



**Dina José Guerra
Gamelas**

**Desenvolvimento de estruturas impressas por
fabrico por filamento fundido com capacidade de
alteração de forma (Impressão 4D)**



**Dina José Guerra
Gamelas**

**Desenvolvimento de estruturas impressas por fabrico
por filamento fundido com capacidade de alteração
de forma (Impressão 4D)**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Fernando Santos Neto, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Este trabalho foi apoiado pelos projetos UIDB / 00481/2020 e UIDP / 00481/2020 --FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia; e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro Portugal (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria PORTUGAL 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

o júri

Presidente

Professor Doutor João Alexandre Dias de Oliveira
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Professora Doutora Ana Paula da Fonseca Piedade
Professora Auxiliar, Universidade de Coimbra

Professor Doutor Victor Fernando Santos Neto
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço à minha família e amigos pelo apoio incondicional e, de igual forma, a todos os envolvidos na elaboração deste estudo.

palavras-chave

Impressão 4D, Impressão 3D, FFF, Termoplástico, Memória de Forma, Anisotropia, DoE, Microestrutura.

resumo

A impressão 4D por Fabrico de Filamento Fundido (FFF) surge como uma vertente do fabrico aditivo. O nome 4D refere-se à componente temporal, uma vez que o objeto impresso sofre uma alteração de forma, função ou propriedade, quando submetido a um estímulo, neste caso um aumento de temperatura. Alguns dos aspetos explorados neste estudo são o efeito da memória de forma, a formação das tensões internas, bem como os parâmetros de impressão que mais afetam o seu armazenamento e, por último, as estratégias de impressão que melhor permitem controlar o efeito de deformação pretendido. Partindo desta base, é feito um estudo experimental a fim de determinar quais as condições ideais para a obtenção de deformações intensas. Posteriormente, é explorada a conceção e fabrico por FFF de dois objetos 4D com complexidades distintas (desenvolvendo uma estratégia que permite a obtenção de um gradiente de deformação). A análise dos resultados salienta o facto de as mudanças de escala terem impacto nas deformações finais obtidas, devido à complexidade inerente ao processo tecnológico em estudo.

keywords

4D printing, 3D printing, FFF, Thermoplastic, Shape Memory Effect, Anisotropy, DoE, Microstructure.

abstract

Fused Filament Fabrication (FFF) of 4D objects appears as a variant of additive manufacturing. The name 4D refers to the temporal component since the printed object undergoes a shape, function or structure change when subjected to a stimulus, in this case an increase in temperature. Some of the aspects explored in this study are the shape memory effect, the formation of internal stress as well as the printing parameters that most affect its storage and lastly the printing strategies that best allow the control of the desired deformation effect. Based on this, an experimental study is carried out to determine which are the ideal conditions for obtaining intense deformations. Subsequently, the *design* and manufacture by FFF of two 4D objects with different complexities is explored, (by developing a printing strategy that allows the obtention of a gradient of deformation). The analysis of the results highlights the fact that changes in scale have impact in the final deformations obtained, due to the complexities inherent to the technology in study.

Índice

Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas.....	11
Nomenclatura.....	12
1. Introdução.....	13
1.1 Motivação	13
1.2 Estrutura.....	13
2. Estado da Arte	14
2.1 Fabrico por Filamento Fundido	14
2.2 Impressão 3D.....	14
2.3 Impressão 4D	15
2.4 Termoplástico.....	16
2.5 Memória de forma.....	18
2.6 Formação das tensões internas	19
2.7 Modelo Viscoelástico	22
2.8 Deformação Anisotrópica.....	24
2.9 Deformação Homogénea.....	26
2.10 Estratégias de impressão 4D.....	28
2.10.1 Estratégia Linear	28
2.11 Sumário	32
3. Procedimento Experimental Preliminar e Discussão	33
3.1 <i>Design of Experiments (DoE)</i>	33
3.2 Análise de resultados.....	39
3.3 Sumário	40
4. Casos de estudo e Discussão.....	41
4.1 Introdução.....	41
4.2 Planeamento.....	43
4.3 Preparação para Impressão	47
4.4 Processo de Impressão	53
4.4.1 Condições de impressão melhoradas.....	58
4.5 Ativação dos Provetes	59
4.5.1 Preparação.....	59
4.5.2 Ativação	60
4.5.3 <i>Redesign</i>	63
4.5.4 Segunda etapa de ativação	65
4.6 Sumário	68

5.	Conclusões.....	69
6.	Bibliografia.....	71

Lista de Figuras

Figura 1 - Comparação entre impressão 3D e 4D por FFF [3].	16
Figura 2 - Fases de transição de um termoplástico semi-cristalino. Adaptado de: [3].	17
Figura 3 - Representação do processo de memória de forma.	19
Figura 4 - Formação das tensões internas durante a extrusão de um filamento.	20
Figura 5 - Efeito do relaxamento térmico.	21
Figura 6 - Filamentos de PLA transparente com (A) e sem (B) relaxamento térmico.	21
Figura 7 - Representação do modelo visco elástico associado ao processo de impressão. Adaptado de: [11].	22
Figura 8 - Tipo de Impressão Longitudinal e Transversal. Adaptado de: [10].	24
Figura 9 - Deformação térmica de barras homogêneas [10].	24
Figura 10 - Barra com impressão heterogênea [10].	25
Figura 11 - Deformação anisotrópica.	25
Figura 12 - Efeito da variação de espessura das camadas. Adaptado de: [4].	26
Figura 13 - Impressão Longitudinal.	27
Figura 14 - Impressão Transversal.	27
Figura 15 - Exemplos de fixação: a) perna da cadeira. b) gancho [4].	28
Figura 16 - Dobragem ortogonal e diagonal [4].	29
Figura 17 - Efeito da mudança de escala [4].	30
Figura 18 - Caminho de impressão geodésico. Adaptado de: [12].	30
Figura 19 - Perfis de deformação de superfícies contínuas. Adaptado de: [12].	31
Figura 20 - Pulseiras com ligações rígidas e flexíveis [12].	31
Figura 21 - Aplicações do projeto geodesy. Adaptado de: [12].	32
Figura 22 - Pré-visualização das camadas impressas.	34
Figura 23 - Antevisão do conjunto impresso.	34
Figura 24 - Provetes de PLA da experiência A.	35
Figura 25 - Medição do ângulo.	36
Figura 26 - Geometria complexa: Papercraft Chair - Shiwori Studio [14].	42
Figura 27 - Conceito em papel e respetiva planificação da cadeira/geometria simples [15].	42
Figura 28 - Legenda para leitura das tabelas 5 e 6.	43
Figura 29 - Planificação da geometria complexa.	47
Figura 30 - Planificação da geometria simples.	47
Figura 31 - Definição de propriedades da sobreposição.	48
Figura 32 - Definição das propriedades para as secções sem deformação.	48

Figura 33 - Definição das características de adesão.	49
Figura 34 - Estratégia de impressão para a geometria simples.	49
Figura 35 - Orientações visualizadas na última camada.	50
Figura 36 - Estratégia de impressão da geometria simples.	51
Figura 37 - Detalhes de orientação na última camada.	51
Figura 38 - Detalhe de impressão.....	52
Figura 39 - Detalhes da geometria complexa.....	52
Figura 40 - Provete com falhas de impressão.	54
Figura 41 - Detalhes de impressão exemplificativos dos principais obstáculos encontrados.	54
Figura 42 - Provete com qualidade melhorada em padrão <i>Zig Zag</i>	55
Figura 43 - Provete impresso com outro filamento.....	55
Figura 44 - Provete da geometria simples.....	56
Figura 45 - Provete passível de ser testado.....	56
Figura 46 - Efeito da densidade no processo de ativação. Adaptado de: [4].....	59
Figura 47 - Impressão simples no estado de pré-ativação.....	60
Figura 48 - Impressão complexa no estado de pré-ativação.	60
Figura 49 - Impressão simples no estado de pós-ativação.....	61
Figura 50 - Geometria complexa ativada com identificação de zonas de deformação.	62
Figura 51 - Esquematização de considerações e observações da zona B.....	63
Figura 52 - Impressão complexa no estado pós-ativação.	63
Figura 53 - <i>Redesign</i> da geometria simples.....	64
Figura 54 - <i>Redesign</i> da geometria complexa.	65
Figura 55 - <i>Redesign</i> das geometrias ativado.	66
Figura 56 - <i>Redesign</i> da geometria simples ativado.	67
Figura 57 - Detalhe em arco do <i>redesign</i> ativado da geometria complexa.	67

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Termoplásticos e respectivas T_v e T_f [6].	17
Tabela 2 - <i>Design of Experiments</i> .	35
Tabela 3 – Média dos ângulos medidos e respetivo desvio padrão.	36
Tabela 4 - Medições da experiência A.	37
Tabela 5 - Medições da experiência B.	37
Tabela 6 - Medições da experiência C.	38
Tabela 7 - Medições da experiência D.	38
Tabela 8 - Planeamento da geometria simples.	43
Tabela 9 - Planeamento da geometria complexa.	45
Tabela 10 - Falhas e respetivas correções.	57

Nomenclatura

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
AM	Fabrico aditivo (do inglês "Additive Manufacturing")
CAD	Desenho auxiliado por Computador (do inglês "Computer-aided design")
DoE	Design of Experiments
E	Módulo de elasticidade ou Young
FDM	Modelação por Deposição de Material Fundido (do inglês "Fused Deposition Modeling")
FFF	Fabrico por Filamento Fundido
ISO	Organização Internacional de Normalização (do inglês "International Organization for Standardization")
PETG	Copolimerização de Poli(tereftalato de etileno glicol)
PLA	Poli(ácido láctico)
PP	Polipropileno
Tv	Temperatura de transição vítrea
Tf	Temperatura de fusão
TPU	Poliuretana Termoplástica (do inglês "Thermoplastic polyurethane")
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
4D	Quadrimensional

1. Introdução

1.1 Motivação

A impressão 4D surge a partir do fabrico aditivo e distingue-se pelo facto de os objetos obtidos por este processo poderem evoluir no tempo ao alterar a sua forma, aspeto ou função, quando expostos a um estímulo externo. Tem aplicações em áreas como a medicina, engenharia aeroespacial, indústria, entre outros. É algo inovador e muito promissor. Esse potencial apresenta-se nas vantagens que traz para o crescimento e otimização da tecnologia de produção, nomeadamente, a nível económico e ecológico, sendo esta uma das grandes preocupações da atualidade. Inovar e otimizar são objetivos constantes em qualquer área do conhecimento científico e participar dessa busca foi o que motivou a escolha deste tema.

1.2 Estrutura

Esta dissertação está dividida em quatro secções, começando com uma introdução onde se explica a motivação e a estruturação deste trabalho. Seguidamente, apresenta-se a componente expositiva dos fundamentos que explicam a impressão 4D. Baseada nesta exposição é explorada uma componente de investigação experimental através do método *Design of Experiments (DoE)*. De seguida, apresenta-se a componente de projeto, onde é planeada e executada a criação de duas geometrias conceptuais distintas, com diferentes graus de dificuldade e o desenvolvimento de uma estratégia que permite a obtenção de um gradiente de deformação, numa mesma secção sólida. Finalmente, apresentam-se as principais conclusões e perspetivas futuras de investigação.

2. Estado da Arte

Neste capítulo, serão explorados conceitos e princípios base que permitem compreender a impressão 4D. Começa-se por apresentar uma visão geral do assunto: impressão 3D; impressão 4D; termoplástico. Explicita-se, também, o conceito de memória de forma. Após a apresentação de conceitos são explorados alguns dos modelos teóricos existentes na literatura. Esta pesquisa inicia-se com a explicação da formação de tensões internas, a apresentação de um modelo viscoelástico e uma análise da geração das deformações anisotrópica e homogénea. Por último, são expostas duas estratégias de impressão que, de forma indireta, influenciaram o desenvolvimento da investigação que se apresenta nos capítulos seguintes.

2.1 Fabrico por Filamento Fundido

Existem vários processos de fabrico que permitem a obtenção de um objeto por camadas, estes denominam-se impressão 3D ou fabrico aditivo. Um desses processos é o fabrico por filamento fundido (FFF) que, como o nome indica, forma camadas a partir da extrusão de um filamento ao longo de um caminho de impressão.

É comum que um objeto obtido por FFF apresente distorções geométricas em relação à geometria original pretendida. Tal fenómeno deve-se, em grande parte, às diferenças de temperatura aquando e após a deposição do filamento [1]. Normalmente, procura-se minimizar este efeito controlando os parâmetros de impressão e é, precisamente, a partir do estudo deste fenómeno indesejado que surge a impressão 4D em FFF.

É importante esclarecer alguns conceitos, começando por explicar o que é, ao certo, a impressão 4D tendo como base a impressão 3D.

2.2 Impressão 3D

O fabrico aditivo, ou impressão 3D, anteriormente designada por prototipagem rápida, refere-se à construção de objetos 3D a partir da sobreposição de camadas de material e caracteriza-se por permitir uma rápida obtenção de objetos (3D) com geometrias complexas. No entanto, a velocidade de impressão de camada por

camada mostra ser uma desvantagem. Uma das variantes da impressão 3D é a impressão de microestruturas que, ao tirarem partido das propriedades dos materiais, podem adquirir a habilidade de evoluir de uma forma controlada no tempo. É esta alteração de forma, aspeto ou função de um objeto ao longo do tempo que define a impressão 4D. Este tipo de impressão foi desenvolvido com o intuito de criar objetos e estruturas com a capacidade de deformação, automontagem e autorreparação. Estas transformações podem ser relativas à cor, volume ou forma dos materiais e só ocorrem quando o objeto é submetido a um estímulo externo. Atualmente existem dois tipos de impressão 4D, por métodos de extrusão e por fotopolimerização. Os campos de aplicação da impressão 4D incluem a química, a ciência dos computadores, a ciência dos materiais e a medicina regenerativa (com a bioimpressão de tecidos, órgãos, nutrientes e outras bioestruturas) [1].

2.3 Impressão 4D

A impressão 4D surge a partir de um objeto conformado que, após ser submetido a um estímulo externo, altera a sua forma, estrutura, função ou propriedade. Portanto, a quarta dimensão a que o nome se refere é o tempo. Este efeito é alcançado através de materiais com características especiais, como a capacidade de memória de forma ou de compósitos inovadores, e da criação de caminhos de impressão, que permitem programar a forma como o objeto se irá transformar ao ser submetido a um estímulo. O estímulo pode ser de vários tipos, tais como a mudança de temperatura, um campo magnético ou um impulso elétrico [2].

É de prever que o 4D traga várias vantagens. Ao criar um objeto 1D, 2D ou 3D que só será ativado no local de utilização acoplando-se, por exemplo, sem a necessidade extra de processos e materiais de montagem. Outra mais valia será ao nível do transporte, pois um objeto plano é mais fácil de transportar do que com o seu respetivo volume funcional, pois o facto de ocupar menos espaço, permite transportar um maior número de produtos. No processo de fabrico poupa-se tempo e material de impressão, pois não são necessários suportes, típicos na impressão 3D de geometrias complexas, como demonstra a figura 1. Existe, ainda, o potencial do produto se adaptar às características do ambiente em que está inserido e efetuar autorreparações [3], [4]. De um modo geral, existe a possibilidade de reinventar a indústria dos produtos desde o seu fabrico, transporte, montagem e desempenho [5].

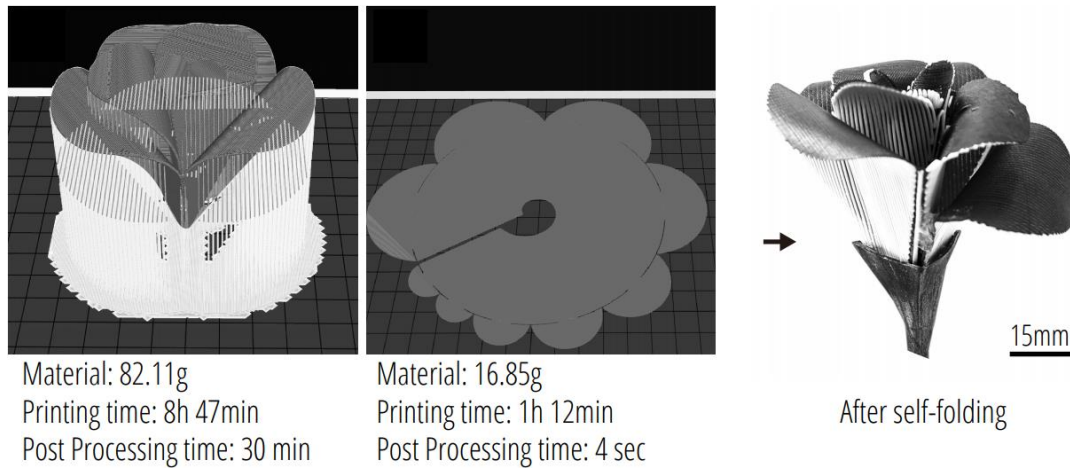


Figura 1 - Comparação entre impressão 3D e 4D por FFF [3].

A impressão 4D por FFF tira partido do *design* de caminhos complexos de impressão e, também, das propriedades termomecânicas (se o estímulo externo for a temperatura) que os termoplásticos apresentam.

2.4 Termoplástico

No caso do fabrico aditivo por FFF, os polímeros usados são os termoplásticos [1]. Os polímeros são constituídos por macromoléculas que exibem a repetição de uma unidade estrutural através de ligações covalentes e cujas ligações intermoleculares são secundárias.

A temperatura à qual o polímero deixa de ter um comportamento frágil e começa a apresentar um comportamento dúctil denomina-se temperatura de transição vítrea (T_v). Quando se atinge esta temperatura ocorrem mudanças ao nível da dureza, do volume livre e do módulo de Young. Este fenómeno está relacionado com o tipo de estrutura do polímero, isto é, a mobilidade da cadeia polimérica. Por exemplo, os polímeros amorfos, que possuem uma disposição molecular aleatória, não têm um ponto de fusão definido (T_f ou T_m), pois simplesmente degradam à medida que a temperatura aumenta e, por isso, apresentam apenas T_v . Já os semi-cristalinos apresentam uma estrutura molecular organizada com T_v e T_f definidas [6], [7].

