformas de simulação respetivas, permitindo a comparação de resultados de modo a obter uma análise posterior e otimização mais precisa.

As análises aplicadas foram estáticas e o facto de nesta fase a pesquisa e redefinição do fator de segurança não terem sido ainda concluídas, obrigou à utilização da carga de 2941 N como referência máxima, distribuída pela área superficial e perpendicular à mesma. Para fins de comparação e seleção de materiais considerou-se também uma carga de aproximadamente 980 N correspondente à carga média. O sétimo modelo de corpo principal, analisado em ambos os programas, não continha inicialmente qualquer tipo de reforço representativo e as análises foram resultantes de dois materiais, uma poliamida sem reforço de fibra e uma poliamida com 25% reforço de fibra de vidro.

Inicialmente foram aplicados ao modelo, os processos de preparação pré análise (simplificação, idealização e limpeza) garantindo uma geometria concisa capaz de executar uma malha fiável de modo a obter resultados de maior exatidão (ver Figura 120).

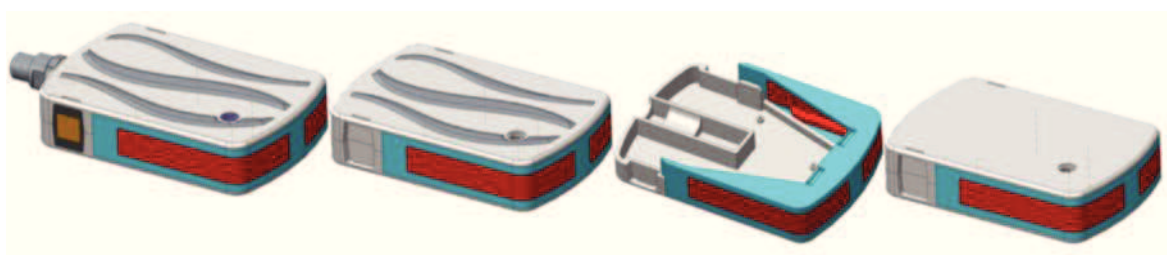


Figura 120 – Processos de simplificação, idealização e limpeza aplicados ao modelo tridimensional.

O tamanho da malha deve sempre ser adaptado ao tamanho da peça, de modo a criar uma análise eficaz e relativamente rápida que ao mesmo tempo não perca qualidade. Neste caso para a criação da malha em SolidWorks Educational Edition 2013 e em Ansys Workbench 9.1, foram aplicadas definições de 1 mm de tamanho global e de 0.05 mm de tolerância (ver Figura 121 e Figura 122).

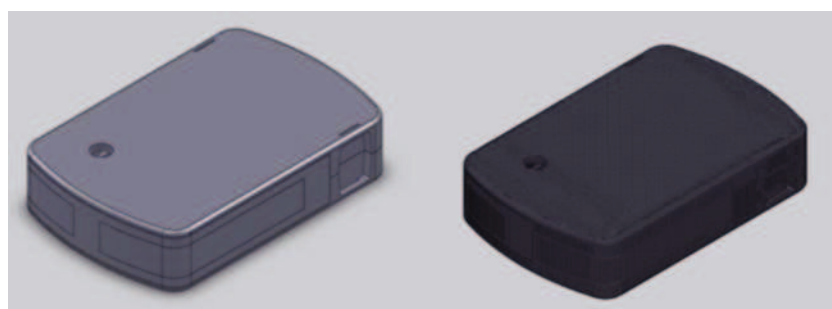


Figura 121 – Processo de criação de malha em SolidWorks Educational Edition 2013.

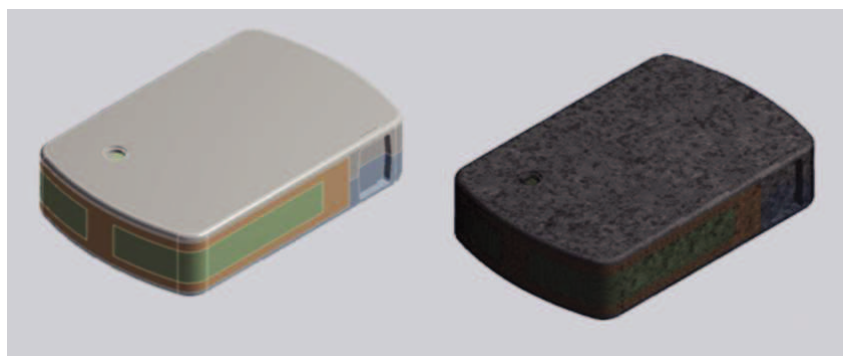


Figura 122 - Processo de criação de malha em Ansys Workbench 9.1.

Na análise do sétimo modelo, apesar da carga ainda não ter sido reformulada através da pesquisa, foram já aplicadas as restrições à peça relativas às zonas de contacto e enroscamento do eixo e dos parafusos em ambos os programas (ver Figura 123 e Figura 124) [39].

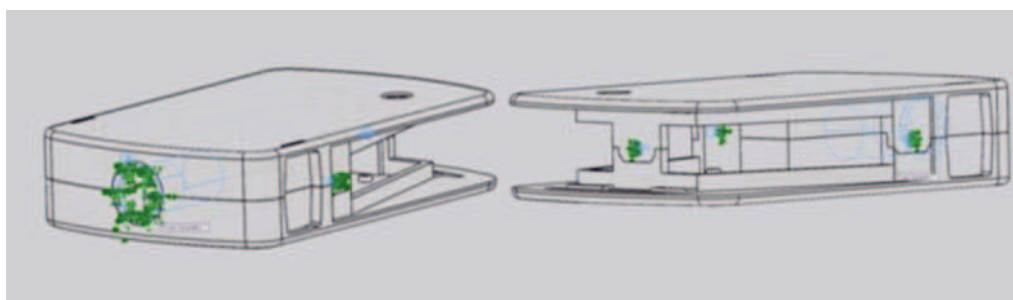


Figura 123 - Restrições aplicadas aos corpos em SolidWorks Educational Edition 2013.



Figura 124 - Restrições aplicadas aos corpos em Ansys Workbench 9.1.

Estas restrições já permitiram considerar na análise o corpo fixo através do eixo enroscado

à pedaleira e montado através do aparafusamento, atribuindo uma maior semelhança a um cenário real. Após isso foram executados oito cenários de análises em cada um dos programas de forma obter resultados relativos às tensões máximas segundo o critério de von Mises e às deslocações resultantes de deformação do corpo. Os cenários foram compostos pelas análises de comportamento mecânico do corpo face à consideração de uma poliamida sem reforço e de uma poliamida com reforço, suportando uma carga de 2941 N e 980 N em cada um dos casos (ver Figura 125 e Figura 126).

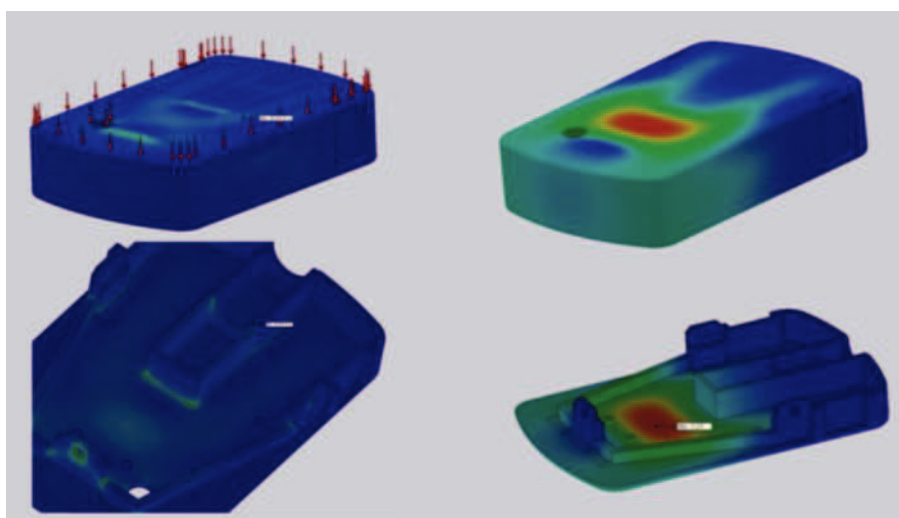


Figura 125 – Representação das zonas de concentração de tensões (esquerda acima e abaixo) e das zonas de deslocação (direita acima e abaixo) obtidas em SolidWorks Educational Edition 2013.

