



**Luís Carlos
Ribeiro Verdasca**

**O fabrico aditivo no desenvolvimento de um
selim de bicicleta**

Additive manufacturing in the development of bicycle saddle



**Luís Carlos
Ribeiro Verdasca**

O fabrico aditivo no desenvolvimento de um selim de bicicleta

Additive manufacturing in the development of bicycle saddle

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e de Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor João Alexandre Dias de Oliveira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Maria Georgina Macedo Miranda

Professor Auxiliar em Regime Laboral da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos

Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

A conclusão desta jornada académica não teria sido possível sem o apoio e contribuição de muitas pessoas às quais expresso minha sincera gratidão.

À minha namorada, um agradecimento especial por todo o apoio e paciência ilimitados, principalmente na fase de finalização deste documento. O peso das pequenas ações do dia-a-dia, que valorizo tanto e que fomentaram sem dúvida a minha estabilidade de trabalho.

À minha família, os meus pais, o meu irmão e a minha cunhada, um agradecimento pelo seu amor e apoio incondicional. Vocês são sempre o meu porto seguro, e esta conquista é dedicada a vocês.

Não posso deixar de expressar a minha gratidão aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante esta jornada. O vosso incentivo foi fundamental para manter o ânimo e motivação ao longo do caminho.

Quero de agradecer à minha equipa de orientação, ao meu orientador, Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos e co-orientador, Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, pela sabedoria partilhada apoio ao longo deste projeto.

Não posso deixar de agradecer também à eVaz Energy, minha entidade patronal, e aos meus colegas de trabalho pelo suporte prestado durante todo o curso desta dissertação.

Por fim, quero agradecer à Universidade de Aveiro e aos Departamentos de Física e Engenharia Mecânica, não só pela facilitação dos recursos e ambiente de pesquisa necessários para a realização deste estudo, como também pela preparação essencial para o mercado trabalho.

Estou sinceramente grato a todos aqueles, que de alguma forma contribuíram para o excelente percurso académico e para a realização desta dissertação.

Keywords

additive manufacturing, optimization, bicycle seat/saddle, road cycling, product development, innovation, lattice

Abstract

Road cycling is a highly demanding sport that requires a symbiotic relationship between the cyclist and the bicycle, particularly in their contact with the saddle. Conventional saddle manufacturing processes face limitations in achieving a balance between comfort, customization, and safety.

Additive manufacturing (AM) offers numerous advantages in the rapid production of complex parts and more efficient customized designs, which opens a door for applications in the manufacturing of final products. However, its orientation towards sports applications is still limited.

This thesis seeks to address how AM technology can be applied to produce a functional saddle for competitive road cycling and what user interaction improvements can be incorporated into this part compared to the conventional ones.

Through reverse engineering processes, an interface of a benchmark saddle was reproduced, and topologically optimized design studies were conducted, resulting in a saddle model (chassis) made of nylon, combining various components into an innovative organically structured part.

An exploratory analysis was also carried out to integrate lattice structures into the saddle's sponge according to a contact pressure map, typical of an elite road cyclist.

The parts were manufactured using the Fused Filament Fabrication (FFF) method (chassis and sponge) both meeting good print quality standards. However, the structural characteristics of the chassis, as determined through experimental compression tests, did not correspond to what was expected, even though they met safety parameters considering ISO 4210-9:2014.

In conclusion, the prototype manufacturing demonstrates the potential of additive manufacturing, especially the FFF technology, in producing high-quality and functional end products, offering considerable design freedom for the entire assembly (chassis and sponge). However, excessive displacements and observed operational rotation indicate a misalignment of the model for practical adoption.

Nevertheless, positioning this project in the a market context, challenges current saddle designs. This project also represents a clear opportunity to adopt this technology across all cycling modalities.

Palavras-chave

fabrico aditivo, otimização, selim, ciclismo, desenvolvimento de produto, inovação, *lattice*

Resumo

O ciclismo de estrada é um desporto de grande exigência que requer simbiose entre o ciclista e a bicicleta, no seu contacto com o selim. Os processos convencionais de fabricação de selins enfrentam limitações para alcançar o equilíbrio entre conforto, customização e segurança.

O fabrico aditivo (FA) traz numerosas vantagens na agilidade de fabrico de peças complexas e designs customizados mais eficientes, que permitem explorar a sua difusão para a fabricação de produtos finais. Contudo, a orientação para o desporto é ainda escassa.

Esta dissertação procura responder de que modo a tecnologia FA pode ser aplicada na fabricação de um selim funcional, no âmbito do ciclismo de estrada de competição, e que melhorias de interação com o utilizador podem ser acopladas a este componente, face aos convencionais.

Através dos processo de engenharia inversa, foi reproduzida uma interface modelo de um selim *benchmark* e elaborados estudos de geração de *design*, otimizados topologicamente, concebendo-se um modelo de selim (chassi) em material *nylon* englobando vários componentes num só, inovador pela sua estrutura orgânica.

Foi também elaborada uma análise exploratória para a integração de estruturas *lattice* no âmbito do enchimento esponjoso do selim de acordo com um mapa de pressões de contacto, típico de um ciclista de estrada de elite. As peças fabricadas pelo método de *Fused Filament Fabrication* (FFF) (chassi e esponja) verificaram boa qualidade de impressão. As características estruturais do chassi, registadas pelos ensaios experimentais de compressão, ficaram aquém das expectativas, ainda que satisfeitos os parâmetros de segurança relativos à adaptação da norma ISO 4210-9:2014.

Por fim, concluiu-se que a fabricação do protótipo é uma potencial prova de que o fabrico aditivo e, em especial, a tecnologia FFF, demonstra boa qualidade e exequibilidade na fabricação de produtos funcionais finais, permitindo uma ampla liberdade no *design* de todo o conjunto (chassi e esponja). Contudo, o deslocamentos exagerados e a rotação operacional registada, revelaram um comportamento desajustado do modelo para a sua adoção no terreno.

Todavia, a colocação deste projeto numa perspectiva de mercado, desafia os *designs* de selins atuais. Este projeto, deriva ainda numa clara possibilidade de adotar esta tecnologia transversalmente a todas as modalidades de ciclismo.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Objetivo	1
1.3	Motivação	2
1.4	Problema	2
1.5	Limitações	3
1.6	Estrutura do documento	3
2	Estudo do selim e suas funções	5
2.1	Conceitos gerais	5
2.2	História e evolução do selim	6
2.3	<i>Designs</i> e formas de selins	9
2.4	Interação com o utilizador	11
2.4.1	Postura e <i>bike-fit</i>	11
2.4.2	Mapa de pressão na interface	15
2.4.3	Lesões e Perturbações	16
2.5	Materiais e processos	17
2.6	Mercado do selins de ciclismo de estrada	19
3	Fabrico aditivo	21
3.1	Aplicações e <i>design</i> de produto	21
3.2	O processo mais comum - FFF	22
3.3	Polímeros e compósitos	23
3.4	Tecnologias de polímeros e sua aplicação	23
3.5	Estudos de fabrico aditivo em peças customizadas de bicicletas	24
4	Metodologias de design e fabrico	25
4.1	<i>Design</i> generativo	25
4.2	Otimização topológica	25
4.3	Estruturas <i>lattice</i>	26
4.4	Regulamentos <i>UCI - Union Cycliste Internationale</i>	26
5	Desenvolvimento CAD do selim	29
5.1	Levantamento de forma e reconstrução da interface original de estudo	29
5.2	Chassi do selim	31

5.2.1	Processo e Material	31
5.2.2	Cargas aplicadas	32
5.2.3	Inserção do modelo no algoritmo de geração de <i>designs</i>	32
5.3	Estrutura de amortecimento - Esponja	34
5.3.1	Definição das características da interface	35
5.3.2	Atribuição de valores de rigidez	37
5.3.3	Análise exploratória de elementos de amortecimento	39
5.3.4	Construção da esponja	47
6	Fabricação do selim	51
6.1	Fabrico do chassi	51
6.2	Fabrico da esponja	53
6.3	Montagem	54
7	Ensaio experimentais do conjunto	55
7.1	Metodologia de ensaio chassi	55
7.2	Metodologia de ensaio do conjunto	57
8	Análise de resultados e discussões gerais	59
8.1	Análise dos resultados experimentais e numéricos	59
8.1.1	Chassi	59
8.1.2	Esponja	64
8.2	Discussão	66
8.2.1	Chassi	66
8.2.2	Esponja	67
8.2.3	Conjunto (chassi + esponja)	67
9	Conclusões e trabalhos futuros	71
9.1	Conclusão	71
9.2	Trabalhos Futuros	73
	Referências	73
A	Complementos ao Capítulo 5 - Definição dos ensaios numéricos dos espécimes de malhas de pontes flexoras da Secção 8.1.2	81
A	Complementos ao Capítulo 5 - Definição dos ensaios numéricos dos espécimes de malhas de pontes flexoras com inclinação da Secção 8.1.2	83
A	Complementos ao Capítulo 6 - Registo fotográfico do processo de fabricação do conjunto	85

Lista de Tabelas

5.1	Repartição de zonas referentes à interface de trabalho.	38
5.2	Redistribuição dos índices de pressão e atribuição de rigidez objetivo ($E_{equiv.obj}$) por zona.	39
5.3	Seleção de elementos octaédricos.	43
5.4	Seleção de elementos de ponte flexora.	46
5.5	Análise de resultados experimentais <i>versus</i> numéricos resumo relativa aos espécimes de malha de ponte flexora.	48
7.1	Especificação do procedimento de ensaio do chassi.	56
7.2	Especificação do procedimento de ensaio da esponja.	57
8.1	Quadro resumo comparativo do Chassi <i>versus</i> Chassi sólido (100%) <i>versus</i> <i>Benchmark</i>	63
8.2	Quadro resumo da análise de resultados dos ensaios experimentais à esponja.	66
A.1	Parâmetros de impressão do chassi, <i>nylon</i> e PVA.	86
A.2	Parâmetros de impressão da esponja, <i>nylon</i>	87

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Figuras

2.1	Legenda de conceitos úteis: Selim.	5
2.2	Legenda de conceitos úteis: Pélvis.	6
2.3	Exemplo de um mecanismo de amortecimento 1 [7].	7
2.4	Exemplo de um mecanismo de amortecimento 2 [7].	7
2.5	Diferenças anatómicas da pélvis masculina e feminina [19].	9
2.6	Ilustração da curvatura Longitudinal.	10
2.7	Ilustração da curvatura Transversal.	10
2.8	Exemplar de um selim com corte central e corte na zona do cóccix.	11
2.9	Medida da altura do selim.	12
2.10	Ângulo de flexão do joelho (AFJ) [24].	13
2.11	Medida do recuo do selim.	13
2.12	Medida do ângulo do selim.	14
2.13	Mapas de pressões, feminino e masculino, <i>tops</i> e <i>drops</i> [19].	15
2.14	Ilustração da composição do selim.	18
2.15	Selim GEIU, fabricado totalmente em polímero reforçado de carbono [52].	19
2.16	<i>Fizik's Antares Versus Evo R3 Adaptive</i> [55].	19
2.17	<i>Specialized S-Works Romin EVO</i> [56].	20
2.18	<i>Selle Italia SLR BOOST 3D TI 316 SUPERFLOW</i> [57].	20
4.1	Exemplo de uma peça pré e pós otimização topológica (fonte: https://m.indiamart.com/proddetail/3d-printing-2851860914962.html).	26
5.1	Modelo de base <i>Prologo C.one 30</i>	29
5.2	Processo de <i>scanning</i>	30
5.3	Malha de polígonos.	30
5.4	Interface reconstruída em CAD.	30
5.5	Definição dos <i>bodies</i> objetivo em ambiente <i>Fusion 360</i>	33
5.6	Esquema de definição da posição do espigão em ambiente <i>Fusion 360</i>	34
5.7	Modelo do chassi selecionado para impressão.	34
5.8	Mapa de pressões exemplo seguido, adaptado de [19].	36
5.9	Mapa de zonas da interface e rigidez ($E_{equiv.}$).	37
5.10	Curva experimental de tensão <i>versus</i> deformação do <i>nylon</i> transparente <i>Ultimaker</i>	40
5.11	Elementos octaédricos.	40
5.12	Curvas experimentais de pressão <i>versus</i> deformação dos espécimes octaédricos elementares.	41
5.13	Curvas experimentais de pressão <i>versus</i> deformação dos espécimes octaédricos elementar e trancados.	42

5.14	Curvas experimentais de pressão <i>versus</i> deformação dos espécimes octaédricos elementares exemplo de aleatoriedade da qualidade individual. . . .	42
5.15	Elemento arco.	43
5.16	Curvas experimental de pressão <i>versus</i> deformação do espécime arco. . . .	44
5.17	Elemento arco danificado.	44
5.18	Malha de elementos de ponte flexora.	45
5.19	Legenda de dimensionamento dos elementos de ponte flexora.	46
5.20	Curvas experimentais de pressão <i>versus</i> deformação dos espécimes de malhas de pontes flexoras.	46
5.21	Curvas de pressão <i>versus</i> deformação numérica e experimental.	47
5.22	Curvas de pressão <i>versus</i> deformação numérica e experimental.	47
5.23	Curvas de pressão <i>versus</i> deformação numérica e experimental.	47
5.24	Curvas de pressão <i>versus</i> deformação numérica e experimental.	47
5.25	Curvas de pressão <i>versus</i> deformação numérica e experimental.	48
5.26	Organização da malha.	49
5.27	Curva numérica de pressão <i>versus</i> deformação do espécime da zona Z1. . . .	49
5.28	Curva numérica de pressão <i>versus</i> deformação do espécime da zona Z2. . . .	49
5.29	Esponja em ambiente CAD.	50
5.30	Conjunto em ambiente CAD.	50
6.1	Bruto do chassi impresso em ambiente de impressão.	52
6.2	Amostragem das ondulações na interface do chassi.	53
6.3	Bruto da esponja impresso em ambiente de impressão.	53
6.4	Protótipo conjunto (chassi e esponja) montado.	54
7.1	Chassi em ambiente de ensaio experimental.	55
7.2	Esquema de forças de ensaio do chassi ao longo da largura do modelo. . . .	56
7.3	Esquema de forças de ensaio da esponja.	57
8.1	Curvas experimentais de força <i>versus</i> deslocamento relativa ao ensaios 1.1, 1.2 e 1.3 do chassi impresso.	60
8.2	Malha de elementos finitos do selim <i>Benchmark Prologo C.one 30</i> . As setas a cor azul identificam a zona de encastramento.	61
8.3	Malha de elementos finitos do Chassi sólido. As setas a cor amarela identificam a zona de encastramento.	62
8.4	Curvas numéricas de força <i>versus</i> deslocamento relativa aos ensaios 1.1 (Posterior), 1.2 (Centro) e 1.3 (Anterior).	62
8.5	Resultado numérico da aplicação da força representativa de uma postura de <i>tops</i> por um atleta de 73 kg.	63
8.6	Curva de força versus deslocamento ensaio 2.1.	64
8.7	Curva de força versus deslocamento ensaio 2.2.	65
8.8	Curva de força versus deslocamento ensaio 2.3.	65
8.9	Protótipo conjunto fixado à bicicleta.	67
8.10	Protótipo de <i>rails</i> fixado à bicicleta.	68
8.11	Esponja acoplada ao selim <i>Prologo C.one 30 (Bechmark)</i>	69

A.1	Malha de elementos finitos do espécime de malha de ponte flexora de 1,2 mm de espessura. As setas a cor azul identificam a zona de encastramento (base) e a seta a cor preto identifica o vetor deslocamento vertical aplicado ao punção rígido (corpo cor laranja).	82
A.1	Malha de elementos finitos do espécime de 0,79 mm de espessura e inclinação de 28° referente à zona Z2. As setas a cor azul identificam a zona de encastramento (base) e a seta a cor preto identifica o vetor deslocamento vertical aplicado ao punção rígido (corpo cor laranja).	84
A.1	Disposição da peça chassi sobre a cama impressão em ambiente de <i>slice</i> . .	85
A.2	Bruto de impressão do chassi mergulhado em água.	86
A.3	Disposição da peça esponja sobre a cama de impressão em ambiente de <i>slice</i> . .	87

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento do tema

O campo do fabrico aditivo (FA), também conhecida como impressão 3D, tem experienciado avanços significativos na última década. O avanço da tecnologia permitiu o melhoramento dos processos de MA trazendo numerosas vantagens na agilidade de fabrico de peças complexas e *designs* customizados mais eficientes [1]. Juntamente com isto, a criação de novos materiais com potencialidades otimizadas nos vários campos da engenharia, permitem que as tecnologias de fabrico aditivo se difundam para o produto final ao invés de apenas permanecerem no âmbito da prototipagem. Contudo, enquanto que a MA tem sido bem sucedida nos setores automóvel e aeroespacial, o seu potencial a respeito do desporto é ainda escasso, principalmente no ciclismo.

O conceito atual de ciclismo na sua etimologia refere-se à classe de modalidades referentes à prática de utilizar/andar de bicicleta. No entanto, socialmente, o termo ciclismo é associado à modalidade estrada, a mais popular de entre as restantes, principalmente pelas suas famosas provas mundialmente conhecidas de *World Tour*, onde o desempenho e a resistência são as divisas da modalidade [2]. A exigência física e o carácter de elite do ciclismo de estrada de competição requerem uma simbiose entre o ciclista e a bicicleta, enfatizando a harmonia biomecânica do atleta a respeito do seu contacto com a máquina [3]. Ou seja, o processo de humanizar a bicicleta e os seus componentes é fulcral no conforto da atividade, principalmente a respeito do selim que representa o maior dos 3 pontos de contacto entre o utilizador e a bicicleta [4]. No entanto, os processos convencionais de fabricação de selins, geralmente enfrentam limitações para alcançar o equilíbrio entre conforto e customização, segurança e disponibilidade.

1.2 Objetivo

Este projeto visa explorar a aplicação da tecnologia de fabrico aditivo no desenvolvimento de um selim de bicicleta de estrada funcional, com vista à melhoria de interação utilizador/produto, no âmbito da competição. Das várias fases de projeto, pretendem também atingir-se os seguintes marcos:

1. Desenvolver um protótipo de um selim tangível, que incorpore os princípios do fabrico aditivo e que não necessite de ser submetido a processos de montagem.

2. Realizar testes mecânicos para avaliar a resistência, rigidez e integridade do protótipo do selim.
3. Avaliar os requisitos de segurança do protótipo fabricado em conformidade com os padrões exigidos pelo mercado de ciclismo de estrada e que permita a sua integração em prova.

Este documento procura ainda responder às seguintes questões:

1. De que modo é que a tecnologia de fabrico aditivo pode ser aplicada na fabricação de um selim funcional no âmbito do ciclismo de estrada?
2. Quais são as principais considerações de *design*, a respeito da ergonomia e requisitos de segurança, que devem ser considerados no processo de fabricação do selim?
3. Como é que interação entre utilizador/produto do protótipo fabricado, se compara com os modelos de selins convencionais em termos de conforto e desempenho?

1.3 Motivação

A motivação por detrás desta pesquisa, decorre da necessidade de soluções inovadoras no *design* de selins de bicicleta, que atendam às limitações dos métodos convencionais de fabricação. Embora a fabricação convencional de selins seja qualitativamente eficiente, não tenta atender à individualidade de cada ciclista, mas a um intervalo de valores definidos pelas características médias, anatómicas e físicas, de uma população. Aliado a isto, surge também o interesse de investigação deste tópico do ponto de vista da prevenção das doenças relacionadas com o desconforto e má acomodação do selim.

O facto da fabrico aditivo, entre variadas valências, possibilitar a exploração de abordagens diferenciadas no âmbito da personalização de uma forma mais acessível e facilitada, suscita uma mudança de paradigma neste meio. Esta, apesar de já estar bastante presente na indústria e disponível a muitos individuais autodidatas, ainda não demonstra investigação aprofundada no fabrico de peças funcionais.

Por fim, o tema levanta ainda uma motivação particular referente ao uso da bicicleta e em especial do selim. Desde criança que sempre pratiquei várias modalidades de bicicleta, sendo que atualmente ainda sou adepto do desporto. Durante os longos passeios que fiz e faço sou confrontado com dores na zona pélvica devido ao contacto com o selim. Assim sendo, este projeto é também uma tarefa de curiosidade pessoal que me permitirá conhecer as adversidades que experienciei e experiencio no terreno e desenvolver algo que as consiga colmatar.

1.4 Problema

Atualmente, os selins produzidos para competição apresentam valores de massa bastante reduzidos, fabricados maioritariamente em fibras reforçadas de carbono com finas espessuras de enchimento esponjoso. Estes fatores impossibilitam aos selins serem conotados como confortáveis com boa acomodação do utilizador, gerando até lesões severas aquando a sua utilização prolongada [5]. Sendo o ciclismo de estrada uma modalidade geralmente

praticada por largas horas de provas e treinos, existe um interesse mútuo pelo desenvolvimento de um produto que induza conforto contínuo a cada indivíduo. Além disto, é deveras relevante a exploração de novas tecnologias de fabricação de selins que consigam satisfazer esta exigência de forma eficaz.

O campo do fabrico aditivo está ainda na sombra da prototipagem, pelo que a fabricação de produtos de consumo final, como o caso do selim, poderá aumentar a credibilidade da tecnologia. A liberdade de *design* e a versatilidade dos materiais são ainda limitações dos métodos tradicionais de fabrico, aos quais o MA tenta responder [6].

1.5 Limitações

Durante o estudo prévio do tema, evidenciou-se uma clara lacuna na literatura científica disponível sobre os selins, revelando-se bastante reduzida e, muitas vezes, desatualizada. Lacuna esta encontrada, não só no âmbito da aplicação das tecnologias de fabrico aditivo na construção de selins, mas também na generalidade de componentes de bicicleta. Com isto, foi exigida uma pesquisa de elevada especificidade, que denota um claro esforço acrescido relativamente à compilação de informação relevante à investigação e desenvolvimento do protótipo. Além do mais, as técnicas de aumento de conforto e bem-estar no domínio da interface do selim estão ainda no seu estado embrionário, à mercê das grandes marcas e equipamentos *premium* dispendiosos.

É também importante reconhecer que esta pesquisa se concentra na construção de um selim de bicicleta, podendo interferir e agregar mecanismos relacionados com o mesmo. No entanto, é de notar que na elaboração do projeto limitaram-se algumas variantes de produção relacionadas com ferramentas e equipamentos disponíveis na Universidade de Aveiro, do Departamento de Engenharia Mecânica.

1.6 Estrutura do documento

No seguimento do presente capítulo, o documento divide-se em 9 capítulos de conteúdo específico, organizado de acordo com as várias fases do projeto.

- **Capítulo 2: Estudo do selim e suas funções** Referencia a história e desenvolvimento atual dos selins e as características de *design* necessárias compreender para este estudo. Faz ainda uma análise dos mapas de pressão de contacto com o selim, assim como as lesões e perturbações relacionadas com o seu uso.
- **Capítulo 3: Fabrico aditivo** O capítulo terceiro aborda o fabrico aditivo, o sua metodologia mais conhecida, assim como potenciais materiais revolucionários.
- **Capítulo 4: Metodologias de *design* e fabrico** O capítulo quarto aborda conceito de *design* importante para o desenvolvimento e modelação de peças orientadas ao fabrico aditivo.
- **Capítulo 5: Desenvolvimento CAD do prototipo do selim** O capítulo quinto descreve o procedimento de aquisição de forma e construção do chassi do protótipo em CAD. É elaborada uma análise exploratória relativa ao agregado de elementos de absorção para construção da esponja do protótipo e finalizada a combinação do conjunto.

- **Capítulo 6: Fabricação do prototipo do selim** O capítulo sexto descreve o processo de fabrico do protótipo.
- **Capítulo 7: Ensaio experimentais** No capítulo sétimo são realizados os ensaios experimentais ao protótipo.
- **Capítulo 8: Análise de resultados e discussão** No capítulo oitavo são analisados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais e numéricos elaborados.
- **Capítulo 9: Conclusões e trabalhos futuros** No capítulo nono são apresentadas as conclusões finais e a sugestão de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estudo do selim e suas funções

Neste capítulo é revista a literatura relevante ao processo de desenvolvimento do selim. Foram estudados conceitos relativos aos avanços e diferentes tecnologias de selins assim como processos de obtenção das mesmas, evolução e impacto no seu design e ajuste.

2.1 Conceitos gerais

Para melhor compreensão das secções e capítulos posteriores, torna-se importante definir, alguns conceitos anatómicos e geométricos gerais, Figuras 2.1 e 2.2.

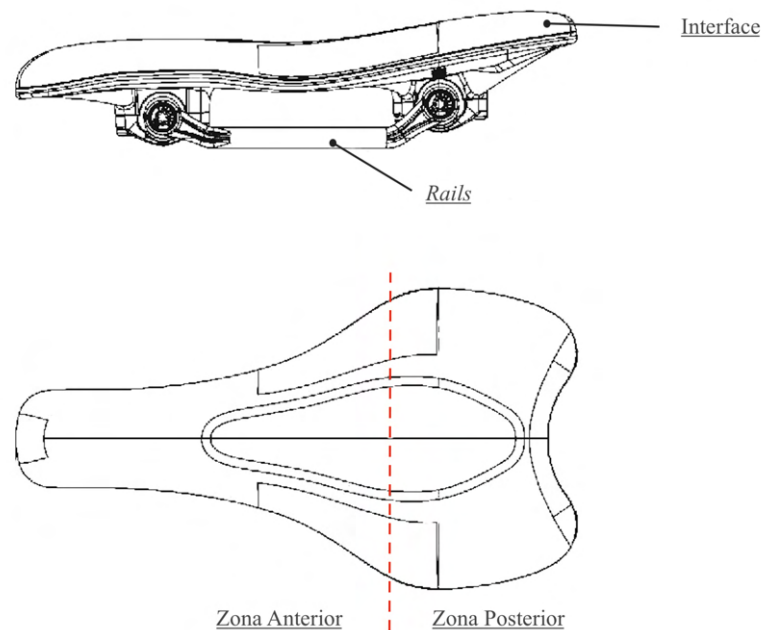


Figura 2.1: Legenda de conceitos úteis: Selim.

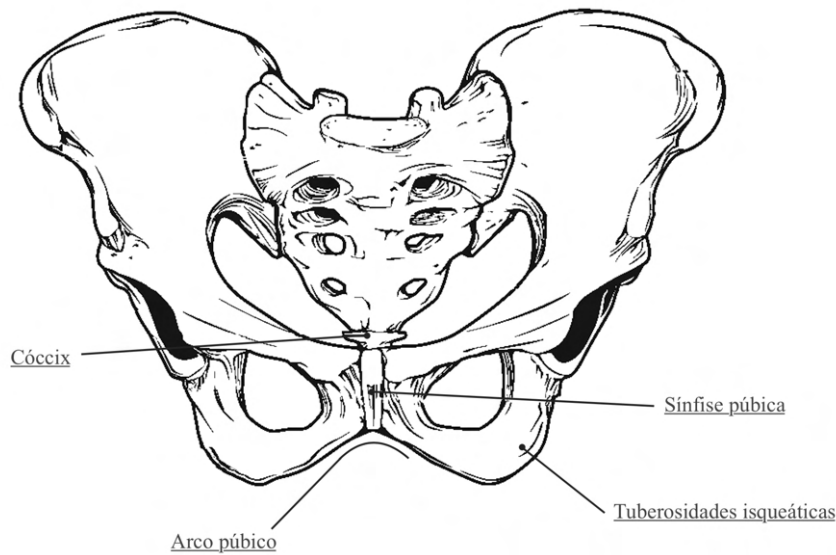


Figura 2.2: Legenda de conceitos úteis: Pélvis.

2.2 História e evolução do selim

Os selins de ciclismo de estrada representam um papel fundamental no desempenho do atleta. Ao longo dos anos, evoluíram consideravelmente, passando por uma série de desenvolvimentos até se tornarem em produtos ergonômicos e especializados que encontramos atualmente no mercado. Este capítulo explora a história do selim de bicicleta de estrada, traçando o seu caminho evolutivo até ao seu *design* atual, enfatizando as principais transformações ao longo do tempo.

Ano de 1818 - Desenvolvimento da bicicleta e do selim

O aparecimento do selim surge lado a lado com o desenvolvimento da bicicleta. O primeiro conceito assemelhado com a bicicleta, continha um selim como um dos seus componentes principais. A criação deste instrumento de transporte tinha o intuito de substituir o cavalo, e abrir uma nova alternativa mais acessível à época. Em semelhança ao principal meio de transporte da época, o cavalo, os selins eram compridos e curvados semelhantes às selas com exceção da largura, sendo que esta apresentava-se mais estreita por não necessitar de acomodar a dorsal do animal. Por este fator, o selim adquiriu o nome *bicycle saddle* traduzido à letra para "sela de bicicleta" [7, 8].

