



GONÇALO BAGUEIXE CRUZ DE GÓIS DIAS

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

EFEITOS DO ENVELHECIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TERMOPLÁSTICO POLIURETANO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2023



EFEITOS DO ENVELHECIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TERMOPLÁSTICO POLIURETANO PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D

GONÇALO BAGUEIXE CRUZ DE GÓIS DIAS

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientadora: Doutora Catarina Isabel Silva Vidal

Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
NOVA de Lisboa

Coorientador: Doutor Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares

Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Nuno Alberto Marques Mendes

Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
NOVA de Lisboa

Vogais: Doutora Catarina Isabel Silva Vidal

Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
NOVA de Lisboa

Doutora Isa Cristina Teixeira Santos

Professora Adjunta Convidada da Escola Superior Aveiro Norte da
Universidade de Aveiro

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Novembro, 2023

EFEITOS DO ENVELHECIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM POLÍMERO FLEXÍVEL PRODUZIDO POR IMPRESSÃO 3D

Copyright © Gonalo Bagueixe Cruz de G3is Dias, Faculdade de Ci4ncias e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ci4ncias e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa t4m o direito, perp4tuo e sem limites geogr4ficos, de arquivar e publicar esta disserta3o atrav4s de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar atrav4s de reposit3rios cient4ficos e de admitir a sua c3pia e distribui3o com objetivos educacionais ou de investiga3o, n3o comerciais, desde que seja dado cr4dito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Catarina Isabel Silva Vidal, pelo seu apoio, disponibilidade e prontidão, o que permitiu superar os desafios inerentes e imprevisíveis ao desenvolvimento deste estudo.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares, pelos conselhos e ajudas prestadas para a componente laboratorial, nomeadamente para o processo de impressão 3D.

Aos meus colegas do laboratório de impressão 3D, pela companhia, bons momentos e ajudas prestadas durante todas as fases da dissertação, especialmente nas mais difíceis.

A Catarina Soares, pela companhia diária, pela motivação e por tornar sempre os dias na melhor versão de si mesmos.

À minha família, por me proporcionarem as condições de poder escolher, frequentar e terminar este curso.

Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.

14-2-1933, Odes de Ricardo Reis. Fernando Pessoa

RESUMO

Este estudo teve como objetivo perceber o modo como as propriedades mecânicas, de uma peça de Poliuretano Termoplástico (TPU) produzida por impressão 3D, se alteram quando esta é exposta a condições climáticas, nomeadamente humidade, radiação e temperatura.

TPU trata-se de um material já largamente estudado e comercializado. Este trata-se de um termoplástico, podendo ser fabricado e moldado por processos que tenham por base calor, mas com uma resistência mecânica comparável ao de borracha. Tais características conferem-lhe uma ampla variedade de aplicações pela indústria. Uma das suas utilizações é em processos de impressão 3D, nomeadamente *Fused Filament Fabrication* (FFF).

O tempo de vida deste material é algo também já aprofundado pelos estudos realizados, nomeadamente o seu envelhecimento devido a condições climáticas. Normalmente é sempre reportado uma degradação do material, contudo, verifica-se que este tópico para peças produzidas por FFF ainda não se encontra aprofundado. É esperado que o material também sofra degradação, mas pretende-se estudar como esta afeta as suas propriedades mecânicas.

Para tal, dois grupos de provetes foram sujeitos a ensaios de tração, sendo um dos grupos envelhecido. Dentro dos grupos foi variada a percentagem de enchimento e a orientação de impressão. Os dados de cada grupo foram tratados e os seus gráficos de tensão-extensão foram elaborados.

Por fim, comparando ambos os ensaios de tração, pode concluir-se que os fatores testados provocaram uma diminuição nas propriedades mecânicas do polímero. Contudo, para observar maiores variações seria necessário um maior tempo de exposição às condições em teste.

Palavras chave: Termoplástico Poliuretano, Manufatura Aditiva, Fused Filament Fabrication, Envelhecimento polímeros

ABSTRACT

This study aimed to understand the behaviour of a Thermoplastic Polyurethane (TPU) component produced through 3D printing when exposed to weather conditions, such as humidity, radiation, and temperature.

First, a literature review is conducted regarding the material in question and related studies that have already been carried out. TPU is a widely studied and commercialized material. It is a thermoplastic, capable of being manufactured and moulded through heat-based processes, yet possessing mechanical resistance comparable to rubber. These characteristics grant it a wide range of applications in the industry, including its use in 3D printing processes such as Fused Filament Fabrication (FFF).

The material's lifespan has also been extensively explored in previous studies, particularly its aging due to weather conditions. Degradation of the material is typically reported; however, this topic for parts produced by FFF has not yet been studied in depth. It is anticipated that the material will also undergo degradation, but the focus is on studying how this degradation affects its mechanical properties.

To achieve this, two groups of specimens underwent tensile testing, with one group being subjected to aging. Within these groups, variations were made in the infill percentage and printing orientation. The data from each group were processed, and their stress-strain graphs were generated using MatLab software.

Finally, comparing both tensile tests, it can be concluded that the factors tested caused a decrease in the polymer's mechanical properties. However, in order to observe greater variations, a longer exposure time to the test conditions would be necessary.

Keywords: Thermoplastic Polyurethane, Additive manufacturing, Fused Filament Fabrication, Ageing of polymer

ÍNDICE

Agradecimentos.....	vii
Resumo.....	xi
Abstract	xiii
Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
Pesquisa Bibliográfica.....	5
2.1 Poliuretano Termoplástico - TPU.....	5
2.1.1 Descrição do TPU	5
2.1.2 Propriedades	6
2.1.3 Aplicações de TPU.....	8
2.2 Impressão 3D de TPU.....	9
2.2.1 Processo de impressão.....	9
2.2.2 Cuidados a ter neste processo	11
2.2.3 Fatores que podem afetar as propriedades mecânicas de produtos obtidos por FFF	12
2.3 Envelhecimento de Polímeros	13
2.3.1 Radiações UV	14
2.3.2 Envelhecimento Higrotérmico.....	15
2.3.3 Envelhecimento de TPU a realizar.....	16
Metodologia.....	18
3.1 Produção dos Provetes	18
3.1.1 Tipo de provete.....	18