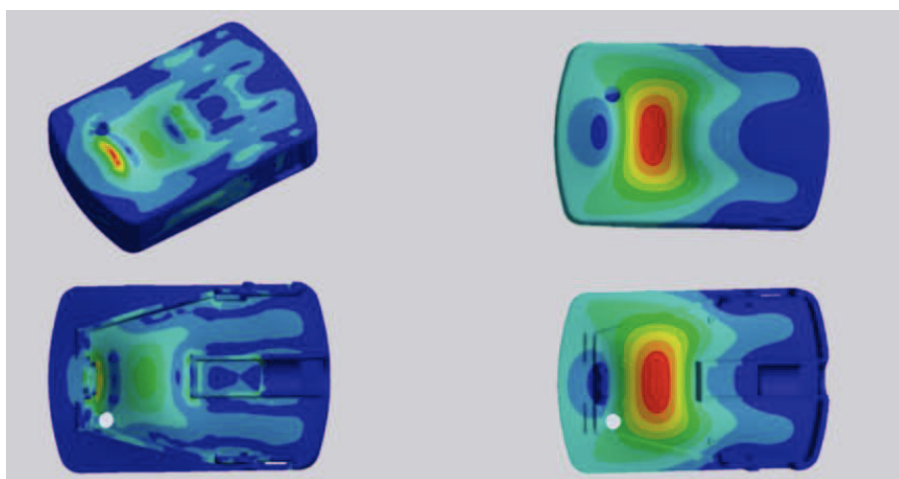


Figura 126 - Representação das zonas de concentração de tensões (esquerda acima e abaixo) e das zonas de deslocação (direita acima e abaixo) obtidas em Ansys Workbench 9.1.

Os resultados permitiram recolher dados relativamente às zonas mais frágeis do pedal e

considerou-se que apesar do material reforçado com fibra revelar segurança considerando uma carga de 100 Kg, o facto de o mesmo não acontecer considerando o fator de segurança relativo à carga máxima de 300 Kg, revelou a necessidade de reforço do corpo na zona de deformação máxima. Para além disso o uso de uma poliamida sem qualquer tipo de fibra, ficou aquém do desempenho do material reforçado, inclinando a seleção para um material reforçado com menos percentagem de fibra.

Após a análise deu-se o retorno ao programa PTC Creo 2.0 de modo a reformular a estrutura da peça e reforçar a mesma. A construção dos reforços foi baseada na zona de esforço principal e na geometria das treliças de modo a criar um modelo simplificado de reforços que pudesse ser analisado com facilidade e modificado caso necessário (ver Figura 127).

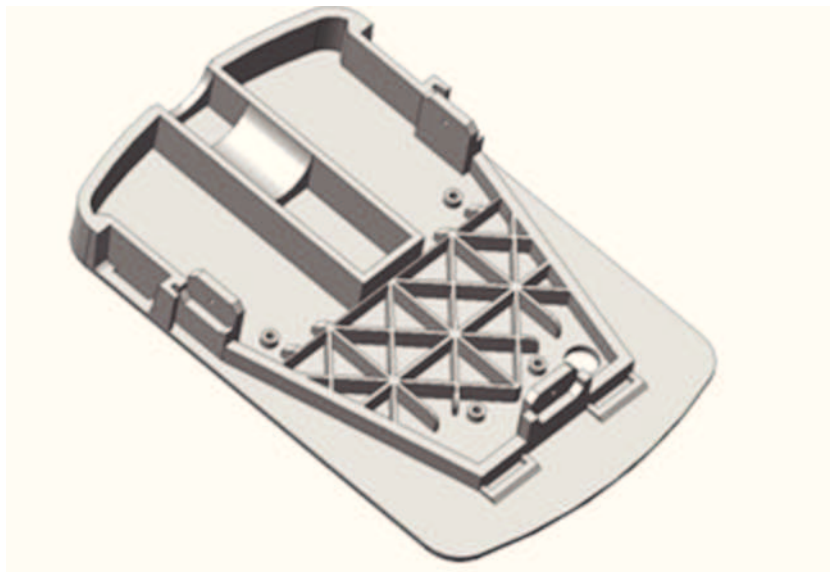


Figura 127 – Representação tridimensional dos reforços efetuados em PTC Creo 2.0.

Em termos volumétricos, calculou-se um aumento de 5% de material referente à construção dos reforços. Essencialmente as geometrias seccionais dos reforços foram semelhantes a *ribs*, considerando-se para as mesmas espessuras menores que a da parede de modo a evitar defeitos superficiais causados pela contração volumétrica.

Durante a criação destes elementos considerou-se a sua espessura resultante do produto da espessura nominal da parede por 0.5 a 0.7. Porém esta redução não deve ser abrupta mas

sim gradual de forma a reduzir o risco de concentração de tensões e surgimento de defeitos. Apesar de neste caso as propriedades do material terem também influenciado a construção dos reforços através da análise prévia; é aconselhável que a altura do reforço seja de 2.5 a 3 vezes superior à espessura da parede, conjuntamente com um raio na base resultante do produto da espessura da parede por 0.25 a 0.4 para evitar concentrações de tensões. É também aconselhável que a distância entre reforços seja no mínimo 2 a 3 vezes a espessura da parede e que todos os reforços tenham um afunilamento longitudinal dos 0.5 aos 1.5 graus de modo a facilitar a extração (ver Figura 128).

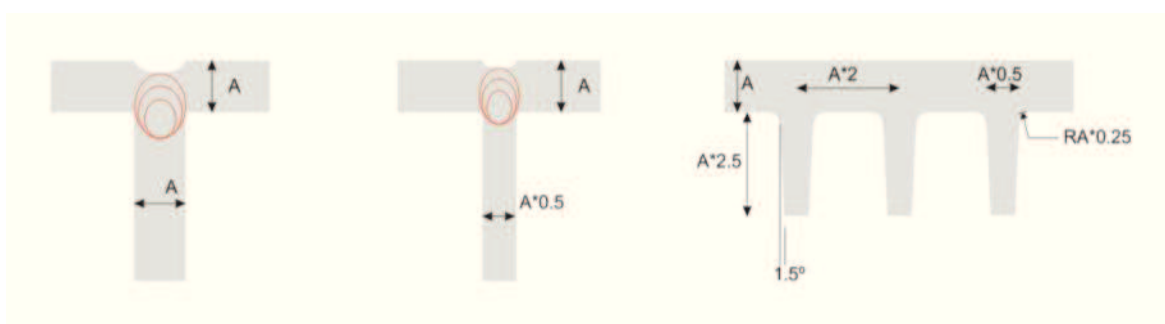


Figura 128 – Representação esquemática dos procedimentos tidos em conta durante a elaboração dos reforços.

O modelo passou pelos mesmos procedimentos anteriores de modo a simplificar a geometria e determinar o sucesso dos reforços considerados. Mais uma vez as análises foram executadas em SolidWorks Educational Edition 2013 e em Ansys Workbench 9.1, iniciando-se pela construção de malha com os mesmos parâmetros anteriores, não apresentando qualquer tipo de problemas durante o processo. À semelhança das análises anteriores, foram aplicadas às mesmas restrições e cargas ao longo do processo (ver Figura 129 e Figura 130)

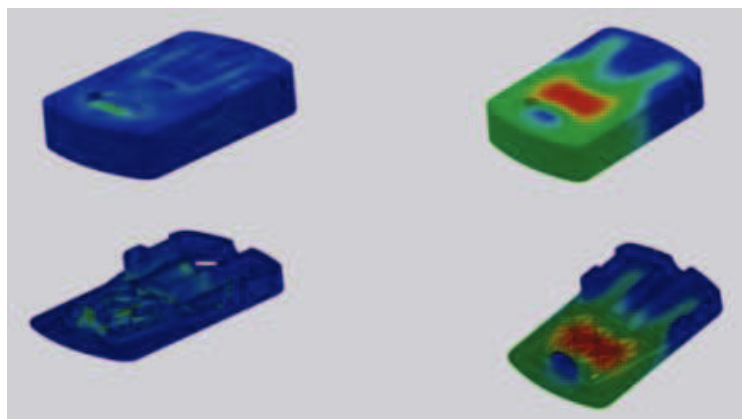


Figura 129 – Representação das zonas de concentração de tensões (esquerda acima e abaixo) e das zonas de deslocação (direita acima e abaixo) obtidas em SolidWorks Educational Edition 2013.

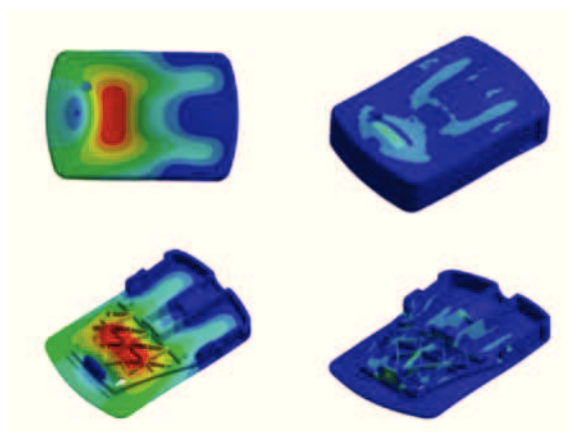


Figura 130 - Representação das zonas de deslocação (esquerda acima e abaixo) e das zonas de concentração de tensões (direita acima e abaixo) obtidas em Ansys Workbench 9.1.