O conjunto de temperaturas compreendidas entre T_v e T_f denomina-se faixa de transição e, entre estas temperaturas, o material apresenta um comportamento dúctil, portanto, o módulo de Young (E) reduz, tal como é indicado na figura 2. Na

imagem 2 também é indicado o comportamento rígido que o termoplástico apresenta abaixo da temperatura de transição vítrea, assim como o comportamento líquido que ocorre a temperaturas acima do ponto de fusão.

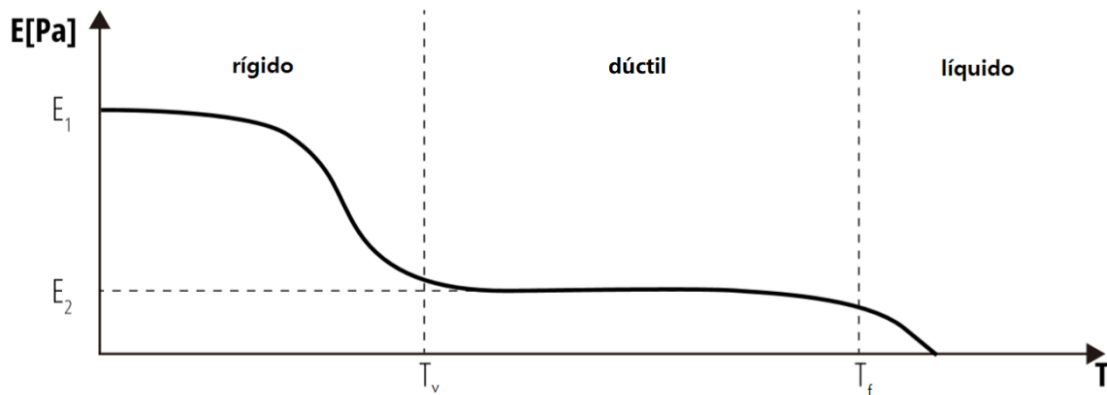


Figura 2 - Fases de transição de um termoplástico semi-cristalino. Adaptado de: [3].

Pode-se dizer que, aquilo que distingue estas duas temperaturas é a mobilidade das moléculas provocada pelo ganho de energia. Relativamente à T_v , a mobilidade é apenas parcial, pois diz respeito somente às zonas amorfas. Já relativamente à T_f , a mobilidade é total pois inclui, para além das amorfas, também as zonas cristalinas. Por isso T_f é sempre superior a T_v [6].

É claro que existem fatores que podem alterar a T_v , para isso basta interferir com a organização molecular. Tomemos como exemplo o caso da humidade. A presença de moléculas de água na atmosfera leva à formação de pontes de hidrogénio com as cadeias poliméricas, separando-as e criando espaçamentos. Estes espaçamentos facilitam a mobilidade das moléculas a uma temperatura mais baixa, o que faz diminuir a temperatura de transição vítrea [6].

Alguns dos termoplásticos mais comumente utilizados no FFF são apresentados na tabela 1 juntamente com as respetivas temperaturas de transição vítrea (T_v) e de fusão (T_f).

Tabela 1 - Termoplásticos e respetivas T_v e T_f [6].

Termoplástico	T_v	T_f
PLA	60-65°C	150 - 160 °C
PETG	80°C	260°C
HIPS	100°C	-
ABS	105°C	-

2.5 Memória de forma

O efeito da memória de forma dá-se em materiais (metais, polímeros, entre outros) que, quando submetidos a um certo estímulo, recuperam a sua forma original após sofrerem uma deformação aparentemente permanente [8].

No caso dos polímeros os estímulos podem ser de vários tipos. A recuperação de forma pode ser desencadeada pela variação de temperatura, o que inclui a geração de calor por efeito de joule (através de compósitos feitos com materiais condutores, e a consequente passagem de corrente) e também por indução (pois ocorre dissipação de energia devido à histerese, ao aplicar um campo magnético alternado que gera uma corrente alterna). Outras formas de provocar o efeito de memória de forma são a luz e processos químicos, como o uso de solventes e a variação de pH ou de humidade [9].

A maior parte dos polímeros que apresentam esta potencialidade não são adequados para efetuarem recuperações cíclicas, ou seja, não têm a capacidade de alternar repetidamente entre duas formas. No entanto, apresentam a possibilidade de serem programados para alternar entre mais do que duas geometrias. Este efeito é alcançado ao serem usadas múltiplas, ou até mesmo um gradiente de temperaturas e, também, através do uso de estímulos diferentes em simultâneo, como por exemplo o uso de luz e uma variação de pH [9].

Na figura 3 estão representados os passos constituintes de um processo de memória de forma. O primeiro passo consiste na programação da segunda forma do objeto, este efeito é alcançado ao aquecer o objeto, na sua forma inicial, até uma temperatura dentro do intervalo de transição, ou seja, acima de T_v . Ao alcançar esta temperatura o objeto torna-se maleável e pode ser transformado, com a aplicação de forças externas, adquirindo uma forma diferente. Esta nova forma é armazenada ao manter as forças externas aplicadas e, em simultâneo, reduzir novamente a temperatura abaixo de T_v . O segundo passo é a recuperação da forma inicial do objeto, para isso basta reaquecê-lo até uma temperatura dentro da faixa de transição e o objeto perde a forma temporária, anteriormente armazenada, voltando a apresentar a sua forma original, permanente. Este segundo passo ocorre sem a aplicação de forças externas, apenas com a atuação da mudança de temperatura [8].



Figura 3 - Representação do processo de memória de forma.

2.6 Formação das tensões internas

No processo de memória de forma existe uma etapa onde são aplicadas forças externas, que provocam a formação de tensões internas. Ao focar neste detalhe, e observando o processo de fabrico dos filamentos usados na impressão 3D, nota-se que todo esse processo de afinamento/estreitamento e alongamento do material é uma forma de aplicar forças externas, que resulta numa acumulação de tensões internas no material final, ou seja, o fio de alimentação [10].

No processo de impressão também são aplicadas forças externas, pois ocorre uma redução de secção do filamento de 1,75 para 0,4 mm (por exemplo), como está representado na figura 4 [10]. Nesta imagem é visível a passagem de um filamento amarelo por um bico de extrusão aquecido.

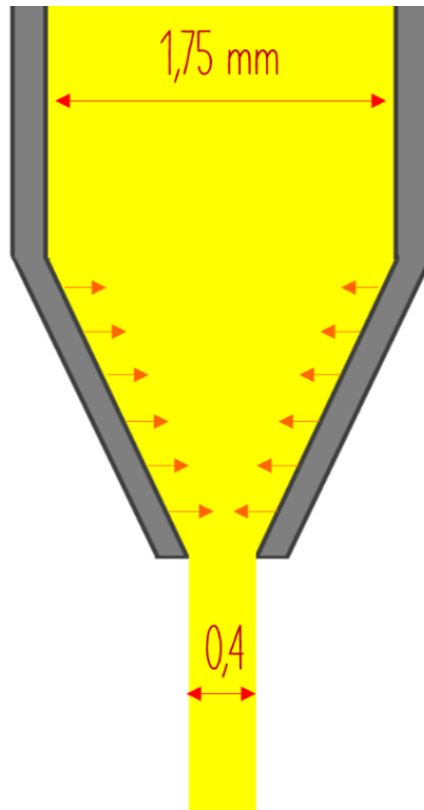


Figura 4 - Formação das tensões internas durante a extrusão de um filamento.

Portanto, todo o processo de impressão corresponde à etapa da programação de forma, o objeto final obtido imediatamente após impressão, corresponde à forma temporária do material. Para revelar a forma final do objeto, neste caso a deformação 4D desejada, basta aquecê-lo novamente a uma temperatura compreendida dentro da faixa de transição vítrea.

Na figura 5 estão representadas, no canto inferior esquerdo, as tensões internas acumuladas no filamento solidificado após impressão e, no canto oposto, o efeito que o estímulo térmico tem na forma do mesmo filamento. Pode-se observar que a forma volúmica pré-relaxamento se apresenta mais alongada devido à tensão de compressão, aplicada durante a impressão, e que após o estímulo térmico esta tensão é libertada, o que provoca uma dilatação ao nível da secção e uma contração ao longo do comprimento.

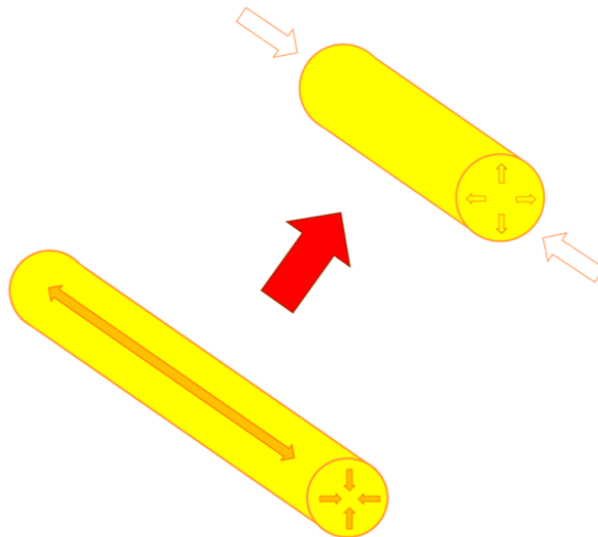


Figura 5 - Efeito do relaxamento térmico.

Estas alterações geométricas são diminutas, no entanto na imagem 6 está representado um teste experimental que mostra um segmento impresso em PLA transparente, à direita, e, à esquerda, um segmento idêntico após ser submetido a um estímulo térmico a 70°C durante um minuto. Ao observar esta fotografia torna-se evidente que a transferência de calor tem um efeito notável a nível da deformação de um plástico impresso, pois esta é a geometria mais simples que se pode obter com uma impressora 3D. Testes semelhantes foram efetuados com segmentos impressos em ABS, HIPS e PETG e todos apresentam o mesmo comportamento quando submetidos a um estímulo térmico.

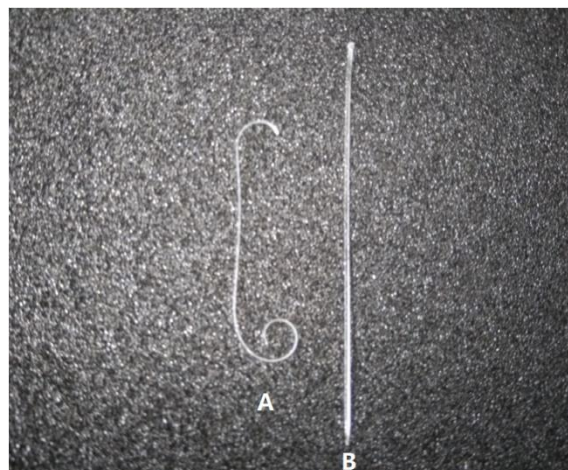


Figura 6 - Filamentos de PLA transparente com (A) e sem (B) relaxamento térmico.

2.7 Modelo Viscoelástico

Um dos modelos que explicam este efeito é o modelo viscoelástico [11]. O modelo clássico de *Kelvin-Voigt* é representado por uma mola puramente elástica, conectada em paralelo com um amortecedor com comportamento puramente viscoso, sendo que, nesta organização as tensões aplicadas a cada componente são idênticas.

Na imagem 7 o amortecedor (verde) representa a tensão constante, que é gerada no interior do bico de extrusão e está diretamente relacionada com a velocidade a que este elemento se desloca. A mola em paralelo (azul) representa a tensão interna acumulada associada à mudança de fase (correspondente à transição de dúctil para rígido) e a mola em série (amarelo) representa uma tensão interna associada à elasticidade do material. Primeiro, forma-se uma tensão constante (amortecedor) antes de o filamento aderir à plataforma de impressão. Ao aderir (amarelo) e solidificar (azul) formam-se as tensões internas. Quando o objeto é descolado da plataforma o material recupera a deformação elástica, mas as tensões internas mantêm-se e só são libertadas quando o termoplástico é submetido a uma temperatura superior a T_v [11].

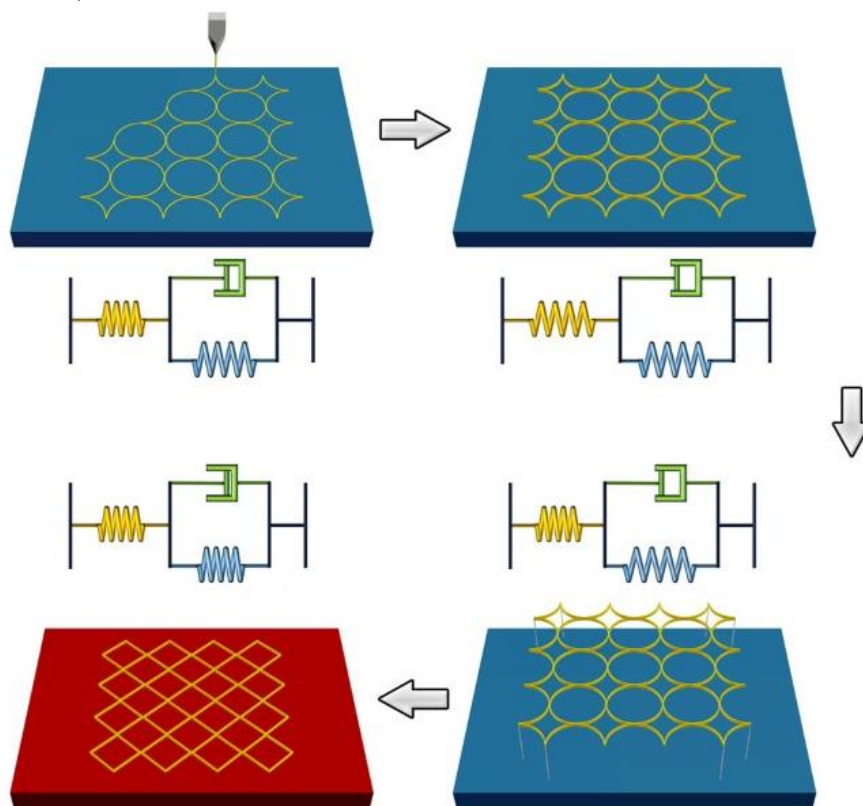


Figura 7 - Representação do modelo visco elástico associado ao processo de impressão. Adaptado de: [11].

No mesmo artigo menciona-se ainda a experiência na qual tiras de PLA, de dimensões 20 x 1,6 x 0,6 mm (comprimento x largura x espessura), foram impressas a diferentes velocidades (10, 30, 60, 90, 120, 150 mm/s) e, posteriormente, submetidas a uma temperatura de 90°C. As observações mais relevantes retiradas deste relatório experimental são as seguintes:

- O PLA apresenta uma deformação máxima de 22,7% quando impresso a 150 mm/s.
- Todas as barras contraem com o aquecimento e a deformação máxima de contração obtida aumenta quase linearmente com as velocidades de impressão entre 30 e 120 mm/s.
- O relaxamento térmico dura cerca de 35 ± 2 s e varia pouco com a velocidade de impressão.

A tensão de contração do material varia com a velocidade de impressão, pois esta faz variar a tensão constante gerada no interior do bico de extrusão. Quanto maior a velocidade de impressão menos eficaz é a transferência de calor no bico da extrusora o que não permite que o material apresente viscosidade semelhante durante a extrusão.

A partir destes resultados, observa-se que a velocidade é um dos parâmetros que apresenta impacto no processo de deformação 4D e que um valor elevado é desejável para atingir esse efeito.

Como nota adicional pode-se fazer a seguinte observação: normalmente, ao imprimir um objeto 3D, sem o objetivo do 4D, utilizam-se velocidades altas para diminuir o tempo de fabrico, mas se esse objeto for submetido a um ambiente com temperaturas elevadas vai sofrer distorções geométricas indesejadas. Por isso, este fenómeno é vantajoso para o 4D mas não para o 3D. Portanto, para produzir peças normais convém diminuir a velocidade ao máximo para evitar distorções, principalmente se esse objeto for utilizado em ambientes com temperaturas elevadas.

2.8 Deformação Anisotrópica

É a partir do fenómeno de contração que surge o efeito bicamada ou deformação anisotrópica. Este efeito consiste na criação de caminhos de impressão que acentuam esta contração e permitem a geração de deformações controláveis e, por conseguinte, programáveis. A imagem 8 apresenta os dois tipos de caminhos de impressão existentes nesta estratégia.



Figura 8 - Tipo de Impressão Longitudinal e Transversal. Adaptado de: [10].

Considerando o exemplo da impressão de uma barra, como é apresentado nos artigos do projeto *A-line*, [4] e da deformação anisotrópica, [10]. Neste último artigo pode-se encontrar a imagem 9, que diz respeito a duas estratégias distintas de imprimir uma barra homogénea de ABS antes e após serem submetidas a um estímulo térmico. O primeiro conjunto apresentado à esquerda diz respeito à estratégia de impressão longitudinal, em que os filamentos que compõem a barra estão orientados a 0° em todas as camadas e, após relaxamento térmico, pode-se observar uma contração longitudinal da barra assim como uma dilatação transversal. No segundo conjunto apresenta-se uma barra com impressão transversal em que os filamentos estão orientados num ângulo de 90° e, após relaxamento térmico, observa-se uma diminuição da espessura da barra e um aumento do seu comprimento.

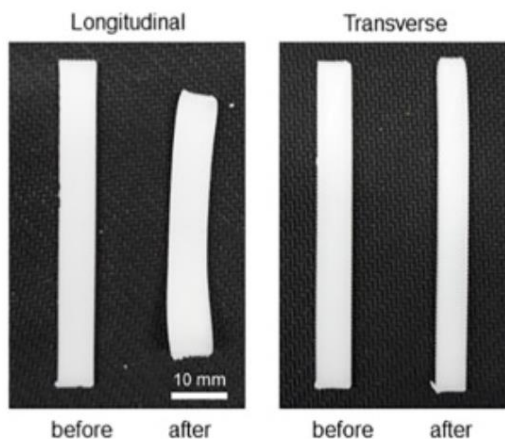


Figura 9 - Deformação térmica de barras homogêneas [10].

A combinação destas duas estratégias de impressão resulta numa barra heterogénea que, quando submetida a um estímulo térmico, apresenta uma curvatura significativa, tal como se mostra na figura 10.

