



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Pedro Miguel Gonçalves Rodrigues

**COMPONENTES OTIMIZADOS POR DFAM:  
FABRICO E CARACTERIZAÇÃO**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na área de Produção e Projeto, orientada pela Professora Ana Paula Piedade e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica de Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

julho de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## **Componentes otimizados por DfAM: fabrico e caracterização**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

### **DfAM optimized components: fabrication and characterization**

**Autor**

**Pedro Miguel Gonçalves Rodrigues**

**Orientadora**

**Ana Paula da Fonseca Piedade**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Doutora Ana Catarina da Silva Pinho</b> Investigadora da Universidade de Coimbra
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes</b> Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra
<b>Orientador</b>	<b>Professora Doutora Ana Paula da Fonseca Piedade</b> Professora Auxiliar com Agregação da Universidade de Coimbra

**Coimbra, julho, 2022**

“Não há passos divergentes para quem se quer encontrar”

Jorge Palma

## Agradecimentos

Gostaria de usar esta página para agradecer a algumas pessoas, que, de forma ativa ou passiva, contribuíram para este trabalho.

À minha orientadora Professora Doutora Ana Paula da Fonseca Piedade, à Doutora Catarina Pinho e ao Doutor Akel Kanaan, por todo o apoio e disponibilidade que me mostraram durante toda a duração da realização deste trabalho.

Aos meus pais, por todo o apoio e sacrifícios que fizeram para que eu pudesse hoje estar aqui, na posição em que estou, e ter a educação que tive. Muito obrigado.

Ao meu avô Lino, e à minha avó Aurora, que sempre acreditaram e transmitiram a confiança que tinham em mim, e a todos os familiares que me apoiaram, o meu sincero agradecimento.

Ao Mick, Carlos, e Paula, que estiveram lá para mim sempre que precisei e me acolheram em tempos difíceis.

À Maria Eugénia, pelo apoio incondicional que me dá, e por ser um abrigo seguro no qual posso sempre contar.

Aos meus amigos, que me apoiaram durante todo o percurso académico e não académico durante estes anos, e me ensinaram valiosas lições sobre a amizade, e companheirismo. De entre eles quero destacar o Rafael Jorge, Miguel Gomes, André Pereira e Paulo Guedes. São pessoas que terão sempre um lugar especial no meu coração.

Quero também agradecer a todos os docentes que impactaram o meu percurso académico de forma positiva, e aos funcionários do departamento, que, nestes últimos anos, fizeram do DEM a minha segunda casa.

E por último quero agradecer aos meus colegas e amigos do grupo de materiais, os quais tornaram esta última etapa do meu percurso universitário especialmente agradável.

O meu muito sincero obrigado a todos.

## Resumo

O fabrico aditivo permite a produção de componentes de geometria complexa, impossíveis de produzir por tecnologias convencionais que constituem os fabricos subtrativo e conformacional, e a um custo acessível. Através do fabrico aditivo, a pessoa comum não necessita de grandes equipamentos ou instalações pra produzir componentes que lhe sejam úteis.

O desenho generativo, a partir de indicações de *design* iniciais definidas pelo utilizador, utiliza métodos computacionais para gerar geometrias orgânicas de forma a projetar um componente de acordo com uma utilização final pré-definida. E, concomitantemente, permite a otimização da massa dos componentes e o ajuste das suas propriedades mecânicas.

O objetivo deste trabalho é a produção e caraterização de componentes desenvolvidos por desenho generativo e fabricados por fabrico aditivo, bem como o estudo da otimização de alguns parâmetros de deposição, nomeadamente a variação da percentagem de *infill* (preenchimento). Assim, é pretendido, produzir componentes otimizados em termos de massa (considerando as solicitações a que são sujeitos e o material em que são fabricados) através da utilização de desenho generativo. A otimização do processamento inclui alguns dos parâmetros do fabrico aditivo, a saber: (i) o ângulo de impressão e (ii) a percentagem de *infill* do componente.

O material utilizado foi um copolímero termoplástico reciclado a partir de tabliers de automóveis dados para abate (poli(acrilonitrilo-butadieno-estireno) (ABS), introduzindo assim o conceito de economia circular neste trabalho. Os componentes produzidos foram pedais de bicicleta, mais especificamente, pedais de plataforma.

A forma inicial dos componentes foi desenvolvida utilizando o Autodesk Inventor, e através da ferramenta de design generativo do Autodesk Fusion 360, foi gerada uma forma otimizada, considerando as solicitações sofridas pelo componente e limites de deformações definidos para o mesmo. Por fim os componentes foram produzidos por FFF (do inglês *Fused Filament Fabrication*), e sujeitos a testes mecânicos.

De entre os pedais desenvolvidos, destacou-se um dos modelos por, em comparação ao pedal de controlo (material termoendurecível), ser cerca de 12% mais leve e apresentar uma maior resistência ao impacto.

**Palavras-chave:** Desenho Generativo, Fabrico Aditivo, Pedal, Otimização, Percentagem de *Infill*.

## Abstract

Additive manufacturing allows the production of components with complex geometry, impossible to produce by conventional technologies that include subtractive and conformational manufacturing, and at an affordable cost. Everyone that needs to use additive manufacturing, in general, does not need large equipment or facilities to produce useful components.

The generative design, from initial user-defined design indications, uses computational methods to generate organic geometries to design a component according to a pre-defined end use. And, at the same time, it allows the optimization of the mass of the components and the adjustment of their mechanical properties.

The objective of this work is the production and characterization of components developed by generative design and produced by additive manufacturing, as well as the study of the optimization of some deposition parameters, namely the variation of the infill percentage. Thus, it is intended to produce components optimized in terms of mass (considering the mechanical solicitations to which they are subjected and the material in which they are manufactured) through the use of generative design. Processing optimization includes some of the additive manufacturing parameters, namely: (i) the printing angle and (ii) the component's infill percentage.

The material used was a thermoplastic copolymer recycled from car dashboards given for slaughter (poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) (ABS), thus introducing the concept of circular economy in this work. The components produced were bicycle pedals, more specifically, platform pedals.

The initial shape of the components was developed using Autodesk Inventor, and through the Autodesk Fusion 360 generative design tool, an optimized shape was generated, considering the mechanical requests of the component and its deformation limits. Finally, the components were produced by FFF (Fused Filament Fabrication), and subjected to mechanical tests.



Among the pedals developed, one of the models stood out because, compared to the control pedal (thermosetting material), it is about 12% lighter and has greater impact resistance.

**Keywords:** Generative Design, Additive Manufacturing, Pedal, Optimization, *Infill* Percentage.

## Índice

Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xii
Simbologia.....	xii
Siglas e Acrónimos.....	xii
INTRODUÇÃO.....	1
Objetivo .....	2
Estrutura da Dissertação .....	3
1. Estado da arte.....	4
1.1. Fabrico Aditivo.....	4
1.1.1. FFF .....	5
1.2. Desenho Generativo .....	6
1.3. Produção de pedais com polímero reciclado .....	6
1.3.1. Esforços mecânicos nos pedais.....	9
2. Materiais e Procedimento Experimental .....	13
2.1. Materiais .....	13
2.2. Procedimento Experimental .....	13
2.2.1. Desenho generativo .....	13
2.3. Produção dos componentes por FFF .....	20
2.4. Ensaios de impacto .....	21
2.5. Análise visual dos componentes.....	24
3. Resultados e discussão .....	25
3.1. Componentes iniciais.....	25
3.1.1. Produção dos componentes .....	25
3.1.2. Ensaios de impacto .....	26
3.2. Otimização de <i>design</i> após ensaios de impacto.....	41
4. Conclusões e propostas para trabalhos futuros.....	49
4.1. Conclusões.....	49
4.2. Propostas para trabalhos futuros.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
APÊNDICE A .....	54
APÊNDICE B.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Processo de impressão de material por FFF (imagem adaptada de [6]).	6
Figura 1.2. Comparação das propriedades de provetes de ABS reciclado e não-reciclado (retirada de [1]).	7
Figura 1.3. Pedal de bicicleta Union SP-872N, disponível em [7].	8
Figura 1.4. Pedal de bicicleta <i>Race Face Ride</i> , disponível em [8].	8
Figura 1.5. Fases de um ciclo de pedalagem.	9
Figura 1.6. Forças (normal e tangencial) aplicadas no plano sagital do pedal.	9
Figura 1.7. Forças (efetiva e inefetiva) aplicadas no plano sagital do pedal.	10
Figura 1.8. Representação da montagem para o ensaio de resistência às cargas estáticas sobre os pedais (retirada de [11]).	10
Figura 1.9. Posição e aplicação de cargas sobre a bicicleta, nomeadamente nos pedais (retirada de [12]).	11
Figura 1.10. Representação da montagem do ensaio de resistência ao impacto (retirada de [11]).	12
Figura 1.11. Dimensões do indentador (retirada de [11]).	12
Figura 2.1. Filamento de ABS reciclado produzido pela Recycle®.	13
Figura 2.2. Pedal 1.	13
Figura 2.3. Pedal 2.	14
Figura 2.4. Pedal 3.	14
Figura 2.5. <i>Preserve geometries</i> (a verde) e <i>starting shapes</i> (a amarelo) consideradas para os pedais 1, 2 e 3.	14
Figura 2.6. <i>Constraints</i> para o desenho generativo dos componentes 1, 2 e 3.	15
Figura 2.7. Representação esquemática da fixação dos componentes.	16
Figura 2.8. Caso de carregamento 1.	16
Figura 2.9. <i>Constraints</i> para o desenho generativo dos componentes 1, 2 e 3.	17
Figura 2.10. <i>Outcomes</i> gerados pelo software de desenho generativo para o componente 1.	17
Figura 2.11. Representação do CP1 e da sua distribuição de tensões, no Autodesk Fusion 360.	18
Figura 2.12. <i>Outcomes</i> gerados pelo software de desenho generativo para o componente 2.	18

Figura 2.13.Representação do modelo CP2 e da sua distribuição de tensões, no Autodesk Fusion 360. ....	19
Figura 2.14. <i>Outcomes</i> gerados pelo software de desenho generativo para o componente 3. ....	19
Figura 2.15. <i>Outcomes</i> gerados pelo software de desenho generativo para o CP3. ....	20
Figura 2.16.Instron CEAST 9340. ....	22
Figura 2.17.Fotografia do modelo de pedal de controlo. ....	23
Figura 2.18.Representação da marcação do centro geométrico dos pedais.....	23
Figura 2.19.Representação dos modelos, com veio metálico, antes dos ensaios de impacto. ....	23
Figura 3.1. Imagem representativa da região central do pedal (CP1), tirada pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot G5</i> . ....	26
Figura 3.2. Imagem representativa do pedal (CP1), tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi. ....	27
Figura 3.3. Imagem representativa da região central do pedal (Componente 2), obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot G5</i> . ....	27
Figura 3.4. Imagem representativa do pedal (CP3), tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi. ....	27
Figura 3.5. Imagem representativa da região central do pedal de controlo, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot G5</i> . ....	28
Figura 3.6. Imagem representativa do pedal de controlo, tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi. ....	28
Figura 3.7. Fotografia do pedal 4, após ensaio de impacto, tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi. ....	29
Figura 3.8. Fotografia da secção transversal do pedal 4, após ensaio de impacto, tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi.....	29
Figura 3.9. Gráfico da energia-tempo, correspondente ao ensaio do pedal 4.....	30
Figura 3.10. Imagem representativa do pedal 5 após ensaio de impacto (caso A), obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot G5</i> . ....	30
Figura 3.11. Imagem representativa do pedal 5 (caso B) após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot G5</i> . ....	31
Figura 3.12. Gráfico da energia-tempo, correspondente aos ensaios do pedal 5. ....	31
Figura 3.13. Imagem representativa dos pedais de controlo, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot G5</i> : a) antes do ensaio de impacto; b) após o ensaio de impacto. ....	32
Figura 3.14. Gráfico energia-tempo, representativo dos ensaios dos pedais de controlo. ..	32
Figura 3.15. Fotografia representativa dos pedais com 75% de infill (CP3), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot G5</i> . ....	33

Figura 3.16 Imagem representativa dos pedais com 50% de infill (CP3), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5. ....	33
Figura 3.17. Gráfico da energia-tempo, correspondente aos ensaios representativos dos pedais do modelo CP3 e dos pedais de controlo. ....	34
Figura 3.18. Imagem representativa dos pedais com 100% de infill (CP1), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5. ....	35
Figura 3.19. Imagem representativa dos pedais com 75% de infill (CP1), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5. ....	35
Figura 3.20. Imagem representativa dos pedais com 50% de infill (CP1), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5. ....	35
Figura 3.21. Gráfico da energia-tempo, correspondente aos ensaios representativos dos pedais do modelo CP1 e dos pedais de controlo. ....	36
Figura 3.22. Fotografia representativa da secção transversal do interior dos pedais (CP3), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5. ....	37
Figura 3.23. Fotografia representativa da secção transversal do interior dos pedais (CP1), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5. ....	37
Figura 3.24. Imagem representativa da zona central o pedal (CP3 com 50% de infill), após ensaio de impacto com ressalto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5.....	38
Figura 3.25. Imagem representativa da zona central o pedal (CP3 com 100% de infill), após ensaio de impacto com ressalto, obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5.....	38
Figura 3.26 Gráfico da energia absorvida em função do tempo, correspondente aos ensaios onde ocorreu ressalto do provete.....	39
Figura 3.27 Representação esquemática da espessura mínima da zona de impacto dos componentes estudados. ....	40
Figura 3.28.Modelo CP4. ....	41
Figura 3.29.Fixações consideradas para o CP4. ....	42
Figura 3.30.Caso de carga 1.1. ....	42
Figura 3.31.Representação do caso de carga 1.2.....	43
Figura 3.32. Resultados da simulação estática (CP4): a) Deslocamentos provocados para o caso de carga 1.1; b) Fator de segurança para o caso de carga 1.1; c) Deslocamentos provocados para o caso de carga 1.2; d) Fator de segurança para o caso de carga 1.2. ....	44
Figura 3.33. Resultados da simulação estática (CP4): a) Distribuição de tensões no caso de carga 1.1; b) Zona de tensão máxima (pontual) para o caso de carga 1.1; c) Distribuição de tensões no caso de carga 1.2; d) Zona de tensão máxima (pontual) para o caso de carga 1.2.....	45

---

Figura 3.34. Fotografia da zona central do pedal (CP4), tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi.....	46
Figura 3.35. Fotografia da zona central do pedal (CP4), obtida pela máquina fotográfica CANON <i>PowerShot</i> G5: a) antes do ensaio de impacto; b) após ensaio de impacto.....	46
Figura 3.36. Gráfico energia-tempo referente aos ensaios de impacto do CP4.....	47
Figura 3.37. Gráfico de energia (tempo) referente ao ensaio 3 do CP4 e ao pedal de controlo.....	48

---

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Caraterísticas do CP1, obtido por desenho generativo. ....	17
<b>Tabela 2.2.</b> Caraterísticas do modelo CP2, obtido por desenho generativo. ....	18
<b>Tabela 2.3.</b> Caraterísticas do CP3, obtido por desenho generativo. ....	19
<b>Tabela 2.4.</b> Parâmetros de impressão utilizados neste trabalho.....	20
<b>Tabela 3.1.</b> Tabela de informações relativas às amostras com 100% de <i>infill</i> . ....	25
<b>Tabela 3.2.</b> Tabela da redução de massa média obtida pelo fabrico aditivo dos componentes e por variação do <i>infill</i> .....	25
<b>Tabela 3.3.</b> Resultados dos ensaios de impacto ao pedal 5. ....	31
<b>Tabela 3.4.</b> Resultados dos ensaios de impacto ao modelo CP3. ....	34
<b>Tabela 3.5.</b> Resultados dos ensaios de impacto ao modelo CP1. ....	36
<b>Tabela 3.6.</b> Resultados dos ensaios de impacto (com ressalto) ao modelo CP3. ....	39
<b>Tabela 3.7.</b> Resultados dos ensaios de impacto a 2J (sem ressalto). ....	39
<b>Tabela 3.8.</b> Tabela de massas dos exemplares de CP4 produzidos. ....	45
<b>Tabela 3.9.</b> Resultados dos ensaios de impacto de CP4 produzidos. ....	47

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$c$  – Largura

$e$  – Espessura

$E$  – Módulo de Elasticidade

$E_{absorvida}$  – Energia absorvida, em percentagem

$E_{imp}$  – Energia de impacto

$E_{máxima}$  – Energia máxima de impacto

$E_{média p.}$  – Valor médio de energia, correspondente ao patamar que delimita a energia absorvida durante a deformação plástica do provete

$F_e$  – Componente efetiva da força resultante exercida sobre os pedais

$F_i$  – Componente inefetiva da força resultante exercida sobre os pedais

$F_n$  – Componente normal da força resultante exercida sobre os pedais

$F_t$  – Componente tangencial da força resultante exercida sobre os pedais

$g$  – Aceleração gravítica

$h$  – Altura

$l$  – Comprimento

$m$  – Massa

### Siglas e Acrónimos

ABS- poli(acrilonitrilo-butadieno-estireno)

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Teste e materiais)

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DfAM – Design for Additive Manufacturing (Design em Fabrico Aditivo)

FA – Fabrico Aditivo

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra



FFF – Fused Filament Fabrication (Fabricação por Fusão de Filamento)

ISO – International Organization for Standardization (Organização Internacional para Normalização)

PLA- poli(ácido lático)

SLM – Selective Laser Melting (Fusão Seletiva por Laser)

## INTRODUÇÃO

O fabrico aditivo (FA) é a designação dada a um conjunto de processos que permitem produzir componentes com geometrias complexas, geralmente vistas como impossíveis de produzir por métodos designados por convencionais. De entre os vários parâmetros de fabrico que podem ser otimizados, o preenchimento (*infill*) das peças é um dos a ter em consideração quando se pretende reduzir a massa dos componentes a produzir ou variar a sua resistência a esforços mecânicos.

A possibilidade de o FA permitir a produção de componentes com *near net shape* (a forma do componente produzido é muito próxima, podendo até a ser igual, à forma final do componente eliminando a necessidade de pós processamento) evita o desperdício de material acrescido observado noutros métodos de fabrico (nomeadamente subtrativos), contribuindo assim para uma atividade industrial mais ambientalmente consciente.

O desenho generativo é um processo de otimização e exploração do design. Através da combinação de algoritmos e tecnologia de nuvem (*cloud technology*), este método permite gerar um conjunto de vários modelos do mesmo componente, considerando as restrições inseridas no software de projeto generativo, que podem incluir desempenho, materiais, peso, métodos de fabricação e restrições de custo, apenas para dar alguns exemplos. Após a escolha de um modelo que respeite todos os requisitos de utilização do componente (como baixa deformação, ou elevada redução de peso) é possível o seu fabrico por vários métodos, entre eles o fabrico aditivo. Os resultados gerados contêm formas otimizadas e mais orgânicas que o design convencional, graças ao uso de inteligência artificial no processo de geração de modelos.

Cada vez mais na indústria é utilizada uma combinação entre técnicas de otimização de *design* e fabrico aditivo. Isto permite uma produção mais eficiente dos componentes, que podem ser facilmente personalizados e passíveis de produzir em qualquer instalação. É possível, através destas técnicas, produzir componentes numa só peça que, por métodos convencionais, seriam compostos por várias peças (aparafusadas ou soldadas, por exemplo), permitindo também diminuir significativamente o tempo e custos de mão-de-obra associados à produção. O facto de ser possível enviar um ficheiro de uma instalação para outra e

proceder à sua “impressão” elimina de modo substantivo tempo e custos de transporte, bem como a pegada de carbono associada ao transporte de matéria-prima e dos produtos finais.

Exemplos de indústrias que estão a apostar fortemente na combinação de otimização de *design* e fabrico aditivo são as indústrias aeronáutica, espacial e automóvel.