Através das análises ao corpo reforçado verificou-se que tanto a poliamida com reforço como a poliamida sem reforço poderiam resultar considerando a carga média, porém seria indispensável o uso de uma poliamida reforçada para garantir a segurança do sistema face a uma carga máxima.

A coerência dos programas de análise e resultados obtidos pelos mesmos também foram registados revelando oscilações de 2% a 5% advindas dos seus processos de análise, qualidade de elementos de entrada e de malha (ver Figura 131 e Figura 132).

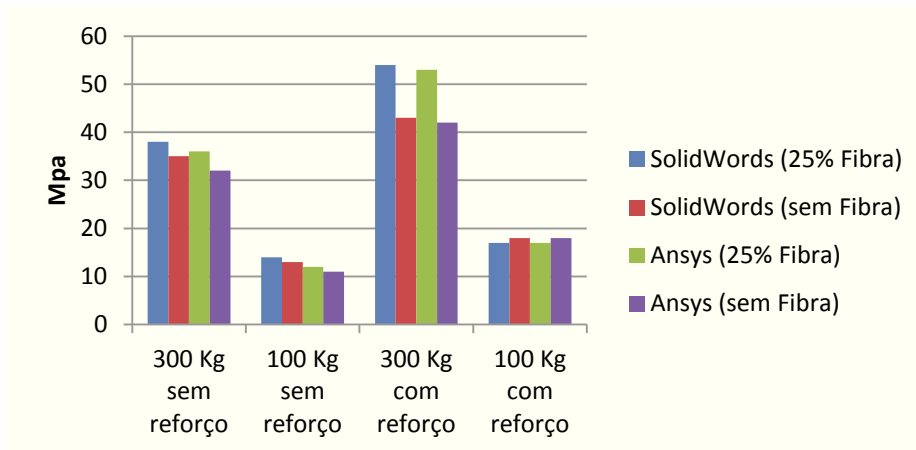


Figura 131 – Gráfico comparativo de concentração de tensões em MPa verificadas em ambos os programas utilizados.

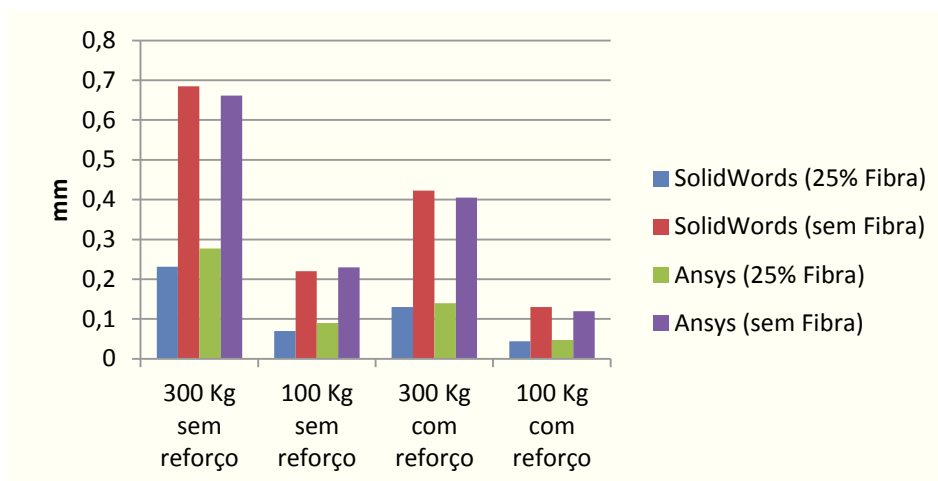


Figura 132 – Gráfico comparativo de deslocamentos em mm verificadas em ambos os programas utilizados.

Analisando os resultados em relação à eficiência dos reforços e à percentagem de material adicionado verificou-se uma média de 56% na redução das deslocamentos do material, estabelecendo uma taxa de redução de 11% por cada 1% de material acrescentado (ver Figura 133).

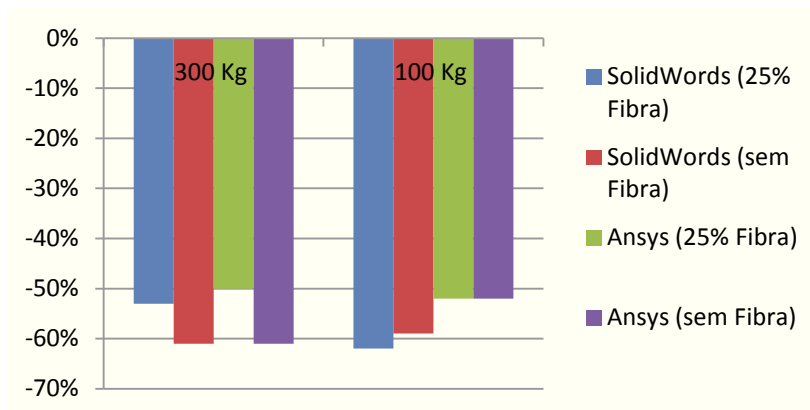


Figura 133 – Gráfico representativo da redução percentual das deslocações verificadas através dos reforços.

Este fator demonstra não só a eficiência dos reforços como também permite comparações com reformulações futuras. Apesar das concentrações de tensões terem o seu valor aumentado não se considerou um fator de importância visto que, as tensões observadas não transpõem o limite do material reforçado com fibra e foram consequentes do processo de simplificação da peça, sendo que aplicação de arredondamentos nas zonas de contacto perpendicular de superfícies diminui em grande parte as tensões concentradas (ver Figura 134) [52].

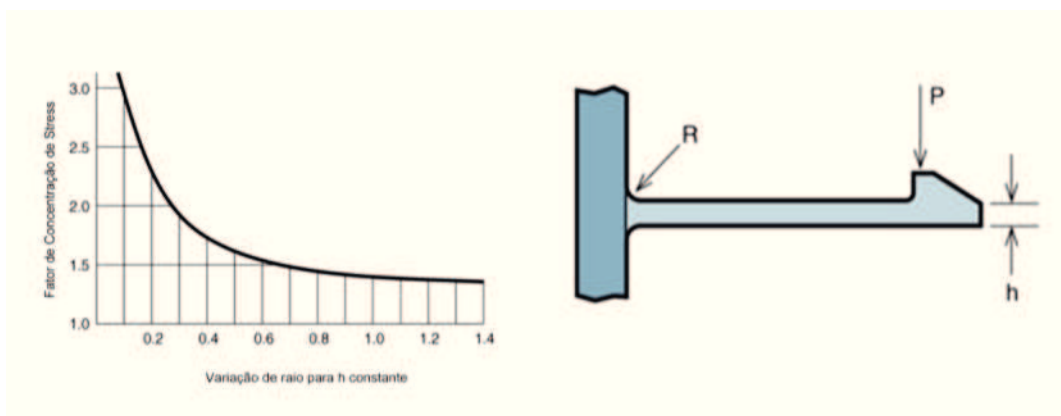


Figura 134 – Curva tendencial da redução do fator de concentração de tensões em função do arredondamento

Um problema identificado no final das análises foi a definição incongruente das fixações entre as partes do conjunto, a serem corrigidas em análises futuras ao corpo principal. Apesar disso o estudo permitiu perceber algumas das zonas de maior fragilidade no modelo do corpo principal, comparar incongruências entre dois programas de análise

considerando cenários semelhantes, estabelecer e validar um modelo de reforço ao corpo passível de ser utilizado em modelos futuros e comparar materiais analisando o seu desempenho em cada um dos cenários.

Após a reformulação dimensional executada durante o oitavo modelo do corpo principal e durante a passagem para o nono modelo de corpo principal, foram executadas análises estruturais de modo a efetuar a decisão relativa ao reforço do corpo. Durante a análise em Ansys Workbench 9.1, foi considerada a carga máxima reformulada de 1500 N. Como material estrutural foi considerado uma poliamida sem reforço devido à redução das cargas a suportar e à requisição por parte do cliente de acabamento polido. Numa primeira fase o modelo foi submetido aos processos de preparação pré análise (simplificação, idealização e limpeza) de modo a simplificar as geometrias para a fase de análise. Seguidamente foram definidas as restrições do modelo sendo que a única restrição aplicada neste caso foi relativa à zona de suporte oferecido pelo eixo, evitando estabelecer outras zonas de restrição, definindo apenas o contacto correto entre as superfícies. A carga de 1500 N foi aplicada à face de topo, as restrições foram aplicadas somente às zonas de contacto com o eixo e após isso foi criada uma malha com 1 mm de tamanho global e 0.05 mm de tolerância, sem qualquer tipo de obstrução ao processo (ver Figura 135).

