



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Joana Almeida Silva

**DESENVOLVIMENTO E IMPRESSÃO 3D DE  
ESTRUTURAS POLIMÉRICAS COM COEFICIENTE  
DE *POISSON* UNITÁRIO**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, no ramo de Produção e Projeto orientada pela Professora Doutora Maria Augusta Neto e pela Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.**

julho de 2021



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## **Desenvolvimento e Impressão 3D de estruturas poliméricas com coeficiente de *Poisson* unitário**

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

### **Development and 3D Printing of polymeric structures with unit Poisson ratio**

**Autor**

**Joana Almeida Silva**

**Orientadoras**

**Professora Doutora Maria Augusta Neto**

**Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis</b> Professor Associado da Universidade de Coimbra
<b>Orientador</b>	<b>Professora Doutora Maria Augusta Neto</b> Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
<b>Vogais</b>	<b>Professora Doutora Ana Paula da Fonseca Piedade</b> Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, julho, 2021**



## Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado foi apenas possível graças a um conjunto de pessoas, às quais não posso deixar de agradecer todo o apoio tanto na elaboração desta dissertação como também ao longo de todo o meu percurso académico.

Às minhas orientadoras, Professora Doutora Maria Augusta Neto e Professora Doutora Ana Paula Amaro, que sem a ajuda delas a realização deste trabalho não teria sido possível. Deixo o meu agradecimento por todo o apoio, disponibilidade, compreensão e paciência ao longo destes meses.

À Professora Doutora Ana Paula Piedade, pela disponibilidade para esclarecer qualquer dúvida e por toda a ajuda prestada para a concretização deste trabalho.

Aos meus pais e irmão, por tudo o que fizeram por mim ao longo destes cinco anos, todo o apoio incondicional, motivação para continuar e lutar por aquilo que queria e compreensão nos momentos mais difíceis desta etapa. Gostaria de também agradecer ao resto da minha família, tia e avós, por sempre terem acreditado em mim e em qualquer circunstância.

Aos meus colegas de curso, que se tornaram grandes amigos, o meu eterno obrigado pelos momentos incríveis durante estes cinco anos e pela paciência, apoio e motivação durante os momentos menos bons. Levo-os comigo para a vida.

Às minhas amigas de toda a vida, Beatriz e Margarida, por terem estado sempre prontas a ajudar em qualquer situação, por todos os momentos que passámos juntas e por todos os que iremos ainda passar.



## Resumo

O objetivo desta dissertação é avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de duas estruturas poliméricas (estrutura A e estrutura B), desenvolvidas através de um programa numérico (VAMUCH) e que, segundo as simulações numéricas, conseguem assegurar um coeficiente de *Poisson* próximo do valor unitário. Assim, foi efetuada uma comparação do comportamento mecânico destas estruturas com os valores obtidos através das simulações numéricas.

Para este estudo foi necessário a escolha de dois materiais, de modo a entender se os resultados finais têm por base um comportamento padrão ou se depende unicamente de um dos materiais. Estes teriam de cumprir alguns requisitos base, para conseguirem ser impressos, tendo-se escolhido inicialmente o rPLA e o HIPS. Após esta escolha, foram feitas avaliações numéricas e experimentais para a confirmação de alguns parâmetros, nomeadamente o coeficiente de *Poisson*. Posteriormente, as estruturas A e B foram obtidas por impressão 3D, pela tecnologia *Fused Filament Fabrication* (FFF). O rPLA foi processado com as duas estruturas em estudo, contudo o HIPS foi apenas processado com a estrutura A. Posteriormente, foram realizados ensaios experimentais com solicitações axiais de tração e efetuando-se uma medição das deformações, por recurso a um sistema de correlação de imagem digital.

A análise dos resultados permitiu concluir que, apesar dos valores do coeficiente de *Poisson* irem de encontro aos obtidos através das simulações numéricas, não sucedeu o mesmo com a rigidez das estruturas, conduzindo a resultados contraditórios. Para além disso, através dos mesmos resultados foi possível concluir que as estruturas em rPLA apresentam maior rigidez e conduzem a coeficientes de *Poisson* mais próximos do valor unitário.

**Palavras-chave:** Coeficiente de *Poisson*, Rigidez, rPLA, HIPS, Ensaios de Tração





## Abstract

The main goal of this dissertation is to experimentally evaluate the mechanical behaviour of two polymeric structures (structure A and structure B), developed through a numeric program (VAMUCH) and which, according to the numerical simulations, can assure a Poisson's ratio close to the unit value. So, the objective of this work will be to compare the mechanical behaviour of these structures with the values obtained in the numerical simulations previously carried out.

For this study it was necessary to choose two materials, in order to understand if the final results are based on a standard behavior or if it depends solely on one of the materials. These would have to satisfy some basic requirements, having initially chosen the rPLA and HIPS. After this choice, numerical and experimental evaluations were made to confirm some parameters, namely the Poisson's ratio. After this, structures A and B were obtained by 3D printing, using the Fused Filament Fabrication (FFF) technology. The rPLA was processed with the two structures under study, however, the HIPS was only processed with structure A. Using the printed samples, tensile tests were carried out and the deformations were measured with the help of a system of digital image correlation.

The analysis of the results allowed us to conclude that, despite Poisson's ratio values were similar to the values obtained in the numerical simulations, the same did not happen with the stiffness of the structures, leading to contradictory results. Furthermore, through the same results it was possible to conclude that the rPLA structures have greater stiffness and lead to Poisson's ratio closer to the unit value.

**Keywords** Poisson's ratio, Stiffness, rPLA, HIPS, Tensile Tests



---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas e Acrónimos.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Estrutura da Dissertação .....	2
2. ENQUADRAMENTO .....	5
2.1. Fabricação Aditiva.....	5
2.2. <i>Fused Filament Fabrication</i> .....	7
2.2.1. Parâmetros do FFF .....	9
2.2.2. Materiais Termoplásticos mais utilizados no FFF.....	12
2.3. VAMUCH.....	16
2.4. Coeficiente de <i>Poisson</i> .....	16
2.5. Módulo de <i>Young</i> .....	17
2.6. Otimização da Estrutura.....	18
2.7. Sistema de Correlação de Imagem Vic-3D.....	21
2.7.1. Metodologia do Sistema de Correlação Vic-3D.....	22
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	29
3.1. Influência do material base no valor do coeficiente de <i>Poisson</i> e da rigidez das células unitárias das estruturas .....	29
3.2. Materiais .....	31
3.2.1. Impressora ( <i>FlashForge Creator 3</i> ) .....	32
3.3. Avaliação das propriedades mecânicas do rPLA e HIPS .....	33
3.3.1. Coeficiente de <i>Poisson</i> .....	34
3.3.2. Módulo de <i>Young</i> .....	35
3.3.3. Avaliação Numérica das Propriedades Mecânicas das células unitárias.....	38
3.4. Desenvolvimento CAD das estruturas .....	39
3.5. Impressão dos Materiais .....	40
3.6. Ensaio Mecânicos.....	42
4. RESULTADOS .....	47
4.1. Coeficiente de <i>Poisson</i> .....	47
4.2. Módulo de <i>Young</i> / rigidez.....	48
4.3. Análise dos Resultados .....	52
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	55
5.1. Conclusões .....	55
5.2. Sugestões .....	57

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
APÊNDICE A .....	63
APÊNDICE B .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Processos da Fabricação Aditiva [3].	6
Figura 2.2. Procedimento Geral da Fabricação Aditiva [4].	7
Figura 2.3. <i>Fused Filament Fabrication</i> (FFF) [9].	8
Figura 2.4. Esforços transversais às camadas de impressão (à esquerda) e Esforços axiais às camadas impressas (à direita) [11].	9
Figura 2.5. Representação esquemática da espessura das camadas: (a) Camadas finas; (b) Camadas grossas [11].	10
Figura 2.6. Representação do Air Gap positivo (à esquerda), nulo (ao centro) e negativo (à direita) [7].	12
Figura 2.7. Distribuição das fases de cada material pela célula unitária para um coeficiente de <i>Poisson</i> de 1: (a)Primeiro Design Inicial; (b)Primeira Solução ótima para quatro células unitárias [31].	20
Figura 2.8. Distribuição das fases de cada material pela célula unitária para um coeficiente de <i>Poisson</i> de 1: (a)Segundo Design Inicial; (b)Segunda Solução ótima para quatro células unitárias [31].	21
Figura 2.9. Sequência de Imagens digitais, onde está presente um <i>subset</i> [33].	22
Figura 2.10. Padrão de manchas para o uso da Vic-3D.	24
Figura 2.11. Montagem final do Vic-3D [33].	25
Figura 3.1. Células Unitárias: (a)Estrutura tipo A; (b)Estrutura tipo B.	29
Figura 3.2. Impressora <i>FlashForge Creator 3</i> , disponível no DEM/UC.	32
Figura 3.3. Equipamento <i>Shimadzu</i> , modelo <i>Autograph AGS -X</i> e Câmaras Vic-3D (esquerda e direita).	33
Figura 3.4. Curva tensão-deformação dos provetes em HIPS.	36
Figura 3.5. Curva tensão-deformação dos provetes em rPLA.	37
Figura 3.6. Dimensões das Amostras a serem impressas.	39
Figura 3.7. (a) Amostra com a estrutura tipo A; (b) Amostra com a estrutura tipo B.	40
Figura 3.8. Amostras antes e depois da limpeza: (a) rPLA_A antes da limpeza; (b) rPLA_A depois da limpeza; (c) rPLA_B antes da limpeza; (d) rPLA_B depois da limpeza.	42
Figura 3.9. Banca de Ensaios.	42
Figura 3.10. Amostras HIPS – Estrutura A (antes dos ensaios).	44
Figura 3.11. Amostras HIPS – Estrutura A (depois dos ensaios).	44

Figura 3.12. Amostras rPLA – Estrutura A.....	44
Figura 3.13. Amostras rPLA – Estrutura B.....	45
Figura 4.1. Curva tensão-deformação das Amostras HIPS_A.....	49
Figura 4.2. Curva tensão-deformação das Amostras rPLA_A.....	49
Figura 4.3. Curva tensão-deformação das Amostras rPLA_B.....	50
Figura B.1. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA_A1, para uma força de 40 N. .....	66
Figura B.2. Deformação segundo o eixo x da amostra rPLA_A1, para uma força de 80 N. .....	67
Figura B.3. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA_A1, para uma força de 80 N. .....	67
Figura B.4. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA_A2, para uma força de 40 N. .....	68
Figura B.5. Deformação segundo o eixo x da amostra rPLA_A2, para uma força de 80 N. .....	68
Figura B.6. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA_A2, para uma força de 80 N. .....	69
Figura B.7. Deformação segundo o eixo x da amostra rPLA_A4, para uma força de 80 N. .....	69
Figura B.8. Deformação segundo o eixo x e y da amostra rPLA_B1, para uma força de 40 N.....	70
Figura B.9. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA_B1, para uma força de 80 N. .....	71
Figura B.10. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA_B3, para uma força de 40 N. .....	71
Figura B.11. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA_B3, para uma força de 80 N. .....	72

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Processos da Fabricação Aditiva segundo a norma ISO/ASTM 52900[2].	6
Tabela 2.2. Materiais e modos de impressão [13].	15
Tabela 2.3. Propriedades dos materiais presentes em cada fase da estrutura [31].	20
Tabela 3.1. Estimativa do coeficiente de <i>Poisson</i> e rigidez da célula unitária para as estruturas A e B.	30
Tabela 3.2. Coeficiente de <i>Poisson</i> do HIPS.	35
Tabela 3.3. Coeficiente de <i>Poisson</i> do rPLA.	35
Tabela 3.4. Módulo de <i>Young</i> do HIPS.	36
Tabela 3.5. Módulo de <i>Young</i> do rPLA.	37
Tabela 3.6. Módulo de <i>Young</i> dos materiais selecionados.	37
Tabela 3.7. Coeficiente de <i>Poisson</i> e módulo de <i>Young</i> dos materiais em estudo.	38
Tabela 3.8. Coeficiente de <i>Poisson</i> e rigidez da célula unitária para a Estrutura A e B.	38
Tabela 3.9. Parâmetros da Impressão das Amostras.	41
Tabela 4.1. Coeficiente de <i>Poisson</i> das Amostras de cada material e estrutura.	48
Tabela 4.2. Coeficiente de <i>Poisson</i> das Amostras.	48
Tabela 4.3. Módulo de <i>Young</i> das Amostras de cada material e estrutura, em MPa.	51
Tabela 4.4. Módulo de <i>Young</i> das Amostras.	51
Tabela 4.5. Tabela Comparativa.	52
Tabela 4.6. Variação percentual dos resultados em relação aos valores do artigo e do procedimento teórico.	53
Tabela A.1. Deformações dos provetes impressos em HIPS.	63
Tabela A.2. Deformações dos provetes impressos em rPLA.	64
Tabela B.1. Deformações das amostras impressas em HIPS com a estrutura tipo A.	66
Tabela B.2. Deformações das amostras impressas em rPLA com a estrutura tipo A.	70
Tabela B.3. Deformações das amostras impressas em rPLA com a estrutura tipo B.	72





---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

- $a$  – Fração de volume da fase A na mistura dos materiais
- $A_i$  – Área transversal inicial
- $\bar{D}_p$  – Relação/ Matriz constitutiva 2D VAMUCH
- $E$  – Módulo de *Young*/ módulo de elasticidade longitudinal
- $E^A, E^B$  – Módulo de *Young* de cada fase constituinte
- $F$  – Força aplicada à tração
- $L_i$  – Distância entre as amarras inicial/ *spam*
- $R^2$  – Coeficiente de correlação
- $s$  – Fator que permite penalizar as propriedades intermédias
- $\Delta L$  – Alongamento
- $\varepsilon$  – Deformação local
- $\varepsilon_{transversal}$  – Deformação transversal
- $\varepsilon_{longitudinal}$  – Deformação longitudinal
- $\sigma$  – Tensão nominal aplicada à tração
- $\nu$  – Coeficiente de *Poisson*
- $\nu^A, \nu^B$  – Coeficiente de *Poisson* de cada fase constituinte

### Siglas e Acrónimos

- ABS – *Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymers*
- AM – *Additive Manufacturing*
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- c.u. – Célula Unitária
- FA – Fabricação Aditiva
- FDM ® – *Fused Deposition Modeling*

FFF – *Fused Filament Fabrication*

PLA – *Polylactic Acid*

rPLA – *Recycled Polylactic Acid*

STL – *Standard Triangle Language*

TPU – *Thermoplastic polyurethane*

CAD – *Computer Aided Design*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

CID – Correlação de Imagem digital

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

HIPS – *High Impact Polystyrene*

ISO – *International Organization for Standardization*

VAMUCH – *Variational Asymptotic Method for Unit Cell Homogenization*

## 1. INTRODUÇÃO

A criação de novos materiais com propriedades mecânicas previamente definidas é um tema de grande interesse para a maioria das indústrias nos dias de hoje. A generalidade destes desenvolvimentos baseia-se em simulações envolvendo conceitos de micromecânica e de otimização. Contudo, apesar das simulações numéricas apresentarem valores interessantes para estes novos materiais, é necessário compreender se na prática esses valores são igualmente atingíveis.

Na presente dissertação foi estudado o comportamento mecânico de duas estruturas poliméricas com geometrias relativamente complexas. O comportamento destas estruturas foi previamente definido através de simulações numéricas utilizando um programa que envolve a utilização de elementos finitos e a análise assintótica. A utilização deste *software* permitiu redistribuir a colocação de material numa célula unitária para garantir que o coeficiente de *Poisson*, no caso limite, tenderá para o valor unitário, não o podendo ultrapassar.

As duas estruturas em estudo foram processadas por impressão 3D utilizando a tecnologia *Fused Filament Fabrication* (FFF). O FFF é cada vez mais usado nos dias de hoje devido à sua simplicidade, baixo custo, elevada velocidade de impressão, entre muitas outras vantagens. Com esta tecnologia, um filamento de material vai ser extrudido e depositado numa plataforma ou para o topo de camadas impressas anteriormente [1].

Deste modo, foram criadas duas novas estruturas poliméricas, tendo como objetivo: conseguirem aliar duas propriedades mecânicas importantes, ou seja, uma boa rigidez e um coeficiente de *Poisson* próximo de 1.

Assim, a presente dissertação apresenta o estudo do comportamento mecânico das duas estruturas em análise, de modo a verificar experimentalmente os resultados numéricos.

## 1.1. Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é conceber e testar componentes com estruturas novas, tendo estes um comportamento mecânico específico.

Os componentes foram desenvolvidos numericamente utilizando um procedimento de otimização que inclui o programa VAMUCH, o qual permite avaliar as propriedades mecânicas de diversas estruturas com um comportamento previamente definido pelo utilizador.

De uma forma mais específica, com este estudo pretende-se:

- Avaliar a influência da alteração do material base no comportamento mecânico de duas estruturas distintas;
- Selecionar dois materiais que tenham propriedades mecânicas semelhantes às utilizadas na simulação numérica, tendo de seguida de se proceder ao estudo das propriedades desses materiais de modo a confirmar a sua escolha;
- Avaliar o comportamento mecânico das estruturas que foram impressas com os materiais selecionados, mais concretamente, os campos de deslocamento e de deformação. Estas propriedades serão avaliadas durante os ensaios de tração, utilizando, simultaneamente, correlação de imagem digital;
- Comparar os valores obtidos experimentalmente com os valores previstos através das simulações numéricas.

## 1.2. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. De seguida é apresentada uma breve descrição do conteúdo presente em cada um deles.

- O Capítulo 1, “Introdução”, aborda o tema a desenvolver bem como os objetivos do presente estudo;
- O Capítulo 2, “Enquadramento”, apresenta não só um breve contexto dos assuntos abordados no presente trabalho, como também expõe o artigo que serviu de base para este estudo, onde se encontram os valores obtidos

numericamente. Assim, primeiramente fez-se um breve enquadramento sobre a fabricação aditiva e sobre o processo que foi usado neste trabalho. Seguidamente foi apresentado o programa usado para se identificarem as propriedades das estruturas em estudo (VAMUCH), e abordadas as duas propriedades das estruturas alvo de estudo. Por fim, foi exposto o artigo base e o sistema de correlação de imagem Vic-3D;

- O Capítulo 3, “Procedimento Experimental”, apresenta uma descrição de todos os passos realizados, desde a escolha dos materiais para as estruturas até aos resultados finais dos ensaios experimentais;
- O Capítulo 4, “Resultados”, apresenta e analisa os resultados, fazendo também uma breve comparação destes com os valores presentes no artigo base, e com os valores obtidos numericamente para os dois materiais em estudo;
- O Capítulo 5, “Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros”, aborda as principais conclusões a que se chegaram com este estudo, bem como algumas sugestões para possíveis melhorias e/ou trabalhos futuros de modo a aprofundar melhor este tema.



## 2. ENQUADRAMENTO

Neste capítulo, de acordo com o referido no ponto 1.2, é feito um breve enquadramento sobre os conceitos e conteúdos deste trabalho.

Primeiramente, aborda-se o tópico da fabricação aditiva, focando-se de seguida na técnica usada neste estudo para a obtenção das amostras. Após este breve contexto, é apresentado o modelo usado (VAMUCH) para o conhecimento das propriedades das estruturas do presente trabalho e expõem-se essas propriedades, fazendo-se uma breve referência ao procedimento utilizado para a sua obtenção. De seguida, é apresentado o artigo que serve de base ao presente estudo e, por fim, o sistema de correlação de imagem.

### 2.1. Fabricação Aditiva

Segundo a norma ISO/ASTM 52900, a fabricação aditiva (FA), ou em inglês *Additive Manufacturing* (AM), é um “*processo de união de materiais de modo a produzir objetos a partir de um modelo 3D em CAD, geralmente, através da deposição de camadas sobre camadas, ao contrário do que ocorre nas metodologias de fabricação subtrativa*”. Esta norma ainda sugere alguns sinónimos para a fabricação aditiva, tais como, processos aditivos, técnicas aditivas, fabricação aditiva por camadas, fabricação por camadas e fabricação de forma livre [2].

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900, a fabricação aditiva é constituída por 7 processos: *Binder Jetting; Directed Energy Deposition; Material Extrusion; Material Jetting; Powder Bed Fusion; Sheet Lamination; e Vat Photopolymerization* [2]. Na Tabela 2.1 encontram-se descritos esses processos e na Figura 2.1 os mesmos estão ilustrados, para uma melhor compreensão.

Tabela 2.1. Processos da Fabricação Aditiva segundo a norma ISO/ASTM 52900[2].

Processo	Descrição
<i>Binder Jetting</i>	Processo de fabricação aditiva em que um agente ligante será depositado, criando um objeto a partir de uma camada de pós.
<i>Directed Energy Deposition</i>	Processo de fabricação aditiva em que é usada energia térmica concentrada de modo a fundir material à medida que este é depositado.
<i>Material Extrusion</i>	Processo de fabricação aditiva em que o material é depositado seletivamente através de um <i>nozzle</i> ou de um orifício.
<i>Material Jetting</i>	Processo de fabricação aditiva em que gotículas de material são seletivamente depositadas.
<i>Powder Bed Fusion</i>	Processo de fabricação aditiva em que a energia térmica irá fundir seletivamente regiões de uma camada de pós.
<i>Sheet Lamination</i>	Processo de fabricação aditiva em que folhas de um material são unidas de forma a criar um objeto.
<i>Vat Photopolymerization</i>	Processo de fabricação aditiva em que uma resina foto-polímera líquida é curada através da exposição seletiva por luz.

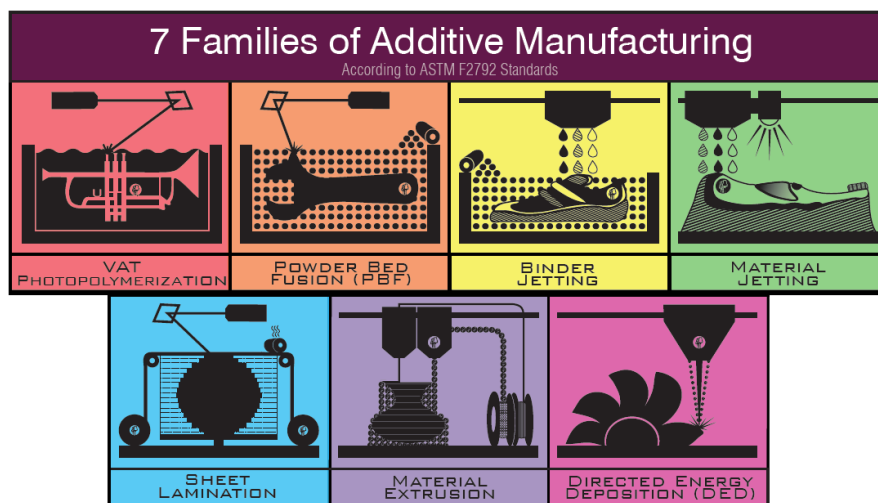


Figura 2.1. Processos da Fabricação Aditiva [3].