O uso de materiais reciclados é uma variável que deve ser cada vez mais considerada na indústria, visto a crescente preocupação com a minimização de desperdício e preservação do planeta. A utilização de materiais deste tipo permite a incorporação do conceito de economia circular no processo de produção, originando abordagens mais sustentáveis e diminuindo o desperdício de material.

Com base no que foi referido anteriormente, surgiu a ideia de testar a viabilidade da combinação de fabrico aditivo, desenho generativo e da utilização de materiais recicláveis (particularmente, materiais termoplásticos) na produção de componentes, na área de desporto, nomeadamente pedais de bicicleta (os quais são comumente fabricados utilizando materiais termoendurecíveis, e por isso, não recicláveis).

## **Objetivo**

Nesta dissertação foram produzidos e caracterizados pedais de bicicleta, cujo *design* foi previamente otimizado por desenho generativo. O impacto da variação de *infill* (preenchimento) da peça, fabricada por FFF, na capacidade de resistir às solicitações que lhe são impostas, mais especificamente, aos esforços de impacto foi também avaliada. O objetivo é mostrar as vantagens inerentes da associação de técnicas de otimização de design com o método de fabrico aditivo, para produção de componentes.

Inicialmente foram elaborados 3 *designs* de base para pedais de bicicleta utilizando o Autodesk Inventor. Os pedais produzidos, referidos neste trabalho, consistem no corpo polimérico dos pedais, sem rolamentos, veios ou tampas.

A ferramenta de desenho generativo do Autodesk Fusion 360, juntamente com informações de solicitações e fixações para pedais obtidas através de normas e artigos científicos, permitiu a elaboração de pedais otimizados.

Finalmente foram produzidos, utilizando a impressora 3D Flashforge Creator 3, e posteriormente submetidos a ensaios para testar as suas propriedades mecânicas função da aplicação específica destes componentes desportivos. A caracterização incluiu como controlo pedais comerciais.

## **Estrutura da Dissertação**

A estrutura desta dissertação consiste em cinco capítulos:

- **Introdução** – Esta parte do pré corpo da dissertação apresenta, de forma sucinta, o que será descrito ao longo de toda a dissertação.
- **Estado da arte** – Neste capítulo são apresentadas as informações relevantes para a presente dissertação e que são resultado da pesquisa bibliográfica efetuada.
- **Materiais e procedimento experimental** – São apresentados, neste capítulo, os materiais de estudo deste trabalho, e também uma descrição dos procedimentos utilizados na realização de todos as etapas experimentais.
- **Resultados e discussão** – Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos no terceiro capítulo.
- **Conclusão** – Finalmente, são apresentadas as principais conclusões retiradas a partir da discussão de resultados, e são feitas propostas para futuros projetos.

## 1. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão apresentados conhecimentos e conceitos relevantes para o trabalho desenvolvido adquiridos quer durante o percurso académico, quer a partir de dissertações, normas, ou artigos redigidos por outros autores.

Inicialmente é apresentado o conceito de fabrico aditivo, seguido do de desenho generativo, e quais as suas gamas de aplicação na engenharia. Em seguida são referidas as conclusões de um estudo já efetuado por A.C. Pinho et al. [1], acerca das propriedades de provetes impressos em ABS reciclado a partir de tabliers de automóveis. É também feita uma introdução aos pedais de bicicleta que existem no mercado e que serviram de inspiração para este trabalho. São referidas também as solicitações a que os componentes produzidos neste trabalho se encontram sujeitos na sua vida útil.

### 1.1. Fabrico Aditivo

Todas as designações, processos e tecnologias utilizadas no FA são regulados pela norma ISO/ASTM 52900:2021.

O primeiro processo a ser utilizado em FA, comumente designado por impressão 3D, foi a fotopolimerização. Mais especificamente, a tecnologia de estereolitografia surgiu em 1984, desenvolvida pelo engenheiro físico do MIT (Massachusetts Institute of Technology) Chuck Hull [2].

Uma das primeiras versões comerciais dos equipamentos de FFF, baseadas no processo de extrusão de material, foi desenvolvida por S.Scott Crump, co-fundador da *Stratasys*, Lda, no ano 1989 [2]. Desde então vários processos de FA têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, tais como o *Binder Jetting* (1989) [3], no qual um ligante é depositado, de forma seletiva, sobre uma cama de pós. A passagem de radiação UV efetua a reticulação (cura) do ligante o que resulta na consolidação dessas partículas, resultando uma peça sólida.

Uma das tecnologias mais difundidas para a produção de componentes metálicos é o Selective Laser Melting (SLS – Fusão seletiva por Laser) (1995) [4], que utiliza um laser para fundir partículas de uma cama de pós, camada a camada, originando uma peça metálica sólida.

O fabrico aditivo é considerado como um dos pilares da indústria 4.0, e está a revolucionar a forma como muitos produtos industriais são produzidos. Com efeito, para além de potenciar benefícios empresariais, tais como ganhos económicos e atividades mais sustentáveis, permite a produção de componentes com geometrias impossíveis de fabricar pelos métodos de fabrico convencionais, e com elevada capacidade de personalização, de modo a satisfazer as necessidades de cada cliente.

A implementação do FA, sempre que economicamente viável, permite às empresas solucionar problemas como a dificuldade em produção de componentes de geometria complexa, elevados custos de transporte, desperdício de material, elevado custo de mão-de-obra e elevado tempo de espera.

Para além de ser excelente para prototipagem rápida, o que faz com que a interação com o cliente seja facilitada, é muito acessível em termos económicos. Há cada vez mais empresas e indivíduos a usar fabrico aditivo para produzir componentes dos quais necessitam e a baixo custo. Um exemplo disto é a produção de próteses de braços *low-cost*, pela organização sem fins lucrativos *Limitless Solutions Inc.*, que utiliza o FA para fazer chegar próteses personalizadas a crianças que delas necessitam, a custo reduzido.

### **1.1.1. FFF**

FFF (Fabricação por Filamento Fundido) é uma tecnologia de impressão 3D que utiliza filamentos de materiais termoplásticos (ou compósitos de matriz termoplástica) para produzir dispositivos/peças/componentes. O filamento é passado continuamente por um bico de extrusão a alta temperatura, no qual é amolecido/fundido e extrudido, sendo depositado camada a camada, produzindo, assim, o componente pretendido (como representado na figura 1.1). As peças produzidas por FFF são anisotrópicas, o que significa que as suas propriedades variam consoante a direção em que são medidas [5].

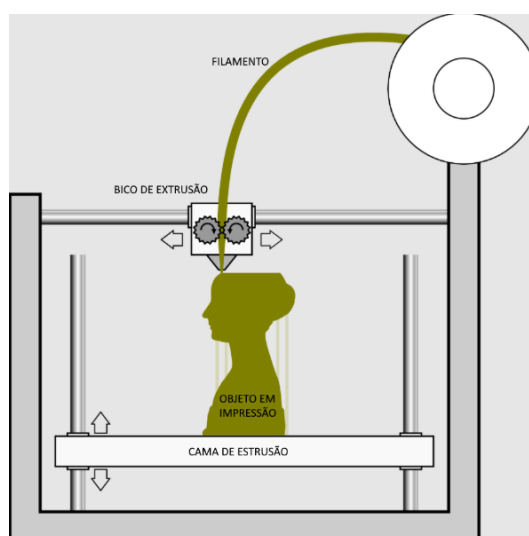


Figura 1.1. Processo de impressão de material por FFF (imagem adaptada de [6]).

## 1.2. Desenho Generativo

O desenho generativo é uma técnica de otimização que utiliza inteligência artificial para gerar componentes com formas criativas, orgânicas e eficientes. Através da definição de restrições e solicitações aplicadas a um componente com um determinado *design* inicial, o software de desenho generativo permite, por métodos computacionais, gerar um conjunto de resultados, onde o material, processo de fabrico e custo são considerados.

A ferramenta de desenho generativo utilizada neste trabalho foi a do *Autodesk Fusion 360*, que permite ao utilizador, para além do que foi referido anteriormente, definir qual o objetivo da experiência (se é um aumento da rigidez do componente, ou uma redução de massa), qual o fator de segurança mínimo que pretende, quais os métodos de fabrico que podem ser usados para produzir o componente em estudo, e também se se pretende uma análise de custos associada a essa produção.

## 1.3. Produção de pedais com polímero reciclado

Nos últimos anos a utilização de materiais reciclados tem aumentado significativamente, devido à crescente necessidade de uma atividade industrial mais consciente.

Recentemente na Universidade de Coimbra, foi feito um estudo, por A.C. Pinho et al. [1], sobre as propriedades de polímeros reciclados para impressão 3D, sendo um deles um polímero de ABS reciclado através de tabliers de automóveis, produzido pela empresa

*Recycle*<sup>®</sup> (Roterdão, Países Baixos). Este polímero foi testado contra polímeros de ABS virgem, natural e preto, produzidos em formato de filamento de 1,75mm pela *DoWire* (Corroios, Portugal). Os materiais foram estudados em formato de filamento e em formato de provete, obtido por impressão 3D tecnologia FFF, sendo este último mais relevante para esta dissertação. Foi concluído que os provetes de ABS reciclado possuíam propriedades mecânicas idênticas aos seus correspondentes processados a partir de filamento virgem (figura 1.2).

A utilização, em determinadas aplicações específicas, de polímeros como substitutos de metais ou cerâmicos permite a obtenção de componentes mais baratos, acessíveis, e com densidades específicas inferiores, sem comprometer a capacidade de utilização do componente.

Pelo facto de apresentar boa resistência ao impacto e ser um material de custo acessível e muito usado no fabrico aditivo, o material escolhido para produção da maioria componentes estudados nesta dissertação foi o ABS reciclado acima referido, também denominado de rABSb. É de notar que, em comparação com o material polipropileno, muito usado para produzir pedais, o ABS (em geral) é mais barato, mais acessível e mais fácil de imprimir.

**Table 5**  
Mechanical properties of the printed specimens evaluated from tensile and 3PB tests.

Printed materials	Tensile tests			3PB tests	
	Tensile stress (MPa)	Breaking strength (MPa)	E (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)
PLA	38.4 ± 1.2	37.9 ± 1.4	2.4 ± 0.1	70.2 ± 3.1	1.8 ± 0.1
rPLA	25.9 ± 0.9	23.3 ± 1.3	1.7 ± 0.0	47.4 ± 0.5	1.4 ± 0.1
ABS	23.9 ± 0.4	22.1 ± 0.3	1.3 ± 0.1	47.8 ± 0.6	1.3 ± 0.1
ABSb	21.9 ± 0.4	21.3 ± 0.9	1.3 ± 0.0	33.2 ± 1.2	0.8 ± 0.1
rABSb	23.6 ± 0.3	22.3 ± 0.4	1.3 ± 0.0	39.8 ± 2.5	0.9 ± 0.1

**Figura 1.2.** Comparação das propriedades de provetes de ABS reciclado e não-reciclado (retirada de [1]).

O corpo dos pedais de bicicleta, nomeadamente pedais de plataforma, é normalmente fabricado em Nylon<sup>®</sup>, polipropileno, policarbonato ou polímeros termoplásticos reforçados com fibra de carbono, com pesos que oscilam entre 200 e 400 g. Para além de pedais em material polimérico também são comuns os que possuem corpos em ligas de alumínio ou magnésio.

O modelo apresentado na figura 1.3, denominado de pedal de plataforma *Union SP-872N*, é um exemplo do *design* dos modelos leves mais comuns, e apresenta as seguintes características:

- Massa: 286 g/conjunto;



- Material: Polipropileno;
- Medidas: 109 mm x 91 mm;
- Uso: MTB, BMX;
- Custo: 4,15 €.



**Figura 1.3.** Pedal de bicicleta Union SP-872N, disponível em [7].

Um exemplo de outro *design* de modelo muito utilizado é o pedal de plataforma *Race Face Ride* (figura 1.4), com as seguintes características:

- Massa: 320 g/conjunto;
- Material do corpo: Composto de Nylon®;
- Material do eixo: aço cromado;
- Medidas (LxW): 110 mm x 100 mm;
- Altura da plataforma: 18,4mm;
- Uso: Urbano e passeio;
- Custo: 34 €.



**Figura 1.4.** Pedal de bicicleta *Race Face Ride*, disponível em [8].

Ambos os pedais acima serviram de inspiração para o *design* dos pedais neste estudo.

O dimensionamento de qualquer componente deve ser feito tendo em conta o tipo de solicitações a que este estará sujeito durante a sua vida útil. Os componentes escolhidos para

produção e caracterização neste trabalho foram pedais de bicicleta, mais especificamente, pedais de plataforma.

### 1.3.1. Esforços mecânicos nos pedais

O ciclista, ao pedalar, provoca um movimento de rotação do eixo do pedal em torno de um outro eixo, o eixo do centro pedaleiro.

Normalmente são consideradas duas fases na pedalagem: a fase de potência (*downstroke*), dos  $0^\circ$  aos  $180^\circ$ , e a fase de recuperação (*upstroke*), dos  $180^\circ$  aos  $360^\circ$  (figura 1.5).

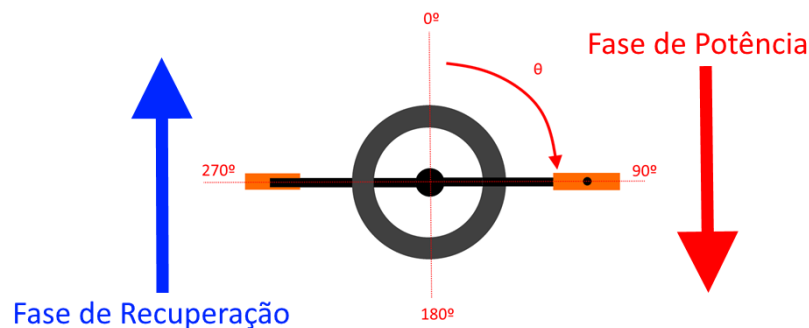


Figura 1.5. Fases de um ciclo de pedalagem.

Segundo M. J. A. J. M. Hoes [9], a força resultante sobre o pedal pode ser decomposta numa componente normal ( $F_n$ ) e numa componente tangencial ( $F_t$ ), relativamente ao pedal (figura 1.6).

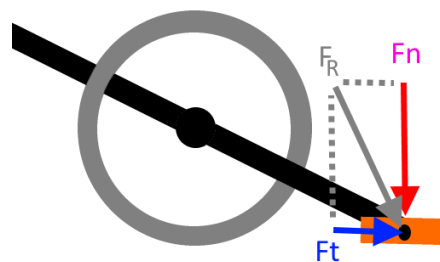
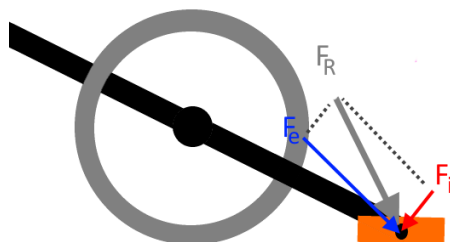


Figura 1.6. Forças (normal e tangencial) aplicadas no plano sagital do pedal.

A mesma força resultante pode ser decomposta numa componente inefetiva ( $F_i$ ) e numa componente efetiva ( $F_e$ ) ao movimento [10], como se pode observar na figura 1.7.



**Figura 1.7.**Forças (efetiva e inefetiva) aplicadas no plano sagital do pedal.

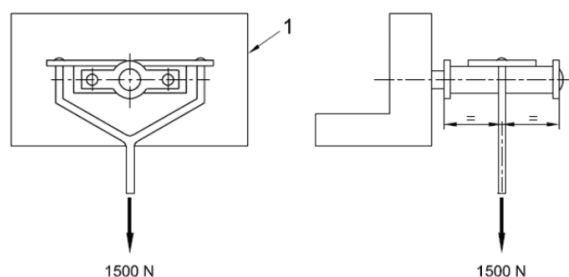
A força resultante aplicada sobre o pedal varia em amplitude e direção durante todo o movimento da pedalada.

Como consta na literatura [9], quando o pedal se encontra à frente, na posição horizontal (a  $90^\circ$  com a vertical), e os braços de pedalagem se encontram próximos dos  $90^\circ$ , com a vertical, as forças exercidas sobre o pedal assumem o seu máximo.

Se considerarmos o pedal na posição horizontal, a componente normal ao pedal torna-se vertical e a componente tangencial torna-se horizontal.

#### 1.3.1.1. Esforços estáticos

Segundo a norma ISO 4210-8 [11], os pedais devem aguentar com um esforço estático de 1500 N, na direção vertical descendente, colocado sobre o centro do pedal, e com a duração de um minuto, sem apresentar deformação visível (Figura 1.8). O pedal deve estar, para esse efeito, encastrado na estrutura assinalada pelo número 1 na figura 1.8.



**Figura 1.8.** Representação da montagem para o ensaio de resistência às cargas estáticas sobre os pedais (retirada de [11]).

Para além da norma acima referida, há artigos científicos que abordam a problemática dos esforços exercidos sobre os pedais. De acordo com o trabalho desenvolvido por P. D.

Soden [12], e para simplificação do tempo de computação, foram consideradas, para este trabalho, apenas as cargas verticais que agem sobre os pedais (figura 1.9). Esta simplificação é possível visto que as restantes cargas que agem sobre os pedais são muito menores em comparação com as cargas verticais (na situação em que o pedal está horizontal e os braços da pedaleira se encontram horizontais e onde são atingidas as forças normais máximas, como referido anteriormente).

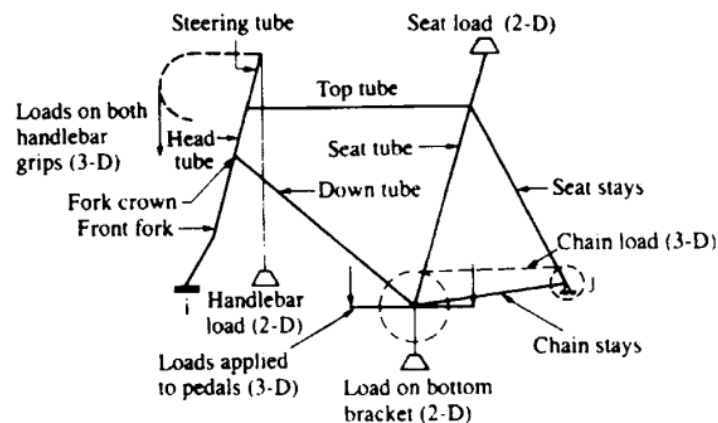


Fig. 2. Posições de aplicação de cargas durante experiment

**Figura 1.9.** Posição e aplicação de cargas sobre a bicicleta, nomeadamente nos pedais (retirada de [12]).

De acordo com este trabalho, a maior carga calculada foi de 1835 N. No entanto, no trabalho desenvolvido nesta dissertação, e por forma a garantir uma maior segurança no dimensionamento, foi considerada a carga normal de 2100 N, calculada pelo mesmo autor num outro estudo [13].

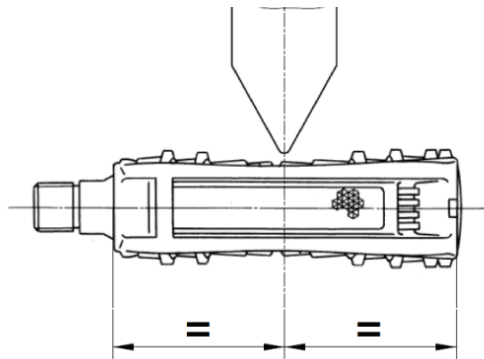
Neste caso, a força máxima normal ao pedal foi obtida para uma situação de arranque em plano inclinado de  $6^\circ$  com a horizontal. O sujeito que gerou o valor máximo desta força (2100 N) tinha um peso de 727 N, ou seja, aproximadamente 74 kg. Esta força foi quase constante durante o primeiro ciclo de pedalagem.

Tendo estes estudos como base, foram considerados dois casos de carregamento estático sobre o pedal:

- **Caso 1:** Aplicação de uma carga de compressão 1500 N sobre a zona central do pedal, dentro da qual passa um veio;
- **Caso 2:** Aplicação de uma carga de compressão de 2100 N, distribuída sobre as superfícies do pedal que servem de apoio ao pé.