Ano de 1871 - Aparecimento dos primeiros selins mais curtos e a introdução dos primeiros mecanismos de amortecimento

Os selins mais curtos viriam a aparecer mas ainda com uma interface muito curvada. Nesta altura, as bicicletas eram conotadas como desconfortáveis [9]. A sua estrutura, quadro, era rígido sem quaisquer elementos de amortecimento associados e as estradas irregulares, dificultando a adesão da bicicleta [9]. Isto fez fomentar a engenharia da bicicleta com foco principalmente no selim, o maior ponto de contacto com o indivíduo. Apareceram então as primeiras molas de amortecimento colocadas sob a interface do selim [10]. Adotaram-se também interfaces mais curtas em aço com as respetivas molas ou mecanismos de absorção soldados ou aparafusados sob e com revestimento em couro ani-

mal. Estes modelos tornaram-se largamente populares, despertando interesse por parte dos utilizadores e dos fabricantes, aumentando a credibilidade pelo meio de transporte [9]. Durante os períodos adjacentes, várias experiências e mecanismos de amortecimento foram adotados, principalmente no ano de 1889 e posteriores, Figuras 2.3 e 2.4, [10]. A classe de ciclistas denominados como corredores (*racers*), continuariam a usar selins rígidos pelo aumento de rendimento nas corridas [8, 9].

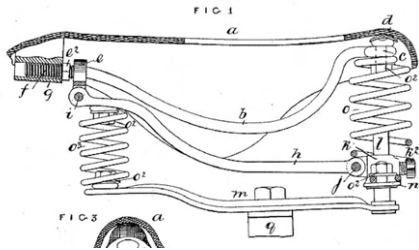


Figura 2.3: Exemplo de um mecanismo de amortecimento 1 [7].

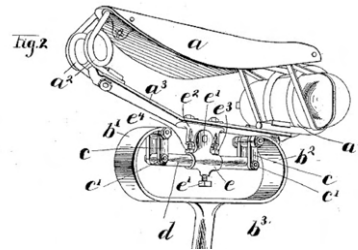


Figura 2.4: Exemplo de um mecanismo de amortecimento 2 [7].

Ano de 1890 - Introdução dos primeiras características de interface para redução de pressões na zona central

Apesar da dedicação aos sistemas de molas, os desenvolvimentos dedicados à interface apenas se fizeram notar no ano de 1892 quando a empresa *Kirkpatrick* criou um selim que não integrava uma interface de base rígida, mas uma estrutura com couro tracionado nas extremidades. Este tornou-se popular pelo facto de a propriedade do couro se moldar de forma livre à pélvis do utilizador, tornando-se mais confortável ao longo do tempo. As primeiras características inovadoras de ergonomia, a respeito da interface do selim, apareceram em 1890 no selim *Middlemore Hammock*. Estas características vinham a apresentar a mesma função dos selins atualmente fabricados como cortes de alívio de pressões na zona do períneo. Também durante este ano viriam a aparecer os primeiros selins com enchimento esponjoso fabricados por *Arthur L. Garford* [11]. No entanto, a era do couro viria a ser mais notória em 1895 quando o confeccionador *Lamplugh* apresentou uma interface inovadora que, além de uma ranhura central, viria adicionalmente a apresentar duas ranhuras nas zonas de apoio das tuberosidades, com o intuito de distribuir os apoios da zona pélvica por uma maior área de contacto. Especula-se que este modelo tenha tido grande adesão principalmente por aqueles que faziam mais quilómetros de bicicleta diariamente [11].

Ano de 1898 - Conceção da bicicleta "segura" e distinção anatómica de selins masculinos e femininos

A conceção da bicicleta chamada "segura" despertou a mobilidade transversal a todo o povo e, principalmente, no género feminino sendo que até à época, apenas as mulheres da burguesia tinham possibilidade de se deslocar a cavalo. Este acontecimento gerou controvérsia social, pois a população acreditava que a utilização das bicicletas por parte das mulheres impossibilitava-as de serem conotadas como puras. Isto motivou à distinção entre géneros no desenvolvimento de selins, estabelecendo-se diferentes estilos anatómicos daí em diante. Foi também nesta altura que começaram a surgir os conceitos de ergonomia no mercado de selins [12].

Anos 40 - Utilização de materiais sintéticos na fabricação de selins

Durante a segunda guerra mundial, o couro animal para produção de selins tornou-se escasso obrigando as marcas a adotar borrachas artificiais produzidas pelas fabricantes de pneus. No entanto, os selins com interfaces sintéticas apenas começaram a ser aceites bastante mais tarde, por volta dos anos de 1970. Esta adoção tornou-se lenta e difícil pelas críticas dos ciclistas acerca do escorregamento sobre a interface e a condução instável que esta induzia. Além disso, viriam a trazer enchimento esponjoso tornando-os grandes absorvedores de calor e incómodos pelo suor e assaduras causados [11].

Ano de 1966 - Introdução das ligas leves na construção de selins

No ano de 1966 a marca *Ideale France* lança um selim com a sua estrutura fabricada em ligas leves metálicas tornando-se no selim mais leve do mundo com cerca de 500 gramas, aproximadamente. Até à data os selins poderiam pesar até mais de 1 kg [13].

Ano de 1968 - Impacto da popularidade das provas de ciclismo

Vários designs e desenvolvimentos fizeram-se a partir do ano de 1968 principalmente nas suas interfaces mais confortáveis e nos seus mecanismos de absorção de impactos. Uma das razões para o despertar deste trabalho de investigação, foi a popularidade que as provas de ciclismo adquiriram no decorrer destes anos [13].

Ano de 1980 - Aparecimento do primeiro selim anatómico

Em 1980 a fabricante italiana *SelleItalia* produziu o primeiro selim anatómico, nomeando a marca como uma das preferidas pelos atletas e equipas de ciclismo profissionais. Paralelamente, a produção de bicicletas recreativas e de baixas gamas de outros tipo de modalidades, viriam a fomentar a indústria de selins *lowcost*, pelo que várias marcas surgiram nesta altura [9].

Ano de 1990 - Inserção do gel de poliuretano no enchimento esponjoso do selim

A marca *SelleRoyal* em 1990, lança um selim com uma esponja inovadora de enchimento de gel de poliuretano patenteado pela multinacional da indústria, *Bayer*. A adoção do gel viria a conservar a capacidade de amortecimento da esponja, contrariamente à tradicional de espuma, permitindo o mesmo conforto durante todo o tempo de utilização do selim. O enchimento em gel está ainda atualmente presente nos modelos de média e alta gama de selins de diversas marcas [14].

Também neste ano, a marca *selleItalia* alcança novamente um marco na inovação com o lançamento de um selim com massa inferior a 200 gramas. O modelo viria a constituir uma base em *nylon* e *rails* em titânio [15].

Ano de 2005 - Reconhecimento da marca *Selle SMP*

Depois de adotar a técnica de mímica criada pela *Specialized*, a marca *Selle SMP* foi reconhecida pela comunidade científica através do *The Journal of Sexual Medicine* em 2005, pela sua investigação acerca do bloqueamento de fluxo sanguíneo na zona pélvica [14].

Ano de 2007 - Introdução da utilização de polímeros reforçados na construção de selins, em especial o carbono

As potencialidades dos polímeros reforçados e em especial de carbono, vieram trazer desempenho aos conjuntos de bicicletas e equipamentos, sem exceção dos selins. A partir desta data deu-se início à "Era do Carbono". Até à atualidade o polímero reforçado de carbono é ainda o principal material associado à leveza e desempenho dos componentes constituintes das bicicletas de alto rendimento [8, 9].

Ano de 2022 - Introdução da utilização do fabrico aditivo na construção de selins

Mais recentemente a marca italiana *fizik's* inseriu a tecnologia de manufatura aditiva, na construção dos seus modelos inovadores de selim, tornando-se na marca pioneira na customização de protótipos de alto desempenho. Estes avanços permitem a criação de um modelo de selim, com uma interface personalizável até uma resolução 10 mil vezes superior em relação aos análogos convencionais [16].

2.3 *Designs* e formas de selins

À medida que a ciência avança, as fabricantes de selins incorporam pesquisas e estudos científicos na criação de produtos. Estes estudos realizados no âmbito da biomecânica e ergonomia, permitem a criação de *designs* mais sofisticados, com características anatomicamente otimizadas que realçam o desempenho, o rendimento e, acima de tudo, o bem-estar do atleta. Além do mais à medida que o ciclismo evolui, este desporto tem-se diversificado em diferentes modalidades mais específicas, como por exemplo, são o ciclismo de estrada, o ciclocross e o triatlo.

Nos dias de hoje, existe uma crescente preocupação pela personalização e ajuste do selim para atender às necessidades de cada indivíduo. As fabricantes oferecem uma variedade de larguras, formatos e materiais de selim para se adequarem à anatomia e às preferências de cada ciclista. Afinal o selim é responsável por suportar cerca de 50% da massa do corpo durante a prática de ciclismo [17]. Em seguida, são apresentadas as categorias de caracterização de um selim de estrada encontradas no mercado atual, podendo ser agregadas em várias combinações:

Género - O principal fator de filtragem de selins é o género do utilizador. As mulheres, comparativamente aos homens, apresentam largura de tuberosidades de apoio maiores, necessitando de um selim inerentemente de largura maior. Além disso, o arco púbico das mulheres apresenta uma forma mais arredondada, diferente da do homem que apresenta forma em "V", Figura 2.5. Este fator poderá ser decisivo na seleção de um selim mais ou menos encurvado na sua secção transversal [18, 19].

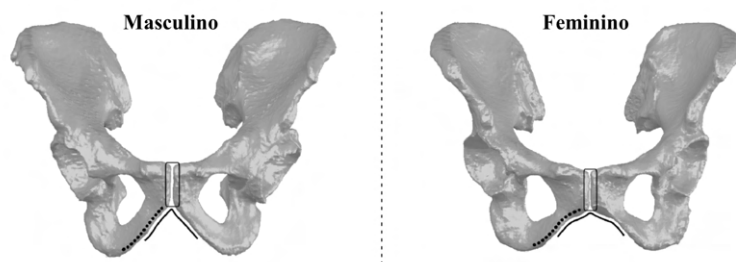


Figura 2.5: Diferenças anatômicas da pélvis masculina e feminina [19].

Curvatura - A curvatura do selim pode ser definida pela direção longitudinal, transversal ou ambas. A primeira, ao longo da maior dimensão da interface, deve ser selecionada em função da magnitude de flexibilidade do ciclista, Figura 2.6. Menor flexibilidade, impossibilita-o de obter uma postura aerodinâmica sem que haja rotação da pélvis no sentido anterior, requerendo suporte na zona posterior da interface e consequentemente maior curvatura da mesma [4]. A curvatura transversal, ao longo da largura do selim,

ênfatisa a dimensão de área de apoio acompanhando a curvatura do arco púbico ao longo da largura da interface, Figura 2.7. É importante ter em conta que ao rebaixarem os ossos de apoio com o aumento desta última, podem induzir-se pressões menos desejadas nos tecidos moles da zona pélvica. Atualmente as geometrias mais direitas ("*flats*") na dimensão transversal são as mais preferidas [20].

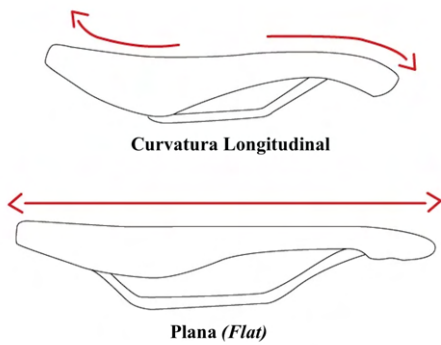


Figura 2.6: Ilustração da curvatura Longitudinal.

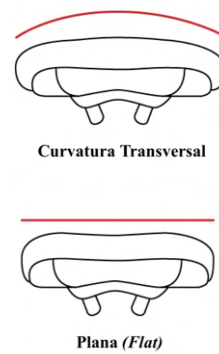


Figura 2.7: Ilustração da curvatura Transversal.

Nariz - A função do nariz é apoiar a púbis e criar estabilidade na condução da bicicleta. Este pode ser caracterizado pelo seu comprimento e pela sua largura. O comprimento não é contabilizado a partir de uma zona específica, mas caracteriza entre a zona anterior e posterior a zona mais estreita e de maior largura respetivamente. A dimensão de largura do nariz depende da largura da pélvis do ciclista e da sínfise púbica. Além disso, os atletas de classes de elite pedalam com as pernas na direção do quadro da bicicleta em busca de maiores aerodinâmicas. Selins mais estreitos evitam a fricção na parte interior da coxa [20]. Os selins, maioritariamente aprovados pelos urologistas, apresentam *designs* com narizes mais curtos ou até sem nariz. No entanto, a comunidade de ciclistas não adota estes últimos, pela sua falta de estabilidade e excesso de força exercida no guiador para sustentar o tronco [21]. Um exemplo de adoção deste tipo de selins com narizes curtos são aqueles projetados para provas de triatlo e/ou contra relógio. Os selins destas modalidades são caracterizados pelos seus narizes mais largos e curtos, sendo que neste tipo de provas existe uma grande procura pela aerodinâmica e as bicicletas possuem guiadores com apoios de braços. Isto faz com que não seja necessária de grande nível de estabilidade dado pelo selim. Além disso, selins mais curtos permitem menos dimensão de recuo do mesmo pelo regulamento, disponibilizando mais potência. É ainda por esta razão que o comprimento do nariz do selim de estrada atualmente é menor.

Corte, depressão e canal - Os cortes, depressões ou canais no centro do selim servem para diminuir as magnitudes de pressões apoiadas nos canais sanguíneos e tendões. Estas saliências são requeridas nos selins pelo conforto e bem-estar do utilizador, sendo que a incidência de apoio sobre os tecidos macios da pélvis podem ser prejudiciais para o indivíduo, como será falado mais adiante. Existe uma tipologia de corte ou depressão visualmente menos notória, presente em alguns selins na extremidade posterior da sua interface. Esta saliência tem a função de evitar o contacto entre a interface com o osso do cóccix [22, 23]. É importante salvaguardar que estes elementos são bastante presentes

nos selins atuais mas que podem não aparecer ambos no mesmo modelo. Na Figura 2.8 pode ser observado um exemplo de um selim com corte central e corte na zona do cóccix.

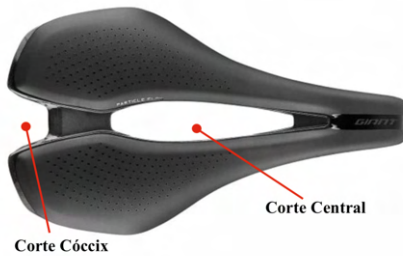


Figura 2.8: Exemplar de um selim com corte central e corte na zona do cóccix.

2.4 Interação com o utilizador

2.4.1 Postura e *bike-fit*

A postura inconsciente ou técnica que o ciclista adota durante a prática da atividade de ciclismo depende de variáveis como: a geometria da bicicleta, a sua experiência e perfil de condução, a sua resistência, a sua flexibilidade e o seu alcance de movimentos, da cadência e intensidade requeridas pela prova, da sua fadiga e da presença de lesões ou desconforto. É através deste aglomerado de especificidades e fatores anatómicos que devem ser dimensionadas as configurações da bicicleta [24, 25].

A configuração da bicicleta ou *bike-fit*, mais comumente chamada, reconhecida em 2014 através do Instituto Internacional de *Bicycle Fitting*, é a disciplina responsável pela calibração e ajuste da bicicleta tendo em conta as variáveis acima referidas [24, 26]. Esta pode ser um fator de desempenho, conforto e impedimento de desenvolvimento de perturbações e lesões associadas ao ciclismo [27]. Por não ser uma ciência exata, uma boa configuração, por vezes carece de processo iterativo e pode recair sobre a habituação do utilizador à máquina [5]. Além disso, estando ligada de forma simbiótica ao ciclista, cria dualidade nos ajustes e na postura, podendo uma postura inferir uma configuração e vice versa [25].

Cada vez mais laboratórios de *bike-fitting* preocupam-se em monitorizar os movimentos dinâmicos do ciclista, configurando a bicicleta com maior aproximação possível do seu estilo de condução. O processo passa pela captação de movimento do ciclista em ambiente de terreno emulado e elaborados ajustes computacionais. Esta metodologia é extremamente fidedigna, comparativamente às restantes tradicionais denominadas de estáticas e antropométricas, que consideram a medição de variáveis de postura com o objeto de estudo em repouso [24].

O selim representa um dos componentes com maior nível de ajuste na bicicleta, sendo todos eles de natureza contínua: altura, recuo e ângulo de inclinação; explicitados individualmente de seguida [4]. Os ajustes realizados a respeito do selim podem impactar no desempenho do atleta como a sua disponibilização de força e a sua aerodinâmica. Contudo, a saúde do sistema músculo-esquelético deve ser melhorada ou conservada

pelo que os fatores biomecânicos devem ser tidos em especial atenção em detrimento do desempenho [28–30].

Altura do Selim

A altura do selim é a dimensão medida entre o topo da interface do selim e o eixo pedaleiro da bicicleta paralela ao espigão, e pode influenciar a condução do atleta e conforto, estabilidade e eficiência, Figura 2.9. A altura do selim é também responsável pelo bom funcionamento do sistema músculo-esquelético, principalmente nos membros inferiores.



Figura 2.9: Medida da altura do selim.

Os primeiros métodos antropométricos a ser estudados são os formulados por *Hamley* e *Thomas*. Estes estabelecem para a dimensão vertical entre o plano da interface e o eixo do pedal na posição de ponto morto inferior (PMI), a altura troncatérica da perna multiplicada por 1,09. Existe ainda refinamento deste método afirmando que para um fator de multiplicação unitário, cria maior eficiência no consumo de oxigénio, e para 1,04, maior força eficaz [24].

Na metodologia de *Holmes* este remete para a avaliação do ângulo de flexão do joelho (AFJ), numa posição operacional estática por parte do ciclista padronizando um intervalo sub-ótimo entre 25° até 35°, com sapatilha de encaixe devidamente colocada e em posição de PMI, Figura 2.10. Este método esclarece que acima de 35° existe pressão excessiva na rótula patelo-femoral no joelho, enquanto que, abaixo de 25° existe flexão em demasia dos tendões da coxa e das costas, e flexão excessiva do tornozelo no movimento de força. Além disso, valores inferiores ao limite inferior do intervalo, também denotam maiores deslocamentos transversais do tronco e, conseqüentemente, maior consumo de oxigénio e rendimento global menor [24].

Esta metodologia de *Holmes* pode ser tomada de forma dinâmica, com a captação do movimento do atleta em ambiente simulado de terreno. Os intervalos de AFJ propostos para esta metodologia dinâmica, passam a ser 30° - 40° em posição de zero potência, ou 33° - 43° na posição de PMI. A literatura aconselha a utilização deste segundo intervalo para maior desempenho a baixa intensidade, retirando o máximo partido da força muscular dos glúteos, ou o primeiro, no caso de alta intensidade. É aconselhado também a adoção desta mesma metodologia de forma estática, com vista a salvaguardar a saúde do

sistema muscular dos membros inferiores ou para atletas com propensão a formar lesões nos joelhos [24, 28, 29, 31].

Em suma, apesar do sistema músculo-esquelético conseguir atenuar pequenas variações ($AFJ \pm 10^\circ$), é aconselhado configurar a altura do selim, considerando-a mais próxima dos limites inferiores dos intervalos de ambos os métodos de forma a atingir maior desempenho, maior otimização do consumo de oxigênio e rendimento global mais alto por parte do ciclista [24, 28, 29].



Figura 2.10: Ângulo de flexão do joelho (AFJ) [24].

Recuo do Selim

O recuo do selim é a configuração da dimensão longitudinal entre o eixo pedaleiro e a extremidade dianteira do selim, Figura 2.11 [32]. Este ajuste é feito através do comprimento longitudinal dos carris (*rails*) sobre o seu ponto de fixação na extremidade do espigão. Este ajuste é responsável por influenciar a disponibilização de força dos membros inferiores, como já referido. É importante ressaltar que a regulação da dimensão de recuo do selim deve ser feita em concomitância com dimensão de altura, devido ao ângulo do espigão presente nas bicicletas de ciclismo de estrada (tipicamente cerca de 73°) [3]. A dimensão do recuo pode ainda ser influenciada pela posição dos encaixes (*cleats*) e do comprimento do braço de pedal [32, 33].



Figura 2.11: Medida do recuo do selim.

Numa posição mais afastada do guidador, o recuo do selim denota maior eficiência muscular, mas com implicações, a longo prazo, nas fibras musculares e cartilagens articulares dos membros inferiores, uma extensão da perna mais lenta e uma maior oxigenação dos músculos [34]. Contrariamente, a posição do selim mais perto do guidador pode induzir maiores ângulos de articulação dos joelhos e, posteriormente, mais trabalho mecânico [3]. Quando esta posição é definida de forma exagerada, torna a extensão dos membros inferiores mais dificultada requerendo mais força para o efeito e maior desenvolvimento de tensões nas articulações do joelho. Além disso, para certas geometrias de quadro, esta posição pode ainda exigir uma curvatura mais acentuada na zona superior da coluna (*kyphosis*) e/ou uma rotação da pélvis no sentido posterior, que pode gerar deslizamento sobre a interface e perda de estabilidade aumentando a curvatura lombar (*lordosis*) [34].

Em suma, o ajuste da dimensão de recuo do selim deve ser tal, que a articulação do joelho esteja alinhada verticalmente com o eixo de rotação do pedal com a pedaleira na posição frontal horizontal (3 horas) [33]. A possibilidade de adotar uma postura adequada com rotação da pélvis no sentido anterior, permite adotar a postura fisiológica da coluna e adquirir estabilidade mais perto da zona posterior da interface, onde existe maior área de apoio. Além disso, permite retirar maior partido dos músculos extensores e fletores dos membros inferiores, minimizando as tensões nas articulações do joelho e tornozelo, aumentando a capacidade do ciclista de produzir potência de forma saudável. É ainda importante ter em atenção que a distância do guidador deve ser tal, que não obrigue os membros superiores a permanecer em extensão total bloqueados [32–34].

Ângulo do Selim

Quanto ao ângulo de inclinação do selim este é medido tendo em conta o plano do piso onde está colocada a bicicleta, Figura 2.12. A sua influência é notória na ativação da força muscular exercida pelo ciclista, assim como, na pressão exercida nos tecidos da zona pélvica [35]. Além disso, a inclinação é também responsável pela rotação natural da pélvis e uma postura fletida inconsciente do tronco, ao invés da flexão da coluna [3, 33].



Figura 2.12: Medida do ângulo do selim.

Não existe um intervalo de valores padrão, mas é aconselhada a inclinação do selim numa gama de valores de tal forma que mantenha o plano da interface paralelo ao piso,

com especial atenção aos limites máximos impostos pelo regulamento de prova [33, 36]. Na condição de inclinação positiva do piso (subida), é aconselhada uma inclinação da interface que mantenha sobre a mesma, o equilíbrio de forças imposto pelo peso do ciclista. Esta abordagem, evita o deslizamento sobre a interface e faz diminuir o efeito da força exercida nos pedais que o empurra no sentido contrário. Além disso, diminui a força suplementar que o ciclista tem de exercer, por ação dos membros superiores, para puxar o corpo no sentido do movimento [35].

2.4.2 Mapa de pressão na interface

O estudo de mapeamento de pressão dos selins é uma componente muito importante tanto na investigação do conforto do ciclista na aquisição de um novo selim, como também na criação de novos designs de selins com melhores características de acomodação, benéficas em termos biomecânicos. Assim como a postura, a configuração da bicicleta e o *design* do selim influenciam o mapa de pressão do ciclista, no entanto existem ainda outros fatores igualmente responsáveis pela magnitude e deslocamento dessas pressões.

O género do ciclista é o fator mais identificador de um mapa de pressões, pelas diferentes variantes anatómicas entre o corpo feminino e masculino. O primeiro, por norma, no ciclismo profissional apresenta menor valor de massa corporal que inerentemente se revela em valores de pressão igualmente menores comparativamente ao género masculino. Como já mencionado, as diferenças anatómicas relativas aos ossos de apoio, de largura maior para o género feminino, distinguem uma disposição de pressões diferente entre os dois géneros [12, 19, 37].

A postura é também um modificador do mapa de pressões do ciclista e relaciona-se com o género. Para posturas mais aerodinâmicas ou de tronco fletido, por exemplo entre *tops* e *drops* (parte superior e inferior do guiador, respetivamente), dá-se uma rotação natural da pélvis no sentido anterior, deslocando maiores índices de pressão para a zona anterior do selim [4, 18]. Estas variações de pressão influenciadas pela postura, são intrínsecas a cada género pelos seus centros de massa corporal distintos. O género feminino apresenta um centro de massa localizado mais baixo comparativamente ao género oposto. Quando um ciclista de género masculino modifica a sua postura, passando de *tops* para *drops*, dá-se uma redução significativa de pressão na zona anterior do selim por ação da distribuição de peso para o guiador, agora suportado pelos membros superiores. Esta diferença não é tão significativa para o género feminino, assim como na dimensão dos centros de pressão da zona posterior, maiores para o género feminino comparativamente ao masculino. Na Figura 2.13, pode ser observado o mapa de pressões de ambos os géneros entre *tops* e *drops* [18, 19, 37].

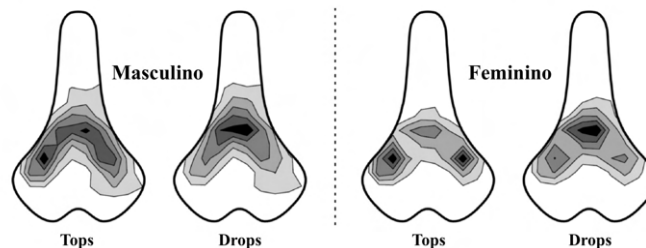


Figura 2.13: Mapas de pressões, feminino e masculino, *tops* e *drops* [19].

O tipo de interface e *design* do selim, como já referido, é também um fator muito importante na influência do mapa de pressões. Tipicamente, o tipo e espessura de enchimento esponjoso e a área útil de interface, permitem uma boa distribuição do mapa de pressões baixando picos de pressão em zonas localizadas. Também os cortes, depressões e canais que servem para realocar forças incidentes nas zonas sensíveis da pélvis, influenciam o mapa de pressões do ciclista, tal como já referido. No entanto, é importante ter em conta que maior quantidade de enchimento, não é proporcional a melhor distribuição de pressão pela interface. Além disso, existe uma clara diminuição de área útil nos modelos de selim que possuem cortes ou canais, pelo que é mandatório que haja uma boa distribuição de pressão pela interface [20, 38].

O tipo de abordagem que o ciclista adota é também um fator determinante na medição de pressões da interface do selim. Quando o ciclista adota maiores tomadas de força com maior intensidade, parte da força exercida nos pedais fá-lo impulsionar no sentido contrário ao vetor força, isto é, existe uma percentagem de força não eficaz ao movimento que faz diminuir o seu vetor de massa. Este fenómeno é transversal a todos os ciclistas e é responsável por diminuir os índices de força total exercida no selim e, conseqüentemente, a magnitude de pressão [19, 37]. Também a adoção de uma maior cadência (número de ciclos de pedalada, por unidade de tempo) induz uma diminuição de pressão total do mapa. O deslizamento acrescido do ciclista sobre o selim inerente ao aumento de movimento cíclico no tempo, faz aumentar a área de contacto com o selim e, conseqüentemente, diminuir a pressão exercida [3]. No entanto, este fenómeno nem sempre se faz notar em todos os casos, pelas assimetrias de alguns ciclistas em regimes de alta intensidade [39].

Em suma, é importante ressaltar que estes fatores são de origem subjetiva, de grande caráter estocástico e combinados inconscientemente de várias formas. Indivíduos distintos terão características anatómicas distintas e, por sua vez, mapas de pressões também distintos. No entanto, um indivíduo que adote uma certa intensidade de força na sua pedalada, com o tronco naturalmente fletido apoiado nos *drops*, terá também um mapa distinto se, por exemplo, apresentar fadiga muscular ou lesão corporal. Até os melhores atletas com grande técnica, capazes de sustentar uma postura estável durante várias horas, apresentam oscilações do seu mapa de pressões de acordo com as variáveis acima descritas. Resumidamente, cada caso é único [40, 41].