O procedimento geral para a obtenção de peças por fabricação aditiva encontra-se representado na Figura 2.2. É de salientar que grande parte deste procedimento apenas é possível com recurso a meios informáticos, em especial, com recurso a *softwares* CAD



(*Computer Aided Design*). Estes *softwares* são ferramentas de desenho 3D, capazes de criar peças ou montagens, conseguindo especificar inúmeros parâmetros como material, dimensões, tolerâncias, bem como também fazer simulações. O formato de arquivo dos ficheiros para os modelos 3D é normalmente o STL (extensão: “.stl”), existindo, no entanto, outros formatos possíveis.

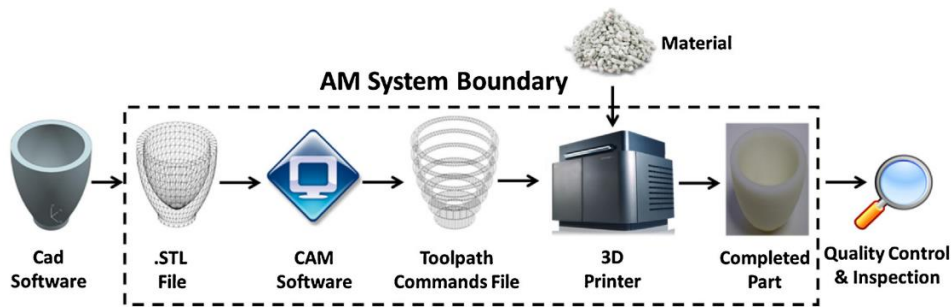


Figura 2.2. Procedimento Geral da Fabricação Aditiva [4].

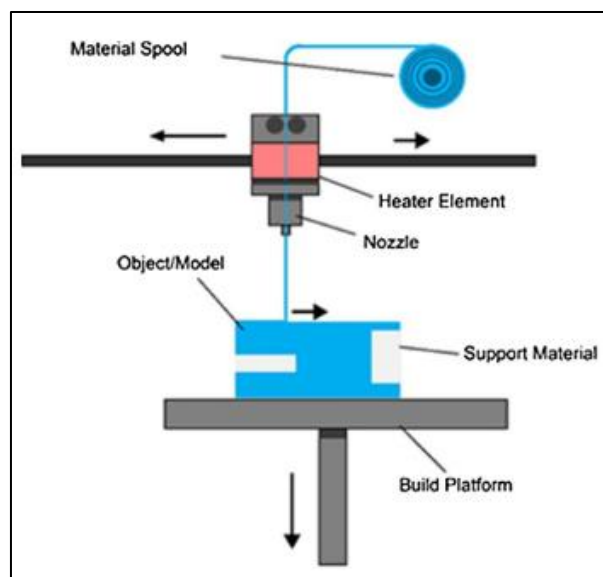
Na Figura 2.2, salienta-se, mais uma vez, que todo o procedimento de fabricação aditiva inicia com a utilização de um *software* CAD, do qual será retirado um ficheiro, normalmente, em STL. Antes da impressão dos materiais, será necessário proceder à escolha de alguns parâmetros de impressão importantes. Posteriormente, será então possível efetuar-se o processamento, obtendo-se, assim, uma peça que terá de ser alvo de inspeção para controle de qualidade, de forma a assegurar o bom estado da mesma.

## 2.2. Fused Filament Fabrication

Em 1989, *Scott Crump* inventou e patenteou a técnica *Fused Deposition Modeling* (FDM®), tendo sido criada, pouco tempo depois, a primeira impressora 3D FDM®, pela companhia *Stratasys*. Devido ao nome FDM® ser uma marca registada foi então criado o termo equivalente, ou seja, *Fused Filament Fabrication* (FFF). Nas últimas duas décadas, FFF tem sido a tecnologia mais usada na Fabricação aditiva em todo o mundo [5].

Apesar desta tecnologia já existir há bastantes anos, o interesse nesta continua a aumentar, tanto para uso industrial, como escolar, ou mesmo para uso pessoal. Este crescente interesse deve-se à expiração das patentes iniciais das impressoras em 2009, possibilitando, assim, a produção destas por qualquer empresa, conseguindo-se ter acesso agora a uma impressora a preços bastante mais acessíveis [6].

A tecnologia mais conhecida de impressão 3D é, como dito anteriormente, o FFF, sendo esta a usada para imprimir as estruturas poliméricas deste projeto. Nesta tecnologia, representada na Figura 2.3, um filamento contínuo é aquecido até atingir uma viscosidade adequada. Após este aquecimento é, então, extrudido de forma controlada para uma plataforma, ou para o topo de camadas já previamente impressas [1]. No final de cada camada, dependendo da impressora, a cabeça de extrusão pode subir no eixo vertical até à altura da camada seguinte ou, noutros casos, a plataforma desce no eixo vertical. Em algumas impressoras existe ainda a opção de a câmara de fabrico ser aquecida, ou ainda a plataforma aquecida [7]. A câmara de fabrico aquecida pode ser importante na impressão de alguns materiais, visto que devido às suas propriedades necessitam de arrefecer de forma mais controlada, de modo a não deformarem. A plataforma aquecida ajudará no aquecimento da primeira camada, garantindo que esta tenha uma maior adesão, não ocorrendo, deste modo, movimentação da peça aquando a impressão [8].



**Figura 2.3.** Fused Filament Fabrication (FFF) [9].

A termoplasticidade do filamento, no caso dos polímeros, é uma propriedade importante que deverá ser tida em conta, visto ser necessário que este aqueça até atingir a viscosidade adequada e consiga solidificar à temperatura ambiente após a impressão [1].

A tecnologia FFF apresenta bastantes vantagens, tais como: ter um baixo custo; alta velocidade de produção; ser uma tecnologia relativamente simples; e ter uma vasta gama de materiais possíveis de serem impressos (Termoplásticos, Metais, Cerâmicos, entre outros) [1]. Para além disso, é uma tecnologia que evita o desperdício, gerando-se, portanto, pouco lixo.

Para a indústria é uma tecnologia com um número significativo de vantagens, permitindo a personalização em massa de peças a baixo custo e a modificação de algum aspeto de última hora sem perdas monetárias. Adicionalmente, permite ainda a redução de stocks e dos custos associados ao transporte das peças, visto que remotamente, e de forma rápida, se conseguem obter as peças necessárias.

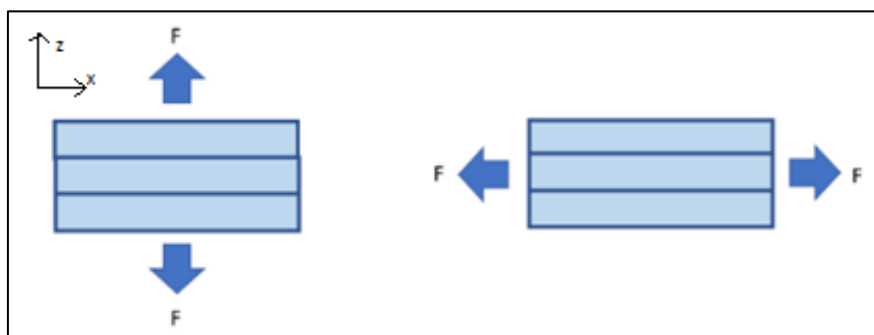
Por outro lado, tem algumas desvantagens, tais como: obterem-se materiais com propriedades mecânicas inferiores, comparativamente a outros processos de fabrico; e a baixa qualidade do acabamento superficial [1].

### 2.2.1. Parâmetros do FFF

Na tecnologia FFF, existem inúmeros parâmetros que influenciam as propriedades finais do produto. Assim, nos subcapítulos seguintes, dar-se-á foco apenas a alguns, sendo estes: orientação de construção; espessura da camada; temperatura de extrusão; velocidade de impressão; ângulo de enchimento; largura do filamento; e o *air gap* do enchimento.

#### 2.2.1.1. Orientação de Construção

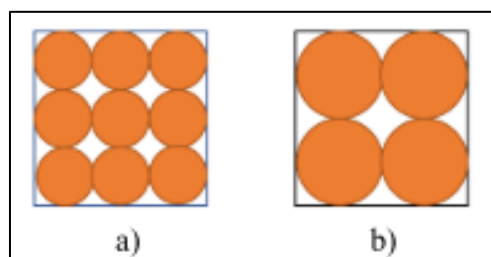
A orientação de construção é a orientação da peça em relação ao sistema de eixos Oxyz da plataforma de construção, sendo o eixo z a direção de construção da peça [10]. Este fator é bastante importante para a resistência final que a peça terá aos esforços aplicados. Assim, se estes forem aplicados transversalmente, Figura 2.4 à esquerda, a resistência da peça será relativamente baixa, pois a peça terá tendência para se separar na interface das camadas. Contudo, se o esforço exterior for aplicado axialmente, Figura 2.4 à direita, a resistência da peça será muito superior, pois os filamentos do material depositado irão resistir melhor aos esforços de tração [11].



**Figura 2.4.** Esforços transversais às camadas de impressão (à esquerda) e Esforços axiais às camadas impressas (à direita) [11].

### 2.2.1.1. Espessura da Camada

Embora não existam limites para a espessura das diferentes camadas, vários fabricantes recomendam que a altura da camada não ultrapasse 80% do diâmetro do *nozzle* de extrusão. As camadas mais finas, Figura 2.5 (a), têm menor resistência à tração e menor área de ligação com as outras camadas, enquanto que as camadas mais grossas, Figura 2.5 (b), embora possuam maior resistência, conduzem a maior área oca entre elas. Assim, deverá existir um compromisso entre estes dois extremos de modo a maximizar a resistência mecânica [11].



**Figura 2.5.** Representação esquemática da espessura das camadas: (a) Camadas finas; (b) Camadas grossas [11].

Sood *et al.* (2009) [10] estudaram a influência de cinco parâmetros de impressão nas propriedades finais. Para analisarem a influência da espessura da camada, foram alterando o *nozzle* de modo a obter diferentes valores. Com este estudo concluíram que a resistência à tração começa por diminuir com o aumento da espessura da camada e, a partir de um certo ponto, começa a aumentar. Isto ocorre, pois, com o aumento da espessura de cada camada, o número de camadas diminui, visto que a espessura de cada camada está diretamente relacionada com o número total de camadas. Assim, irá diminuir o número de interfaces entre as camadas e, conseqüentemente, diminui o acumular de tensões. Deste modo, a resistência do material irá aumentar [10].

### 2.2.1.2. Temperatura de Extrusão

A temperatura de extrusão do material deve ser ligeiramente acima do ponto em que atinge a viscosidade adequada. Se a temperatura for demasiado baixa, a impressão será dificultada pela viscosidade elevada do material. Por outro lado, se a temperatura de impressão for demasiado elevada pode levar à degradação do material, podendo ocorrer entupimento da cabeça extrusora [11].

### 2.2.1.3. Velocidade de Impressão

Para aumentar a velocidade de impressão é necessário um aumento da velocidade de extrusão, reduzindo assim o tempo disponível para a transferência de calor na cabeça extrusora. Assim, é normal aumentar ligeiramente a temperatura de extrusão (5 – 10°C) para que a condução de calor tenha tempo de ocorrer. Contudo, maiores velocidades irão conduzir a maiores imperfeições, podendo levar a uma diminuição da resistência da peça final [11]. As velocidades de impressão das peças dependerão, deste modo, do material escolhido, das dimensões do objeto, da impressora, entre outros.

### 2.2.1.4. Ângulo de Enchimento (*Raster Angle*)

O ângulo de enchimento corresponde ao ângulo do fio depositado em relação ao plano da mesa de construção. Sood *et al.* (2009) [10] concluíram que o aumento do ângulo de enchimento resulta em cordões menos compridos. Assim, a probabilidade de ocorrerem distorções irá diminuir, aumentando a resistência à tração do material [10].

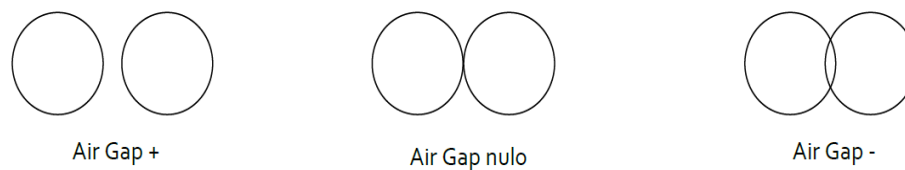
### 2.2.1.5. Largura do Filamento (*Raster Width*)

Segundo Ahn *et al.* (2002) [12], menores larguras do filamento permitem melhorar a qualidade superficial, mas irá aumentar o tempo de construção [7][12].

Sood *et al.* (2009) [10] defendem que uma largura do filamento maior resulta em uma acumulação de tensões ao longo do filamento, podendo diminuir a resistência mecânica deste. Deste modo, é preferível ter uma largura do filamento maior. Assim, irá aumentar o período de tempo a que este estará sujeito a temperaturas elevadas e, quando a camada seguinte for depositada, a difusão do material será mais eficiente, resultando em ligações mais fortes [7][10].

### 2.2.1.6. *Air Gap* do Enchimento

O *air gap* do enchimento é o espaço entre dois fios adjacentes depositados na mesma camada [10]. Na Figura 2.6 encontram-se os valores possíveis para o *air gap*. O seu valor é nulo quando os dois fios adjacentes apenas se tocam, é positivo quando não se tocam (estrutura muito pouco compacta, mas que se constrói rapidamente) e é negativo quando ocupam parcialmente o mesmo espaço (estrutura bastante densa, necessitando para isso de mais tempo de construção) [12].



**Figura 2.6.** Representação do Air Gap positivo (à esquerda), nulo (ao centro) e negativo (à direita) [7].

Segundo Ahn *et al.* (2002) [12], o ideal é ter um *air gap* negativo, de modo a aumentar a resistência mecânica e a rigidez da estrutura. Contudo, não é recomendável ter *Air Gaps* inferiores a  $-0,0762\text{ mm}$ , visto que poderá existir o risco de se ter excesso de material e se obter uma má qualidade superficial, bem como piores tolerâncias dimensionais. Um *air gap* negativo melhora a difusão entre os cordões, promovendo uma ligação mais forte e torna a peça mais densa, preenchendo, portanto, os espaços vazios entre os cordões [7][12].

### 2.2.2. Materiais Termoplásticos mais utilizados no FFF

A gama de materiais termoplásticos possíveis de serem impressos tem vindo a aumentar significativamente, sendo os mais populares o ABS (Copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno), o PLA (Poli(ácido láctico)), o PC (Policarbonato) e a PA (Poliamida) [5]. Para além dos referidos anteriormente, o HIPS (Poliestireno de elevado impacto), o TPU (Poliuretana Termoplástica), o PMMA (Poli(metil-acrilato)), entre outros, têm também bastante popularidade na impressão 3D, com a tecnologia FFF [13].

#### 2.2.2.1. ABS

O ABS é um dos materiais mais antigos na história da impressão 3D, tendo sido um dos primeiros polímeros a ser usado. Mesmo assim, nos dias de hoje continua a ser um dos materiais mais escolhidos devido ao seu baixo custo aliado a boas propriedades mecânicas [13].

Este material, tal como o nome indica, é composto por três polímeros: Acrilonitrilo, Butadieno e Estireno. O Acrilonitrilo é responsável pela resistência química, durabilidade, dureza, brilho e rigidez. O Butadieno fornece a ductilidade a baixas temperaturas, flexibilidade e boa resistência à fusão. Por fim, o Estireno é responsável pelo bom processamento, pelo brilho e pela dureza [14].

Assim, pode-se concluir que o ABS é uma boa opção para a impressão por FFF devido às suas excelentes propriedades mecânicas, boa estabilidade térmica e química e bom

processamento [15]. Contudo, o seu maior problema é não ser biodegradável, sendo uma grande desvantagem nos dias de hoje, tendo em conta que a indústria está a mover-se cada vez mais para o uso de materiais renováveis [16]. Para além dos aspetos referidos anteriormente sobre a impressão do ABS, deve, ainda, ter-se em consideração que após impressão este material tende a contrair à medida que arrefece, sendo, por isso, necessário utilizar uma tolerância nas dimensões, de modo que, após o seu processamento, se obtenham as dimensões requeridas [13].

As suas aplicações mais comuns incluem: brinquedos; telefones; capacetes de segurança; peças de automóveis; componentes de aparelhos (por exemplo, aspiradores de pó); entre muitas outras aplicações [14].

#### **2.2.2.2. PLA**

O PLA, tal como o ABS, é um dos materiais mais escolhidos para a impressão 3D. Esta escolha deve-se ao facto de a sua impressão poder ocorrer a baixas temperaturas e, conseqüentemente, não ser necessário ter plataformas de impressão aquecidas. Para além disso, o PLA é um bom material para quem está a iniciar no processo de aprendizagem de impressão 3D, visto ser um material fácil de imprimir e de baixo custo [13].

Aliado aos fatores anteriormente referidos, o PLA é um dos materiais mais amigos do ambiente que existe no mercado, pois é renovável e biodegradável [13]. Quando o PLA é reciclado, a designação usual passa a rPLA. O PLA é um termoplástico derivado de produtos agrícolas (milho e/ou cana-de-açúcar), tendo diversas propriedades interessantes como: a sua biocompatibilidade; boa resistência; rigidez e; termoplasticidade [17].

A grande desvantagem deste material é a sua baixa resistência ao impacto e a baixa resistência ao meio ambiente, visto que as peças ficam deformadas quando sujeitas a temperaturas elevadas durante o seu transporte ou utilização, ou mesmo quando deixadas expostas à luz solar direta [7][17].

As aplicações do PLA são diversas, tendo sido mais recentemente alvo de estudo para servir para produzir embalagens. Para além disso, tem sido também utilizado para aplicações biomédicas, incluindo parafusos de compressão óssea, suturas (pontos cirúrgicos) e na engenharia de tecidos [17].

#### **2.2.2.3. HIPS**

O HIPS é um polímero desenvolvido como uma alternativa dúctil ao poliestireno de uso geral (material frágil e rígido). Assim, o HIPS é um material: de baixo custo;

relativamente leve; flexível; fácil de fabricar; e fácil de maquinar [18][19]. Este material tem uma baixa resistência à tração, contudo tem uma elevada resistência ao impacto [20].

O HIPS é usado normalmente em pré-produção de protótipos, devido à sua estabilidade dimensional, fácil fabricação, e por ter a possibilidade de ser pintado e colado [20]. Este material é muitas vezes usado como suporte de estruturas em ABS, visto ser solúvel numa substância chamada *d-Limonene*, não existindo, assim, quaisquer marcas causadas pela sua remoção posterior [13].

Para além das aplicações anteriormente referidas, o HIPS é ainda usado como material para: embalagens (aprovado pela FDA – *Food and Drug Administration*); brinquedos; garrafas; utensílios domésticos; aparelhos eletrónicos; e em componente industriais em aplicações leves. Deste modo, devido às suas inúmeras aplicações, têm sido desenvolvidos métodos de forma a reciclar e reutilizar este material [19].

#### **2.2.2.4. TPU**

O TPU é um tipo de filamento flexível da família dos TPE (elastómeros termoplásticos), sendo o mais comum desta família na impressão 3D, pela tecnologia FFF. Este material tem uma excelente resistência ao desgaste e ao rasgo, tem alta resistência ao impacto e tem uma dureza elevada. Para além disso, o TPU tem uma boa resistência à corrosão para os produtos químicos e óleos mais comuns na indústria [21].

As aplicações deste material são incontáveis, estando presente em inúmeros mercados, sendo essencialmente usado em situações em que seja necessária uma flexibilidade elevada [21]. Para alguns casos do TPU, que apresentam biocompatibilidade, este pode ser usado em inúmeras situações na área da medicina, tais como: próteses; implantes; vasos sanguíneos artificiais; entre outros [22].

#### **2.2.2.5. PA**

PA é um material bastante popular na indústria dos polímeros. Algumas das principais características deste material são ser particularmente resistente, flexível e versátil para a impressão 3D. É ainda caracterizado por ter uma viscosidade baixa e uma temperatura de fusão alta. Para além disso, PA tem uma alta resistência ao impacto e uma boa resistência à abrasão [13][23].

Uma desvantagem da PA é ser um material que absorve bastante humidade, originando alguns problemas de qualidade durante a impressão, caso este já a tenha absorvido.



Deste modo, deve ter-se bastante cuidado na forma de armazenamento deste material, devendo optar-se por recipiente herméticos [13].

Existem vários tipos de PA, sendo os mais conhecidos o Nylon® 6 e o Nylon® 12. O Nylon® 6 pode ser usado como uma alternativa ao ABS e, conseqüentemente, tem uma variedade de aplicações na impressão 3D [1]. Possui uma excelente resistência e rigidez, tendo uma boa resistência ao impacto. Este material é uma boa escolha para ser usado em ferramentas que têm de lidar com os rigores de um ambiente de produção. O Nylon® 12 tem excelentes propriedades à fadiga, boa resistência química e ao impacto, sendo uma boa escolha para componentes sujeitos a alta vibração [24].

PA tem diversas aplicações como: ferramentas de produção personalizadas; encaixes na indústria automóvel e aeroespacial; engrenagens de plástico; parafusos; porcas; etc. [21][24];

#### 2.2.2.6. Materiais e os seus modos de impressão

Na Tabela 2.2 encontram-se alguns aspetos a ter-se em conta na impressão dos materiais referidos anteriormente, podendo algumas características alterar ligeiramente de fornecedor para fornecedor. É de salientar que consoante a impressora a usar poderão existir materiais que não serão possíveis de imprimir.

**Tabela 2.2.** Materiais e modos de impressão [13].

<b>Materiais</b>	<b>Temperatura cabeça de extrusão</b>	<b>Plataforma Aquecida</b>	<b>Ventilação</b>	<b>Câmara Aquecida</b>
<b>ABS</b>	220 – 250 °C	Obrigatório 95 – 110 °C	Recomendável (liberta odor)	Obrigatório caso a plataforma não seja aquecida
<b>PLA</b>	190 – 220 °C	Opcional 45 – 60 °C	Obrigatório	Opcional
<b>HIPS</b>	230 – 245 °C	Obrigatório 100 – 115 °C	Recomendável	Recomendável
<b>TPU</b>	225 – 245 °C	Opcional 45 – 60 °C	Obrigatório	Opcional
<b>PA</b>	225 – 265 °C	Obrigatório 70 – 90 °C	Opcional	Opcional

### 2.3. VAMUCH

VAMUCH (*Variational Asymptotic Method for Unit Cell Homogenization*) é um programa que implementa várias formulações da micromecânica, sendo capaz de analisar de forma eficiente e com precisão materiais heterogêneos. Este programa faz uma análise assintótica às estruturas, homogeneizando: compostos binários (células unitárias 1D), compósitos reforçados com fibra (células unitárias 2D), ou compósitos reforçados com partículas (células unitárias 3D) [25].