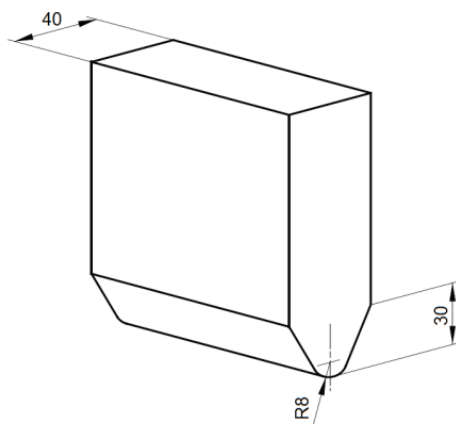
### 1.3.1.2. Esforços de impacto

Segundo a norma ISO 4210-8 [11], os esforços de impacto a que os pedais estão sujeitos podem ser aproximados ao deixar cair sobre o pedal, na posição horizontal, um indentador com massa de 15kg de uma altura de 400mm sobre o centro do pedal (figura 1.10).



**Figura 1.10.** Representação da montagem do ensaio de resistência ao impacto (retirada de [11]).

O indentador (figura 1.11) deve ter dimensão tal que a sua largura seja superior à largura da superfície rosçada do pedal.



**Figura 1.11.** Dimensões do indentador (retirada de [11]).

Todos estes fatores foram tidos em consideração quando se caracterizaram os pedais produzidos neste trabalho, considerando os equipamentos disponíveis no DEM-FCTUC.

## 2. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiais

O material utilizado para produção dos pedais de bicicleta foi o copolímero poli(acrilonitrilo-butadieno-estireno) (ABS), reciclado a partir de tabliers de automóveis, fornecido pela Recycle<sup>®</sup> Company (Roterdão, Países Baixos), vendido na forma de filamento com  $1,75 \pm 0,03$  mm de espessura (figura 2.1).

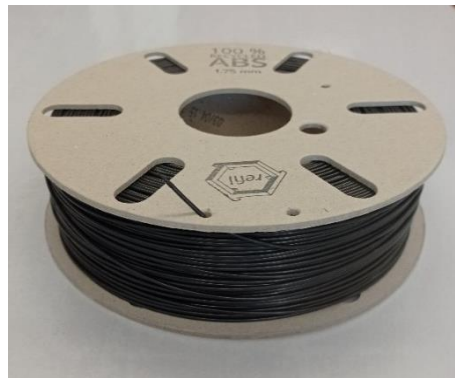


Figura 2.1. Filamento de ABS reciclado produzido pela Recycle<sup>®</sup>.

### 2.2. Procedimento Experimental

#### 2.2.1. Desenho generativo

Os *designs* de base para os pedais foram realizados no *software* Autodesk Inventor 2022, e podem ser observados nas figuras 2.2, 2.3 e 2.4.

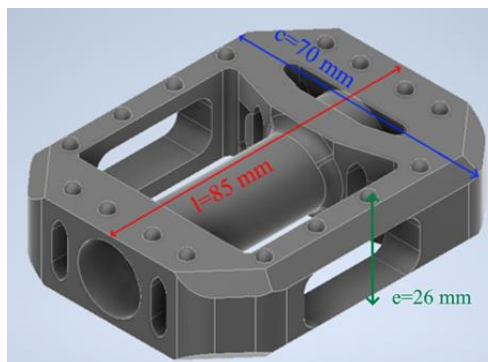


Figura 2.2. Pedal 1.

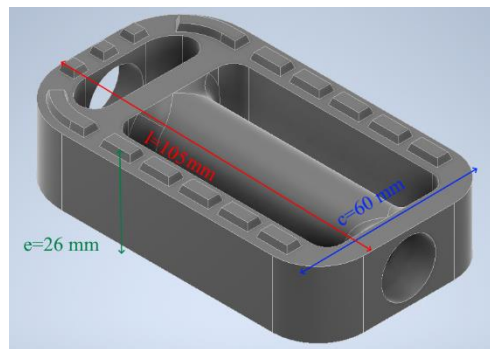


Figura 2.3. Pedal 2.

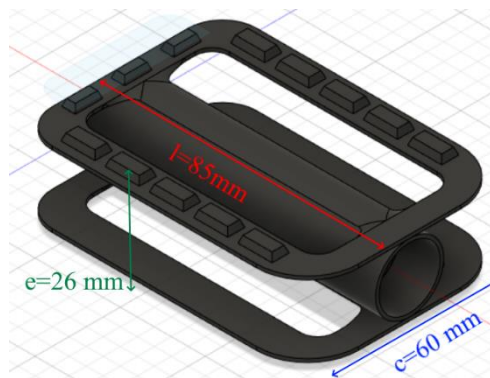
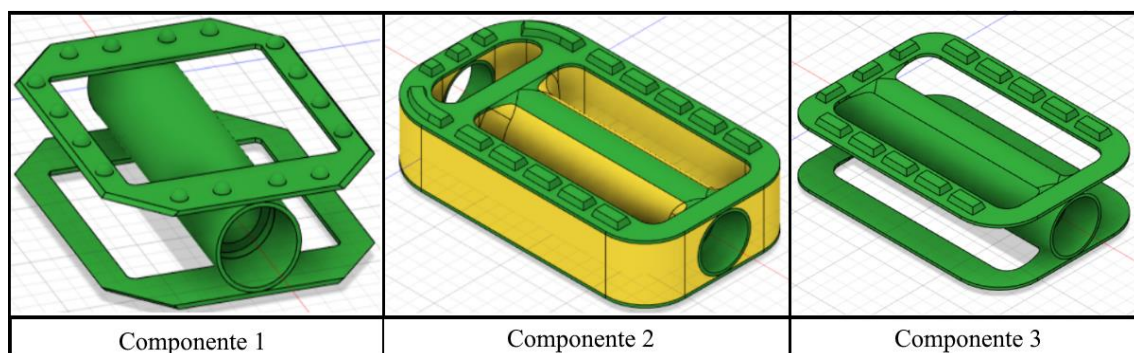
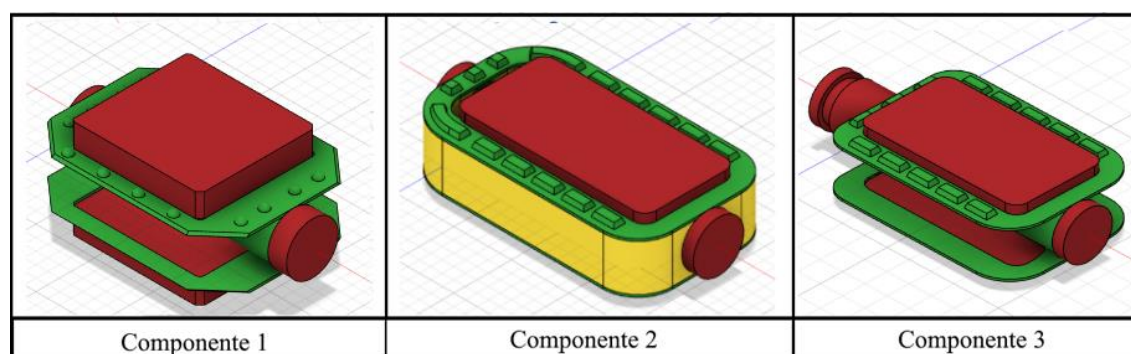


Figura 2.4. Pedal 3.

Os *designs* de base de cada pedal foram alterados e introduzidos no Autodesk Fusion 360, dando origem aos componentes 1, 2 e 3 (figura 2.5) que servem como ponto de partida para o processo de desenho generativo. A partir destes, foram definidas quais as geometrias a preservar (*preserve geometries*) e geometrias de forma inicial (*starting shapes*) a usar (figura 2.5).

Figura 2.5. *Preserve geometries* (a verde) e *starting shapes* (a amarelo) consideradas para os pedais 1, 2 e 3.

Em seguida foi necessário desenhar as geometrias que serviriam de obstáculo (*constraints*) para o processo de desenho generativo (figura 2.6). O passo seguinte consistiu em indicar as fixações (figura 2.7).



**Figura 2.6.** Constraints para o desenho generativo dos componentes 1, 2 e 3.

Os carregamentos estáticos (figuras 2.8 e 2.9) foram definidos tendo em conta o que foi referido no capítulo anterior. Deve ser referido que o *software* de desenho generativo utilizado apenas permite carregamentos estáticos, e gera componentes capazes de resistir a todos os casos de carregamento considerados dentro do mesmo estudo.

Em todos os casos de estudo foi considerada a ação da gravidade sobre a massa do componente (seta amarela que pode ser observada nas figuras 2.8 e 2.9). As opções consideradas para os métodos de fabrico dos componentes foram a “sem restrições” (*unrestricted*) e a “fabrico aditivo” (*additive*). O fator de segurança mínimo considerado foi sempre 2. A resolução considerada para o processo de desenho generativo foi opção “fina” (*fine*). Foi selecionado como material de fabrico o ABS, presente na biblioteca de materiais do *software* utilizado. Deve ser realçado que esta biblioteca considera o copolímero virgem dado que não possui informação sobre o material reciclado.

Para a escolha do componente mais adequado para o estudo, de entre todos os resultados gerados pelo *software*, foram tidos em conta vários fatores:

- Massa do modelo gerado;
- Tensão equivalente de von Mises máxima induzida no modelo pelas solicitações impostas;
- Deslocamentos máximos produzidos no modelo pelas solicitações impostas;
- Fator de segurança mínimo associado ao caso de estudo;
- Estética do modelo.

Assim, foi dada prioridade a componentes de baixa massa, com tensão máxima equivalente de von Mises baixa, deslocamento máximo pequeno e estética interessante.



### 2.2.1.1. Fixações, Solicitações e Obstáculos

Para qualquer um dos 3 componentes, que irão dar origem a modelos de pedal, foram consideradas como fixações as faces cilíndricas que estão em contacto com os rolamentos interiores e com o veio de metal que liga o pedal ao braço da pedaleira (figura 2.7). O tipo de fixação considerada para este caso é o tipo “pino” (*pin*), com restrições de movimento radial e axial, uma vez que o pedal apenas pode rodar sobre si mesmo.

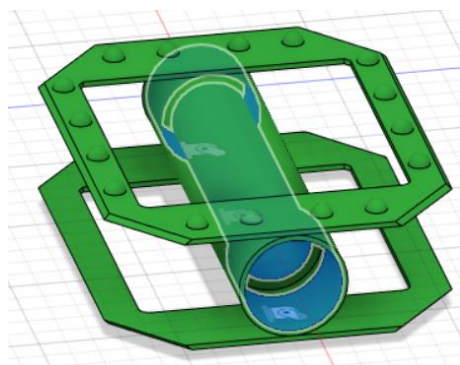


Figura 2.7. Representação esquemática da fixação dos componentes.

Para o caso de carregamento 2, uma vez que o *software* utilizado não permite que em ambiente de desenho generativo seja feita uma distribuição automática da carga total (2100 N) pelos apoios do pé, em função da sua área de superfície, foi considerada uma simplificação em que uma intensidade de carga aplicada é igual para cada superfície de apoio

Cada caso de carregamento foi aplicado separadamente a ambos os lados do componente. Deste modo, os modelos foram estudados considerando no total 4 casos de carregamento.

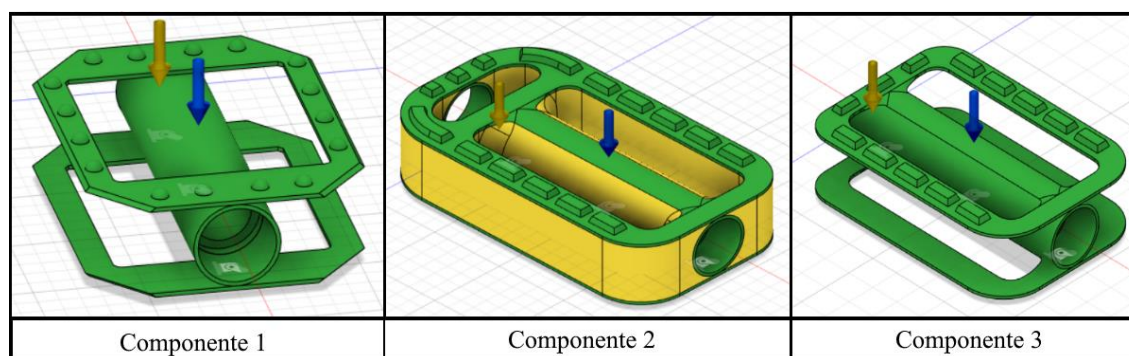


Figura 2.8. Caso de carregamento 1.

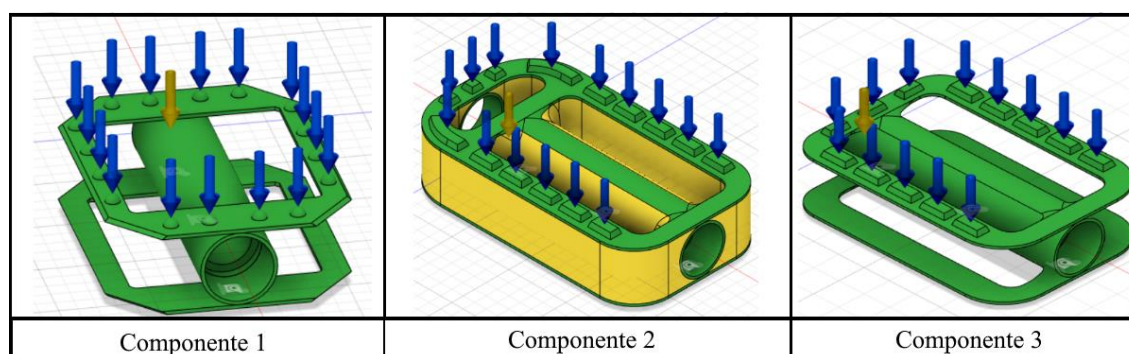


Figura 2.9. Caso de carregamento 2.

### 2.2.1.2. Resultados do Desenho Generativo

Para cada caso de componente foi selecionado apenas um resultado do processo de desenho generativo.

O desenho generativo para o componente 1 deu origem a 2 conjuntos de resultados (*outcomes*), como é mostrado na figura 2.10.



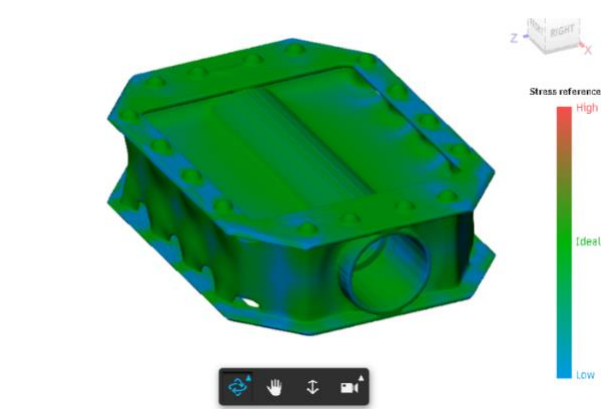
Figura 2.10. *Outcomes* gerados pelo software de desenho generativo para o componente 1.

Após cuidadosa análise dos resultados, foi selecionada a iteração 45 do *outcome* 1. Esta iteração apresenta a menor massa de ambos os *outcomes*. O modelo selecionado foi intitulado de CP1, e as características e distribuição de tensões são apresentadas, respetivamente, na tabela 2.1 e figura 2.11.

Tabela 2.1. Características do CP1, obtido por desenho generativo.

#### Caraterísticas do modelo selecionado

<b>Massa (g)</b>	54
<b>Deslocamento máximo (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	285
<b>Tensão de von Mises máxima (MPa)</b>	10
<b>Coefficiente de segurança mínimo</b>	2
<b>Volume (<math>\text{mm}^3</math>)</b>	$51,4 \times 10^3$



**Figura 2.11.** Representação do CP1 e da sua distribuição de tensões, no Autodesk Fusion 360.

Para o componente 2, o *software* gerou 2 *outcomes* (figura 2.12).



**Figura 2.12.** *Outcomes* gerados pelo software de desenho generativo para o componente 2.

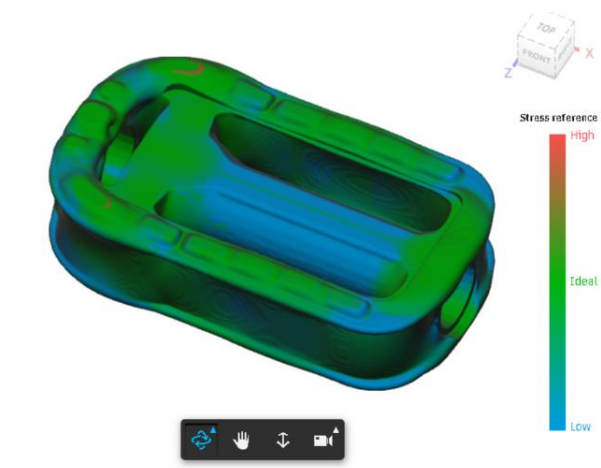
O resultado escolhido foi a iteração 8 do *outcome* 1. Deve ser salientado que o fator de segurança mínimo de 2 não foi respeitado neste resultado. No entanto, após observação da distribuição de tensões (figura 2.13), foi possível concluir que se tratava de tensões pontuais, que não representam risco significativo para a integridade do componente.

O modelo selecionado foi intitulado de CP2, e as suas características podem ser consultadas na tabela 2.2.

**Tabela 2.2.** Características do modelo CP2, obtido por desenho generativo.

#### Caraterísticas do modelo escolhido

<b>Massa (g)</b>	94
<b>Deslocamento máximo (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	189
<b>Tensão de von Mises máxima (MPa)</b>	30,2
<b>Coefficiente de segurança mínimo</b>	0,663
<b>Volume (<math>\text{mm}^3</math>)</b>	$89,1 \times 10^3$



**Figura 2.13.** Representação do modelo CP2 e da sua distribuição de tensões, no Autodesk Fusion 360.

Para o componente 3, o *software* deu novamente origem a 2 *outcomes* (figura 2.14).



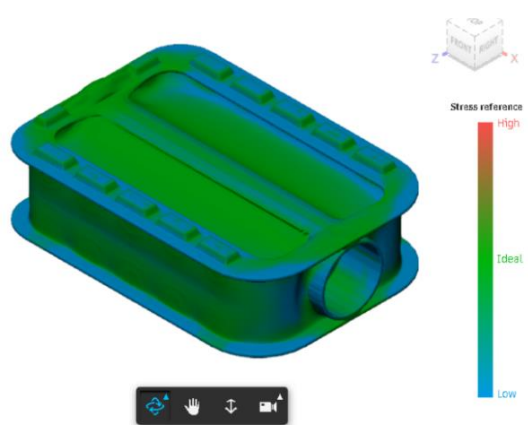
**Figura 2.14.** *Outcomes* gerados pelo software de desenho generativo para o componente 3.

O resultado escolhido foi a iteração 14 do *outcome* 1. O modelo selecionado foi intitulado de CP3. As características e distribuição de tensões deste modelo são apresentadas, respetivamente, na tabela 2.3 e figura 2.15.

**Tabela 2.3.** Características do CP3, obtido por desenho generativo.

#### Caraterísticas do modelo escolhido

<b>Massa (g)</b>	62
<b>Deslocamento máximo (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	210
<b>Tensão de von Mises máxima (MPa)</b>	10
<b>Coefficiente de segurança mínimo</b>	2
<b>Volume (<math>\text{mm}^3</math>)</b>	$58,6 \times 10^3$



**Figura 2.15.** *Outcomes* gerados pelo software de desenho generativo para o CP3.

De entre os modelos selecionados, o modelo intitulado de CP1 é o que apresenta a menor massa, menor volume e menor deslocamento máximo quando solicitado. Este modelo apresenta também o menor valor tensão máxima de von Mises e maior valor de coeficiente de segurança mínimo, de entre os escolhidos.