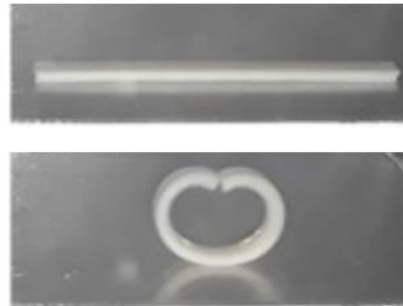


Figura 10 - Barra com impressão heterogénea [10].

Para explicar esta deformação é preciso compreender as tensões acumuladas que estão presentes na barra antes do relaxamento provocado pelo estímulo térmico. O esquema da figura 11 apresenta uma vista lateral do objeto em que a impressão longitudinal está representada a azul e a impressão transversal da barra está representada a laranja. Desta perspetiva, a componente longitudinal tem armazenadas tensões de tração no seu interior, enquanto a componente transversal, que corresponde à secção do filamento, apresenta compressão. Estas tensões estão representadas com setas representadas a cheio. As setas brancas correspondem ao movimento que o componente apresenta após as tensões serem libertadas. Neste caso, as camadas longitudinais comprimem, ou seja, o termoplástico contrai ao longo do seu comprimento, enquanto a camada transversal expande por dilatação do material provocando a deformação observada.

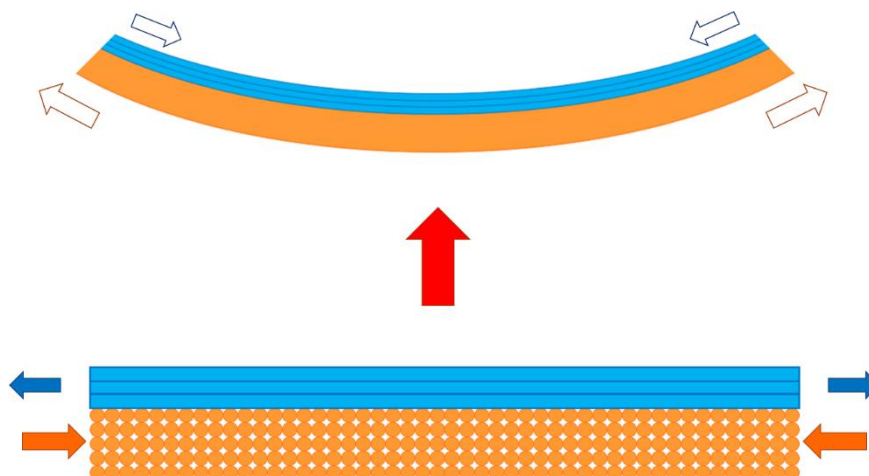


Figura 11 - Deformação anisotrópica.

Tanto neste artigo [10] como no projeto *A-line* [4] é observada a influência que o número de camadas impressas de forma distinta tem na deformação final obtida, tal como exemplifica a figura 12 onde a cor avermelhada representa as camadas impressas longitudinalmente e a azul as camadas impressas transversalmente.

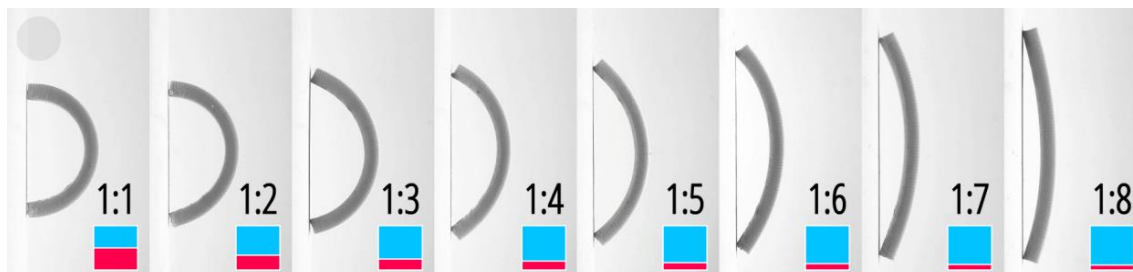


Figura 12 - Efeito da variação de espessura das camadas. Adaptado de: [4].

Este é um aspeto importante que está na base das hipóteses apresentadas nos capítulos seguintes. É a partir desta observação que é delineada a estratégia de impressão para o projeto da geometria complexa ao combinar, num mesmo objeto, a variação do número de camadas sobrepostas numa mesma orientação e secção da geometria.

2.9 Deformação Homogénea

Embora pouco significativas no efeito da deformação anisotrópica, é interessante analisar a formação das deflexões verticais das barras homogéneas. A justificação do seu surgimento está de acordo com os princípios apresentados, reforçando-os.

Começamos por analisar a impressão longitudinal representada no esquema da figura 13. Neste esquema focamo-nos apenas em duas camadas representativas do processo de arrefecimento. Aquando da impressão a camada superior, ao ser depositada e solidificar, contrai e provoca uma tensão residual de compressão na camada inferior. Como a camada inferior já solidificou, a deformação da camada superior fica restringida, dando origem a uma tensão residual de tração nesta camada. Posteriormente, o estímulo térmico provoca o relaxamento destas tensões residuais o que resulta numa deformação positiva, para cima.

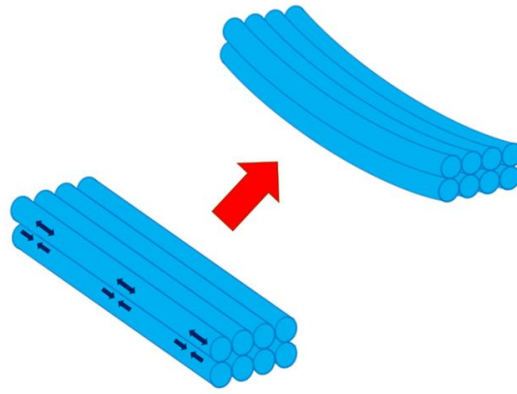


Figura 13 - Impressão Longitudinal.

O esquema da figura 14 representa a impressão transversal. As tensões residuais das camadas transversais formam-se da mesma forma que na impressão longitudinal. No entanto, existe a formação de tensões resultantes: de tração nas camadas inferiores, (gerada pela compressão no filamento inferior que vai provocar uma dilatação transversal do material) e de compressão nas camadas superiores (gerada pela tração no filamento superior que provoca uma contração transversal do material). O estímulo térmico provoca o relaxamento das tensões residuais resultantes, o que resulta numa deformação negativa, para baixo.

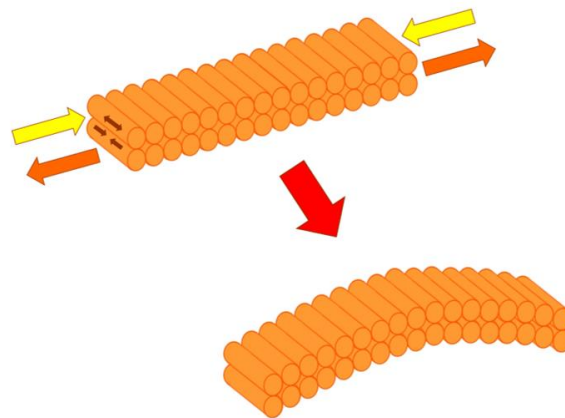


Figura 14 - Impressão Transversal.

Através desta análise pode-se concluir que a solidificação das camadas antes de ocorrer nova deposição de material é crucial para a acumulação de tensões residuais e, portanto, para a geração de deformações em impressão 4D.

Os esquemas das figuras 4, 5, 11, 13 e 14 resultam de interpretação própria do artigo de B. Goo et al. [10], assim como da análise dos mesmos.

2.10 Estratégias de impressão 4D

Nesta secção são apresentadas outras estratégias de impressão para além das barras anisotrópicas, sendo que estas se baseiam nos mesmos princípios apresentados, mas aplicados de forma diferente. Embora estas estratégias não sejam exploradas na componente de projeto, estudá-las influenciou o desenvolvimento das estratégias de impressão apresentadas no quarto capítulo, nomeadamente na conceção da geometria complexa.

2.10.1 Estratégia Linear

A estratégia linear [4] distingue-se pelo facto de se focar apenas na criação de objetos lineares. Tirando partido das propriedades específicas do termoplástico usado, neste caso o PLA, gerou-se uma estratégia de impressão que permite controlar não só a intensidade, mas também o ângulo de deformação do objeto impresso em oito direções distintas.

Para além das vantagens na poupança de espaço, material e tempo de impressão, a impressão em linha tira proveito da geometria linear. Um exemplo é a capacidade que estes objetos têm de atravessar espaços reduzidos e, após deformação, ficarem acoplados nos locais pretendidos sem necessidade de outros meios de fixação, tal como exemplifica a imagem 15.

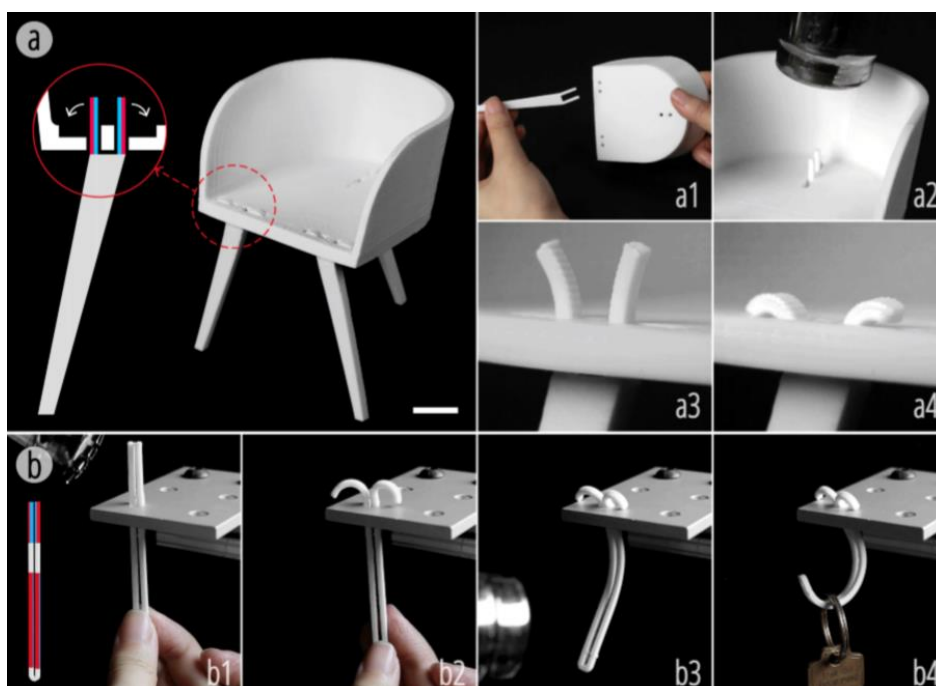


Figura 15 - Exemplos de fixação: a) perna da cadeira. b) gancho [4].

No mesmo artigo[4] é introduzida a existência de segmentos ortogonais que se distinguem pela direção em que ocorre a deformação. Existem dois tipos de mudança de direção: ortogonal e diagonal. A mudança ortogonal ocorre quando a camada ativa tem a mesma largura que o filamento, a mudança diagonal ocorre quando a largura é de apenas metade, tal como apresenta o esquema da figura 16 em que estão demonstradas as oito direções de deformação possíveis de controlar.

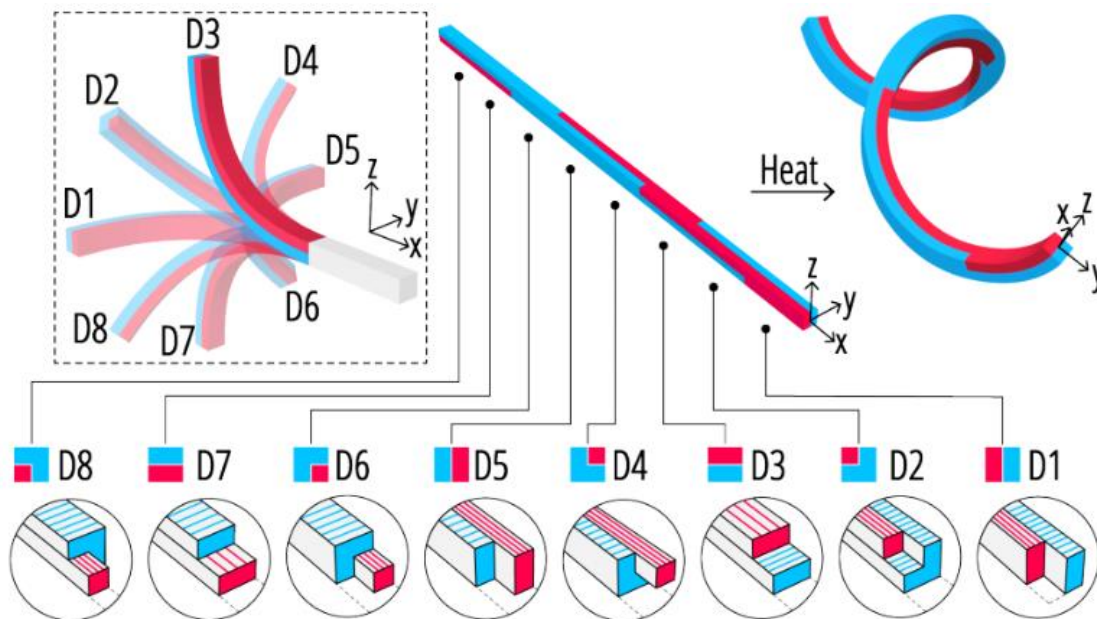


Figura 16 - Dobragem ortogonal e diagonal [4].

Os filamentos *A-line* consistem em paralelepípedos de secção quadrada e quanto menor for a área desta secção, maior é o efeito de curvatura no objeto final. O comprimento ideal da secção varia entre 1 e 4 mm. Em comprimentos inferiores a 1 mm as deformações diagonais não têm efeito e nos superiores a 4 mm os efeitos não são tão visíveis, tal como pode ser visto na figura 17 [4].

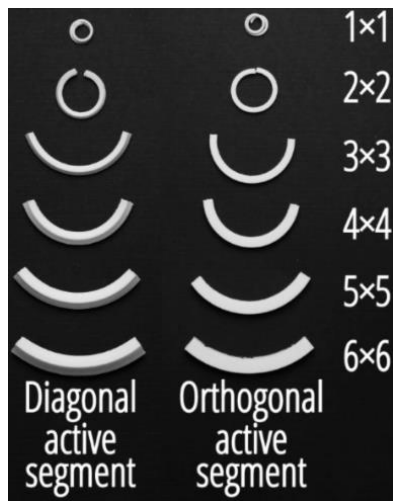


Figura 17 - Efeito da mudança de escala [4].

2.10.2 Estratégia Geodésica

O trabalho *Geodesy* [12] distingue-se dos apresentados anteriormente por apresentar um caminho de impressão circular, que permite imprimir superfícies complexas a partir de uma geometria em 2D, dando origem a um objeto fino feito de termoplástico. Esta estratégia aplica-se na obtenção de superfícies contínuas com curvatura e tira, igualmente, partido do efeito da memória de forma dos termoplásticos.

Na figura 18 está representado um caminho de impressão geodésico, em que a variação de cor corresponde a uma variação da espessura de impressão.

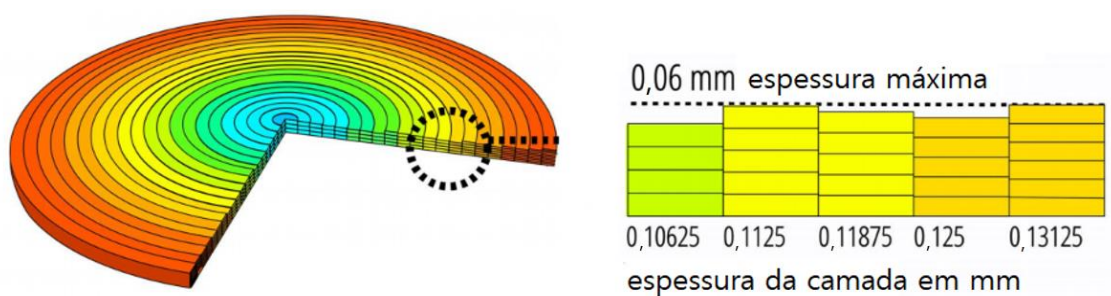


Figura 18 - Caminho de impressão geodésico. Adaptado de: [12].

Este tipo de impressão controla e prevê a contração do objeto através da espessura da camada, pois tira partido das tensões residuais criadas aquando do arrefecimento rápido do termoplástico ao ser depositado de forma circular. Quanto

mais finas as camadas, maior será a deformação, pois um arrefecimento mais rápido promove a acumulação de um maior número de tensões.

A medida máxima recomendada para a espessura de uma folha é de 0,5/0,6 mm para não comprometer a integridade estrutural do componente sendo, por isso, necessária a sobreposição de várias camadas impressas [12].

Ao variar o caminho de impressão é possível criar perfis de deformação diferenciados, sendo todos superfícies com simetria axial. É possível criar formas cónicas (deformação uniforme), convexas (menor deformação no centro do disco/topo) e concavas (deformação mais acentuada no centro do disco/topo), assim como combinações entre as três possibilidades. Algumas destas possibilidades estão representadas na figura 19, à esquerda apresentam-se formas cónicas com deformações de menor e maior acentuação, no centro uma forma convexa, à direita uma forma concava e a combinação entre deformação concava e convexa.



Figura 19 - Perfis de deformação de superfícies contínuas. Adaptado de: [12].

Estas superfícies podem, ainda, ser conectadas para formar componentes mais complexos e de maiores dimensões. As conexões podem ser efetuadas ligando diretamente as partes individuais com mais material (PLA), ou através de malhas mais flexíveis feitas de TPU. Um exemplo desta aplicação são as pulseiras feitas com ligações rígidas e flexíveis da figura 20.



Figura 20 - Pulseiras com ligações rígidas e flexíveis [12].

Neste artigo [12] apenas foi utilizado o PLA, mas podem ser usados outros termoplásticos. A ativação dos provetes é em tudo semelhante às estratégias já apresentadas.

Tal como as restantes estratégias em desenvolvimento, a estratégia *geodesy* apresenta algumas limitações como, por exemplo, o facto de o diâmetro exterior dos discos impressos ter de ser superior a 8 mm, pois, de outro modo, a espessura da folha não pode ser ignorada sendo que irá resistir à mudança de forma. Outra limitação é o facto de poderem ocorrer distorções não desejadas na forma final obtida, como a geração de curvaturas pouco ou demasiado acentuadas. Este efeito ocorre devido a uma certa imprevisibilidade da taxa de deformação.