A base metodológica deste programa assenta em dois pressupostos básicos: (1) as soluções exatas das variáveis do problema têm médias de volume na célula unitária; 2) as propriedades efetivas do material obtidas pela análise micromecânica da célula unitária são independentes da geometria, das condições da fronteira, e das condições de carregamento da estrutura macroscópica. Isto significa que as propriedades efetivas do material consideradas propriedades intrínsecas do material quando vistas macroscopicamente [25].

O VAMUCH calcula, portanto, as propriedades efetivas a partir da discretização em elementos finitos da célula unitária, incluindo a geometria e os detalhes de cada elemento. Estas propriedades são importantes de modo a ser possível prever o comportamento global de qualquer estrutura [26].

Este programa foi o usado no presente estudo, de modo a prever as propriedades das estruturas poliméricas a analisar, procedendo-se depois a uma confirmação, ou não, desses valores experimentalmente.

### 2.4. Coeficiente de *Poisson*

O coeficiente de *Poisson* é definido como a razão entre a deformação transversal ( $\epsilon_{transversal}$ ) e a deformação longitudinal ( $\epsilon_{longitudinal}$ ). Este parâmetro vai depender essencialmente do material, da sua rigidez, da sua forma, entre outros [27].

$$\nu = - \frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{longitudinal}} \quad (2.1)$$

Para a maioria dos materiais, o coeficiente de *Poisson* assume valores positivos, querendo isto dizer que ao ser aplicada uma solitação axial em tração, a dimensão da secção transversal do componente irá diminuir. Todavia, alguns materiais podem apresentar um valor

negativo para o coeficiente de *Poisson*, sendo assim designados de materiais auxéticos. Para estes materiais, ao ser aplicada uma solicitação axial em tração, as dimensões da secção transversal irão aumentar [28].

Quando o valor do coeficiente de *Poisson* de um material é igual a 1, em 2D (1/2 em 3D), este denomina-se de incompressível, visto que o seu volume não será alterado. Valor nulo do coeficiente de *Poisson* significa que aplicando uma força numa direção, o material vai sofrer variações de comprimento, mas as dimensões da secção transversal manter-se-ão inalteradas [27].

Neste estudo será necessário determinar o coeficiente de *Poisson* dos materiais escolhidos para as estruturas através de ensaios experimentais. Para isso será necessário aplicar solicitações axiais em tração ao material e, ao mesmo tempo, avaliar o valor do deslocamento, ou da deformação, dos provetes. Os equipamentos mais comuns neste tipo de ensaios são os extensómetros, sendo que no presente estudo será usado um extensómetro ótico, mais propriamente, o sistema de correlação de imagem Vic-3D.

## 2.5. Módulo de *Young*

Módulo de *Young* ou módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ) é uma grandeza proporcional à rigidez de um material [29].

No presente estudo também será necessário avaliar o valor deste parâmetro, sendo para isso usada a lei de *Hooke* (Equação (2.2)), considerando que os materiais são isotrópicos e apresentam um comportamento linear. Esta lei exprime a dependência linear entre as componentes do estado de tensão e do estado de deformação de um qualquer ponto do corpo [29].

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.2)$$

onde  $\sigma$  corresponde à tensão aplicada e  $\varepsilon$  corresponde à deformação do material.

Assim, para a determinação do  $E$  é usual realizar ensaios experimentais aplicando solicitações axiais de tração a um provete produzido com o material que se pretende avaliar. Após este passo, será possível ter acesso ao valor da força aplicada ( $F$ ) e do alongamento ( $\Delta L$ ) em função do tempo. Fazendo uma análise dos dados obtidos será possível avaliar o valor da tensão aplicada (Equação (2.3)) e da deformação (Equação (2.4)) e, por conseguinte, o valor do módulo de *Young* [30].

$$\sigma = \frac{F}{A_i} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i} \quad (2.4)$$

onde  $A_i$  corresponde ao valor da área transversal inicial e  $L_i$  corresponde ao valor da distância inicial entre amarras.

## 2.6. Otimização da Estrutura

As estruturas a serem analisadas no presente estudo foram desenvolvidas no artigo Neto *et al.* (2010) [31]. Estas serão apresentadas nesta Subsecção, fazendo-se um breve resumo relativamente ao modo como foram obtidas e às suas propriedades, mais concretamente, valor do coeficiente de *Poisson* e rigidez.

Neto *et al.* (2010) [31], a fim de encontrarem a estrutura mais adequada, começaram por fazer uma otimização topológica utilizando uma célula unitária, ou seja, descobrir a distribuição de material na célula unitária 2D. Deste modo, não limitaram a distribuição do material da estrutura a um certo padrão e encontraram as estruturas mais adequadas. O procedimento consistiu em considerar uma distribuição de dois materiais dentro da célula unitária. Assim, as propriedades mecânicas de cada elemento finito são atribuídas a partir de uma mistura de dois materiais disponíveis: uma fase sólida linear elástica (A) e o vazio (B) [31].

O trabalho de Neto *et al.* [31] baseou-se no procedimento proposto por Fujii *et al.* (2001) [32]. Assim, com o objetivo de determinar o módulo de *Young* e o coeficiente de *Poisson* da célula unitária, Fujii *et al.* [32] propuseram uma regra de mistura com três fases (A, B e C). Contudo, esta regra também pode ser aplicada a células unitárias com duas fases apenas (A e B). Nesta abordagem, o material sólido e o vazio são misturados artificialmente e é assumido que são isotrópicos e têm propriedades elásticas lineares [32].

- **Módulo de Young, E**

Considere-se o caso em especial que contém duas fases: a fase A e a fase B, e em que as duas fases possíveis são uma fase sólida linear elástica (A) e o vazio (B), sendo que  $E^B \leq E^A$ . Deste modo, obtém-se a seguinte equação:

$$E = a^s E^A + (1 - a^s) E^B \quad (2.5)$$

onde  $s$  é o fator que permite penalizar as propriedades intermédias;

$E^A, E^B$  – módulo de *Young* de cada fase constituinte;

$a$  – Fração de volume da fase A na mistura dos materiais.

- **Coefficiente de Poisson,  $\nu$**

Para o mesmo caso especial anteriormente referido em que se tem: a fase A e a fase B, o coeficiente de *Poisson* pode ser definido como:

$$\nu = a\nu^A + (1 - a)\nu^B \quad (2.6)$$

onde  $\nu^A, \nu^B$  – coeficiente de *Poisson* de cada fase constituinte;

$a$  – Fração de volume da fase A na mistura dos materiais.

O problema de otimização basear-se-á em encontrar uma célula unitária base com uma quantidade de material mínima, em que os parâmetros constitutivos estão sujeitos a restrições de igualdade [31].

Para esta otimização, Neto *et al.* (2010) [31] procuraram um material com uma topologia de modo a apresentar um coeficiente de *Poisson* da estrutura igual a 1, assumindo que esta poderia ser descrita como uma célula unitária 2D. Assim, a relação constitutiva 2D-VAMUCH,  $\bar{D}_p$ , assume um estado plano de tensão e, pode ser definida através da Equação (2.7). O coeficiente multiplicativo da matriz,  $\frac{E}{(1-\nu^2)}$ , diz respeito à rigidez da estrutura [31].

$$\bar{D}_p = \begin{bmatrix} \bar{D}_{33} & \bar{D}_{36} & \bar{D}_{35} \\ \bar{D}_{63} & \bar{D}_{66} & \bar{D}_{65} \\ \bar{D}_{53} & \bar{D}_{56} & \bar{D}_{55} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

De notar que foi feita uma simplificação na Equação (2.7), fazendo-se uma abreviação de  $ij$  para  $i$  de modo a ser possível definir as restrições de igualdade dos parâmetros constitutivos [31]:

$$33 \rightarrow 1; \quad 66 \rightarrow 2; \quad 55 \rightarrow 3; \quad 36 \rightarrow 4; \quad 35 \rightarrow 5$$

Além disso, visto que o coeficiente de *Poisson* é igual a 1, tem-se que [31]:

$$\bar{D}_1 = \bar{D}_2; \quad \bar{D}_1 = \bar{D}_4; \quad \bar{D}_3 \approx 0; \quad \bar{D}_5 = 0 \quad (2.8)$$

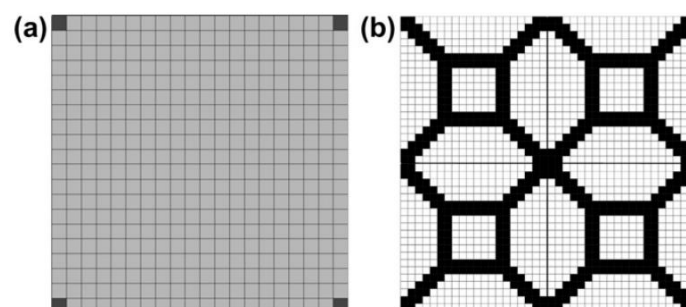
Na Tabela 2.3 encontram-se as propriedades dos materiais que estarão presentes em cada fase. Nesta análise foi considerado um  $s$  de 2, um  $a$  de 0,2 e uma divisão da malha de  $20 \times 20$  [31].

**Tabela 2.3.** Propriedades dos materiais presentes em cada fase da estrutura [31].

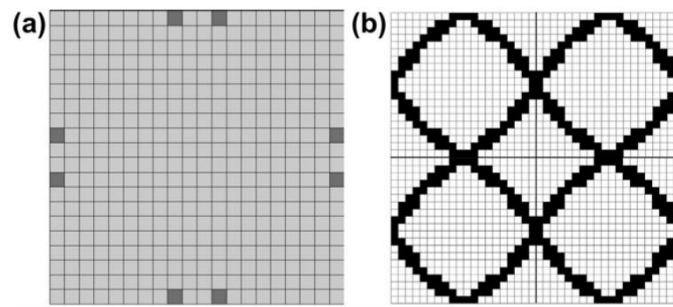
Fase	$E$	$\nu$
<b>A - Preta (<math>a_i = 1</math>)</b>	0,52	0,3
<b>B - Branca (vazio, <math>a_i = 0,001</math>)</b>	$10^{-6}$	0,3
<b>Cinzenta (mistura)</b>	$a_i = 0,5$	

As soluções obtidas por este procedimento não são únicas, pois dependendo da estimativa inicial, do formato da célula base e de outros parâmetros é possível diversas estruturas [31].

Neto *et al.* (2010) [31] propuseram duas estimativas iniciais diferentes e, conseqüentemente, obtiveram duas estruturas diferentes, estando estas representadas na Figura 2.7 e na Figura 2.8 [31].



**Figura 2.7.** Distribuição das fases de cada material pela célula unitária para um coeficiente de *Poisson* de 1: (a)Primeiro Design Inicial; (b)Primeira Solução ótima para quatro células unitárias [31].



**Figura 2.8.** Distribuição das fases de cada material pela célula unitária para um coeficiente de *Poisson* de 1: (a)Segundo Design Inicial; (b)Segunda Solução ótima para quatro células unitárias [31].

Por conseguinte, com recurso ao programa VAMUCH, Neto *et al.* (2010) [31] obtiveram as matrizes constitutivas VAMUCH 2D, apresentadas a seguir. A partir destas foi possível saber que para a primeira estrutura o coeficiente de *Poisson* foi de 0,9 e para a segunda estrutura foi de 0,97, estando ambos os valores muito próximos do valor unitário. É também de salientar que a primeira estrutura é mais rígida do que a segunda, cerca de 3,76 vezes superior [31].

$$\bar{D}_p = 1,58 \times 10^{-2} \begin{bmatrix} 1 & 0,9 & 0 \\ 0,9 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,186 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\bar{D}_p = 0,42 \times 10^{-2} \begin{bmatrix} 1 & 0,97 & 0 \\ 0,97 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

## 2.7. Sistema de Correlação de Imagem Vic-3D

O sistema Vic-3D é ideal para medir e visualizar formas tridimensionais, deslocamentos, deformações, tensões e vibrações, tendo por base o princípio da correlação de imagem digital. Utilizando este equipamento é possível medir os campos de deslocamentos e deformações 3D em todos os pontos da superfície da amostra. Com este sistema é possível testar amostras com tamanhos entre 1 mm a 50 m [33].

A Correlação de Imagem Digital Tridimensional (CID 3D) consiste num método ótico de medição que consegue seguir o campo de micromovimentos da superfície em análise, sem que ocorra nenhum contacto com a amostra em estudo. Para isso, este sistema tem

incorporadas duas câmaras fotográficas de alta velocidade que captam imagens da amostra enquanto esta está a sofrer algum tipo de transformação mecânica [34].

Para se aplicar o princípio da correlação de imagem digital é necessário definir pequenas áreas de estudo na superfície do objeto (pequenos subconjuntos de  $N \times N$ ), sendo estas denominadas de *subsets*. Este princípio consegue depois determinar a translação, rotação e deformação de cada um desses *subsets*, através de um algoritmo de correlação de imagem que tem por base conceitos da mecânica. Assim, o *software* compara a “imagem de referência” (imagem inicial em que a amostra ainda não sofreu nenhuma deformação) com as “imagens deformadas”, conseguindo-se assim medir as deformações da superfície do objeto [34].

Na Figura 2.9 observa-se uma sequência de imagens retiradas durante uma transformação mecânica, onde está realçado um *subset* (a vermelho). O princípio da correlação digital monitoriza então esse *subset* comparando-o com a “imagem de referência”.

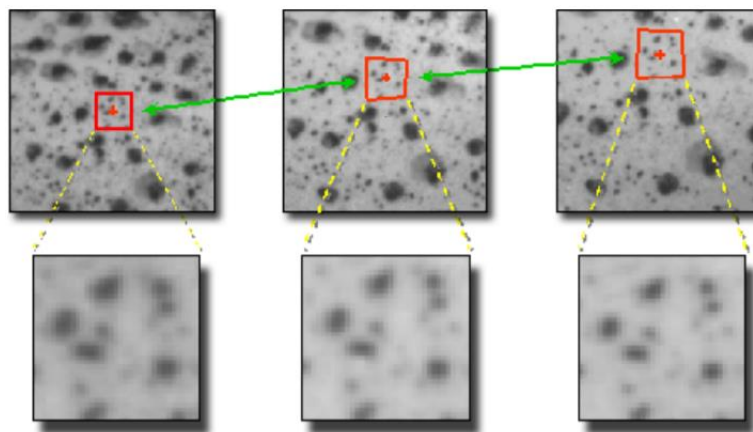


Figura 2.9. Sequência de Imagens digitais, onde está presente um *subset* [33].

### 2.7.1. Metodologia do Sistema de Correlação Vic-3D

Para a utilização adequada deste sistema é necessário respeitar uma sequência de passos, estando de seguida apresentado em mais detalhe cada um deles.

1. Preparar o espécime;
2. Montagem, direcionamento e focagem das câmaras;
3. Calibração do sistema de câmaras;
4. Execução do ensaio, procedendo à aquisição de imagens;
5. Correlação de imagem tridimensional;
6. Análise e processamento dos resultados [34].b



### 2.7.1.1. Preparar o espécime

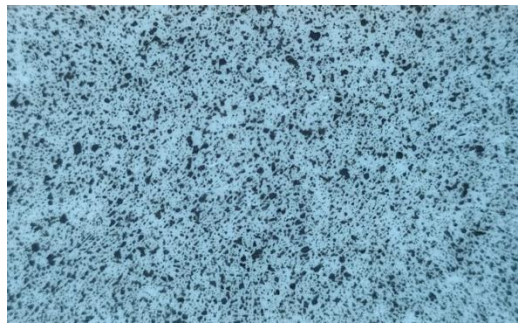
A região de interesse do espécime de teste tem de ter um padrão de salpicos (pintas) contrastante, de modo a conseguir aplicar a técnica de correlação de imagem digital (CID). Este padrão pode já existir naturalmente no espécime, pode ser pintado, ou até mesmo projetado na superfície em estudo [34].

O padrão de manchas deve cumprir os seguintes requisitos, de modo a produzir uma correlação efetiva, obtendo-se, assim, os melhores resultados:

- Ser não repetitivo, ou seja, ser aleatório;
- Isotrópico, isto é, não deverá exibir tendência para uma determinada orientação;
- Ser de alto contraste, com tamanhos de pontos consistentes e com iguais quantidades de preto e branco na superfície da amostra;
- A escala do padrão deve ser adaptada ao teste a realizar, não tendo manchas demasiado pequenas nem demasiado grandes [34].

Se as dimensões das manchas do padrão forem demasiado grandes, pode ocorrer que alguns *subsets* estejam inteiramente num campo preto ou num campo branco, não se conseguindo obter bons resultados. Caso não se consiga reduzir a dimensão das manchas, a solução é aumentar a dimensão dos subconjuntos, contudo vai reduzir-se a resolução espacial, diminuindo a capacidade para medir gradientes finos. Por outro lado, se a dimensão das manchas forem demasiado pequenas, a resolução das câmaras poderá não ser suficiente para obter resultados precisos [34].

A técnica mais usual para a aplicação de um padrão de manchas é com tinta comum, desde que esta não afete quimicamente, nem fisicamente, a amostra. Normalmente, o método para aplicação da tinta é revestir, primeiramente, a superfície do espécime com tinta branca, com camadas muito finas [34]. Após a secagem da tinta branca, salpicar com tinta preta. Deste modo, os materiais escolhidos para o presente estudo têm de ter a possibilidade de ser pintados. Na Figura 2.10 apresenta-se o padrão de manchas de uma amostra usada na presente dissertação.



**Figura 2.10.** Padrão de manchas para o uso da Vic-3D.

### **2.7.1.2. Montagem, direcionamento e focagem das câmaras**

#### **Montagem do equipamento**

Para a montagem do equipamento é necessário cumprir uma sequência de passos de modo à sua correta montagem:

1. Instalação do tripé na posição desejada, à altura adequada, estando as pernas niveladas;
2. Acoplar na cabeça do tripé uma peça que permite ajustar a montagem nos 3 eixos espaciais, existindo, assim, uma maior flexibilidade e um maior número de graus de liberdade. Voltar a verificar o nivelamento da montagem;
3. Anexar um dispositivo de deslizamento para extensão da montagem, na parte superior da estrutura;
4. Inserção da calha de alumínio, que irá suportar as câmaras e voltar a verificar o nivelamento e estabilidade;
5. Fixar as duas câmaras fotográficas de alta velocidade aos respectivos dispositivos giratórios e aparafusá-los na calha de alumínio;
6. Retificar os apertos e verificar novamente o nivelamento e estabilidade de toda a estrutura [34].

Na Figura 2.11 apresenta-se a montagem final do sistema de correlação de imagem Vic-3D.



**Figura 2.11.** Montagem final do Vic-3D [33].

### **Direcionamento das câmaras**

Para o direcionamento das câmaras começa-se por iniciar o *software* *Vic-Snap*, de modo a obter imagens em tempo real de ambas as câmaras. Posiciona-se então o equipamento com as câmaras de modo a enquadrar o espécime no campo de visão [34].

O objetivo será ter toda a área de interesse do objeto contida no campo de visão ao longo dos ensaios, não considerando apenas a imagem inicial, mas tendo em conta o deslocamento que o espécime poderá ter durante os ensaios. Para além disso, será necessário posicionar as duas câmaras individualmente de modo a que veja a mesma vista do objeto em ambas [34].

### **Focagem**

Para atingir uma imagem focada e nítida de toda a área de interesse do espécime utiliza-se o anel de focagem de cada lente. Quando é necessário focar espécimes de dimensões reduzidas e com grandes ampliações, normalmente é necessário recorrer-se a iluminação suplementar. Esta terá de ser colocada de forma cuidada, de modo a evitar a reflexão da luz na superfície do objeto [34].

### **2.7.1.3. Calibração**

A calibração da Vic-3D serve para estabelecer dois parâmetros distintos: os intrínsecos e os extrínsecos. Os parâmetros intrínsecos são específicos de cada câmara e sofrem modificação caso se altere a focagem, a abertura da lente ou se a lente for movida. Os parâmetros extrínsecos definem a relação entre as duas câmaras e sofrem alterações se estas forem movidas, inclinadas ou rodadas [34].

#### **Seleção da Grelha de Calibração**

A grelha de calibração deve ser a mais apropriada para o ensaio, devendo preencher todo o campo de visão em ambas as câmaras [34]. Para este estudo foram usadas grelhas fornecidas pelo equipamento.

#### **Calibração Sincronizada**

Para se fazer a calibração não é necessário ter a grelha na localização precisa onde irá estar o espécime, devendo apenas estar próxima do plano pretendido para o estudo [34].

A aquisição das imagens do alvo de calibração é efetuada usando o programa *Vic-Snap*, sendo apenas necessário ir rodando o alvo significativamente em torno dos três eixos. As imagens do alvo devem ficar bastante focadas em toda a largura e altura do alvo, e este deve ser totalmente visível em ambas as câmaras [34].

Caso se utilize uma grelha que não preencha todo o campo de visão, é necessário captar mais imagens, sendo estas em todas as regiões do campo de visão, bem como mais próximas e mais afastadas das câmaras [34].

Após a aquisição das imagens do alvo de calibração, o Vic-3D irá correr a sequência de imagens e, ao passar por cada imagem, irá extrair os centros dos pontos. Estando a análise das imagens concluída, irá aparecer um relatório relativamente aos resultados de calibração, bem como ainda é atribuída uma pontuação aos erros de calibração. Estes erros são exibidos em cada imagem e ainda é apresentada uma avaliação global do erro [34].

Uma vez concluída a calibração são apresentados os resultados com os parâmetros relativos à orientação das câmaras, com os respetivos intervalos de confiança. Os parâmetros de orientação dizem respeito à geometria das câmaras (posição de uma câmara em relação à outra). Os parâmetros das câmaras dizem respeito: à posição do sensor, onde a lente está centrada; à distância focal da lente em pixels; à inclinação do sensor; aos coeficientes de

distorção radial das lentes. Assim que o valor da pontuação global do erro de calibração e os intervalos de confiança dos parâmetros forem aceites, a calibração está concluída [34].

#### **2.7.1.4. Execução do ensaio, procedendo à aquisição de imagens**

Durante a execução dos ensaios não será necessária nenhuma iluminação especial nem lasers. Para além disso, ainda tem a vantagem de durante os testes não existir nenhum contacto do sistema com a amostra [33].