3.1.2	Especificações do material a usar e características dos provetes a produzir	20
3.1.3	Impressão dos provetes.....	22
3.2	Câmara de envelhecimento.....	25
3.2.1	Reparações e modificações	26
3.2.2	Câmara final.....	34
3.3	Equipamentos para os ensaios de tração	36
	Resultados Experimentais	39
4.1	Ensaio de provetes não envelhecidos.....	39
4.2	Ensaio de provetes envelhecidos	41
4.3	Comparação de resultados.....	43
	Conclusão e Trabalhos Futuros	47
5.1	Conclusão.....	47
5.2	Trabalhos Futuros.....	49
	Bibliografia.....	51
	Anexos	54
A	Gráficos tensão- extensão dos provetes impressos horizontalmente	54
B	Gráficos tensão- extensão dos provetes impressos verticalmente	55
C	Gráficos tensão- extensão dos provetes horizontais envelhecidos	57
D	Gráficos tensão- extensão dos provetes verticais envelhecidos.....	58
E	Código usado para o controlo dos ciclos de envelhecimento	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da disposição dos blocos constituintes do TPU, adaptado de [2].....	6
Figura 2 - Estrutura molecular de TPU [3].....	6
Figura 3 - Esquema de teste de abrasão [4].....	7
Figura 4 - Comparação entre resultados de teste de abrasão para diversos materiais [3]	7
Figura 5 - Esquema da reorganização de ligações no TPU com a mudança de temperaturas [2].....	8
Figura 6 - Esquema do processo de FFF [9]	10
Figura 7 - Problemas na impressão 3D de Elastómeros, (a) para filamento rígido e para (b)(c) filamento flexível [10]	11
Figura 8 - Esquema do efeito da direção das camadas para (a) esforços paralelos às camadas e (b) esforços perpendiculares	12
Figura 9 - Esquema de provete produzido por Arifvianto por et al. [11].....	13
Figura 10 - Variação das propriedades de TPU quando submetido a radiações UV, (a) variação do modulo de Young e (b) tensão no material quando este se encontra com uma extensão de 200% [13]	14
Figura 11 – Variação das propriedades de TPU sujeito a envelhecimento higrotérmico, (a) variação da tensão e (b) teste de abrasão [14].....	16
Figura 13 - Dimensões especificadas pela norma D 638 – 03 para provetes [16].....	Error!
Bookmark not defined.	
Figura 14 - Desenho do provete a produzir com as dimensões em milímetros	19
Figura 15 - Representação do uso de <i>brim</i> no <i>software</i> de <i>slicing</i>	20
Figura 16 - Diferenças no valor do enchimento entre provetes: 5% (a), 25% (b), 55% (c)	21
Figura 17 - Pormenor do padrão usado para o enchimento dos provetes	21
Figura 18 - Impressora usada para a produção dos provetes.....	22
Figura 19 – (a) Modelo gerado pelo software de <i>slicing</i> para os provetes horizontais, (b) proвете impresso horizontalmente, (c) pormenor das camadas da impressão.....	23
Figura 20 – Efeito das vibrações na impressão vertical sem apoios	23
Figura 21 - Impressão vertical: modelo criado em <i>SolidWorks</i> (a), passagem pelo software de <i>slicing</i> para a criação de apoios (b), produto final (c).....	24
Figura 22 - Modelo da câmara de envelhecimento [17]	26
Figura 23 - Placas controladoras: Arduino ® mega usado (a), placa Velleman® substituída (b), pormenor do defeito no chip central da placa Velleman® (c)	27

Figura 24 - Transformador usado para fornecer energia à placa controladora	27
Figura 25 - <i>Driver</i> TB660 para o motor passo a passo (a), configuração para o <i>microstep</i> usada (b)	28
Figura 26 - Novo circuito elétrico com legenda dos componentes: 1) Driver TB660; 2) Leitor de cartões SD; 3) Placa Arduino ®; 4) Grupo de relés para o controlo do sistema de arrefecimento e humidade; 5) Relé do circuito de manutenção do nível da água	30
Figura 27 – Sensor DFROBOT – DFR0067 de temperatura e humidade usado na câmara	31
Figura 28 - Fonte de alimentação adaptada ao circuito.....	32
Figura 29 - (a) Lâmpada usada, (b) Ciclo de envelhecimento no qual a lâmpada se insere [15]	33
Figura 30 - (a) Aquecedor a ventoinha, (b) Resistência do aquecedor usada.....	33
Figura 31 - Esquema do circuito elétrico do Arduino®.....	35
Figura 32 – Diversas vistas do apoio projetado para os provetes	36
Figura 33 - Máquina de tração uniaxial usada nos ensaios.....	37
Figura 34 – Pormenor dos tipos de falhas apresentadas pelos provetes verticais: (a)(b) falhas em provetes de 25%, (c) falha num provete de 55%, (d) rotura completa de um dos provetes com 5% de enchimento	41
Figura 35 - Pormenor das camadas de um provete horizontal: (a) Provete não envelhecido, (b) Provete depois de um processo de envelhecimento	42
Figura 36 – (a) Fratura de um dos provetes verticais, (b) com o pormenor da separação de camadas	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Opções de ciclos de radiação UV e humidade, adaptado de [15].....	17
Tabela 2 - Características dos filamentos usados	20
Tabela 3 - Matriz de características e ensaios	25
Tabela 4 - Numeração dos cabos constituintes do circuito.....	31
Tabela 5 - Saídas de cada componente usadas na placa Arduino®	34
Tabela 6 - Valores de tensão e extensão dos ensaios a provetes não envelhecidos	39
Tabela 7 - Valores de tensão e extensão dos ensaios a provetes envelhecidos	42
Tabela 8 - Comparação entre os valores da tensão de cedência.....	43
Tabela 9 - Comparação entre os valores de extensão à cedência.....	44

SIGLAS

DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
FDM	<i>Fused deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused filament Fabrication</i>
FTIR	<i>Fourier-transform infrared</i>
PLA	<i>Poly lactide</i>
SEM	<i>Scanning electron microscope</i>
SLS	<i>Selective laser sintering</i>
TPU	<i>Thermoplastic polyurethane</i>
UV	Ultravioleta

SÍMBOLOS

A	Ampere
°C	Celsius
CS	<i>Chipselect</i>
DIR+ / DIR-	<i>Direction</i>
ENA+/ENA-	<i>Enable</i>
E	Modulo de <i>Young</i>
GND	<i>Ground</i>
kN	Kilonewton
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
min	Minuto
MISO	<i>Master in Slave out</i>
MOSI	<i>Master out Slave in</i>
PUL+/PUL-	<i>Pulse</i>
PWR	<i>Power entry</i>
SCK	Serial Clock
s	segundo
T	Espessura do provete
V	Volt
W	Watts
ϵ	Extensão Nominal
θ	Ângulo das linhas de impressão
σ	Tensão de cedência

INTRODUÇÃO

Com este capítulo pretende-se fazer um enquadramento do material polimérico Poliuretano Termoplástico (TPU), das suas diversas áreas de aplicação e do seu uso em fabrico aditivo. Serão também apresentados os objetivos e a estrutura deste documento.

1.1 Enquadramento e Motivação

TPU trata-se de uma classe de polímeros elastómeros caracterizados por diversas propriedades, como elasticidade natural, transparência, resistência à abrasão, entre outras. Este é descrito como um elo intermedio entre borracha e outros polímeros, uma vez que possui propriedades mecânicas semelhantes a borracha, mas pode ser produzido pelos meios habituais usados para termoplásticos [1].

Das suas diversas propriedades, duas destacam-se, que conferem a este material um especial interesse do ponto de vista da produção. Estas são a sua baixa resistência à temperatura e a capacidade de manter as suas propriedades e estrutura molecular mesmo depois de submetido a várias mudanças de temperatura. Esta combinação permite ao material ser reutilizado e também o tornam atrativo para processos de fabrico que envolvam calor para causar deformação, nomeadamente impressão 3D por *Fused Filament Fabrication* (FFF).