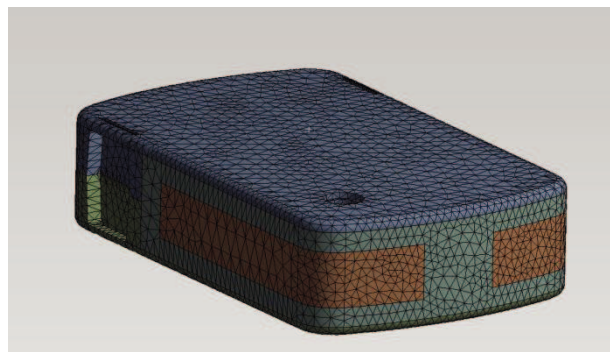


Figura 135 – Criação de malha no modelo reformulado.

Da análise ao corpo sem aplicação de reforços, verificou-se num critério de von Mises tensões máximas na ordem dos 53 MPa, abaixo do limite elástico de 83 MPa característico da poliamida em questão (PA66), indicando que a deformação existente não teria efetividade num regime plástico. Apesar disso verificaram-se deslocamentos na ordem dos 1,68 mm, o que apontou para a reformulação e reforço dos corpos de modo a colocar essas

mesmas deslocções abaixo de 1 mm (ver Figura 136).

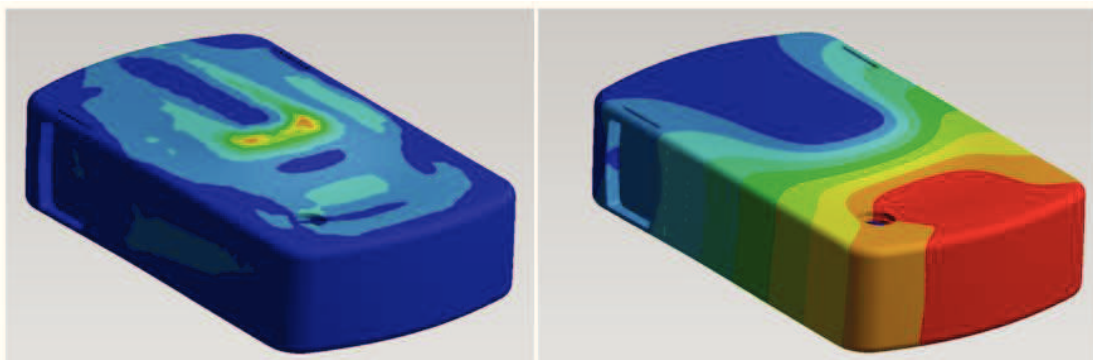


Figura 136 – Representação da concentração de tensões (esquerda) e das deslocções (direita).

Ao se verificar na análise anterior que os limites de tensões máximas não ultrapassavam o limite elástico do material, considerou-se na fase de reformulação e de aplicação de reforços ao corpo a simplificação geométrica dos mesmos, visto necessitarem de agir apenas no âmbito de restrição de deslocções. Foram aplicados os critérios estabelecidos até então para a construção de uma geometria de reforço tendo em conta que a exclusão de arredondamentos poderia resultar no aumento das tensões máximas verificadas.

No decorrer da análise das peças com reforço verificou-se no critério de von Mises tensões máximas na ordem dos 77 MPa, localizadas maioritariamente na geometria de reforço e facilmente dispersadas através da aplicação de arredondamentos (ver Figura 137).



Figura 137 - Representação da concentração de tensões exteriores (esquerda) e interiores (direita).

Face à carga máxima as deslocções foram reduzidas para 0,72 mm, colocando-as dentro

do âmbito definido para o projeto e validando deste modo o reforço efetuado à peça. Apesar de não ser esperada uma linearidade entre os modelos de reforços estabelecidos e os implementados neste corpo (devido à mudança de parâmetros geométricos como espessura de parede, largura do corpo, altura do corpo, disposição de geometrias de suporte, restrição correta do corpo, etc.) verificou-se que a simplificação da geometria de reforço teve um impacto negativo face aos rácios de reforço, sendo que neste caso por cada percentagem de matéria acrescentada ao corpo as deslocações foram diminuídas apenas 4,6% (ver Figura 138).

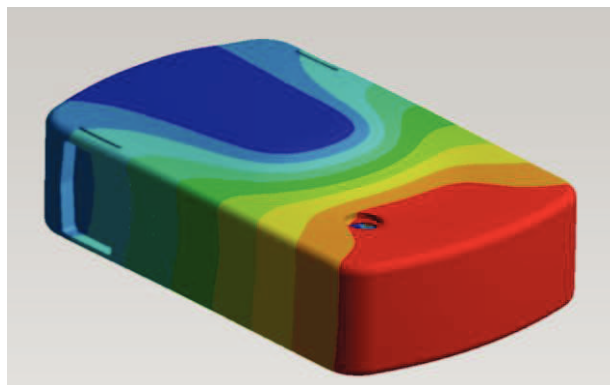


Figura 138 – Representação das deslocações.

### 3.3.4 Análise Estrutural do Eixo

Para a análise relativa ao eixo, foi apenas considerado o programa Ansys Workbench 9.1. Também nesta análise, foram aplicados os processos de limpeza e simplificação do modelo tridimensional e definidas as restrições (zona de enrocamento do eixo à pedaleira) e pontos de aplicação de carga (superfície do pedal), sendo que a criação da malha no programa Ansys Workbench 9.1 (tamanho global 1 mm e 0.005 mm de tolerância) não apresentou qualquer problemática (ver Figura 139).

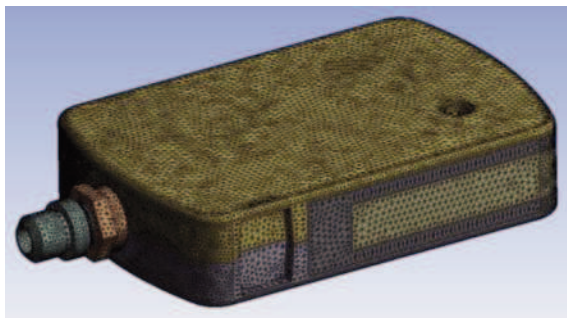


Figura 139 – Malha do corpo principal, moldura e eixo do pedal em Ansys Workbench 9.1.

Os primeiros testes consideraram alumínio 6061-T6 como material estrutural do eixo e uma poliamida com reforço como material estrutural do pedal, de modo a auxiliar a tomada de decisão em deterioramento de um material mais pesado mas com melhores capacidades mecânicas de suporte de carga (por exemplo o aço) e verificar o comportamento da geometria face a cargas.

Verificou-se a falha na análise de um primeiro modelo tridimensional utilizando o alumínio como material e uma carga de 900 N (ver Figura 140).



Figura 140 – Falha localizada verificada durante a análise do eixo.

Esta falha esteve associada a uma zona geométrica específica do eixo que induzia a concentração de esforços sendo mais tarde corrigida através de uma geometria mais suavizada. Apesar de se ter verificado a falha material, verificou-se simultaneamente que o corpo principal do pedal e a componente exterior do eixo não sofreram qualquer tipo de tensão relevante, sendo que a mesma se verificou maioritariamente nas zonas de secção reduzidas da parte interior do eixo, indicando a possibilidade de controlo e concentração dessa mesma deformação através da geometria deste componente (ver Figura 141) [53].

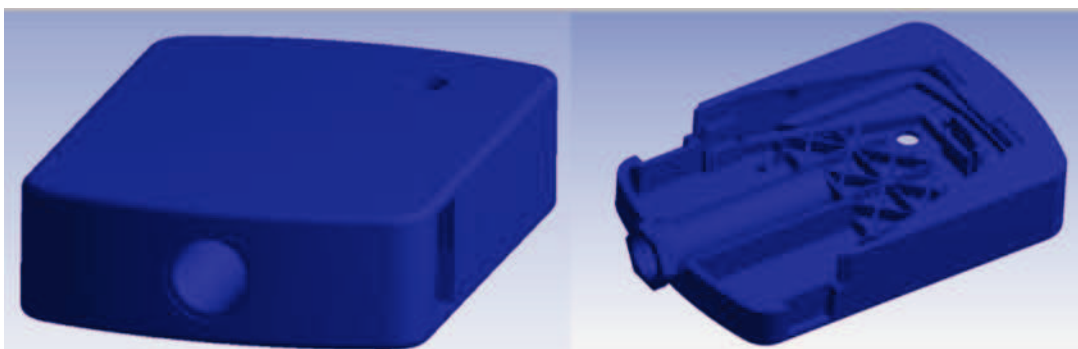


Figura 141 – Representação da não deformação por parte do corpo principal e da cobertura externa do eixo.