Outras aplicações propostas pelo projeto *geodesy* [12] são exemplificadas na imagem 21, que apresenta um altifalante, feito a partir de uma forma convexa, e piões feitos a partir de formas cónicas e convexas.



Figura 21 - Aplicações do projeto *geodesy*. Adaptado de: [12].

2.11 Sumário

Ao fazer esta análise teórica, as características que mais se destacam na formação das deformações finais, a obter após ativação, são os caminhos de impressão, a forma como o material solidifica e, por conseguinte, a temperatura e a velocidade de impressão dos objetos. Tendo em conta o conhecimento adquirido neste capítulo, segue-se a etapa de análise experimental onde o efeito de cada uma destas características é testado.

3. Procedimento Experimental Preliminar e Discussão

Partindo dos princípios apresentados no capítulo anterior é feita uma análise experimental, seguindo o método *DoE*. Esta análise tem como ponto de partida as informações experimentais de um artigo, sendo que são alterados o método e o material em estudo. De seguida, apresenta-se, de forma sucinta, o processo experimental e os resultados devidamente documentados. Por último, é feita uma discussão desses resultados e são estabelecidas comparações com dados experimentais presentes na literatura.

3.1 *Design of Experiments (DoE)*

Com o objetivo de determinar quais as condições mais favoráveis à geração de uma deformação geométrica intensa foi seguido o método *DoE* [13]. Este método é utilizado para otimizar um processo ao variar, de forma controlada, as variáveis que o influenciam e, posteriormente, avaliar o impacto que estas provocam no resultado obtido. Ou seja, determina relações de causalidade entre condições de entrada e saída.

Para tal foi escolhida uma geometria retangular de dimensões 95 x 7.5 x 1.6 mm, feita de PLA da gama *Fiberlogy EASY PLA*. Usando esta estrutura, é variado o número de camadas impressas numa determinada orientação, sendo três as combinações propostas:

- 4T + 4L – Número igual de camadas impressas de modo transversal e longitudinal.
- 5T + 3L – Número de camadas impressas de modo transversal superior ao número de camadas impressas de modo longitudinal.
- 3T + 5L – Número de camadas impressas de modo transversal inferior ao número de camadas impressas de modo longitudinal.

A escolha da espessura dos provetes e as três possibilidades de impressão das camadas são idênticas às apresentadas no artigo de B. Goo et al. [10], sendo que, neste caso, o material em estudo é PLA e não ABS.

Esta organização está apresentada nas figuras 22 e 23. Ambas as imagens são pré-visualizações obtidas a partir do programa *Ultimaker Cura 4.6*, sendo que na imagem 23 é visível que o programa apresenta uma grelha milimétrica, tornando perceptíveis as dimensões da estrutura escolhida. Na imagem 22 são visíveis as camadas de cada uma das variantes, assim como o seu número e a diferenciação entre estas.

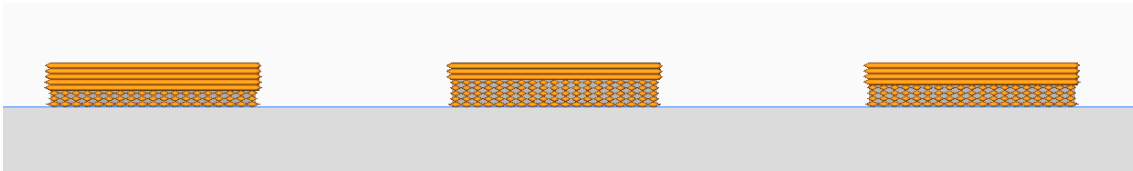


Figura 22 - Pré-visualização das camadas impressas.

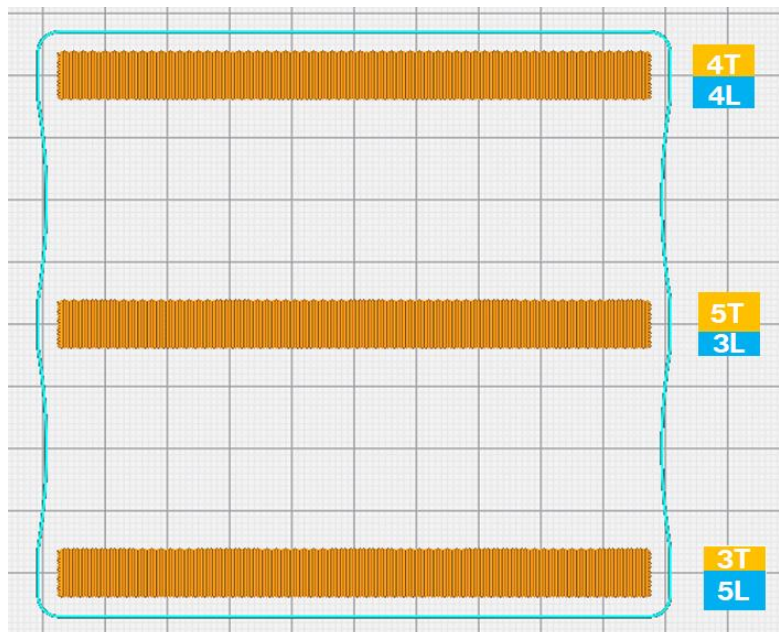


Figura 23 - Antevsão do conjunto impresso.

Este estudo experimental também inclui a variação de mais dois parâmetros que influenciam a impressão do conjunto destas três barras:

X – Velocidade de impressão: 30 mm/s (-) e 50 mm/s (+);

Y – Temperatura da cama de impressão: ~25°C (-) e 40°C (+).

Como já exposto anteriormente, a velocidade de impressão tem grande impacto na tensão interior acumulada e a temperatura da plataforma de impressão tem influência na velocidade de arrefecimento e solidificação do material depositado, em particular da primeira camada. Portanto, ambos estes fatores são relevantes ao considerar o objetivo final de deformação.

Na tabela 2 apresentam-se as experiências a efetuar que se baseiam no número de combinações possíveis de efetuar com as variáveis selecionadas e respetivos valores de máximo e de mínimo, ou seja, são quatro experiências ao todo.

Tabela 2 - Design of Experiments.

Parâmetros	Experiências			
	A	B	C	D
X	-	+	-	+
Y	-	+	+	-

Para cada uma das experiências de A a D são impressos três conjuntos de provetes (para cada combinação de variáveis), de modo a minimizar o erro aleatório inerente ao processo, sendo que o número total de provetes impressos é 36. A imagem 24 apresenta o conjunto de provetes impressos para a experiência A.

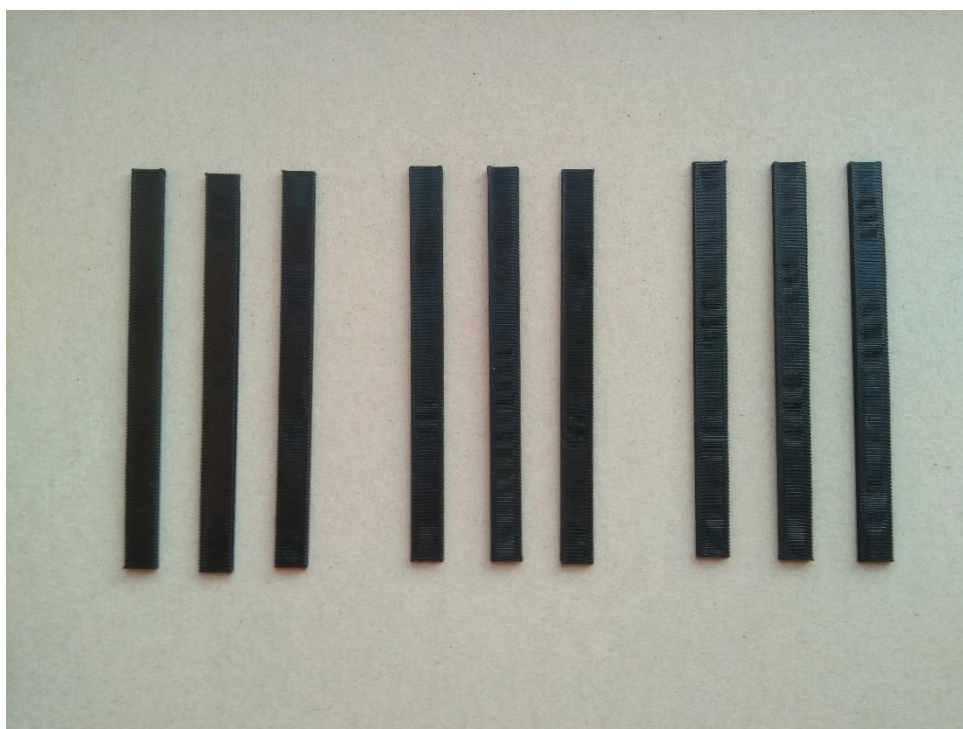


Figura 24 - Provetes de PLA da experiência A.

Quando estas geometrias são mergulhadas no banho térmico, o seu tempo de acionamento é de aproximadamente 10 segundos a partir do momento em que são submersas até a transformação se tornar menos aparente. As barras são imersas a 80°C e retiradas a 59°C, durante esta descida de temperatura a estrutura deforma lentamente até estabilizar.

A medição do ângulo foi feita ao traçar retas paralelas às extremidades dos provetes, tal como mostra a figura 25, sendo posteriormete usado um transferidor.

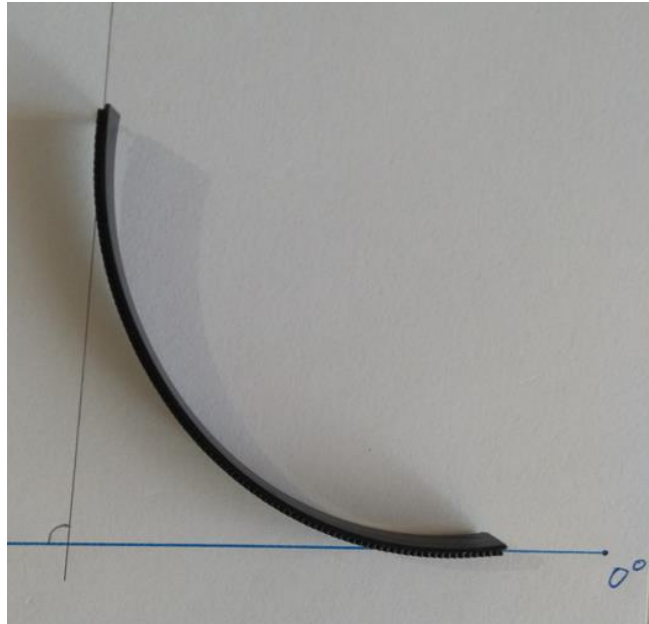


Figura 25 - Medição do ângulo.

A média dos ângulos de deformação obtidos e medidos em graus apresenta-se na tabela 3. Nas tabelas 4, 5, 6 e 7 estão apresentados, em detalhe, os resultados obtidos para as medições de cada uma das experiências assim como o respetivo desvio padrão.

Tabela 3 – Média dos ângulos medidos e respetivo desvio padrão.

Orientação das camadas	A	B	C	D
4T+4L	174 ± 15	73 ± 4	63 ± 7	201 ± 23
5T+3L	283 ± 6	84 ± 9	69 ± 4	295 ± 10
3T+5L	276 ± 2	55 ± 10	60 ± 1	303 ± 23

Tabela 4 - Medições da experiência A.

Orientação das camadas	Velocidade de impressão [mm/s]	Temperatura da plataforma de impressão [°C]	Ângulo de deformação [$\pm 0,5^\circ$]	Média do ângulo de deformação [°]	Desvio padrão [°]
4T+4L	30	~25	163	174,33	14,64
			165		
			195		
5T+3L			275	283,00	5,72
			286		
			288		
3T+5L			278	275,67	1,70
			274		
			275		

Tabela 5 - Medições da experiência B.

Orientação das camadas	Velocidade de impressão [mm/s]	Temperatura da plataforma de impressão [°C]	Ângulo de deformação [$\pm 0,5^\circ$]	Média do ângulo de deformação [°]	Desvio padrão [°]
4T+4L	30	40	71	73,00	3,56
			70		
			78		
5T+3L			95	84,33	8,99
			85		
			73		
3T+5L			69	54,67	10,14
			47		
			48		

Tabela 6 - Medições da experiência C.

Orientação das camadas	Velocidade de impressão [mm/s]	Temperatura da plataforma de impressão [°C]	Ângulo de deformação [$\pm 0,5^\circ$]	Média do ângulo de deformação [°]	Desvio padrão [°]	
4T+4L	50	40	72	63,33	6,60	
			56			
			62			
5T+3L			72	69,00	3,56	
						71
						64
3T+5L			60	60,33	1,25	
						59
						62

Tabela 7 - Medições da experiência D.

Orientação das camadas	Velocidade de impressão [mm/s]	Temperatura da plataforma de impressão [°C]	Ângulo de deformação [$\pm 0,5^\circ$]	Média do ângulo de deformação [°]	Desvio padrão [°]	
4T+4L	50	~25	183	201,00	22,69	
			187			
			233			
5T+3L			287	294,67	10,14	
						309
						288
3T+5L			299	303,00	23,04	
						333
						277

3.2 Análise de resultados

Analisando os resultados obtidos, e tendo em conta o objetivo proposto, os valores de deformação mais elevados são obtidos para a experiência D em que o valor de velocidade é o mais elevado e a temperatura da plataforma de impressão é a mais reduzida. Comparando estas duas variáveis, conclui-se que a temperatura da plataforma de impressão é a variável que tem maior influência na deformação final obtida. Observando ainda a experiência D, o maior ângulo é obtido para a orientação do tipo 3T+5L, sendo esta a única experiência para a qual esta tendência se verifica. Em A, B e C o valor mais elevado é obtido para a orientação 5T+3L, o que corrobora os resultados obtidos por B. Goo et al. [10] em que a deformação mais intensa dos provetes de ABS (de dimensões de 60x6x1.6 mm) foi obtida para estruturas que apresentavam um maior número de camadas transversais.

Portanto, em relação à combinação anisotrópica do número de camadas de impressão, poder-se-á dizer que o comportamento observado no termoplástico ABS é semelhante ao comportamento observado em provetes de PLA. Este resultado contradiz o artigo de G. Wang et al. [4] que apresenta provetes de PLA com dimensões 60x4x4 mm em que a maior deformação é observada para a orientação em que o número de camadas longitudinais é igual ao número de camadas transversais.

Esta diferença de resultados pode estar baseada no facto de as estruturas geométricas escolhidas serem diferentes em termos dimensionais (nomeadamente o número de camadas dos provetes, ou seja, as espessuras distintas de 1.6 e 4 mm), e, também, no facto de o efeito tridimensional da deformação ser incompatível com os modelos numéricos bidimensionais utilizados, tal como defendem B. Goo et al. [10]. Concluindo, estes resultados diferenciados ressaltam a necessidade de criação de modelos equacionais mais completos, de modo a estudar de forma mais aprofundada o fenómeno da impressão 4D por FFF, em particular os efeitos que a alteração de escala têm na deformação final obtida.

3.3 Sumário

As principais conclusões a inferir deste estudo são que a mudança de escala, particularmente em termos de espessura, tem um grande impacto na deformação final obtida e que, esta, não sofre efeitos significativos quando se altera o material de impressão, mais especificamente na comparação entre o uso de ABS e PLA. As deformações mais intensas obtêm-se, para o maior valor de velocidade e menor valor de temperatura, da plataforma de impressão e, também, para os casos em que um maior número de camadas transversais é observado. Estas informações empíricas são aplicadas no capítulo seguinte, onde serão planeadas e testadas geometrias com graus de complexidade diferente. A complexidade advém da divisão das geometrias em diferentes secções, em que o número de camadas é alterado para criar efeitos de maior ou menor deformação. Para garantir esta possibilidade e a validade das observações experimentais, a escala/espessura das geometrias é a mesma dos provetes testados, assim como o material utilizado, PLA.

4. Casos de estudo e Discussão

Neste capítulo são criadas geometrias experimentais partindo das informações empíricas adquiridas no capítulo anterior.

O capítulo inicia-se com uma introdução, onde é feita a escolha de geometrias, tendo como critério o grau de dificuldade que poderão apresentar ao serem traduzidas para um objeto 4D. Segue-se o planejamento onde as geometrias são divididas em secções que apresentam deformações e, por conseguinte, estratégias de impressão diferentes. A justificação da escolha destas estratégias encontra-se apresentada em duas tabelas. De seguida, apresenta-se a etapa de preparação para a impressão dos objetos, são criados os ficheiros e explicitada a forma como foram obtidos. No subcapítulo *Processo de Impressão* é dada ênfase aos principais obstáculos sentidos e respetivas correções. Por último, segue-se a ativação dos provetes e a análise dos resultados obtidos. Posteriormente é feita a correção e reimpressão das geometrias para que se aproximem mais do resultado inicial pretendido.

4.1 Introdução

Numa componente de projeto propôs-se criar um objeto a partir da impressão 4D por FFF, demonstrando, deste modo, a versatilidade da sua utilização. São, assim, propostas duas geometrias distintas, uma simples e outra com um maior grau de complexidade. O material previsto para a impressão destas geometrias será o PLA, pois foi usado no capítulo anterior e é o material que se encontra mais analisado pela literatura.

O conceito das cadeiras, em particular, foi escolhido por serem objetos simples e bastante comuns, ou seja, é fácil de avaliar se a geometria obtida após estimulação térmica é funcional e, portanto, se a estratégia de impressão utilizada é adequada ao efeito pretendido. Além disso, a ideia de comprar um móvel fácil de transportar e que se monte sozinho é bastante apelativa. Atualmente a impressão 4D por FFF está limitada em termos de dimensões, o que torna estes conceitos meramente ilustrativos. Saliente-se que a conceção das cadeiras não tem em conta a mudança de escala necessária, nem os esforços mecânicos a que uma cadeira real estaria submetida.