Para que este material possa ser utilizado, além de conhecer as suas propriedades e modos de fabrico, é também necessário saber como é que este se comporta com o passar do tempo. Existem diversos fatores externos que, quando aplicados durante longos períodos de tempo, podem influenciar o material, resultando assim numa alteração das propriedades inicialmente consideradas. Para este aspeto, foram criados ensaios de envelhecimento que permitem submeter o material a condições semelhantes

às que este iria encontrar, mas com intervalos de tempo muito inferiores.

Assim, com este estudo pretende-se medir os impactos que um processo de envelhecimento terá numa peça produzida por FFF. Tal será alcançado através da impressão de dois conjuntos de provetes. O primeiro conjunto será testado quanto às suas propriedades mecânicas, enquanto que o segundo será primeiro submetido a um determinado número de horas de ciclos de envelhecimento. De seguida, as propriedades mecânicas dos provetes envelhecidos serão testadas, e da comparação entre os dois grupos de provetes será possível concluir se fatores como radiação, temperatura e humidade, afetam as características mecânicas.

1.2 Objetivos

Com esta dissertação pretende-se compreender o comportamento do material TPU, em peças produzidas por FFF, quando estas são sujeitas a um processo de envelhecimento. Este processo tem como objetivo simular condições semelhantes às atmosféricas, mas de modo acelerado para que as alterações possam ser observadas.

Assim, pode ser dito que o objetivo será o de reportar o modo como provetes de TPU produzidos por FFF reagem quando sujeitos a condições que pretendem simular longos períodos de exposição a condições atmosféricas. Nomeadamente, a fatores como radiação, humidade e temperatura.

Resumidamente, os objetivos a cumprir podem ser expostos deste modo:

- Produzir dois grupos de provetes por impressão 3D;
- Variar a sua percentagem de enchimento e orientação de impressão;
- Caracterizar mecanicamente os provetes;
- Submeter os provetes a um processo de envelhecimento, e de seguida caracterizá-los mecanicamente;
- Comparar os resultados, concluindo qual a diferença exibida nas propriedades mecânicas pelos provetes.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 5 capítulos principais com as respetivas designações: Pesquisa Bibliográfica, Metodologia, Resultados Experimentais e Conclusão e Trabalhos Futuros.

Primeiro, no capítulo Pesquisa Bibliográfica, pretende-se realizar uma revisão da literatura já existente relevante para o estudo que se realizou. Este capítulo encontra-se subdividido em três partes, na primeira descreve-se o material, mencionando as suas aplicações e propriedades. De seguida é descrito o método a usar para a produção dos provetes, e por último expõem-se um estudo já realizado, sobre o envelhecimento deste material, que engloba os aspetos do envelhecimento que se pretende estudar com esta dissertação.

De seguida, no capítulo Metodologia, é relatada a parte prática do estudo a realizar. Este capítulo encontra-se subdividido em três partes, a primeira será relativa à produção dos provetes, ao tipo de provete escolhido, à especificação do material a usar e ao processo de impressão destes. A segunda parte é referente à câmara de envelhecimento usada. A reparação desta foi um imprevisto, por isso todas as modificações foram anotadas, com um subcapítulo específico para cada uma. No último subcapítulo, o material usado para os ensaios de tração é descrito.

No capítulo de Resultados Experimentais, são reportados os resultados obtidos nos dois grupos de provetes testados, envelhecidos e não envelhecidos. De seguida é realizada uma comparação entre os valores de cada grupo.

O último capítulo é composto por dois subcapítulos: Conclusão e Trabalhos Futuros. No subcapítulo da Conclusão é feito um resumo de todas as conclusões tiradas durante o estudo, enquanto que no subcapítulo Trabalhos futuros, são sugeridos determinados caminhos para dar seguimento ao estudo realizado.

Para finalizar o documento segue a Bibliografia, com as fontes utilizadas, e os Anexos.

PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão da literatura já existente em relação ao TPU, as suas propriedades e usos, e também do uso deste polímero em impressão 3D. Por último, serão abordados alguns estudos já existentes para o envelhecimento de TPU.

2.1 Poliuretano Termoplástico - TPU

2.1.1 Descrição do TPU

Poliuretano Termoplástico (TPU) trata-se de um género de polímeros de poliuretano que pode ser classificado como um elastómero termoplástico. Deste, destacam-se diversas capacidades modificáveis consoante a aplicação desejada, tais como uma elevada elasticidade, resistência à abrasão e uma baixa resistência à temperatura.

Estas propriedades são resultantes de uma estrutura molecular constituída por blocos de copolímeros compostos por três componentes diferentes [2]:

- Polioli ou um dioli de cadeia longa;
- Um extensor de cadeia ou dioli de cadeia curta;
- Um diisocianato;

Na Figura 1 pode ver-se um esquema da estrutura formada por estes três componentes. O chamado *soft block*, constituído por polioli, é o responsável por garantir

a este polímero as suas capacidades elásticas enquanto que, o *hard block*, constituído por conjuntos alternantes de diisocianato e extensor de cadeia, confere as propriedades mecânicas [2].

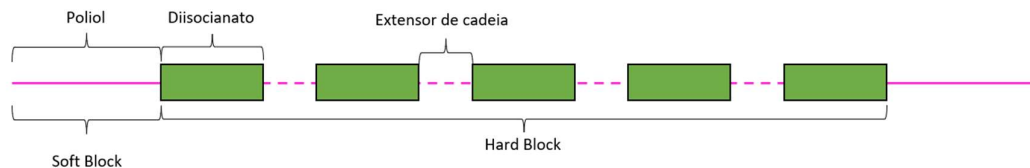


Figura 1 - Esquema da disposição dos blocos constituintes do TPU, adaptado de [2]

Em conjunto, estes blocos dão origem a uma estrutura molecular mostrada na Figura 2. Uma vez que esta estrutura é modificável, estes segmentos podem ser classificados consoante a sua estrutura específica. O *soft block* pode ser classificado como poliéster ou polieter, e o segmento *hard block* pode ser classificado como aromático ou alifático. Cada uma destas classes concede ao polímero características diferentes [3].

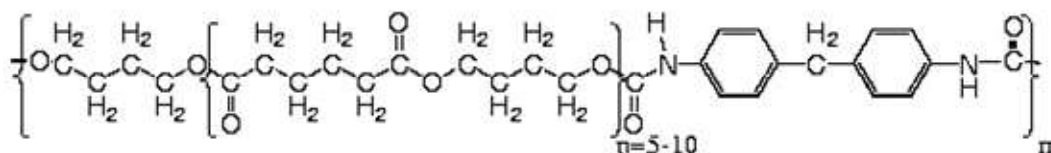


Figura 2 - Estrutura molecular de TPU [3]

2.1.2 Propriedades

As indústrias onde este polímero é usado tiram proveito das diversas capacidades produzidas pelas variadas estruturas moleculares deste material, o que lhes permite tirar partido das seguintes características:

- Resistência à abrasão: este fator mede-se submetendo o material a um teste de abrasão com condições pré-determinadas e medindo a perda de massa do material. Um esquema de um tipo deste teste pode ser visto na Figura 3 [4]. Quando comparado com outros materiais, TPU exhibe uma perda de material muito reduzida como mostrado no gráfico da Figura 4 o que se traduz numa boa resistência à abrasão [3].