### 2.3. Produção dos componentes por FFF

Os componentes projetados foram produzidos por FFF no equipamento Flashforge Creator 3. Por questões de tempo e considerando a quantidade de amostras necessárias, apenas foram produzidos dois dos três modelos selecionados a partir do processo de desenho generativo. Estes modelos foram o CP1 e o CP3, tendo em consideração os critérios de seleção usados anteriormente. Os parâmetros de impressão utilizados neste trabalho, otimizados a partir de parâmetros anteriores [1], podem ser consultados na tabela 2.4.

**Tabela 2.4.** Parâmetros de impressão utilizados neste trabalho.

#### Parâmetros de Impressão

<b>Temperatura da impressora</b>	230°C
<b>Temperatura da plataforma de impressão</b>	120°C
<b>Velocidade de Impressão (mm/s)</b>	60
<b>Altura de Camada (µm)</b>	180
<b>Cascas</b>	3
<b>Densidade de preenchimento (<i>Infill</i>)</b>	100% / 75% / 50%
<b>Formato de preenchimento</b>	Linha
<b>Orientação do preenchimento</b>	45°/-45°
<b>Suportes</b>	Sim
<b>Método de adesão à plataforma de impressão</b>	<i>Raft</i>

O formato e orientação escolhida para o *infill* dos componentes é a que permite uma melhor distribuição de tensões (A.C.Pinho et al. [1]). Foi também considerado o trabalho de C.W.Ziemian et al., [14], onde se observou que a orientação escolhida ( -45°/45°) permite a melhor resistência a solicitações de fadiga em provetes de ABS.

Foram inseridos suportes, manualmente, para garantir uma maior estabilidade das peças durante a impressão. As imagens e detalhes relativos à impressão das peças desta dissertação podem ser consultados no apêndice A.

## 2.4. Ensaio de impacto

Inicialmente foi pensado prosseguir segundo dita a norma ISO 4210-8 [11]. Nesta situação o pedal é montado na sua totalidade (isto é, já com o seu preenchimento interior metálico, que lhe possibilita a rotação em torno de si mesmo) e encastrado numa parede.

Para qualquer massa  $m$  e altura  $h$ , considerando a aceleração gravítica  $g$  igual a 9,81  $m/s^2$ , a energia associada ao impacto,  $E_{imp}$ , é dada por:

$$E_{imp} (J) = m(kg) \times g(m/s^2) \times h(m). \quad (2.1)$$

A energia associada ao ensaio de impacto sobre os pedais indicado na norma ISO 4210-8 [11] tem o valor de 58,9 J.

Devido às restrições dos equipamentos disponíveis no DEM, foi decidido que o ensaio de impacto seria realizado no equipamento Instron CEAST 9340 (figura 2.16), onde o pedal é colocado sobre um orifício de 40 mm cujo centro está alinhado como ponto de impacto do indentador.



**Figura 2.16.** Instron CEAST 9340.

Devido às restrições do equipamento utilizado, a massa do indentador também não foi a indicada pela norma, sendo alterada de 15 kg para 3,4 kg.

Foram efetuados ensaios iniciais de 10 J, sendo os restantes ensaios efetuados para uma energia de 2 J. Foram feitos 3 ensaios de 2 J para cada modelo de pedal.

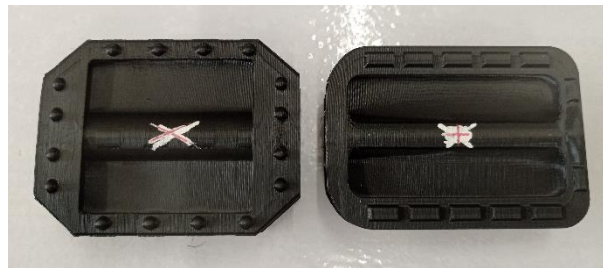
Os pedais produzidos foram testados e comparados com pedais planos de BTT (figura 2.17) fornecidos pela Decathlon (disponíveis em [15]). A componente polimérica destes pedais, referidos neste trabalho como pedais de controlo, é composta por resina de polipropileno, que é um material termoendurecível. Por norma, estes materiais apresentam uma resistência mecânica superior aos materiais termoplásticos.

Os pedais de controlo foram desmontados de forma que apenas a sua componente polimérica fosse testada, tendo esta uma massa média de 46,7 g. A cavidade cilíndrica deste pedal, sobre a qual se dá o impacto, tem um diâmetro igual ao dos restantes pedais estudados neste trabalho (cerca de 14 mm).



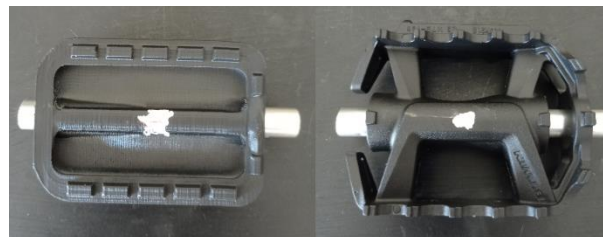
**Figura 2.17.**Fotografia do modelo de pedal de controlo.

De seguida, os centros geométricos de todos os pedais (figura 2.18) foram marcados, de modo a posicionar corretamente os modelos para os ensaios de impacto.



**Figura 2.18.**Representação da marcação do centro geométrico dos pedais.

Inicialmente os pedais foram testados com um veio de alumínio, de diâmetro exterior de 13mm, no seu interior (figura 2.19). Após alguns ensaios preliminares os veios foram retirados e os restantes ensaios foram efetuados sem estes.



**Figura 2.19.**Representação dos modelos, com veio metálico, antes dos ensaios de impacto.

Após os ensaios, os dados foram recolhidos e analisados, de forma a determinar a força máxima de impacto e a energia absorvida em cada ensaio. A percentagem de energia absorvida pelo pedal durante um ensaio de impacto pode ser calculada com recurso ao valor máximo da energia verificado no impacto,  $E_{máxima}$ , e ao valor de  $E_{média p.}$ , que é usado para traçar o patamar do gráfico energia (tempo) que representa a energia absorvida pelo provete aquando da sua deformação plástica.

O cálculo da energia absorvida, em percentagem, pode então ser calculado por:

$$E_{absorvida} (\%) = \left( 1 - \frac{E_{máxima} (J) - E_{média p.} (J)}{E_{máxima} (J)} \right) \times 100. \quad (2.2)$$



## 2.5. Análise visual dos componentes

As amostras foram observadas, antes e depois de serem submetidas aos ensaios mecânicos, na lupa *Stemi 2000-C* da ZEISS. A partir dessa observação foram captadas imagens da secção central do pedal (onde ocorre o impacto), utilizando a máquina fotográfica *CANON PowerShot G5*, que se encontrava associada à lupa. Foram também captadas imagens da totalidade do pedal, utilizando a câmara de um telemóvel Redmi Note 9 da Xiaomi.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Componentes iniciais

##### 3.1.1. Produção dos componentes

Na tabela 3.1 encontram-se as informações relativas à massa média das amostras produzidas.

**Tabela 3.1.** Tabela de informações relativas às amostras com 100% de *infill*.

Designação do Componente	Percentagem de <i>infill</i>	Massa média (g)
CP1	100%	46,5
	75%	41,4
	50%	35,4
CP3	100%	54,1
	75%	47,6
	50%	40,9

##### 3.1.1.1. Redução de massa

A tabela 3.2 traduz a redução média de massa de cada componente face ao valor idealizado pelo *software* de desenho generativo. Para determinar este valor foi feito o cálculo da redução percentual de massa para cada amostra e de seguida foi calculada a média da redução para cada componente.

**Tabela 3.2.** Tabela da redução de massa média obtida pelo fabrico aditivo dos componentes e por variação do *infill*.

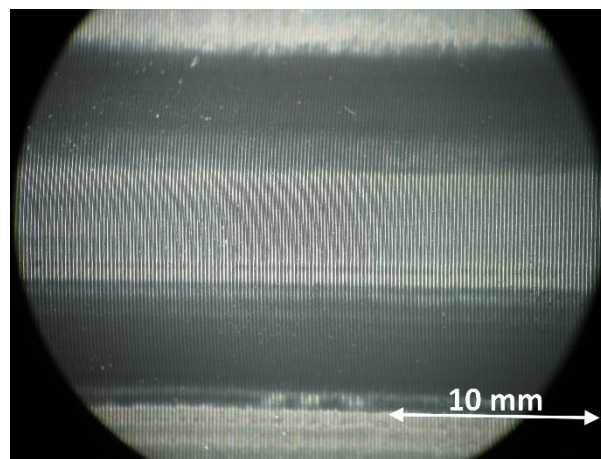
Designação do Componente	Redução de massa (média percentual)
CP1 (100% <i>infill</i> )	14,0%
CP3 (100% <i>infill</i> )	12,8%
CP1 (75% <i>infill</i> )	23,3%
CP3 (75% <i>infill</i> )	23,2%
CP1 (50% <i>infill</i> )	34,4%
CP3 (50% <i>infill</i> )	34,1%

A redução de massa foi semelhante para ambos os modelos que continham a mesma percentagem de *infill*, o que é curioso, tendo em conta que estamos perante dois designs de pedal diferentes, com zonas interiores distintas.

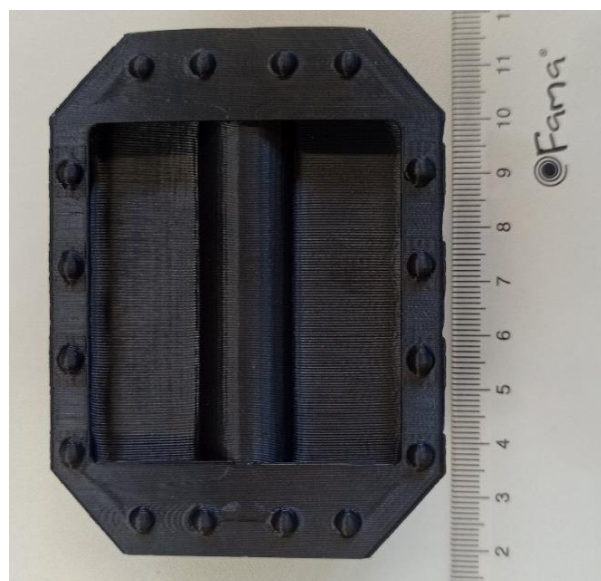
Apenas pela utilização do fabrico aditivo como método de produção, foi possível obter uma redução de massa de cerca de 13 a 14%. A redução de massa nas amostras com 75% de *infill* foi de cerca de 23% e no caso dos componentes com 50% de *infill* esta redução foi à volta de 34%.

### 3.1.2. Ensaios de impacto

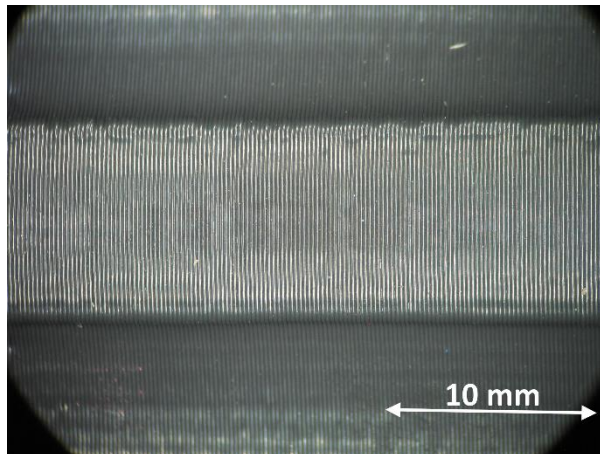
As imagens representativas das amostras do modelo CP1 e CP3, pré-ensaio de impacto, podem ser observadas, respetivamente, nas figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.



**Figura 3.1.** Imagem representativa da região central do pedal (CP1), tirada pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5.



**Figura 3.2.** Imagem representativa do pedal (CP1), tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi.

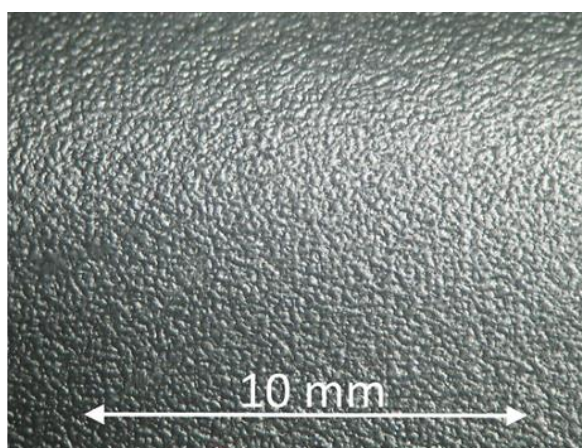


**Figura 3.3.** Imagem representativa da região central do pedal (Componente 2), obtida pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5.



**Figura 3.4.** Imagem representativa do pedal (CP3), tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi.

Nas figuras 3.5 e 3.6 é possível visualizar com pormenor o modelo de pedal de controlo, antes dos ensaios de impacto.



**Figura 3.5.** Imagem representativa da região central do pedal de controlo, obtida pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5.



**Figura 3.6.** Imagem representativa do pedal de controlo, tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi.

### 3.1.2.1. Ensaio iniciais

A primeira amostra a ser testada foi um dos pedais do modelo CP3 com 100% de *infill* (designado como pedal 4), para uma energia de impacto de 10 J e com veio metálico no seu interior. Este ensaio de impacto resultou na fratura, em duas partes, do provete em questão (figura 3.7). Como se pode observar na Figura 3.8, estamos perante uma fratura do tipo frágil, visto não ter ocorrido deformação plástica (significativa) antes de ocorrer falha da peça em questão. Pela análise da figura 3.8 é razoável afirmar que a falha do provete não ocorreu devido a problemas de adesão entre camadas.

Adicionalmente, é possível observar o gráfico de energia-tempo relativo a este ensaio na figura 3.9. A curva energia-tempo deste gráfico demonstra que ocorreu um ressalto do provete durante o ensaio, e após este o provete absorveu praticamente toda a energia

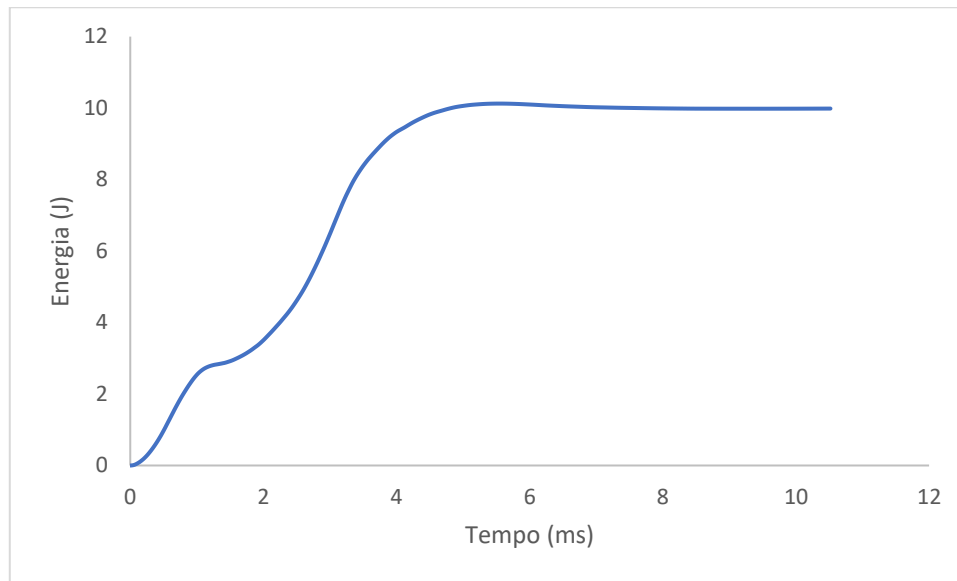
associada ao impacto (aproximadamente 98,6%), o que resultou em fratura. A força máxima exercida sobre o pedal foi de 3,4 kN, para um deslocamento de 6,3 mm (os gráficos de força-deslocamento de todos os ensaios representativos deste trabalho podem ser consultados no apêndice B).



**Figura 3.7.** Fotografia do pedal 4, após ensaio de impacto, tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi.



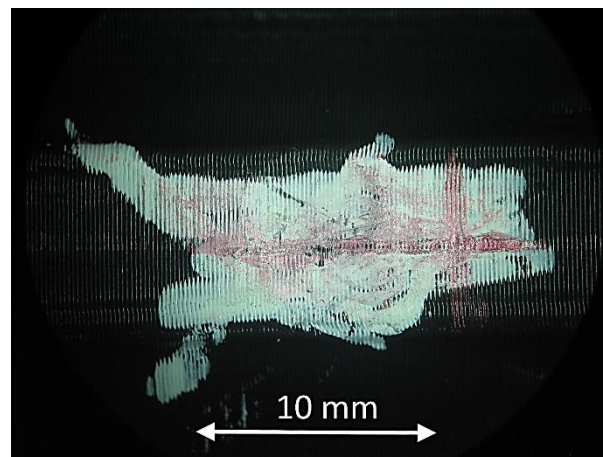
**Figura 3.8.** Fotografia da secção transversal do pedal 4, após ensaio de impacto, tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi.



**Figura 3.9.** Gráfico da energia-tempo, correspondente ao ensaio do pedal 4.

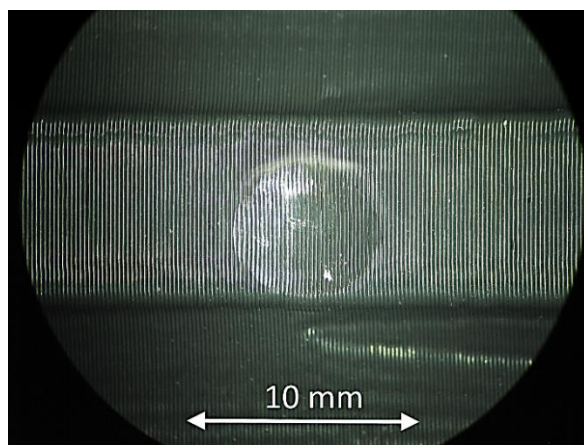
Tendo em consideração o sucedido com o pedal 4, a energia de impacto a ser usada nos restantes ensaios foi alterada para 2 J.

Em seguida, foram efetuados dois ensaios com um outro pedal do modelo CP3 com 100% de *infill* (intitulado de pedal 5), sendo que um ensaio foi efetuado com veio metálico no interior do pedal (caso A) e o outro ensaio não (caso B). Os ensaios foram efetuados em lados diferentes do pedal, uma vez que a deformação induzida no provete permitia isso. A imagem representativa da deformação sofrida por este pedal, para o caso em que foi utilizado o veio metálico, pode ser observada na figura 3.10.



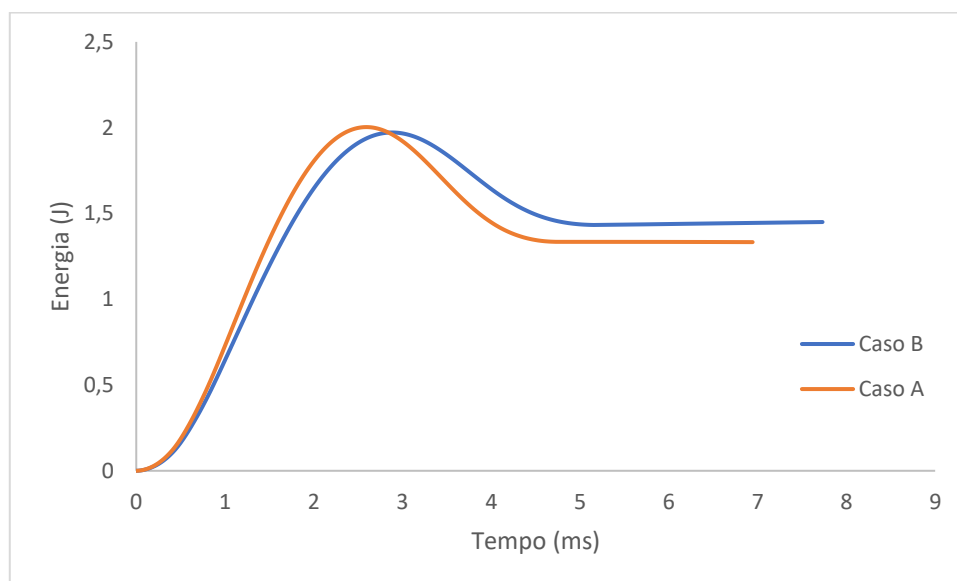
**Figura 3.10.** Imagem representativa do pedal 5 após ensaio de impacto (caso A), obtida pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5.