No programa *Vic-Snap* é possível escolher diferentes modos para a aquisição de imagens de teste: manual; semi-manual; automática; ininterrupta; ou cronometrada. Logo após a aquisição da primeira imagem estática do espécime, ou seja, antes do ensaio começar efetivamente, convém proceder-se a uma análise, de modo a verificar se está tudo de acordo com os requisitos e de modo a ser terem resultados precisos [34].

Durante os ensaios, regra geral, é preferível ter imagens a mais do que a menos, visto que estas poderão ser apagadas/ignoradas, posteriormente. Terminado o teste, para se proceder à análise das imagens do ensaio será necessário reabrir o programa *Vic-3D*.

#### **2.7.1.5. Correlação de imagem tridimensional**

Para se proceder à correlação é necessário importar a informação do projeto em estudo, selecionando as imagens que se pretendem estudar. A primeira imagem corresponde à imagem de referência, sendo a imagem do estado inicial do espécime, ou seja, antes de ser aplicada qualquer carga. No *Vic-3D*, todas as análises de deslocamento são calculadas em relação à imagem de referência [34].

Para iniciar o processo de correlação é necessário definir a área de interesse do espécime. Após isto, será necessário selecionar a dimensão dos subconjuntos e o tamanho do passo. A dimensão dos subconjuntos controla a área da imagem que é usada para seguir o deslocamento entre as imagens, e tem de ser suficientemente grande de modo a garantir não existir nenhum padrão característico contido na área utilizada para a correlação. O tamanho de passo controla o espaçamento dos pontos que serão analisados durante a correlação [34].

Geralmente, pode começar-se a correlação após a seleção da área de interesse. Contudo, caso a correlação falhe, ou seja muito lenta, poderá ser necessário adicionar uma estimativa inicial. Para isso, começa-se por colocar pontos de início para a correlação. Estes pontos não têm de estar associados a uma área de interesse específica, podendo até estar fora desta. Por exemplo, em ensaios de tração, o ponto deverá estar próximo da amarra fixa. Uma

vez colocado esse ponto, o Vic-3D irá começar a procurar estimativas iniciais. Atingido 100% na estimativa, pode começar-se a fazer a análise das imagens [34].

#### **2.7.1.6. Análise e processamento dos resultados**

Concluída a análise do Vic-3D e calculados os campos de deslocamento, será possível usar as ferramentas do pós-processamento. Estas ferramentas permitem: calcular deformações; remover o movimento rígido; aplicar funções para criar novas variáveis; calcular a velocidade e a taxa de deformação; entre outros [34].

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente capítulo é apresentada a descrição dos procedimentos experimentais realizados durante esta dissertação, desde os primeiros passos do trabalho, como a escolha dos materiais, até ao momento dos ensaios mecânicos finais das estruturas em estudo. Os ensaios experimentais foram realizados no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Coimbra.

Neste e nos capítulos seguintes, as estruturas apresentadas anteriormente (Figura 2.7b e Figura 2.8b) serão designadas por A e B, respetivamente.

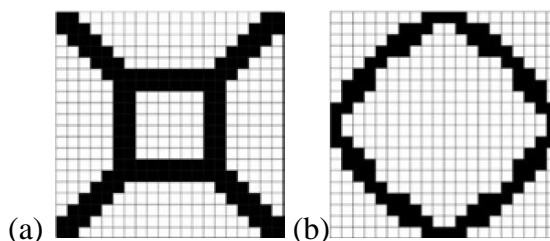


Figura 3.1. Células Unitárias: (a)Estrutura tipo A; (b)Estrutura tipo B.

#### 3.1. Influência do material base no valor do coeficiente de *Poisson* e da rigidez das células unitárias das estruturas

De modo a avaliar a influência do coeficiente de *Poisson*,  $\nu$ , do material base no valor final do coeficiente de *Poisson*,  $\nu$ , da célula unitária em cada uma das estruturas, assim como a sua rigidez, recorreu-se, como referido anteriormente, ao programa VAMUCH.

Neste programa é necessário ter conhecimento do valor do módulo de *Young* do material, que irá estar presente na fase sólida linear elástica, e do respetivo coeficiente de *Poisson*. Após a inserção destes dados, o programa consegue avaliar a lei constitutiva 3D e, seguidamente, a matriz constitutiva 2D ou matriz de rigidez material 2D (Equação (2.7)), onde se encontram os valores dos parâmetros analisados neste estudo.

Assim, de modo a conseguir chegar a resultados concretos, testaram-se vários materiais, estando todos eles disponíveis para serem usados neste estudo. Os valores obtidos encontram-se apresentados na Tabela 3.1.

Para além de se terem estudado alguns dos materiais apresentados na secção 2.2, foram testados também o FOMM ® e o PVDF (Poli(fluoreto de vinilideno)).

**Tabela 3.1.** Estimativa do coeficiente de *Poisson* e rigidez da célula unitária para as estruturas A e B.

	$E_{\text{filamento}}$ (GPa)	$\nu$	Estrutura A		Estrutura B	
			$\nu_{c.u. (A)}$	Rigidez <sub>A</sub> (GPa)	$\nu_{c.u. (B)}$	Rigidez <sub>B</sub> (GPa)
rPLA	2,12	0,3	0,897	$6,45 \times 10^{-2}$	0,964	$1,71 \times 10^{-2}$
		0,35	0,899	$6,82 \times 10^{-2}$	0,965	$1,80 \times 10^{-2}$
HIPS	0,99	0,3	0,897	$3,01 \times 10^{-2}$	0,964	$8,00 \times 10^{-3}$
		0,41	0,901	$3,47 \times 10^{-2}$	0,965	$9,07 \times 10^{-3}$
PMMA	1,30	0,3	0,897	$3,95 \times 10^{-2}$	0,964	$1,05 \times 10^{-2}$
		0,35	0,899	$4,18 \times 10^{-2}$	0,965	$1,10 \times 10^{-2}$
TPU	0,033	0,3	0,896	$1,00 \times 10^{-3}$	0,963	$2,68 \times 10^{-4}$
		0,49	0,902	$1,40 \times 10^{-3}$	0,964	$3,76 \times 10^{-4}$
FOMM ®	0,70	0,3	0,897	$2,13 \times 10^{-2}$	0,964	$5,66 \times 10^{-3}$
Nylon ® 12	1,08	0,3	0,897	$3,29 \times 10^{-2}$	0,964	$8,73 \times 10^{-3}$
		0,35	0,899	$3,48 \times 10^{-2}$	0,965	$9,16 \times 10^{-3}$
PMMA	1,20	0,3	0,897	$3,65 \times 10^{-2}$	0,964	$9,70 \times 10^{-3}$
		0,35	0,899	$3,86 \times 10^{-2}$	0,965	$1,02 \times 10^{-2}$
PVDF	1,29	0,3	0,897	$3,92 \times 10^{-2}$	0,964	$1,04 \times 10^{-2}$
		0,34	0,898	$4,10 \times 10^{-2}$	0,964	$1,08 \times 10^{-2}$

Note-se que os valores do coeficiente de *Poisson* e da rigidez apresentados na Tabela 3.1 são meras estimativas. De facto, os valores do módulo de *Young* apresentados na Tabela 3.1 são os do filamento e não os do material impresso. Assim, os valores dos coeficientes de *Poisson* representam valores possíveis para os materiais, não sendo os valores reais. Por conseguinte, após a escolha dos materiais para o estudo dever-se-á fazer ensaios experimentais de modo a encontrar valores mais precisos.



Pelos resultados apresentados na Tabela 3.1, rapidamente se conclui que o valor do módulo de *Young* do material base não tem grande influência no valor final do coeficiente de *Poisson* de cada uma das células unitárias. Contudo, tem uma grande influência no valor final da rigidez da célula unitária, algo que já era expectável. Para além disso, mais uma vez se confirma que a rigidez da estrutura A é superior à rigidez da estrutura B.

Relativamente ao valor do coeficiente de *Poisson* de cada estrutura, para todos os materiais analisados, os valores aproximam-se aos do artigo: 0,9 para a estrutura A e 0,97 para a estrutura B.

### 3.2. Materiais

Para a seleção dos dois polímeros a analisar durante esta dissertação, foi necessário estabelecer previamente alguns requisitos, de modo a encontrar os dois mais apropriados. Assim, era importante que estes fossem fáceis de imprimir e de pintar. Este último requisito deve-se ao uso posterior do sistema de correlação de imagem Vic-3D, em que é necessário pintar os provetes a serem analisados.

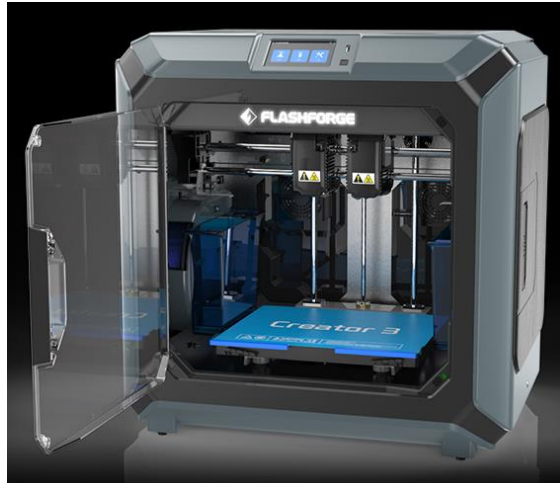
Adicionalmente, ainda era necessário que os materiais conseguissem atingir coeficientes de *Poisson* próximos aos das células unitárias das estruturas do artigo Neto *et al.* (2010) [31] (0,9 para a estrutura A e 0,97 para a estrutura B) e rigidez semelhante à apresentada no mesmo artigo ( $1,58 \times 10^{-2} \text{ GPa}$  para a estrutura A e  $0,42 \times 10^{-2} \text{ GPa}$  para a estrutura B).

Tendo em conta os requisitos apresentados e os materiais disponíveis para este estudo, optou-se pelo rPLA e pelo HIPS. Tanto um como o outro são materiais fáceis de imprimir e têm a possibilidade de ser pintados. Para além disso, os valores do coeficiente de *Poisson* e da rigidez destes dois materiais parecem ir de encontro aos requisitos, como se pode verificar na Tabela 3.1.

Seguidamente, de modo a comprovar que os materiais selecionados são indicados para o presente estudo, estes serão analisados através de ensaios experimentais de modo a avaliar o valor do coeficiente de *Poisson* e do módulo de *Young*.

### 3.2.1. Impressora (*FlashForge Creator 3*)

Para a impressão dos materiais deste projeto foi usada a impressora 3D de nível industrial, *Creator 3*, do fabricante *FlashForge*, apresentada na Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Impressora *FlashForge Creator 3*, disponível no DEM/UC.

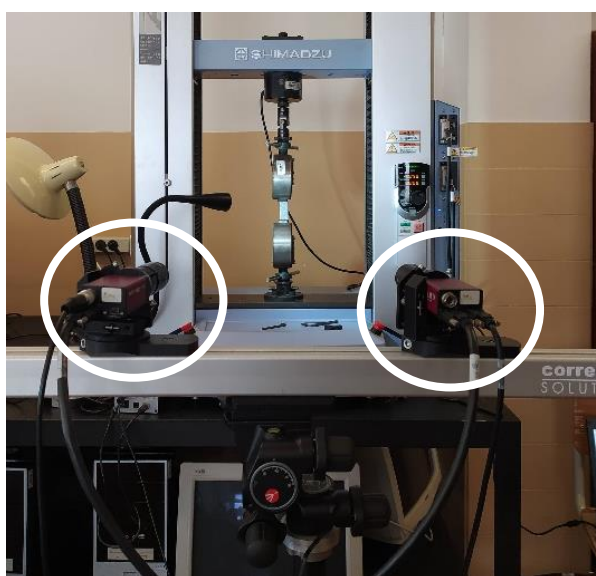
Esta impressora tem um sistema de extrusão duplo independente, ou seja, possui duas cabeças extrusoras independentes, cada uma com diâmetro de  $0,4\text{ mm}$ . Estas cabeças extrusoras conseguem atingir altas temperaturas durante a impressão, cerca de  $300^{\circ}\text{C}$ . Para além disso, tem ainda uma plataforma flexível aquecida, que atinge temperaturas máximas de  $120^{\circ}\text{C}$ . O volume de impressão máximo é de  $300 \times 250 \times 200\text{ (mm)}$ , tem uma velocidade de impressão entre  $10$  e  $150\text{ mm/s}$  e uma resolução de impressão de  $\pm 0,2\text{ mm}$  [35].

Esta impressora possui ainda quatro ventiladores integrados que deslocam o ar interno e externo de modo a ajustar a temperatura no interior da câmara, criando um melhor ambiente para a impressão [35].

### 3.3. Avaliação das propriedades mecânicas do rPLA e HIPS

Os ensaios experimentais para determinação do coeficiente de *Poisson* e do módulo de *Young* dos materiais selecionados anteriormente, rPLA e HIPS, foram realizados à temperatura ambiente.

Para a aplicação das solicitações axiais de tração foi utilizada uma máquina universal de tração *Shimadzu*, modelo *Autograph AGS -X* equipada com uma célula de carga de 5 *kN*, que está disponível no laboratório de construções mecânicas do DEM. Este equipamento utiliza um *software*, *TRAPEZIUM X*, para o processamento de dados. Estes ensaios foram acompanhados com o sistema de correlação de imagem *Vic-3D*, que foi responsável pela análise das deformações nos provetes segundo o eixo *x* (deformações transversais) e *y* (deformações longitudinais ou direção de tração).



**Figura 3.3.** Equipamento *Shimadzu*, modelo *Autograph AGS -X* e Câmaras *Vic-3D* (esquerda e direita).

Para estes ensaios foram impressos três provetes de cada material com as seguintes dimensões:  $100 \times 20 \times 2$  (*mm*). Estes provetes foram previamente preparados, tendo sido pintados com tinta branca e, posteriormente à fase de secagem, pulverizados com tinta preta de modo a criar um padrão aleatório sobre a superfície dos provetes, a qual será analisada pelo *Vic-3D*.

Nos ensaios de tração, os provetes foram dispostos de modo a garantir um afastamento entre amarras de 50 mm. Todos os provetes foram ensaiados utilizando o mesmo protocolo de carregamento:

- 1) Carregamento incremental até se atingirem os 200 N, mantendo-se 5 seg. nesse valor para se conseguir retirar imagens com a Vic-3D;
- 2) Segundo carregamento incremental até aos 400 N, mantendo-se constante durante 5 seg. de modo a conseguir-se retirar imagens com a Vic-3D;
- 3) Retirou-se o carregamento, de forma controlada. Nestes ensaios nunca ocorreu rotura dos provetes.

Para o rPLA foi necessário repetir os ensaios pois o sistema de correlação de imagem Vic-3D nos primeiros ensaios não conseguiu avaliar corretamente as deformações dos provetes. Assim, para o cálculo do coeficiente de *Poisson* serão considerados apenas três provetes. Contudo, para o cálculo do módulo de *Young* serão considerados seis provetes.

### **3.3.1. Coeficiente de *Poisson***

Nas Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 encontram-se apresentados os valores do coeficiente de *Poisson* de cada provete do HIPS e do rPLA, respetivamente. Tal como referido anteriormente, estes valores foram obtidos através do sistema de correlação de imagem Vic-3D. Os valores apresentados na coluna relativa aos extensómetros (Vic-Extensómetro) foram obtidos através da definição de três extensómetros lineares em cada uma das duas direções, isto é, três na direção longitudinal e três na direção transversal. Posteriormente, foi considerado o valor médio da deformação em cada uma das direções, calculando as médias dos três valores avaliados em cada direção. Os valores apresentados na coluna relativa aos valores estatísticos do Vic-3D, foram obtidos através do cálculo do valor médio da deformação em todos os pontos da área de análise do Vic-3D, considerando os valores em cada uma das direções.

No APÊNDICE A, encontram-se os valores das deformações longitudinais e transversais dos provetes que deram origem aos valores do coeficiente de *Poisson* apresentados nas Tabela 3.2 e na Tabela 3.3.

**Tabela 3.2.** Coeficiente de *Poisson* do HIPS.

Força, F (N)	HIPS	Coeficiente de <i>Poisson</i> , $\nu$ Vic - Extensómetro	Coeficiente de <i>Poisson</i> , $\nu$ Vic - <i>Statistical</i>
200	HIPS_1	0,4309	0,3891
	HIPS_2	0,3820	0,3966
	HIPS_3	0,3906	0,3533
400	HIPS_1	0,3879	0,3480
	HIPS_2	0,3976	0,3896
	HIPS_3	0,4006	0,3146
<b>Média</b>		0,3817	
<b>Desvio-padrão</b>		0,0288	

**Tabela 3.3.** Coeficiente de *Poisson* do rPLA.

Força, F (N)	rPLA	Coeficiente de <i>Poisson</i> , $\nu$ Vic - Extensómetro	Coeficiente de <i>Poisson</i> , $\nu$ Vic - <i>Statistical</i>
200	rPLA_1	0,2798	0,2828
	rPLA_2	0,3343	0,3253
	rPLA_3	0,3225	0,3501
400	rPLA_1	0,3030	0,3448
	rPLA_2	0,3203	0,3400
	rPLA_3	0,3397	0,3462
<b>Média</b>		0,3257	
<b>Desvio-padrão</b>		0,0227	

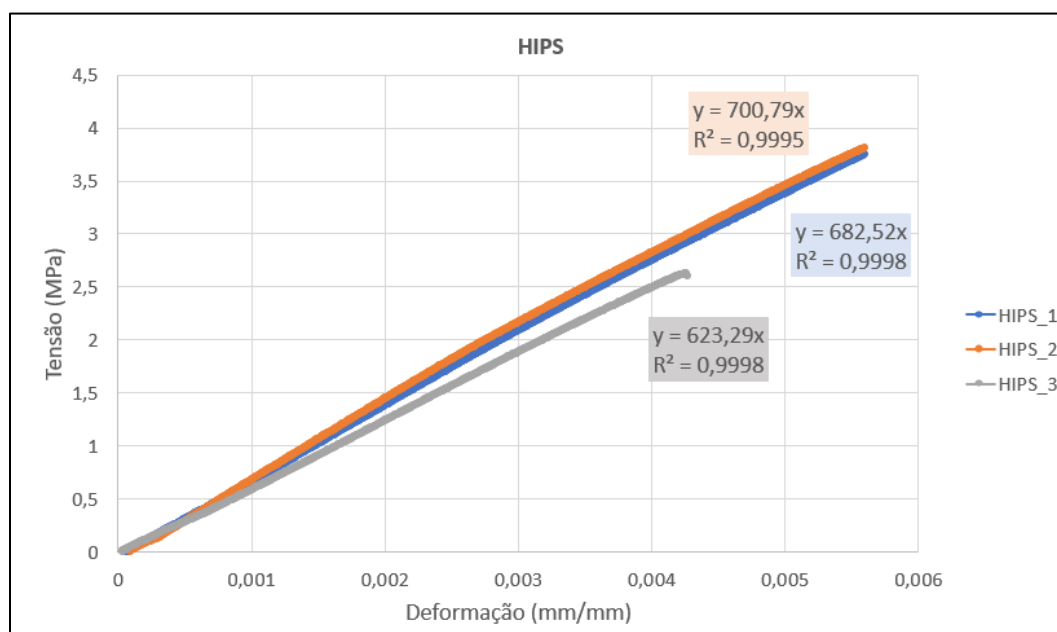
### 3.3.2. Módulo de *Young*

Após cada ensaio experimental, os dados da força e do deslocamento em função do tempo foram registados pelo *software* da máquina universal de tração *Shimadzu* e guardados num ficheiro *Excel*. Partindo desses dados iniciais, foi possível traçar a curva de tensão ( $\sigma$ ) -deformação ( $\epsilon$ ), visto que era conhecida a área transversal inicial dos provetes e o afastamento entre as amarras. Por fim, através da lei de *Hooke*, foi possível avaliar o valor do módulo de *Young* dos materiais.

Nas Figura 3.4 e Tabela 3.4, e nas Figura 3.5 e Tabela 3.5, encontram-se apresentados os valores do módulo de *Young* de cada um dos provetes analisados do HIPS e do rPLA, respetivamente. Na Figura 3.4 e Figura 3.5 encontram-se apresentadas as curvas de tensão-deformação, sendo que o declive das retas representa o módulo de *Young*.

De notar que nem todos os valores do módulo de *Young* dos provetes, apresentados nas Tabela 3.4 e Tabela 3.5, foram considerados na média do valor, tendo sido considerados os que se encontram a sombreado. Isto deve-se ao facto de alguns valores estarem fora da gama de valores aceitáveis, sendo esta gama definida pelo valor do desvio-padrão.

Na Tabela 3.6 são apresentados os valores finais do módulo de *Young* de cada um dos materiais e os respetivos desvios-padrão.



**Figura 3.4.** Curva tensão-deformação dos provetes em HIPS.

**Tabela 3.4.** Módulo de *Young* do HIPS.

HIPS	Módulo de <i>Young</i> , E (MPa)
HIPS_1	682,52
HIPS_2	700,79
HIPS_3	623,29
<b>Média</b>	668,87
<b>Desvio-padrão</b>	40,51

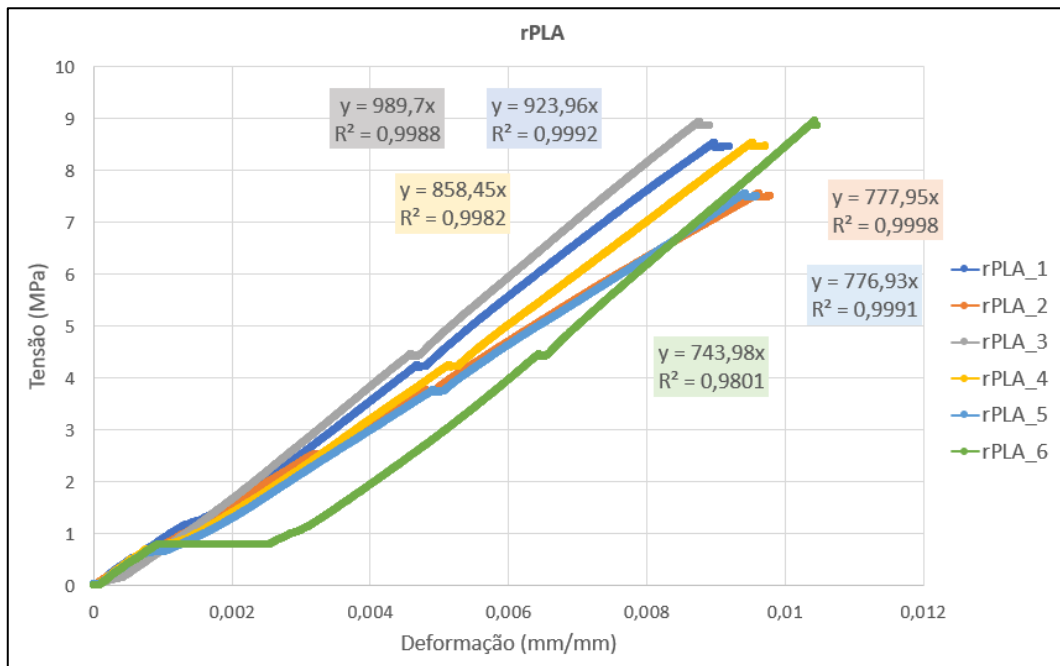


Figura 3.5. Curva tensão-deformação dos provetes em rPLA.