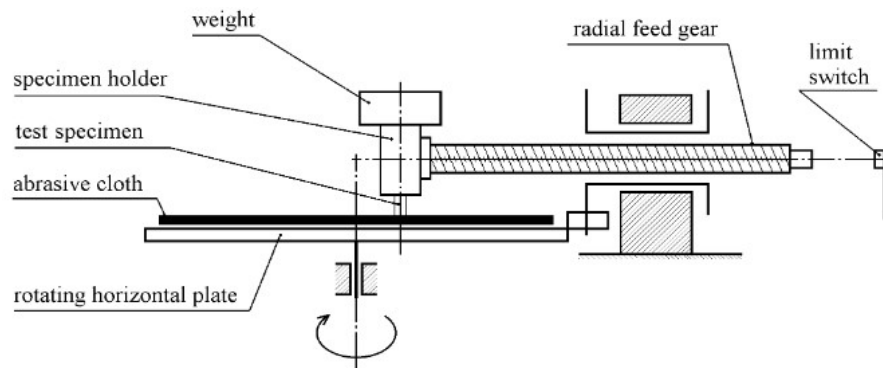


Figura 3 - Esquema de teste de abrasão [4]

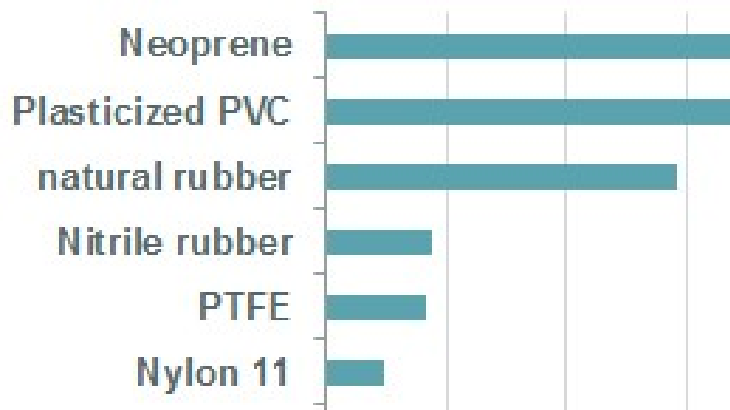


Figura 4 - Comparação entre resultados de teste de abrasão para diversos materiais [3]

- Estrutura modificável: como já mencionado, a estrutura deste material pode ser alterada consoante as propriedades pretendidas. Pode também recorrer-se a aditivos para melhorar capacidades já existentes ou conceder outras, como resistência ao calor ou retardamento de chamas, entre outros. Este pode também ser usado para criar compósitos com outros materiais.
- Fabricos por calor: a sua baixa resistência a temperaturas elevadas tornam este polímero ideal para processos de fabrico onde este possa ser extrudido ou forçado para um molde. Dentro destes processos será focado o de fabrico aditivo no capítulo 2.3. Este polímero possui também capacidade de manter a sua integridade molecular pelo que pode ser reutilizado várias vezes. Um esquema deste mecanismo pode ser visto na Figura 5.

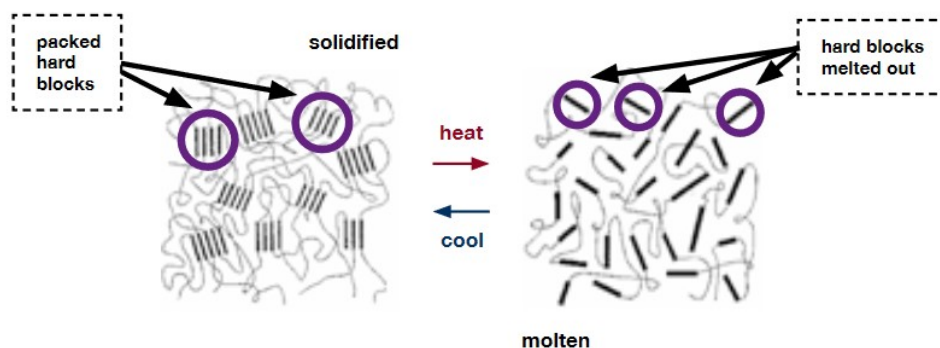


Figura 5 - Esquema da reorganização de ligações no TPU com a mudança de temperaturas [2]

Algumas gamas de TPU, como TPUs alifáticos, podem também apresentar uma resistência a radiações ultravioleta (UV), mantendo as suas propriedades e cores. Contudo, estas em conjunto com água formam as duas principais falhas destes polímeros. A água causa no material uma reação de hidrólise o que pode originar uma perda das suas propriedades levando a que algumas gamas deste polímero tenham um tempo de vida de armazenamento relativamente reduzido [3], cerca de 3 a 5 anos [5]. É por isso necessário ter em atenção as condições de humidade não só para o armazenamento, mas também quando se pretende fazer uso e fabricar estes materiais.

2.1.3 Aplicações de TPU

TPU trata-se de um material já largamente estudado e comercializado, e para o qual ainda se estão a realizar estudos de modo a inovar as suas aplicações. Por exemplo, TPU com propriedades *self-healing*, presente nos estudos de Yao et al.[6].

Logo, pode concluir-se que este material se encontra disperso por diversas indústrias e aplicações:

- Fabrico de tubos e mangueiras para circuitos pneumáticos e hidráulicos;
- Revestimento de cabos elétricos;
- Revestimentos para botões e interiores de automóveis;
- Fabrico de etiquetas de identificação de gado;
- Implantes de aparelhos médicos;
- Juntas, vedantes e O-rings;

- Têxteis e calçado;
- Encapsulamento de células fotovoltaicas;
- Revestimentos de cabos retardador de chamas[23];
- Tapetes transportadores e correias de transmissão;
- Produção de nanocompósitos [7] ou compósitos com outros materiais;
- Aparelhos elétricos/robóticos flexíveis [9].

Esta lista contém apenas algumas das aplicações deste material pois estas são extremamente variadas, e expandem-se com a passagem de cada dia devido aos diversos estudos realizados com o propósito de inovar este material.

2.2 Impressão 3D de TPU

Como já foi mencionado, TPU apresenta a capacidade de ser incluído em processos de fabrico que tenham por base a deformação por calor, devido à sua estrutura molecular. Com a procura deste material em constante crescimento e com uma previsão de assim continuar é necessário aliar a este um processo de fabrico ágil que consiga acompanhar o crescimento [8]. Processos de fabrico aditivo tornaram-se por isso o foco de variados estudos.