Após a reformulação da geometria, aplicaram-se novamente os mesmos parâmetros e correu-se a análise em Ansys Workbench 9.1 (ver Figura 142).



Figura 142 – Confirmação da reformulação da geometria e verificação de falha específica.

Desta, confirmou-se o funcionamento adequado do componente face a uma carga de 900 N, à exceção de uma falha localizada, causada pela interpretação perpendicular da malha da zona de contacto dos rolamentos com o eixo. Como forma de cobertura a esta questão, efetuou-se uma análise apenas ao eixo interno (ignorando as outras componentes de suporte), sobre as mesmas condições de esforço efetivas nas respetivas faces de contacto validando a sua performance (ver Figura 143).

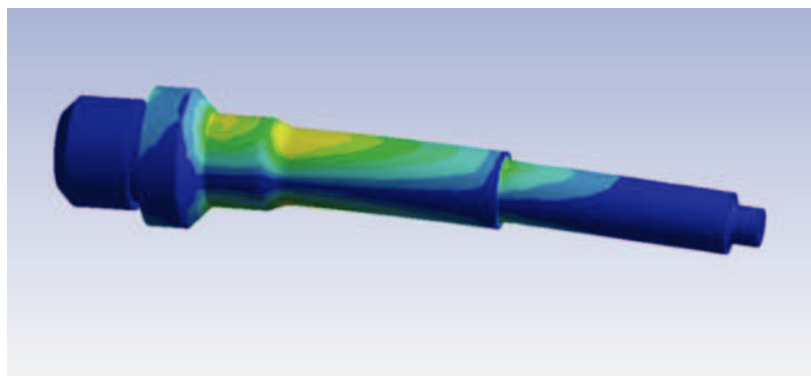


Figura 143 – Confirmação do suporte da parte interna do eixo.

Após a verificação e correção do modelo tridimensional, verificou-se através do critério de von Mises tensões máximas na ordem dos 270 Mpa, que apesar de estarem próximos do limite de elástico do material, mantêm qualquer deformação existente no mesmo no regime elástico. Em termos de deformação observou-se uma deslocação de aproximadamente 2 mm em relação à totalidade do corpo do pedal, sendo que o eixo em si, na sua extremidade exterior, apresentou um máximo de deslocação de 0,7 mm em regime elástico (ver Figura 144).

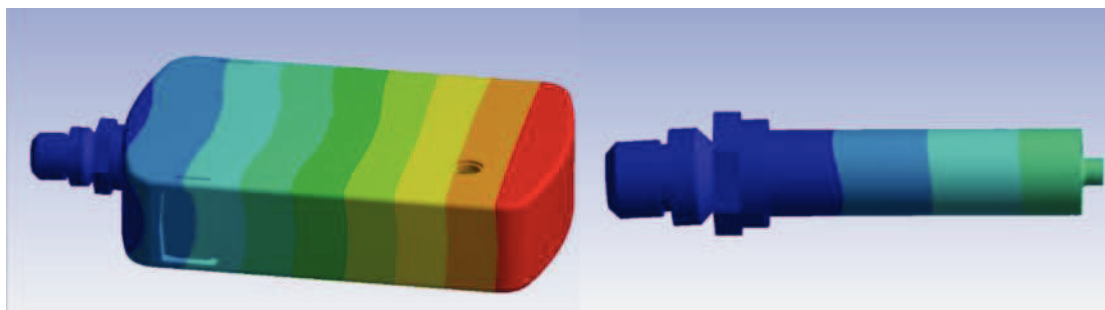


Figura 144 – Graus de representação demonstrados em escala de cores.

Apesar destas análises terem possibilitado a otimização da geometria do eixo face a uma carga, verificou-se mais tarde que o alumínio como material estrutural não seria capaz de satisfazer o grau de exigência de suporte de cargas definido durante a pesquisa e desenvolvimento do pedal. Como tal, através de pesquisa e análise seleccionou-se o aço inoxidável de designação comercial QT800 como material estrutural.

No decorrer da reformulação da análise, aumentaram-se as cargas testadas para 1500 N e

alterou-se o material estrutural do pedal para uma poliamida sem reforço, de modo a entrar em concordância com as análises efetuadas ao corpo principal do pedal. Os parâmetros relativos às restrições do eixo e à zona de aplicação de carga mantiveram-se os mesmos, visto que a geometria não se alterou. Apesar do comportamento do corpo principal do pedal ter sido essencialmente o mesmo que o verificado durante a sua análise específica, o comportamento do eixo teve melhorias consideráveis. As deslocamentos máximos verificados no eixo foram reduzidas de 0.7 mm para 0.25 mm mesmo face ao aumento de cargas, resultando numa deslocação do conjunto (corpo do pedal e eixo) de 1,02 mm máximos, metade do resultado obtido anteriormente com a consideração de alumínio 6061-T6 como material estrutural. As tensões máximas observadas segundo o critério de von Mises foram de aproximadamente 520 Mpa, oferecendo uma margem considerável relativamente ao limite elástico do material de 760 Mpa. Para além disso verificou-se que a localização das tensões máximas se encontrava nas zonas projetadas e otimizadas para tal (ver Figura 145).

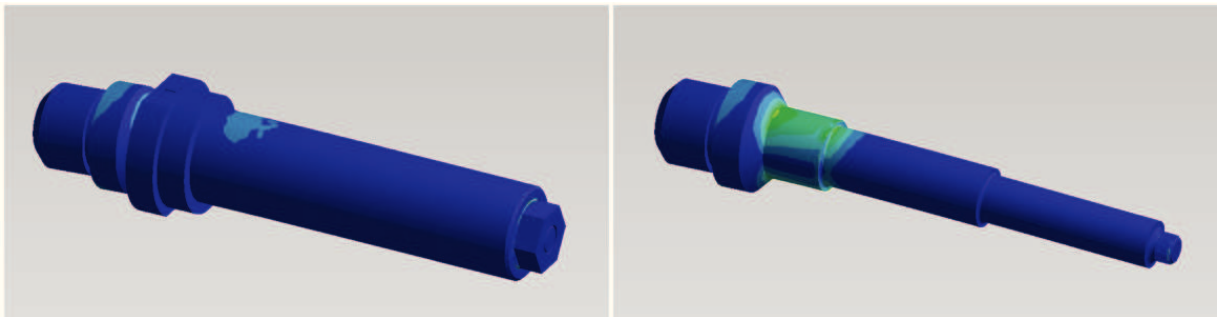


Figura 145 – Concentração de tensões na peça externa (esquerda) e interna (direita) do eixo.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 4 - Prototipagem

---

### 4.1 Processos de Prototipagem Aplicados ao Pedal

O modelo final obtido foi uma primeira versão do protótipo, em que se pretendeu retirar conclusões para a finalização de projeto, quer em termos de projeto de moldes, ou de acabamento estético final e sistema interno.

A construção tridimensional funcionou também como confirmação das soluções técnicas estabelecidas até então em relação à composição de elementos e montagem dos mesmos (ver Figura 146).



Figura 146 – Impressão e montagem do modelo executado através de impressão tridimensional

O protótipo do corpo foi obtido através de uma tecnologia de impressão tridimensional

utilizando a fabricação aditiva, que conjuga a deposição de um pó cerâmico com um elemento ligante, resultando num corpo que após impressão é reforçado com cianoacrilato (ver Figura 147 e Figura 148).

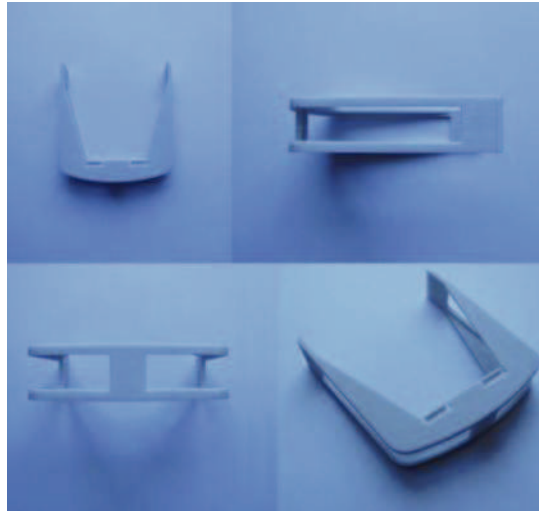


Figura 147 – Componente de moldura elaborado através de impressão tridimensional



Figura 148 – Corpo principal elaborado através de impressão tridimensional

O material não é o mais indicado para comprovar o comportamento mecânico do corpo, devido a sua fragilidade tipicamente cerâmica, porém permite avaliar espessuras, comportamento de corpos, distanciamento, espaço geométrico e acabamento visual com alguma precisão (ver Figura 149).