A imagem da deformação sofrida pelo pedal, para o caso em que não foi utilizado o veio metálico, pode ser observada na figura 3.11.



**Figura 3.11.** Imagem representativa do pedal 5 (caso B) após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5.

O gráfico de energia-tempo referente aos dois ensaios do pedal 5 pode ser observado na figura 3.12. Na tabela 3.3 podem ser consultados os valores relativos à absorção de energia e forças de impacto nos ensaios referidos.



**Figura 3.12.** Gráfico da energia-tempo, correspondente aos ensaios do pedal 5.

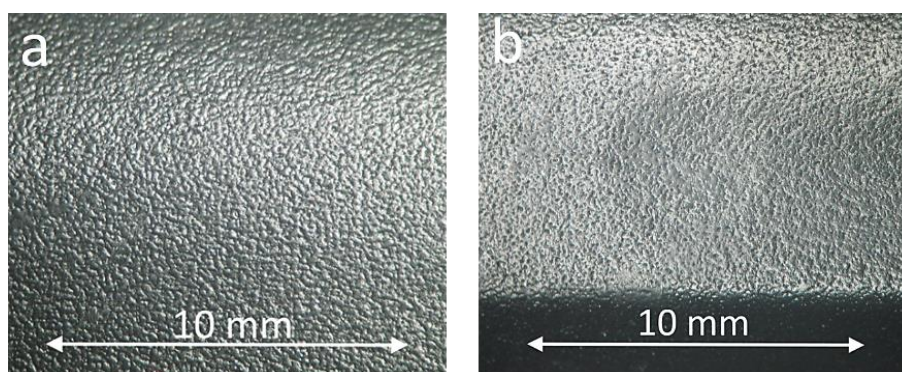
**Tabela 3.3.** Resultados dos ensaios de impacto ao pedal 5.

Ensaio	Energia absorvida (%)	Força de impacto máxima, $F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Deslocamento em $F_{m\acute{a}x}$ (mm)
<b>Caso A</b>	66,6	2,0	1,7
<b>Caso B</b>	73,2	1,7	1,8

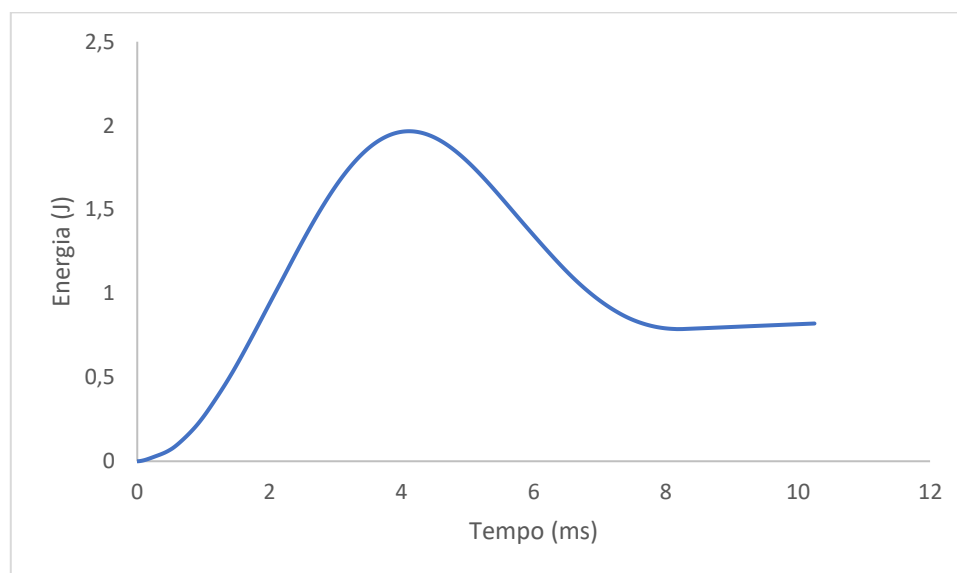


Pela análise dos dados correspondentes aos ensaios do pedal 5, foi decidido que não seria utilizado o veio metálico nos restantes ensaios.

Os próximos pedais a serem submetidos aos ensaios mecânicos foram os modelos de controlo. Como se pode observar na figura 3.13, representativa deste modelo, a superfície dos pedais de controlo sofreu uma deformação muito pequena, tão pequena que pode ser considerada insignificante. O gráfico de energia-tempo representativo destes ensaios pode ser observado na figura 3.14. Verificou-se uma absorção de 40,9% da energia de impacto e a força máxima atingida foi de 1,4 kN, para um deslocamento de 2,8 mm.



**Figura 3.13.** Imagem representativa dos pedais de controlo, obtida pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5: a) antes do ensaio de impacto; b) após o ensaio de impacto.

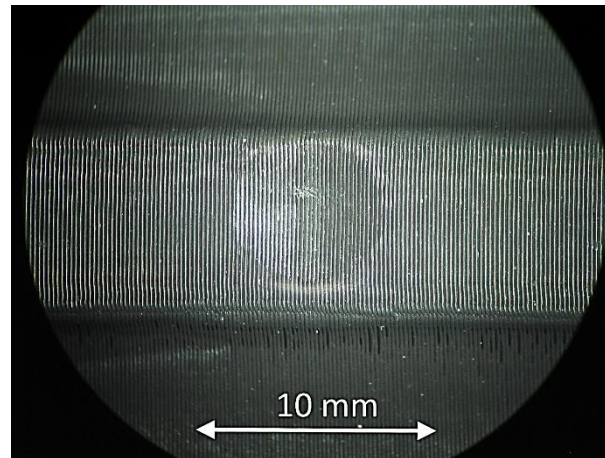


**Figura 3.14.** Gráfico energia-tempo, representativo dos ensaios dos pedais de controlo.

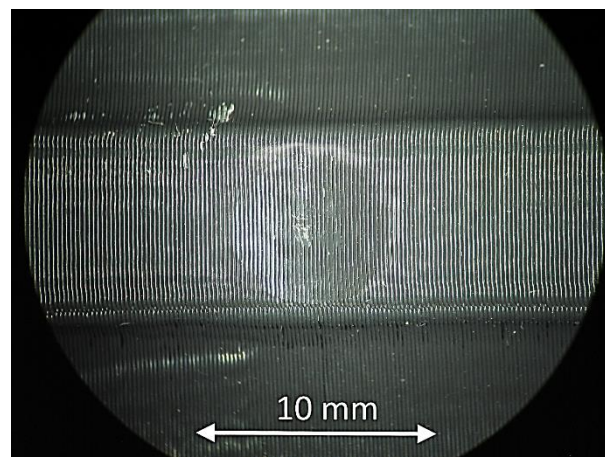
### 3.1.2.2. Modelo CP3

O ensaio ao pedal 5 foi considerado como representativo dos modelos do CP3 com 100% de *infill*.

As figuras 3.15 e 3.16 são relativas aos ensaios representativos dos pedais do modelo CP3 com 75% e 50% de *infill*, respetivamente.

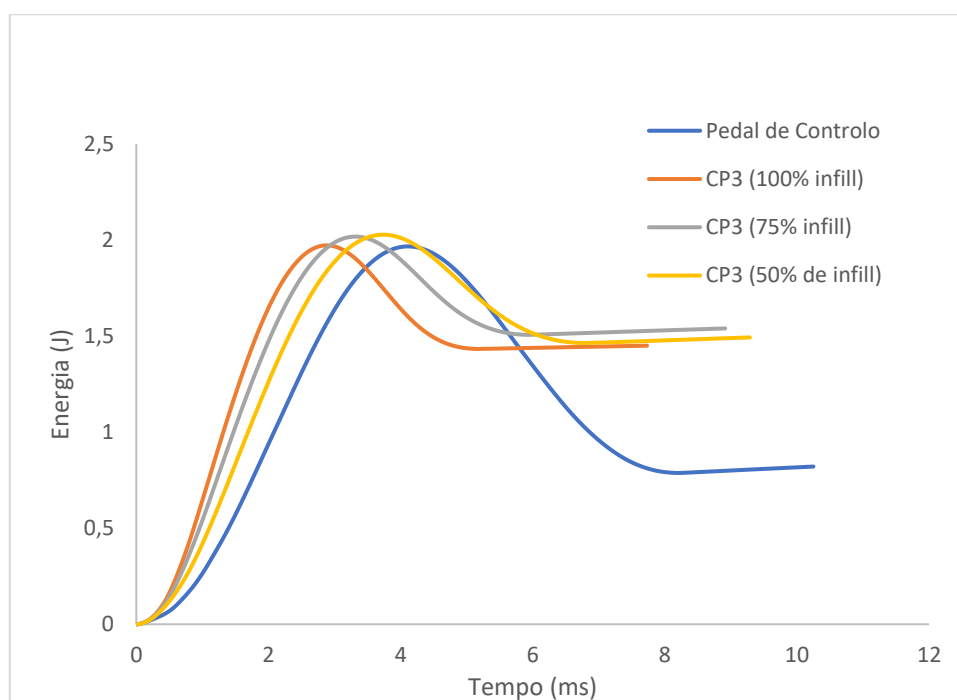


**Figura 3.15.** Fotografia representativa dos pedais com 75% de infill (CP3), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON *PowerShot* G5.



**Figura 3.16** Imagem representativa dos pedais com 50% de infill (CP3), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON *PowerShot* G5.

Na figura 3.17 pode ser observado o gráfico que contém as curvas energia-tempo dos ensaios representativos para todas as situações de *infill* dos pedais do modelo CP3. Através deste gráfico e das informações contidas na tabela 3.4 é possível comparar as diferentes situações de percentagem de *infill*.



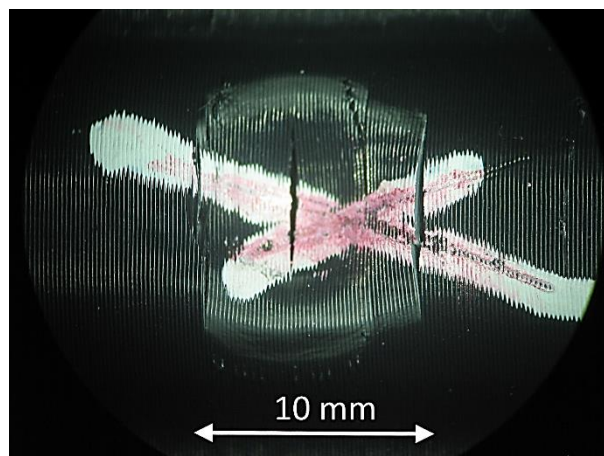
**Figura 3.17.** Gráfico da energia-tempo, correspondente aos ensaios representativos dos pedais do modelo CP3 e dos pedais de controlo.

**Tabela 3.4.** Resultados dos ensaios de impacto ao modelo CP3.

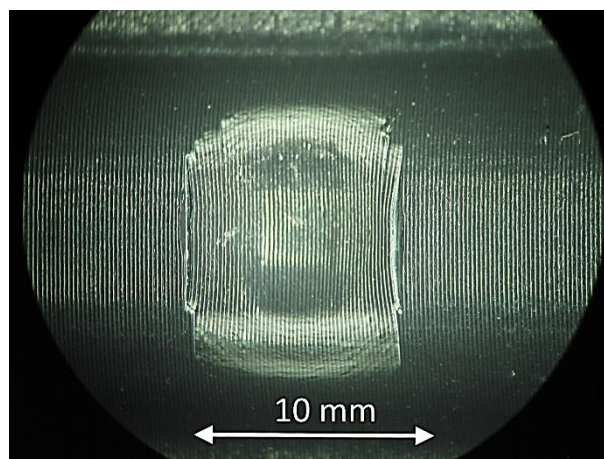
Percentagem de Infill	Energia absorvida (%)	Força de impacto máxima, $F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Deslocamento em $F_{m\acute{a}x}$ (mm)
100%	73,2	1,7	1,8
75%	75,8	1,5	2,1
50%	73,0	1,4	2,4

### 3.1.2.3. Modelo CP1

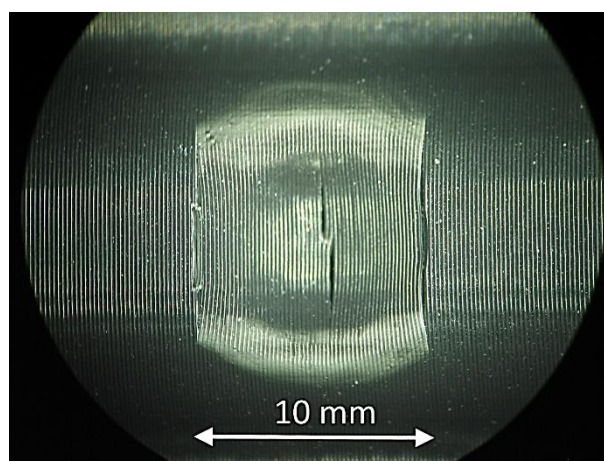
As figuras 3.18, 3.19 e 3.20 são relativas aos ensaios representativos dos pedais do modelo CP1 com 100%, 75% e 50% de *infill*, respetivamente.



**Figura 3.18.** Imagem representativa dos pedais com 100% de infill (CP1), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON *PowerShot G5*.



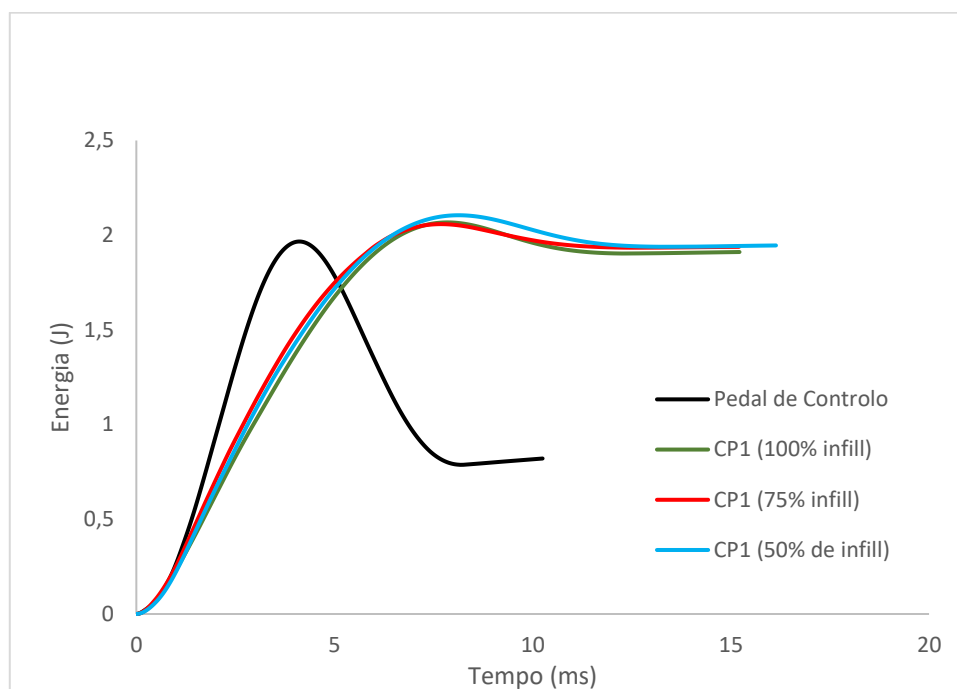
**Figura 3.19.** Imagem representativa dos pedais com 75% de infill (CP1), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON *PowerShot G5*.



**Figura 3.20.** Imagem representativa dos pedais com 50% de infill (CP1), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON *PowerShot G5*.

Na figura 3.21 pode ser observado o gráfico que contém as curvas energia-tempo dos ensaios representativos para todas as situações de *infill* dos pedais do modelo CP1. A tabela

3.5 contém informações que permitem comparar com maior rigor as diferentes situações de percentagem de *infill* entre si.

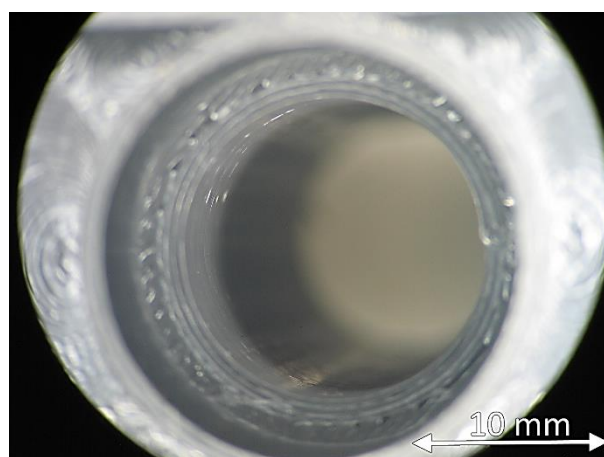


**Figura 3.21.** Gráfico da energia-tempo, correspondente aos ensaios representativos dos pedais do modelo CP1 e dos pedais de controle.

**Tabela 3.5.** Resultados dos ensaios de impacto ao modelo CP1.

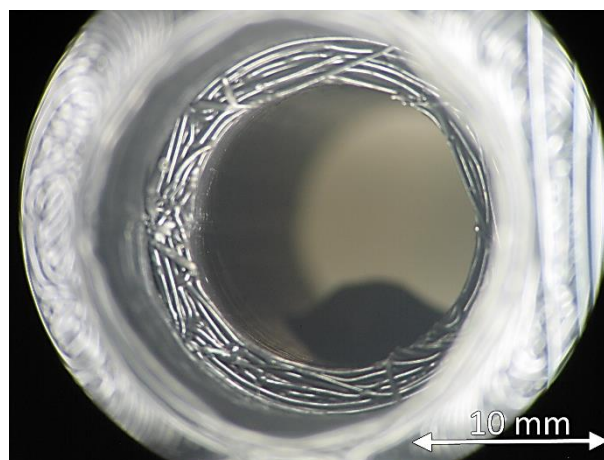
Percentagem de Infill	Energia absorvida (%)	Força de impacto máxima, $F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Deslocamento em $F_{m\acute{a}x}$ (mm)
100%	92,3	0,6	4,5
75%	94,1	0,6	4,2
50%	92,3	0,6	4,3

Um aspeto importante que também deve ser observado é a deformação propagada até à zona interior do pedal, nomeadamente onde passaria o veio que permite ao pedal rodar sobre si mesmo. Na figura 3.22 é possível observar uma imagem representativa dos pedais do modelo CP3. Como pode ser observado, não houve deformação notável nas faces interiores dos pedais, algo que é desejado.



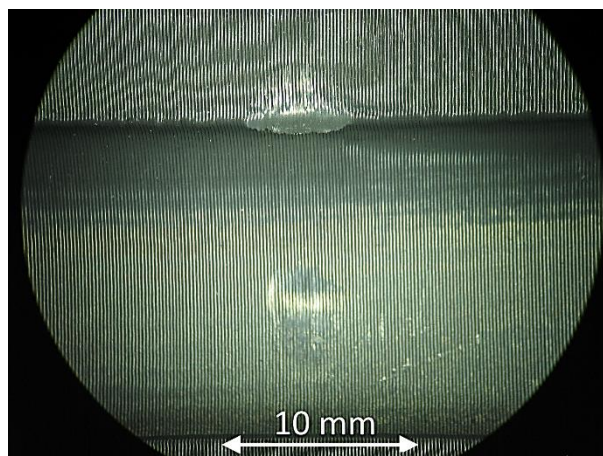
**Figura 3.22.** Fotografia representativa da secção transversal do interior dos pedais (CP3), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON *PowerShot G5*.