2.2.1 Processo de impressão

Existem dois principais processos de fabrico aditivo no qual TPU pode ser usado, *Fused Filament Fabrication* (FFF), e *Selective Laser Sintering* (SLS). Para a parte experimental, será usado o processo FFF.

FFF trata-se de um processo de fabrico aditivo relativamente comum, que também aparece várias vezes sob o nome *Fused Deposition Modelling* (FDM). Este processo já se encontra numa fase de comercialização avançada, sendo relativamente acessível, pratico e de reduzidas dimensões o que faz com que um aparelho destes possa ser instalado em casas regulares sem necessitar de especial atenção.

Na Figura 6 pode ser visto um esquema deste método. Este processo pode utilizar uma diversa gama de polímeros desde que estes estejam sob a forma de filamento. Este fio é obrigado a passar por um bocal aquecido que irá colocar o material num estado visco-plástico que de seguida irá ser extrudido.

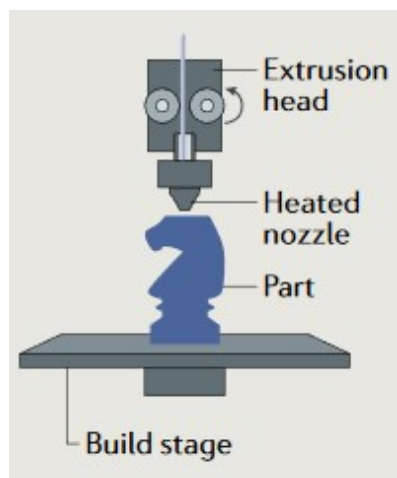


Figura 6 - Esquema do processo de FFF [9]

A peça tem de ser previamente modelada num *software* de modelação e depois passada para o *slicer*, de forma a dividir a peça em diversas camadas. Em seguida serão gerados os comandos que irão dar origem às várias camadas. Por último, a impressora irá ler os comandos gerados e fará o bocal movimentar-se e extrudir o material de forma a criar a primeira camada. Segue-se este processo até se obter a peça completa.

O diâmetro do bocal irá influenciar a largura do cordão depositado. Cordões mais largos levam a acabamentos superficiais mais rugosos onde se consegue distinguir, sem dificuldade, as diversas camadas. Contudo, o processo consome menos tempo. Cordões mais finos permitem realizar pormenores mais pequenos e o acabamento superficial consideravelmente menos rugoso em relação ao anterior. No entanto, este aspeto torna o processo mais demorado.

2.2.2 Cuidados a ter neste processo

Apesar de largamente usado e comercializado para FFF, TPU também traz alguns contratempos.

Mesmo antes de se iniciar o processo de fabrico, é necessário ter em atenção se o filamento foi bem alinhado com o bocal de extrusão. Devido à natureza flexível deste material, é possível que o filamento, quando puxado pelos mecanismos motores, não entre no bocal o que pode originar os cenários apresentados na Figura 7, em (b) e (c) [10]. Além disto, se este problema não for detetado no início, o filamento poderá enrolar-se no mecanismo. A flexibilidade deste material também pode fazer com que, quando as rodas dentadas o puxarem, este seja esticado, o que irá reduzir o seu diâmetro. Por consequência, este já não consegue ser puxado pelas rodas motoras. O problema pode ser mitigado regulando a velocidade de alimentação do filamento [10].

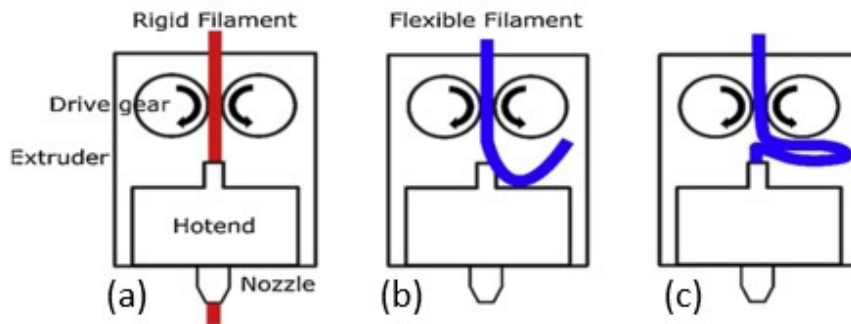


Figura 7 - Problemas na impressão 3D de Elastómeros, (a) para filamento rígido e para (b)(c) filamento flexível [10]

Na produção é necessário ter em atenção o controle da temperatura. Esta terá de causar a fundição completa do filamento para garantir que não ocorram vazios e que as camadas consigam aderir entre si e à mesa. É também possível que a parte impressa mostre algumas diferenças da modelada, e as propriedades mecânicas possam ser inferiores à de uma peça idêntica, mas produzida por moldação [10].

Para o acabamento superficial, existem dois fatores principais: o diâmetro do bocal e o uso de suportes. O diâmetro do bocal irá controlar a espessura do filamento depositado. Diâmetros menores irão permitir alcançar melhores pormenores na estrutura e resultam num acabamento superficial pouco rugoso, podendo até já ser difícil diferenciar as várias camadas. Diâmetros maiores tem a vantagem de reduzirem o tempo de produção, mas à custa de pormenores geométricos e do acabamento superficial.

Os suportes são uma estrutura criada automaticamente pelo *software* da impressora para auxiliar a construção da peça. Como o polímero é depositado num estado visco-plástico, certas zonas da peça onde não exista um local para o polímero se apoiar podem abater. A utilização de suporte consegue mitigar por completo esta falha à custa de um acabamento superficial inferior, que poderá necessitar de uma operação de acabamento final.

2.2.3 Fatores que podem afetar as propriedades mecânicas de produtos obtidos por FFF

Estas podem ser afetadas por vários fatores[21]. Dois dos principais são a orientação das camadas produzidas em relação ao esforço, e os esforços térmicos experienciados pelo material durante o processo de fabrico [11].

Em relação à direção das camadas em relação ao esforço, esta afeta as propriedades mecânicas do conjunto e não do material em si. As zonas de ligação entre as camadas formam descontinuidades na peça e, caso o esforço seja aplicado perpendicularmente às camadas, pode ocorrer uma separação destas, como exemplificado na Figura 8. Este género de falha depende das condições de aderência entre camadas e pode ser parcialmente mitigado produzindo a peça com um ângulo nas camadas [11]. Caso seja conhecido a orientação do esforço este método de falha deixa de ser relevante.