2.4.3 Lesões e Perturbações

As lesões ou perturbações associados à atividade de ciclismo de estrada, são bastante frequentes e prováveis de acontecer a todos os atletas profissionais e recreativos. Cerca de 49,4% de ciclistas reportam, no mínimo, uma *GOI - Gradual onset injury* por ano nas 3 zonas principais de incidência: lombar, joelho e pélvis. As *GOI* são lesões ou perturbações originadas por sucessivos impactos mecânicos, que colocam em causa a integridade do sistema músculo-esquelético do ser humano de forma gradual, todas de caráter intrínseco, relacionadas apenas com o utilizador e máquina [5, 27, 42–44].

Da classe de lesões relacionadas com a zona pélvica, apenas dizem respeito o *design* da interface e ajuste o selim. O contacto com o selim é o maior fator de compressões nos tendões e vasos sanguíneos, e irritação dos tecidos na zona pélvica dos ciclistas, podendo estar na origem de diversos problemas de saúde nesta zona. O stress mecânico

por incidência sistêmica ou fadiga por exaustão e fraca oxigenação dos músculos, são causas frequentes no ciclismo de estrada, principalmente nas classes de alto rendimento e elites, causando insuficiência arterial até 70% dos vasos sanguíneos e atrofio dos tendões presentes na zona pélvica [27]. Ou seja, as dimensões anatômicas da pélvis e o curso dos nervos presentes na área de contacto com o selim, definem pontos cruciais no fluxo sanguíneo saudável da zona pélvica, que devem ser tidos em conta na construção de um selim de bicicleta [12, 27, 44, 45].

A existência de pontadas e câibras, dormência e/ou diminuição da sensação da genitália, dor peniana ou labial, disfunção sexual, priapismo, incontinência urinária, laceração e permeabilidade de vasos sanguíneos, neuropatias isquiêmicas e, em casos extremos, infertilidade são algumas das causas relacionadas com a utilização excessiva do selim [5, 27, 44]. Apesar de desconhecida a verdadeira etiologia destes problemas, vários estudos apontam para o contacto excessivo com o selim [5, 27, 46]. A procura por melhores aerodinâmicas com selins não adequados e sem enchimento e/ou mal ajustados, está na origem de desenvolvimento destes problemas através da exposição em excesso. Além disso, a fricção da pele, o calor e suor acumulados atuam como aceleradores do processo [44]. Das lesões reportadas em média apenas 36% requerem intervenção médica. A incidência em cada 100h de exercício é de 0,95 para elite e 2,25 para recreativos nos dois géneros [27, 47]. No entanto, é importante ter em conta que os ciclistas de elite apresentam maior limiar de tolerância à dor e desconforto. Além disso, pelo elevado cariz competitivo das provas em que participam, são sustidos alguns incidentes [27, 47, 48].

A percepção de dor, fadiga, desconforto e, na generalidade, de efeitos de perda de desempenho são indicadores de início de desenvolvimento de lesão, pelo que algumas medidas devem ser tomadas, como por exemplo: a adoção de um estilo de condução menos aerodinâmico; a rotação posterior da pélvis e, conseqüentemente, menos incidência de pressão sobre os tecidos moles; o reajuste do selim ou escolha de um selim mais ergonómico junto de especialistas; levantar do selim repetidamente por alguns minutos, durante a tirada/percurso, de modo a restabelecer o fluxo sanguíneo [27, 44]. Em casos de persistência da dor, por aconselhamento médico, deve cessar-se a atividade em prol da saúde até que deixe de haver desconforto e/ou dor persistente [12, 38, 49].

2.5 Materiais e processos

Durante as últimas décadas as marcas de manufatura de componentes de bicicleta têm vindo a explorar vários materiais e compósitos no âmbito da competição. Os materiais poliméricos reforçados, com fibras de carbono por exemplo, são atualmente os materiais mais usados nas disciplinas de alto rendimento. Com origem na indústria aeroespacial, estas fibras foram desenvolvidas com o propósito de substituírem peças em metal de maior massa. Os constituintes dos selins ditos de competição são na sua grande maioria fabricados nestes materiais [50].

O conceito de selim mais tradicional é ainda atual, constituído por 4 componentes distintos pelo material e forma, Figura 2.14.

A **base rígida** que funciona como chassi do selim é onde os restantes constituintes são montados. É geralmente fabricada em polímero reforçado de carbono ou em polímero duro não maleável, sendo que, neste último caso, a fabricação é feita por injeção de material na cavidade de um molde. Nalguns casos, esta peça apresenta uma forma final

de interface em modelos sem enchimento, típicos de competição [51].

O **enchimento esponjoso** é o que adquire conforto e acomodação ao selim. Geralmente em espumas fechadas de látex, em gel ou misturas de gel e espumas. São montados manualmente por meio de colas, líquidas ou em *spray*, à base rígida. Contudo, nem todos os selins contêm enchimento [51].

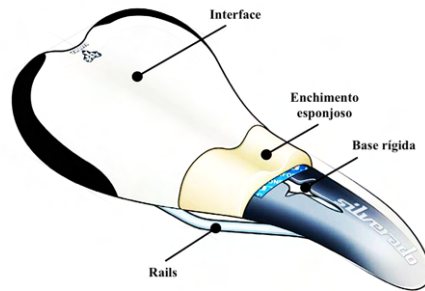


Figura 2.14: Ilustração da composição do selim.

A **interface** tem a função de atribuir caráter aderente entre o ciclista e a interface do selim. É também responsável por amarrar e proteger o enchimento esponjoso, geralmente em pele sintética, vinil, *kevlar*, tecido, *nylon*, couro animal ou combinações de várias destas. Este componente é primeiramente recortado com a forma desejada e, em seguida, centrado e colado por meio de cola ao enchimento, fixado manualmente, sob a base rígida. O excedente de material que serve apenas de ajuda ao processo de fixação é depois retirado. Pode ainda haver a possibilidade de serem montados acessórios de acabamento e proteção para esconder fendas de montagem e ou pontas cortantes salientes. Analogamente ao enchimento, nem todos os selins contêm este componente [51].

Os **rails** servem de suporte ao selim e, é a partir destes, que é acoplado à bicicleta, geralmente produzidos em metais como alumínio, aço, magnésio, titânio ou em polímeros de baixa densidade. Os carris de encaixe são cortados e moldados a partir de varas finas de diâmetro fixo, por vezes pintados, sendo posteriormente montados à base rígida por meio de colas. Existe ainda a possibilidade destes serem fabricados por injeção de materiais poliméricos ou fibras reforçadas, juntamente com a base rígida. Em alguns modelos de selins, são também responsáveis por absorver impactos mais fortes [51].

Alguns modelos de selins de competição apresentam características distintas dos modelos convencionais, que podem fugir a este método de fabricação e montagem, por motivos de desempenho. Um exemplo é a marca portuguesa GELU que fabrica os seus selins totalmente em polímero reforçado de carbono impregnado com resina *epoxy*, Figura 2.15. O processo de fabricação de um selim deste tipo, passa pela deposição de camadas de fibra com resina alternadamente na cavidade de um molde, seguida de secagem e cura a uma determinada temperatura [50].

Mais recentemente algumas marcas como a *Fizik's* e a *Specialized*, no âmbito da customização de selins, produzem os seus modelos cujo enchimento e interface é fabricado através da manufatura aditiva. Este componente montado à base rígida é produzido através da polimerização de resina de poliuretano termoplástico (TPU), formando um agregado de estruturas que trabalham como uma esponja [16].



Figura 2.15: Selim GEIU, fabricado totalmente em polímero reforçado de carbono [52].

2.6 Mercado do selins de ciclismo de estrada

Como já mencionado, o mercado atual dos selins é específico quanto às diferentes modalidades atualmente praticadas. Entre a ampla variedade de selins disponíveis para ciclismo de estrada, selecionaram-se aqueles que se destacam num cenário de *world tour*, mais populares para os atletas de elite transversais às suas preferências.

1.O selim *Fizik's Antares R3* é um modelo bastante presente nas provas de *world tour* por diversos atletas, com um *design* de interface reto, tanto na longitudinal como na transversal. É um modelo geralmente escolhido por atletas com grande flexibilidade em postura de aerodinâmica extrema. O seu preço está fixado em 149,00€ e apresenta uma massa total entre as 200 e 205 gramas, dependendo da sua largura [53].

2.O selim *Selle Italia Watt Supercarbonio Superflow* apresenta um formato mais curto e largo, e um corte de maior dimensão do que a maioria dos selins análogos. É também um selim de gama alta que é recorrente encontrar em bicicletas de atletas de *world tour* ainda que seja um modelo projetado para triatlo, segundo a marca. O preço deste modelo situa-se nos 259,90€ com um peso de 195 gramas [54].

Para além destes modelos de construção convencional, foram ainda identificados alguns modelos parcialmente fabricados através de manufatura aditiva, dentro do cenário de alto rendimento:

3.O selim *Fizik's Antares Versus Evo R3 Adaptive* é um modelo caracterizado pela sua adaptabilidade referente à esponja impressa em 3D, Figura 2.16. Através do processo de *Digital Light Synthesis* que pela projeção de luz ultravioleta polimeriza resina líquida, dá origem a uma malha de elementos com grande qualidade e resolução de acomodação. O seu preço situa-se nos 259,00€ e apresenta um peso entre as 217 e as 220 gramas, dependendo da largura da interface [55].



Figura 2.16: *Fizik's Antares Versus Evo R3 Adaptive* [55].

4.O selim *Specialized S-Works Romin EVO* com tecnologia *Mirror* é muito semelhante ao *Fizik's* explicado no parágrafo anterior, com a almofada fabricada através do mesmo

processo pela mesma empresa, *Carbon*, Figura 2.17. Segundo a marca, esta tecnologia de reprodução, "*mirror*", da anatomia do ciclista permite a redução de pressão de pico nas tuberosidades até 26%. Os preços para estes selins atingem os 470,00 €, englobando a medição e fabricação personalizada, e um peso total entre 190 a 198 gramas, dependendo da largura do selim [56].



Figura 2.17: *Specialized S-Works Romin EVO* [56].

5.O selim *Selle Italia SLR BOOST 3D TI 316 SUPERFLOW* é também caracterizado pela sua interface fabricada por manufatura aditiva, analogamente aos anteriores no mesmo material e processo, pela mesma empresa, Figura 2.18. Este modelo apresenta um corte de maiores dimensões, característico da marca, semelhante ao *Selle Italia Watt Supercarbonio Superflow* acima mencionado. O seu preço situa-se nos 359,90 € e apresenta um peso total de 200 a 205 gramas, podendo estes valores variar pela densidade da almofada [57].



Figura 2.18: *Selle Italia SLR BOOST 3D TI 316 SUPERFLOW* [57].

Capítulo 3

Fabrico aditivo

3.1 Aplicações e *design* de produto

O campo do Fabrico Aditivo (FA) está em constante desenvolvimento a um ritmo extraordinário desde o seu aparecimento em 1986 [58]. Cada vez mais, a manufatura aditiva é orientada para produtos finais, ao invés apenas de se apresentar ao serviço da prototipagem. Atualmente, o FA é aplicado a diferentes indústrias incluindo até a construção civil, biomédica e biomecânica, sendo a sua maior utilização a indústria aeroespacial, responsável por 18,2% de todo o mercado. Peças customizadas, geometrias complexas, impressão multi-material, eliminação de fases de montagem, redução de desperdício e sustentabilidade dos materiais são as vantagens do fabrico aditivo que o têm vindo a torná-lo cada vez mais atrativo [59].

A metodologia de fabricação por deposição de sucessivas camadas de material, permite o acesso ao interior da peça durante a sua construção. Este fenómeno possibilita a criação de cavidades ocas ou condutas internas, por exemplo para aumentar o fluxo de calor, atrativas à indústrias aeroespacial e automóvel. Esta liberdade de *design* confere à fabricação aditiva a possibilidade de direcionar o produto ao consumidor individual, no caso das indústrias biomédica e biomecânica, ou aceder a *stocks* obsoletos/descontinuados de forma elementar e acessível como é o caso das indústrias aeroespacial, aeronáutica e restauro. Além disso, é também uma mais valia em aplicações que requerem boa relação desempenho/peso, através da acessibilidade ao multi-material e/ou incorporação de estruturas *lattice*, com potencialidades melhoradas de acordo com o requerido. Sem esquecer também a eliminação de custos de produção associados à eliminação de fases de montagem de componentes e a redução do desperdício até 10-20% comparativamente à maquinação subtrativa [58].

Contudo, é importante perceber as suas limitações e de que forma as tornam ainda num processo em investigação e desenvolvimento. Uma destas é a anisotropia intrínseca do método, associada à deposição de camadas. Este fator, por vezes possível de ser visualizado a olho nu traduz-se numa redução das propriedades mecânicas dos produtos da impressão, tornando-as na generalidade mais frágeis. Também a aproximação a ficheiros de malhas de polígonos e a contração das peças após a impressão, criam divergências indesejadas entre o *design* virtual e o produto final. Na fase de impressão, a formação de pequenos ocos e falhas de material proporcionam possíveis fissuras e rutura estrutural da peça. Além disto, existem ainda limitações associadas aos tempos de produção que confere ao método a inviabilidade da produção de séries de peças [58].

Apesar das limitações do FA relativamente aos métodos de produção tradicionais, o interesse e credibilidade do método estão a orientar, cada vez mais, para a produção de produtos finais customizados, ao invés da prototipagem. As problemáticas associadas às falhas de impressão, são atualmente combatidas através de técnicas de pós processamento e cura que diminuem o carácter heterogéneo dos produtos de impressão. Além disso, a aplicação do fabrico híbrido vem ainda dar resposta às limitações dimensionais do FA através do recurso à maquinaria CNC para acabamento das superfícies de precisão. Novas ramos da ciência, medicina, biomédica, construção civil e indústrias automóvel e aeroespacial, continuam a investigar a adaptação do fabrico aditivo na manufatura de cartilagens, implantes, próteses, tecidos orgânicos, entre outros, que darão ainda maior amplitude ao método, enquanto meio de produção [6, 58-60].

3.2 O processo mais comum - FFF

Entre as várias tecnologias de fabricação aditiva, este documento foca-se no processo *FFF - Fused Filament Fabrication*. Este método é também conhecido pelo termo *FDM - Fused Deposition Modeling*, marca registada pela empresa americana *Stratasys*. Como o nome indica, a fabricação aditiva dá-se pela deposição de filamento de material fundido, camada a camada com o formato da peça pretendida [6, 61].

É idealmente aplicado à prototipagem rápida, permitindo aos *designers* e engenheiros testarem e refinarem peças ou produtos. O seu baixo custo torna possível a pequenas empresas e individuais o acesso à manufatura aditiva para produção em escala unitária ou pequena, comparativamente a outros processos mais dispendiosos na sua preparação, como os *SLM - Selective Laser Melting* ou *EBM - Electron Beam Melting*. Além disso, a grande variedade de oferta e informação disponível pela grande comunidade de entusiastas e autodidatas que investigam, colaboram e partilham conteúdo e aconselhamento sobre o método FFF, permitindo que este evolua a passos largos [6].

Todavia, um dos principais desafios é alcançar alta precisão e exatidão nos produtos da impressão. Tal como já referido, a abordagem de deposição de filamento resulta em linhas de divisão de camadas visíveis a olho nu, que no caso do FFF é característica do método. Noutros métodos, como por exemplo *SLA - Stereolithography* ou *DLP - Digital Light Processing*, o acabamento superficial consegue ser mais fino, com maior detalhe e precisão dimensional. Já para o método FFF, esta última depende de vários fatores como: a qualidade do modelo 3D, a calibração da impressora e o tipo de filamento utilizado. Uma das limitações mais adversa é também a faixa limitada de materiais que podem ser usados. As impressoras de FFF utilizam materiais termoplásticos cujas propriedades mecânicas são limitadas comparativamente aos metais, às cerâmicas e aos materiais compósitos. Além do mais, as propriedades da peça impressa podem ser afetadas pela orientação, temperatura de impressão e pelo arrefecimento da peça [6].

Em suma, o processo de fabricação deve ser tal que se adeque à peça e à sua função. No entanto, cada vez mais o processo FFF é melhorado, acelerado e refinado analogamente aos restantes, mas é na larga maioria das vezes a primeira escolha para aqueles que se querem estrear no mundo do fabrico aditivo. Existe também uma clara melhoria e disponibilização de filamentos de material, que possibilitam melhores qualidades e novas abordagens de pós processamento, tornando-o cada vez mais o método preferido entre os demais [58, 61].

3.3 Polímeros e compósitos

Os polímeros são considerados os materiais mais comuns na impressão 3D pela sua diversidade e facilidade de adoção transversalmente a todos os processos. São os frequentemente encontrados na forma de filamento, monómeros reativos, resina e pó. Estes são largamente estudados há vários anos em várias aplicações. No entanto, o uso de polímeros puros são apenas usados em protótipos pela falta de resistência e funcionalidade. O FFF usa polímeros termoplásticos com baixo ponto de fusão. No entanto, filamentos de material com boas propriedades e amigos do ambiente são a grande preocupação do processo de FFF [62].

A adição de fibras reforçadas aos polímeros, permitem melhorar as propriedades e comportamento mecânico destes nomeadamente, aumentar a rigidez, diminuir flexão e aumentar resistência global à cedência e fratura. Mais ainda, são também relatados melhores níveis de acabamento superficial. Também a introdução de nanomateriais permite a incorporação de novas potencialidades, capazes de melhorar e introduzir propriedades mecânicas e elétricas aos materiais já existentes. Várias indústrias despertam interesse sobre estes materiais pelas suas emancipações relativamente à condutividade térmica, resistência ao fogo e boa relação entre resistência e massa [62].

3.4 Tecnologias de polímeros e sua aplicação

Os polímeros, são materiais amplamente utilizados na manufatura aditiva visto que oferecem uma vasta gama de propriedades: flexibilidade, durabilidade e resistência química. Uma classe bastante recorrente, desses materiais são os termoplásticos, como os já conhecidos: ABS, PLA, PETG, entre outros. Estes são caracterizados pela sua mudança de viscosidade com o aumento da temperatura. Ficam facilmente moldáveis quando aquecidos, solidificando quando arrefecem, distintos na sua estrutura molecular como amorfos ou semi-cristalinos. Alguns destes apresentam funcionalidades especiais como é o caso *polyvinyl alcohol* (PVA) e *Hydrofill*, que sendo solúveis em líquidos facilitam a fabricação de suportes. Outra vertente dos materiais poliméricos são os foto polímeros, como as resinas à base de acrílico, que se apresentam, normalmente, no estado líquido, mas quando expostos a radiação ultravioleta, sinterizam e solidificam. Os polímeros são frequentemente usados em aplicações de prototipagem, visto que as suas especificações não revelam boas propriedades mecânicas, elétricas e químicas para serem aplicados a produtos funcionais [6, 62].

Uma alternativa aos polímeros são os chamados compósitos. De acordo com a norma ASTM D3878-18, um material compósito é definido como uma substância que consiste em dois ou mais materiais, insolúveis um no outro, que são combinados de forma útil para a engenharia possuindo certas propriedades, não possuídas pelos seus constituintes [6]. Este tipo de agregação de materiais é uma solução a várias limitações dos polímeros, através da inserção de materiais reforçados na sua matriz, como nano partículas ou fibras, dando-se origem a polímeros compósitos ou nano-compósitos. A sua relação de estrutura e desempenho no contexto do fabrico aditivo, onde a configuração de materiais é facilitada, adquirem novas potencialidades como a redução de peso, aumento rigidez e funcionalidades como expansão, contração, flexão, memória de forma, entre outras [6].

Atualmente as potencialidades dos materiais de impressão 3D permitem ainda torná-la 4D. Uma classe de polímeros chamados inteligentes, conseguem alterar as suas pro-

priedades físicas através de estímulos exteriores como luz, calor, humidade, eletricidade ou magnetismo. Esta classe de materiais permite a criação de produtos ditos ativos no âmbito tecnológico. São por norma adotados nas indústrias têxtil, aeroespacial, médica, eletrónica e robótica, sendo que a sua fabricação é convencional e a quarta dimensão é pertencente ao material [62]. Outra classe de materiais poliméricos são os chamados polímeros biocompatíveis, baseados em polímeros naturais, como gelatina, alginato e ácido hialurónico. Estes são comumente usados através de bio-impressão para criação de estruturas que reproduzem tecidos naturais e dão suporte ao crescimento e mutação celular. Fazem parte dos bio-materiais que potenciam a revolução nas áreas da saúde e medicina especializadas na criação de estruturas complexas que se assemelham a tecidos humanos [62].

Por fim é importante referir uma classe de polímeros transversal a todas as anteriores chamada polímeros sustentáveis. Estes são materiais obtidos através de derivados de reciclagem de resíduos, podendo estes ainda ser reciclados, biodegradados ou compostados no seu fim de sua vida útil. Embora ainda estejam em estágios de investigação, estes materiais poliméricos já apresentam aplicações em embalagens, peças automóveis e filamento de impressão 3D. A preferência por este tipo de materiais acelera a era dos polímeros sustentáveis que, a longo prazo, se traduz numa economia circular completa nesta classe.[62].

3.5 Estudos de fabrico aditivo em peças customizadas de bicicletas

A produção de exemplares de componentes de bicicletas através de fabrico aditivo é uma realidade limitada. De facto, a potencialidade da manufatura aditiva é pouco aproveitada no setor do desporto e principalmente no ciclismo, tal como já mencionado. No entanto, desde o ano de 2019, com a introdução dos selins com interface fabricados através de manufatura aditiva, referidos na Secção 9.1, abriu um novo capítulo na potencialização dos componentes e da biomecânica da bicicleta. Contudo, alguns experimentos já teriam sido elaborados com incidência em vários métodos e tecnologias [59].

O grupo *Empire Cycles*, fabricante de bicicletas de montanha em parceria com a empresa *Renishaw*, fabricante de máquinas de sinterização laser de metais, produziu em 2014 o primeiro quadro de bicicleta em ligas de titânio através da manufatura aditiva. Apesar de apresentar maior massa que os análogos de carbono disponíveis, o quadro demonstrou maior resistência à fadiga comparativamente ao polímero reforçado [63].

McEwen et al. num estudo, fabricaram dois exemplares de teste de um braço de pedalreira topologicamente otimizado para aplicação em bicicletas de estrada de competição. Fabricado em titânio e ferro, para além de haver uma redução de massa, comparativamente ao *benchmark*, demonstrou também ser mais rígido e resistente à flexão, contudo, com valores de fadiga inferiores [64].

Tanikella et al. usou o convencional FFF com filamento de PLA para produzir pedais *Black Mamba*. Os pedais quando comparados com o *benchmark*, demonstraram ser mais leves e com menor custo unitário de produção. O modelo fabricado respeita as normas de testagem *CEN - European Committee for Standardisation* [65].

Capítulo 4

Metodologias de design e fabrico

4.1 *Design* generativo

A exigência dos mercados atuais obriga a um esforço constante por parte dos projetistas a projetar novos produtos, não só funcionais mas também com aparências desiguais daquelas que já existem. No estágio inicial da conceção de *design* de produto, o projetista não consegue projetar todas as formas ou aparências possíveis, ou simplesmente não possui tempo suficiente para atingir esse feito. Esta escassez de amostragem de soluções colocaram ao dispor novas ferramentas que aceleram este processo criativo [66].

O *design* generativo, aparece como uma ferramenta geradora de diversas soluções arquitetónicas no sentido de colmatar os dilemas referidos. Com base em requisitos e restrições do projeto definidas a montante pelo *designer*, o sistema fornece variadas soluções aleatórias possíveis. Além disso, este processo pode criar soluções para problemas substancialmente complexos que, de outra forma, esgotariam recursos criativos rapidamente, tornando-o uma opção mais atraente para problemas com um conjunto de soluções grande e/ou desconhecido [66].

Atualmente o *design* generativo está inserido em diversas ferramentas aliadas a diversos algoritmos de otimização, podendo usar de base a geração aleatória de soluções, sendo um exemplo, os algoritmos de topologia.

4.2 Otimização topológica

A otimização topológica é uma metodologia numérica de otimização, geralmente aplicada na fase inicial de conceção de novos produtos baseados em modelos já existentes de forma a otimizá-los. Através da metodologia de elementos finitos, esta avalia qual o desempenho da peça tendo em conta restrições bem definidas impostas na fase de configuração. O resultado é uma distribuição ótima de material num *layout* minimizado ou maximizado, de acordo com a função objetivo imposta dentro de um espaço igualmente definido, por exemplo, minimização de massa ou maximização de rigidez [67, 68]. Com este método, a engenharia e, conseqüentemente, a indústria conseguem encontrar o melhor modelo específico para a sua aplicação.

Os benefícios que esta metodologia traz são ao nível estrutural dos produtos. Normalmente permite uma poupança de matéria-prima ainda que não se traduza em menores custos de produção. De facto, pode acrescer na dificuldade de fabrico, pelas suas formas

orgânicas e irregulares que por vezes, apenas o fabrico aditivo e a maquinação de 5-eixos conseguem satisfazer [6]. Na Figura 4.1, pode ser observado um exemplo de pré e pós de otimização de uma peça segundo um algoritmo de otimização topológica.



Figura 4.1: Exemplo de uma peça pré e pós otimização topológica (fonte: <https://m.indiamart.com/proddetail/dmls-3d-printing-2851860914962.html>).

4.3 Estruturas *lattice*

As estruturas *lattice* são malhas organizadas de forma regular de repetidos elementos ou micro estruturas, conjugadas topologicamente, que satisfazem um tipo de requisito definido. As potencialidades da sua geometria permitem a redistribuição de energia pela sua estrutura conferindo-lhes, para além de baixo peso, eleva rigidez ou vertentes de absorção de energia. Ou seja, dependendo do material, do tipo de arranjo e do tipo de elementos, as estruturas *lattice* podem ser tais que confirmam maiores ou menores níveis de rigidez, flexibilidade e ductilidade. São comumente encontradas em diversas situações da natureza como favos de uma colmeia ou a organização cristalina de átomos de um dado material [69, 70].

São cada vez mais populares no mundo da impressão 3D, devido às suas inúmeras vantagens ao nível da economia de material. O seu arranjo geométrico permite ainda boas distribuições de tensões, que resultam em produtos mais resistentes a impactos e fadiga, tornando-as ideais para aplicações que exigem resistência e durabilidade, mantendo o desempenho relativa à massa. Estas podem ainda ser projetadas com um arranjo geométrico tal, que permita maior flexibilidade e elasticidade benéfico para aplicações que requerem deformação ou absorção de vibração. Uma variante destas últimas, chamadas estruturas auxéticas, distinguem-se pelo seu coeficiente *poisson* negativo. Este fenómeno confere-lhes características especiais de compressibilidade que, quando pressionadas numa direção, as restantes direções reagem de forma semelhante [69, 71].

Em suma, as estruturas *lattice* representam uma ferramenta essencial no projeto de produtos inovadores e de alto desempenho, com uma ampla gama de aplicações onde apenas o FA as consegue aplicar [71].

4.4 Regulamentos *UCI - Union Cycliste Internationale*

As regulamentações de prova são diretivas modelo, de carácter obrigatório, de como proceder à construção, ajuste e configuração dos componentes da bicicleta, que visam ao equilíbrio da competição entre equipas e a proteção dos atletas participantes.

A respeito do selim e componentes que atuam diretamente na sua configuração, a UCI, entidade de federação de ciclismo de estrada obriga a que:

1. A geometria do selim assente num intervalo de valores no qual o seu comprimento tem de respeitar no mínimo 24 cm e no máximo 30 cm, com uma tolerância de ± 5 mm [36];
2. O recuo do selim tem de ser tal que no mínimo meça 50 mm desde a ponta do nariz até a um plano vertical que passa pelo eixo pedaleiro [36];
3. O ângulo de inclinação do selim tem de estar compreendido entre 9° positivos até aos 9° negativos, medido através do plano horizontal tangente aos dois pontos mais altos da zona anterior e posterior da interface do selim comparativamente com o piso [36].

É ainda importante salientar que existe a norma denominada ISO 4210-9:2014, direcionada à segurança dos utilizadores a respeito dos selins de bicicleta e respetivo *seatpost*. No entanto, não existe informação sobre a sua aplicação aos selins de competição atualmente disponíveis no mercado.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 5

Desenvolvimento CAD do selim

5.1 Levantamento de forma e reconstrução da interface original de estudo

Como já revisto anteriormente na secção 2.3, as interfaces dos selins são de extrema complexidade quanto ao seu *design*. Posto isto, e não sendo o *design* da interface o objetivo fulcral deste projeto, foi usado um selim cuja interface foi replicada como ponto de partida. O modelo utilizado é um selim da *Prologo*, modelo *C.one 30* de 126 mm de largura e 130 g de massa, Figura 5.1. Segundo a informação da marca, este modelo é caracterizado como um selim de alta competição de ciclismo de estrada, para uma anatomia masculina, enquadrando-se para o tipo de atleta com grande flexibilidade de movimentos e adoção de uma postura aerodinâmica média, típica de um ciclista de *worldtour*. Assenta em intervalos de largura de tuberosidades de 96 a 106 mm. É também importante referir que ainda que este seja um modelo de selim já obsoleto pelo seu comprimento e pela sua interface sem enchimento esponjoso, servirá em pleno para o projeto aqui descrito [20].