Na figura 3.23 é possível observar uma imagem representativa dos pedais do modelo CP1. É clara a significativa deformação que ocorre na abertura cilíndrica no interior dos pedais. Caso o pedal estivesse implementado numa bicicleta, esta deformação afetaria a sua capacidade de rotação em torno de si mesmo, podendo mesmo torná-lo inapto para uso.

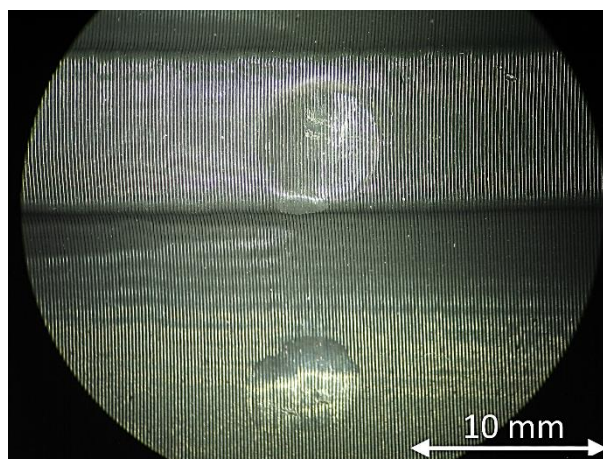


**Figura 3.23.** Fotografia representativa da secção transversal do interior dos pedais (CP1), após ensaio de impacto, obtida pela máquina fotográfica CANON *PowerShot G5*.

Nem todos os ensaios foram “limpos”. Em alguns casos, o provete ressaltou, o que resultou em mais que uma zona de impacto. Na figura 3.24 é possível observar a imagem resultante do ressalto de um provete (do modelo CP3) com 50% de *infill*. Ocorreu também ressalto num ensaio a um provete do mesmo modelo, mas com 100% de *infill*. A imagem da deformação superficial da zona central do pedal resultante deste ensaio pode ser observada na figura 3.25.

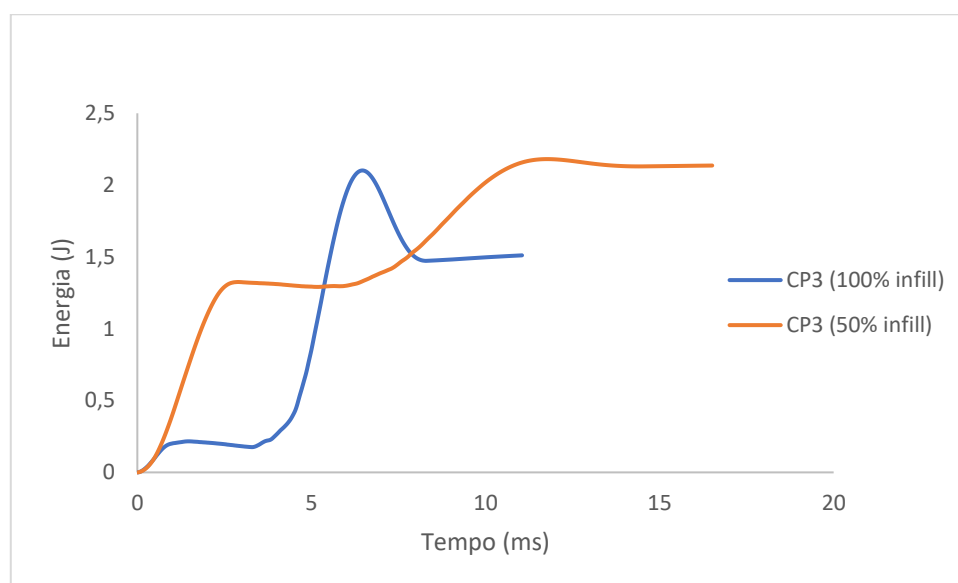


**Figura 3.24.** Imagem representativa da zona central o pedal (CP3 com 50% de infill), após ensaio de impacto com ressalto, obtida pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5.



**Figura 3.25.** Imagem representativa da zona central o pedal (CP3 com 100% de infill), após ensaio de impacto com ressalto, obtida pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5.

O gráfico energia-tempo correspondente aos ensaios onde ocorreu ressalto é apresentado na figura 3.26. Na tabela 3.6 são apresentados os valores de absorção de energia (em percentagem) e de força de impacto máxima relativos a estes ensaios. Quando ocorre ressalto e o impacto se propaga para outra secção da amostra, a sua resposta mecânica é influenciada significativamente pela percentagem de *infill*.



**Figura 3.26** Gráfico da energia absorvida em função do tempo, correspondente aos ensaios onde ocorreu ressalto do provete.

**Tabela 3.6.** Resultados dos ensaios de impacto (com ressalto) ao modelo CP3.

Percentagem de Infill	Energia absorvida (%)	Força de impacto máxima, $F_{m\acute{a}x}$ (kN)
100%	71,2	2,3
50%	97,8	0,9

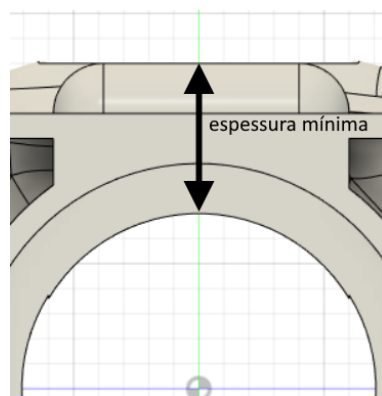
De modo a facilitar a comparação dos modelos desenvolvidos entre si e com o modelo de controlo, foi elaborada a tabela 3.7.

**Tabela 3.7.** Resultados dos ensaios de impacto a 2J (sem ressalto).

Modelo	Percentagem de Infill	Energia absorvida (%)	Força de impacto máxima, $F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Deslocamento em $F_{m\acute{a}x}$ (mm)
CP3	100%	73,2	1,7	1,8
	75%	75,8	1,5	2,1
	50%	73,0	1,4	2,4
CP1	100%	92,3	0,6	4,5
	75%	94,1	0,6	4,2
	50%	92,3	0,6	4,3
Controlo	-----	40,9	1,4	2,8



Como se pôde concluir, o modelo CP1 não resistiu, em nenhum dos casos, aos ensaios de impacto. Já o modelo CP3, apesar de apresentar uma deformação um pouco superior à dos pedais de controlo, conseguiu resistir a todos os ensaios. Além disso, não se observou transmissão de deformação significativa para a abertura interior dos pedais deste modelo. Esta distinta resposta dos dois modelos produzidos é resultado da sua espessura mínima de material na zona do impacto (figura 3.27), sendo esta superior no modelo CP3 (tem o valor de 4 mm, enquanto no modelo CP1 assume o valor de 3 mm), o que se traduz numa maior área resistente.



**Figura 3.27** Representação esquemática da espessura mínima da zona de impacto dos componentes estudados.

Adicionalmente, a absorção de energia assume (nos casos sem ressalto), valores muito próximos para os vários casos de percentagem de *infill* dentro do mesmo modelo. Esta semelhança pode ser explicada pelo facto de a zona do impacto ser composta quase na totalidade por cascas (ou *shells*), não contendo uma quantidade de *infill* suficiente para provocar grande diferença nos valores de absorção de energia (no caso do modelo CP1 a zona de *infill* sob a superfície de impacto é tão pequena que não se verifica diferença significativa na resistência ao impacto entre as amostras com diferentes percentagens de *infill*).

Apesar da clara proximidade no que toca à absorção de energia pelas amostras, é possível tirar algumas conclusões no caso do modelo CP3: os modelos com maior percentagem de *infill* parecem estar associados a uma absorção de energia inferior (isto é especialmente notável nos casos de ressalto); com maior a percentagem de *infill*, a força máxima de impacto aumenta (no caso dos ensaios sem e com ressalto). É possível afirmar, com certeza, que uma maior percentagem de *infill* resulta numa maior resistência do provete.

### 3.2. Otimização de *design* após ensaios de impacto

Uma vez que os modelos anteriormente produzidos não se encontram à altura das solicitações impostas nos ensaios de impacto, uma vez que apresentam significativa deformação quando sujeitos a estas, surgiu a ideia de melhorar aquele que apresentou maior resistência ao impacto. Com esta finalidade, foi alterado o desenho 3D do CP3. O procedimento consistiu em retirar massa em áreas anexas à secção do pedal onde passa o veio e reforçar a zona central do pedal, onde se dá o impacto, por aumento da espessura da mesma, até que a superfície de impacto fique à mesma cota que as superfícies de apoio ao pé (o novo componente tem o mesmo valor de espessura mínima da zona de impacto que o modelo de controlo: 6 mm). O objetivo foi chegar a um modelo com maior resistência ao impacto e menor absorção de energia. Para essa finalidade, a percentagem de *infill* selecionada foi de 100%.

O modelo desenvolvido (figura 3.28), intitulado de CP4, apresenta uma massa teórica de 45,8 g e um volume de 43,2 cm<sup>3</sup>.

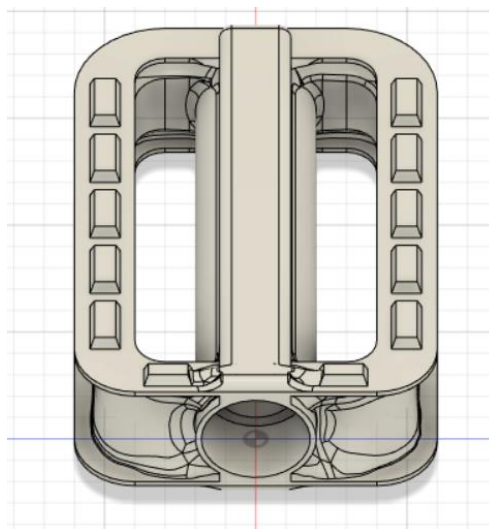
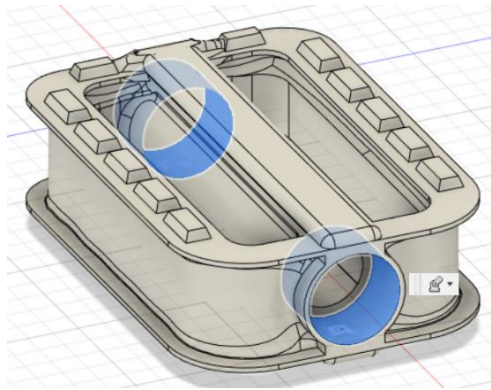


Figura 3.28. Modelo CP4.

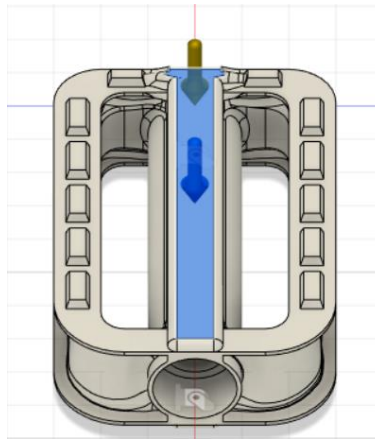
Este modelo foi testado, por análise de elementos finitos, no *software* Autodesk Fusion 360, de modo a verificar o seu comportamento face às cargas estáticas a que deve resistir. Quanto às definições (avanzadas) de malha, foram utilizadas as definições de *default* do *software*, para um “*model-based size*” de 5% (foi verificada a convergência de resultados). As fixações consideradas foram do tipo “*pin*” e aplicadas às superfícies de contacto com os rolamentos, no caso de o pedal ser montado para utilização (figura 3.29).



**Figura 3.29.**Fixações consideradas para o CP4.

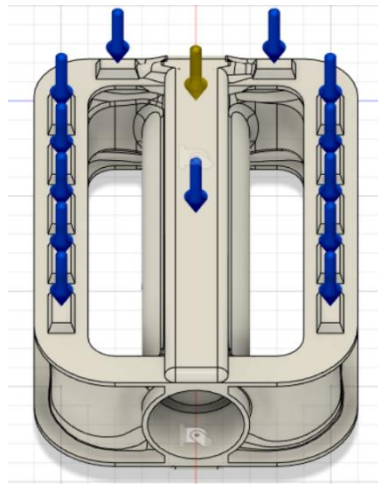
Foram considerados 2 casos de carga distintos, aplicados a ambos os lados do pedal:

- Caso 1.1- Uma carga de 1500 N é aplicada na superfície central do pedal situada acima do eixo de rotação do pedal em torno de si próprio (figura 3.30).



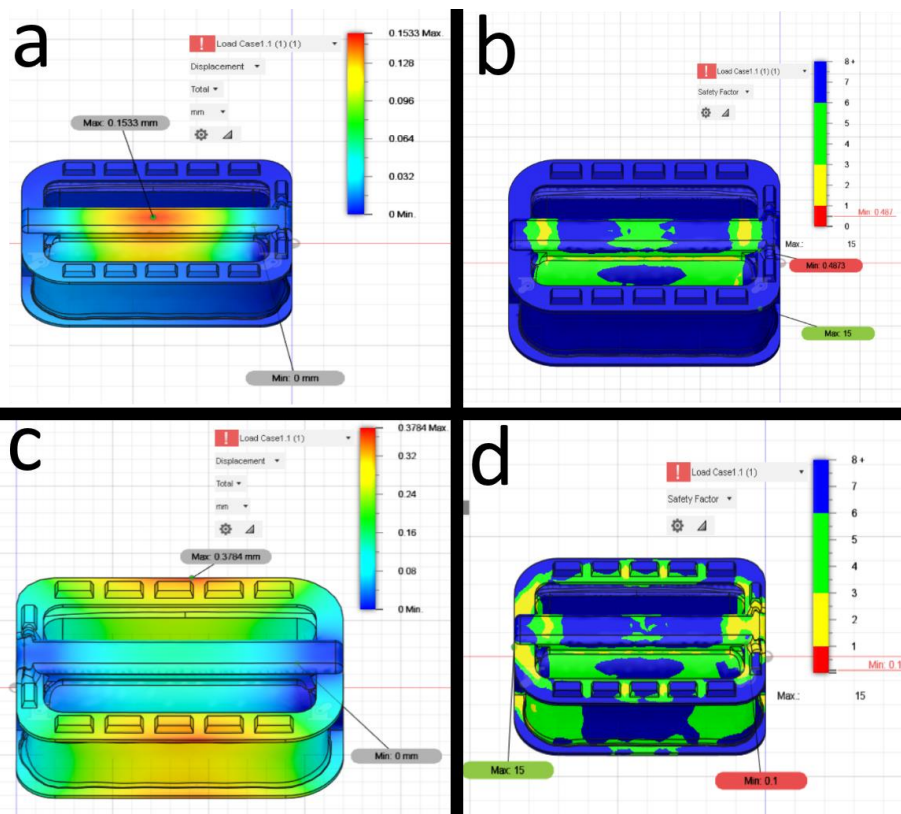
**Figura 3.30.**Caso de carga 1.1.

- Caso 1.2- Uma carga de 2100 N é aplicada por todas as superfícies de apoio do pedal (figura 3.31). A distribuição é feita, pelo *software*, em função da área de cada apoio individual (esta opção não se encontra disponível no ambiente de desenho generativo do *software* utilizado).

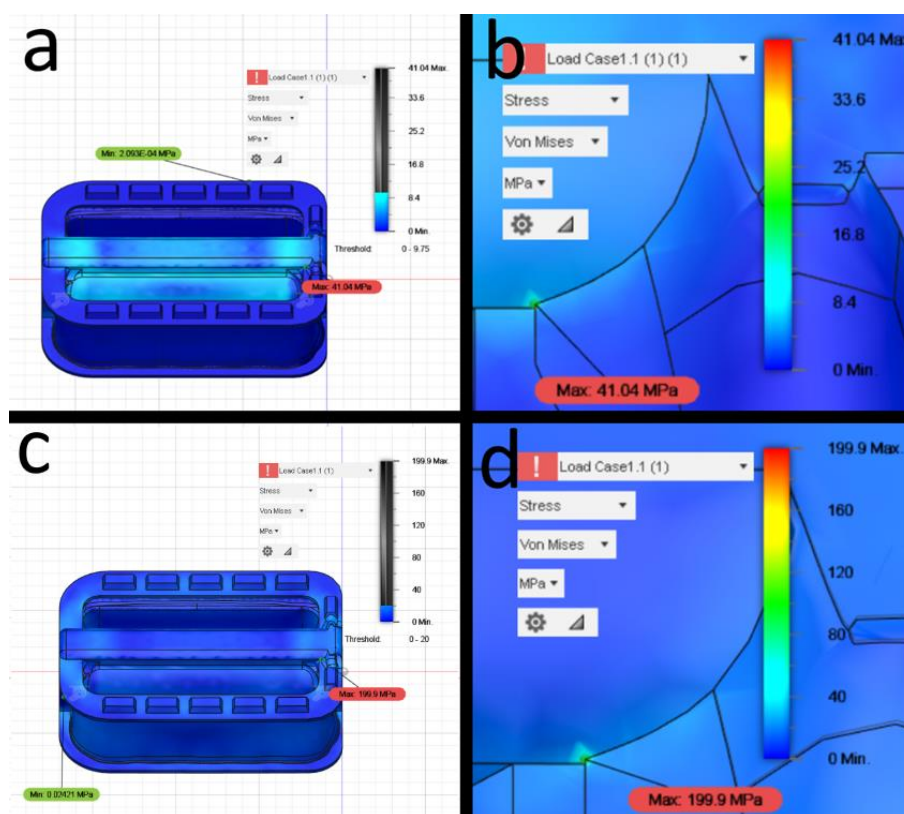


**Figura 3.31.** Representação do caso de carga 1.2.

A análise estática ao modelo revelou um deslocamento máximo de  $153 \mu\text{m}$  no caso 1.1 (figura 3.32: a), e de  $378 \mu\text{m}$  no caso 1.2 (figura 3.32: c). Em ambos os casos de carga, o fator de segurança é superior à unidade em quase toda a peça, exceto numa zona específica, muito pequena, onde assume o valor mínimo de 0,49 no caso 1.1 e 0,10 no caso 1.2 (a zona referida é a mesma em ambos os casos de carga). Uma explicação para isto é a existência de tensões pontuais nessa zona (figura 3.33). Na prática, estas tensões pontuais, e consequentemente o fator de segurança associado às mesmas, podem ser consideradas como desprezáveis. Ignorando então essas tensões pontuais, as tensões induzidas no modelo CP4 são inferiores a  $9,8 \text{ MPa}$  no caso 1.1, e inferiores a  $20,0 \text{ MPa}$  no caso 1.2.



**Figura 3.32.** Resultados da simulação estática (CP4): a) Deslocamentos provocados para o caso de carga 1.1; b) Fator de segurança para o caso de carga 1.1; c) Deslocamentos provocados para o caso de carga 1.2; d) Fator de segurança para o caso de carga 1.2.



**Figura 3.33.** Resultados da simulação estática (CP4): a) Distribuição de tensões no caso de carga 1.1; b) Zona de tensão máxima (pontual) para o caso de carga 1.1; c) Distribuição de tensões no caso de carga 1.2; d) Zona de tensão máxima (pontual) para o caso de carga 1.2.

Após esta verificação da integridade mecânica do modelo, foram produzidos dois exemplares, seguindo os parâmetros de impressão utilizados anteriormente. Na tabela 3.8 são apresentadas as massas (individuais e média) dos componentes produzidos.

**Tabela 3.8.** Tabela de massas dos exemplares de CP4 produzidos.

Designação do Componente	Nome da amostra	Massa [g]
CP4	C4.1	40,9
	C4.2	41,2
	Média	41,0

A massa média das amostras deste modelo é:

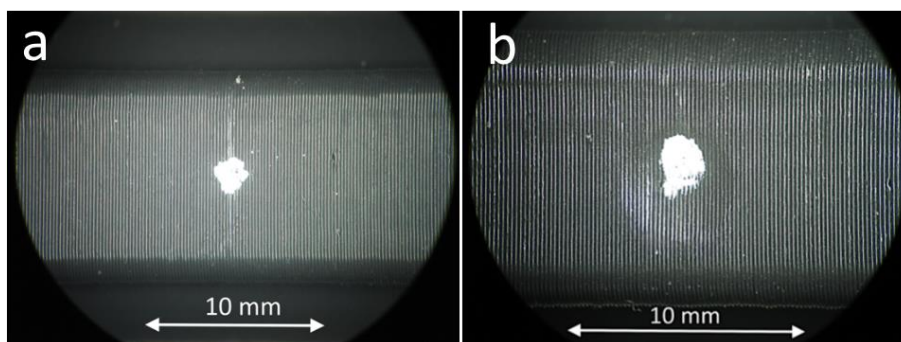
- 10,3% inferior à idealizada pelo *software*;
- 12,2% inferior à massa média dos pedais de controlo;
- 24,1% inferior à das amostras do modelo que lhe deu origem (CP3).