Tabela 3.5. Módulo de Young do rPLA.

rPLA		Módulo de Young, E (MPa)
1º Ensaio	rPLA_1	923,96
	rPLA_2	777,95
	rPLA_3	989,70
2º Ensaio	rPLA_4	858,45
	rPLA_5	776,93
	rPLA_6	743,98
<b>Média</b>		789,33
<b>Desvio-padrão</b>		48,71

Tabela 3.6. Módulo de Young dos materiais selecionados.

Material	Módulo de Young, E (MPa)
<b>HIPS</b>	668,87 ± 40,51
<b>rPLA</b>	789,33 ± 48,71

Na Tabela 3.7 são sumariados os valores do coeficiente de *Poisson* e do módulo de *Young* dos dois materiais selecionados, com os respetivos desvios-padrão. Rapidamente se concluiu que o HIPS tem um menor módulo de *Young*, comparativamente ao rPLA, e um coeficiente de *Poisson* superior.

Visto que o coeficiente de *Poisson* estabelece uma relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal do material, tendo o HIPS um maior valor para este parâmetro, significa que para a mesma solicitação, o HIPS tenderá a deformar mais na direção transversal do que o rPLA. Para além disso, o módulo de *Young* deste material é menor que o do rPLA. Portanto, o HIPS será menos rígido quando comparado ao rPLA.

**Tabela 3.7.** Coeficiente de *Poisson* e módulo de *Young* dos materiais em estudo.

	Coeficiente de <i>Poisson</i> , $\nu$	Módulo de <i>Young</i> , $E$ (MPa)
<b>HIPS</b>	0,382 ± 0,0288	668,87 ± 40,51
<b>rPLA</b>	0,323 ± 0,0227	789,33 ± 48,71

### 3.3.3. Avaliação Numérica das Propriedades Mecânicas das células unitárias

Os valores das propriedades mecânicas dos materiais selecionados e apresentados nas subsecções 3.3.1 e 0 são utilizados no programa VAMUCH. A utilização destes valores experimentais para fazer novas estimativas, sendo estas mais precisas, sobre os valores do coeficiente de *Poisson* e da rigidez das células unitárias de cada estrutura conduzirá a valores mais realistas. Os valores obtidos encontram-se apresentados na Tabela 3.8.

**Tabela 3.8.** Coeficiente de *Poisson* e rigidez da célula unitária para a Estrutura A e B.

			Estrutura A		Estrutura B	
	$E$ (GPa)	$\nu$	$\nu_{c.u. (A)}$	Rigidez <sub>A</sub> (GPa)	$\nu_{c.u. (B)}$	Rigidez <sub>B</sub> (GPa)
<b>HIPS</b>	0,669	0,382	0,900	$2,25 \times 10^{-2}$	0,965	$5,89 \times 10^{-3}$
<b>rPLA</b>	0,789	0,326	0,898	$2,47 \times 10^{-2}$	0,964	$6,53 \times 10^{-3}$



Relativamente ao coeficiente de *Poisson*, os valores obtidos com os dois materiais vão de encontro aos valores do artigo base Neto *et al.* (2010) [31] (0,9 para a estrutura A e 0,97 para a estrutura B). Para a rigidez, os valores obtidos não foram exatamente iguais. Contudo, aproximam-se do objetivo ( $1,58 \times 10^{-2} GPa$  para a estrutura A e  $0,42 \times 10^{-2} GPa$  para a estrutura B). Deste modo, concluímos que os dois materiais anteriormente selecionados, HIPS e rPLA, podem ser usados neste estudo.

### 3.4. Desenvolvimento CAD das estruturas

As dimensões finais das amostras do presente estudo, estão representadas na Figura 3.6, e representam amostras com dimensões de  $100 \times 40 \times 2$  (mm). É na zona central, de comprimento  $60$  mm, que estará a estrutura. Assim, para garantir estas dimensões, a célula unitária é replicada oito vezes na horizontal e seis vezes na vertical.

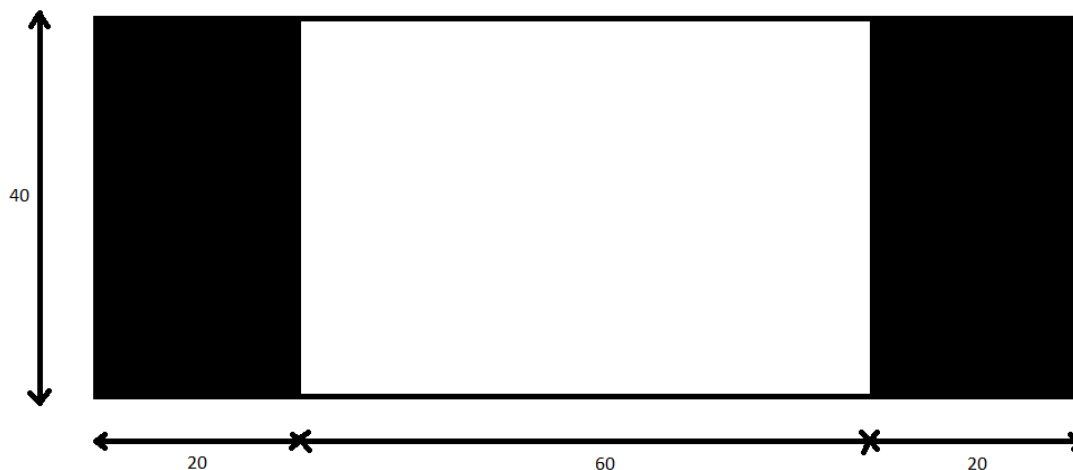
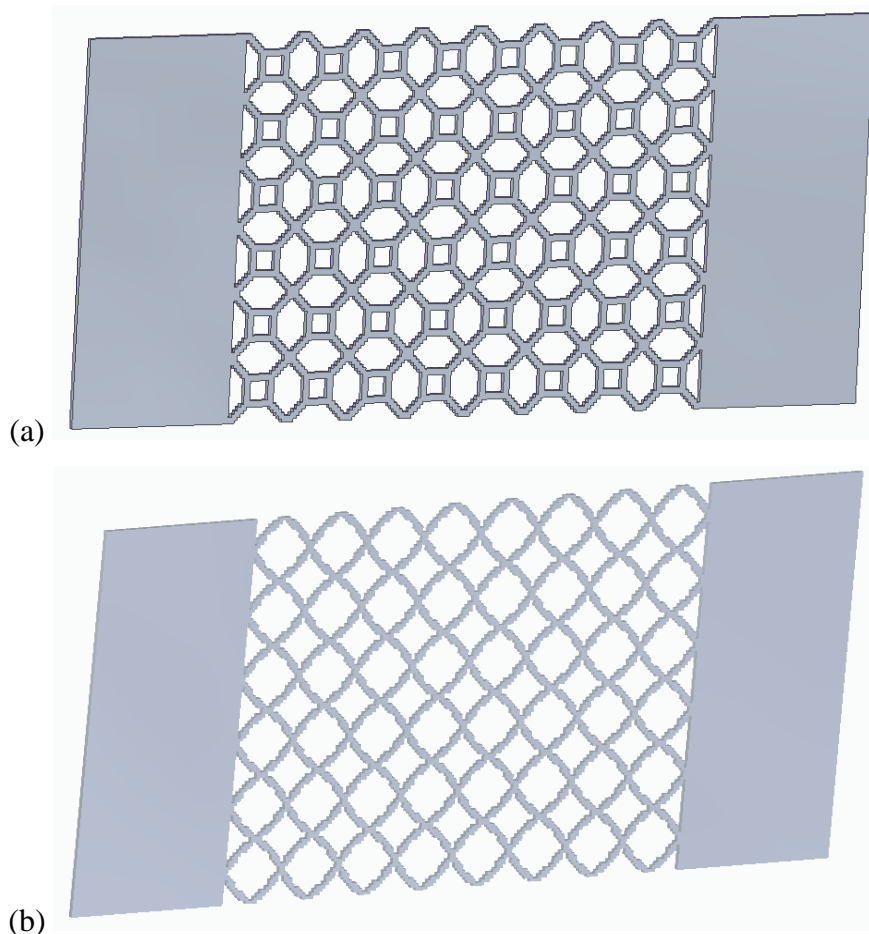


Figura 3.6. Dimensões das Amostras a serem impressas.

Para o desenvolvimento das amostras, e visto que posteriormente serão para ser impressas, foi necessário fazer uma triangulação da malha. Para isso foi utilizado o programa GiD, sendo este um programa de pré e pós processamento capaz de: fazer modelação numérica (CAD); geração de malha em superfícies ou volumes; operações de pós-processamento, tal como visualização de resultados de diferentes parâmetros.

Na Figura 3.7 encontram-se as duas amostras que serão posteriormente impressas. Estas foram obtidas, primeiramente, com recurso ao programa GiD, onde se

desenvolveram as estruturas em 2D. De seguida, através de um *software* CAD, *Solid Edge*, efetuou-se uma extrusão de 2 mm de espessura. Por fim, guardou-se o ficheiro com formato STL, podendo-se, assim, proceder-se à impressão das amostras.



**Figura 3.7.** (a) Amostra com a estrutura tipo A; (b) Amostra com a estrutura tipo B.

### 3.5. Impressão dos Materiais

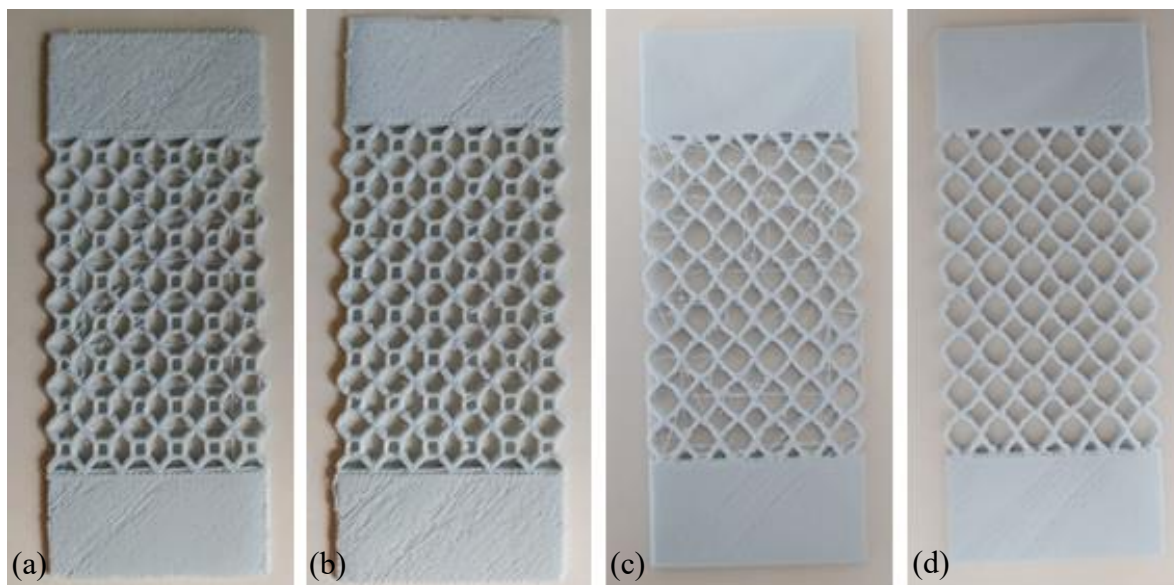
As amostras para o presente estudo foram impressas usando a *Creator 3* da *FlashForge*. Foram impressas quatro amostras em HIPS com a estrutura A (HIPS\_A), quatro amostras em rPLA com a estrutura A (rPLA\_A) e quatro amostras em rPLA com a estrutura B (rPLA\_B). Os parâmetros da impressão encontram-se resumidos na Tabela 3.9.

**Tabela 3.9.** Parâmetros da Impressão das Amostras.

Amostra		rPLA	HIPS
Temperatura de Impressão (°C)		230	240
Temperatura da Plataforma (°C)		50	110
Velocidade de Impressão (mm/s)		40	40
<i>Shell</i>		1	1
Espessura da Camada (mm)		0,180	0,180
Zona a cheio (extremos da amostra)	Preenchimento ( <i>Infill</i> ) (%)	100	100
	Padrão do <i>Infill</i>	Linear	Linear
	<i>Bottom layers (100% infill linear)</i>	1	1
	<i>Upper layers (100% infill linear)</i>	1	1

Após a impressão das estruturas com o rPLA, foi necessário proceder a uma limpeza das amostras, visto que durante a impressão ocorreu arrastamento de filamento. Por outro lado, após a impressão das estruturas com o HIPS não foi necessário proceder a esta limpeza.

Este arrastamento de filamento ocorreu, maioritariamente, devido a se ter uma viscosidade demasiado baixa do filamento durante a impressão. Estes filamentos, provavelmente, não iriam ter influência na resistência das amostras durante os ensaios mecânicos, no entanto, procedeu-se na mesma a esta limpeza, de modo a evitar algum erro que pudesse causar. Na Figura 3.8, é possível visualizar as diferenças entre as amostras antes e após a referida limpeza.



**Figura 3.8.** Amostras antes e depois da limpeza: (a) rPLA\_A antes da limpeza; (b) rPLA\_A depois da limpeza; (c) rPLA\_B antes da limpeza; (d) rPLA\_B depois da limpeza.

### 3.6. Ensaios Mecânicos

Os ensaios experimentais para determinação do coeficiente de *Poisson* e do módulo de *Young* das amostras anteriormente referidas foram realizados no mesmo equipamento da subsecção 3.3.

Nestes ensaios também se recorreu ao sistema de correlação de imagem Vic-3D e os provetes foram previamente preparados: pintados com tinta branca e, posteriormente, pulverizados com tinta preta de modo a criar um padrão aleatório sobre a superfície a analisar. A banca de ensaios, onde está presente a máquina universal de tração *Shimadzu* e o sistema de correlação de imagem Vic-3D, encontra-se apresentada na Figura 3.9.



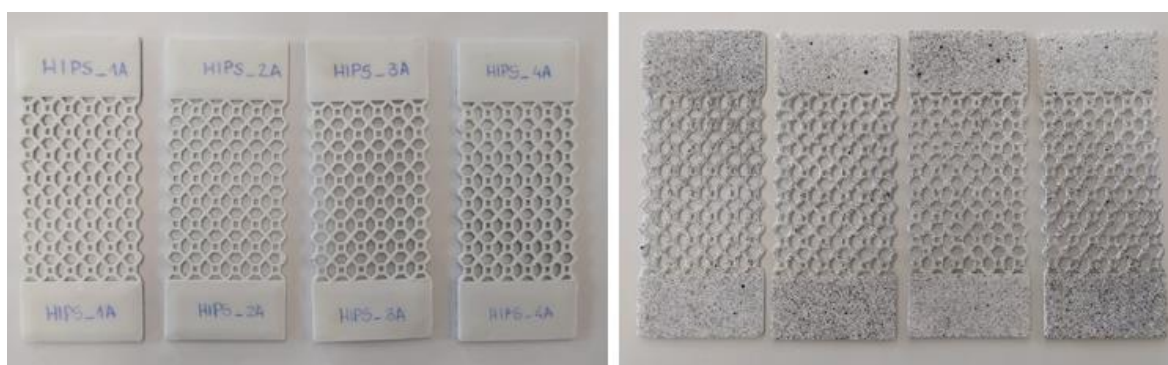
**Figura 3.9.** Banca de Ensaios.

Para os ensaios experimentais, com solicitações axiais de tração, os provetes foram dispostos de modo a se ter um afastamento entre amarras de 50 *mm*, apesar de no desenvolvimento CAD das estruturas se ter definido um afastamento entre amarras de 60 *mm*. Esta mudança foi feita de modo a garantir esforços mais uniformes na zona das amostras onde está presente a estrutura em estudo, no momento dos ensaios experimentais. Deste modo, no interior de cada uma das amarras está um comprimento de 25 *mm*, correspondendo 20 *mm* à parte a cheio e 5 *mm* à estrutura.

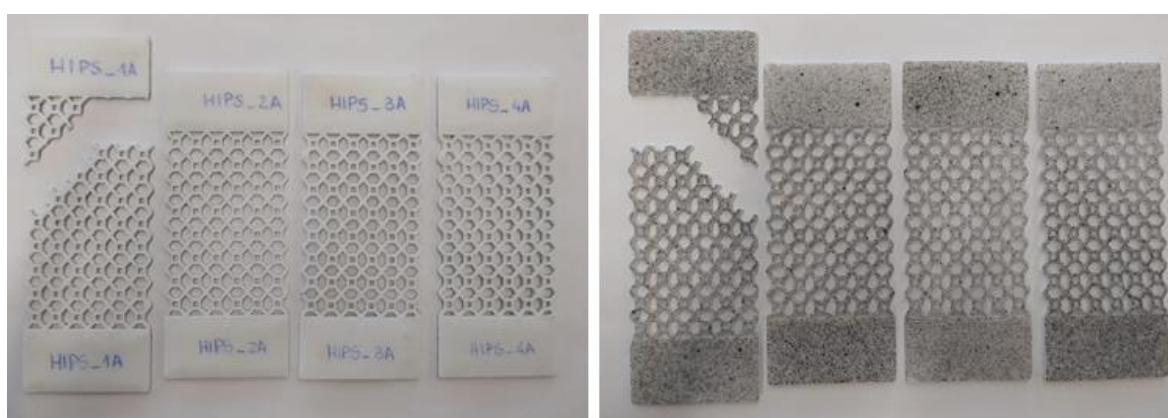
A primeira amostra a ser ensaiada foi a HIPS\_1A, utilizando o protocolo de carregamento definido na secção 3.3, isto é, carregamento incremental até aos 200 *N* seguido de manutenção de carga durante 5 *seg.*, e posterior incremento de carga até aos 400 *N*. Contudo, aos 92 *N* a amostra fraturou. Por esta razão, foi necessário fazer um ajuste do protocolo de carregamento, em que as pausas passaram para os carregamentos de 40 *N* e 80 *N*. Quer isto dizer, que se fez um carregamento incremental até aos 40 *N*, mantendo-se 5 *seg.* nesse valor para se conseguir retirar imagens com a Vic-3D. De seguida, continuou-se o carregamento até aos 80 *N* e repetiu-se a manutenção de carga constante por 5 *seg.*, de modo a conseguir-se retirar imagens. Após isto, retirou-se o carregamento, de forma controlada. Nestes ensaios nunca ocorreu rotura das amostras.

Nas Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12 e Figura 3.13 encontram-se apresentadas as amostras do presente estudo. É de salientar que apenas no caso do HIPS é apresentado o antes e o depois dos ensaios experimentais, visto que nas restantes amostras (rPLA\_A e rPLA\_B) não se revela nenhuma diferença visível a olho nu.

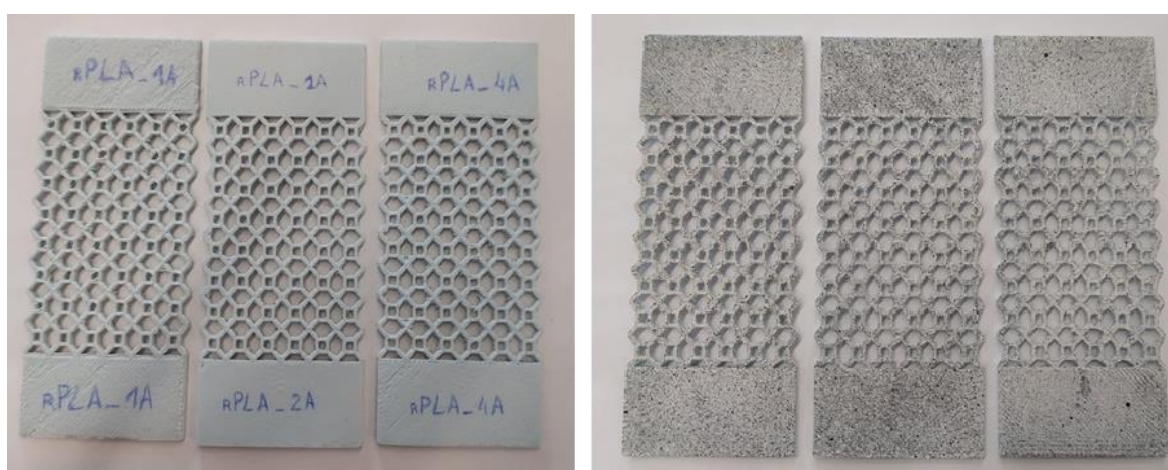
Por observação das Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12 e Figura 3.13 conclui-se que durante os ensaios experimentais não ocorreu rotura das amostras, exceptuando o caso do HIPS\_1A. Para além disso, a pintura das amostras foi de encontro aos requisitos, apresentado uma primeira camada de tinta branca com salpicos pretos, com tamanhos diferentes, por cima.



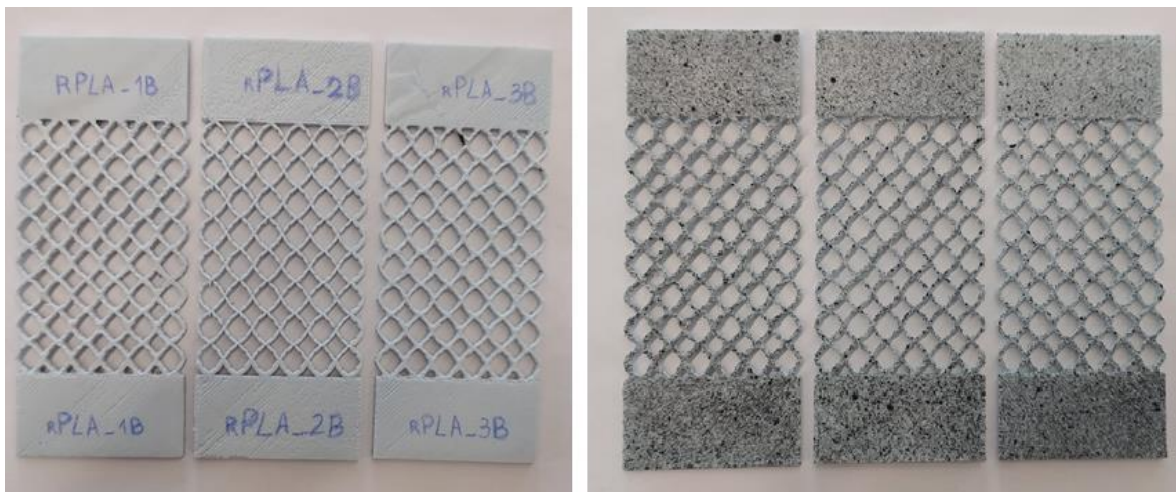
**Figura 3.10.** Amostras HIPS – Estrutura A (antes dos ensaios).