Figura 5.1: Modelo de base *Prologo C.one 30*.

O levantamento de forma surge como ponto de partida para a reconstrução da interface de base, através do processo de engenharia inversa. A digitalização do modelo foi obtida por *scan 3D laser* com auxílio da *Roland picza lpx-250* presente no Laboratório de Desenvolvimento de Produto (LDP) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Figura 5.2. Apesar do selim apresentar um plano de simetria longitudinal, foi feito o varrimento laser na totalidade da sua interface pela facilidade associada à programação

do *scanner*. Nas Figuras 5.3 e 5.4, é possível observar a malha de polígonos exportada do *scanner* e a interface já reconstruída em CAD, respetivamente. A modelação da interface foi elaborada através do *software* de CAD *Solidworks* da *Dassault Systèmes S.A.*



Figura 5.2: Processo de *scanning*.

Com a reconstrução da interface de partida, dá-se início à fase de criação do protótipo. A montante da criação de *design* e modelação do modelo, foi elaborado um plano prévio da projeção do protótipo. Com isto, estimou-se que seria vantajoso do ponto de vista temporal uma repartição do selim em duas peças distintas, desrespeitando um dos objetivos propostos. Não obstante, a elaboração de ambas as peças seguem uma ótica que conserva este requisito inicial, possibilitando a qualquer momento unir e fabricar apenas um só protótipo integral.



Figura 5.3: Malha de polígonos.



Figura 5.4: Interface reconstruída em CAD.

Assim as duas etapas principais, estudadas separadamente, referem-se: ao chassi do selim, que inclui a sua interface e suporte (chassi) de fixação à bicicleta; e à esponja, que diz respeito à almofada do selim com características amortecedoras e de conforto.

5.2 Chassi do selim

Como referido, nesta secção irá expor-se o processo de criação do chassi: interface e componentes abaixo da mesma. Como revisto anteriormente nos capítulos 2 e 3, é neste onde são elaborados ajustes de grande impacto biomecânico para sistema músculo-esquelético do ciclista, assim como a definição do seu perfil de condução.

Para a criação do design do chassi foi utilizada o *software Autodesk Fusion 360*. Como já referido na Secção 4.1, o desenvolvimento de novas soluções é trabalhoso e de grande índole criativa, para além do carácter estrutural que esta peça específica requer. Esta ferramenta chamada *design* generativo, agrega a otimização topológica nos algoritmos de geração de formas, possibilitando gerar *designs* inovadores baseados em estruturas orgânicas que facilitarão o processo de construção do chassi. Os algoritmos reagem a parâmetros de entrada bem definidos com restrições estruturais e de *design*: estruturas a conservar; obstáculos; processo e material; cargas; condições de fronteira e função objetivo, definidos em seguida.

5.2.1 Processo e Material

A escolha do processo de fabrico surge como um requisito a ser definido pelas limitações inerentes à fase de planeamento. Este projeto pretende estudar uma primeira abordagem para a criação de um protótipo de um selim funcional de produção unitária através da manufatura aditiva, na qual se reconhece que a tecnologia FFF é um excelente ponto de partida pelas vantagens já apresentadas na Secção 3.2. A máquina de impressão que se irá utilizar a jusante é a *Ultimaker S5* de dupla extrusão, presente no LDP. De entre os filamentos de material compatíveis com a marca *Ultimaker*, foram selecionados aqueles cuja funcionalidade e as propriedades mecânicas e químicas satisfaçam os requisitos de tensão que a competição de ciclismo de estrada impõe [72].

Pelo facto das bicicletas de estrada não constituírem quaisquer mecanismos de absorção, como amortecedores, a transferência de impactos entre o conjunto bicicleta-utilizador, dá-se pelos seus pontos de contacto. Assim, é importante que o selim seja rígido e resistente à fadiga, pelas vibrações do piso e carga cíclica imposta, características do ciclismo, e que no caso de rutura iminente comprometerá a segurança do atleta. É também importante considerar as condições do meio ambiente, sendo que o selim irá estar sujeito a calor e humidade, suor e chuva. Ou seja, é mandatório que este possa ser submetido a cenários extremos mantendo a sua estabilidade estrutural. Além disso, os componentes de ciclismo necessitam ainda de ser resistentes ao contacto com lubrificantes artificiais e solventes, que poderão impactar a síntese dos materiais, fragilizar ou fissurar o mesmo.

O filamento de Poliamida (PA/Nylon) surge como a seleção final comparativamente aos filamentos de Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG) e Ácido Polilático (PLA). A alta resistência e durabilidade confere ao *nylon* uma longevidade alargada quando comparado com o PLA e o PETG. Este apresenta também grande flexibilidade

com grandes valores de deformação (na ordem dos 80%), sem comprometer as suas características originais. Isto confere-lhe grande potencialidade, podendo oscilar entre grande valores de cargas repentinas sem que quebre de forma inesperada. O *nylon* apresenta igualmente uma boa resistência química, ao calor e à humidade conferindo-lhe um bom perfil para as condições do ciclismo. Além disso, apresenta grandes níveis de desempenho relativamente à sua densidade, possibilitando massas reduzidas sem sacrificar a integridade estrutural da peça.

Em suma, a rigidez, durabilidade, natureza de baixa densidade e resistência química, ao calor e à humidade, faz do *nylon* uma escolha versátil no mundo da impressão 3D transversalmente também a várias indústrias e, neste caso, para o protótipo do selim. Contudo, é importante não deixar de considerar que o *nylon* é um filamento que revela alguma dificuldade de atingir impressão de qualidade, requer parâmetros específicos e temperaturas mais elevadas que os termoplásticos mais comuns, assim como, técnicas de adesão para alcançar melhores resultados ???. Alguns destes são por exemplo *stringing*, *clogs*, *under* e *over extrusion*. O *stringing* representa o fenómeno que origina pequenos fios de filamento (cabelos), entre zonas de impressão ocas/sem ligação, devido à retração parcial do filamento no extrusor. Os *clogs* são pequenas bolhas de material que se formam através do entupimento momentâneo do bico extrusor e que por vezes ficam colados à peça como pequenos grãos de material. Os fenómenos de *under* e *over extrusion*, como a sua tradução indica, significam baixo e alto fluxos de extrusão de material que, respetivamente, causam interrompimento ou transbordo de material depositado.

5.2.2 Cargas aplicadas

A definição dos casos de carga no *software*, segue uma abordagem generalista aplicada em toda a extensão de interface, por motivos de segurança. Embora o selim induza um leque de posturas bem definidas, a criatividade do atleta na procura de melhores aerodinâmicas pode sair fora da estabilidade dita normal. Assim, a interface do selim foi dividida, de acordo com a literatura, em duas zonas convencionais: anterior e posterior, onde foram aplicadas condições de carga relativas à média máxima recomendada pelos fabricantes de selins de estrada: 85 kg (aprox. 833 N) na direção vertical. Além disso, de acordo com a literatura, foram ainda aplicados também dois casos de carga com forças médio-laterais aplicadas na zona posterior com magnitude de 20 kg (aprox. 196 N). Estas representam possíveis desequilíbrios durante o ciclo de pedal e/ou mudanças bruscas de direção. É de notar que estas últimas foram definidas com base nas forças médio-laterais retiradas da literatura de Potter et al. [19], sobre-dimensionadas até 4 vezes visto que é importante fixar a interface do selim para quaisquer deslocamentos no plano da interface.

5.2.3 Inserção do modelo no algoritmo de geração de *designs*

Com os parâmetros de entrada definidos, a inserção do modelo no algoritmo de geração de soluções do *Fusion 360* é progressiva. A metodologia de geração de volume por obstáculos foi a preferida para este caso, para que haja completa liberdade do *software* para gerar volume de peça no espaço disponível entre os corpos (*bodies*) definidos como aqueles a preservar. A definição destes pode ser vista na Figura 5.5 onde se encontram legendados a cor vermelha os corpos definidos como obstáculos geométricos e a cor verde aqueles cujo a geometria deve ser preservada. Estes últimos são a interface do selim reconstruída, com 3 mm de espessura similar ao *benchmark* e o espigão com diâmetro

de secção de 31,8 mm, valor arbitrário de entre os valores *standard* para espigões de bicicleta.

A escolha do espigão para a fixação do selim, ao invés dos tradicionais *rails*, advém da liberdade de *design* intrínseca ao fabrico aditivo. A possibilidade de incorporar vários componentes num só, poderá estar na origem de um incremento de desempenho operacional do selim, suporte e espigão, principalmente na redução de massa do conjunto selim. Além disso, existe também um aumento de produtividade eliminando fases de montagem, ajuste e calibração. Contudo, é importante ter em especial atenção que na fase de projeto as variáveis associadas ao *bike-fit* sejam bem definidas, sendo que não serão possíveis efetuar ajustes a jusante da sua fabricação.



Figura 5.5: Definição dos *bodies* objetivo em ambiente *Fusion 360*.

Ainda que para o projeto deste protótipo não se tenha seguido um caso de estudo específico, foram selecionados valores realistas relativos ao ângulo de inclinação e recuo de selim, com base na literatura disponível e num modelo físico, configurado para um ex-atleta masculino de 1,78 m de altura. Com isto, fixou-se um ângulo de inclinação 4° da interface segundo um quadro convencional de bicicleta de estrada (ângulo de *seat-tube* aprox. 73°). Para a dimensão do recuo do selim foi considerado uma dimensão de 12 mm no sentido anterior, relativamente à posição de fixação do selim *benchmark* Prologo originalmente utilizado. Este valor é representativo da média dos valores de recuos (*set-back*) para um espigão convencional de bicicleta de estrada. Estes valores podem ser observados pelo esquema da Figura 5.6.

A função objetivo selecionada segue ótica de minimização de massa do corpo gerado com um fator de segurança mínimo de convergência selecionado de 2.0, salvaguardando as características heterogêneas do produto de impressão por FFF. Foram também dimensionados deslocamentos verticais máximos de 1 mm para ambas as zonas da interface, que permite definir a flecha máxima que se quer atribuir ao algoritmo. Por fim, abstiveram-se a consideração de restrições relativas à fabricação sabendo *à priori* que a dupla extrusão permitirá liberdade total de *design*.

Durante toda a fase de obtenção de resultados, o algoritmo do *Fusion 360* demonstrou ser aleatoriamente demorado em alguns estudos e, muitas vezes, de natureza estocástica e imprevisível nas soluções geradas. Alguns exemplos foram soluções completamente sólidas e outras com apenas alguns elementos de suporte entre o espigão e a interface. Para colmatar estas adversidades, foram ajustadas as magnitudes de carga num valor máximo de 870 N e modificado o comprimento do espigão sobre o seu eixo. Para além disso, foi ainda estudada a influência de cargas assimétricas, típicas dos movimentos

cíclicos de pedalada, que não se demonstraram influentes nas soluções geradas.

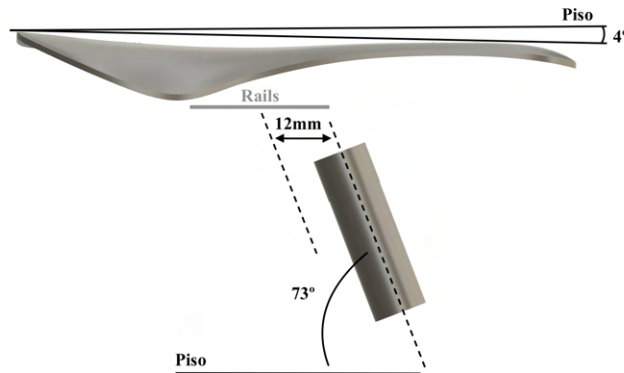


Figura 5.6: Esquema de definição da posição do espigão em ambiente *Fusion 360*.

De entre as várias soluções obtidas foram selecionadas aquelas cujas características estruturais são aceitáveis relativamente ao objetivo pretendido. O *software* fornece alguns parâmetros de comparação e seleção. O modelo selecionado, presente na Figura 5.7, apresenta coeficiente de segurança igual a 2,12; deslocamento global máximo de 2,81 mm; tensão de Von Mises igual a 33,06 MPa; massa total igual a 346 g.

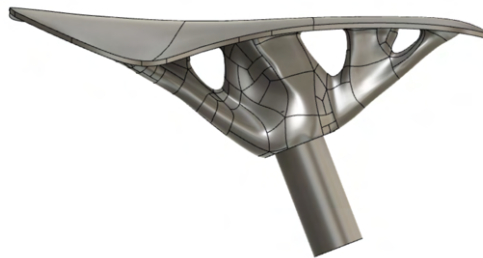


Figura 5.7: Modelo do chassi selecionado para impressão.

5.3 Estrutura de amortecimento - Esponja

À semelhança da Secção 5.2 de elaboração do chassi, foi projetada a construção da esponja do selim que, como o nome indica, é a peça que irá proporcionar conforto ao utilizador. Esta é também o segundo componente que permite ser customizado, impactando na origem e desenvolvimento de diversos problemas associados aos tecidos da pélvis. Assim, reorientar a área de contacto do utilizador com a interface, é algo que pode corrigir estes problemas, como revisto na Secção 2.4.3.

A grande maioria das esponjas dos selins convencionais apresentam rigidez constante em toda a sua área de apoio. Isto provoca pontos de pressão, que se fazem notar através de dor, desconforto e cansaço muscular. Esta força extrema exercida sobre uma área de

pequenas dimensões, é resultado da morfologia do ciclista, quando este contacta com uma superfície que o acomoda de igual forma em toda essa área. Isto resulta na maioria dos casos na fragilização e destruição de tecidos nas zonas situadas imediatamente abaixo das tuberosidades, principalmente quando pressionado por longos períodos, como é o caso do ciclismo de estrada [19, 27].

Na Secção 2.4.3, foi estudado que estas perturbações ou lesões podem ser colmatadas através do descanso ou pausa indeterminada da atividade de ciclismo. Contudo, os atletas de competição impõe metas que não estabelecem limites físicos e nem sempre priorizam a saúde dos próprios [38, 44]. Mecanismos como os já referidos cortes, depressões ou canais, foram outrora inovadores e revolucionários no âmbito do ciclismo dito saudável. Contudo, é necessária uma contínua humanização da bicicleta e, para este caso, da interface do selim para que esta consiga "espelhar" a morfologia do atleta.

Variar a rigidez da esponja para ir de encontro à força exercida pelo ciclista em cada zona da interface, moldando-se de acordo com o seu contacto, contribui para a distribuição da pressão de forma mais equilibrada, atenuando a magnitude dos picos de pressão por uma área maior. Ou seja, ao invés da atribuição de uma só zona de rigidez global em toda a interface, a personalização da rigidez da esponja, à vista da morfologia do atleta, poderá estar na origem de maior conforto na condução. Uma interface perfeitamente alinhada para um ciclista com uma determinada postura fixa num caso ideal, apresentaria, na medição do mapa de pressões, apenas um só valor global de pressão. Todavia, é importante ter em conta que os suportes de massa do ciclista deve ser sempre feito em maior percentagem sobre os seus apoios principais, as tuberosidades isqueáticas [50].

Nesta secção irá ser exposto o processo de projeção de uma esponja capaz de redistribuir as cargas de maior magnitude a uma área maior, diminuindo os valores pico de pressão e, conseqüentemente, favorecer o conforto e saúde do atleta. Além disso, pretende-se ainda minimizar a incidência sobre as zonas do períneo.

5.3.1 Definição das características da interface

À semelhança da construção do chassi, foi utilizada a mesma interface reconstruída a partir do levantamento de forma descrito na Secção 5.1. A este foi adicionado um corte na interface em forma de *slot* com comprimento de 140 mm e diâmetro de 15 mm, Figura 5.9. Apesar da interface do modelo original não possuir quaisquer mecanismos de redução de pressões na zona do períneo, esta característica foi incorporada no protótipo pela vasta gama de problemas associados ao constrangimento dos nervos e vasos sanguíneos, como já supramencionado.

Para o mapa de contacto entre o atleta e o selim, ressaltando de que não foi seguido um modelo anatómico específico pela escassez de informação disponível na revisão de literatura, foi adaptado ao modelo de selim de trabalho, um mapa de pressões exemplo, referente a uma população de ciclistas com peso médio de 73 kg Potter et al. [19]. Importa referir que as características do mapa de pressões se enquadram no perfil de um ciclista profissional de elite, de género masculino de classe *sprinter*. Mais ainda, para a fase de dimensionamento da interface, em seguida descrita, foram adaptadas algumas dimensões geométricas referentes às diferenças entre a interface de trabalho e a relativa aos mapas de pressões retirados da revisão de literatura. Em todo o caso, no dimensionamento, foram salvaguardadas as dimensões e áreas originalmente medidas dos mapas, assim

como, centros de pressão e larguras relativas aos gradientes, adaptando o seu referencial global visando a interface de trabalho [19, 73].

Este redimensionamento conta com um acréscimo médio de 14,25 mm face a extremidade posterior (traseira) do selim de trabalho. Ou seja, a linha anterior-posterior que na revisão de literatura é definida a uma distância de 93,75 mm, é atualizada para 108 mm ($93,75 + 14,25$ mm) como referência na interface de trabalho, Figura 5.9. Este valor foi aproximado através da sobreposição de ambas as interfaces.

A abordagem tomada para este mapa prioriza o gradiente de zonas na direção perpendicular à longitudinal das tuberosidades isqueáticas. De facto, quando o ciclista altera a sua postura, o seu mapa de pressões evolui em todas as direções da interface, anterior e posterior, direita e esquerda, que pode ser revisto na Figura 5.8. É possível perceber um deslocamento sobre a interface em forma de V, identificado na figura a cor vermelha. Esta configuração é a marca do contacto do osso sobre os seus eixos longitudinais cuja direção transversal aos mesmos, identificado na figura a cor amarela, permanece aproximadamente constante nas posturas registadas em Potter et al. [19]. Assim, pretende-se dar ênfase a estas visto que as maiores oscilações do mapa dão-se no sentido longitudinal das tuberosidades. Ressalve-se que a tentativa de replicar o gradiente de pressão em ambas as direções, poderá recair em desconforto para outras posturas que não as originalmente replicadas, pelo que apenas se irá direccionar a interface às direções transversais e às extremidades longitudinais do osso referentes das posturas *tops* e *drops* registadas em Potter et al. [19].

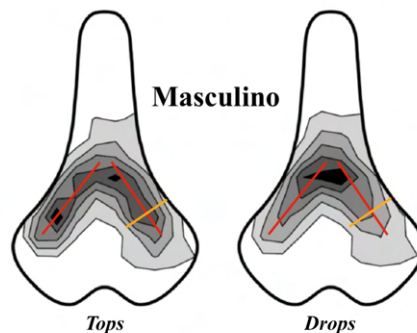


Figura 5.8: Mapa de pressões exemplo seguido, adaptado de [19].

Dessa forma, para permitir a completa acomodação do atleta e para que este se movimente sobre o selim sem que haja imposição de qualquer postura preferencial, foram apenas repartidas 3 zonas principais atribuídas à interface de trabalho. A zona Z1, dita mais macia e a zona Z3, mais rígida, sendo a zona Z2 a intermédia entre as duas anteriores identificadas na Figura 5.9 a cor vermelha Z1, cor amarela Z2 e a cor verde Z3.

A definição da área de cada zona surge como o primeiro marco para a definição de rigidez atribuída a cada zona. Clarifique-se que a área total de contacto entre utilizador-selim permanecerá constante, sendo que não é pretendido um aumento de área útil, mas uma reformulação da rigidez em cada área de modo a que haja uma distribuição mais homogénea por toda a área de contacto. Em seguida foram assinalados os centros de maior incidência de pressão, para *tops* e *drops*, a respeito do intervalo de indivíduos ao qual o selim se destina pela sua largura (largura de tuberosidades entre 96-106 mm): *tops*

com valores entre 68,5 e 71,0 mm e *drops* com 77,5 e 78,8 mm, representados a cor azul na Figura 5.9 [19]. O ângulo pélvico para a incidência das tuberosidades fixou-se a 68°, valor médio representativo da população referente ao mapa e de acordo com a incidência do mesmo, representado na Figura 5.9 a linha de traço interrompido.

Em seguida foram definidas as larguras de cada zona, paralelas à interface de acordo com a sua curvatura. O cálculo de valores de pressão associados ao mapa de pressões para ambas as posturas revelou, incrementos de magnitude de pressão maiores entre as segunda e terceira zonas, comparativamente às primeira e segunda zonas, e terceira e quarta zonas, ordenadas da mais escura para a mais tênue, Figura 5.8. Assim, para a zona Z1 foi atribuída uma largura de 19 mm, resultado do agrupamento da primeira e segunda zonas, seguida da zona Z2 com uma largura de 41 mm provinda do agrupamento da terceira e quarta zonas. À restante área foi atribuída a zona Z3, Figura 5.9. As zonas Z1 e Z2 foram prolongadas em 18 mm e 36 mm, respetivamente, no sentido posterior na direção longitudinal à zona de incidência dos tuberosidades, assinalado na Figura 5.9. Esta extensão posterior de ambas as zonas deve-se à possibilidade do ciclista procurar mais acomodação na zona mais larga do selim, por exemplo em posições menos aerodinâmicas [19].

A respeito da zona anterior, foram também extendidas as zonas Z1 e Z2 até um total de 40 e 60 mm, respetivamente, desde a linha anterior-posterior, à semelhança do mapa de pressões da literatura, Figura 5.9

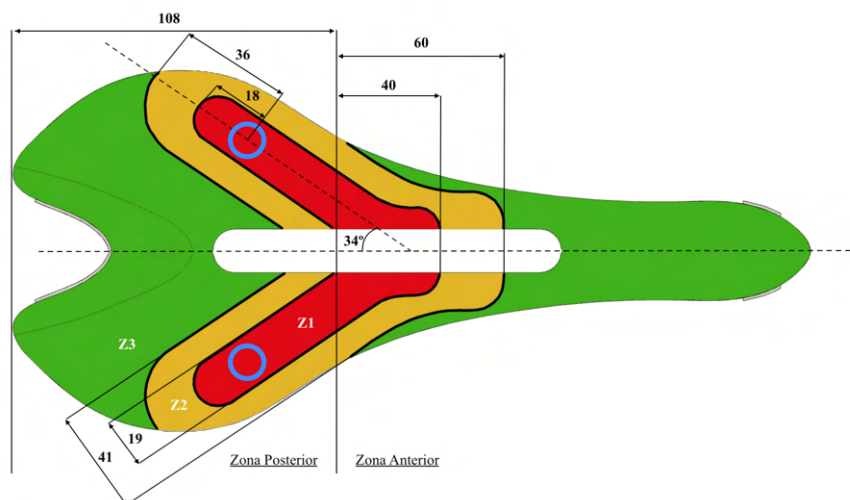


Figura 5.9: Mapa de zonas da interface e rigidez ($E_{equiv.}$).

5.3.2 Atribuição de valores de rigidez

Na atribuição dos valores de rigidez, é necessária ter em consideração o equilíbrio global da pressão exercida sobre o selim. Isto é, como definido, a área útil da esponja permanecerá constante pelo que também a força aplicada ao selim terá de permanecer igualmente constante. Assim, como ponto de partida, foi atribuído o valor de rigidez à zona Z2,

semelhante à interface padrão. Ou seja, o saldo global de incidência de pressão sobre a interface, distribui-se da zona Z1 para Z2 e da Z2 para a Z3. Assim, o decréscimo de rigidez da zona Z1 terá de ser compensado pela zona Z3, respeitando uma ordem lógica da mais macia para a mais rígida.

Na impossibilidade de aceder ao valor de rigidez do enchimento esponjoso do selim referente aos mapas de pressões, foi atribuído um valor de rigidez *standard* de um enchimento esponjoso típico de um modelo de selim similar. Assim, o valor de rigidez atribuído é de 1,10 MPa, representativo de uma espuma de poliuretano de densidade entre os 90 e os 120 kg/m^3 de cerca de 10 mm de espessura com comportamento linearmente elástico em todo o seu curso de deformação [74, 75]. É importante notar que este valor é uma potencial fonte de erro sistemático durante todo o processo de cálculo e dimensionamento dos valores de rigidez da esponja.

O cálculo dos valores de rigidez objetivo ($E_{equiv.obj}$) começa por se reger ao comportamento linear elástico dos materiais através da fórmula $E_{equiv.} = P/\varepsilon$, em que $E_{equiv.}$ simboliza o valor de rigidez da zona em MPa, P a pressão exercida quando o ciclista que contacta com a interface em MPa e ε a deformação vertical imposta por essa pressão. Na Tabela 5.1, compilam-se os valores de pressão, área e largura transversal média, dos mapas de pressões de trabalho da Figura 5.8 e a respetiva repartição em zonas referentes à interface de trabalho, definidas anteriormente. É importante notar que os valores da tabela representam valores globais referentes às duas posturas e à média de valores de largura, entre ambos os lados direito e esquerdo do selim.

Tabela 5.1: Repartição de zonas referentes à interface de trabalho.

Zonas	P [MPa]	A [mm ²]	Largura média [mm]
Z1	0,050	144	9,3
	0,046	1742	18,5
Z2	0,040	2161	31,0
	0,036	2362	40,7
Z3	0,031	3462	48,9

O valor máximo que permite equilíbrio dos valores globais de pressão exercidos sobre o selim, situa-se a 26% abaixo do valor pico de pressão. Este dado é particularmente curioso, visto ser o valor que a marca *Specialized* anuncia como sendo o máximo valor de redução das pressões no seu selim de tecnologia *Mirror* [76]. Na tabela 5.2, são compilados os valores de pressão calculados para o caso ideal limite, assim como os respetivos valores de rigidez ($E_{equiv.}$) a atribuir a cada zona.

É de notar que esta abordagem de cálculo visa o equilíbrio global de pressões da interface, leva a um máximo de redução de 26% em relação ao valor de maior magnitude de pressão, tal como referido. Contudo, especula-se que tal possa não se rever no caso real. Esta descida de pressão calculada revista numa descida de rigidez ($E_{equiv.}$), tem em conta um valor de deformação vertical constante da esponja, fenómeno que poderá não acontecer pela heterogeneidade relativa ao tecido humano que contacta com o selim. No entanto, foram adotados estes valores piloto, sendo que na fase de experimentação poderão ser confirmados. Mais ainda, os benefícios da impressão 3D permitem a exploração

desta abordagem através do custo reduzido na aquisição do protótipo.

Tabela 5.2: Redistribuição dos índices de pressão e atribuição de rigidez objetivo ($E_{equiv.obj}$) por zona.

Zonas	P [MPa]	Diferença de pressão %	P [MPa]	Rigidez obj. ($E_{equiv.obj}$) [MPa]
Z1	0,050	-26,0	0,037	0,81
Z2	0,040	-8,5	0,037	1,01
Z3	0,031	+19,1	0,037	1,31

5.3.3 Análise exploratória de elementos de amortecimento

Como já revisto na Secção 4.3, a adoção de padrões de micro estruturas *lattice* representam uma ferramenta ideal para a construção de algo funcional como a esponja do selim, através do fabrico aditivo. O *design*, modelação e teste de elementos surgem como os primeiros passos no processo de desenvolvimento de uma malha de repetidos elementos para uma finalidade definida. A montante da criação e seleção de elementos, foram consideradas algumas restrições de volume e fabricação:

1. O volume de da esponja é limitado à área da interface e uma espessura máxima de 10 mm, considerando uma espessura de uma potencial interface de contacto. O selins de competição apresentam apenas finas camadas de esponja pelo seu caráter competitivo. Na mesma ótica, o limite definido vai de acordo com o mercado atual, salvaguardando o desempenho;
2. A estrutura deve permitir flexibilidade em 4 direções: anterior, posterior, esquerda e direita. Elementos de geometria triangular são excluídos;
3. A flexibilidade da estrutura deve priorizar a componente vertical, para que não seja imposto ao utilizador, deslocamentos sobre a interface do selim;
4. Os elementos devem ser auto suportados (inclinação mínima de 45° relativamente ao plano da mesa de impressão) ou, em caso específico, serem totalmente horizontais, que permita impressão sem necessidade de suportes através do fenómeno de *bridging*.