A planificação destes assentos retira inspiração dos *papercrafts*, que são esculturas feitas a partir de planificações de papel e cola, uma forma de artesanato semelhante

ao origami, e que pode ser facilmente transformada em conceitos de impressão 4D. É de notar que a complexidade se encontra na planificação do objeto e não propriamente na programação de caminhos 4D. As cadeiras são meramente um exemplo daquilo que se pode criar, o que inclui, também, esculturas de animais e outros objetos, com um maior ou menor número de superfícies. Estas superfícies podem ainda ser construídas em separado e coladas posteriormente. A aplicação desta técnica no 4D traz a vantagem de criar objetos num material mais resistente e duradouro que o papel, o que potencia não só a vertente artística, mas também funcional.

Na figura 26 pode-se observar que as superfícies que compõem este banco são curvas de forma não uniforme, tornando esta geometria mais difícil de alcançar. Já a figura 27 apresenta uma geometria com curvaturas uniformes.



Figura 26 - Geometria complexa: Papercraft Chair - Shiwori Studio [14].

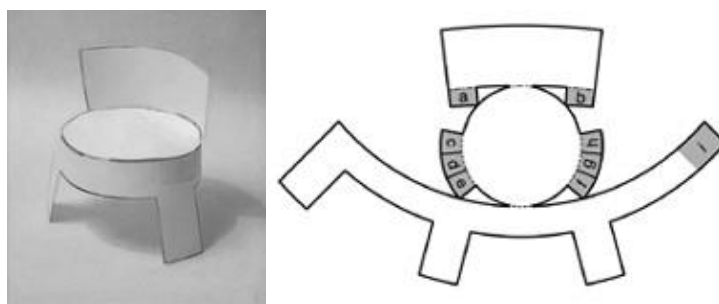


Figura 27 - Conceito em papel e respetiva planificação da cadeira/geometria simples [15].

4.2 Planeamento

Nas tabelas 8 e 9 apresenta-se o planeamento dos caminhos de impressão das duas geometrias. A preparação dos caminhos começa pela criação de uma planificação completa da geometria, seguido de uma divisão em secções baseada nas diferentes curvaturas que compõem o objeto final. A leitura dos esquemas exibidos é feita com o auxílio da legenda apresentada na figura 24, fazendo-se a distinção entre os dois tipos de impressão existentes através de um código de cores. Este é apenas um planeamento especulativo baseado na literatura encontrada [10] e nos resultados obtidos nas experiências descritas no capítulo anterior. Por exemplo, na tabela 3, que diz respeito à geometria complexa, a não uniformidade na espessura de certas secções da geometria relaciona-se com o facto de a deformação ser mais intensa quando se imprimem mais camadas transversais do que longitudinais numa mesma zona, criando uma deformação complexa com um gradiente de deformação.

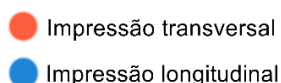
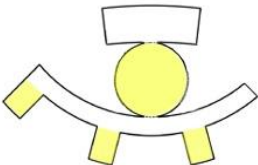



Figura 28 - Legenda para leitura das tabelas 5 e 6.

Tabela 8 - Planeamento da geometria simples.

GEOMETRIA PRETENDIDA	GEOMETRIA IMPRESSA	DEFORMAÇÃO PREVISTA	JUSTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO
		 Sem deformação	- Camadas com espessura uniforme e com orientação alternada de 45° e -45° para reduzir ao mínimo a distorção geométrica provocada pelo estímulo térmico.


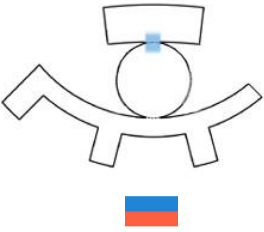
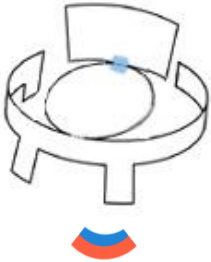

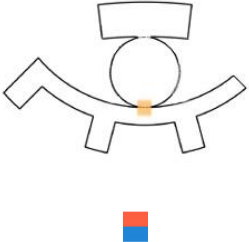
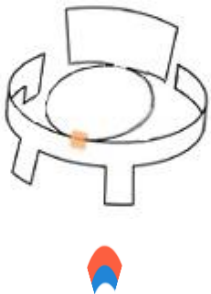

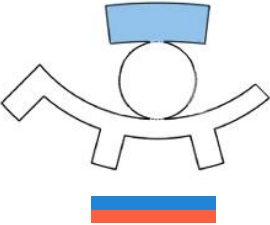


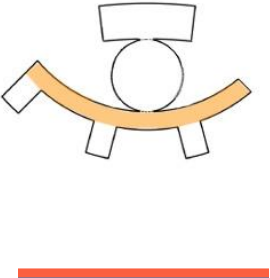
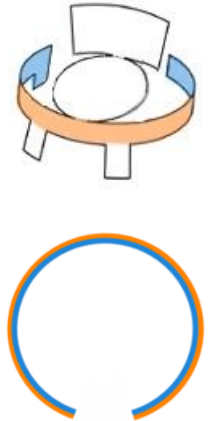



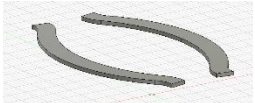


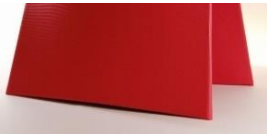
	 <p>Corte de secção</p>	 <p>Corte de secção</p>	<p>- Espessura uniforme para criar uma deformação contínua ao longo da geometria.</p>
			<p>- Intensidade de deformação maximizada, ou seja, maior número de camadas transversais do que longitudinais. (5:3)</p>
	 <p>Corte de secção</p>	 <p>Corte de secção</p>	<p>- Espessura uniforme para criar uma deformação contínua ao longo da geometria.</p>
	 <p>Corte de secção</p>	 <p>Vista de cima/corte</p>	<p>- Intensidade de deformação moderada, ou seja, mesmo número de camadas longitudinais e transversais.</p>

Tabela 9 - Planeamento da geometria complexa.

GEOMETRIA PRETENDIDA	GEOMETRIA IMPRESSA	DEFORMAÇÃO PREVISTA	JUSTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO
	 <p>Vista de cima</p>  <p>Vista lateral</p>		<p>maior espessura nos cantos para ter uma deformação menos intensa.</p>
	 <p>Vista de cima</p>  <p>Vista lateral</p> 		<p>Espessura uniforme, pois a deformação/curvatura é constante ao longo do comprimento da geometria. As camadas transversais devem ser perpendiculares ao caminho para que acompanhe a forma e dobre em torno do acento. Num angulo inferior a 90° para que apresente inclinação e não seja tão intenso, portanto, a espessura da camada transversal terá de ser inferior à camada longitudinal.</p>
	 <p>Vista de cima</p>  <p>Vista lateral</p>		<p>A espessura da camada transversal vai diminuindo ao longo do comprimento para criar uma deformação gradualmente menos intensa.</p>
			<p>Camadas com espessura uniforme e com orientação alternada de 45° e -</p>

	 <p>Vista de cima</p>	Vista lateral Sem deformação	45° para reduzir ao mínimo a distorção geométrica provocada pelo estímulo térmico.
--	--	---------------------------------	--

4.3 Preparação para Impressão

Após o planeamento inicial passa-se para a criação virtual destas estruturas. Um objeto 3D é, primeiramente, formulado para depois ser traduzido num conjunto de caminhos de impressão. Este processo começa pela criação das planificações em formato *.stl*, a partir do *software Autodesk Fusion 360*, como se encontra ilustrado nas figuras 29 e 30.

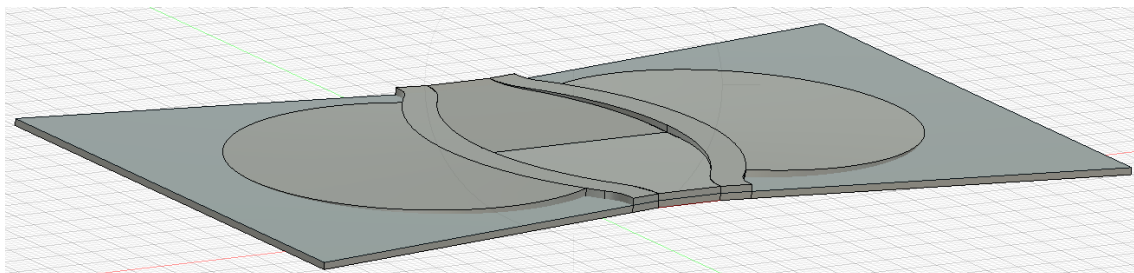


Figura 29 - Planificação da geometria complexa.

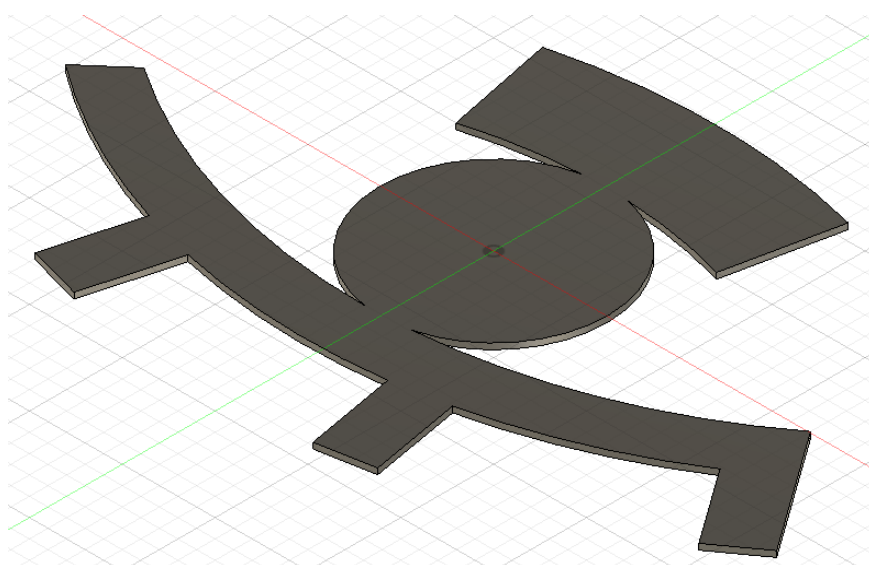


Figura 30 - Planificação da geometria simples.

Após completada esta etapa, segue-se a programação das estratégias definidas na fase do planeamento. Para isso, começa-se por abrir os ficheiros *.stl* no software *Ultimaker Cura* e, de seguida, definem-se as propriedades de impressão, como se pode observar nas figuras 32 e 33. É importante ter em conta as características que maximizam o efeito de deformação pretendido, como, por exemplo, a plataforma de impressão não ser aquecida e a ventoinha estar ativada para promover o arrefecimento/solidificação rápida.

Tendo definido as características gerais de impressão inicia-se a definição individual das secções de deformação que compõem a planificação. Esta etapa é feita

recorrendo à ferramenta *Mesh Type: Modify settings for overlaps*, como se pode observar na figura 31. Esta ferramenta permite definir a orientação em graus de cada camada de impressão, ou seja, o número de camadas transversais e longitudinais.

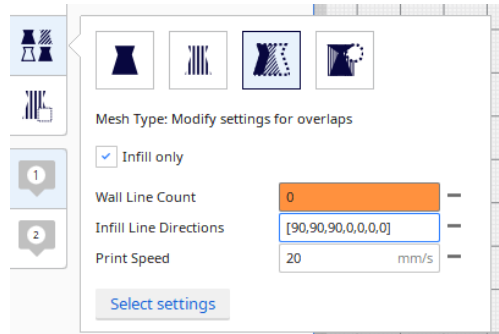


Figura 31 - Definição de propriedades da sobreposição.

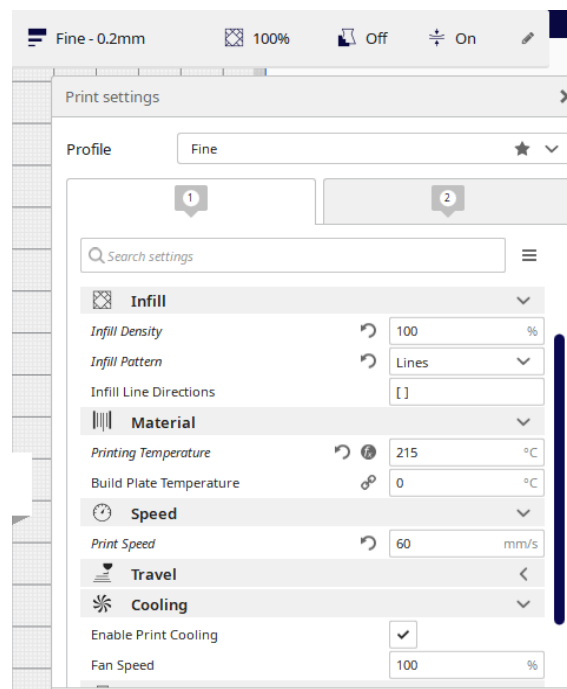


Figura 32 - Definição das propriedades para as secções sem deformação.

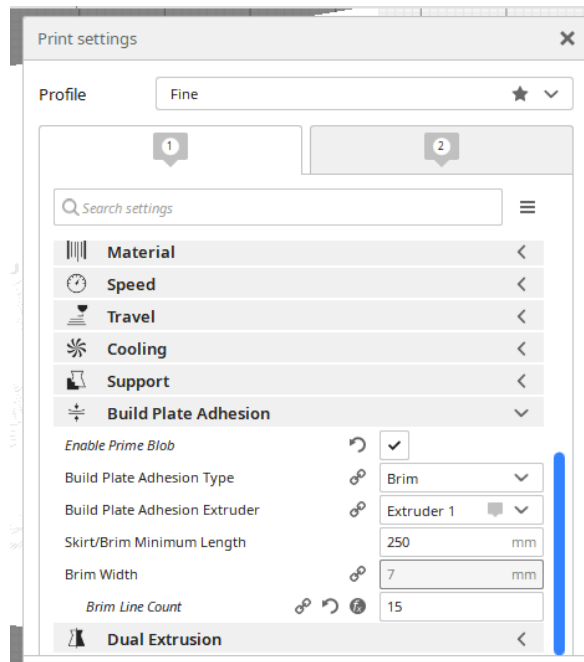


Figura 33 - Definição das características de adesão.

Como se pode observar nas figuras 34 e 35, a geometria simples obtida é diferente em relação à apresentada no processo de planificação, pois foi adicionado um comprimento às juntas que fazem a ligação entre o acento e os restantes componentes, de modo a permitir o efeito de dobragem. Esta alteração não existe no planeamento original pois a planificação foi pensada para ser feita em papel, que apresenta uma espessura muito reduzida que permite essa solução.

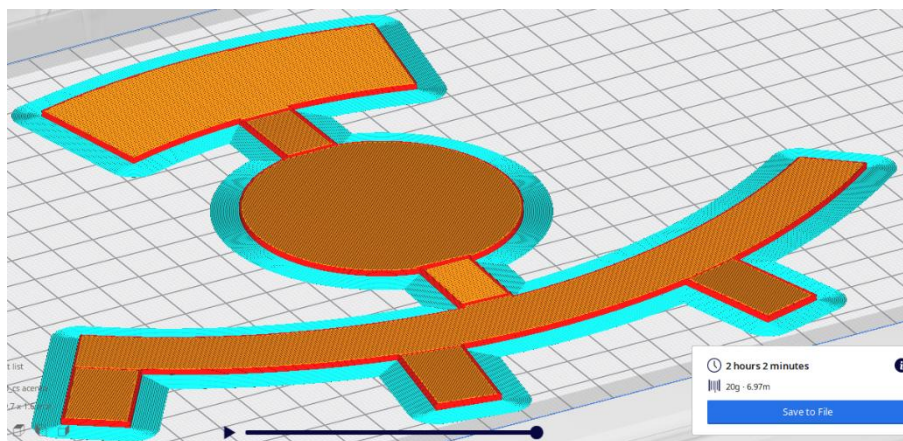


Figura 34 - Estratégia de impressão para a geometria simples.

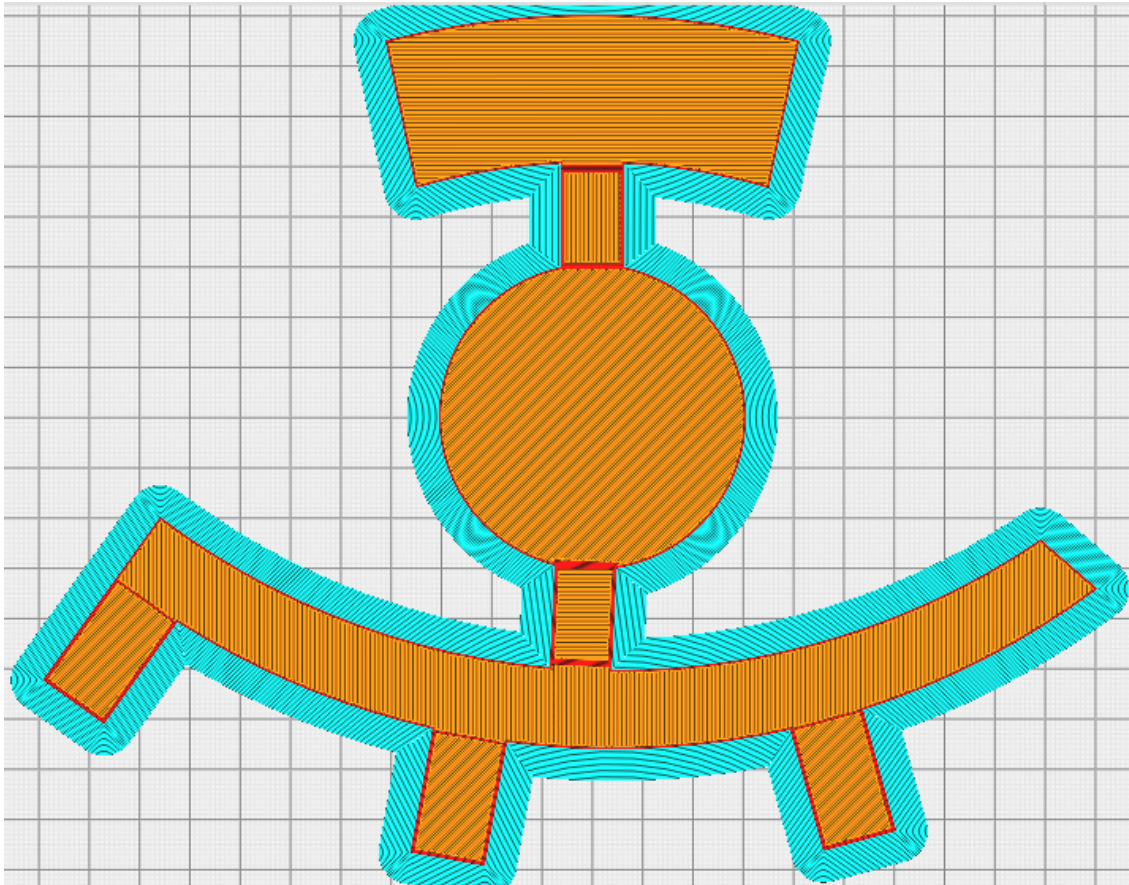


Figura 35 - Orientações visualizadas na última camada.