**Figura 3.11.** Amostras HIPS – Estrutura A (depois dos ensaios).



**Figura 3.12.** Amostras rPLA – Estrutura A.



**Figura 3.13.** Amostras rPLA – Estrutura B.





## 4. RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados dos valores do coeficiente de *Poisson* e do módulo de *Young* dos ensaios experimentais das amostras anteriormente referidas: HIPS\_A, rPLA\_A e rPLA\_B. Os ensaios experimentais encontram-se descritos na subsecção 3.6 e as amostras encontram-se expostas na mesma subsecção, da Figura 3.10 à Figura 3.13. A obtenção dos valores é similar ao procedimento utilizado na Subsecção 3.3.1 e na Subsecção 0. Por fim, irá fazer-se uma análise comparativa entre os valores obtidos e os valores apresentados no artigo Neto *et al.* [31], para cada um dos parâmetros em estudo.

### 4.1. Coeficiente de *Poisson*

Tal como na análise do coeficiente de *Poisson* dos provetes, as amostras também foram analisadas usando o sistema de correlação de imagem Vic-3D.

Na Tabela 4.1 encontram-se expostos os valores obtidos para as três amostras de cada material e de cada estrutura. Os resultados são apresentados para as duas intensidades de força. Assim, é possível observar os valores finais do coeficiente de *Poisson*, respetivos desvio-padrão, de cada uma das amostras (HIPS\_A, rPLA\_A e rPLA\_B). Os valores das deformações longitudinais e transversais, obtidos através do sistema de correlação de imagem Vic-3D que conduziram aos valores apresentados nesta tabela, encontram-se expostos no APÊNDICE B. Para além disso, nesse apêndice encontram-se ainda imagens relativas aos resultados das deformações do Vic-3D com as estruturas.

Ao contrário do que aconteceu na análise dos provetes, no caso destas amostras apenas se consideraram os valores do Vic – Extensómetro, ou seja, os valores do Vic-*Statistical* não foram considerados visto que se afastavam bastante dos valores reais.

De seguida, na Tabela 4.2 apresentam-se sumariamente, para melhor comparação, os valores dos coeficientes de *Poisson* obtidos, com o respetivo desvio-padrão, consoante o material e o tipo de estrutura.

**Tabela 4.1.** Coeficiente de *Poisson* das Amostras de cada material e estrutura.

Força, F (N)	HIPS_A		rPLA_A		rPLA_B	
	40	HIPS_A2	0,9593	rPLA_A1	0,9285	rPLA_B1
HIPS_A3		0,8092	rPLA_A2	0,9689	rPLA_B3	1,0605
HIPS_A4		0,8374	rPLA_A4	0,9670	rPLA_B4	1,0002
80	HIPS_A2	0,9698	rPLA_A1	0,9637	rPLA_B1	1,0631
	HIPS_A3	0,8329	rPLA_A2	0,9517	rPLA_B3	1,0593
	HIPS_A4	0,8495	rPLA_A4	1,0166	rPLA_B4	1,0437
Média	0,8763		0,9661		1,0478 (irrealista)	
Desvio-padrão	0,0636		0,0264		0,0222	

**Tabela 4.2.** Coeficiente de *Poisson* das Amostras.

Material_Estrutura	Coeficiente de <i>Poisson</i> , $\nu$
HIPS_A	$0,8763 \pm 0,0636$
rPLA_A	$0,9661 \pm 0,0264$
rPLA_B	$1,0478 \pm 0,0222$ (irrealista)

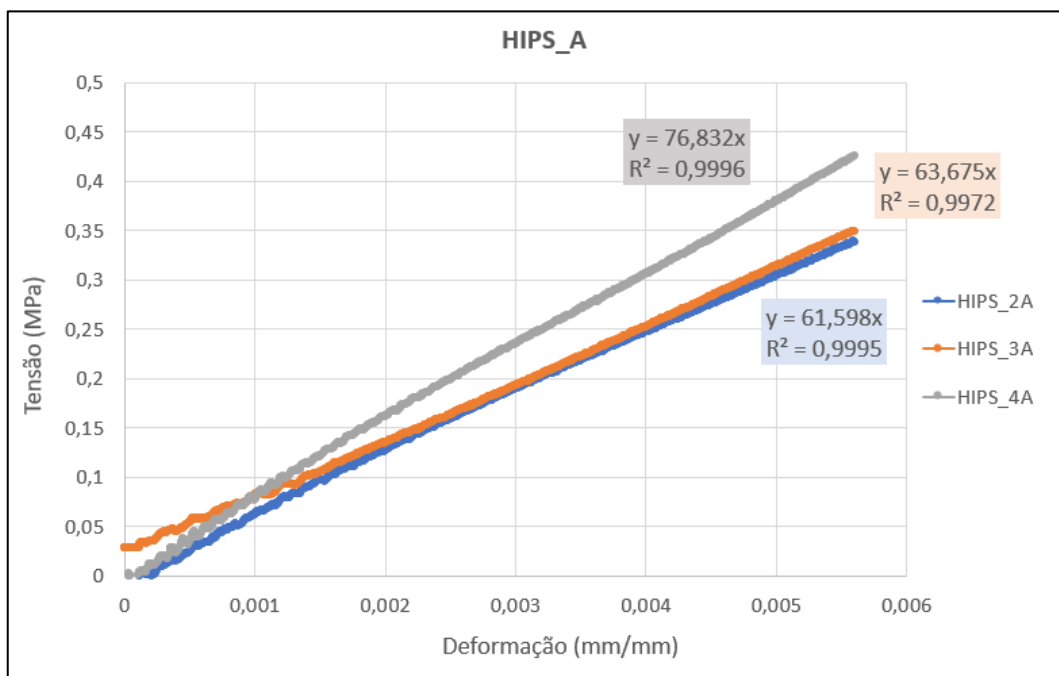
Por observação da Tabela 4.2, rapidamente se conclui que no caso do rPLA\_B chegou-se a um valor irrealista, visto que o coeficiente de *Poisson* não pode ultrapassar o valor unitário. Contudo, este valor vai continuar a ser apresentado neste estudo, mas tendo em atenção que é um valor que tem associado limitações experimentais e que, no máximo, será igual a 1 (valor limite).

## 4.2. Módulo de *Young*/ rigidez

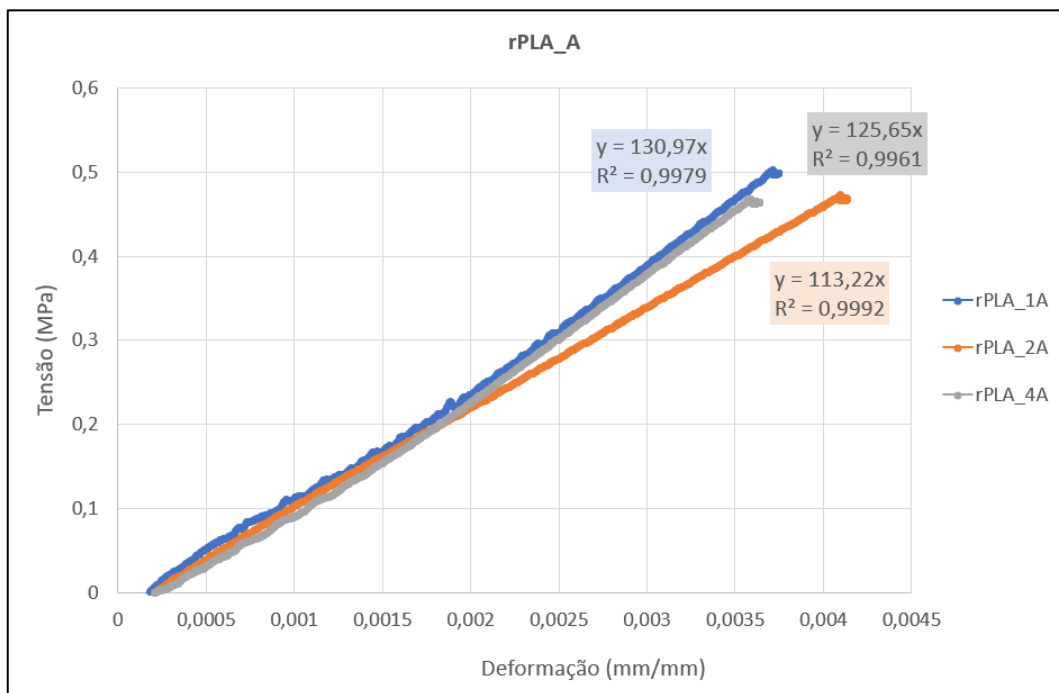
Para avaliar o valor do módulo de *Young* de cada uma das amostras foi necessário traçar a curva tensão-deformação, a partir dos valores da força e deslocamento, em função do tempo, disponibilizados pelo *software*.

Nas Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 encontram-se apresentadas as curvas de tensão-deformação para cada uma das amostras, consoante o material e a estrutura (HIPS\_A,

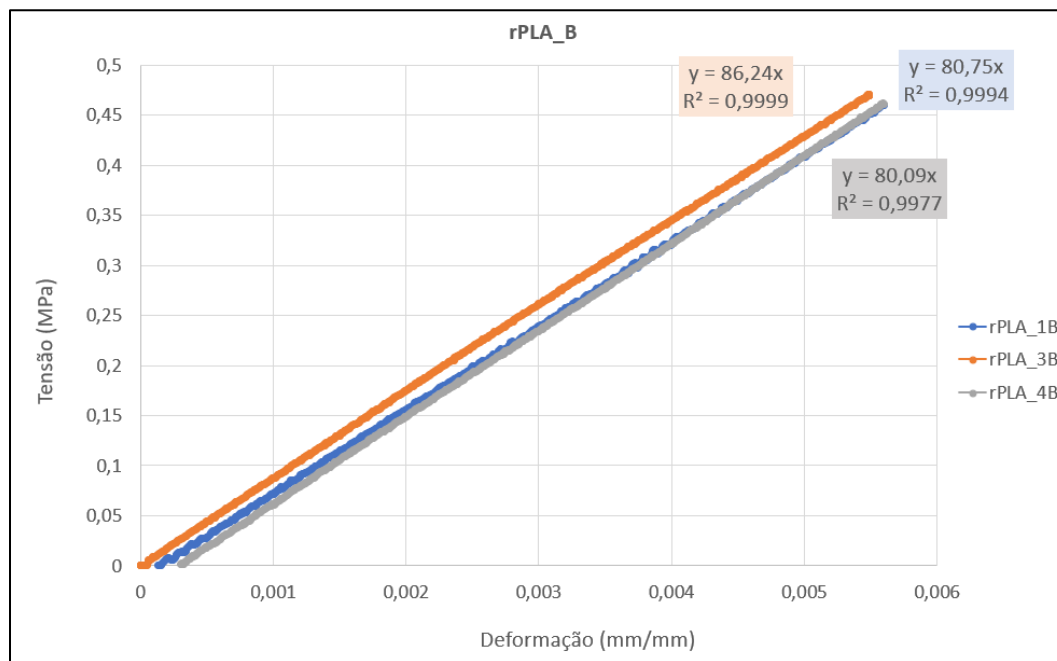
rPLA\_A e rPLA \_B, respetivamente). Note-se que está apresentado o valor do  $R^2$ , sendo este sempre próximo de 0,99, o que significa que não existe grande dispersão de valores.



**Figura 4.1.** Curva tensão-deformação das Amostras HIPS\_A.



**Figura 4.2.** Curva tensão-deformação das Amostras rPLA\_A.



**Figura 4.3.** Curva tensão-deformação das Amostras rPLA\_B.

Por observação das Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 retira-se que a estrutura do tipo A parece ter um comportamento menos uniforme, quando comparada com a estrutura do tipo B. Esta conclusão é retirada, visto que, quer no rPLA\_A quer no HIPS\_A existir uma amostra com um comportamento diferente das outras: HIPS\_A4 e rPLA\_A2 parecem apresentar uma maior rigidez, quando comparadas com o resto das amostras do mesmo material e estrutura. Por outro lado, no caso do rPLA\_B, ambas as amostras parecem ter o mesmo comportamento, não existindo grande diferença nos resultados de cada uma.

Na Tabela 4.3 encontram-se apresentados os valores retirados das curvas de tensão-deformação, apresentadas nas Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3. Ao contrário do que aconteceu nos provetes, nestas amostras todos os valores obtidos foram considerados no valor da média e do desvio-padrão.

**Tabela 4.3.** Módulo de *Young* das Amostras de cada material e estrutura, em MPa.

	<b>HIPS_A</b>		<b>rPLA_A</b>		<b>rPLA_B</b>	
	HIPS_2A	61,60	rPLA_1A	130,97	rPLA_1B	80,75
	HIPS_3A	63,68	rPLA_2A	113,22	rPLA_3B	86,24
	HIPS_4A	76,83	rPLA_4A	125,65	rPLA_4B	80,09
<b>Média (MPa)</b>	67,37		123,28		82,36	
<b>Desvio-padrão (MPa)</b>	8,26		9,11		3,37	

Por fim, na Tabela 4.4, encontra-se sumariamente os valores do módulo de *Young* obtidos e da rigidez.

**Tabela 4.4.** Módulo de *Young* das Amostras.

<b>Amostra</b>	<b>Módulo de <i>Young</i>, E (MPa)</b>	<b>Rigidez (GPa)</b>
<b>HIPS_A</b>	67,37 ± 8,26	2,90 × 10 <sup>-1</sup>
<b>rPLA_A</b>	123,28 ± 9,11	1,85
<b>rPLA_B</b>	82,36 ± 3,37	_____

Salienta-se, mais uma vez, que o valor do coeficiente de *Poisson* no caso do rPLA\_B é superior ao valor unitário, algo que não é realista. Deste modo, a rigidez daria um resultado impossível, ou seja, um valor negativo. Contudo, é relevante salientar que no caso limite, ou seja, no caso do coeficiente de *Poisson* ser igual ao valor unitário, a rigidez tenderá para o infinito. Assim, o rPLA\_B é a amostra que obteve uma maior rigidez.

### 4.3. Análise dos Resultados

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores presentes no artigo base Neto *et al.* (2010) [31], os valores numéricos obtidos na Subsecção 3.6 e os valores experimentais obtidos neste estudo. O objetivo será fazer uma breve comparação dos resultados.

**Tabela 4.5.** Tabela Comparativa

			<b>Coeficiente de Poisson</b>	<b>Rigidez (GPa)</b>
<b>Artigo</b>	<b>Estrutura A</b>		0,90	$1,58 \times 10^{-2}$
	<b>Estrutura B</b>		0,97	$0,42 \times 10^{-2}$
<b>Procedimento Teórico</b>	<b>Estrutura A</b>	<b>HIPS_A</b>	0,90	$2,25 \times 10^{-2}$
		<b>rPLA_A</b>	0,90	$2,47 \times 10^{-2}$
	<b>Estrutura B</b>	<b>HIPS_B</b>	0,97	$5,89 \times 10^{-3}$
		<b>rPLA_B</b>	0,96	$6,53 \times 10^{-3}$
<b>Procedimento Experimental</b>	<b>Estrutura A</b>	<b>HIPS_A</b>	0,88	$2,90 \times 10^{-1}$
		<b>rPLA_A</b>	0,97	1,85
	<b>Estrutura B</b>	<b>rPLA_B</b>	1,05 (irrealista)	—————

- **Coeficiente de Poisson**

Dos resultados expostos na Tabela 4.5, relativamente aos valores experimentais obtidos, é fácil de compreender que as estruturas produzidas em rPLA atingiram um coeficiente de *Poisson* superior às estruturas em HIPS.

Note-se ainda que, por análise das amostras em rPLA do procedimento experimental, a estrutura B possui um coeficiente de *Poisson* superior, contudo menos próximo do valor unitário, comparativamente com a estrutura A. A primeira conclusão vai de encontro ao que já se esperava, visto que nas simulações numéricas ocorreu o mesmo, isto é, a estrutura B leva a coeficientes de *Poisson* superiores.

Os três valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de *Poisson* das amostras, apesar de não serem exatamente iguais, são semelhantes aos valores de ambas as simulações numéricas efetuadas anteriormente.

Na Tabela 4.6 apresenta-se a variação percentual dos resultados obtidos em cada amostra, através do procedimento experimental, relativamente aos valores do artigo base e do procedimento teórico.

**Tabela 4.6.** Variação percentual dos resultados em relação aos valores do artigo e do procedimento teórico

	<b>HIPS_A</b>	<b>rPLA_A</b>	<b>rPLA_B</b>
<b>Artigo</b>	-2,22 %	7,78 %	8,25 %
<b>Procedimento Teórico</b>	-2,22 %	7,78 %	9,38 %

Pelos valores expostos na Tabela 4.6, conclui-se que as amostras em HIPS se aproximam mais dos valores do artigo, visto que têm uma menor variação percentual, tanto relativamente aos valores do artigo base Neto *et al.* [31], como relativamente aos valores do procedimento teórico. Para retirar mais conclusões relativamente à influência do material, poder-se-ia analisar a estrutura B também com material HIPS.

- **Rigidez**

Relativamente à rigidez das amostras, as que foram produzidas em material HIPS conduziram a estruturas menos rígidas, o que já era de esperar visto que este material tem um menor módulo de *Young* quando comparado com o rPLA.

Relativamente às estruturas, por análise das amostras em rPLA, conclui-se que a estrutura B, no caso limite do valor do coeficiente de *Poisson*, ou seja, quando este assume o valor unitário, tem uma rigidez superior à da estrutura A. Estes resultados são contrários ao que se esperava, visto que no artigo Neto *et al.* (2010) [31], a estrutura A obteve uma maior rigidez. Para se retirarem resultados mais conclusivos dever-se-ia analisar a estrutura B produzida em material HIPS.

Outra solução seria repetir os ensaios do rPLA\_B, pois poderá ter existido algum erro para tal acontecer. O coeficiente de *Poisson* desta amostra deu um valor não coerente

(superior ao valor unitário), levando a que a rigidez desta estrutura seja infinita ou, no caso limite (igual ao valor unitário), que a rigidez desta amostra seja superior à do rPLA\_A.

Mais uma vez as amostras em HIPS parecem voltar a aproximar-se mais dos valores do artigo base. Contudo, o rPLA leva a resultados mais interessantes a nível da rigidez visto que as estruturas serão mais rígidas, conseguindo assim suportar maiores esforços.



## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação teve como objetivo fazer um estudo comparativo de duas estruturas relativamente às suas propriedades, mais especificamente, o coeficiente de *Poisson* e a rigidez. Os valores das simulações numéricas que se tinha por base para este estudo eram os expostos no artigo Neto *et al.* [31].

Esta investigação iniciou com a escolha de dois materiais que apresentassem propriedades mecânicas parecidas às do material apresentado no artigo de comparação, tendo-se, assim, optado pelo HIPS (*High Impact Polystyrene*) e pelo rPLA (*Recycled Polylactic Acid*). Após a realização de estudos numéricos recorrendo ao programa VAMUCH, foi possível comprovar que estes materiais seriam adequados para esta dissertação. Usando a Impressão 3D, pela tecnologia FFF, imprimiram-se os materiais com as estruturas a serem avaliadas. Assim, produziram-se amostras com a estrutura A em HIPS e em rPLA e amostras com a estrutura B em rPLA.

Após a impressão dos materiais, e, conseqüentes, ensaios experimentais, obtiveram-se os valores do coeficiente de *Poisson*, do módulo de *Young* e da rigidez de cada uma das amostras. As conclusões deste estudo são apresentadas de seguida, fazendo-se algumas sugestões para possíveis melhorias e/ou trabalhos futuros de modo a aprofundar melhor este tema.

### 5.1. Conclusões

Através desta dissertação, de carácter experimental, torna-se relevante salientar as seguintes conclusões retiradas deste estudo:

#### 1) Coeficiente de *Poisson*

- As amostras impressas em rPLA apresentaram valores de coeficientes de *Poisson* superiores aos apresentados pelas amostras impressas em HIPS;

- As amostras, em rPLA, com a estrutura B obtiveram um valor de coeficiente de *Poisson* superior às amostras com a estrutura A. Contudo, o valor obtido com a estrutura B não é realista, visto ser superior a 1;
- Os valores de coeficiente de *Poisson* obtidos foram de encontro aos valores expostos no artigo e aos valores das simulações numéricas efetuadas para estes materiais. Contudo, a utilização de HIPS como material de impressão, parece conduzir a resultados mais semelhantes aos valores apresentados no artigo de base.

## 2) Módulo de Young

- As amostras impressas em rPLA atingiram valores de módulos de *Young* superiores quando comparadas com as amostras impressas em HIPS. Esta conclusão já era expectável visto que o rPLA tem um módulo de *Young* superior;
- As amostras com a estrutura B produzidas, em rPLA, obtiveram um módulo de *Young* inferior às amostras com a estrutura A.

## 3) Rigidez

- As amostras impressas em rPLA atingiram uma rigidez superior quando comparadas com as amostras em HIPS, algo já expectável visto que o módulo de *Young* também era superior;
- As amostras em rPLA com a estrutura B obtiveram uma rigidez superior às amostras com a estrutura A. Para esta conclusão foi considerado o valor limite do coeficiente de *Poisson* (valor unitário) para a Estrutura B, que levaria a uma rigidez infinita;
- Os valores da rigidez obtidos neste estudo não foram de encontro aos valores expostos no artigo, pois neste a estrutura A levaria a uma rigidez superior. Contudo, quase todos os valores se aproximaram da gama de valores do artigo de base, sendo que em geral a rigidez obtida foi superior, levando a estruturas mais rígidas e, por conseguinte, que aguentam maiores esforços.