Por conseguinte, elaborou-se uma análise aprofundada de 3 geometrias de elementos distintos, tendo em conta o primeiro processo de filtragem. Para o processo de análise destes elementos foi utilizada a curva do material *nylon* representada no Gráfico da Figura 5.10. Esta curva foi obtida através de 2 ensaios de tração de provetes de material *nylon* impressos em 3D com 100% de densidade e orientação longitudinal segundo a norma ISO 527-4:2021. Os ensaios foram realizados com o auxílio da máquina *Shimadzu AGS-X* com uma célula de carga calibrada de 10 kN, à temperatura ambiente e uma velocidade de 10 mm/min, em conformidade com a norma ISO 9001:2015.

É de notar que ao longo das próximas secções, todos os ensaios numéricos foram elaborados com auxílio da curva referente ao comportamento do *nylon* através do *software*

Solidworks. Os ensaios experimentais de compressão realizados, tiveram o auxílio de uma máquina de ensaios universal: *Shimadzu AGS-X* com uma célula de carga calibrada de 10 kN, à temperatura ambiente e a uma velocidade de 10 mm/min, em conformidade com a norma ISO 9001:2015.

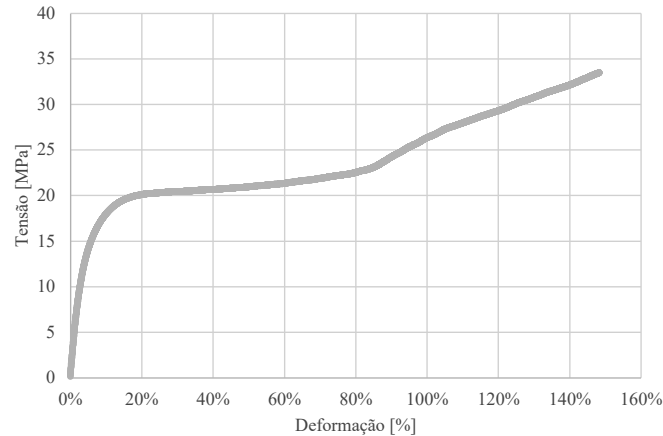


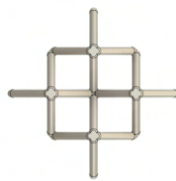
Figura 5.10: Curva experimental de tensão *versus* deformação do *nylon* transparente *Ultimaker*.

Elemento 1: octaedro

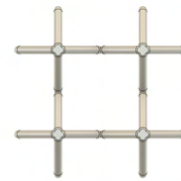
O primeiro *design* levado a análise apresenta uma geometria cúbica numa orientação octaédrica, provinda da junção vertical de dois elementos *Body-Centered Cubic (BCC)*, Figura 5.11a. Para este elemento foi fixada a sua altura máxima em 10 mm e variados os diâmetros de secção das hastes do elemento no intervalo discreto = {1; 1,2; 1,6; 1,8} mm. Estas dimensões foram atribuídas de forma arbitrária, impondo à variável de diâmetro de secção a função de controlar a rigidez ($E_{equiv.}$) do elemento. Foram também replicadas 2 estruturas com interligação dos elementos em 2 orientações distintas, cruzada e paralela, demonstradas nas Figuras 5.11b e 5.11c, respetivamente.



(a) Elementar.



(b) Arranjo cruzado.



(c) Arranjo paralelo.

Figura 5.11: Elementos octaédricos.

Foram fabricados e elaborados ensaios de compressão a 4 exemplares de entre todos os valores de secção referidos. É importante salientar que a partir destes ensaios, foi validada a curva de material do *nylon*, Figura 5.10, com registo em vídeo de movimento lento do comportamento do elemento durante a compressão. No Gráfico da Figura 5.12,

são apresentadas as curvas experimentais de pressão *versus* deformação referentes aos diferentes diâmetros dos espécimes octaédricos individuais. Para este tipo de geometria os espécimes impressos demonstraram ser equivalentes quando às dimensões virtuais do CAD, verificando-se apenas um desvio médio máximo de 0,1 mm no diâmetro de secção de apenas alguns octaedros, que foram a montante desconsiderados do ensaio experimental de compressão.

Para esta geometria observa-se um comportamento inicial linear e, após a zona de cedência, um comportamento maioritariamente constante. Esta característica pode ter implicações ao nível estrutural do elemento para oscilações de pressão na interface do selim, provindas de irregularidades do piso. Esta é uma preocupação importante, visto que estes impactos são da ordem dos 4500 N, cerca de 9 vezes superiores à carga total assente no selim, danificando o elemento irreversivelmente [74]. É possível observar uma tendência na diminuição da deformação limite elástica com o aumento do diâmetro de secção de 7,3%, 6,0%, 5,0% e 3,2%, relativamente aos octaedros de 1,0 mm, 1,2 mm, 1,6 mm e 1,8 mm, respetivamente. À semelhança do observado pelo comportamento do provete, apesar da deformação imposta ao elemento, dá-se um retrocesso lento, demorando alguns minutos até os elementos voltarem à sua forma original. Contudo, este fenómeno terá de ser mais rápido na ordem da elasticidade, pela rapidez de carga e descarga que o movimento cíclico do ciclismo impõe. Para a adoção deste elemento, espera-se o seu sobre-dimensionamento inevitável para o seu funcionamento duradouro da esponja e seus elementos.

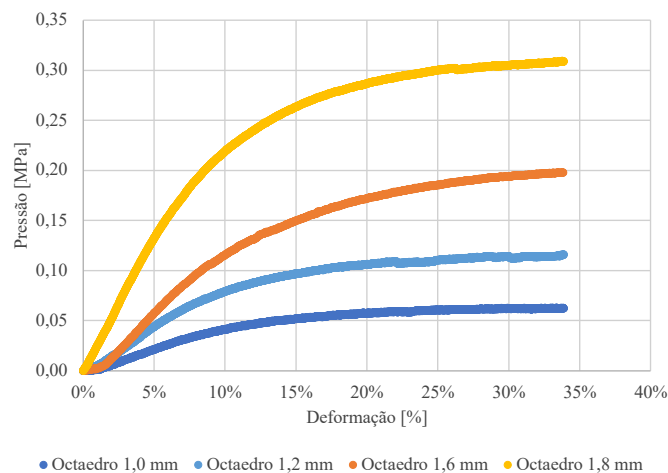


Figura 5.12: Curvas experimentais de pressão *versus* deformação dos espécimes octaédricos elementares.

Relativamente aos agregados de elementos octaédricos, as respetivas curvas de Pressão *versus* Deformação, podem ser observadas no Gráfico da Figura 5.13. Pelo seu comportamento idêntico entre espécimes, foram apenas expostas arbitrariamente as curvas relativas aos exemplares de 1,2 mm de diâmetro de secção. É possível reparar que para o caso das malhas interligadas tanto na geometria cruzada, como na paralela, apresentam um máximo de pressão localizado aproximadamente na zona de cedência, seguido por decaimento de rigidez ($E_{equiv.}$) com o decorrer do curso de compressão. Comparativamente aos modelos individuais, as geometrias interligadas apresentam um decréscimo

de rigidez ($E_{equiv.}$) de, aproximadamente, 2,5 vezes superior, facto que, pelos motivos anteriormente descritos, poderá pôr em causa a viabilidade da malha.

Durante o tratamento de dados foi ainda possível observar diferenças de magnitude de rigidez ($E_{equiv.}$) entre espécimes da mesma secção. Isto é, espécimes fabricados nas mesmas condições apresentam incremento/decremento do valor de rigidez ($E_{equiv.}$), entre si. No Gráfico da Figura 5.14, pode observar-se as curvas de Pressão *versus* Deformação para dois espécimes impressos ao mesmo tempo nas mesmas condições.

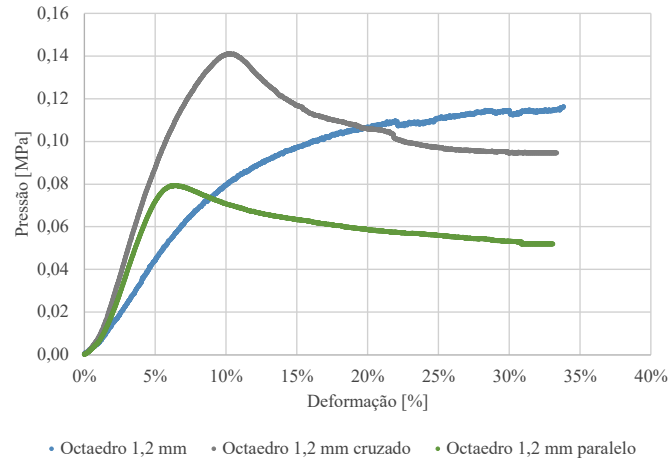


Figura 5.13: Curvas experimentais de pressão *versus* deformação dos espécimes octaédricos elementar e trancados.

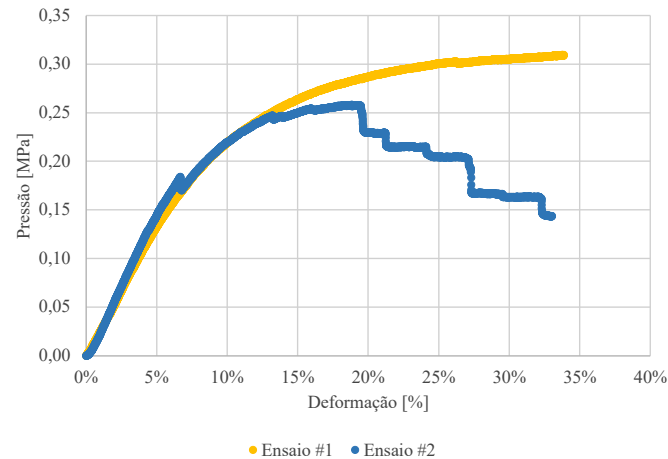


Figura 5.14: Curvas experimentais de pressão *versus* deformação dos espécimes octaédricos elementares exemplo de aleatoriedade da qualidade individual.

Os patamares de queda de pressão na curva Ensaio #2 representam a cedência do elemento pela sua descolagem de camadas de impressão. Este fenómeno é particularmente negativo, pela perda de capacidade elástica do elemento para os ciclos de carga posteriores. Contrariamente, o mesmo acontece para maiores valores de rigidez ($E_{equiv.}$).

Estas variações demonstraram ser aleatórias, pelo que de forma operacional, quando aplicada à esponja, criam irregularidades na mesma de forma também aleatória, que poderá invalidar o conforto do ciclista. Assim, é importante tomar algumas medidas no caso de adoção deste elemento, como o sobre-dimensionamento da estrutura, já referido, ou a inclusão de elementos bloqueadores de curso, salvaguardando a integridade da estrutura.

A tabela 5.3 culmina a análise deste elemento octaédrico com a seleção dos espécimes que integram os valores de rigidez objetivo ($E_{equiv.obj}$). É importante notar que os diâmetros de secção selecionados foram arredondados, por defeito, às centésimas.

Tabela 5.3: Seleção de elementos octaédricos.

Zonas	Rigidez obj. ($E_{equiv.obj}$) [MPa]	Elemento	Rigidez elem. ($E_{equiv.}$) [MPa]
Z1	0,81	Octaedro 1,25 mm	0,81
Z2	1,10	Octaedro 1,40 mm	1,09
Z3	1,35	Octaedro 1,55 mm	1,35

Ressalve-se que os diâmetros de secção referidos na tabela, foram estimados face aos resultados dos ensaios experimentais pelo notório comportamento idêntico entre todos. No entanto, numa fase posterior para a seleção desta geometria, serão fabricados e validados esses mesmos espécimes através de metodologia experimental.

Durante o fabrico dos elemento octaédricos levados a ensaio, o filamento de *nylon* demonstrou ser bastante problemático quanto à sua viscosidade, revelando muita dificuldade na impressão de áreas de secção inferiores a 1 mm^2 , para o bico de impressão (*nozzle*) de dimensão 0,4 mm. É importante notar que este processo de experimentação e a consulta de literatura, teve influência no redimensionamento dos elementos a jusante, e permitiu o refinamento dos parâmetros de impressão para o *nylon*, para elementos de pequenas dimensões.

Elemento 2: arco

A segunda geometria de elementos desenvolvida e testada foi a geometria em forma de arco, a qual agrega várias repetições paralelas e espaçadas entre si, Figura 5.15. Este *design* é uma variação do octaedro anterior, mas com uma maior zona de dobragem nas suas hastes.

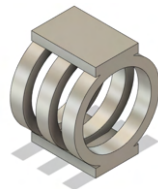


Figura 5.15: Elemento arco.

Analogamente aos anteriores, foram igualmente impressos e elaborados ensaios de compressão de 4 unidades deste elemento com dimensões piloto, de diâmetro exterior

igual a 10 mm e diâmetro de secção igual a 1,5 mm. O Gráfico da Figura 5.16 exhibe a curva de Pressão *versus* Deformação do elemento.

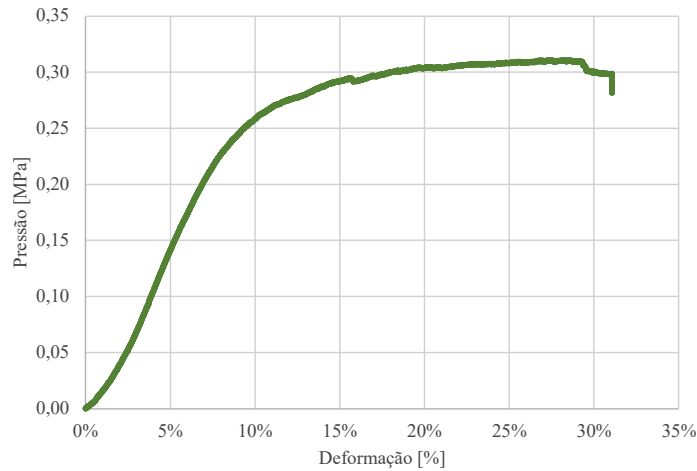


Figura 5.16: Curvas experimental de pressão *versus* deformação do espécime arco.

O comportamento observado pela curva anterior demonstra ser semelhante ao elemento octaedro, apresentando uma zona elástica seguida de uma zona de estabilização de rigidez ($E_{equiv.}$). No entanto, demonstra um comportamento mais rígido quando comparado com o análogo octaédrico, apresentando um comportamento elástico até 8,2% de deformação para uma pressão de cedência de 0,22 MPa. Contudo, durante os ensaios, perceberam-se pequenos ruídos de quebra da estrutura do elemento, fenómeno que não é claramente perceptível pela curva do gráfico. No entanto, é aparente a cessão dos elementos quando inspecionados fora do ambiente de ensaio, Figura 5.17. A quebra do elemento e os ruídos percebidos desde o início do curso de compressão, podem ser explicados pela descolagem de camadas imposta, durante o curso de compressão. Este fenómeno é fruto da inexistência de uma zona definida de dobragem do arco, que consequentemente impossibilita o elemento de acompanhar a curvatura de dobragem durante a sua compressão. Uma forma de colmatar este problema seria a impressão do espécime numa direção distinta, impossível para este espécime pela sua geometria circular que não permite o acesso ao método de *bridging*. Assim, e pelo registo de quebra do perímetro do arco em todas as unidades ensaiadas deste elemento, o mesmo foi desconsiderado do processo de construção da esponja.

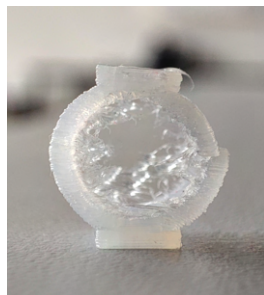


Figura 5.17: Elemento arco danificado.

Elemento 3: Ponte flexora

O terceiro elemento é distinto dos anteriores e da sobreposição organizada de elementos flexores em forma de pontes, replicados de forma organizada, Figura 5.18. Estes elementos, comparativamente aos anteriores, são mais compactos e complexos quanto à sua combinação de dimensionamento.

Particularmente, a geometria desenhada não faz repetir a sobreposição de camadas entre cada andar de igual forma, característica específica que impede a limitação do curso de flexão das camadas superiores pelas inferiores. Assim, a resultante de repetição linear desta estrutura dá-se a cada 3 camadas sendo que, a terceira (topo), apenas acompanha o movimento da camada abaixo. Este fator confere-lhe um gradiente uniforme de ondulação, mesmo quando pressionada pontualmente. A flexão máxima pode ainda ser controlada pela dimensão de altura das pontes, impedindo que se danifiquem irreversivelmente. Quando comprimida, a malha demonstra comportamento auxético [71].

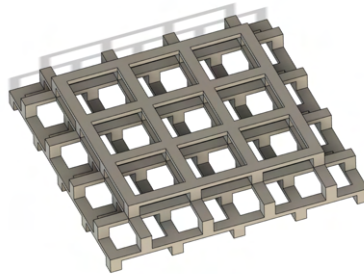


Figura 5.18: Malha de elementos de ponte flexora.

Durante a fase de dimensionamento, foi atribuída como variável da flexibilidade, a dimensão de espessura das pontes (e). Além disso, e através da aprendizagem adquirida na fabricação dos elementos anteriores, foram fixadas *à priori* algumas variáveis vantajosas ao seu fabrico, sendo estas a altura (h) com um valor de 2 mm, a largura (w) com um valor de 2 mm e a base (b) com um valor de 2 mm, legíveis na Figura 5.19. Restando apenas a definição do comprimento das pontes, foi elaborada análise numérica, respeitando a curva de comportamento do *nylon* da Figura 5.10, visando uma boa resolução de elementos *versus* os constrangimentos de impressão para a dimensão de espessura. Assim, foi atribuído um comprimento de ponte (L) de 9 mm, perfazendo uma malha agrupada em 3 camadas sobrepostas de elementos 13 mm \times 13 mm.

À semelhança dos elementos anteriores, no Gráfico da Figura 5.20, são demonstradas as curvas de Pressão *versus* Deformação dos espécimes impressos e ensaiados à compressão de espessura variada no intervalo discreto = {0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 1,2} mm. Note-se que a legenda do gráfico da Figura 5.20, refere a espessura registada em 4 ensaios a cada um dos espécimes fabricados.

Pela observação das curvas é possível evidenciar um comportamento muito próximo do linear, favorável às implicações anteriormente referidas relativamente às oscilações de pressão, não sendo observados possíveis sinais de comprometimento da estrutura. Todos os elementos ensaiados não apresentaram danos na sua integridade, não necessitando de adição de mecanismos de limitação de curso. Além do mais, ao contrário dos elementos octaédricos, estes retornaram à sua aparência original imediatamente após o ensaio.

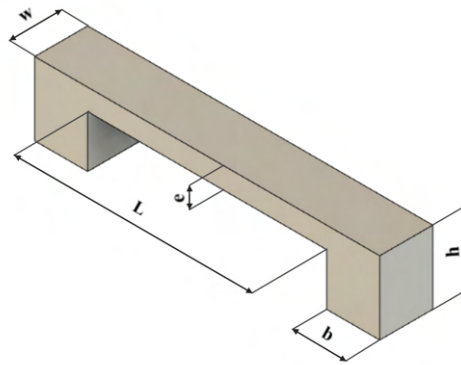


Figura 5.19: Legenda de dimensionamento dos elementos de ponte flexora.

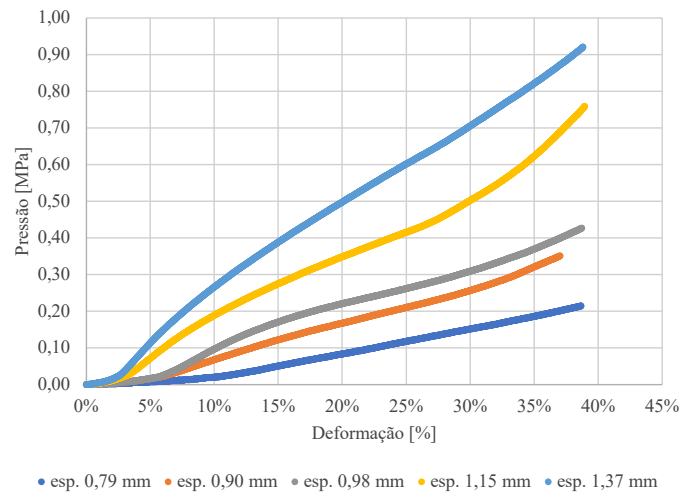


Figura 5.20: Curvas experimentais de pressão *versus* deformação dos espécimes de malhas de pontes flexoras.

Na tabela 8.2, são selecionados os elementos que se enquadram na rigidez objetivo requerida. Analogamente ao exposto na Secção 5.3.3, as similitudes entre o comportamento dos vários espécimes ensaiados, permite estimar com grande veracidade resultados intermédios. Ainda assim numa fase posterior, no caso de seleção desta geometria serão fabricados e validados esses mesmos espécimes.

Tabela 5.4: Seleção de elementos de ponte flexora.

Zonas	Rigidez obj. ($E_{equiv.obj}$) [MPa]	Elemento	Rigidez elem. ($E_{equiv.}$) [MPa]
Z1	0,81	esp. 0,85 mm	0,81
Z2	1,10	esp. 0,97 mm	1,09
Z3	1,35	esp. 1,06 mm	1,35

5.3.4 Construção da esponja

Na seleção dos elementos para a construção da esponja, foi eliminada a possibilidade de adoção do elemento octaédrico devido às suas limitações. A seleção dos elementos de acordo com a rigidez objetivo ($E_{equiv.obj}$) requerida, passam pela adoção de uma estrutura não interligada como observado, especulando-se o possível arrancamento de elementos individuais, anteriormente experienciado durante a análise exploratória com porções de malhas de 2×2 elementos. Além disso, como referido, existe grande probabilidade de alguns elementos serem mais rígidos ou cederem aleatoriamente, criando heterogeneidade na rigidez ($E_{equiv.}$) global das zonas da esponja, inviabilizando a mesma.

Sem descurar o desempenho superior relativo ao elemento octaédrico, a adoção da malha de pontes flexoras surge por exclusão dos restantes. De facto, a geometria interligada da malha permite a homogeneidade tanto na união das zonas de rigidez ($E_{equiv.}$) variável como na sua interligação e uniformização no contacto com a mesma. Além disso, a malha reage como uma só, evidenciando os benefícios das estruturas *lattice* revistos na Secção 4.3.

Para compreender a fiabilidade da curva relativa ao comportamento do *nylon* da Figura 5.10 para esta geometria, foram realizados ensaios numéricos dos espécimes com as mesmas dimensões daqueles analisados na fase exploratória na Secção 5.3.3. A definição dos estudos numéricos pode ser consultada no Apêndice A. Nos Gráficos das Figuras 5.21, 5.23, 5.23, 5.24 e 5.25, podem ser observadas as curvas de Pressão *versus* Deformação relativas aos ensaios numéricos *versus* experimentais dos espécimes de ponte flexora.

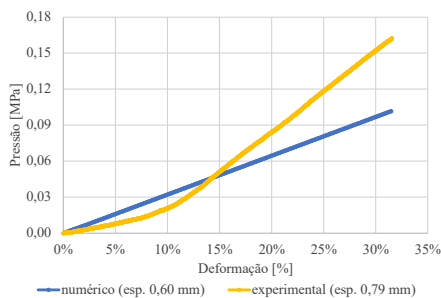


Figura 5.21: Curvas de pressão *versus* deformação numérica e experimental.

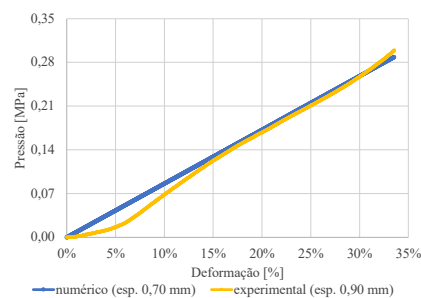


Figura 5.22: Curvas de pressão *versus* deformação numérica e experimental.

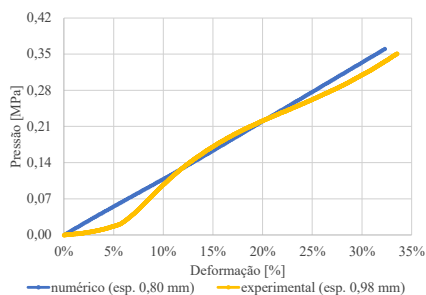


Figura 5.23: Curvas de pressão *versus* deformação numérica e experimental.

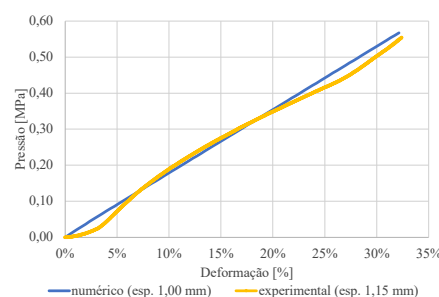


Figura 5.24: Curvas de pressão *versus* deformação numérica e experimental.

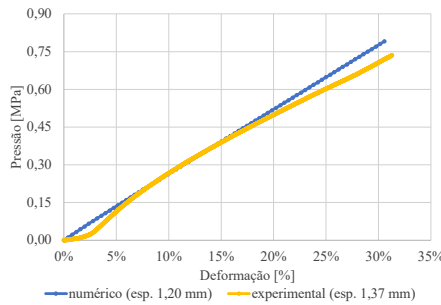


Figura 5.25: Curvas de pressão *versus* deformação numérica e experimental.

É de notar que as oscilações durante o curso de compressão não são visíveis na curva simulada. Este fenómeno pode ser explicado pelo cariz heterogéneo proveniente da impressão por FFF. Repare-se no caso do espécime de 0,6 mm de espessura (dimensão impressa com 0,79 mm) que apresenta a maior discrepância entre ambas as curvas, numérica e experimental, com um acréscimo de rigidez ($E_{equiv.}$) ao longo do seu curso de compressão, com a curva numérica a não se estabilizar perto da curva experimental como nos restantes casos. Isto pode ser explicado pela fraca qualidade do modelo de 0,6 mm, comparativamente aos restantes. De facto, espessuras menores requerem maior número de retrações e estrangulamento de fluxo de filamento, de tal modo que, comprometem a qualidade de impressão. Cabelos e bolhas, efeitos de *stringing* e *clogs*, foram observados em todos os espécimes. Na Tabela 5.5, podem ser observados os valores de espessura, bem como, o erro relativo e o R^2 representativo da comparação entre o experimental e o numérico.

Tabela 5.5: Análise de resultados experimentais *versus* numéricos resumo relativa aos espécimes de malha de ponte flexora.

esp. CAD [mm]	esp. real [mm]	Erro relativo [%]	R^2 (exp. face num.)
0,60	0,79	50,85 %	0,7523
0,70	0,90	2,93 %	0,9827
0,80	0,98	4,36 %	0,9834
1,00	1,15	3,95 %	0,9954
1,20	1,37	4,85 %	0,9941

Apesar do erro associado ao elemento de 0,6 mm de espessura, foi admitida a fidelidade, para elementos de espessura a partir de 0,7 mm, na previsão do comportamento macroscópico da geometria de ponte flexora através da simulação numérica com curva de material relativa ao comportamento do *nylon*, da Figura 5.10.

Para a aplicação da malha à interface do selim, devido à sua curvatura, foram analisadas duas configurações de organização estrutural relativamente à sobreposição de camadas, Figura 5.26. A abordagem seguida, refere-se à vertente vertical pela conservação da área da interface original e à influência dos pilares na componente de amortecimento.

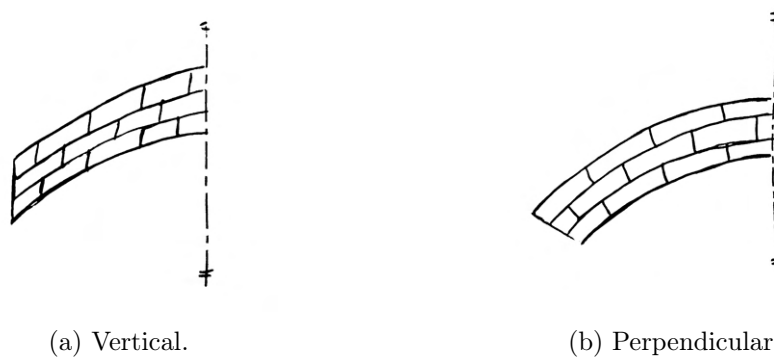


Figura 5.26: Organização da malha.

Assim, foram modelados e simulados os espécimes com a espessura objetivo estimada, Tabela 8.2, com a respetiva inclinação representativa da curvatura da zona a que pertencem os espécimes. A definição dos estudos numéricos pode ser consultada no Apêndice A. Nos Gráficos das Figuras 5.27 e 5.28, podem ser observadas ambas as curvas de Pressão *versus* Deformação dos espécimes de geometria de ponte flexora, de espessuras de 0,67 mm e 0,79 mm, com inclinações de $32,6^\circ$ e 28° referentes aos maiores valores de inclinação contidos nas áreas das respetivas zonas de Z1 e Z2, respetivamente. Ressalve-se que não foi simulado o exemplar da zona Z3, pelo facto da localização da malha não ser influenciada pela curvatura da interface.