As cores apresentadas nas figuras 36 e 37 permitem distinguir os diversos tipos de impressão. A laranja temos as camadas com as orientações pretendidas, que causam ou não deformação na geometria final. A vermelho foram definidas paredes que permitem a ligação entre as diversas subdivisões da planificação e, também, criar um objeto final mais robusto (estas paredes acabaram por ser removidas de modo a permitir uma deformação mais visível). A azul apresentam-se as camadas geradas aquando da primeira camada de impressão e cujo objetivo é permitir uma boa adesão do objeto à plataforma de impressão, evitando distorções.

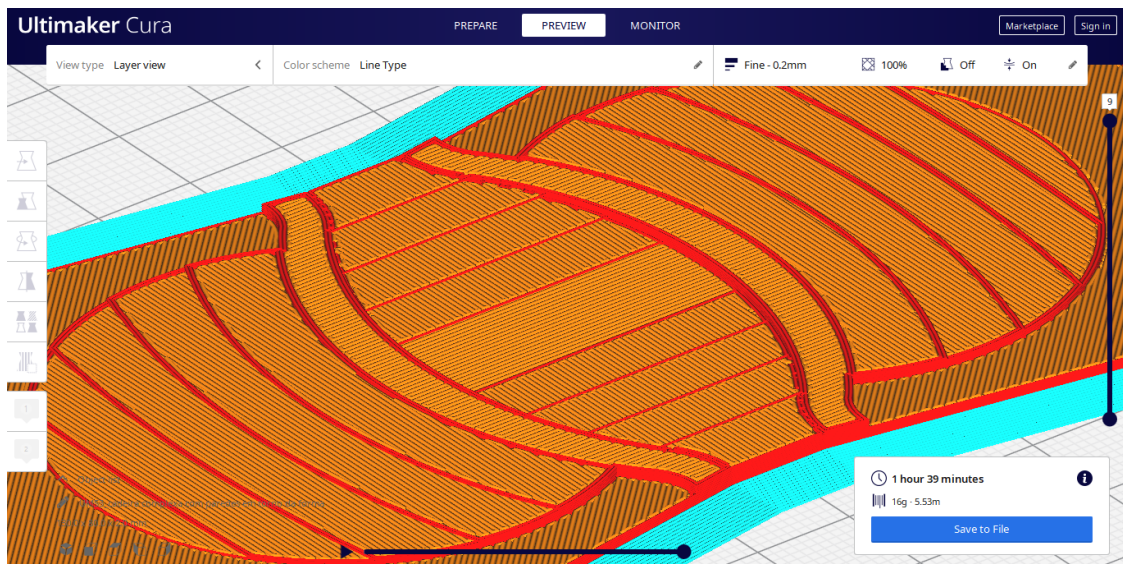


Figura 36 - Estratégia de impressão da geometria simples.

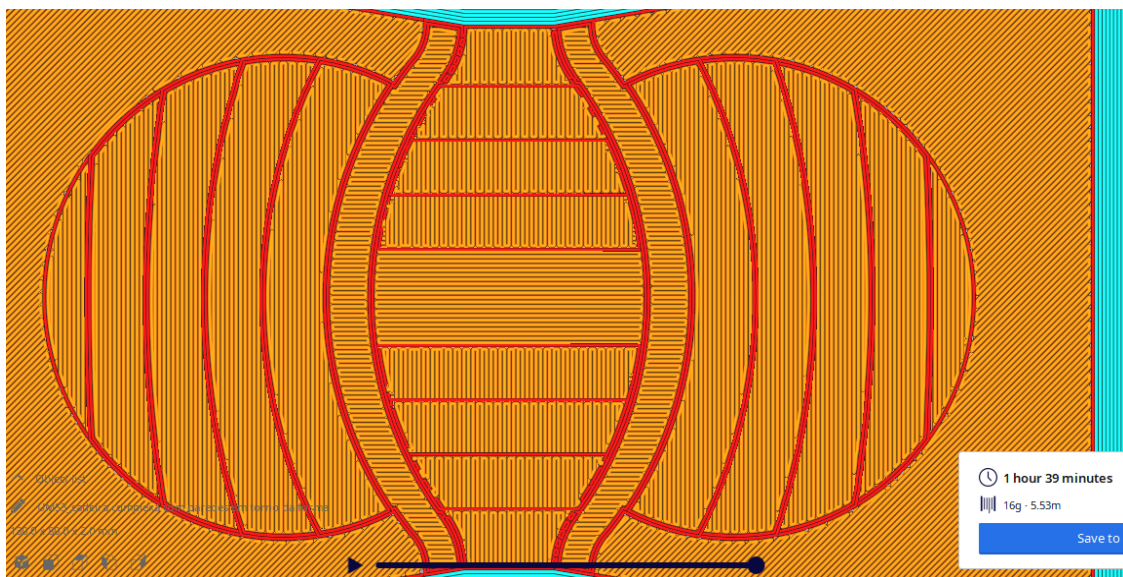


Figura 37 - Detalhes de orientação na última camada.

Na figura 38 é visível a orientação das camadas sobrepostas na criação de uma das juntas da geometria simples. Já na figura 39 apresenta-se em detalhe a zona do

acento do banco com geometria complexa, onde é possível visualizar a variação da espessura da camada longitudinal que aparece na forma de degraus.

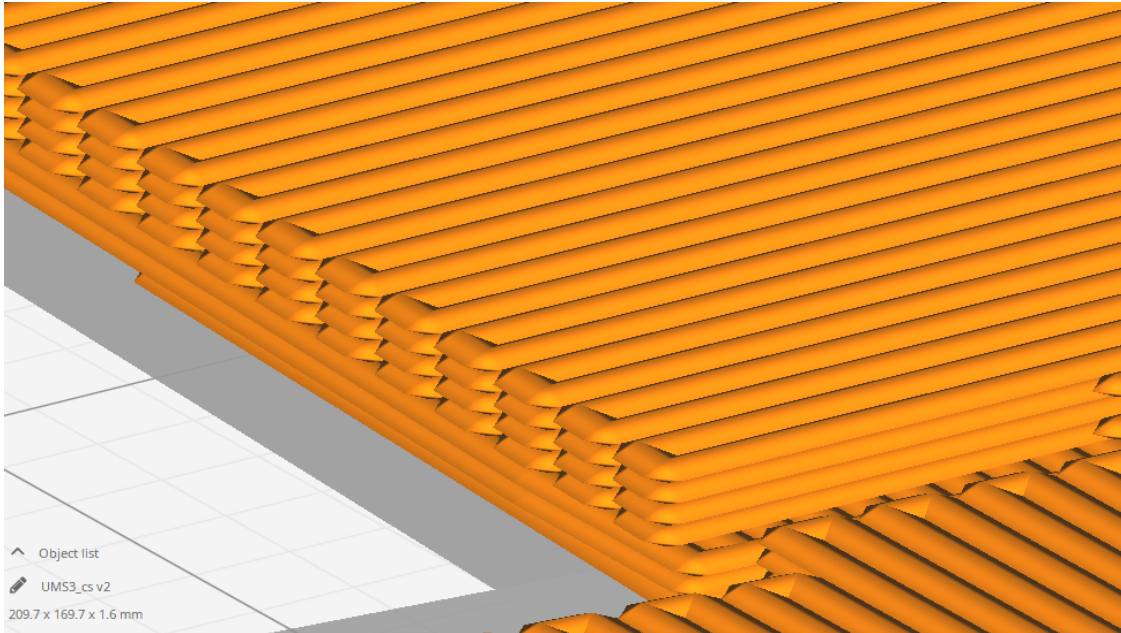


Figura 38 - Detalhe de impressão.

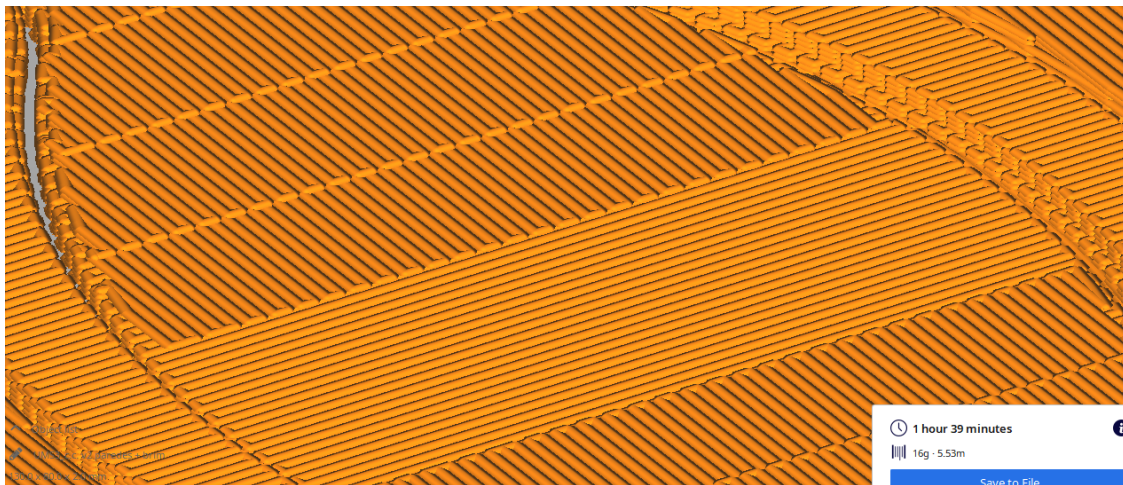


Figura 39 - Detalhes da geometria complexa.

4.4 Processo de Impressão

Neste subcapítulo são discutidas as dificuldades sentidas no processo de obtenção dos provetes e as correções aplicadas nos ficheiros Cura para melhorar a qualidade de impressão. São apresentadas figuras e uma tabela onde estes desafios são analisados com maior detalhe.

O problema que mais persistiu, ao longo das várias tentativas de impressão, foi a paragem de extrusão. Tal problema será potencialmente resolvido pela substituição do tubo que guia o filamento até ao bico de extrusão. Este componente apresenta várias marcas de desgaste que prendem o filamento a meio do percurso de alimentação impedindo o correto funcionamento da máquina.

A impressora usada nesta etapa foi o modelo *B2X300 BEEVERYCREATIVE*.

No provete representado nas imagens 40 e 41 (detalhe) são visíveis riscos devido à remoção, no ficheiro *Cura*, da opção *enable retraction* que impede que a impressora retrate o material conseguindo, assim, uma impressão mais fluida.

No detalhe da imagem 41, apresentam-se fios de material ao longo de diferentes zonas da peça. Este efeito resulta da consecutiva diminuição do volume de extrusão, provocando a paragem do processo. São ainda observáveis falhas de material junto à zona circular do objeto, que se devem à descolagem do material aquando da formação da primeira camada.

A fraca adesão foi solucionada (observável na imagem 42), ao substituir o padrão de impressão *line*, que deposita material de forma descontínua ao levantar o bico de extrusão sempre que se cria uma nova linha de material depositado, para o padrão em *zig zag* que se apresenta contínuo e sem as constantes subidas do bico. Inicialmente, o padrão *line* foi escolhido por potencializar a solidificação do material antes de entrar novamente em contacto com a extrusora, uma vez que deposita sempre da esquerda para a direita sem alternar o sentido, este método permite o arrefecimento da ponta direita, uma vez que a nova deposição começa sempre do lado esquerdo. Isto não acontece no padrão *zig zag*, pois se a deposição da linha acabar na direita, a linha seguinte começa a ser depositada de imediato neste lado direito.

Este detalhe não parece muito significativo, mas a impressão 4D por FFF tira partido das tensões residuais acumuladas precisamente no processo de solidificação do material e, por isso, é possível que esta alteração tenha impacto na deformação do objeto final a obter.

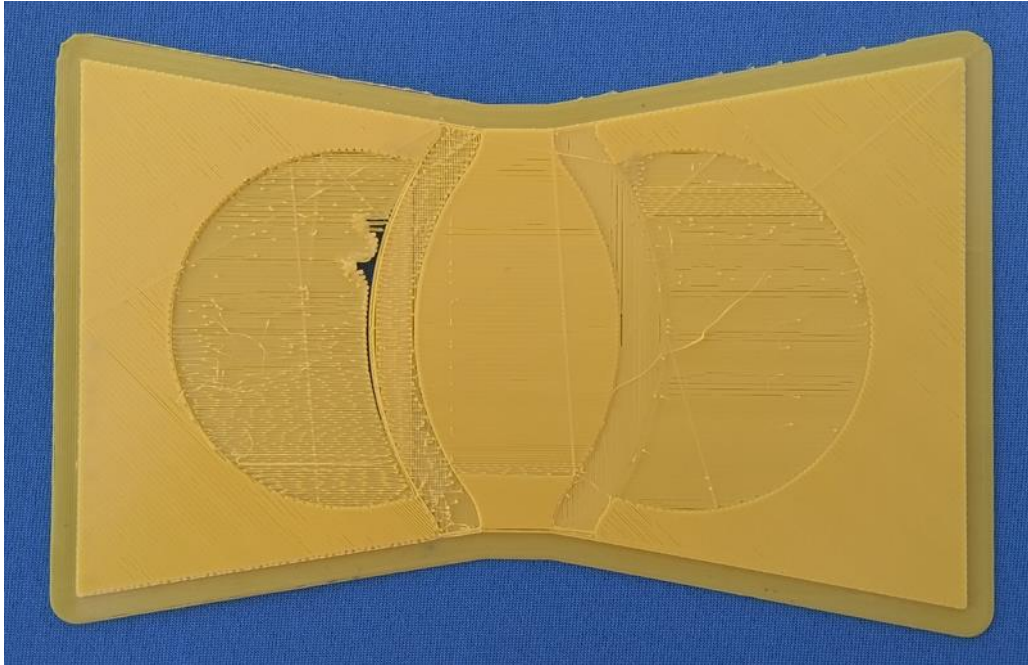


Figura 40 - Provete com falhas de impressão.



Figura 41 - Detalhes de impressão exemplificativos dos principais obstáculos encontrados.

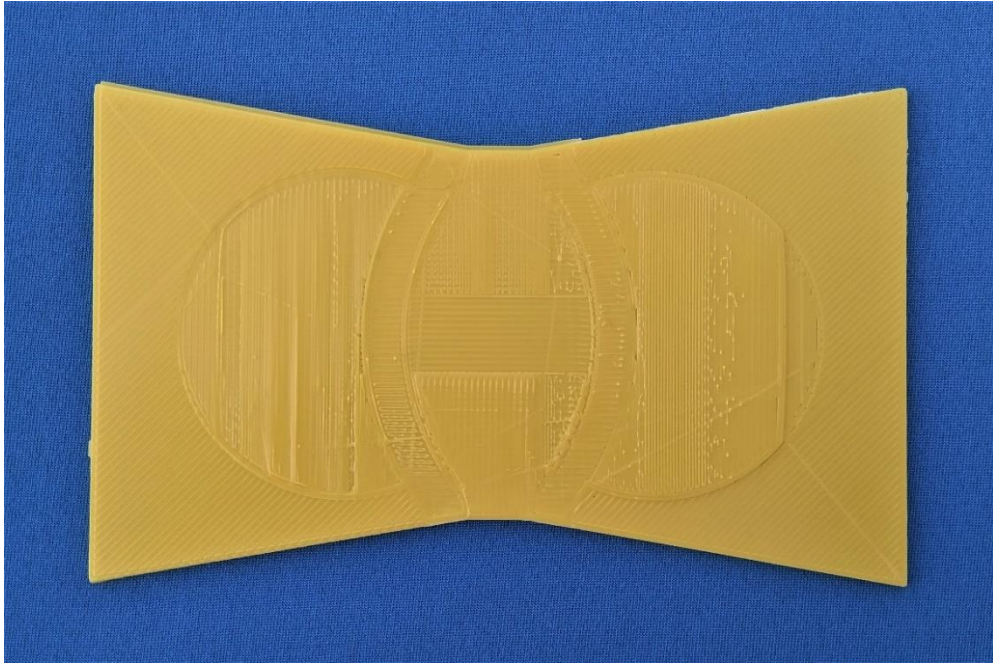


Figura 42 - Provete com qualidade melhorada em padrão Zig Zag.

No provete da figura 43 aumentou-se a espessura da camada de *brim* (aumento do número de contornos da peça na camada inicial de 10 para 15) o que resultou num melhoramento da adesão. Contudo, o problema de paragem de extrusão a meio do processo repete-se, possivelmente devido a um desalinhamento das peças de guiamento do fio de alimentação entre o tubo de guiamento e a roda dentada do motor que movimenta o filamento. A mudança de cor do objeto deve-se a uma troca de filamento.



Figura 43 - Provete impresso com outro filamento.

As imagens 44 e 45 mostram provetes da geometria simples. O primeiro apresenta falhas em certas zonas de impressão e o último é um melhoramento que será submetido ao teste da deformação em água quente. Este melhoramento deve-se à diminuição da aceleração que também permitiu um aumento da velocidade de impressão sem comprometer a qualidade final.



Figura 44 - Provede da geometria simples.



Figura 45 - Provede passível de ser testado.

A tabela 10 apresenta uma visão geral das falhas detetadas ao longo do processo de impressão e os respetivos passos implementados para as corrigir, assim como uma breve explicação/justificação das suas escolhas.

Tabela 10 - Falhas e respetivas correções.