Como foi feito anteriormente, foram marcados os centros geométricos das amostras produzidas, e foram captadas imagens dessa zona (figura 3.34).



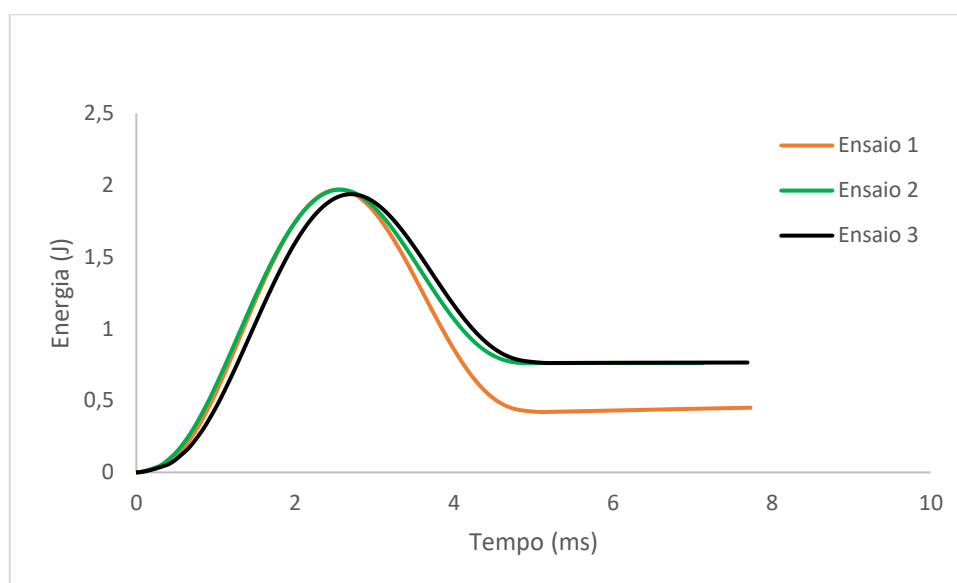
**Figura 3.34.** Fotografia da zona central do pedal (CP4), tirada pelo modelo Redmi 9 da Xiaomi.

Os pedais do modelo CP4, quando sujeitos aos ensaios mecânicos, sofreram a menor deformação de entre todos os pedais produzidos neste trabalho. A figura 3.35 é representativa da deformação induzida nestes pedais pelos ensaios de impacto.



**Figura 3.35.** Fotografia da zona central do pedal (CP4), obtida pela máquina fotográfica CANON PowerShot G5: a) antes do ensaio de impacto; b) após ensaio de impacto.

Na figura 3.36 é possível observar o gráfico que contém as curvas energia-tempo correspondentes aos três ensaios do CP4. Os valores de energia de impacto absorvida, força máxima e deslocamento correspondente, para cada ensaio, podem ser consultados na tabela 3.9.



**Figura 3.36.** Gráfico energia-tempo referente aos ensaios de impacto do CP4.

**Tabela 3.9.** Resultados dos ensaios de impacto de CP4 produzidos.

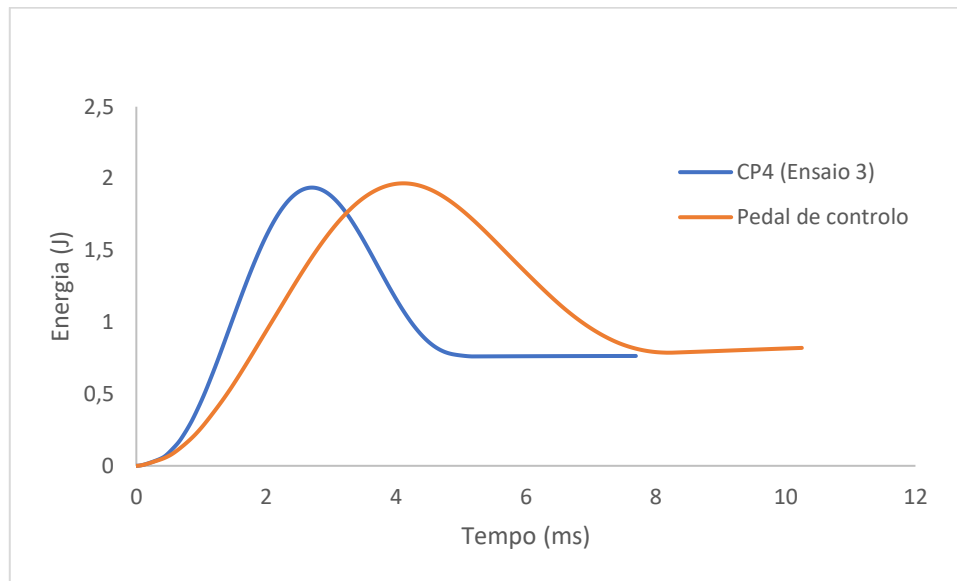
Ensaio	Energia absorvida (%)	Força de impacto máxima, $F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Deslocamento em $F_{m\acute{a}x}$ (mm)
1	22,3	2,3	1,8
2	38,7	2,2	1,7
3	39,4	2,2	1,9

Observando a tabela 3.9, há uma semelhança significativa entre os resultados dos ensaios 2 e 3. O ensaio 1 foi o ensaio em que se verificou uma menor absorção de energia e uma maior força de impacto. Por ser significativamente diferente dos outros dois ensaios, não pode ser tomado como representativo.

A absorção de energia nos ensaios do modelo CP4 é, em geral, próxima à observada nos pedais de controlo, sendo até ligeiramente inferior. Adicionalmente, a força de impacto máxima atingida nos ensaios deste modelo é bastante superior à medida nos ensaios dos pedais de controlo (foi observada uma diferença na ordem dos 800 N). Isto é notável, uma vez que estamos a comparar um modelo produzido em material termoplástico (CP4) com outro produzido em material termoendurecível (pedal de controlo), e ambos os modelos têm um valor de espessura mínima da zona de impacto igual (6 mm).



Na figura 3.37 são apresentadas as curvas energia-tempo do ensaio de impacto menos favorável do modelo CP4 e do ensaio representativo dos pedais de controlo.



**Figura 3.37.** Gráfico de energia (tempo) referente ao ensaio 3 do CP4 e ao pedal de controlo.

## 4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Os objetivos deste trabalho foram cumpridos, nomeadamente: foram produzidos (por fabrico aditivo) e caracterizados componentes cujo *design* foi resultado da técnica de desenho generativo; foi estudada a viabilidade da otimização de massa através da combinação de desenho generativo e variação de percentagem de *infill*; as amostras produzidas foram analisadas e comparadas entre si e com componentes já existentes.

### 4.1. Conclusões

Após a elaboração deste trabalho, foi possível retirar as seguintes conclusões principais:

- I. A ferramenta de desenho generativo do Autodesk Fusion 360, por si só, é insuficiente quando se pretende a geração de componentes sujeitos a cargas que não sejam do tipo estático. Os resultados do desenho generativo devem ser estudados (potencialmente em ambiente de simulação) de modo a verificar a capacidade de resistência das peças face às solicitações não-estáticas, e se necessário, o seu *design* deve ser reforçado;
- II. Os primeiros modelos produzidos neste trabalho (CP1) foram incapazes de resistir às solicitações a que foram submetidos, sofrendo falha mecânica. O segundo modelo (CP3) demonstrou melhor resistência, e evidenciou a influência da percentagem de *infill* na resposta dos provetes: quanto maior a percentagem de *infill*, maior a resistência do provete;
- III. Através da análise dos ensaios dos primeiros componentes produzidos, foi possível desenvolver um novo modelo (CP4), com 100% de *infill*, que para a energia de impacto utilizada (2 J), obteve uma resposta melhor que os restantes modelos produzidos;
- IV. O modelo CP4 (material termoplástico), 12,2% mais leve que o pedal de controlo (material termoendurecível), teve uma absorção de energia de impacto semelhante a este (cerca de 40,0%). Adicionalmente, no ensaio de impacto

menos favorável do modelo CP4, a força de impacto máxima foi de 2,2 kN para um deslocamento de 1,9 mm, enquanto no ensaio representativo do pedal de controlo esse valor foi de 1,4 kN para um deslocamento de 2,8 mm. Por essas razões, o modelo CP4 apresenta uma maior resistência ao impacto que o modelo comprado (pedal de controlo), para a energia de impacto utilizada. Deve também ser referido que a espessura mínima da zona de impacto é igual em ambos os modelos.

- V. As reduções de massa causadas pela utilização de fabrico aditivo e pela variação de percentagem de *infill* foram semelhantes para os pedais primeiros pedais produzidos. As amostras produzidas (por FFF) com 100% de *infill* apresentam massa menor que a idealizada pelo *software* utilizado (Autodesk Fusion 360). No caso do último pedal produzido (CP4), essa redução de massa foi de aproximadamente 10%.

## 4.2. Propostas para trabalhos futuros

Tendo em consideração o tema abordado neste trabalho, são consideradas pertinentes as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- I. Reprodução do presente trabalho, utilizando poli(ácido láctico) (PLA) como material para o corpo dos pedais;
- II. Reprodução do presente trabalho, considerando a geometria de encaixe interior do pedal semelhante à dos pedais de controlo, de modo a permitir a total montagem dos pedais para testagem;
- III. Estudo da influência da orientação de impressão na resistência mecânica dos pedais desenvolvidos;
- IV. Testagem do comportamento do modelo CP4 quando submetido a solicitações de fadiga;
- V. Elaboração de um trabalho semelhante, direcionado à área da saúde (por exemplo, testar a viabilidade da combinação de fabrico aditivo com desenho generativo para produção de próteses transtibiais);
- VI. Uso de um *software* de desenho generativo diferente, de modo a poder comparar os resultados obtidos.





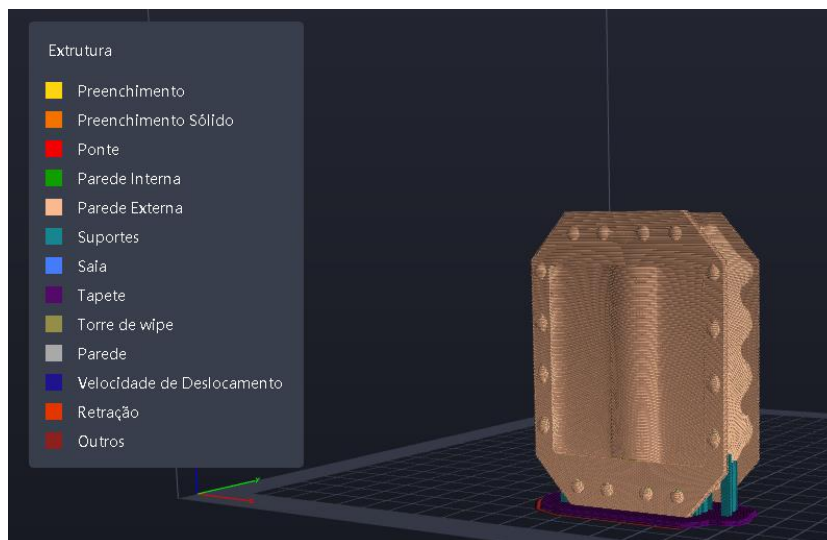
## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. C. Pinho, A. M. Amaro e A. P. Piedade (2020), “3D printing goes greener: Study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components,” *Waste Management* 118, 426–434.
- [2] “Impressão 3D – Wikipédia, a enciclopédia livre.”, acessido a 14 de junho de 2022: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Impress%C3%A3o\\_3D](https://pt.wikipedia.org/wiki/Impress%C3%A3o_3D).
- [3] “Binder Jetting - an overview | ScienceDirect Topics.”, acessido a 14 de junho de 2022: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/binder-jetting>.
- [4] “Selective laser melting - Wikipedia.”, acessido a 14 de junho de 2022: [https://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_melting](https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting).
- [5] P.M.F. Cunha (2019), “Impressão 3D de Estruturas Híbridas”. Tese de Mestrado em Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho.
- [6] “Fused Filament Fabrication.”, acessido em 5 de março de 2022: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication#/media/File:Schematic\\_representation\\_of\\_Fused\\_Filament\\_Fabrication\\_01.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication#/media/File:Schematic_representation_of_Fused_Filament_Fabrication_01.png).
- [7] “Pedais Union SP-872N | Deporvillage.”, acessido a 5 de abril de 2022: [https://www.deporvillage.pt/pedais-union-sp-872n-preto?gelid=CjwKCAjwrfCRBhAXEiwAnkmKmWPWncfvanhIb6XrprxG14GjAJYufmHNs6rI6OluPB6OERUqsgEpcxoCksoQAvD\\_BwE](https://www.deporvillage.pt/pedais-union-sp-872n-preto?gelid=CjwKCAjwrfCRBhAXEiwAnkmKmWPWncfvanhIb6XrprxG14GjAJYufmHNs6rI6OluPB6OERUqsgEpcxoCksoQAvD_BwE).
- [8] “Pedais de plataforma Race Face Ride | Deporvillage.”, acessido a 5 de abril de 2022: [https://www.deporvillage.pt/pedais-de-plataforma-race-face-ride-preto?source=igodigital&opt=product\\_sfmc\\_slider1](https://www.deporvillage.pt/pedais-de-plataforma-race-face-ride-preto?source=igodigital&opt=product_sfmc_slider1).
- [9] M. J. A. J. M. Hoe, R. A. Binkhotst, A. E. M. C. Smeekes-Kuyl, and A. C. A. Vissers (1968), “Measurement of Forces Exerted on Pedal and Crank During Work on a Bicycle Ergometer at Different Loads”, *Int. Z. angew. Physiol. einsehl. Arbeitsphysiol.* 26, 33-42.
- [10] J. V. Neves (2010), “Estudo e Dimensionamento de um Equipamento de Ginástica Bicicleta Estática”. Trabalho de Projeto para a obtenção do Grau de Mestre em Equipamentos e Sistemas Mecânicos, Instituto Politécnico de Coimbra.
- [11] ISO 4210-8 (2014). “Cycles-Safety requirements for bicycles-Part 8: Pedal and drive system test methods”, International Organization for Standardization.
- [12] P. D. Soden, B. A. Adeyefa, Y. S. Wong, e M. A. Millar (1986), “Loads, Stresses, and deflections in Bicycle Frames,” *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 21, no. 4, pp. 185–195, doi: 10.1243/03093247V214185.
- [13] P. D. Soden e B. A. Adeyefa (1979), “Forces Applied to a Bicycle During Normal Cycling”, *J. Biomechanics*, vol.12. pp, 527-541.
- [14] C. W. Ziemian, D. E. Cipoletti, S. N. Ziemian, M. N. Okwara, e K. V. Haile (2014), “Monotonic and Cyclic Tensile Properties of ABS Components Fabricated by Additive Manufacturing”.
- [15] “PEDAIS PLANOS DE BTT EM RESINA 100 ROCKRIDER - Decathlon.”, acessido a 14 de junho de 2022: [https://www.decathlon.pt/p/pedais-planos-de-btt-em-resina-100/\\_R-p-100619?mc=8380502](https://www.decathlon.pt/p/pedais-planos-de-btt-em-resina-100/_R-p-100619?mc=8380502).

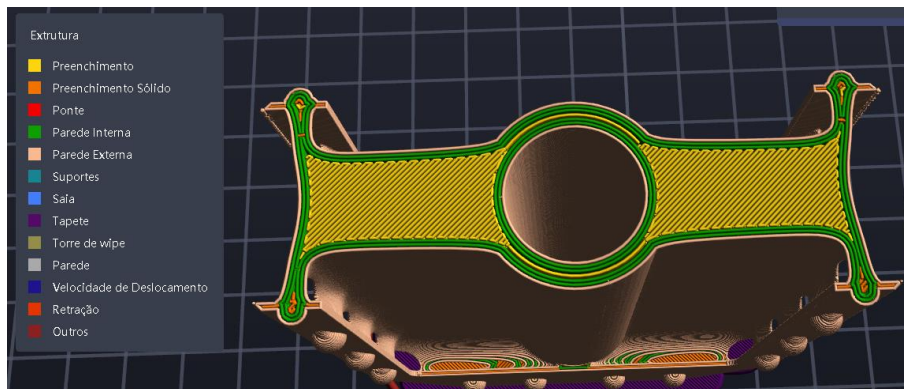
## APÊNDICE A

**Tabela A. 1.** Tempo de produção e filamento consumido na produção das amostras.

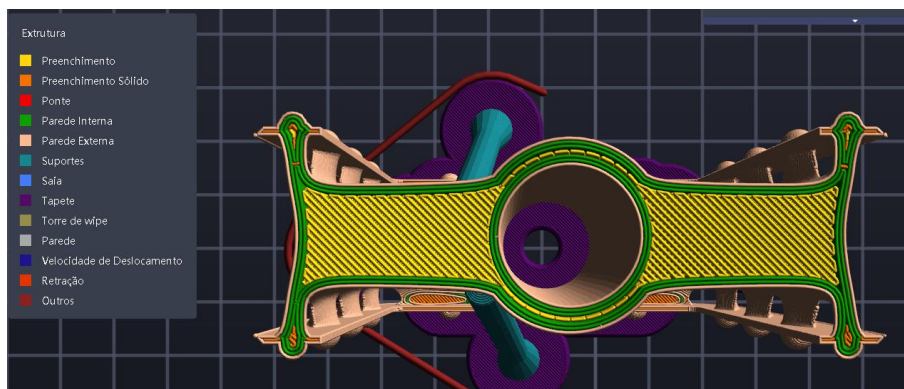
Modelo	Infill (%)	Filamento consumido [g]	Tempo de produção
CP1	100	53,2	6h e 56 min
	75	50,4	7h e 2 min
	50	43,8	6h e 44 min
CP3	100	64,7	7h e 57 min
	75	56,9	7h e 28 min
	50	48,9	6h e 28 min
CP4	100	51,0	7h e 32 min



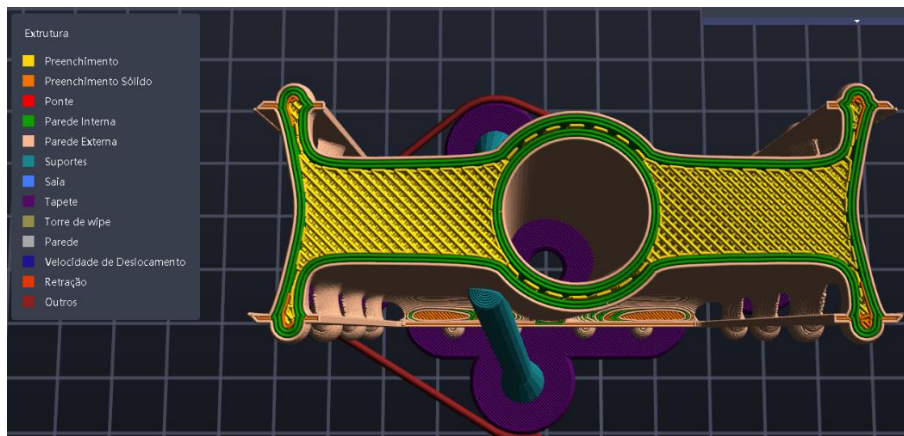
**Figura A.1.** Representação do g-code para impressão do CP1 com 100% de infill, obtida através do software FlashPrint.