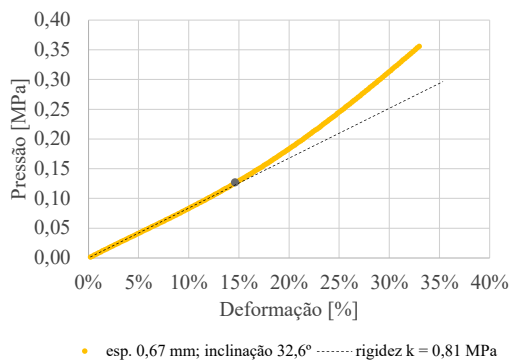


Figura 5.27: Curva numérica de pressão *versus* deformação do espécime da zona Z1.

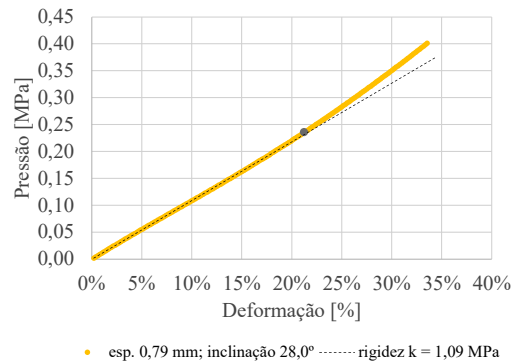


Figura 5.28: Curva numérica de pressão *versus* deformação do espécime da zona Z2.

O comportamento com aproximação à exponencialidade era esperado pela ativação das camadas de forma gradual. Isto é, a inclinação da malha reparte a força vertical imposta criando uma componente de força de corte paralela à superfície curva ou perpendicular aos pilares. Ao longo de cada camada durante o curso de compressão, este vetor de corte aumenta, subtraindo a força vertical e aparentando uma estrutura dita mais rígida. Para o caso da zona Z1 onde a existe maior inclinação e rigidez ($E_{equiv.}$) estrutural menor, denota-se um agravamento da rigidez ($E_{equiv.}$) a partir de cerca de 15 % de deformação, ponto assinalado na curva. Foi ainda traçada a reta de rigidez linear

na fase inicial onde esta denota uma rigidez ($E_{equiv.}$) de 0,81 MPa. A partir do ponto assinalado, a rigidez ($E_{equiv.}$) aumenta para aproximadamente 1,14 MPa. Para o caso da zona Z2, a inclinação não se demonstra problemática sendo que a combinação de maior rigidez ($E_{equiv.}$) por parte da estrutura influencia a sua linearidade ao longo de quase todo o seu curso de compressão, mantendo-se para além dos 20% de deformação com uma rigidez ($E_{equiv.}$) estável de 1,09 MPa. Ressalve-se mais uma vez que, apesar da falta de linearidade em ambas as malhas, o seu comportamento favorece as oscilações de pressão induzidas pelas irregularidades do piso, como já referido.

Dessa forma, foi finalizada a malha em formato CAD com as as espessuras de 0,73 mm, 0,85 mm e 0,94 mm correspondendo às zonas Z1, Z2 e Z3, respetivamente, Figura 5.29. Note-se que, estes valores de espessura foram estabelecidos de acordo com a impressão teste de exemplares de estruturas na respetiva direção e com a consulta de informação do fórum da *ultimaker*, atingindo-se uma média de expansão de 0,12 mm entre o modelo CAD e físico.

Por fim, sobre a malha foi ainda adicionado uma camada de espessura 0,3 mm que evita o potencial desconforto superficial e protege-a de poeiras e resíduos que possam, com o tempo, interferir com a sua funcionalidade. Note-se que esta camada protetora foi incluída na dimensão da última camada da malha, para que não haja influência da mesma na rigidez ($E_{equiv.}$) resultante. Foram também incorporados mecanismos de montagem *snap to fit* para acoplar a esponja ao chassi do selim identificados pelas setas a cor azul na Figura 5.30. As localizações destes tiveram especial atenção em evitar as zonas operacionais de contacto com o atleta.

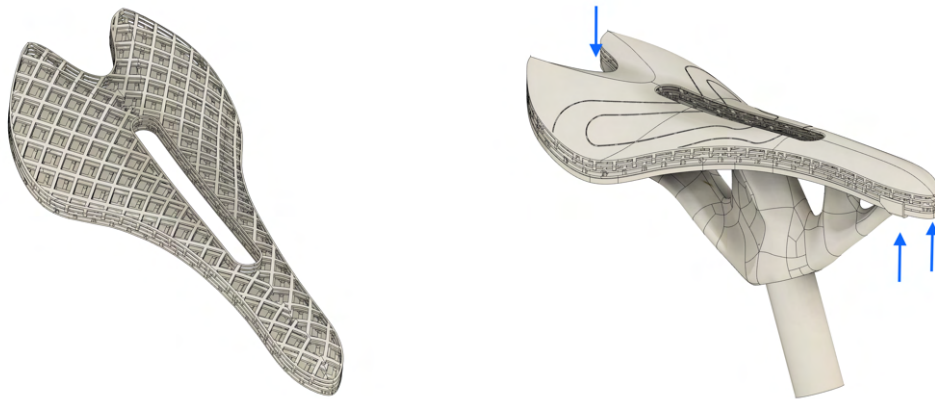


Figura 5.29: Esponja em ambiente CAD. Figura 5.30: Conjunto em ambiente CAD.

Capítulo 6

Fabricação do selim

Neste capítulo é abordada a fabricação do conjunto selim. Serão expostas as parametrizações, orientação e pós-processamento de cada uma das peças: chassi e esponja. A tecnologia aditiva selecionada para o fabrico de ambas as peças é o FFF, com auxílio da impressora *Ultimaker S5* presente no LDP, como já mencionado.

Primeiramente foram exportados os ficheiros STL relativos a cada uma das peças do *software* de CAD e introduzidas no ambiente de trabalho do *software* de *slice*, *Ultimaker Cura*. Aqui foram definidas as configurações da impressão, material e orientação que por sua vez, processa as trajetórias e configurações a fornecer à impressora. Já anteriormente referido, o material selecionado é o *nylon* transparente da marca *Ultimaker*.

6.1 Fabrico do chassi

A seleção de orientação de impressão surge como o primeiro passo, assim que é introduzido o modelo no *software* de trabalho. Esta pode influenciar bastante as características mecânicas da peça final através da sua orientação de deposição de camadas. No caso do selim, sabe-se que irá ser comprimido na direção perpendicular ao plano da interface, podendo orientá-lo de tal forma que, no seu fabrico, o impacto da elasticidade do material seja reduzido. Contudo, é importante ter em atenção de conferir firmeza na fixação da peça à mesa de impressão, visto que existem forças adversas que descolam a peça. Além disso, é ainda mais importante a direção a que esta é impressa, pela deformação da peça durante o seu arrefecimento.

Desta forma, foi preferida uma impressão menos problemática ainda que não tão favorável às propriedades estruturais do chassi, Figura A.1. Esta orientação escolhida segue uma abordagem em pirâmide. Quanto à parametrização da impressão foi ativada dupla extrusão possível no modelo S5, como já referido. A impressão com dois extrusores de material, possibilita a impressão alternada de dois materiais, neste caso filamento de *nylon* transparente e filamento de PVA. Este fator incrementa a liberdade geométrica no sentido do seu pós-processamento, removendo de forma facilitada o material em excesso através da submersão do bruto impresso em água. É importante perceber que esta opção só é compatível com o filamento de *nylon*, por este ser fraco absorvedor de humidade, como já referido.

Pelo facto da peça a fabricar (chassi) ser de grandes dimensões e pouco pormenorizada, foram utilizados extrusores com *nozzle* de diâmetro 0,8 mm, que aceleram o

processo de impressão. As configurações de impressão do chassi podem ser lidas na Tabela A.1. É importante referir ainda que as parametrizações foram atingidas através de conhecimento partilhado em fóruns de impressão 3D e através de uma metodologia iterativa empírica, visando redução de efeitos de *stringing*, *clogs*, *under* e *over extrusion*, já referidas como muito características do filamento de *nylon*. Mais ainda, foi selecionada uma temperatura de extrusão de *nylon* mais alta que a sugerida pela marca *Ultimaker*, visando atingir maiores valores de rigidez para o chassi. De facto, maior temperatura permite melhor arranjo de moléculas, aumentando o nível de cristalinidade e, por sua vez, a sua rigidez. Maior temperatura permite também melhor adesão entre camadas [77].

A impressão decorreu num tempo total de 13 horas e 46 minutos, utilizando 213,6 g de filamento de *nylon* transparente e 92,8 gramas de filamento de PVA. Na Figura 6.1 é possível observar o bruto impresso completo ainda em ambiente de impressão.

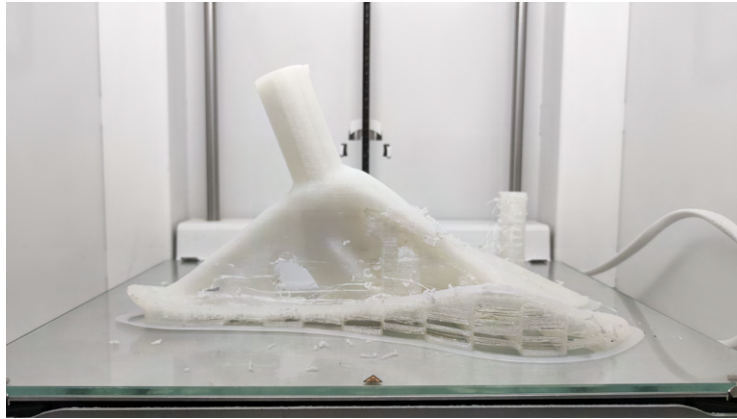


Figura 6.1: Bruto do chassi impresso em ambiente de impressão.

Em seguida, o bruto foi submergido em água para remoção dos suportes, Figura A.2. Este processo demorou cerca de 1 dia, auxiliando a dissolução do material agitando a água e trocando-a uma vez após as primeiras 12 horas. Por fim, foram cortadas as fibras de *nylon* descoladas (cabelos) e também limadas as zonas com acumulação de bolhas de material provenientes de efeitos de *clog* e *stringing*. Foi ainda realizada uma inspeção visual minuciosa para identificar potenciais defeitos ou irregularidades ou quaisquer comprometimentos estruturais.

É possível constatar uma ótima qualidade de impressão, com boa adesão de camadas sem irregularidades mesmo nas zonas de furos e arcos orgânicos irregulares no centro da peça. Contudo, são visíveis ondulações na interface do selim, resultantes da falta de suporte nessas zonas e empeno local da peça, Figura 6.2. Uma solução a este problema, para estudos futuros, será a mudança de padrão de impressão e/ou o aumento do seu valor de densidade.

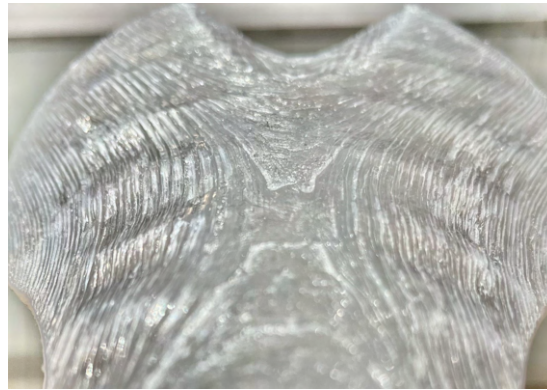


Figura 6.2: Amostragem das ondulações na interface do chassi.

6.2 Fabrico da esponja

À semelhança do chassi, foi primeiramente selecionada a orientação de impressão, observada na Figura A.3, em ambiente de *software* de *slice*. Pelo detalhe da peça, foram também dispensados qualquer suportes e a dispensa do extrusor de impressão secundário, resultando na orientação apresentada. Foi utilizado um extrusor com *nozzle* de diâmetro de 0,4 mm, cujos parâmetros principais de impressão podem ser lidos na Tabela A.2. Analogamente ao chassi, estes parâmetros são baseados em iterações experimentais e conhecimento partilhado em fóruns de impressão 3D. Esta peça é caracterizada pelas baixas velocidades de impressão, de deslocamento da cabeça extrusora e de retração de filamento. No total, o programa exportado para a impressora estima um tempo total de impressão de 1 dia, 16 horas e 33 minutos, com utilização de 81 gramas de filamento de *nylon*. O bruto impresso pode ser observado em ambiente de impressão na Figura 6.3.

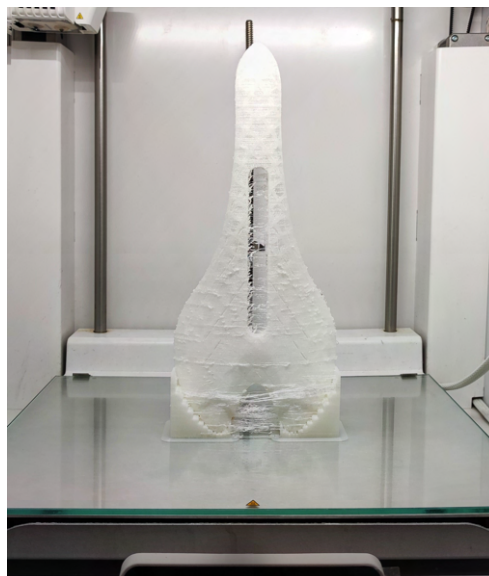


Figura 6.3: Bruto da esponja impresso em ambiente de impressão.

Analogamente ao chassi, foram removidos os elementos de suporte e, em seguida, cortados e limados cabelos e bolhas de *nylon*. Foi também realizada uma inspeção visual à peça, no caso desta, com especial atenção à colagem de camadas dos elementos nas suas extremidades. Após o pós-processamento, a esponja regista um peso total de 43,0 gramas.

6.3 Montagem

A montagem do conjunto é facilitada pelos mecanismos de *snap to fit*. Na Figura 6.4, é possível ver o protótipo fabricado completamente montado.



Figura 6.4: Protótipo conjunto (chassi e esponja) montado.

Capítulo 7

Ensaaios experimentais do conjunto

Este capítulo relata a metodologia de análise experimental direcionada aos testes de segurança do protótipo do selim. O objetivo principal destes testes é analisar a resposta do selim à imposição de forças compressivas em ambiente controlado, e avaliar a sua integridade estrutural e capacidade de suportar carga. Para o efeito, foram concebidas peças de fixação do modelo especializadas para o efeito de ensaio.

A metodologia de ensaios elaborada envolve duas etapas: a primeira referente ao chassi e, uma segunda, referente ao conjunto (chassi e esponja). Os ensaios experimentais foram realizados em conformidade com a norma ISO 9001:2015, com auxílio da máquina de ensaios *Shimadzu AG-X Plus* com uma célula de carga de 100-kN, presente no departamento de Engenharia Mecânica. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. Na Figura 7.1 pode ser observado o selim em ambiente de ensaio.

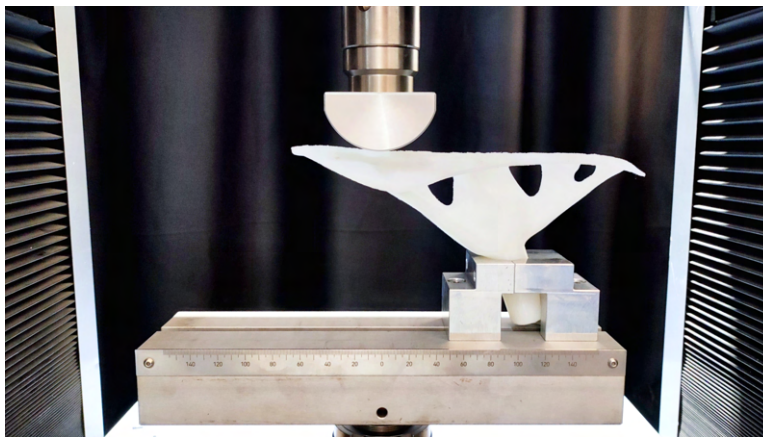


Figura 7.1: Chassi em ambiente de ensaio experimental.

7.1 Metodologia de ensaio chassi

Os ensaios realizados somente ao chassi têm por base a norma ISO 4210-9:2014 para selins, adaptada para esta geometria. A norma descreve os procedimentos de teste a respeito de uma tipologia de selins convencionais, aqueles cuja a montagem na bicicleta é feita através dos *rails*. Assim, pela geometria diferenciada do protótipo, relativamente aos

selins tradicionais, a metodologia foi ajustada visando a segurança do modelo e, consequentemente, a sua certificação, título obrigatório para a sua usabilidade em competição [36].

Este primeiro grupo de ensaios estáticos de compressão realiza 3 sequências de carregamento vertical em 3 localizações distintas da interface ao longo de toda a largura do modelo: Posterior, Centro e Anterior, Figura 7.2 acompanhada da Tabela 7.1. Este grupo de ensaios visa estudar a rigidez do chassi e a sua viabilidade estrutural. O critério de avaliação é tal que o selim não apresente qualquer fissura, falha/quebra e distorção estrutural permanente. Não foram realizados ensaios de fadiga.

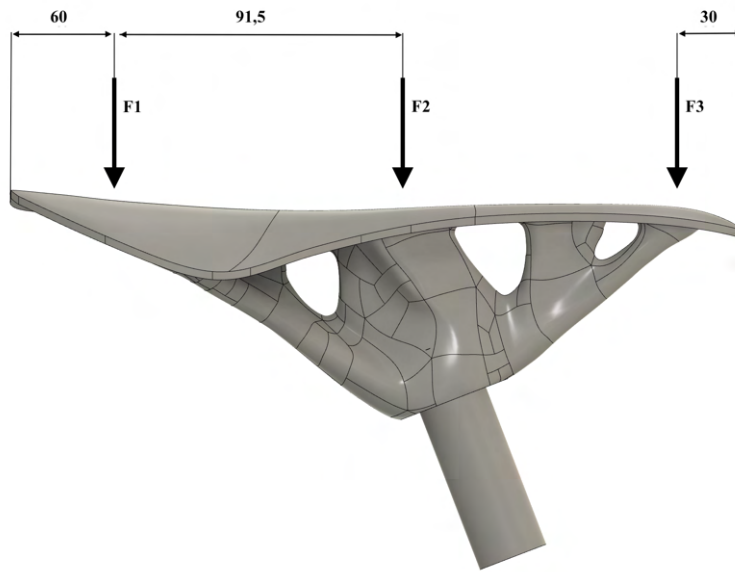


Figura 7.2: Esquema de forças de ensaio do chassi ao longo da largura do modelo.

Tabela 7.1: Especificação do procedimento de ensaio do chassi.

Ensaio	Força [N]	Procedimento
1.1 (Posterior)	F1=1000 vertical	Carregamento, 1 minuto, descarregamento
1.2 (Centro)	F2=1000 vertical	
1.3 (Anterior)	F3=1000 vertical	

7.2 Metodologia de ensaio do conjunto

O segundo grupo de ensaios, diz respeito ao testes de compressão do conjunto, realizando carregamentos de dimensão pontual na interface. Este grupo de ensaios visa estudar o comportamento e viabilidade estrutural da esponja. A Figura 7.3, exemplifica as zonas de carregamento acompanhado da Tabela 7.2.

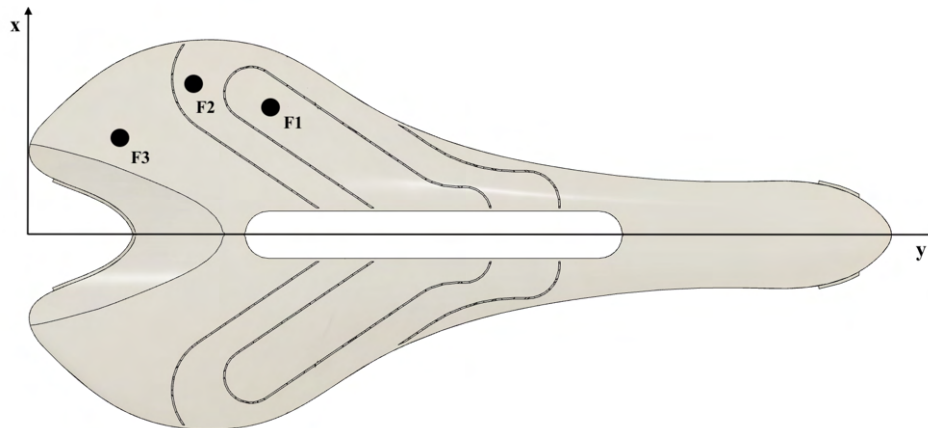


Figura 7.3: Esquema de forças de ensaio da esponja.

Tabela 7.2: Especificação do procedimento de ensaio da esponja.

Ensaio	Deslocamento [mm]	Procedimento
3.1	d1=4mm vertical	Carregamento
3.2	d2=4mm vertical	Carregamento
3.3	d3=4mm vertical	Carregamento

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 8

Análise de resultados e discussões gerais

Neste capítulo são expostos todos os dados recolhidos durante a fase de ensaios experimentais do protótipo. São avaliados qualitativamente e quantitativamente de acordo com o seu desempenho mecânico. São também expostos os análogos testes numéricos.

8.1 Análise dos resultados experimentais e numéricos

Todos os ensaios relativos ao chassi e conjunto não demonstraram quaisquer problemas ou anomalias que invalidassem a fidelidade dos resultados.

8.1.1 Chassi

Em todas as fases de ensaio o selim apresentou deformação aparente seguida de uma recuperação total da sua forma original. O mesmo não apresentou quaisquer fissuras ou danos visualmente perceptíveis a olho nu pelo que, na globalidade dos ensaios elaborados, relativos à conformidade da ISO 4210-9:2014, pode-se afirmar que o selim satisfaz os padrões de segurança estabelecidos.

No Gráfico da Figura , podem ser observadas a cor amarela, azul e verde as curvas de carga, *hold* e descarga de Força *versus* Deslocamento relativas aos ensaios experimentais 1.1, 1.2 e 1.3, respetivamente. Pelas curvas apresentadas, é possível reparar num comportamento de crescimento exponencial de rigidez em todas as zonas de carregamento do chassi. Isto é, ao longo do curso de compressão, a rigidez da peça incrementa de forma contínua. É também possível reparar que ao longo do curso de compressão existem zonas de incremento brusco de força face ao deslocamento representativo da estrutura e do seu tipo de geometria.

Relativamente ao carregamento na zona posterior do selim (ensaio 1.1), denota-se uma maior flexibilidade de entre as 3 zonas. Isto deve-se ao facto da colocação do espigão estar maioritariamente deslocada no sentido posterior da interface, satisfazendo uma clara rotação posterior do modelo. Foi ainda registado um deslocamento vertical máximo, para a força de pico de 1000 N, de $21,65 \text{ mm} \pm 1,66 \text{ mm}$. O ponto de maior variabilidade de entre as 3 repetições elaboradas, é o ponto a 994,0 N, com deslocamento de 21,09 mm e com um desvio padrão de 1,68 mm.

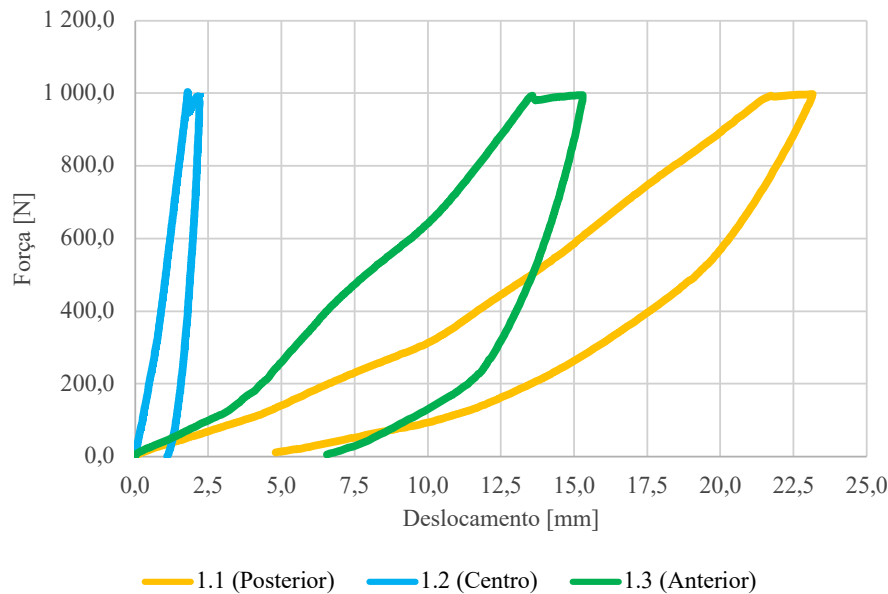


Figura 8.1: Curvas experimentais de força *versus* deslocamento relativa ao ensaios 1.1, 1.2 e 1.3 do chassi impresso.

No que diz respeito ao carregamento da zona central do selim (ensaio 1.2), denota-se como a zona mais rígida de entre as 3 zonas. Esta é também a zona central de equilíbrio do selim, imediatamente sobre o espigão. Para o ensaio 1.2, é também ainda possível registar um deslocamento vertical máximo para a força pico de 1000 N, de $1,79 \text{ mm} \pm 0,62 \text{ mm}$. Este é também o ponto de maior variabilidade entre as 3 repetições elaboradas.

No que se refere ao carregamento à zona anterior (nariz) do selim (ensaio 1.3), denota-se como sendo mais rígida que a zona traseira. Contrariamente ao observado nas curvas relativas aos ensaios 1.1 e 1.2, existe uma zona, próxima dos 600 N de força, onde pode ser notada uma fluência momentânea da estrutura. Para este ensaio, foi também registado um deslocamento vertical máximo, para força pico de 1000 N, de $13,57 \text{ mm} \pm 1,21 \text{ mm}$. Este é também o ponto de maior variabilidade entre as 3 repetições elaboradas.

É ainda possível observar em todos os ensaios o comportamento de regime elástico da estrutura associado ao material. É também verificado o fenómeno de fluência durante o curso de estabilização (*hold*) a 1000 N por 1 minuto. Em conformidade com o já referido anteriormente, apesar dos grandes valores de deslocamento, o modelo recuperou em todas as repetições a sua geometria original. Saliente-se que esta recuperação foi comprovada através sobreposição do chassi, sobre um modelo 2D do mesmo na posição original antes do início de cada ensaio e repetição. Pela observação das curvas de descarga é possível perceber uma tendência elástica da estrutura em todos os ensaios sendo que esta aparenta acompanhar o comportamento da percurso de carga. O espaçamento entre a os dois pontos de início e fim de cada ensaio pode ser explicado pela velocidade de descarga do ensaio, superior relativamente à velocidade de recuperação do chassi. Para efeito de comparação dos 3 ensaios, foi calculada a percentagem de recuperação à posição original de cada ensaio, representada pelas curvas, perante velocidade de descarga do ensaio. São registados valores de 79,5%, 51,7% e 57,4% de recuperação para as zonas Posterior,

Centro e Anterior respetivamente, afirmando como zona Posterior a mais elástica de entre as restantes. Após os ensaios, são possíveis de se observar marcas do punção na superfície da interface, onde é evidente um esmagamento local do material relativo à fase de compressão. No entanto, este esmagamento não é significativo para se fazer notar durante a sua utilização.

Por motivos de comparação relativos ao desempenho do chassi impresso e da sua componente de *design*, foi aplicada a metodologia de ensaio descrita na Secção à componente numérica de estudo do modelo virtual reconstruído do selim *benchmark*, *Prologo C.one 30* e ainda ao protótipo do chassi CAD sólido (densidade = 100%).

Para a definição e computação do modelo de simulação usou-se o *software Soliworks Community SP3.1*. Para o modelo *benchmark* foram estabelecidas condições de fronteira de encastramento (todos os graus de translação e rotação nulos/fixos) correspondentes à posição de fixação do selim no seus *rails* na dimensão de recuo originalmente estabelecida cobrindo um comprimento de 30 mm *standard*, identificado a azul na Figura 8.2. Foi definida a malha segundo o critério de *Curvature Based Mesh* para a malha de elementos, sendo o refinamento desta definido com base na curvatura do modelo a simular. A malha apresenta 10661 elementos e 19287 nodos com Jacobiano de 16 pontos (Tamanho dos elementos: máximo = 9,03 mm e mínimo = 1,81 mm), Figura 8.2. Para as cargas, estas foram definidas apenas na direção vertical e magnitude 1000 N de variação linear no tempo, Secção 8.1.1. Foram também selecionados 2 materiais distintos para os *rails* e interface, Titânio (ID 55 *Soliworks*; Módulo de *Young* = 110 GPa; coef. de *Poisson* = 0,30; Densidade = 4600 kg/m^3) e Fibra de Carbono reforçada (Módulo de *Young* = 240 GPa; coef. de *Poisson* = 0,28; Densidade = 1800 kg/m^3) [78, 79], respetivamente, ambos modelo tipo linear elástico isotrópico.