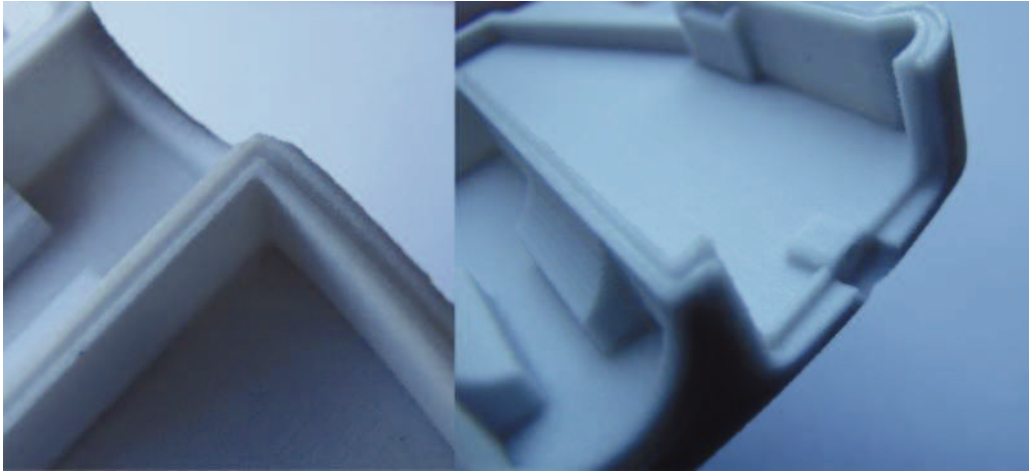


Figura 149 – Vista pormenorizada dos detalhes impressos tridimensionalmente

Uma problemática ligada a esta tecnologia de prototipagem é o seu acabamento resultante da impressão por camadas, que coloca condicionantes na sua interface com outros componentes e requer um trabalho de acabamento pós reforço (ver Figura 150).

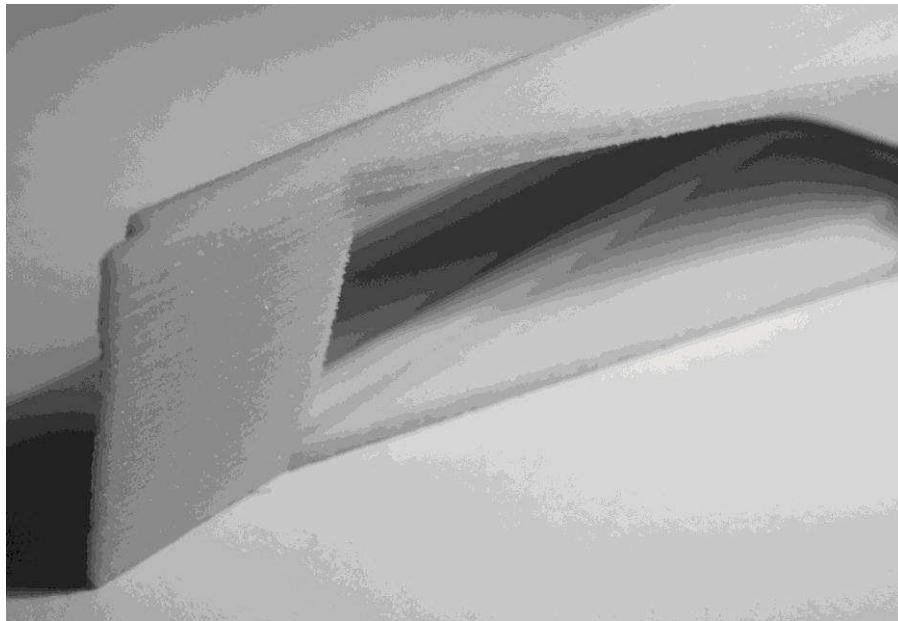


Figura 150 – Visualização das camadas resultantes da impressão tridimensional

Apesar disso, o custo desta tecnologia direcionado para uma primeira análise na qual se pretende sobretudo avaliar o modelo a nível geométrico, de modo a progredir para uma segunda fase de construção e prototipagem de validação pré produção, é o mais adequado quando comparado com uma tecnologia de prototipagem de maior precisão como a SLS,

mas com aproximadamente 60% mais de custos finais (ver Tabela 6).

Tabela 6 – Avaliação dos custos de tecnologias de prototipagem

Tecnologia	Custo Aprox. Material	Custo Aprox. Final
Imp.3D	0.55 euros/cm <sup>3</sup>	65 euros
SLS	1.50 euros/cm <sup>3</sup>	175 euros

Nesta primeira fase, em relação à prototipagem do sistema interno, sendo que o desenvolvimento do circuito ainda não havia sido concluído, a prototipagem do sistema interno passou pela execução através do uso de uma placa em polímero onde foram fixos os componentes específicos e conectado o elemento de comando exterior de modo a testar o comportamento geral e emissão luminosa.

Numa segunda fase, após formulação do nono modelo de corpo principal, utilizou-se para prototipagem da geometria o processo de SLS. À semelhança do processo de impressão tridimensional aditiva, este processo resulta de uma consolidação do material camada a camada, tendo um resultado final de superfície com algumas irregularidades. A grande disparidade entre os dois processos é o material utilizado, sendo que no caso da Sinterização Seletiva a Laser, as propriedades intrínsecas da poliamida permitiram obter protótipos funcionais de excelente resistência mecânica e flexibilidade.

O eixo do pedal passou numa primeira fase por um processo de torneamento CNC, resultando de um bloco de latão as geometrias projetadas. Não foram maquinadas as geometrias de aperto relativas ao mesmo (ver Figura 151).



Figura 151 – Protótipo do eixo considerado obtido através de torneamento CNC

Após esta primeira fase de prototipagem e validação da geometria do eixo, foram reconsideradas as dimensões geométricas do passo da zona de enroscamento, das folgas e arredondamentos e foram executados quatro protótipos em aço inoxidável QT800 para serem utilizados em conjunto com os corpos principais obtidos a partir de SLS, numa fase final de avaliação do pedal inteligente.

## 4.2 Análise e Conclusões Relativas aos Protótipos

Após analisar o protótipo relativo à impressão tridimensional aditiva do corpo principal, verificou-se a necessidade de existência de uma maior zona para o encaixe do isolamento, considerando mesmo a possibilidade de criação de um plano intermédio às duas metades do pedal ao invés de um perfil de encaixe num entalhe, como forma de garantir uma selagem adequada (ver Figura 152).

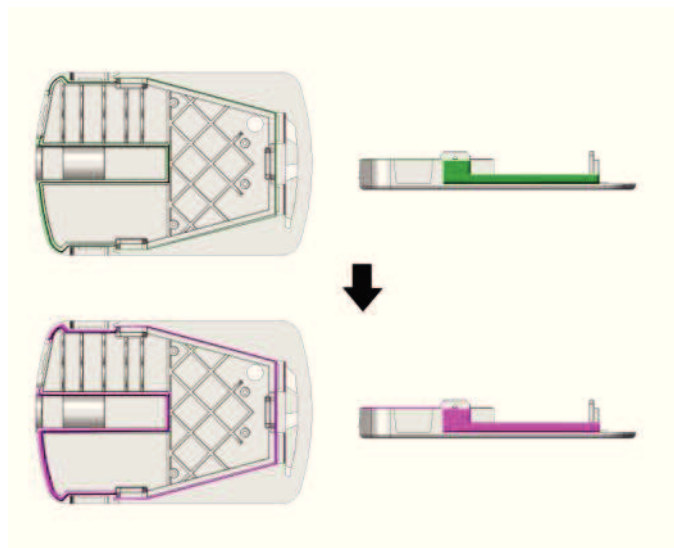


Figura 152 – Isolamento modificado através da análise ao protótipo

Confirmou-se também a necessidade de considerar boleados como elementos de extração em algumas zonas específicas. A composição dos corpos, encaixe e métodos de assemblagem foram verificados como válidos necessitando apenas de alguns ajustes a nível de acabamento e projeto de moldes.

A zona de encaixe do eixo revelou apenas a necessidade de uma maior adaptação dimensional ao novo modelo e aumento da secção de enroscamento do eixo. Como descrito anteriormente, a geometria do eixo também foi analisada de modo a obter uma fabricação mais económica utilizando elementos pré-formados.

Apesar de na primeira fase não terem sido alvos de prototipagem o relevo de topo e os elementos refletos, verificou-se através do modelo e do corpo do protótipo uma

validação a nível estético relativamente ao trabalho desenvolvido face aos requisitos do cliente. Em relação ao topo, manteve-se constante que qualquer alteração dimensional resultante da análise ao protótipo e efetuada ao corpo principal resultaria também na reformulação da composição geométrica do topo segundo o modelo estabelecido.