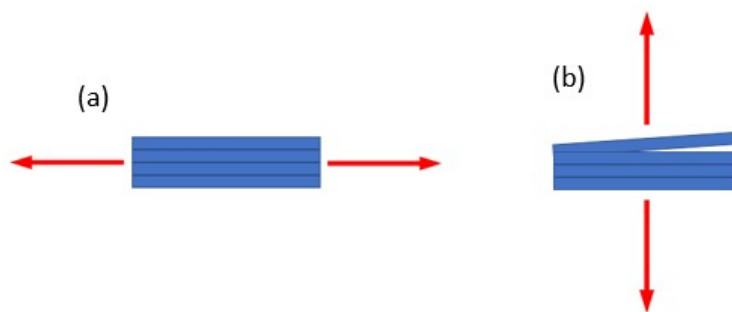


Figura 8 - Esquema do efeito da direção das camadas para (a) esforços paralelos às camadas e (b) esforços perpendiculares

Quanto às propriedades mecânicas do material em si, estas são determinadas pelos esforços térmicos que este irá passar no processo de impressão. O filamento irá passar por quatro fases durante o seu processamento: a fase de sinterização, fase de

cristalização, transição vítrea e retração. Primeiro o material deve ser aquecido até entrar na fase de sinterização antes de ser extrudido e depositado na mesa. Após depositado, o material irá entrar na fase de cristalização e depois em fase de transição vítrea, onde este irá perder a sua elasticidade e tornar-se mais rígido. Por fim com a perda de temperatura este irá retrair [11]. Logo, é necessário controlar a temperatura para garantir que estas fases decorram como pretendidas.

Um estudo foi conduzido por Arifvianto et al. [11] onde estas propriedades e a orientação das camadas foram testadas. Foram produzidos diversos provetes como o mostrado na Figura 9 e foram testadas várias temperaturas. Concluiu-se que uma temperatura de 200 °C era a que produzia os melhores resultados em termos de resistência à tensão e ductilidade. Foi também concluído que melhores propriedades mecânicas foram demonstradas quando o esforço aplicado era paralelo às camadas depositadas [11].

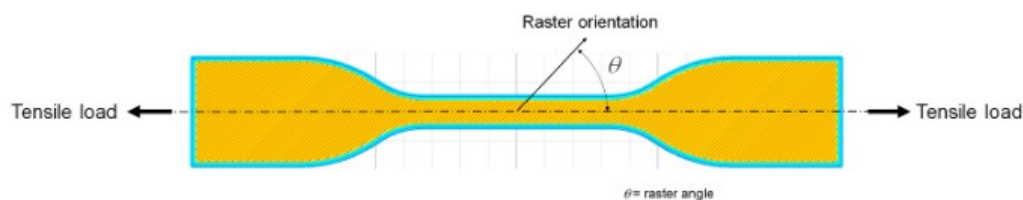


Figura 9 - Esquema de provete produzido por Arifvianto et al. [11]

2.3 Envelhecimento de Polímeros

O termo envelhecimento é usado para englobar diversos fenômenos físicos ou químicos que alterem as propriedades do material ao longo de um período de tempo [22]. Estas alterações podem ser observadas em propriedades físicas como a resistência à tração, tenacidade ou mudança de densidade, ou em propriedades químicas como a reatividade. Estas reações podem ser devidas ao ambiente onde o material se encontra inserido, como por exemplo o fenômeno de oxidação, ou podem ser independentes deste como a retração de um material com a perda de temperatura [12].

Conhecer estas mudanças e os fatores que as causam irá permitir fabricar produtos melhor adaptados às condições que se pretende que estes suportem e, irá também permitir prever o comportamento do material durante o seu tempo de vida.

O uso de TPU por toda a indústria torna este material alvo de diversos estudos, não sendo o envelhecimento uma exceção. Até à data, diversos estudos foram realizados para analisar e documentar o maior número possível destes fenómenos. Destes, destacam-se estudos para envelhecimento em meios aquosos e para radiações UV, uma vez que estes conjugam em si os fatores que mais afetam este material nas suas aplicações.

2.3.1 Radiações UV

Em relação ao envelhecimento por radiações UV, um estudo foi realizado por Boubakri et al. [13] onde amostras de TPU, em forma de provetes, foram submetidos a radiações UV até 140 h, a temperaturas de cerca de 70 °C e exposto a condições atmosféricas normalizadas. Posteriormente, as amostras foram submetidas a testes de tensão e abrasão para determinar o impacto do envelhecimento e as suas propriedades térmicas foram analisadas recorrendo a Calorimetria de Varrimento Diferencial (DSC) e a um Microscópio ótico de varrimento (SEM).

Na Figura 10 podem ser vistas as mudanças de propriedades nas amostras, em (a) mostra-se a variação do Modulo de *Young* (E) e em (b) a tensão no material quando este se encontra com uma extensão de 200% [13].

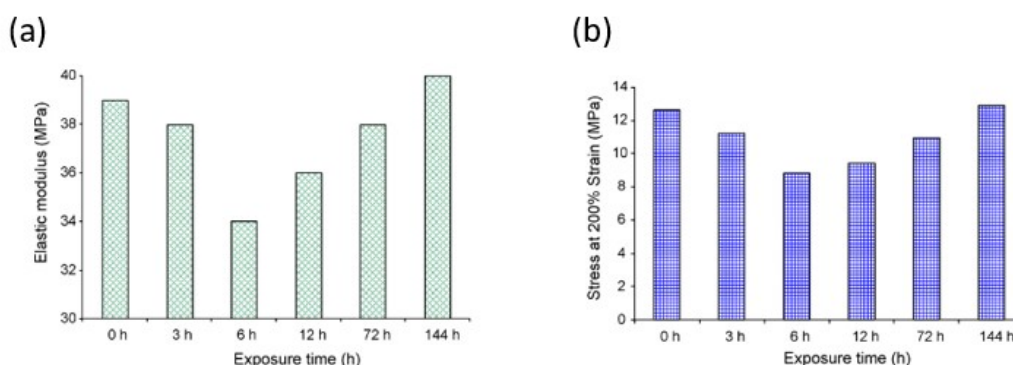


Figura 10 - Variação das propriedades de TPU quando submetido a radiações UV, (a) variação do modulo de Young e (b) tensão no material quando este se encontra com uma extensão de 200% [13]

Foi reportado que o material, inicialmente incolor, começou a ganhar uma coloração amarela nas primeiras horas, até 6 h, e depois uma coloração castanha. Foi possível identificar micro falhas, especialmente em tempos de exposição maiores. A resistência à abrasão mostrou-se inversamente proporcional às horas de exposição, e afetou as amostras com mais intensidade nas primeiras horas. Ocorreram também mudanças na temperatura de transição vítrea [13].

2.3.2 Envelhecimento Higrotérmico

Este género de envelhecimento foi estudado por Boubakri et al. [14] onde se pretendeu examinar o efeito da água e temperatura nas propriedades deste material.

Neste estudo os provetes foram submersos em água destilada a 70 °C durante um intervalo de tempo de 6 meses. Algumas amostras foram submetidas a um processo de secagem a 70 °C durante 48 h para averiguar a influencia deste processo na amostra.

Para avaliar as propriedades recorreu-se a Espetroscopia de infravermelhos por transformadas de Fourier (FTIR) e Calorimetria de Varrimento Diferencial (DSC). Foram também realizados testes de tensão, abrasão, e medida a água absorvida. Os resultados dos testes de tensão (a) e abrasão (b) podem ser vistos na Figura 11. Como pode ser observado em (a), as propriedades mecânicas do material foram afetadas com o envelhecimento: foi reportado uma redução E e uma redução da tensão a 200% de extensão. Os valores retornados pela amostra *dried* devem-se à perda de flexibilidade induzida pelas moléculas de água que depois foram retiradas. Em (b) pode ver-se a perda da capacidade de resistência à abrasão de ambas as amostras. Foi também testado se estes efeitos eram reversíveis, contudo tal não se verificou.