FALHAS OBSERVADAS	CORREÇÕES IMPLEMENTADAS
<p>Sub extrusão (paragem de deposição de filamento a meio da impressão)</p>	<p><i>Cold pull</i> para limpeza do bico de extrusão.</p> <p>Aumento da temperatura do bico de extrusão (+5°C, fica a 215°C) para facilitar o processo de extrusão.</p> <p>Aumento do fluxo de extrusão para 105% (Um modo de compensar a falta de extrusão de material.)</p> <p>Desativação do parâmetro <i>enable retraction</i>, que puxa o filamento quando este não está a ser depositado, ou seja, quando o bico de impressão se movimenta na cama. Uma desvantagem é que pode dar origem a linhas de material/riscos não desejadas depositadas sobre a camada.</p>
<p>Não adesão à camada de impressão ou uma fraca adesão inicial que pode resultar numa descolagem da plataforma a meio da impressão. Este fenómeno pode dar origem a uma impressão desalinhada ou à acumulação de material no bico de extrusão.</p>	<p>Aumento da temperatura da plataforma de impressão de 40°C (o mínimo possível para diminuir a perda das tensões acumuladas importantes no processo de ativação da deformação)</p> <p>Mudança do padrão de impressão de <i>Lines</i> para <i>Zig Zag</i> que fornece uma deposição contínua de filamento em contraste com a opção descontínua/interrupta.</p> <p>Incremento do esmagamento do filamento ao depositar. (0.1 mm) ou seja, diminuição de espessura.</p> <p>Calibração/Ajuste da altura do bico de extrusão (com folha de papel/espessura de modo que nem fique muito presa nem solta.)</p>
<p>Quebra do filamento de alimentação aquando da impressão (devido a torções).</p>	<p>Manutenção do estado do filamento de alimentação (desemaranhar manualmente pois a impressora não possui enrolador).</p>

<p>Falha de impressão ao mudar de secção (zonas específicas) devido a falta de adesão ou a velocidades de impressão demasiado elevadas que impedem a adesão.</p>	<p>Diminuição da velocidade para a toda a peça. (camada inicial 10 mm/s e restantes 20 mm/s)</p> <p>Alteração dos <i>settings</i>/correção do parâmetro do diâmetro do filamento de alimentação. (1,75 mm)</p> <p>Diminuição da aceleração para 250 mm/s² em vez dos 500mm/s². (Evitar transições bruscas de modo a diminuir falhas pois o tubo de alimentação do filamento e as rodas dentadas apresentavam problemas a serem detetados.)</p> <p>Diminuição do <i>setting Print jerk</i> para 5mm/s (em vez dos 20 mm/s iniciais). Este parâmetro permite calibrar a velocidade inicial que é aplicada ao motor. O objetivo é de evitar o escorregamento/patinagem do filamento de alimentação nas rodas dentadas que o empurram para o bico de extrusão, ou seja, para evitar que deixe de ser empurrado. Esta alteração permitiu ainda o aumento de velocidade de impressão para 30mm/s em vez dos 20 mm/s e também da reposição do fluxo de extrusão para os 100%. A temperatura do bico foi ainda aumentada para 220°C.</p>
--	--

4.4.1 Condições de impressão melhoradas

Com o intuito de melhorar a qualidade de impressão foi usada outra impressora 3D, o que permitiu alterar os parâmetros e melhorar a qualidade da deformação. Nesta impressora, *Anycubic i3 Mega-S*, a temperatura da plataforma de impressão foi alterada para a ambiente e foi usada laca, garantindo a adesão do filamento à cama de impressão. Outra alteração efetuada foi o aumento de velocidade de 30 para 50 mm/s. Estas alterações são as ideais para a obtenção de deformações tal como foi concluído no capítulo anterior. O aumento de velocidade garante que o filamento depositado não é reaquecido em demasia pela deposição do filamento seguinte, o que facilita o armazenamento das tensões internas que provocam a deformação. Por último, a ventilação forçada manteve-se, promovendo o arrefecimento rápido do plástico.

Desta forma, os provetes foram reimpressos e estão apresentados no subcapítulo que se segue.

4.5 Ativação dos Provetes

Nesta etapa é feita a ativação dos provetes, obtidos na fase anterior, assim como uma análise dos resultados obtidos e respetiva ponderação do que pode ser potencialmente melhorado.

4.5.1 Preparação

A ativação dos provetes de PLA será feita por imersão num banho de água quente visto as temperaturas (entre 60 e 65°C) da faixa de transição vítrea do material escolhido serem compatíveis com este método. Este processo permite ativar os provetes de forma homogénea, pois toda a geometria é aquecida em simultâneo ao ser submersa no fluido quente.

No artigo *A-line* [4] é referido que no processo de ativação de provetes a densidade da água foi aumentada para 1,16 g/cm³ recorrendo à dissolução de açúcar. Este passo minimiza a influência da gravidade no processo de deformação. Portanto, é preferível que o objeto “flutue” e, por isso, o valor de densidade utilizado nestas experiências é o referido na literatura. A imagem 46 do mesmo artigo [4] ilustra o efeito que a densidade do fluido ativador tem na deformação do objeto impresso.



Figura 46 - Efeito da densidade no processo de ativação. Adaptado de: [4].

Para aumentar a densidade da água, do valor considerado de 1 g/cm³, até ao valor desejado, basta adicionar 0,16 g de açúcar a cada ml de água utilizado. No entanto, e no caso particular dos provetes criados no âmbito desta dissertação, a alteração da densidade da água revelou ser um passo desnecessário visto não ter um impacto significativo quando se compara a ativação dos provetes com água a densidades diferentes.

Em relação ao banho de água, este tem de estar a uma temperatura à qual o provete deforme, ou seja, uma temperatura dentro da faixa de transição vítrea do material. Neste caso trata-se de PLA e, por isso, a temperatura escolhida está por volta dos 76°C. Após a deformação do plástico é importante deixar a temperatura

da água diminuir para que se encontre fora da faixa de transição (inferior a 60°C) e se possa remover o objeto sem danificar a forma obtida durante o processo de deformação/ativação.

4.5.2 Ativação

Nesta etapa são analisadas as deformações obtidas tendo em conta o caminho de impressão escolhido para cada zona de deformação. Esta análise permite que, posteriormente, se planeiem correções a serem efetuadas na fase seguinte. As imagens 47 e 48 apresentam as planificações impressas com sucesso antes de serem submetidas ao processo de ativação.



Figura 47 - Impressão simples no estado de pré-ativação.



Figura 48 - Impressão complexa no estado de pré-ativação.

GEOMETRIA SIMPLES

A imagem 49 apresenta a geometria simples acionada e pode-se confirmar que a falha mais óbvia, neste caso, são as zonas que fazem a ligação entre o acento e o restante da geometria, ou seja, a dimensão reduzida não permite a deformação completa de 90° pretendida. De igual forma a zona da saia da cadeira também não dobra na forma de círculo ficando incompleto.

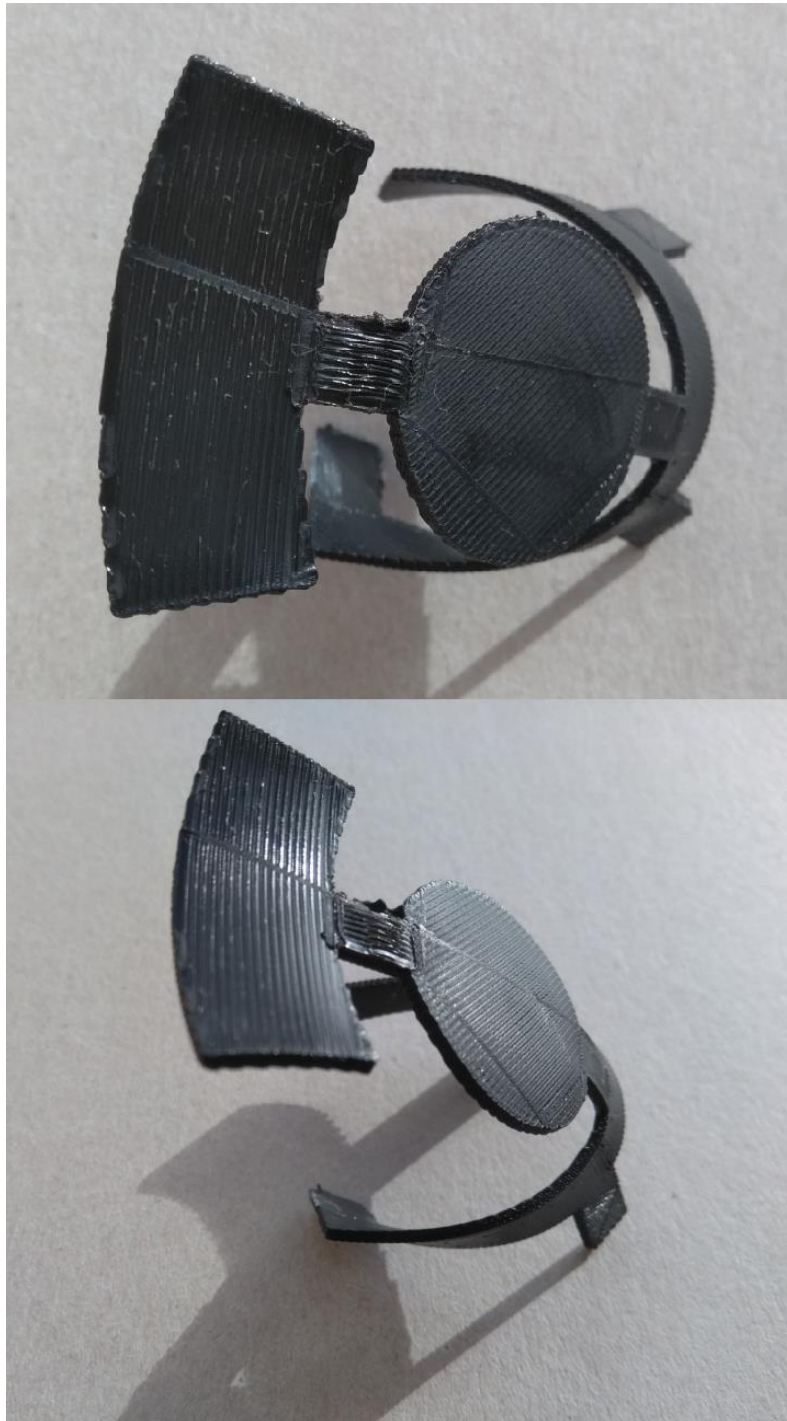


Figura 49 - Impressão simples no estado de pós-ativação.

GEOMETRIA COMPLEXA

A figura 50 mostra uma imagem em detalhe da vista lateral da geometria complexa impressa e as respetivas previsões de deformação para cada zona. Na zona A, a deformação não ocorre conforme o planeado, sendo que as dimensões desta zona de ligação não apresentam comprimento suficiente para efetuar a dobra. Uma possível solução seria imprimir a geometria em maiores dimensões, embora isso possa alterar a deformação das restantes zonas da geometria de forma imprevisível. Tal impressão não foi efetuada pois as dimensões da máquina não o possibilitam. A zona B diz respeito ao assento e, embora pouco visível nesta figura, a deformação ocorreu de forma gradual, mas no sentido oposto ao pretendido, o que é facilmente corrigível com a troca entre camadas transversais e longitudinais. Esta observação poderá ser explicada devido à geometria não uniforme que o assento apresenta e à variação de espessura/escala que lhe foi imposta, sendo que as orientações consideradas para esta geometria são opostas ao que foi observado experimentalmente, tal como exemplifica a imagem 51. Outra explicação possível é a ocorrência de fenómenos ainda desconhecidos, que levam à anulação do efeito pretendido. No fundo, o efeito de deformação é algo que resulta de um somatório de fenómenos e é expectável que uma observação como a da zona B ocorra por ser uma geometria não estudada. A deformação gradual da zona C está de acordo com o objetivo inicial. O gradiente nesta zona começa mais intenso junto ao acento e reduz intensidade à medida que se afasta.

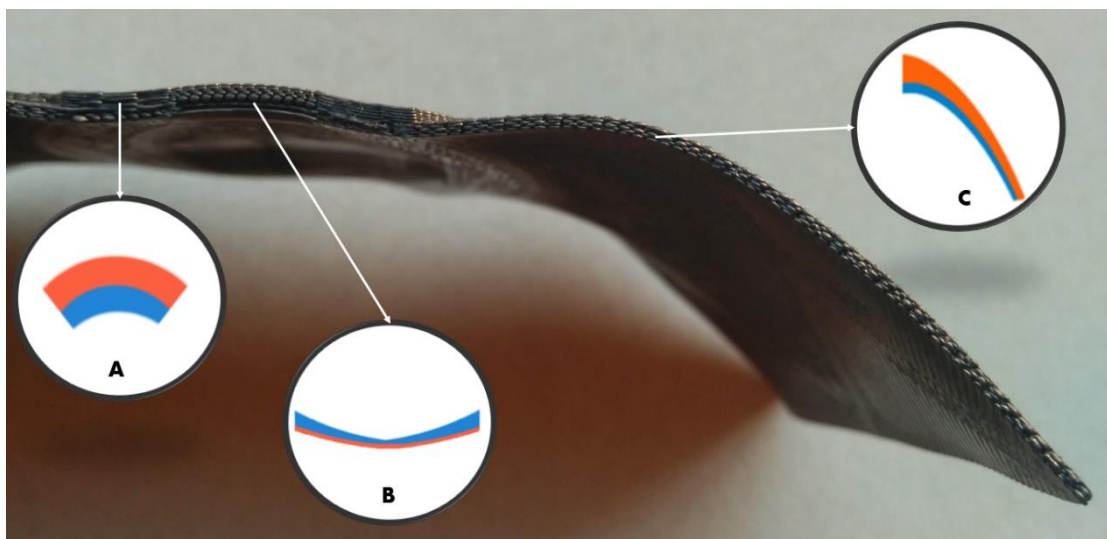


Figura 50 - Geometria complexa ativada com identificação de zonas de deformação.

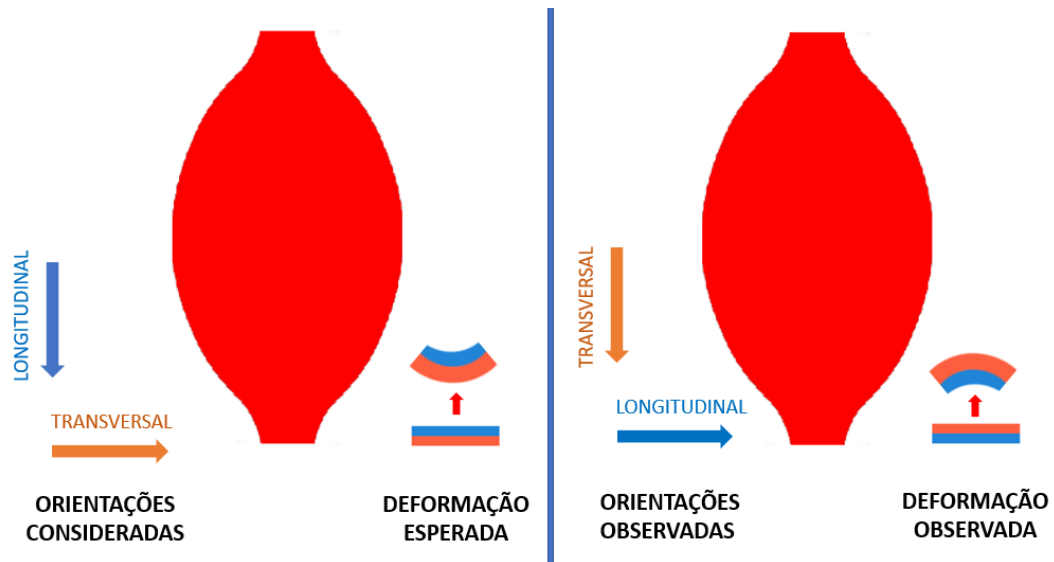


Figura 51 - Esquemática de considerações e observações da zona B.

Na imagem 52 apresenta-se uma perspectiva geral da geometria complexa ativada.



Figura 52 - Impressão complexa no estado pós-ativação.

4.5.3 Redesign

Tendo em conta as observações efetuadas, na primeira etapa de ativação dos provetes, são efetuadas correções nos caminhos de impressão para que se obtenham geometrias mais próximas do objetivo pretendido.

GEOMETRIA SIMPLES

O comprimento das dobradiças foi aumentado de modo a permitir a formação de um ângulo de 90° passando de 0.9 para 3 cm de comprimento. A determinação deste valor tem por base uma aproximação do ângulo de deformação feita a partir do provete anterior. As dimensões gerais da geometria sofreram também um aumento de escala de 10% para se tornar mais visível o efeito de transformação. Por último, e de modo a criar um efeito de deformação mais simples e uniforme, as formas em arco da planificação passaram a ser retilíneas. Estas alterações podem ser visualizadas na figura 53.

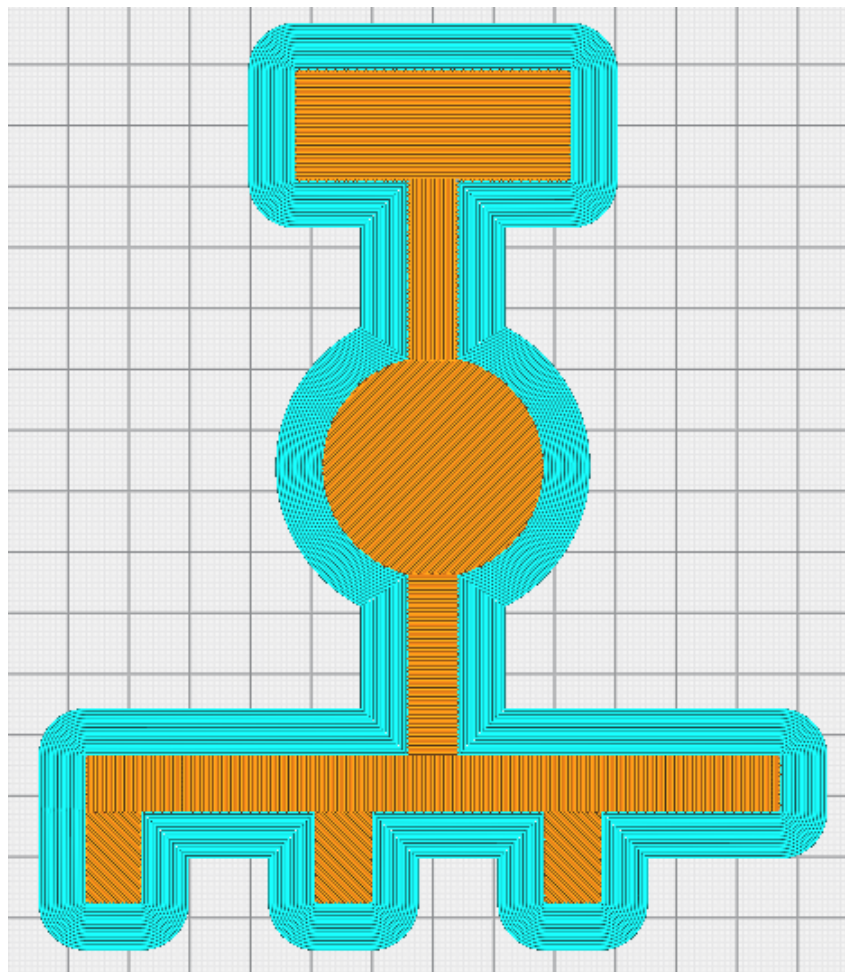


Figura 53 - *Redesign* da geometria simples.