## 5.2. Sugestões

Após a realização desta dissertação surgem algumas sugestões para trabalhos futuros ou possíveis melhorias para aprofundar melhor este tema:

- Repetição dos ensaios experimentais das amostras em rPLA\_B, de modo a se obterem resultados mais precisos;
- Uso do material HIPS para a estrutura B, conseguindo-se assim fazer uma melhor comparação com os valores presentes no artigo e tirar conclusões mais concretas;
- Realização de testes com outros materiais poliméricos, de modo a conseguir-se entender quão influente é o material nas propriedades finais das estruturas, mais concretamente no valor do coeficiente de *Poisson* e da rigidez;
- Desenvolvimento do estudo aqui apresentado, mas com estruturas alternativas e com dimensões diferentes às escolhidas para este trabalho.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- [2] ISO/ASTM, “ISO/ASTM 52900:2015 Additive manufacturing — General principles — Terminology.” 2015.
- [3] “Hybrid Manufacturing Technologies,” *Hybrid Manufacturing Technologies Ltd.* 2015, [Online]. Available: <http://www.hybridmanutech.com/>.
- [4] L. D. Sturm, C. B. Williams, J. A. Camelio, J. White, and R. Parker, “Cyber-physical vulnerabilities in additive manufacturing systems: A case study attack on the.STL file with human subjects,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 44, pp. 154–164, 2017.
- [5] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, “Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing,” *Chem. Rev.*, vol. 117, no. 15, pp. 10212–10290, 2017.
- [6] J. W. Stansbury and M. J. Idacavage, “3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities,” *Dent. Mater.*, vol. 32, no. 1, pp. 54–64, 2016.
- [7] T. Martins, “Influência dos parâmetros de fabrico nas propriedades mecânicas de peças obtidas por impressão 3D com um único material,” Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2017.
- [8] Z. Hay, “Best 3D Printing Temperatures for PLA, TPU, ABS, & More,” *All3Dp.Com.* 2021, [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/the-best-printing-temperature-for-different-filaments/>.
- [9] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, “Mechanical characterization of 3D-printed polymers,” *Addit. Manuf.*, vol. 20, pp. 44–67, 2018.
- [10] A. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, “Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 287–295, 2010.
- [11] D. Machado, “Desenvolvimento de impressora 3D para caracterização dos efeitos de parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do PEEK,” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2019.
- [12] S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,” *Emerald - Rapid Prototyp.*, vol. 8, no. 4, pp. 248–257, 2002.
- [13] Simplify3D, “Materials Guide.” [Online]. Available:

<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>.

- [14] S. T. C.V. Pious, *Polymeric Materials - Structure, Properties and Application*. 2016.
- [15] C. Z. Zhisheng Yu, Yang Li, Zhongfu Zhao, Chaoxian Wang, Juan Yang and Y. W. Zhansheng Li, “Effect of Rubber Types on Synthesis, Morphology, and Properties of ABS Resins,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 49, pp. 1–10, 2009.
- [16] P. C. Dromel and D. Singh, “Biomanufacturing,” in *3D Printing in Medicine and Surgery*, 2021, pp. 137–170.
- [17] M. A. Elsayy, K. H. Kim, J. W. Park, and A. Deep, “Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 1346–1352, 2017.
- [18] R. Kumar and R. Singh, “On the 3D printing of recycled ABS , PLA and HIPS thermoplastics for structural applications,” *PSU Res. Rev.*, vol. 2, no. 2, pp. 115–137, 2018.
- [19] M. T. Masood, J. A. Heredia-Guerrero, L. Ceseracciu, F. Palazon, A. Athanassiou, and I. S. Bayer, “Superhydrophobic high impact polystyrene (HIPS) nanocomposites with wear abrasion resistance,” *Chem. Eng. J.*, vol. 322, pp. 10–21, 2017.
- [20] R. Singh, R. Kumar, I. Farina, F. Colangelo, L. Feo, and F. Fraternali, “Multi-material additive manufacturing of sustainable innovative materials and structures,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 62, pp. 1–14, 2019.
- [21] J. Lee, J. An, and C. K. Chua, “Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,” *Appl. Mater. Today*, vol. 7, pp. 120–133, 2017.
- [22] J. K.-L. and H. J. Agnieszka Harynska, Iga Gubanska, “Fabrication and Characterization of Flexible Medical-Grade TPU Filament for Fused Deposition,” *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 1304, pp. 1–19, 2018.
- [23] S. Wojtyła, P. Klama, and T. Baran, “Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon,” *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 14, no. 6, pp. D80–D85, 2017.
- [24] Stratasys, “3D Printing & Additive Manufacturing.” [Online]. Available: <https://www.stratasys.com/>.
- [25] W. Yu and T. Tang, “Variational asymptotic method for unit cell homogenization of periodically heterogeneous materials,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 11–12, pp. 3738–3755, 2007.
- [26] W. Yu, “VAMUCH Manual for Users,” pp. 1–26, 2012.
- [27] Z. Dimitrovová, “Comportamento Mecânico dos materiais - Cap.3,” in *Sebenta da Disciplina RM-LEG*, 2018.
- [28] A. D. M. Santos, “Otimização das propriedades elásticas de materiais compósitos de microestrutura periódica,” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [29] A. P. B. M. Amaro, M. A. Neto, and J. M. O. S. Cirne, “Resistência de Materiais

- Parte II,” in *Apontamentos de apoio às disciplinas de Resistência de Materiais*, 2017.
- [30] K. A. M. D. da Silva, “Análise do envelhecimento acelerado de polímeros,” Universidade de Aveiro, 2017.
- [31] M. A. Neto, W. Yu, T. Tang, and R. Leal, “Analysis and optimization of heterogeneous materials using the variational asymptotic method for unit cell homogenization,” *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 12, pp. 2946–2954, 2010.
- [32] D. Fujii, B. C. Chen, and N. Kikuchi, “Composite material design of two-dimensional structures using the homogenization design method,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 50, no. 9, pp. 2031–2051, 2001.
- [33] Correlated Solutions, “Correlated Solutions – VIC-3D.” [Online]. Available: <https://www.correlatedsolutions.com/vic-3d/>.
- [34] T. Baiôa, “Medição de micromovimentos em implantes endósseos pelo método de correlação de imagem digital tridimensional,” Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, 2013.
- [35] FlashForge 3D Printer, “Creator 3.” [Online]. Available: <http://en.flashforge.com/product-detail/1>.





## APÊNDICE A

Neste Apêndice apresentam-se os valores obtidos das deformações, longitudinais e transversais, dos provetes, através do sistema de correlação de imagem Vic-3D. As deformações longitudinais foram segundo o eixo y e as transversais segundo o eixo x. Com os valores destes dois parâmetros, foi possível calcular o valor do coeficiente de *Poisson*, estando este também apresentado.

Na Tabela A.1 são expostos os valores dos parâmetros anteriormente referidos correspondentes aos provetes em HIPS e na Tabela A.2 são apresentados os valores correspondentes aos provetes em rPLA.

**Tabela A.1.** Deformações dos provetes impressos em HIPS

Força (N)	Provete HIPS	Vic - Extensómetro			Vic - <i>Statistical</i>		
		$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$	$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$
200	HIPS_1	0,002806	-0,001209	0,430918	0,003117	-0,001213	0,389088
	HIPS_2	0,003015	-0,001152	0,381979	0,002923	-0,001159	0,396646
	HIPS_3	0,002881	-0,001126	0,390643	0,003270	-0,001155	0,353325
400	HIPS_1	0,006404	-0,002484	0,387901	0,006811	-0,002370	0,347995
	HIPS_2	0,006306	-0,002508	0,397633	0,006042	-0,002354	0,389563
	HIPS_3	0,006387	-0,002559	0,400601	0,007009	-0,002205	0,314569

**Tabela A.2.** Deformações dos provetes impressos em rPLA.

Força (N)	Provete rPLA	Vic - Extensómetro			Vic - Statistical		
		$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$	$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$
200	rPLA_1	0,002522	-0,000706	0,279823	0,002161	-0,000611	0,282830
	rPLA_2	0,002432	-0,000813	0,334275	0,002167	-0,000705	0,325318
	rPLA_3	0,002305	-0,000744	0,322530	0,002078	-0,000728	0,350127
400	rPLA_1	0,004657	-0,001411	0,302975	0,004169	-0,001438	0,344801
	rPLA_2	0,004592	-0,001471	0,320252	0,004220	-0,001435	0,340027
	rPLA_3	0,004347	-0,001477	0,339744	0,004049	-0,001402	0,346242

## APÊNDICE B

Neste Apêndice apresentam-se os valores obtidos das deformações, longitudinais e transversais das amostras, consoante o material (HIPS ou rPLA) e a estrutura (A ou B), através do sistema de correlação de imagem Vic-3D. As deformações longitudinais foram segundo o eixo  $y$  e as transversais segundo o eixo  $x$ . Com os valores destes dois parâmetros, será possível calcular o valor do coeficiente de *Poisson*, estando este também apresentado.

Na Tabela B.1 são apresentados os valores das deformações, longitudinais e transversais, com o respetivo valor do coeficiente de *Poisson* das amostras impressas em HIPS com a estrutura do tipo A.

Da Figura B.1 à Figura B.7 encontram-se os resultados dos valores das deformações dados pelo sistema de correlação de imagem Vic-3D, de algumas amostras impressas em rPLA com a estrutura A. Na Tabela B.2 são apresentados os valores das deformações, longitudinais e transversais, com o respetivo valor do coeficiente de *Poisson*.

Da Figura B.8 à Figura B.11 encontram-se os resultados dos valores das deformações dados pelo sistema de correlação de imagem Vic-3D, de algumas amostras impressas em rPLA com a estrutura B. Na Tabela B.3 são apresentados os valores das deformações, longitudinais e transversais, com o respetivo valor do coeficiente de *Poisson*.

Note-se que os valores apresentados nas tabelas são as médias das deformações. Isto é, o sistema de correlação Vic-3D calcula as deformações, tanto longitudinais como transversais, em diferentes partes da área de interesse, fazendo de seguida a média desses valores.

• **HIPS\_A**

Tabela B.1. Deformações das amostras impressas em HIPS com a estrutura tipo A.

Força (N)	Amostra HIPS_A	Vic - Extensómetro			Vic - <i>Statistical</i>		
		$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$	$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$
40	HIPS_A2	0,006889	-0,006609	0,959285	0,001375	-0,000638	0,464262
	HIPS_A2	0,005920	-0,004790	0,809156	0,001511	-0,000355	0,059913
	HIPS_A4	0,004936	-0,004133	0,837394	0,001217	-0,000455	0,374134
80	HIPS_A2	0,020503	-0,019883	0,969794	0,003892	-0,001190	0,305716
	HIPS_A2	0,013355	-0,011123	0,832892	0,003116	-0,001259	0,404204
	HIPS_A4	0,012478	-0,010600	0,849536			

• **rPLA\_A**

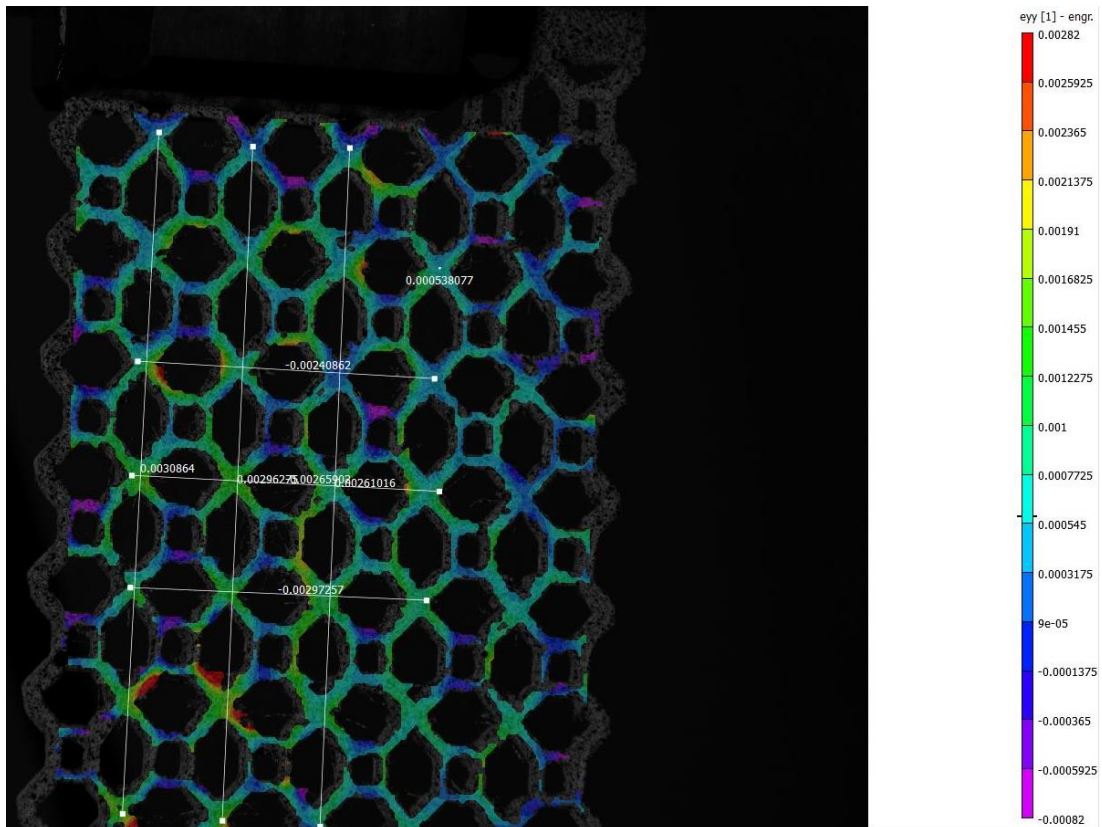


Figura B.1. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA\_A1, para uma força de 40 N.

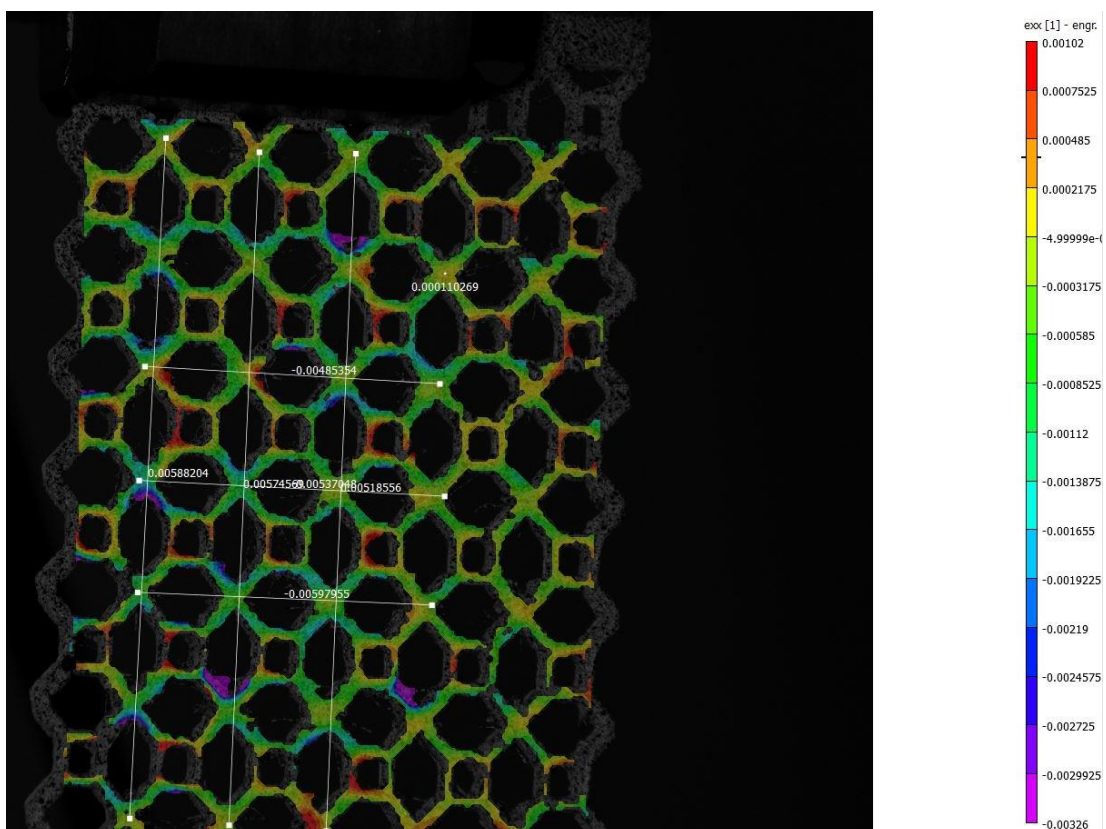


Figura B.2. Deformação segundo o eixo x da amostra rPLA\_A1, para uma força de 80 N.

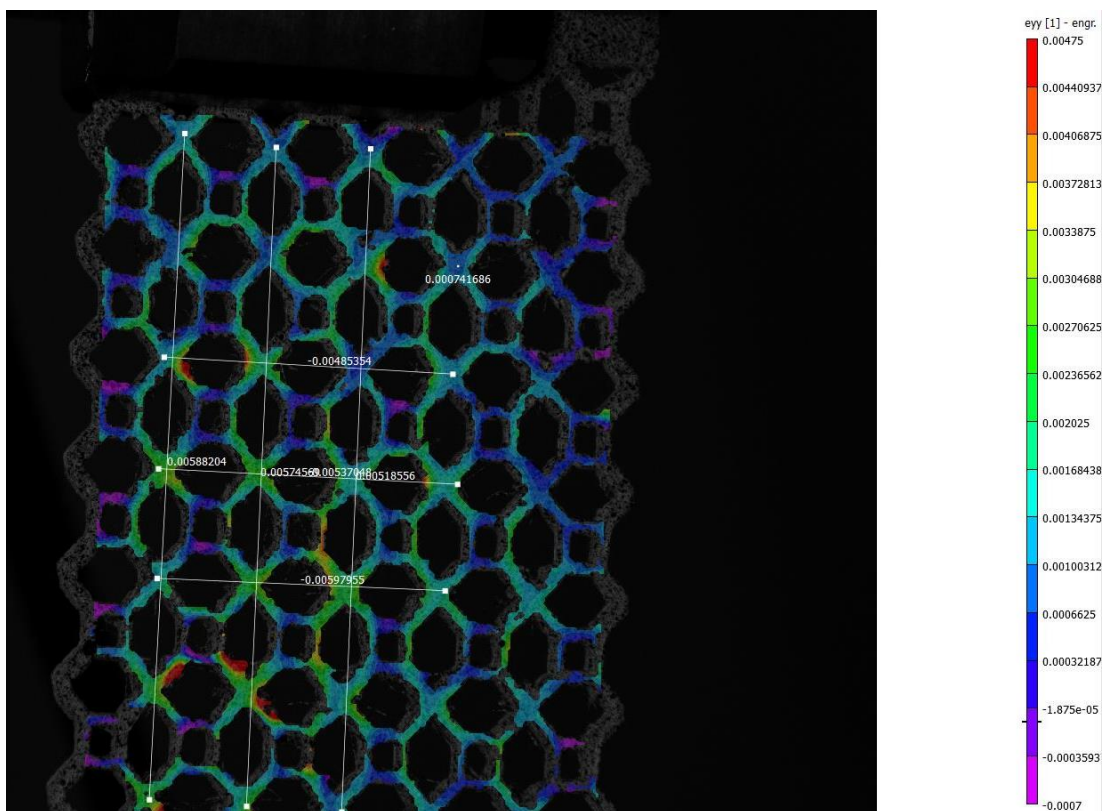


Figura B.3. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA\_A1, para uma força de 80 N.

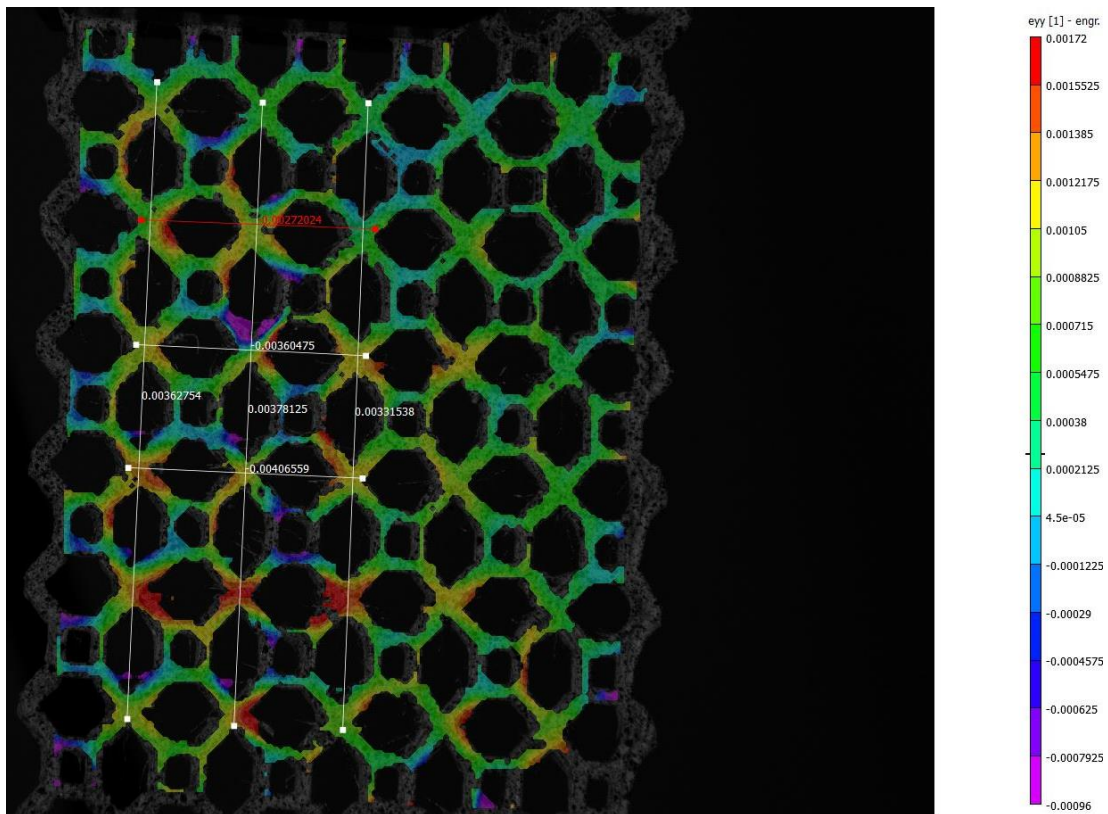


Figura B.4. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA\_A2, para uma força de 40 N.