Em relação aos custos e dedicação inseridos na área de prototipagem de um processo de ECDP, neste projeto específico, os mesmos foram projetados desde o seu início como pertencendo a apenas duas fases; a primeira fase de prototipagem e a segunda fase de prototipagem. Na primeira fase de prototipagem, o objetivo foi utilizar o modelo respetivo aos métodos de solvência finais obtidos até então, de modo a otimizar os mesmos com o auxílio da análise e perceção de uma forma tridimensional real e estabelecer, após isso, um modelo preliminar destinado a uma segunda fase de prototipagem, que iria por sua vez representar o modelo final dessa etapa.

Para além disso a primeira fase de prototipagem permitiu também verificar a ligação dos meios de produção industrial considerados, e da geometria projetada, permitindo reformular ou considerar meios de resolução ou de redução de custos envolvidos em relação aos componentes.

A análise à seleção de apenas duas fases de prototipagem como validação de resultados revelou que apesar de se adiarem durante o desenvolvimento algumas questões que apenas podem ser resolvidas com a existência de um protótipo, evitaram-se os custos e prolongamento temporal associados à prototipagem como elemento de decisão e construção do objeto durante o seu desenvolvimento.

Após a primeira fase de prototipagem, através da orçamentação emitida relativamente aos processos e das previsões de fornecimento e fabricações futuras, também se conseguiu efetuar um gráfico comparativo de custos prospetivados durante a prototipagem e a produção e dos custos reais estimados através de orçamentações, da prototipagem e produção efetiva do pedal (ver Figura 153).

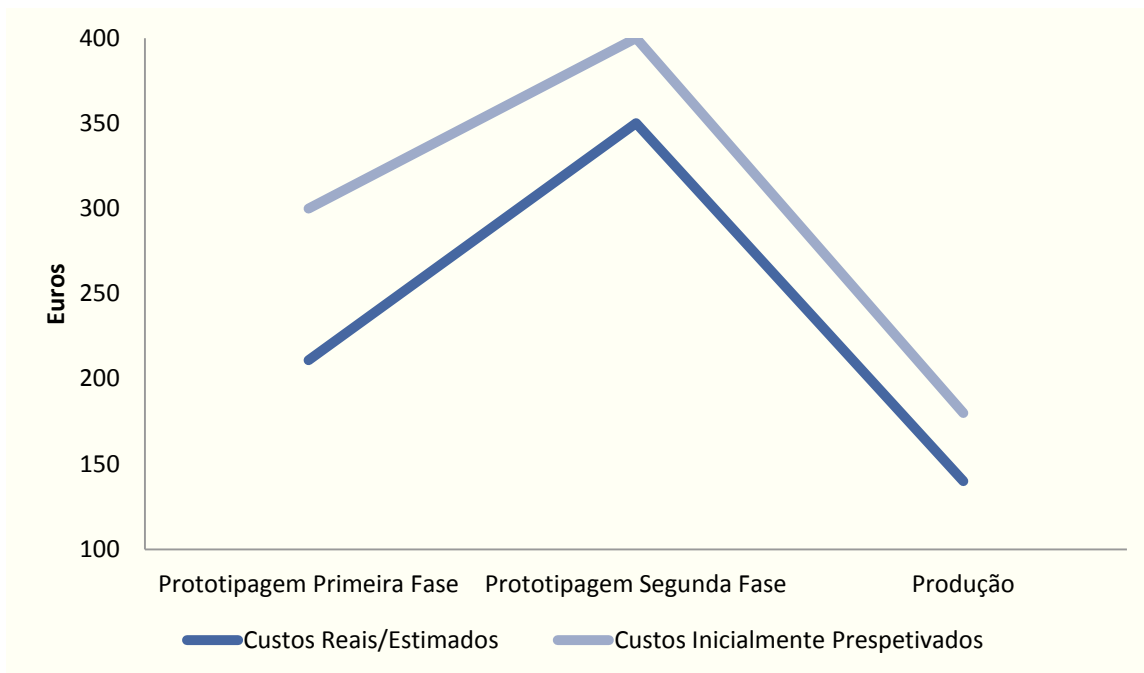


Figura 153 – Esquema de estimativas de redução dos custos e dos custos da prototipagem

Estas estimativas verificaram-se como válidas na segunda fase de prototipagem, na qual o corpo principal foi obtido através de SLS e o material do eixo, produzido através de CNC, foi modificado. Anteriormente a estas fases foram consideradas outras tecnologias para a produção de corpos protótipo, nomeadamente o uso de dois moldes protótipo em resina, de modo a permitir a injeção multicomponente do ecrã/moldura e do corpo principal. Esta opção foi tida em conta como possibilidade de redução de custos e aumento de qualidade de acabamento face a uma prototipagem de maiores séries, sendo futuramente abandonada no cenário relativo ao corpo, após análise de orçamentações. O protótipo obtido através da segunda fase de prototipagem permitiu validar a geometria do corpo estabelecida até então bem como o funcionamento do mesmo, criando um objeto suficientemente completo para utilização em avaliações de mercado e produção.

## **5 - Conclusão**

---

Em conclusão analítica ao documento, observou-se que o mesmo inclui a descrição aprofundada de todos os processos e metodologias de Conceção e Desenvolvimento do Produto utilizadas no projeto, desde o surgimento de uma ideia inicial.

A polivalência do conhecimento adquirido e aplicado durante o desenvolvimento do produto foi descrita e incluída no documento, como elemento de potencialização e auxílio à criação, construção e tomada de decisões justificadas ao longo da elaboração do projeto.

Toda a pesquisa, análise e desenvolvimento relativamente ao projeto, foram separadas em etapas respetivas, permitindo uma avaliação e perceção mais detalhada da complexidade do percurso de projeto.

Adicionalmente, descreveram-se, aplicaram-se e avaliaram-se, ferramentas criativas e científicas, tanto na conceção e desenvolvimento do corpos e componentes, relativos ao pedal, como na sua análise estrutural reformulações e fatores de seleção. Essas mesmas ferramentas revelaram ao longo de todo o trabalho uma imensa polivalência, podendo ser adaptadas a cenários diversos de modo a servir propósitos específicos.

O desenvolvimento, a passagem e evolução metodológica de etapas, encontra-se justificado através de decisões de projeto, cientificamente e criativamente fundamentadas, de modo a que os modelos e reformulações estabelecidas, sejam sempre identificados como resultado de um processo e metodologia cuidadosamente trabalhados.

O culminar do trabalho foi a criação de um pedal com capacidade de rececionar comandos através de uma ligação sem fios, de modo a ativar uma sequência luminosa destinada a indicar uma mudança de direção. O corpo final foi capaz de satisfazer os requisitos inicialmente definidos e garantir estrutura para um âmbito de produção industrial.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **6 - Trabalhos Futuros**

---

### **6.1 Trabalhos Futuros**

O trabalho descrito no documento foi desenvolvido visando a obtenção de um corpo suficientemente estruturado para o âmbito de produção industrial.

Conseqüentemente no âmbito de trabalhos futuros, poderá existir a necessidade de alguma reformulação geométrica menor, resultante da otimização ou reformulação relativa aos processos produtivos inseridos num âmbito de industrialização. Apesar do aperfeiçoamento do modelo ser inevitável, o produto criado e descrito neste documento será futuramente utilizado também na implementação de uma pesquisa e validação de mercado, por parte do cliente. Esta mesma pesquisa não será centralizada na validação do desenvolvimento da ideia, mas sim nas suas propriedades funcionais do produto face ao seu carácter inovador, sendo que as repercussões advindas desse processo vão afetar principalmente a configuração do sistema interno.

Para além das questões relacionadas com o produto, as ferramentas de ECDP aplicadas no documento serão submetidas a uma análise final conjunta ao processo de Conceção e Desenvolvimento do Produto, de modo a aplicar e desenvolver as mesmas na metodologia de projeto da empresa aumentando o desenvolvimento da mesma neste âmbito.