**Figura A.2.** Representação do interior do CP1 com 100% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.

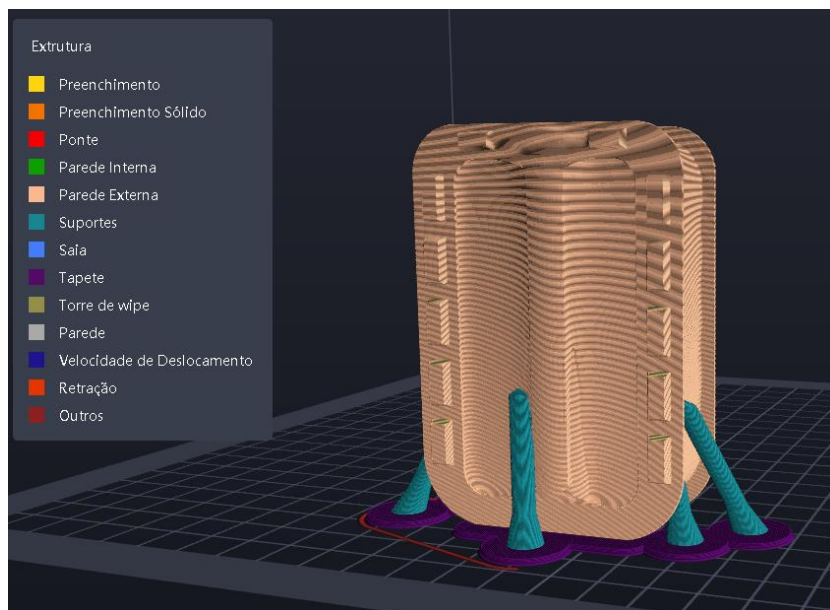


**Figura A.3.** Representação do interior do CP1 com 75% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.

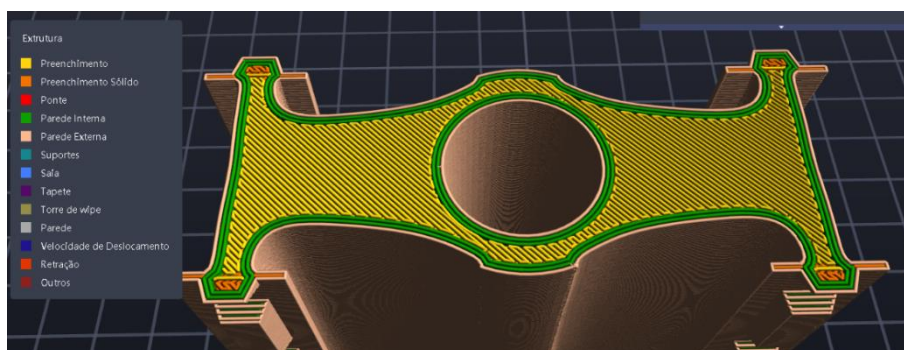


**Figura A.4.** Representação do interior do CP1 com 50% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.

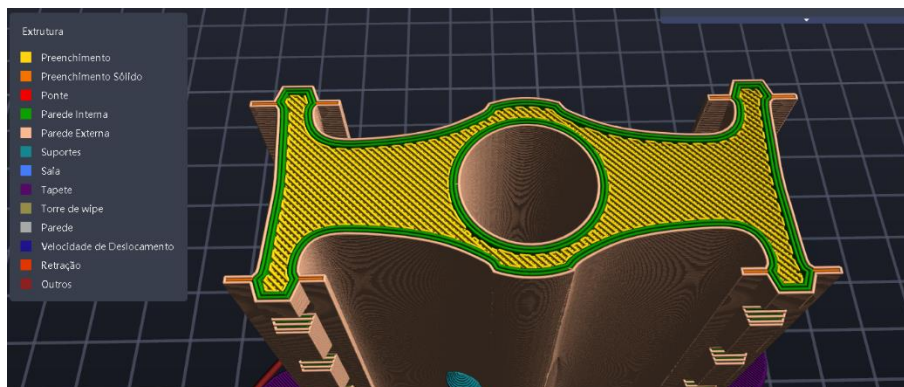




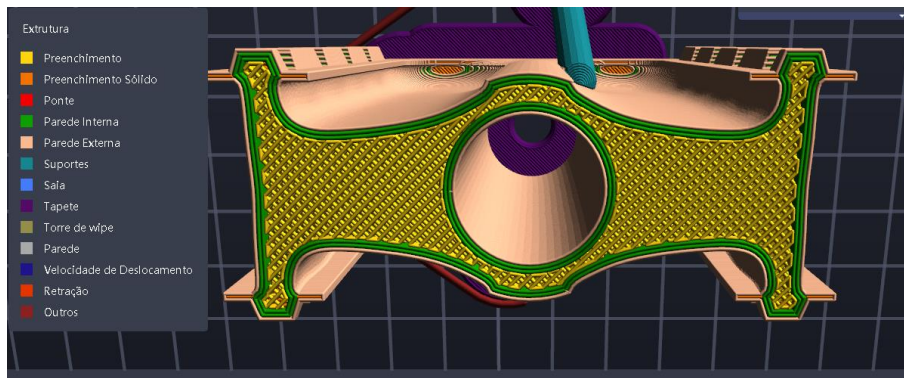
**Figura A.5.** Representação do g-code para impressão do CP3 com 100% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.



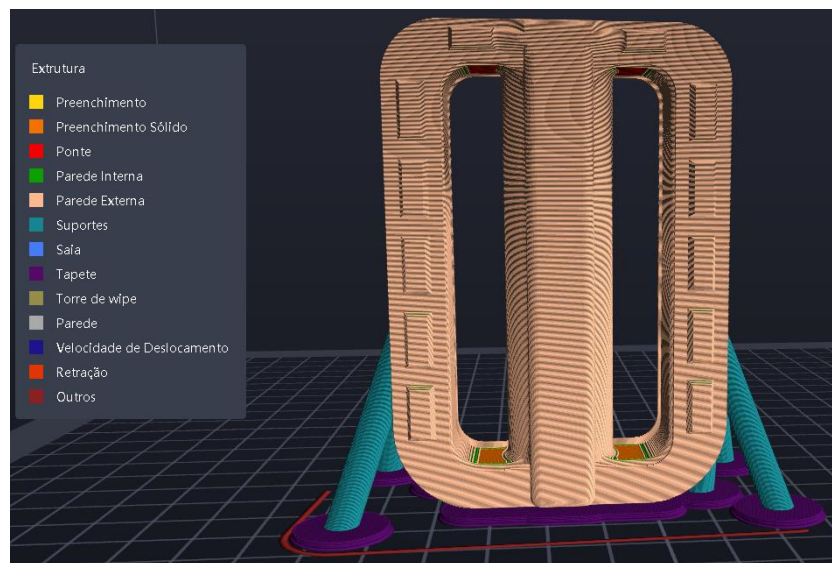
**Figura A.6.** Representação do interior do CP3 com 100% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.



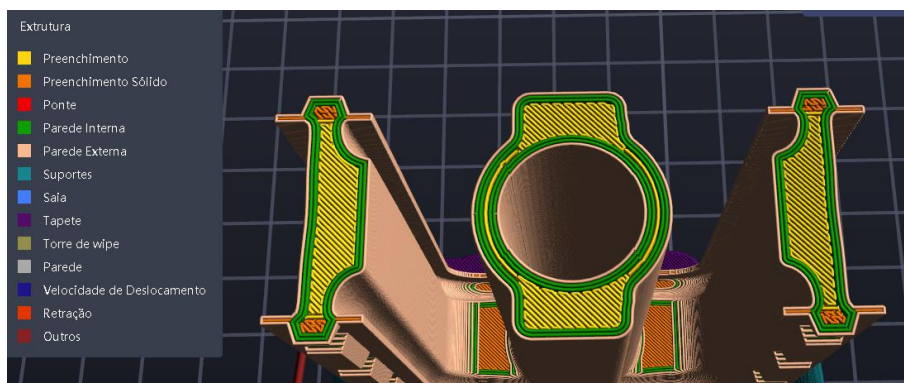
**Figura A.7.** Representação do interior do CP3 com 75% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.



**Figura A.8.** Representação do interior do CP3 com 50% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.



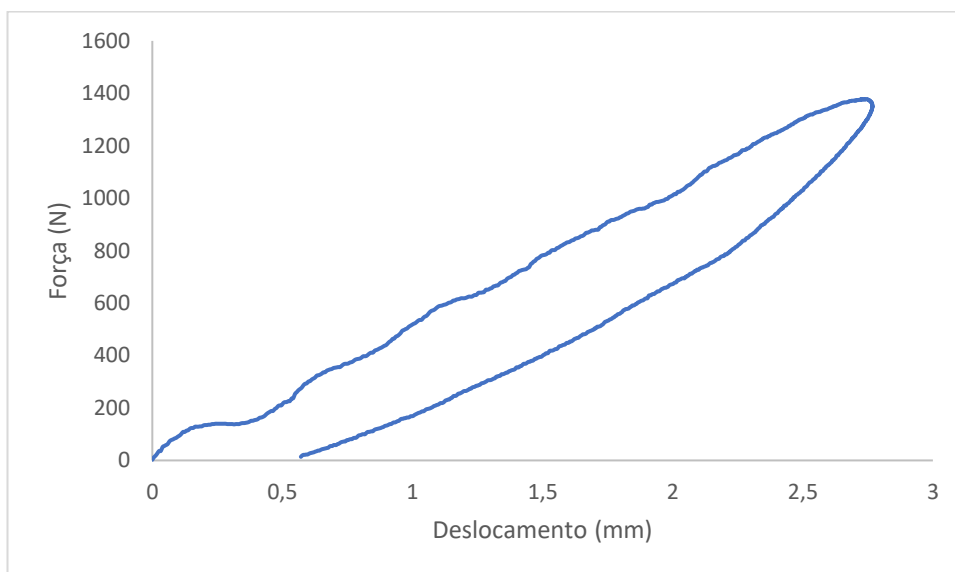
**Figura A.9.** Representação do g-code para impressão do CP4 com 100% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.



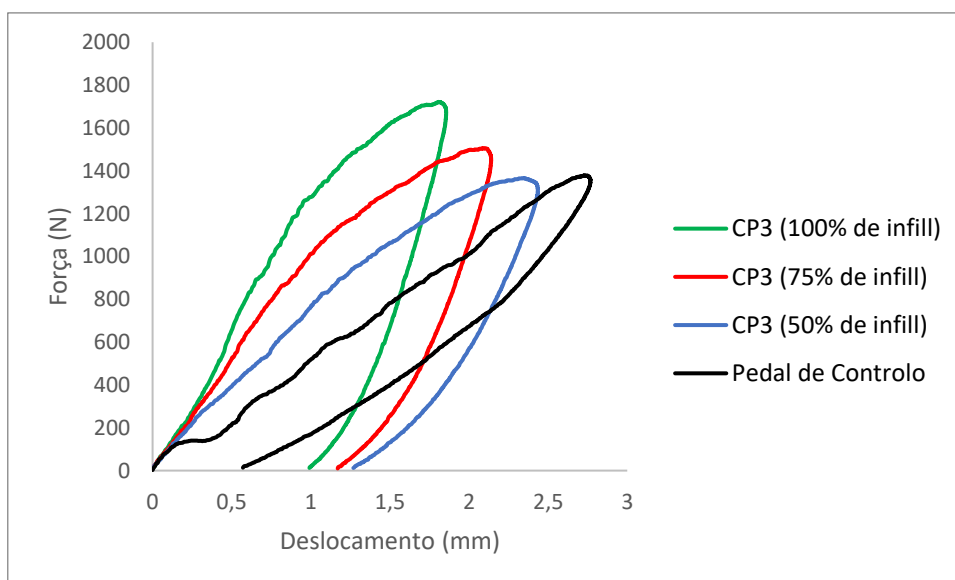
**Figura A.10.** Representação do interior do CP4 com 100% de *infill*, obtida através do *software FlashPrint*.

## APÊNDICE B

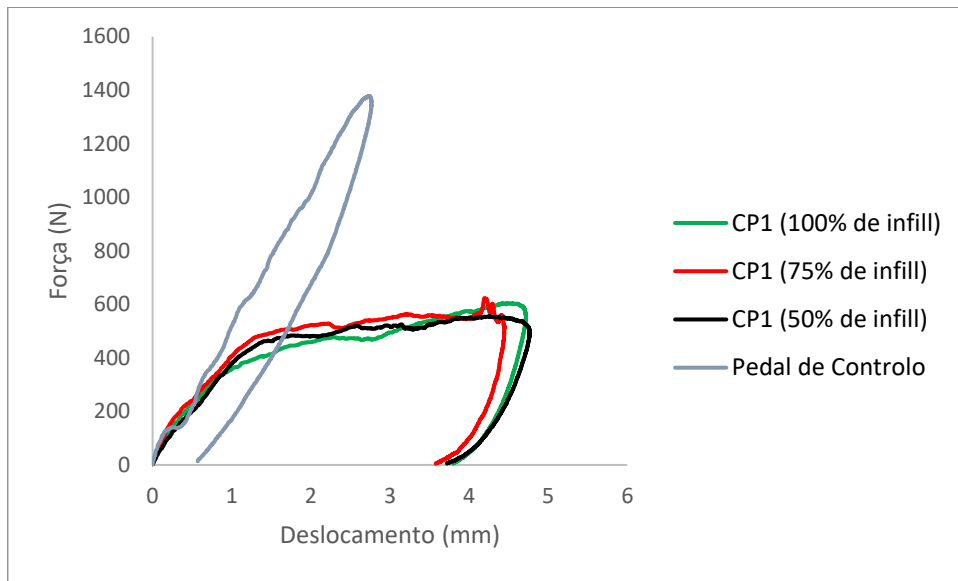
Os gráficos força-deslocamento para os ensaios representativos referidos neste trabalho são apresentados abaixo.



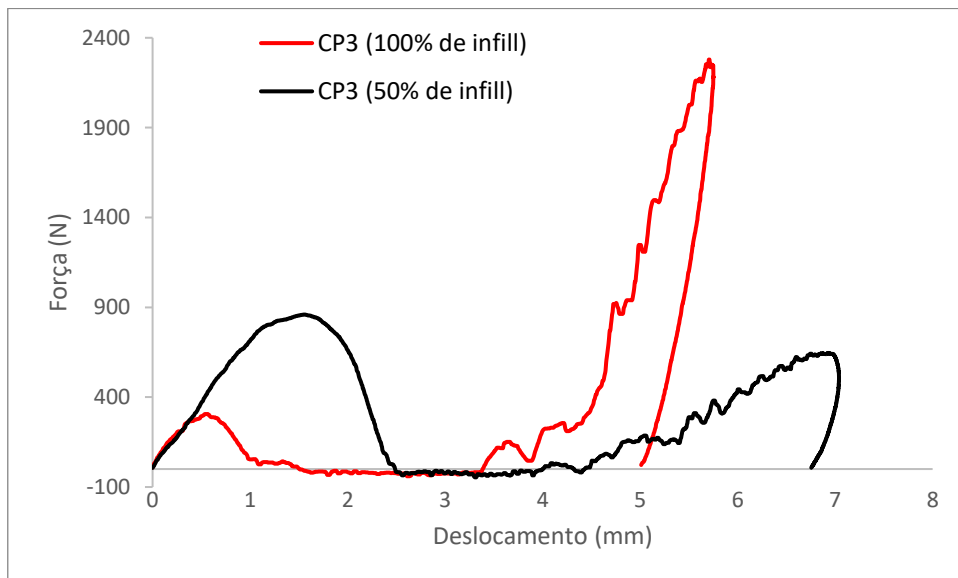
**Figura B. 1.** Gráfico força-deslocamento representativo dos ensaios de impacto do modelo de pedal de controlo.



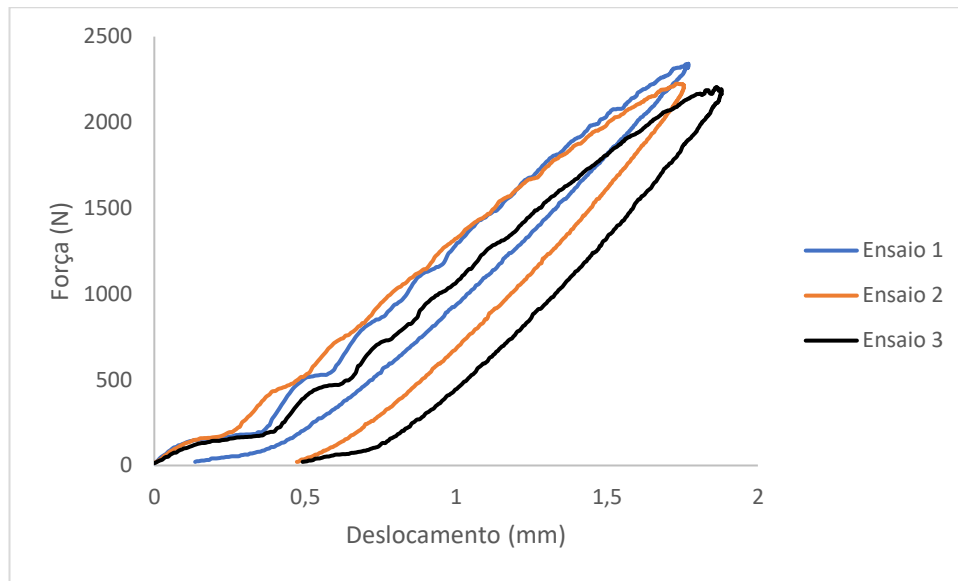
**Figura B. 2.** Gráfico força-deslocamento comparativo dos ensaios do modelo CP3 com o ensaio representativo do modelo de pedal de controlo.



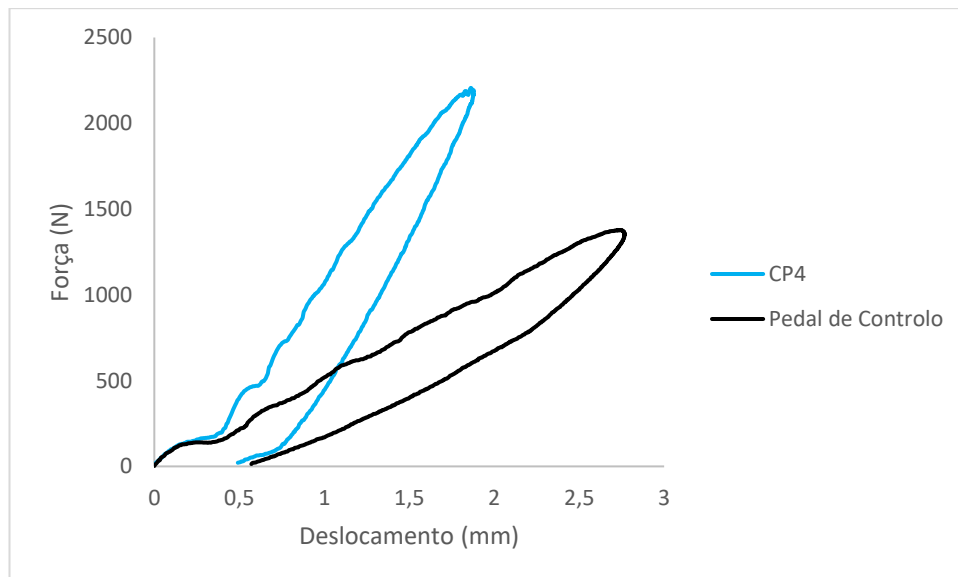
**Figura B. 3.** Gráfico força-deslocamento comparativo dos ensaios do modelo CP1 com o ensaio representativo do modelo de pedal de controlo.



**Figura B. 4.** Gráfico força-deslocamento comparativo dos ensaios do modelo CP3 (50 e 100% de *infill*) com ressalto.



**Figura B. 5.** Gráfico força-deslocamento dos ensaios de impacto do modelo CP4.



**Figura B. 6.** Gráfico força-deslocamento comparativo do ensaio menos favorável do modelo CP4 (ensaio 3) com o ensaio representativo do modelo de pedal de controlo.