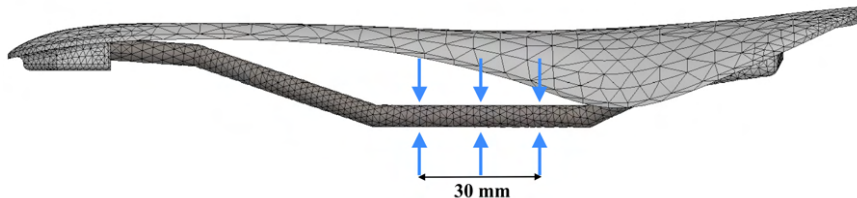


Figura 8.2: Malha de elementos finitos do selim *Benchmark Prologo C.one 30*. As setas a cor azul identificam a zona de encastramento.

Para o modelo chassi sólido foram estabelecidas condições de fronteira de encastramento correspondentes à posição de fixação do selim no seu espigão identificado pelas setas a cor amarela na Figura 8.3. Foi definida a malha segundo o critério de *Curvature Based Mesh*, semelhante à definição do *Benchmark*. A malha apresenta 14666 elementos e 26295 nodos com Jacobiano de 16 pontos (tamanho dos elementos: máximo = 9,03 mm e mínimo = 1,81 mm), Figura 8.3. Para as cargas, estas foram definidas apenas na direção vertical e magnitude 1000 N de variação linear no tempo, Secção 8.1.1. Para o material foi utilizada a curva de comportamento do *nylon* da Figura 5.10. Importa referir que ainda que as propriedades dos materiais não correspondam exatamente à mesmas daqueles que compõe o selim *benchmark*, vão permitir perceber qual o enquadramento do Chassi segundo o *benchmark*. Para ambos os modelos foram usadas condições de simetria segundo o plano longitudinal de simetria do selim.

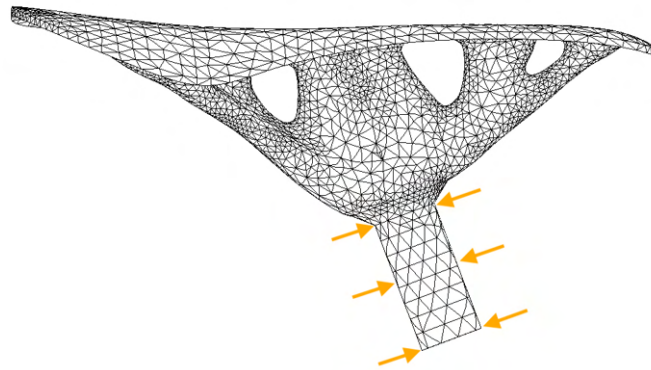


Figura 8.3: Malha de elementos finitos do Chassi sólido. As setas a cor amarela identificam a zona de encastramento.

No gráfico das Figuras 8.4a e 8.4b, podem ser observadas a compilação das 3 curvas numéricas de Força *versus* Deslocamento de ambos os modelos, *benchmark* e chassi sólido, referentes aos ensaios 1.1, 1.2 e 1.3.

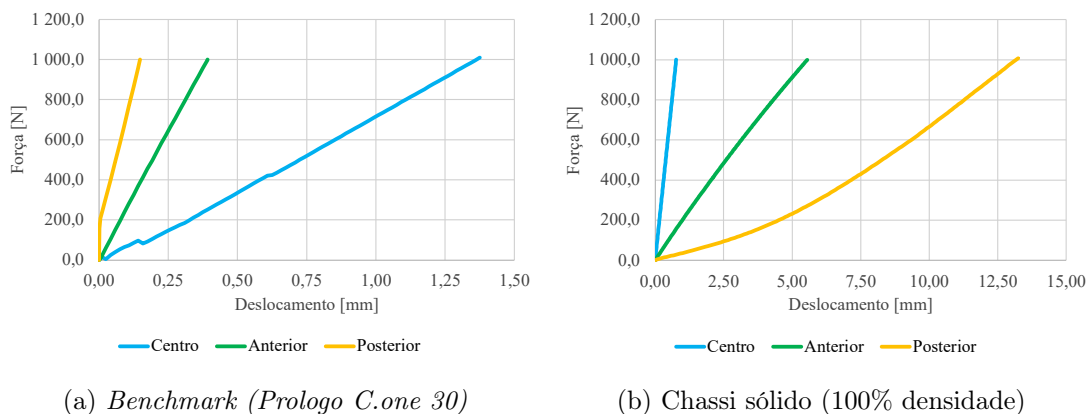


Figura 8.4: Curvas numéricas de força *versus* deslocamento relativa aos ensaios 1.1 (Posterior), 1.2 (Centro) e 1.3 (Anterior).

Numa breve análise ao conjunto de ensaios ao selim *benchmark*, é possível reparar num comportamento linear elástico em todas as zonas de ensaio do selim. Não foi encontrada informação acerca da sua conformidade relativa à norma ISO 4210-9:2014, referenciada na secção 8.1.1, mas é especulada a sua aprovação sendo este é um selim de competição. São ainda registados os deslocamentos máximos, para uma força pico de 1000 N, de 0,15 mm, 1,36 mm e 0,39 mm para as localizações Posterior, Centro e Anterior, respetivamente.

Para o chassi sólido é de notar um comportamento linear em todo o curso de compressão nas zonas Anterior e Centro, e um comportamento mais próximo do exponencial para a zona Posterior. Foram também registados deslocamentos verticais máximos para a força de 1000 N nas 3 zonas de 13,20 mm, 0,77 mm e 5,55 mm respetivamente Posterior, Centro e Anterior. Comparativamente aos dois chassis de 50% e 100% de densidade,

existe ainda uma grande diferença relativa aos deslocamentos registados, ainda que largamente afastados do convencional observado no *benchmark*. Em resumo, na Tabela 8.1, é possível observar lado a lado os deslocamentos máximos registados, para uma força limite de 1000 N nas 3 localizações referidas na Secção 8.1.1, para o *benchmark* (numérico), para o chassi sólido (numérico) e para o chassi impresso (experimental). São ainda registados os pesos de cada um 263 g, 258 g e 219 g, respetivamente. Estes pesos foram calculados equiparando todos os selins a uma configuração semelhante com espigão de 300 mm de comprimento em fibra de carbono. Assim, a adoção de ambos os protótipos seria mais leve que a adoção do *benchmark*.

Tabela 8.1: Quadro resumo comparativo do Chassi *versus* Chassi sólido (100%) *versus* *Benchmark*.

Selim	Desl. Vert. Post. [mm]	Desl. Vert. Cent. [mm]	Desl. Vert. Ant. [mm]
Chassi	21,01	1,74	12,98
Chassi sólido	13,20	0,77	5,55
<i>Benchmark</i>	0,15	1,36	0,39

Por fim, para o chassi sólido foi elaborado um ensaio numérico específico de um caso de utilização normal por um indivíduo de 73 kg, na condição de postura de *tops* com a distribuição de cargas sobre a interface [19]. Mantiveram - se inalteradas as restantes parametrizações do ensaio numérico relativas aos ensaios do chassi sólido anterior. O resultado é um deslocamento vertical de 4,36 mm no plano vertical da linha anterior-posterior, perfazendo uma rotação da interface de 2,8° no sentido posterior. Na Figura 8.5, pode ser observado o resultado deformado do modelo, acompanhado da respetiva escala de deslocamentos colorida *versus* o modelo na sua posição inicial.

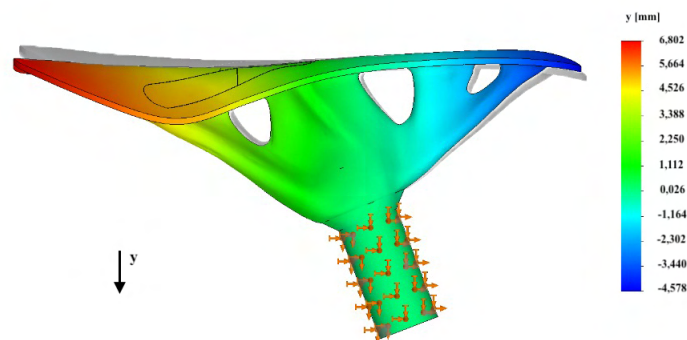


Figura 8.5: Resultado numérico da aplicação da força representativa de uma postura de *tops* por um atleta de 73 kg.

É importante salvaguardar que por motivos de dimensão de cálculo computacional não foram elaborados estudos de simulação numérica ao modelo originalmente impresso. No entanto, através do modelo sólido do protótipo, é possível observar uma vertente conservadora da homogeneidade estrutural do modelo, comparativamente ao fabricado por

impressão em 3D. Isto é, o estudo numérico do protótipo sólido demonstra o comportamento daquele que seria a componente de geometria desagregada da heterogeneidade da impressão 3D. Além disso, é ainda importante deixar a ressalva de que apenas foi ensaiada uma postura operacional crítica, tendo por base o conhecimento do comportamento de compressão da zona Posterior (ensaio 1.1).

8.1.2 Esponja

Os ensaios relativos à esponja, demonstraram ser os mais complicados pela calibração do arranjo de ensaio nas respectivas localizações, definidas na Figura 7.3. É possível afirmar que, após uma inspeção visual da esponja, não foram observados danos permanentes na mesma.

Relativamente ao comportamento da zona Z1 (ensaio 2.1), é possível observar a curva de comportamento Pressão *versus* Deformação no Gráfico da Figura 8.6. A reta de tendência representada a traço interrompido representa a rigidez ($E_{equiv.}$) operacional da esponja na qual a mesma irá trabalhar de 0,83 MPa. Este valor superior ao valor ($E_{equiv.obj}$) estipulado originalmente projetado em cerca de 2,47%. No gráfico foi também assinalado um ponto representativo da pressão máxima calculado, imposta na eventualidade de potenciais impactos sobre a interface provenientes de irregularidades do piso. Ou seja, a cor vermelha está representada o valor da pressão resultante de uma força de impacto típica de magnitude 4500 N, utilizando uma carneira convencional de ciclismo de estrada de enchimento esponjoso de 80 kg/m^3 de densidade [74]. Pelo ensaio é possível evidenciar a inexistência de quaisquer danos na estrutura da esponja na zona Z1. Este acontecimento é particularmente importante nesta zona, sendo esta a de menor rigidez ($E_{equiv.}$). Como observado, pelo Gráfico da Figura 5.27, da Secção , é corroborado um comportamento no sentido de aumento de rigidez ($E_{equiv.}$) ao longo do curso de compressão.

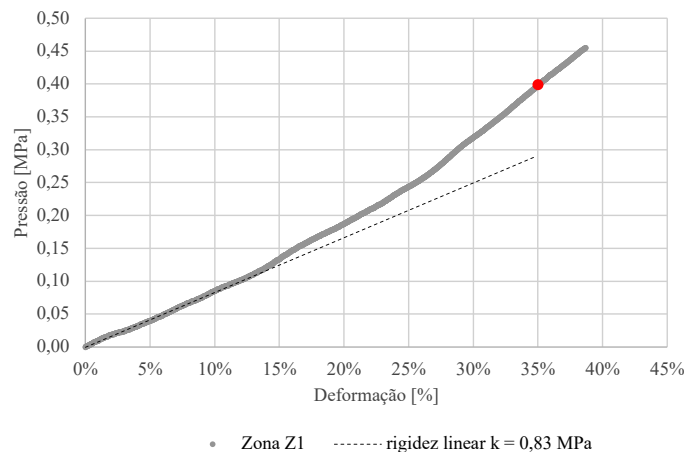


Figura 8.6: Curva de força versus deslocamento ensaio 2.1.

Relativamente ao comportamento da zona Z2 (ensaio 2.2), é possível observar a curva de comportamento Pressão *versus* Deformação no Gráfico da Figura 8.7. A sua rigidez ($E_{equiv.}$) operacional representada a traço interrompido, de 1,07 MPa, valor 2,80% inferior ao valor de rigidez objetivo ($E_{equiv.obj}$) estipulado.

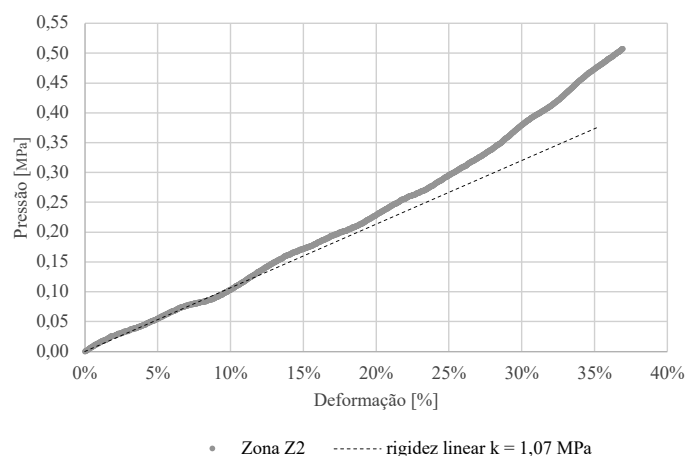


Figura 8.7: Curva de força versus deslocamento ensaio 2.2.

Relativamente ao comportamento da zona Z3 (ensaio 2.3), é possível observar a curva de comportamento Pressão *versus* Deformação no Gráfico da Figura 8.8. A sua rigidez ($E_{equiv.}$) operacional representada a traço interrompido é de 1,33 MPa, valor 1,50% inferior ao valor de rigidez objetivo ($E_{equiv.obj}$) estipulado. Como já referido na Secção , a linearidade na zona Z3 é mantida, pelo facto da mesma estar apenas situada nas zonas onde a curvatura da interface não influencia o comportamento linear da malha.

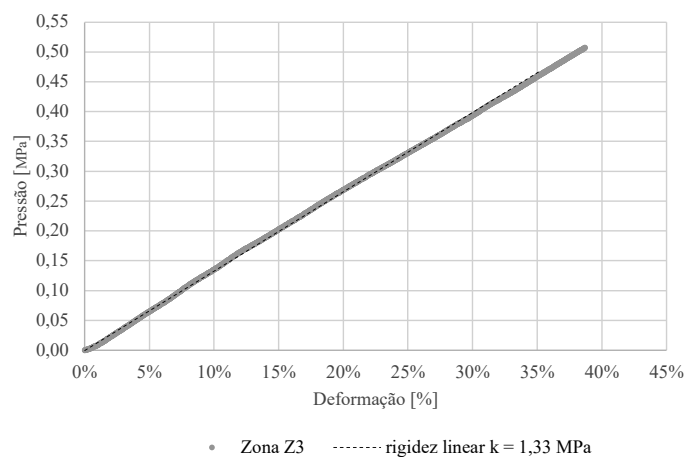


Figura 8.8: Curva de força versus deslocamento ensaio 2.3.

Tabela 8.2: Quadro resumo da análise de resultados dos ensaios experimentais à esponja.

Zonas	Rigidez obj. ($E_{equiv.obj}$) [MPa]	Rigidez da zona ($E_{equiv.}$) [MPa]	Erro relativo [%]
Z1	0,81	0,83	2,47 %
Z2	1,10	1,07	2,80 %
Z3	1,35	1,33	1,50 %

8.2 Discussão

8.2.1 Chassi

Após concluir a análise de resultados, é possível discutir e comparar o comportamento da estrutura do selim a respeito da sua geometria e material. Os ensaios elaborados e, comparativamente ao *benchmark*, realçam a grande flexibilidade do protótipo associada maioritariamente ao *nylon*. Esta grande disparidade entre os valores originais do selim, questionam a inviabilidade de adoção desta estrutura. A confiabilidade adquirida por parte do modelo, pela sua elasticidade relativamente à forma original, confere segurança na escolha deste para utilização. No entanto, a característica que lhe confere um comportamento seguro, é também a mesma que lhe atribui a sua flexibilidade exagerada para a sua utilização.

Pela observação do comportamento global dos selins tradicionais encontrados no mercado, do qual o *benchmark* é exemplo, é distinto do comportamento observado no protótipo. De facto, nos gráficos relativos aos ensaios numéricos do *benchmark*, Figura 8.4a, são apresentados maiores valores de flexão na zona central. Este comportamento, que induz até algum movimento de amortecimento, é o reflexo do sistema de arco/ponte de suspensão da interface nas suas extremidades que, por sua vez, evita deslocamentos horizontais, paralelos ao piso e conserva a postura global do atleta. No protótipo impresso dá-se o inverso. São registados os menores deslocamentos na zona central e os maiores valores de flexão nas extremidades anterior e posterior. Ou seja, é criado um eixo indefinido na zona central na qual os carregamentos nas zonas anterior e posterior fazem rotacionar a interface, alterando o seu ângulo de inclinação relativamente ao plano do piso. Como já mencionado na revisão de literatura, a inclinação da interface em ambos os sentidos é responsável pela alteração da postura do atleta e implicações ao nível do seu mapa de pressões, que afeta tanto o conforto, como o rendimento global do mesmo. Saliente-se que os ensaios numéricos elaborados para o protótipo sólido, onde uma postura de *tops* faz rotacionar a interface no sentido posterior em $2,8^\circ$, invalida a configuração na sua dimensão de inclinação.

Para além do comportamento distintivo entre os dois chassis e *benchmark*, é também importante salientar os valores de deslocamento registados em ambos. Estes demonstram-se ser desfasados em duas ordens de grandeza, com exceção da zona central. Este desfasamento, pode ser explicado pela rigidez também distinta entre os dois materiais, o *nylon* e as fibras de carbono reforçada em duas ordens de grandeza entre os seus módulos de elasticidade [80, 81]. É ainda importante perceber a grande influência da densidade (*infill*) na robustez do modelo pelos deslocamentos observados na Tabela 8.1.

8.2.2 Esponja

Pelos ensaios já elaborados nos espécimes descritos no Capítulo 5, a malha demonstrou ser coerente face ao projetado, demonstrando bom desempenho e resistência, possibilitando a sua usabilidade sem preocupação associada. No entanto, existem alguns pontos menos favoráveis que foram observados durante a fase de ensaios. As pequenas oscilações observadas ao longo das curvas das Figuras 8.6, 8.7 e 8.8, demonstram a falta de linearidade microscópica no curso de compressão da malha. Estas oscilações podem ser provenientes de imperfeições na impressão e/ou *strings* e *clogs* dentro da malha, que alteram as propriedades da mesma, na sua compressão e descarga. Durante as repetições de cada ensaio a malha permaneceu retraída durante alguns segundos, principalmente na zona Z1, onde o efeito destas imperfeições afetam em maior escala a malha menos rígida.

É ainda importante certificar que apesar da direção de impressão da esponja tenha sido diferente daquela na qual os espécimes foram impressos, o comportamento e as propriedades da estrutura permaneceram intactas. Este fenómeno pode ser relacionado pela viscosidade e adesão do *nylon* entre as suas camadas. Além disso, as características geométricas da malha e as pequenas dimensões relativas às pontes, não evidenciam influência da direção de impressão para que se modifique o seu comportamento macroscópico.

8.2.3 Conjunto (chassi + esponja)

A fim de testar a operacionalidade do conjunto, o mesmo foi instalado numa bicicleta cidadina tendo sido efetuados 2 testes de utilização de 1 hora, o primeiro relativo ao chassi e o segundo relativo à esponja, por um indivíduo de 67 kg e altura 1,82 m, Figura . Foi ainda utilizado o *benchmark* entre cada teste para dispersar qualquer parâmetro de influência vinculativa ao protótipo. É importante salvaguardar que a avaliação do selim no terreno entra no campo da subjetividade podendo a experiência descrita adiante não se repetir para outro indivíduo. No entanto, esta descreve uma avaliação mais realista da utilização do selim.



Figura 8.9: Protótipo conjunto fixado à bicicleta.

A utilização somente do chassi sem esponja denota alguma rotação nos sentidos posterior e anterior para pequenas mudanças de postura nos respetivos sentidos. A maior das

rotações faz-se notar no sentido posterior, principalmente em posturas menos aerodinâmicas análogas à postura de *tops*. Também, quaisquer movimentos no plano do movimento da bicicleta, faz notar pequenas movimentações da interface, induzindo ajuste e instabilidade na postura de condução. Contudo, contrariamente ao esperado, a magnitude de rotação percebida é mínima, pelo que permite uma condução sem deslizamentos ou necessidade de corrigir a postura.

Particularmente em percursos com inclinação positiva (subida), foi percebido requerimento de força suplementar por parte dos membros superiores para puxar o corpo no sentido do movimento, e evitar deslizamento sobre a interface. Foi também para estes casos que, conseqüentemente, se sentiu maior rotação da interface. Passando à analogia, o comportamento descrito é idêntico à flexão da extremidade de um ramo de uma árvore, até que o ramo que o antecede começa a fletir e assim sucessivamente incrementando-se a resistência à flexão desse ramo.

Por último, não foi percebido desconforto na zona central do períneo comparativamente ao *benchmark*. No entanto, especula-se que a possível razão para este efeito seja a movimentação momentânea da pélvis e conseqüentemente algum alívio de pressões. Além disso, pelas rotações percebidas, ainda que mínimas, estima-se que se registem aumentos locais de pressão.

É relevante ainda referir que a montante da elaboração do modelo de chassi descrito nos Capítulos 5 e 6, foi produzido um modelo similar também este gerado nas condições descritas na Secção 5.1, com um *design* conservador a respeito da utilização dos *rails*, Figura 8.10. O mesmo foi fixado e testado por alguns minutos, reportando grande instabilidade e rotação da interface ambos os sentidos anterior e posterior. Nada é descrito acerca da sua estrutura pelo facto da movimentação registada se dever ao diâmetro de secção controla dos *rails*.



Figura 8.10: Protótipo de *rails* fixado à bicicleta.

A utilização da esponja no terreno demonstrou-se bastante positiva, desenvolvendo grande níveis de conforto comparativamente à interface do protótipo sem esponja ou ao modelo do *benchmark*. Além disso, é também sentida uma acomodação total da zona pélvica e uma clara libertação das pressões na zona central do períneo, devido ao canal.

Note-se que a esponja foi também testada, acoplada à interface do *benchmark*, para evitar a influência da instabilidade reportada na utilização do chassi, Figura 8.11. Saliente-se ainda que não se reportou dor após essa mesma utilização, pelo que se denota também um ponto positivo comparativamente à interface sem esponja.



Figura 8.11: Esponja acoplada ao selim *Prologo C.one 30 (Bechmark)*.

Contudo, apesar da rigidez ($E_{equiv.}$) da interface medida estar próxima dos valores projetados, a sua experimentação em ambiente não controlado pelo indivíduo de menor massa corporal, demonstrou ser demasiado macia, resultando no esgotamento do curso de amortecimento da mesma, em situações específicas de pequenas oscilações. Existem duas possíveis explicações para este fenómeno. De facto, como mencionado na Secção 5.3.2, especulou-se que a diminuição de rigidez por parte da esponja não se revise numa diminuição de pressão no caso real, pelas características morfológicas do tecido da pélvis. Além disso, foram dimensionados os índices de rigidez baseados no valor global de 1,10 MPa, sendo este valor também mencionado na Secção 5.3.2, como sendo uma possível fonte de erro sistemático.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 9

Conclusões e trabalhos futuros

9.1 Conclusão

Ao longo desta dissertação foi com diligência que foi perseguido o objetivo de dar forma a um protótipo tangível de um selim de bicicleta, dimensionado no âmbito da competição, fabricado através de manufatura aditiva. Para dar resposta às 3 questões especificadas na Secção 1.2, foram elaborados estudos de *design*, análises exploratórias e ensaios numéricos e experimentais de um conjunto que visa melhorar a interação utilizador-produto. Este Capítulo, culmina na análise de todos os passos elaborados ao longo do projeto.

Neste âmbito, agregam-se qualitativamente várias corroborações e descobertas. A fabricação do protótipo é uma potencial prova de que o fabrico aditivo e, em especial, o método FFF, demonstra boa qualidade e exequibilidade para a fabricação de produtos funcionais. A sua aplicação permitiu uma ampla liberdade no *design* de todo o conjunto, que outrora seria difícil de atingir por métodos de fabricação convencionais. Contudo, importa não deixar de referir, que a aplicabilidade demonstrou-se eficiente devido ao algoritmo de otimização topológica e, em especial, ao motor de geração de *design* do *Fusion 360*, definindo um modelo sub-ótimo.

Acerca da análise e discussão de resultados, assim como na demonstração gráfica das curvas de Força *versus* Deslocamento relativos aos ensaios do chassi, é testemunhado um cenário defeituoso por parte do protótipo. A grande flexibilidade do chassi pelos deslocamentos exagerados e a dimensão de rotação operacional, constata um comportamento desajustado do modelo para a sua adoção no terreno. Porém, pela sua utilização e experimentação em ambiente não controlado, é notável a sua segurança e equilíbrio, emancipando a possibilidade de adoção de um análogo de outra densidade ou material. Esta contrariedade entre resultados experimentais e numéricos e a perceção de confiabilidade do modelo, associada aos testes no terreno, são deveras importantes no âmbito do trabalho e desenvolvimento contínuos neste mote. A subjetividade relacionada com a utilização do selim e dos fatores que influenciam o conforto de cada utilizador, são motivos de implementação de processos de customização, largamente associados ao fabrico aditivo, nos selins principalmente nas modalidades de resistência.

Também durante a discussão de resultados foi revelada uma lacuna de encaixe do chassi relacionada com o desempenho do material. Apesar de elaborada a análise comparativa do chassi com o seu análogo sólido e o *benchmark*, foi percecionada uma falha comparativa do *nylon* a um modelo similar de outro material distinto. Embora a escolha do *nylon* ter-se revelado, na componente teórica, a mais apropriada tendo em conta os

requerimentos químicos do material, uma possível dispersão dos resultados através da fabricação e teste de um protótipo semelhante composto por outro material, contido no espectro da *Ultimaker*, poderia desenvolver uma discussão mais aprofundada, ainda que este não cumprisse com o exigido pelas condições do ambiente. Contudo, salvaguarda-se a fiabilidade dos resultados para futuras investigações neste âmbito.

Quanto à esponja concebida para acoplar ao chassi, como examinado na Secção 8.1.2, foi demonstrada conformidade com o projetado inicialmente, apenas registando-se uma ligeira margem de erro à luz das limitações inerentes à precisão do fabrico. Já na discussão acerca da experimentação da esponja no terreno, para um indivíduo de menor massa, a mesma demonstrou ser demasiado macia para utilização, ainda que tenha sido estabelecido conforto. Desta forma, importa concluir que o apuramento da influência dos erros mencionado no processo de dimensionamento da rigidez da esponja, são fulcrais na sua orientação para a redução da magnitude dos picos de pressão de contacto. Com isto, numa iteração deste projeto, dá-se ênfase à aplicação minuciosa de medição e registo de pressões, a montante do processo de atribuição de rigidez por cada zona. Importa ainda ressaltar a fiabilidade do método de projeção da esponja, podendo recuar e corrigir os valores de rigidez originalmente selecionados.

Colocando este projeto no espectro do mercado, é possível afirmar que o mesmo desafia os *designs* de selins atuais surgindo como uma nova abordagem não só de fabrico, mas também relativa à sua aparência e função, já mencionado. Apesar de restrito, como se pôde constatar, um conjunto inteiriço aglomerando selim, espigão e suporte, demonstra ser mais leve que o *benchmark*, chamando também à atenção para a análise de mercado elaborada na Secção . Saliente-se ainda que o deslocamento global, relativo ao chassi, exportado do *Fusion 360*, comparando-o com aqueles analisados nos ensaios do Capítulo 7, desafia também a veracidade do *software* na geração e otimização topológica do *design* do selim.

Importa também referir algumas limitações impactantes no processo desta dissertação. A falta de um caso de estudo específico influenciou e dificultou a seleção de algumas variáveis de decisão, mencionadas ao longo do projeto. A inclusão de um caso de estudo, tratando-se de um processo de customização, seria interessante e vantajoso na aquisição de dados de entrada associados ao *bike-fit* e às características de atuação da esponja, como mencionado acima. Além do mais, existiria a possível formalização desta dissertação, como uma ferramenta de avaliação e atribuição personalizada no dimensionamento da esponja. Juntamente a isto, a falta de equipamento e ambiente controlado de medição de pressões impediu a perceção da evolução da escala de conforto no pré e pós dimensionamento da esponja.