Além destas alterações, foi reportado uma variação da temperatura de transição vítrea e foi encontrado o mecanismo de Fickian na difusão das moléculas de água [14].

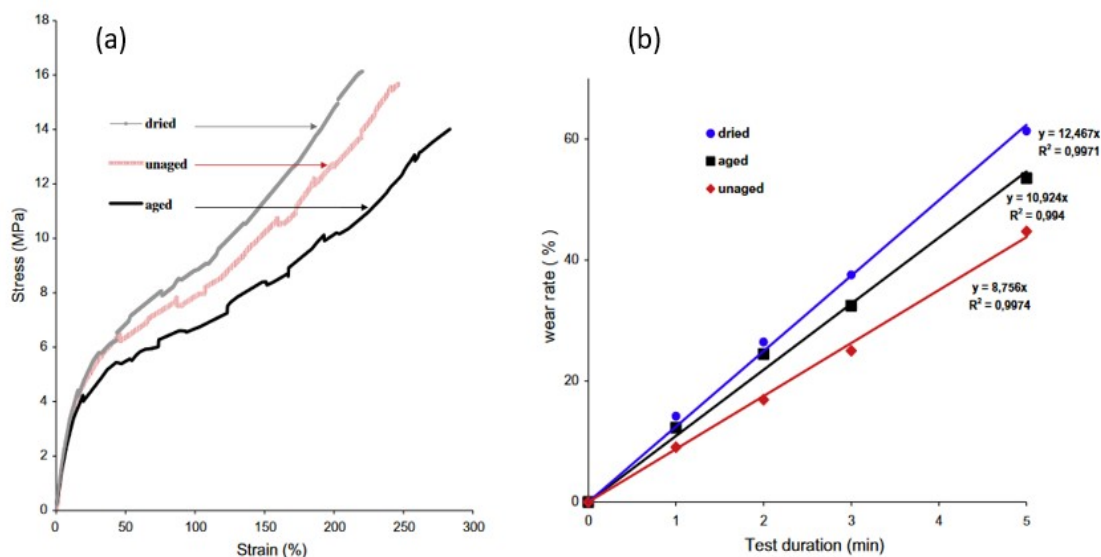


Figura 11 – Variação das propriedades de TPU sujeito a envelhecimento higrotérmico, (a) variação da tensão e (b) teste de abrasão [14]

2.3.3 Envelhecimento de TPU a realizar

Os estudos apresentados são apenas uma pequena porção da literatura nesta área. Existem diversos estudos sobre o envelhecimento de TPU e, devido à distribuição deste material na indústria, certamente que mais investigação será feita. Contudo, existe na literatura uma falta de documentação deste género para TPU produzido por FFF. Como já foi descrito no Capítulo 2, o processo FFF possui diversas variáveis que podem influenciar o material no momento da produção. Torna-se assim necessário testar estes produtos para averiguar qual será o comportamento dos mesmos ao longo do seu tempo de vida.

Como descrito nos subcapítulos 3.1.1, 3.1.2, radiações UV e água são dos fatores que mais afetam este material. Sendo estes fatores que decorrem no dia-a-dia é imperativo que um material os conseguir suportar.

Assim, o ensaio proposto será de um envelhecimento acelerado por radiações UV intercalado com ciclos de humidade. Na reprodução das condições ideais para a testagem serão seguidas as normas ISO – 4892 – 3:2016(E) e G 154 – 06. Os ciclos a realizar irão depender do tipo de lâmpada disponível, na Tabela 1 apresentam-se quatro possíveis opções.

No caso deste estudo, foi usada uma lâmpada Cosmorrow® de 20 W e 24 V. As características desta permitem a realização de ciclos divididos em: 8 horas de radiação a 70 °C, e 4 horas de humidade a 50 °C.

Tabela 1- Opções de ciclos de radiação UV e humidade, adaptado de [15]

Cycle No.	Exposure period	Lamp type
1	8 h dry 4 h condensation	UVA-340 (type 1A)
2	8 h dry 0,25 h water spray 3,75 h condensation	UVA-340 (type 1A)
3	5 h dry 1 h water spray	UVA-340 (type 1A)
4	5 h dry 1 h water spray	UVA-340 (type 1A)

METODOLOGIA

Este capítulo é composto por três subcapítulos, o primeiro para descrever a produção dos provetes e especificações do material utilizado. O segundo irá abordar as reparações e modificações necessárias para colocar a câmara de envelhecimento operacional, e por último os equipamentos e métodos utilizados para os ensaios de tração.

3.1 Produção dos Provetes

3.1.1 Tipo de provete

Para a definição do tipo de provete a utilizar recorreu-se à norma D 638 – 03 [16]. As dimensões delineadas pela norma podem ser vistas na Figura 12. A norma especifica que tipo de provetes devem ser utilizados para diferentes tipos de materiais, contudo, esta não é conclusiva relativamente a provetes produzidos por fabrico aditivo. Então, foi escolhido um dos tipos que melhor se acomoda aos estudos. Foi escolhido o provete de tipo I pois este, de entre os vários propostos pela norma, é o que permite uma maior espessura aliada à menor altura. Estes fatores são essenciais para conseguir uma impressão vertical nas melhores condições: a espessura irá aumentar a área de apoio do provete, e a menor altura irá sujeitar o provete a menos vibrações ao longo do processo de fabrico. Assumiu-se uma espessura de 7 mm, correspondente à letra T na Figura 12, para que a secção de material resistente fosse suficiente para produzir valores mais elevados na célula de carga. Esta precaução foi tomada devido às baixas tensões suportadas pelo material. O equipamento utilizado poderia não ter sensibilidade para a medição dos valores esperados, o que causaria o aparecimento de ruído nos valores obtidos. Além do mais, esta espessura corresponde a um bom ponto médio entre facilitar impressões verticais e não consumir demasiado material, originando tempos de impressão não muito prolongados.



Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^A					Tolerances
	7 (0.28) or under	Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under			
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Figura 12- Dimensões especificadas pela norma D 638 – 03 para provetes [16]

Relativamente às impressões verticais, esta espessura irá criar uma base com área suficiente para suportar as impressões e encontra-se acoplada a um comprimento de provete não muito elevado. Estes fatores irão ajudar a aumentar a estabilidade.

Na Figura 13 pode ser visto o desenho técnico com as dimensões relevantes do provete escolhido modelado no *software SolidWorks*, com as dimensões especificadas pela norma.