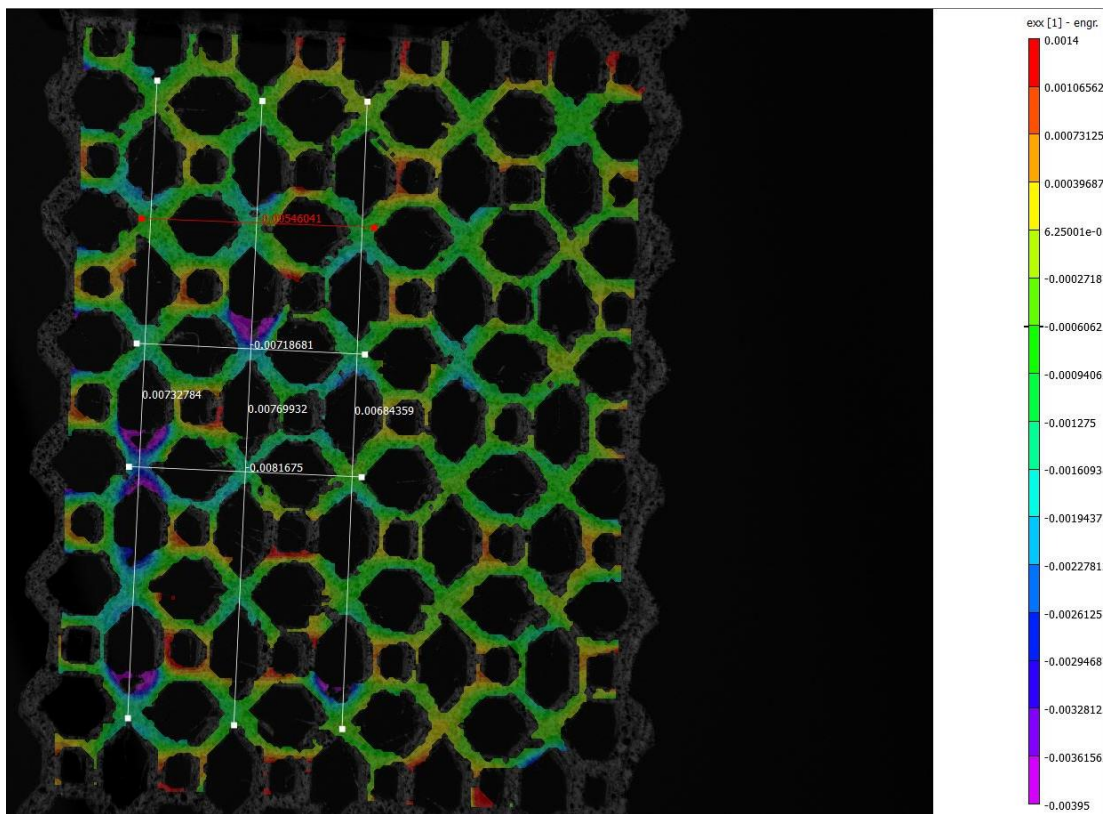


Figura B.5. Deformação segundo o eixo x da amostra rPLA\_A2, para uma força de 80 N.

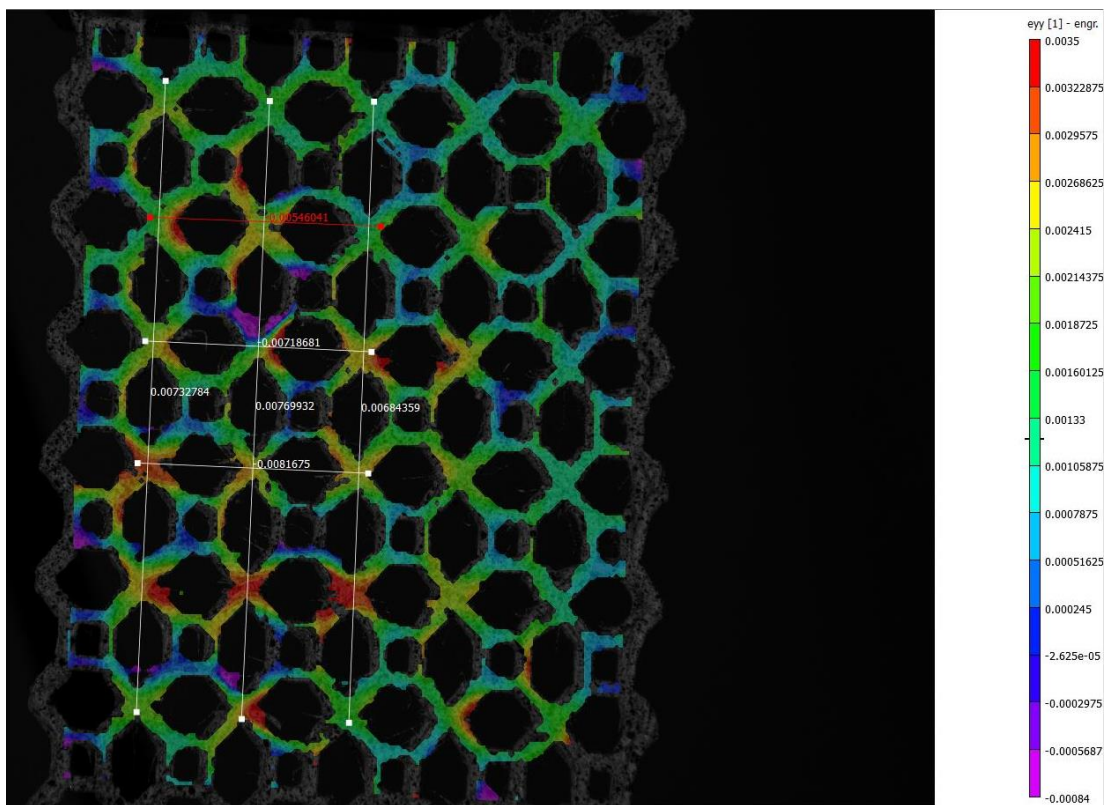


Figura B.6. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA\_A2, para uma força de 80 N.

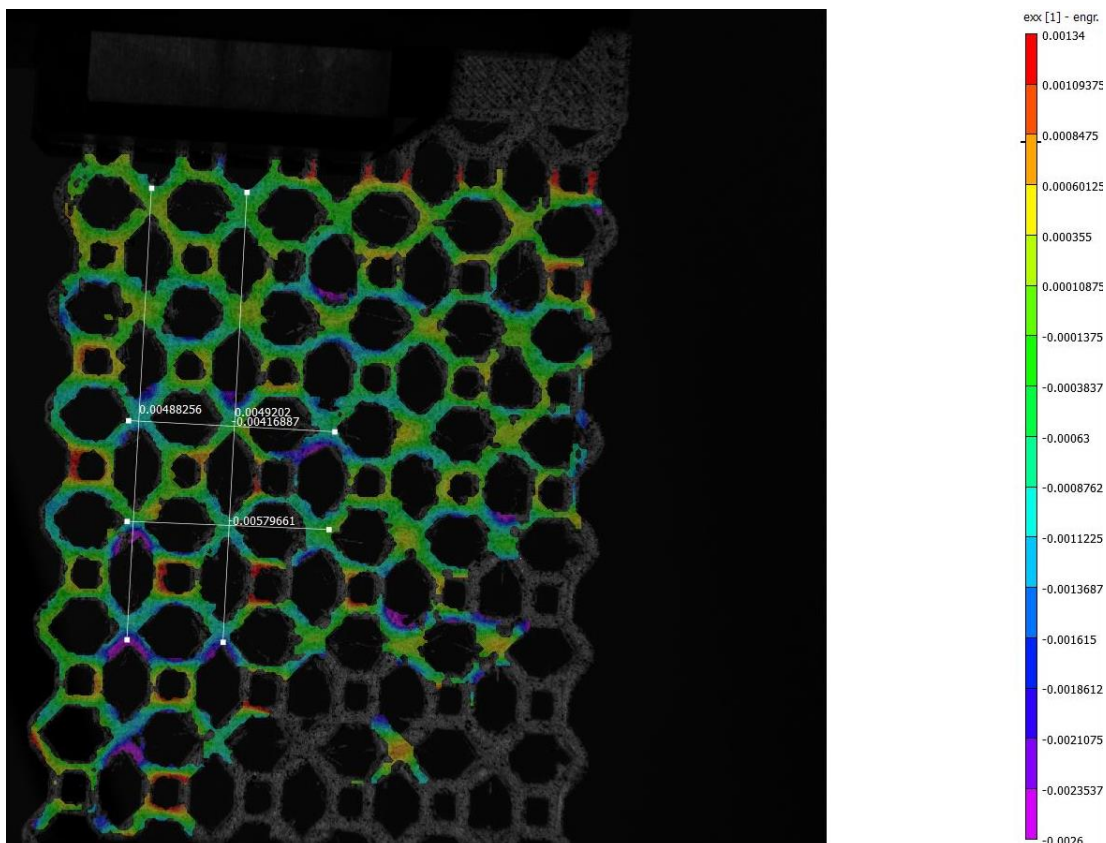


Figura B.7. Deformação segundo o eixo x da amostra rPLA\_A4, para uma força de 80 N.

Tabela B.2. Deformações das amostras impressas em rPLA com a estrutura tipo A.

Força (N)	Amostra rPLA_A	Vic - Extensômetro			Vic - <i>Statistical</i>		
		$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$	$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$
40	rPLA_A1	0,002886	-0,002680	0,928505	0,000679	-0,000291	0,428882
	rPLA_A2	0,003575	-0,003464	0,968894	0,000593	-0,000348	0,586143
	rPLA_A4	0,002549	-0,002465	0,966990	0,000770	-0,000102	0,132647
80	rPLA_A1	0,005604	-0,005401	0,963736	0,001381	-0,000505	0,365398
	rPLA_A2	0,007290	-0,006938	0,951681	0,001470	-0,000702	0,477884
	rPLA_A4	0,004901	-0,004983	1,016599	0,001389	-0,000434	0,312766

• rPLA\_B

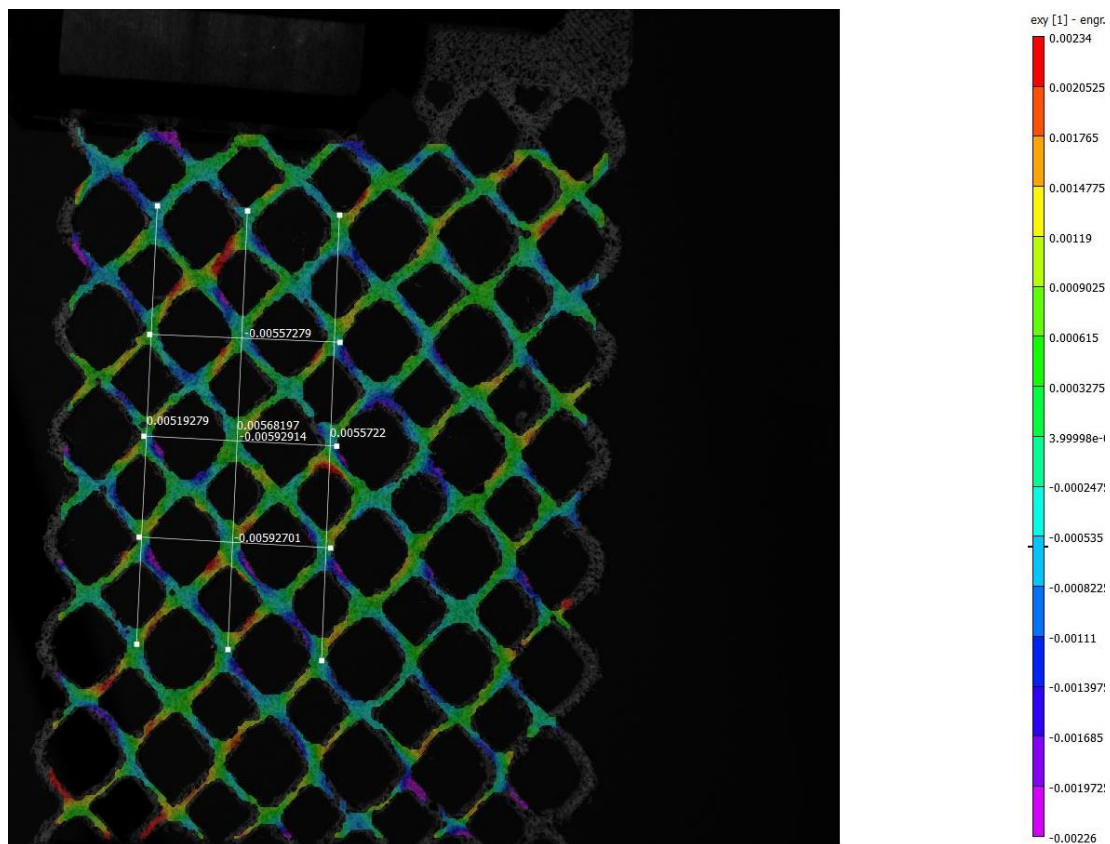


Figura B.8. Deformação segundo o eixo x e y da amostra rPLA\_B1, para uma força de 40 N.



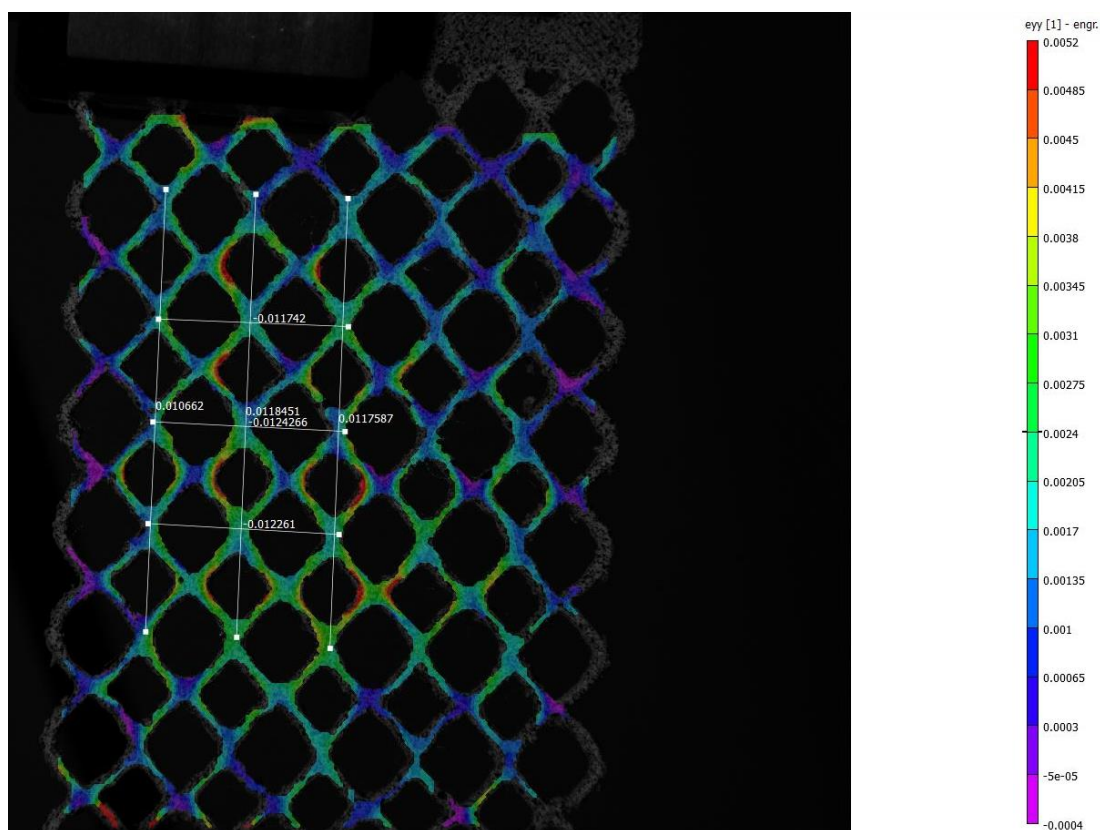


Figura B.9. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA\_B1, para uma força de 80 N.

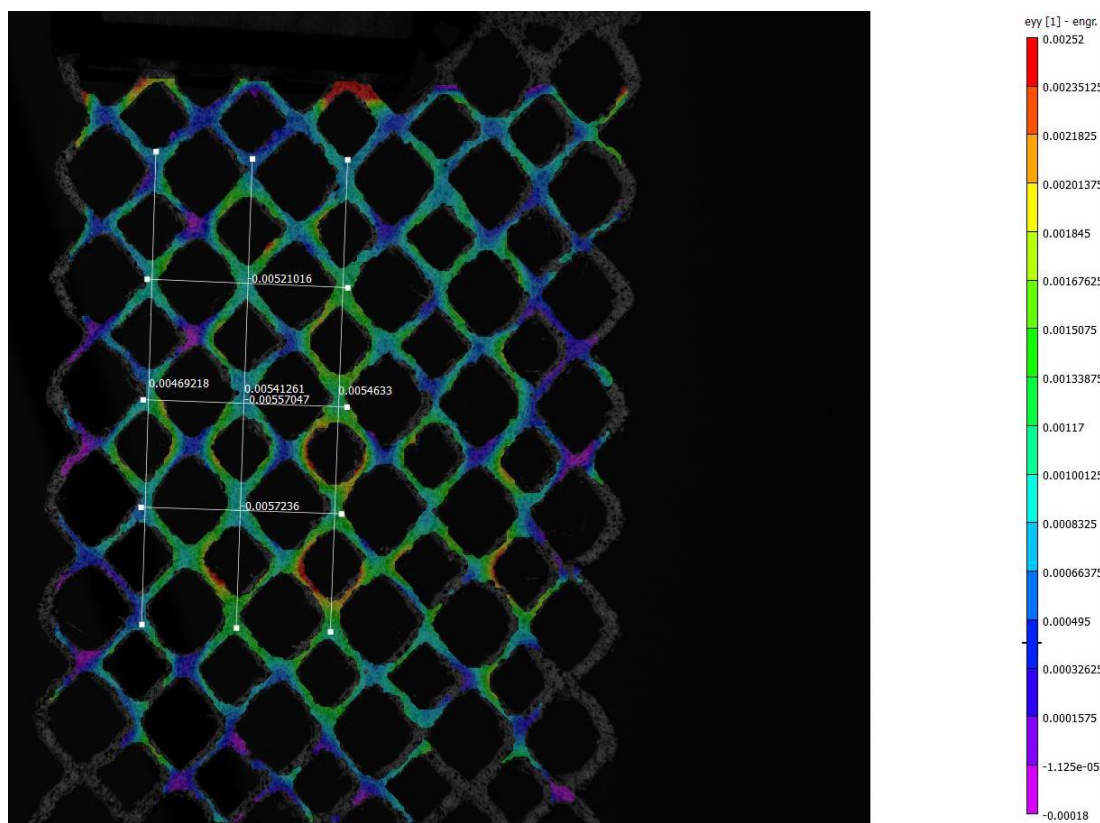


Figura B.10. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA\_B3, para uma força de 40 N.

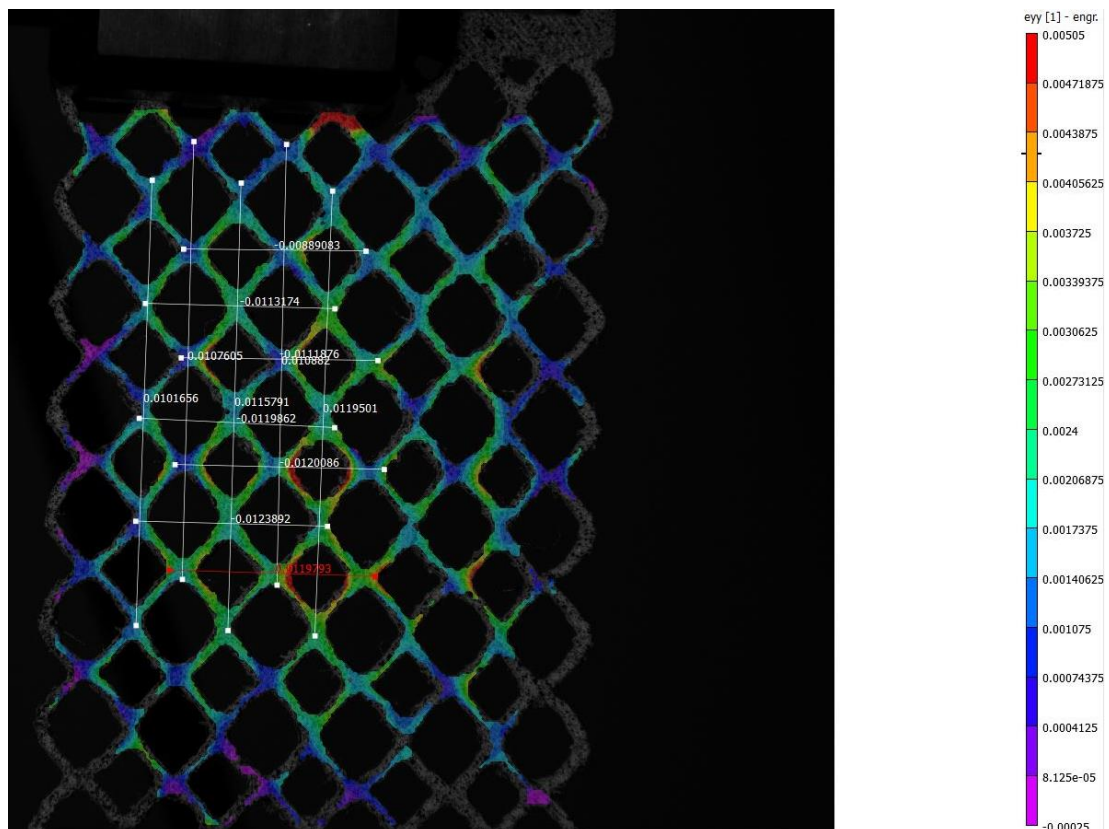


Figura B.11. Deformação segundo o eixo y da amostra rPLA\_B3, para uma força de 80 N.

Tabela B.3. Deformações das amostras impressas em rPLA com a estrutura tipo B.

Força (N)	Amostra rPLA_B	Vic - Extensómetro			Vic - Statistical		
		$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$	$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{xx}$	$\nu$
40	rPLA_B1	0,005482	-0,005810	1,059835	0,000825	-0,000466	0,564408
	rPLA_B3	0,005189	-0,005503	1,060508	0,000924	-0,000406	0,439162
	rPLA_B4	0,005107	-0,005108	1,000215	0,000918	-0,000255	0,277409
80	rPLA_B1	0,011422	-0,012143	1,063148	0,001819	-0,000802	0,440743
	rPLA_B3	0,011232	-0,011898	1,059297	0,001910	-0,000786	0,411860
	rPLA_B4	0,010385	-0,010838	1,043656	0,001695	-0,000709	0,418401