Uma outra limitação que importa referir é a escolha do método de fabrico. Apesar da objetificação ao uso do FFF, a escolha de outro processo, poderia recorrer em melhores resultados e qualidade de impressão superiores para a esponja, revisto na literatura. Neste campo estão ainda associadas limitações de *hardware* relativas à dimensão do bico extrusor principal. Apesar de confirmada a precisão obtida com a utilização de um *nozzle* de diâmetro de 0,4 mm, a impressão com um *nozzle* de diâmetro menor viria a ser uma alternativa mais viável, na diminuição ou eliminação dos efeitos de *stringing* e qualidade global maior dentro da malha.

Por fim, facilitando o processo de fabricação do protótipo, pela abordagem separatista em duas peças, verificou-se potencialidades relativas ao reaproveitamento da peça esponja como uma vertente de substituição ou de *redesign* de um modelo obsoleto de selim, como

foi o exemplo do *benchmark*. Além disso, esta dissertação permite ainda derivar este projeto, numa clara possibilidade de adotar esta tecnologia transversalmente a todas as modalidades de ciclismo e mobilidade sustentável do domínio da bicicleta. A humanização da bicicleta é um desafio e oportunidade para o *design* e engenharia, incrementar o conforto e ergonomia da mesma, modificando o paradigma da bicicleta beneficiando de ser um meio de transporte mais versátil, económico e com impacto ambiental reduzido.

9.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros propõem-se:

- O estudo aprofundado deste protótipo e/ou similares variando características como a densidade, padrão de *infill* e pós-processamento/cura, avaliando o seu desempenho, rigidez e estabilidade, com o objetivo de perceber a influência destas características na parametrização da impressão do modelo;
- Variar o material de fabricação do modelo, estendendo a pesquisa a toda a gama de termoplásticos e compósitos compatíveis ao método de FFF, com possibilidade de adaptação do modelo de geração de *design*, com o objetivo de compreender a influência do material no desempenho do selim. Esta proposta visa o estudo de uma solução capaz de satisfazer todos os requisitos para a sua usabilidade, tanto no ambiente recreativo como em prova.
- Estender as propostas anteriores, aplicado ao *design* convencional do selim, cuja componente de fixação são os *rails*.
- A aplicação desta metodologia de projeto a um caso de estudo individual, principalmente à peça esponja, com equipamento de medição de pressões em tempo real.
- A elaboração de ensaios de fadiga descritos pela norma ISO 4210-9:2014 tanto ao modelo obtido neste projeto como a análogos produzidos com outras características.
- A exploração e fabricação por outros processos de manufatura aditiva, para obtenção tanto do chassi como da esponja, visando a adequação do método à peça.
- Por fim, a investigação e construção de um modelo de selim que acompanhe e permita o movimento natural da inclinação da pélvis, similar aquele que é reproduzido ao caminhar [82].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Referências

- [1] Azlin, M. N., Ilyas, R. A., Zuhri, M. Y., Sapuan, S. M., Harussani, M. M., Sharma, S., Nordin, A. H., Nurazzi, N. M., & Afiqah, A. N. (2022). 3D Printing and Shaping Polymers, Composites, and Nanocomposites: A Review. *Polymers 2022*, Vol. 14, Page 180, 14, 180. <https://doi.org/10.3390/POLYM14010180>
- [2] Treloar, I. (2021, dezembro). *Cyclingtips*. <https://cyclingtips.com/2021/12/millions-of-cyclists-billions-of-kilometres-unpacking-a-year-of-strava-data/>
- [3] Holliday, W., Theo, R., Fisher, J., & Swart, J. (2019). Cycling: joint kinematics and muscle activity during differing intensities. *Sports Biomechanics*. <https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1640279>
- [4] Bressel, E., & Larson, B. J. (2003). Bicycle seat designs and their effect on pelvic angle, trunk angle, and comfort. *Medicine and science in sports and exercise*, 35, 327–332. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000048830.22964.7C>
- [5] Bini, R., & Priego-Quesada, J. (2021). Methods to determine saddle height in cycling and implications of changes in saddle height in performance and injury risk: A systematic review. *Journal of Sports Sciences*. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1994727>
- [6] Wu, H., Fahy, W. P., Kim, S., Kim, H., Zhao, N., Pilato, L., Kafi, A., Bateman, S., & Koo, J. H. (2020). Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing. *Progress in Materials Science*, 111, 100638. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2020.100638>
- [7] *History: early bicycle saddles – The webpage Bicycle Museum*. (s.d.). <https://webpagebicyclemuseum.co.uk/tour/early-bicycle-saddles/>
- [8] *Why Is a Bicycle Seat Called a Saddle | Pedal Chile |*. (s.d.). <https://pedalchile.com/blog/mtb-seat>
- [9] *Bike Saddle History - Companion Bike Seat*. (s.d.). <https://www.thebikeseat.com/bike-saddle-history.html>
- [10] Minetti, A. E., Pinkerton, J., & Zamparo, P. (2001). From bipedalism to bicyclism: evolution in energetics and biomechanics of historic bicycles. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268, 1351. <https://doi.org/10.1098/RSPB.2001.1662>
- [11] *The Bicycle Seat: Greater Cleveland Innovations - cleveland.com*. (s.d.). https://www.cleveland.com/metro/2011/08/the_bicycle_seat_greater_cleve.html

- [12] Lui, H., Mmonu, N., Awad, M. A., Namiri, N. K., Zheng, M. Y., Amend, G. M., Eisenberg, M. L., & Breyer, B. N. (2021). Association of Bicycle-Related Genital Numbness and Female Sexual Dysfunction: Results From a Large, Multinational, Cross-Sectional Study. *Sexual medicine*, *9*. <https://doi.org/10.1016/J.ESXM.2021.100365>
- [13] *Once Upon a Time, Idéale*. (s.d.). <https://www.sellesideale.fr/en/history>
- [14] *Our history - Company*. (s.d.). https://www.sellesmp.com/eu_en/company/our-history.html
- [15] *About us - Selle Italia*. (s.d.). <https://www.selleitalia.com/about-us/>
- [16] *New for consumers: Carbon and Specialized 3D print superior comfort bike saddle - 3D Printing Industry*. (s.d.). <https://3dprintingindustry.com/news/new-for-consumers-carbon-and-specialized-3d-print-superior-comfort-bike-saddle-160852/>
- [17] Sanford, T., Gadzinski, A. J., Gaither, T., Osterberg, E. C., Murphy, G. P., Carroll, P. R., & Breyer, B. N. (2018). Effect of Oscillation on Perineal Pressure in Cyclists: Implications for Micro-Trauma. *Sexual medicine*, *6*, 239–247. <https://doi.org/10.1016/J.ESXM.2018.05.002>
- [18] Bressel, E., Bliss, S., & Cronin, J. (2009). A field-based approach for examining bicycle seat design effects on seat pressure and perceived stability. *Applied Ergonomics*, *40*, 472–476. <https://doi.org/10.1016/J.APERGO.2008.10.001>
- [19] Potter, J. J., Sauer, J. L., Weisshaar, C. L., Thelen, D. G., & Ploeg, H. L. (2008). Gender differences in bicycle saddle pressure distribution during seated cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *40*, 1126–1134. <https://doi.org/10.1249/MSS.0B013E3181666EEA>
- [20] *Sit bone measurement | fitting bike saddle | SQlab Ergonomics Expert*. (s.d.). <https://www.sq-lab.com/en/ergonomics/sqlab-measurement-concepts/sit-bone-measurement/>
- [21] Leibovitch, I., & Mor, Y. (2005a). The vicious cycling: Bicycling related urogenital disorders. *European Urology*, *47*, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2004.10.024>
- [22] Breda, G., Piazza, N., Bernardi, V., Lunardon, E., & Caruso, A. (2005). Development of a new geometric bicycle saddle for the maintenance of genital-perineal vascular perfusion. *The journal of sexual medicine*, *2*, 605–611. <https://doi.org/10.1111/J.1743-6109.2005.00088.X>
- [23] Piazza, N., Cerri, G., Breda, G., & Paggiaro, A. (2020). The effect of a new geometric bicycle saddle on the genital-perineal vascular perfusion of female cyclists. *Science Sports*, *35*, 161–167. <https://doi.org/10.1016/J.SCISPO.2019.07.010>
- [24] Swart, J., & Holliday, W. (2019). Cycling Biomechanics Optimization - The (R)Evolution of Bicycle Fitting. *Current Sports Medicine Reports*, *18*, 490–496. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000665>
- [25] Holliday, W., & Swart, J. (2021). Anthropometrics, flexibility and training history as determinants for bicycle configuration. *Sports Medicine and Health Science*, *3*, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.smhs.2021.02.007>

- [26] Christiaans, H. H., & Bremner, A. (1998). Comfort on bicycles and the validity of a commercial bicycle fitting system. *Applied Ergonomics*, *29*, 201–211. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(97\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(97)00052-5)
- [27] Visentini, P. J., McDowell, A. H., & Pizzari, T. (2021). Factors associated with overuse injury in cyclists: A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport*. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMS.2021.12.008>
- [28] Ferrer-Roca, V., Roig, A., Galilea, P., & García-López, J. (2012). *Influence of saddle height on lower limb kinematics in well-trained cyclists: static vs. dynamic evaluation in bike fitting*. www.nscs.com
- [29] Encarnación-Martínez, A., Ferrer-Roca, V., & García-López, J. (2018). *Influence of sex on current methods of adjusting saddle height in indoor cycling*. www.nscs.com
- [30] Chabroux, V., Barelle, C., & Favier, D. (2012). *Aerodynamics of Cyclist Posture, Bicycle and Helmet Characteristics in Time Trial Stage*.
- [31] Millour, G., Duc, S., Puel, F., & Bertucci, W. (2020). Comparison of static and dynamic methods based on knee kinematics to determine optimal saddle height in cycling. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, *21*. <https://doi.org/10.37190/abb-01428-2019-02>
- [32] Mestdagh, K. D. V. (1998). Personal perspective: in search of an optimum cycling posture. *Applied Ergonomics*, *29*, 325–334. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(97\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(97)00080-X)
- [33] Manigandan, S., Gunasekar, P., Kumar, T. R. P., Alahmadi, T. A., Subramanian, N., Pugazhendhi, A., & Brindhadevi, K. (2021). Influence of dynamic position, fluid intake, hydration, and energy expenditure on sustainable mobility transport. *Applied Acoustics*, *175*, 107809. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2020.107809>
- [34] Menard, M., Domalain, M., Decatoire, A., & Lacouture, P. (2020). Influence of saddle setback on knee joint forces in cycling. *Sports Biomechanics*, *19*, 245–257. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1466906>
- [35] Wilkinson, R. D., & Kram, R. (2022). Nose-down saddle tilt improves gross efficiency during seated-uphill cycling. *European journal of applied physiology*, *122*, 409–414. <https://doi.org/10.1007/S00421-021-04841-Y>
- [36] (UCI), I. C. U. (2023). Clarification guide of the UCI Technical Regulation.
- [37] Bressel, E., & Cronin, J. (2005). Bicycle seat interface pressure: reliability, validity, and influence of hand position and workload. *Journal of Biomechanics*, *38*, 1325–1331. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOMECH.2004.06.006>
- [38] Litwinowicz, K., Choroszy, M., & Wróbel, A. (2021). Strategies for Reducing the Impact of Cycling on the Perineum in Healthy Males: Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine*, *51*, 275–287. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01363-z>
- [39] Javaloyes, A., Mateo-March, M., Carpes, F. P., Moya-Ramon, M., Lopez-Grueso, R., & Zabala, M. (2021). Bilateral asymmetries in professional cyclists during a Grand Tour. *Isokinetics and Exercise Science*, *29*, 455–461. <https://doi.org/10.3233/IES-202234>

- [40] Rossato, M., Bini, R. R., Carpes, F. P., Diefenthaler, F., & Moro, A. R. (2008). Cadence and workload effects on pedaling technique of well-trained cyclists. *International journal of sports medicine*, *29*, 746–752. <https://doi.org/10.1055/S-2008-1038375>
- [41] Diefenthaler, F., Coyle, E. F., Bini, R. R., Carpes, F. P., & Vaz, M. A. (2012). Muscle activity and pedal force profile of triathletes during cycling to exhaustion. *Sports biomechanics*, *11*, 10–19. <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.637125>
- [42] Clarsen, B., Myklebust, G., & Bahr, R. (2013). Development and validation of a new method for the registration of overuse injuries in sports injury epidemiology: the Oslo Sports Trauma Research Centre (OSTRC) Overuse Injury Questionnaire. *British Journal of Sports Medicine*, *47*, 495–502. <https://doi.org/10.1136/BJSPORTS-2012-091524>
- [43] du Toit, F., Schweltnus, M., Wood, P., Swanevelder, S., Killops, J., & Jordaan, E. (2020). History of chronic disease is a novel intrinsic risk factor associated with gradual onset injuries in recreational road cyclists: A cross-sectional study in 21,824 cyclists - SAFER XIV. *Physical Therapy in Sport*, *46*, 137–144. <https://doi.org/10.1016/J.PTSP.2020.08.008>
- [44] Leibovitch, I., & Mor, Y. (2005b). The vicious cycling: Bicycling related urogenital disorders. *European Urology*, *47*, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2004.10.024>
- [45] Jeong, S.-J., Park, K., Moon, J.-D., & Ryu, S. B. (2002). Bicycle saddle shape affects penile blood flow. *International Journal of Impotence Research*, *14*, 513–517. <https://doi.org/10.1038=sj.ijir.3900929>
- [46] Mackinnon, S. E. (2002). Pathophysiology of nerve compression. *Hand clinics*, *18*, 231–241. [https://doi.org/10.1016/S0749-0712\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0749-0712(01)00012-9)
- [47] Dahlquist, M., Leisz, M.-C., & Finkelstein, M. (2014). The Club-Level Road Cyclist: Injury, Pain, and Performance. www.cjsportmed.com
- [48] Edler, C., Droste, J. N., Anemüller, R., Pietsch, A., Gebhardt, M., & Riepenhof, H. (2023). Injuries in elite road cyclists during competition in one UCI WorldTour season: a prospective epidemiological study of incidence and injury burden. *The Physician and sportsmedicine*, *51*, 129–138. <https://doi.org/10.1080/00913847.2021.2009744>
- [49] Quesada, J. I. P., Kerr, Z. Y., Bertucci, W. M., & Carpes, F. P. (2019). The association of bike fitting with injury, comfort, and pain during cycling: An international retrospective survey. *European Journal of Sport Science*, *19*, 842–849. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1556738>
- [50] Bere, P., Neamtu, C., & Udriou, R. (2020). Novel Method for the Manufacture of Complex CFRP Parts Using FDM-based Molds. *Polymers 2020, Vol. 12, Page 2220, 12, 2220*. <https://doi.org/10.3390/POLYM12102220>
- [51] *How Products are Made - Bicycle Seat*. (s.d.). <http://www.madehow.com/Volume-7/Bicycle-Seat.html>
- [52] *Gelu A3*. (s.d.). <https://gelucarboncreation.com/product/gelu-a-3/>
- [53] *Fizik's Antares R3*. (s.d.). https://www.fizik.com/eu_en/antares-r3.html

- [54] *Selle Italia Watt Supercarbonio Superflow*. (s.d.). <https://www.selleitalia.com/watt-kit-carbonio-superflow/>
- [55] *Fizik's Antares Versus Evo R3 Adaptive*. (s.d.). https://www.fizik.com/us_en/antares-versus-evo-r3-adaptive.html
- [56] *Specialized S-Works Romin EVO*. (s.d.). <https://www.specialized.com/pt/pt/s-works-romin-evo-com-mirror/p/205228?color=330429-205228>
- [57] *Selle Italia SLR Boost 3D TI 316 Superflow*. (s.d.). <https://www.selleitalia.com/slr-boost-3d-ti-316-superflow/>
- [58] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, *143*, 172–196. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012>
- [59] Novak, J. I., & Novak, A. R. (2021). Is additive manufacturing improving performance in Sports? A systematic review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, *235*, 163–175. <https://doi.org/10.1177/1754337120971521>
- [60] Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *129*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2018.04.001>
- [61] Relvas, C. (2017). *Design Engenharia da ideia ao produto*. www.engebook.com
- [62] Park, S., Shou, W., Makatura, L., Matusik, W., & Fu, K. (2022). 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. *Matter*, *5*, 43–76. <https://doi.org/10.1016/J.MATT.2021.10.018>
- [63] Nickels, L. (2014). 3D printing the world's first metal bicycle frame. *Metal Powder Report*, *69*, 38–40. [https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(14\)70083-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(14)70083-9)
- [64] McEwen, I., Cooper, D. E., Warnett, J., Kourra, N., Williams, M. A., & Gibbons, G. J. (2018). Design manufacture of a high-performance bicycle crank by Additive Manufacturing. *Applied Sciences (Switzerland)*, *8*. <https://doi.org/10.3390/APP8081360>
- [65] Tanikella, N. G., Savonen, B., Gershenson, J., & Pearce, J. M. (2017). Viability of Distributed Manufacturing of Bicycle Components with 3-D Printing: CEN Standardized Polylactic Acid Pedal Testing. *Journal of Humanitarian Engineering*, *5*. <https://doi.org/10.36479/JHE.V5I1.60>
- [66] Jaisawal, R., & Agrawal, V. (2021). Generative Design Method (GDM) – A State of Art. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1104*, 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1104/1/012036>
- [67] Jiang, L., Chen, S., Sadasivan, C., & Jiao, X. (2017). Structural topology optimization for generative design of personalized aneurysm implants: Design, additive manufacturing, and experimental validation. *2017 IEEE Healthcare Innovations and Point of Care Technologies, HI-POCT 2017, 2017-December*, 9–13. <https://doi.org/10.1109/HIC.2017.8227572>

- [68] Krishna, L. S. R., Mahesh, N., & Sateesh, N. (2017). Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 4, 1414–1422. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.01.163>
- [69] Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., & Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials Design*, 183, 108137. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2019.108137>
- [70] Helou, M., & Kara, S. (2018). Design, analysis and manufacturing of lattice structures: An overview. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31, 243–261. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1407456>
- [71] Chen, L. Y., Liang, S. X., Liu, Y., & Zhang, L. C. (2021). Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 146, 100648. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2021.100648>
- [72] *S series materials*. (s.d.). <https://ultimaker.com/materials/s-series-materials/>
- [73] Mujika, I., & Padilla, S. (2001). Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 31, 479–487. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131070-00003>
- [74] Marcolin, G., Panizzolo, F. A., Paoli, A., & Petrone, N. (2018). Experimental methods for the mechanical characterization of cycling short pads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 232, 22–27. <https://doi.org/10.1177/1754337117696390>
- [75] Patel, P. S., Shepherd, D. E., & Hukins, D. W. (2008). Compressive properties of commercially available polyurethane foams as mechanical models for osteoporotic human cancellous bone. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 9, 137. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-9-137>
- [76] *S-works com Mirros*. (s.d.). <https://www.specialized.com/pt/pt/saddle-mirror>
- [77] Guessasma, S., Belhabib, S., & Nouri, H. (2021). Effect of printing temperature on microstructure, thermal behavior and tensile properties of 3D printed nylon using fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science*, 138. <https://doi.org/10.1002/APP.50162>
- [78] Collins, M. N., Culebras, M., & Ren, G. (2021). The use of lignin as a precursor for carbon fiber-reinforced composites. *Micro and Nanolignin in Aqueous Dispersions and Polymers: Interactions, Properties, and Applications*, 237–250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823702-1.00011-6>
- [79] Krucinska, I., & Stypka, T. (1991). Direct measurement of the axial poisson's ratio of single carbon fibres. *Composites Science and Technology*, 41, 1–12. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90049-U](https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90049-U)
- [80] Mirdehghan, S. A. (2021). Fibrous polymeric composites. *Engineered Polymeric Fibrous Materials*, 1–58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824381-7.00012-3>
- [81] Ultimaker. (2022). Ultimaker Nylon - technical data sheet.
- [82] *Active Saddle Technology*. (s.d.). <https://sqlab-usa.com/pages/sqlab-active-saddle-technology>

Apêndice A

Complementos ao Capítulo 5 - Definição dos ensaios numéricos dos espécimes de malhas de pontes flexoras da Secção 8.1.2

Este Apêndice contém a informação relativa à definição dos ensaios numéricos, da Secção 8.1.2, dos espécimes de malha de ponte flexora similares àqueles impressos de dimensão de espessura de {0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 1,2} mm descritos na Secção 5.3.3.

Para a definição e computação do modelo de simulação usou-se o *software Soliworks Community SP3.1*. As condições de fronteira foram definidas como encastramento na base do espécime (todos os graus de translação e rotação nulos/fixos), identificado pelas setas a cor azul na Figura A.1. A malha de elementos foi definida segundo o critério de *Standard Mesh* com elementos de tamanho de 0,661 mm e tolerância de 0,033 mm, equivalente ao refinamento *fine*. Para os 5 espécimes as malhas apresentam, dependendo da dimensão de espessura, entre 82867 a 120585 elementos e entre 160286 a 216196 nodos com jacobiano de 16 pontos, Figura A.1. Foi definido apenas deslocamento constante no tempo na direção vertical do corpo punção e velocidade 10 mm/min, identificado a cor laranja na Figura A.1. Para o material foi utilizada a curva de comportamento do *nylon* da Figura 5.10, como referido.

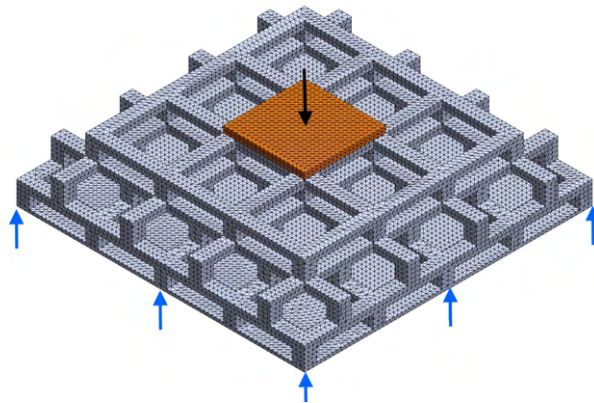


Figura A.1: Malha de elementos finitos do espécime de malha de ponte flexora de 1,2 mm de espessura. As setas a cor azul identificam a zona de encastramento (base) e a seta a cor preto identifica o vetor deslocamento vertical aplicado ao punção rígido (corpo cor laranja).

Apêndice A

Complementos ao Capítulo 5 - Definição dos ensaios numéricos dos espécimes de malhas de pontes flexoras com inclinação da Secção 8.1.2

Este Apêndice contém a informação relativa à definição dos ensaios numéricos, da Secção 8.1.2, dos espécimes de malha de ponte flexora de espessuras de 0,67 mm e 0,79 mm, com inclinações de 32,6° e 28° referentes aos maiores valores de inclinação contidos nas áreas das respetivas zonas de Z1 e Z2, respetivamente.

Para a definição e computação do modelo de simulação usou-se o *software Soliworks Community SP3.1*. As condições de fronteira foram definidas como encastramento na base do espécime (todos os graus de translação e rotação nulos/fixos), identificado pelas setas a cor azul na Figura A.1. A malha de elementos foi definida segundo o critério de *Standard Mesh* com elementos de tamanho de 1,057 mm e tolerância de 0,053 mm, equivalente ao refinamento *fine*. Para os 2 espécimes as malhas apresentam, para as espessuras de 0,67 mm e 0,79 mm, 27140 a 29102 elementos e entre 54408 a 62107 nodos com jacobiano de 16 pontos, Figura A.1. Foi definido apenas deslocamento constante no tempo na direção vertical do corpo punção e velocidade 10 mm/min, identificado a cor laranja na Figura A.1. Para o material foi utilizada a curva de comportamento do *nylon* da Figura 5.10, como referido.

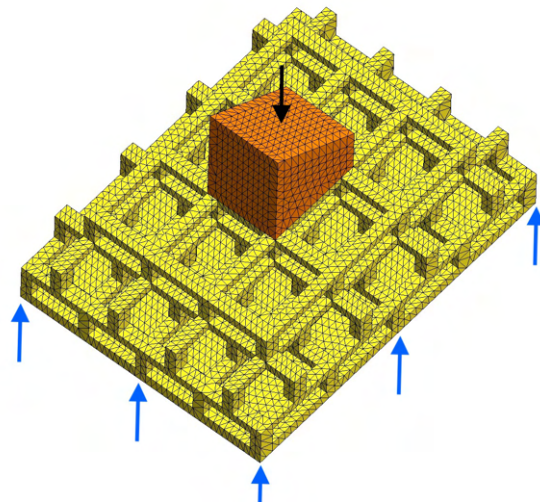


Figura A.1: Malha de elementos finitos do espécime de 0,79 mm de espessura e inclinação de 28° referente à zona Z2. As setas a cor azul identificam a zona de encastramento (base) e a seta a cor preto identifica o vetor deslocamento vertical aplicado ao punção rígido (corpo cor laranja).

Apêndice A

Complementos ao Capítulo 6 - Registo fotográfico do processo de fabricação do conjunto

Este Anexo contém a informação suplementar ao Capítulo 6.

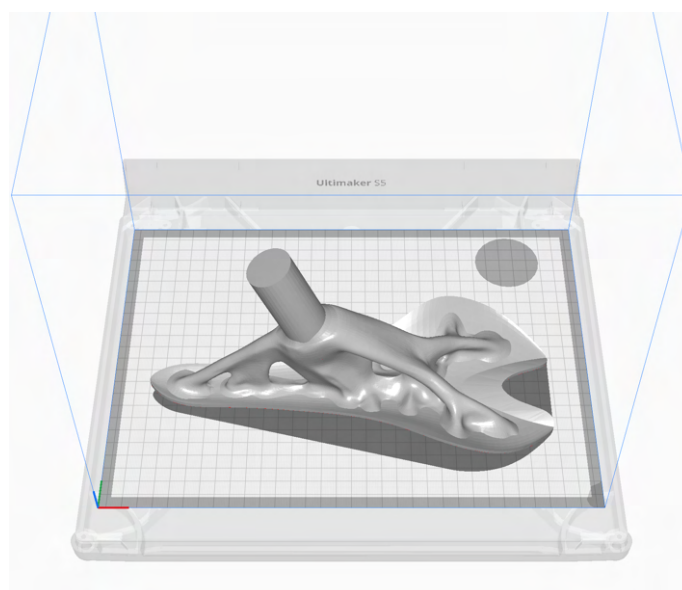


Figura A.1: Disposição da peça chassi sobre a cama impressão em ambiente de *slice*.

Tabela A.1: Parâmetros de impressão do chassi, *nylon* e PVA.

Parâmetro	Valor	
	Nylon	PVA
Temperatura de extrusão	245 °C	220 °C
Temperatura da cama	70 °C	70 °C
Velocidade de impressão	35 mm/s	35 mm/s
Ventoinha de arrefecimento	0%	0%
Densidade	50% (Triangular)	20% (Zig zag)
Espessura de parede	2,4	2,4
Altura de camada	0,3	0,3



Figura A.2: Bruto de impressão do chassi mergulhado em água.

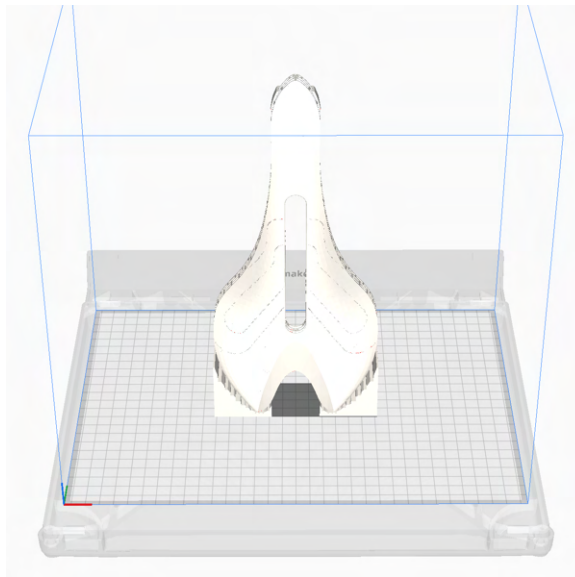


Figura A.3: Disposição da peça esponja sobre a cama de impressão em ambiente de *slice*.

Tabela A.2: Parâmetros de impressão da esponja, *nylon*.

Nylon	
Parâmetros	Valor
Temperatura de extrusão	225 °C
Temperatura da cama	70 °C
Altura de camada	0,1 mm
Velocidade de impressão	15 mm/s
Ventoinha de arrefecimento	25%
Densidade	100%
Espessura de parede	2,0 mm
Distância de retração	4,5 mm