## ***Bibliografia***

---

- [1] Mountain bike injuries and clipless pedals: a review of three cases - British Journal of Sports Magazine. **PATEL, N. D.** Assunto 3: British Journal of Sports Magazine, Março de 2004, Vol. 38.
- [2] Load Moments About the Hip and Knee Joints during Ergometer Cycling - Clinical Biomechanics. **ERICSON, MO. et al.** Assunto 2: Elsevier, Maio de 1987, Vol. 2.
- [3] Advantages of the PC2 Pedals. Ergon. [Online] [Acedido a: 27 de Janeiro de 2014.] [www.ergon-bike.com](http://www.ergon-bike.com)
- [4] **Inc., Shimano.** Pedal for bicycle. EP1803638B1 Osaka, 9 de Julho de 2008. Hardware Desportivo.
- [5] Pedals. Shimano. [Online] [Acedido a: 25 de Janeiro de 2014.] [www.shimano.com](http://www.shimano.com)
- [6] **BRYNE, Richard.** Clipless Bicycle Pedal System. US4942778A Estados Unidos, 24 de Julho de 1990. Hardware Desportivo.
- [7] Bicycle Pedal Timeline. SpeedPlay. [Online] [Acedido a: 22 de Janeiro de 2014.] [www.speedplay.com](http://www.speedplay.com)
- [8] **HERLIHY, David.** Bicycle: The History. Yale : Yale University Press, 2006. ISBN: 9780300120479.
- [9] The Story of the Bicycle - Journal of the Franklin Institute. **SAMPLE, N.W. e COULSON, Jr., T.** Assunto 4: Elsevier, Abril de 1943, Vol. 235.

[10] Pedal Set Carbon Chrome Moly Axle. Keywin. [Online] [Acedido a: 23 de Janeiro de 2014.] [www.keywin.com](http://www.keywin.com)

[11] JCPC. Odyssey. [Online] [Acedido a: 1 de Maio de 2014.] [www.odysseybmx.com](http://www.odysseybmx.com)

[12] **MARK, James E.** Polymer Data Handbook (2nd Edition).Oxford University Press, 2009. ISBN: 9780195181012.

[13] Zytel Nylon Resin. Dupont. [Online] [Acedido a: 23 de Janeiro de 2014.] [www.dupont.com](http://www.dupont.com).

[14] Poliamides, Plastics - Encyclopedia Of Polymer Science and Technology. **PALMER, Robert.** John Wiley & Sons, Inc., 2005.

[15] Injection moulding of long glass fibre reinforced - eXPRESS Polymer Letters. **LAFRANCHE, E. et al.** Assunto 7: Express Polymer, 2007, Vol. 1.

[16] A study of the mechanical behaviour of a glass fibre reinforced polyamide 6,6: Experimental investigation - Polymer Testing. **MOUH MID, B et al.** Assunto 4: Elsevier, 2006, Vol. 25.

[17] **JOHANNABER, Friedrich.** Injection molding machines a user's guide. Munique : Hanser Publishers, 1994. ISBN: 1569901694.

[18] Pedalite Flashing Battery Free Pedals. Pedalite. [Online] [Acedido a: 26 de Janeiro de 2014.] [www.pedalite.com](http://www.pedalite.com)

[19] Portable Lightning. Dosun . [Online] [Acedido a: 29 de Janeiro de 2014.] [www.dosun.us](http://www.dosun.us)

[20] Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction - Science Magazine. **YU, Nanfang et al.:** Sciencemag, Setembro de 2011, Vol.

334.

[21] Tilt Measurement Sensor - Sensors and Actuators A: Physical. **BALTAG, O. e COSTANDACHEB, D. e SALCEANUC, A.** Assunto 1-3: Elsevier, 2000, Vol. 81.

[22] **FIGUEIREDO, Lígia J. et all.** Aplicações de Acelerómetros. Lisboa : Instituto Superior Técnico Lisboa - Monografia, 2007.

[23] Make fitness a lifestyle with Flex. Fitbit. [Online] [Acedido a: 28 de Janeiro de 2014.] [www.fitbit.com](http://www.fitbit.com)

[24] Runtastic App. Runtastic. [Online] [Acedido a: 26 de Janeiro de 2014.] [www.runtastic.com](http://www.runtastic.com)

[25] Connected Lighting Solution. Green Wave. [Online] [Acedido a: 25 de Janeiro de 2014.] [www.greenwavereality.com](http://www.greenwavereality.com)

[26] Keyless entry using your phone. Lockitron. [Online] [Acedido a: 26 de Janeiro de 2014.] [www.lockitron.com](http://www.lockitron.com)

[27] Microchip. [Online] [Acedido a: 13 de Julho de 2014.] [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

[28] **PEREIRA, Fábio.** Microcontroladores PIC: Programação em C. São Paulo : Érica, 2005. ISBN: 9788571949355.

[29] **PEATMAN, John B.** Embedded design with the PIC18F452 microcontroller. New Jersey : Prentice Hall, 2013. ISBN: 0130462136.

[30] **PEREIRA, Fábio.** Microcontroladores PIC18 detalhado: hardware e software. São Paulo : Érica, 2010. ISBN: 9788536502717.

[31] Fuzzy Approaches to Quality Function Deployment for New Product Design - Fuzzy

Sets and Systems. **CHEN, Liang-Hsuan e KOA, Wen-Chang.** Assunto 18: Elsevier, Setembro de 2009, Vol. 160.

[32] Gate location optimization scheme for plastic injection molding. **ZHAI, Ming e LAM, Yeecheong e AU, Chikit.** Assunto 1: De Gruyter, 2009, Vol. 9.

[33] **GOODSHIP, V. e LOVE, J.C.** Multi-Material Injection Moulding. Warwick : Rapra Technology, Lda., 2002. ISBN: 1859573274.

[34] Integration TRIZ with problem-solving tools: a literature review from 19950 to 2006 – Int. J. of Business Innovation and Research . **HUA, Zhongsheng et all.** Assunto 1-2: Inderscience, 2006, Vol. 1.

[35] **ELIAS, Polithartos.** Wireless Communication & Applications of BlueTooth, based on Microcontrollers. Chania : Technical University of Crete - Monografia de Diploma, 2004.

[36] **ULLAH, Malik.** An Analysis of the Bluetooth Technology - Features, Challenges, Future and Security. Ronneby : Blekinge Institute of Technology - Monografia de Mestrado, 2009.

[37] Rolling Element Bearings - Mechanical Design Engineering Handbook. **CHILDS, Peter R. N.** Capitulo 6: Elsevier, 2014.

[38] **BOYER, Howard.** Atlas of stress-strain curves. ASM International, 1987. ISBN: 0871702401.

[39] **PAPADOPOULOS, Jim.** Forces in bicycle pedalling. Nova Iorque : Cornell University, 1987.

[40] Measurement of forces exerted on pedal and crank during work on a bicycle ergometer at different loads - Journal of applied Physiology. **HOES, M.J. et all.** Assunto 1:

Springer, 1968, Vol. 26.

[41] The effect of rider weight on rider-induced loads during common cycling situations - Journal of Biomechanics. **STONE, Call e HULL, M.L.** Assunto 4: Elsevier, 1995, Vol. 28.

[42] The use of force pedals for analysis of cycling sprint performance - International Society of Biomechanics in Sport, XVI International Symposium. **COLEMAN, Simon.** Reino Unido : Chichester Institute of Higher Education, 1998.

[43] Chromium martensitic stainless steel. Deutschen Edelstahlwerke. [Online] [Acedido a: 21 de Junho de 2014.] [www.dew-stahl.com](http://www.dew-stahl.com)

[44] Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels. **PAVLINA, E.J. e VAN TYNE, C.J.** Springer. 2008.

[45] Stainless Steel: Tables of Technical Properties. Euro Inox. [Online] [Acedido a: 18 de Junho de 2014.] [www.euro-inox.org](http://www.euro-inox.org)

[46] **RILEY, William F., STURGES, Leroy e MORRIS, Don. H.** Statics and Mechanics of Materials an Integrated Approach. Nova Iorque : John Wiley & Sons, Inc., 1995. ISBN: 047101334X.

[47] LED Directivity Measurement in Situ - Measurement. **SVILAINIS, L.** Assunto 6: Elsevier, 1 de Outubro de 2077, Vol. 41.

[48] **Bayer Material Science LLC.** Snap-Fit Joints for Plastic a Design Guide. Pitsburgo : Bayer Material Science LLC, 2000.

[49] **TRES, Paul A.** Designing Plastic Parts for Assembly. Ohio : Hanser/Gardner Publications, Inc., 1998. ISBN: 1569902437.

[50] **FILHO, Avelino Alves.** Elementos Finitos : A base da Tecnologia CAE. São Paulo : Érica, 2005. ISBN: 8571947414.

[51] **KARNOVSKY, Igor A. e LEBED, Olga I.** Formulas Structural Dynamics: Tables, Graphs, and Solutions. Nova Iorque : MacGraw - Hill, 2001. ISBN: 007136712-8.

[52] **NIDAL, H., ABU-HAMDEH e MOHAMMAD, Alharty.** A Study on the Influence of using Stress Relieving Feature on Reducing the Root Fillet Stress in Spur Gear. Arabia Saudita : s.n., 2014. ISBN : 9781618042194.

[53] **DIETER, George.** Mechanical Metallurgy. Nova Iorque : Mcgraw Hill Book Co, 1986. ISBN: 0070168903.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*