GEOMETRIA COMPLEXA

Como a escala da geometria complexa não pode ser alterada, optou-se por criar uma nova zona de dobragem sem gradiente de deformação para permitir uma deformação mais acentuada e próxima do planeamento inicial. A última correção efetuada foi ao sentido de deformação do acento, visto que na etapa anterior a deformação ocorreu no sentido oposto. Na figura 54 estão representadas as modificações feitas ao caminho de impressão.

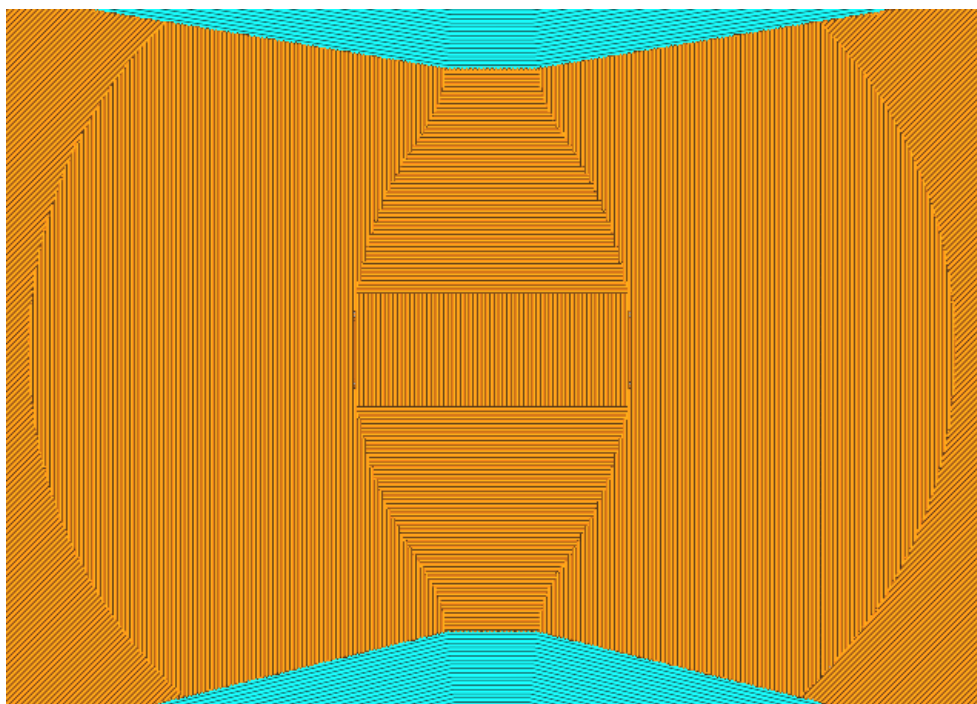


Figura 54 - *Redesign* da geometria complexa.

4.5.4 Segunda etapa de ativação

Com o *redesign* dos caminhos de impressão efetuados, segue-se a segunda etapa de ativação e respetiva análise de resultados. A versão final dos *redesigns* ativados pode ser observada na fotografia 55 tirada em fundo de papel milimétrico.

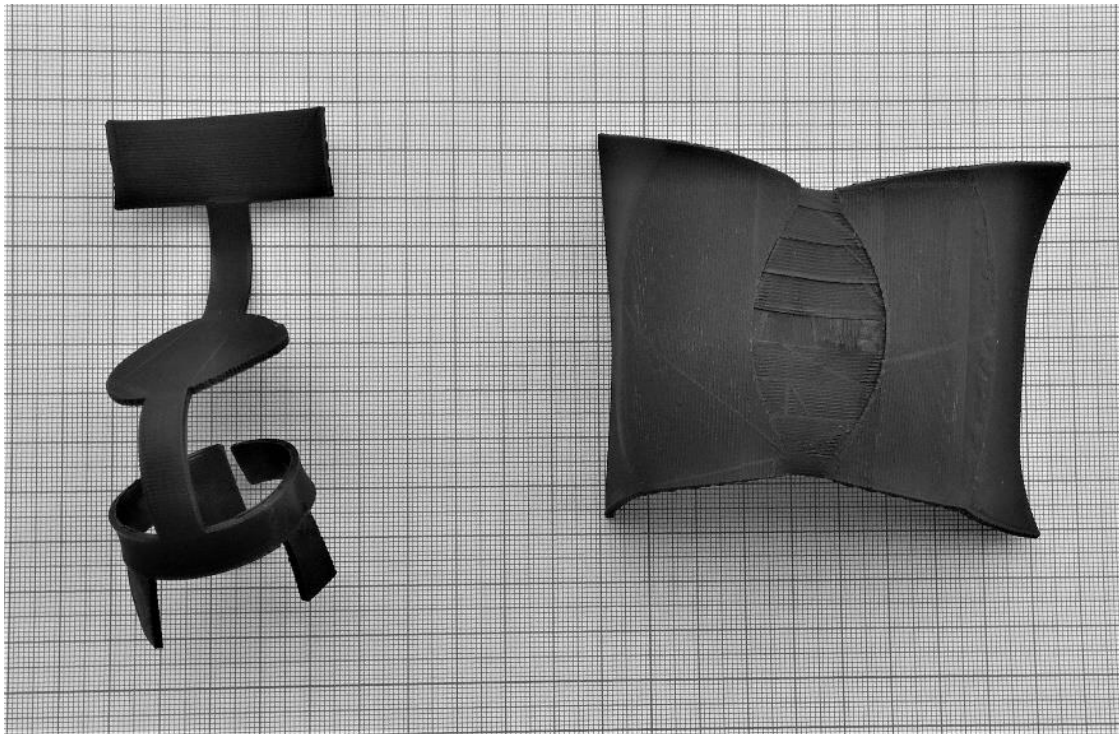


Figura 55 - *Redesign* das geometrias ativado.

GEOMETRIA SIMPLES

No caso da geometria simples, como se pode confirmar na imagem 56, todos os objetivos de deformação foram atingidos. Esta geometria não é funcional pois, além das limitações inicialmente estabelecidas para ambas as geometrias, o material não está distribuído de forma a manter-se equilibrado na vertical, ou seja, o centro de massa não foi considerado na etapa de *redesign*.

Na mesma imagem (56), pode-se observar que a zona das costas da cadeira apresenta uma deformação adicional não planeada que se deve à contração das camadas transversais, o que forma a curvatura aparentemente mais ergonómica da cadeira. Este efeito foi discutido no capítulo da deformação homogénea. Neste capítulo, a imagem 13, que diz respeito à impressão transversal, está esquematizada dando ênfase à deflexão vertical, mas na realidade os segmentos retilíneos, a laranja, deviam apresentar também uma curvatura própria para cima, tal como a imagem 12 da impressão longitudinal.

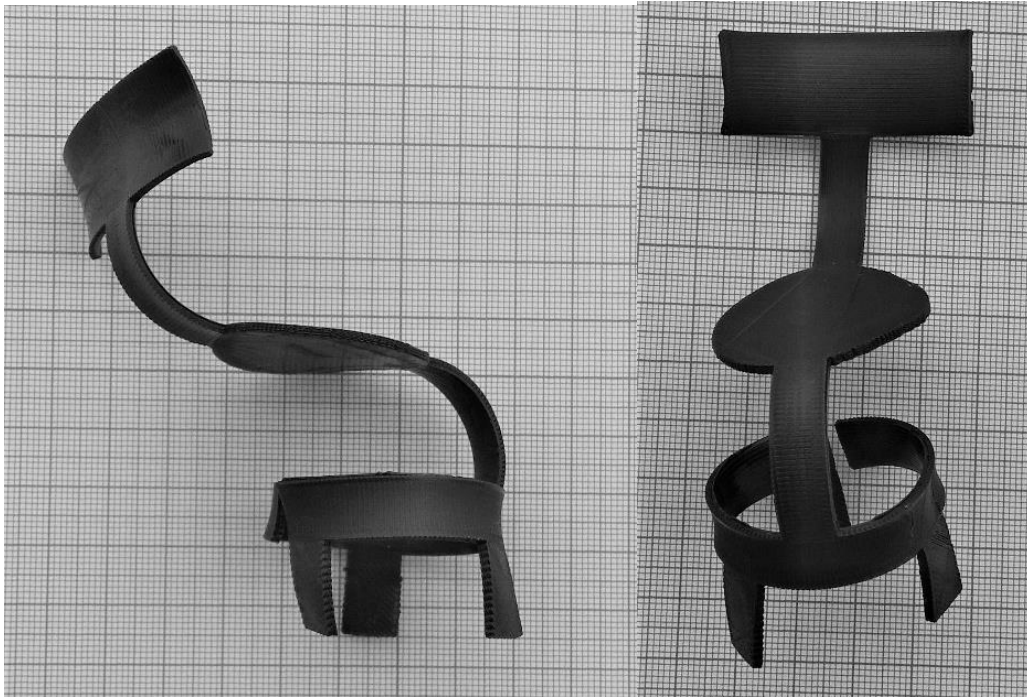


Figura 56 - *Redesign* da geometria simples ativado.

GEOMETRIA COMPLEXA

O arco visível na imagem 57 mostra que o objetivo de formar um ângulo de 90° foi atingido, assim como a inversão do sentido de deformação da zona do acento. No entanto, a geometria final não é simétrica sendo que uma das pernas deformou mais uniformemente que a outra.



Figura 57 - Detalhe em arco do *redesign* ativado da geometria complexa.

4.6 Sumário

Nesta componente de projeto, após o planeamento, impressão e obtenção de duas geometrias distintas, é de notar que a mudança de escala continua a ser um obstáculo na obtenção de objetos 4D. Apesar disso, a criação de um gradiente de deformação é possível de obter numa secção sólida. Além deste facto, a combinação de formas simples, que seguem os padrões de geometria bem documentadas na literatura, mostra ser um método eficiente para a obtenção de objetos que revelam alguma complexidade. Como última nota, observa-se, de uma forma geral, o facto de a impressão 4D por FFF ser uma área de estudo com potencial de ser estudada em maior detalhe.

5. Conclusões

A impressão 4D ainda está a ser desenvolvida, mas é muito promissora em várias vertentes, por exemplo, na economia de tempo e de material de impressão, resultando em impactos positivos em termos ecológicos e financeiros.

Ao desenvolver esta tese, e em particular a componente de projeto, torna-se claro que uma das maiores vertentes a serem exploradas será a engenharia inversa, com o objetivo de obter estruturas a partir do *design* final desejado e não de planificações iniciais, de que é exemplo a geometria complexa aqui apresentada. No entanto, o processo seguido para a obtenção do caminho de impressão da estrutura escolhida foi manual, ou seja, os comandos foram criados ao isolar cada zona, planeados individualmente antes de serem impressos e, posteriormente, corrigidos. Já existem pesquisas (por exemplo o artigo *A-line*) que apresentam softwares que permitem ao utilizador a programação de uma forma geométrica 4D a obter por FFF. Obviamente que a criação de softwares interativos diz respeito a uma fase mais avançada de pesquisa. A necessidade mais imediata e promissora, no sentido de auxiliar na compreensão e otimização dos processos que estão na base da impressão 4D, seria a simulação numérica. No entanto, o uso desta ferramenta requer a existência de bases de dados confiáveis acerca do comportamento e alteração de propriedades do termoplástico a diferentes temperaturas. Alguns desses dados, que têm implicações em termos de qualidade do processo de impressão, estão dependentes de diversos fatores complexos, como as propriedades do material, a sua taxa de deposição, as taxas de transferência de calor e as deformações que ocorrem durante e depois do processo.

A limitação que mais se destaca no projeto é a impossibilidade de mudança de escala para o tamanho real, por motivos estruturais, e consequente imprevisibilidade do efeito de deformação, o que revela uma necessidade latente de exploração desta área. Outra vertente a explorar será a utilização de outros materiais para além do PLA, como a utilização de outros termoplásticos (não apenas o ABS) e a comparação de resultados entre estes ou até mesmo a combinação de diferentes materiais.

Um aspeto positivo a salientar é a facilidade que um utilizador de uma impressora 3D por FFF tem em aplicar o 4D, uma vez que o tipo de material a utilizar é o mesmo

para o 4D e para o 3D, não havendo necessidade de adquirir outros materiais, necessitando apenas de dominar o software de criação dos caminhos de impressão.

Ao desenvolver esta dissertação introduziu-se o conceito de deformação complexa, ao variar na mesma secção o número de camadas impressas de cada tipo, com o objetivo de obter um gradiente de deformação, comprovando-se, experimentalmente, a existência dessa possibilidade.

Concluindo, a impressão 4D por FFF revela-se um campo de exploração amplo e produtivo, com a capacidade de facilitar processos de produção já existentes e, mesmo, potenciar o desenvolvimento de produtos outrora impossíveis de conceber. Nesta dissertação procurou-se explorar algumas dessas vertentes, tendo por base a compreensão dos princípios que possibilitam o desenvolvimento de estruturas com alteração de forma.

6. Bibliografia

[1] H. Chu et al., "4D Printing: A Review on Recent Progresses", *Micromachines*, vol. 11(9), no. 796, pp. 1-30, Aug., 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/mi11090796>. Accessed on: Feb., 4, 2021.

[2] M. Young, "What is 4D Printing? – All You Need to Know" 2019. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/4d-printing/>. Accessed on: Apr., 7, 2020.

[3] Y. Tao et al., "Demonstrating thermorph: Democratizing 4D printing of self-folding materials and interfaces," *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, vol. 2018-April, pp. 1-12, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3170427.3186478>. Accessed on: Apr., 2, 2020.

[4] G. Wang, Y. Tao, O. B. Capunaman, H. Yang, and L. Yao, "A-line: 4D Printing Morphing Linear Composite Structures," *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, pp. 1-12, May, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3290605.3300656>. Accessed on: Dec., 16, 2019.

[5] "4D Printing: A technology coming from the future" [Online]. Available: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/best-3d-printing-articles/4d-printing-technology/>. Accessed on: Apr., 13, 2020.

[6] "Glass Transition Temperature (T_g) of Plastics - Definition & Values" [Online]. Available: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/glass-transition-temperature>. Accessed on: Mar., 6, 2020.

[7] Y. Xia et al., "A Review of Shape Memory Polymers and Composites: Mechanisms, Materials, and Applications", *Adv. Mater.*, vol. 33, no. 6, pp. 1-33, Sept., 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/adma.202000713>. Accessed on: Apr., 7, 2020.

[8] C. Woodford, "How do shape-memory materials work? - Explain that Stuff". 2020. [Online]. Available: <https://www.explainthatstuff.com/how-shape-memory-works.html>. Accessed on: Apr., 7, 2020.

- [9] W. M. Huang, "An Introduction to Shape Memory Materials", 2010. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5164>. Accessed on: Apr., 7, 2020.
- [10] B. Goo, C. Hong, and K. Park, "4D printing using anisotropic thermal deformation of 3D-printed thermoplastic parts", *Materials & Design*, vol. 188, no. 108485, Jan., 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108485>. Accessed on: Apr., 9, 2020.
- [11] Q. Zhang, D. Yan, K. Zhang and G. Hu, "Pattern Transformation of Heat-Shrinkable Polymer by Three-Dimensional (3D) Printing Technique," *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 8936, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/srep08936>. Accessed on: Mar., 26, 2020.
- [12] J. Gu et al., "Geodesy: Self-rising 2.5D Tiles by Printing along 2D Geodesic Closed Path," *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, vol. 2019-May, no.37, pp. 1–10, May, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3290605.3300267>. Accessed on: Jan., 25, 2020.
- [13] K. Sundararajan, "DESIGN OF EXPERIMENTS – A PRIMER www.isixsigma.com." [Online]. Available: <https://www.isixsigma.com/tools-templates/design-of-experiments-doe/design-experiments-%E2%90%93-primer>. Accessed on: Jun., 15, 2020.
- [14] "Papercraft Chair by Shiwori Studio". [Online]. Available: <https://cms.whiterabbitexpress.com/papercraft-chair-by-shiwori-studio/papercraft-chair-red/>. Accessed on: Apr., 30, 2020.
- [15] S. Hisao, "Design Museum: Kids' Activities Micro-Chairs" [Online]. Available: http://satohisao.com/pages/2_works/2_dmuseum/1_chairs/e_chairs.html. Accessed on: Apr., 30, 2020.
- [16] G. Wang et al., "4DMesh: 4D Printing Morphing Non-Developable Mesh Surfaces," *ACM Symposium on User Interface Software and Technology - Proc.*, no. 31st, pp. 623–635, Oct., 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3242587.3242625>. Accessed on: May, 18, 2020.

[17] G. Wang et al., "Printed Paper Actuator: A Low-cost Reversible Actuation and Sensing Method for Shape Changing Interfaces," *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, vol. 2018-April, no. 569, pp. 1–12, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3173574.3174143>. Accessed on: May, 11, 2020.

[18] Z. X. Khoo et al., "3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 10, no. 3, pp. 103-122, Oct., 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>. Accessed on: Jun., 22, 2020.

[19] M. S. Cadete et al., Morphing Shapes by 3D Printing, presented at 2nd International Conference of TEMA: mobilizing projects, Aveiro, Portugal, 2019.