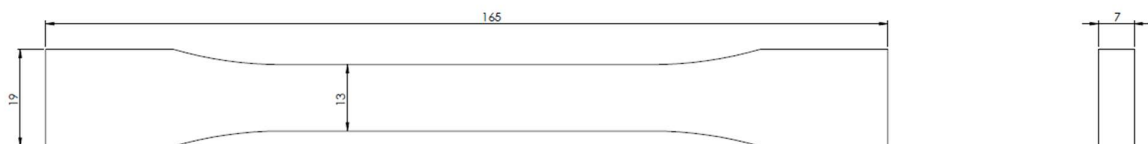


Figura 13 - Desenho do provete a produzir com as dimensões em milímetros

Depois de impressos, os provetes foram medidos e verificou-se que as dimensões se encontravam dentro de valores aceitáveis, sendo o maior dos desvios de 0,5 mm. Tais desvios afetam apenas a aresta da face do provete que estava assente na mesa de impressão, e correspondem, no máximo, a 2,5% da respetiva dimensão. Este desvio pode ser explicado devido a fatores necessários para a correta impressão dos provetes, como o uso de *brim*, representado a verde na Figura 14 no *software* de *slicing* usado.

Este parâmetro garante que a contração no arrefecimento do material não tenha um grande impacto no produto final, contudo, tem de ser removido manualmente o que pode criar imperfeições a nível das dimensões.

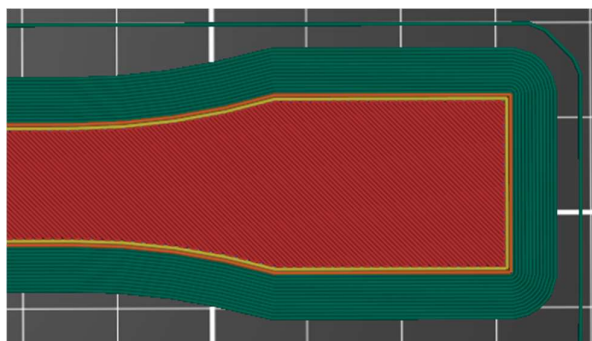


Figura 14 - Representação do uso de *brim* no *software* de *slicing*

3.1.2 Especificações do material a usar e características dos provetes a produzir

O material a usar, como já referido, foi TPU, mais especificamente TPU com dureza Shore A entre os valores 96 A e 98 A. Na Tabela 2 apresentam-se as características dos diferentes filamentos usados. Apesar de terem origens distintas, os filamentos apresentam as suas durezas dentro do intervalo aceitável. O filamento RECREUS® Reciflex (c) apresenta uma dureza no intervalo [96; 98] A, enquanto os filamentos RepRap®: flexível TPU(a) e FLEXIVEL(b), apresentam um valor de 98 A. Estes valores são fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 2 - Características dos filamentos usados

Fornecedor	Denominação	Dureza Shore A	Cor
RepRap	flexível TPU	98	branco
	FLEXIVEL		
RECREUS	Reciflex	[96;98]	preto

Em relação às características a variar nos provetes, foi definido entre as partes intervenientes, que estas seriam a sua orientação de impressão em relação à mesa, e a sua percentagem de enchimento. Foi também definido que seriam testados dois provetes por conjunto de características, o que resultou em doze provetes.

Para o enchimento, foi decidido testar três valores diferentes: 5%, 25% e 55%. Na Figura 15 pode ver-se as diferenças destes valores nos provetes impressos. Foi decidido não ultrapassar o valor de 55% uma vez que acima deste a diferença na flexibilidade é pouco perceptível[18].

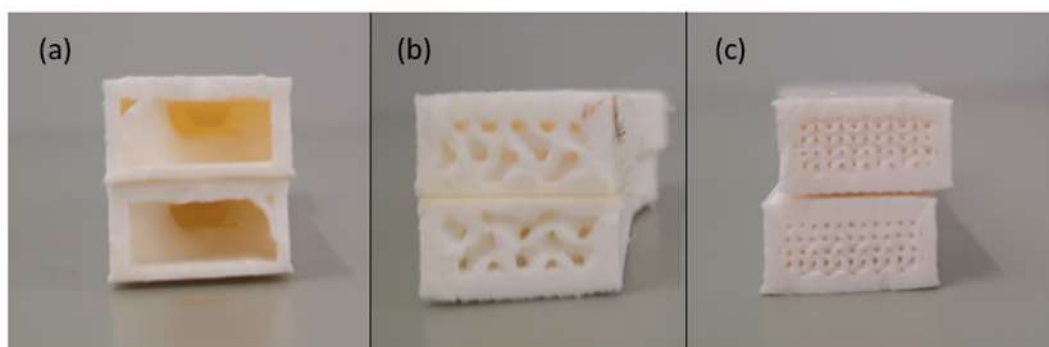


Figura 15 - Diferenças no valor do enchimento entre provetes: 5% (a), 25% (b), 55% (c)

Na imagem é também possível ver o padrão usado. Decidiu-se usar o padrão *gyroid*, evidenciado na Figura 16, retirada do *software PrusaSlicer*. Escolheu-se este padrão devido ao facto de ser o menos anisotrópico em todas as direções de entre os vários padrões disponíveis [19].

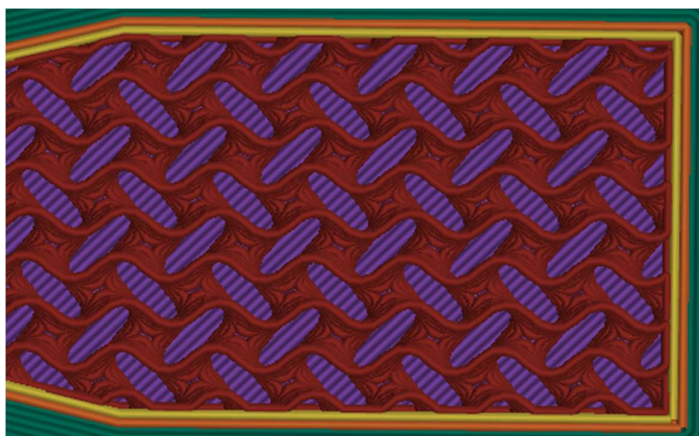


Figura 16 - Pormenor do padrão usado para o enchimento dos provetes

3.1.3 Impressão dos provetes

Relativamente à produção dos provetes, foi utilizada uma impressora Original Prusa i3 MK3S do laboratório de impressão 3D do DEMI, como pode ser visto na Figura 17. Esta impressora possui um bocal de 0,4 mm, mas tem a capacidade de depositar camadas entre os valores de [0,05; 0,35] mm. Para a produção dos provetes, foram usadas camadas com 0,2 mm de espessura. Foi também usado o *software* de *slicing* *PrusaSlicer* como modo de transformar os modelos de *SolidWorks* em G-code para que a impressora conseguisse interpretar.



Figura 17 - Impressora usada para a produção dos provetes

O modelo gerado pelo *software* para as impressões horizontais e o resultado obtido podem ser vistos na Figura 18. Em (a) apresenta-se o modelo já processado pelo *slicer*, em (b) encontra-se um dos provetes impressos e em (c) o pormenor das camadas.

Estas impressões não apresentaram qualquer contratempo. Sendo o seu único requisito o uso de *brim* para garantir que a contração no arrefecimento não afete o produto final. Os tempos de impressão para esta orientação foram entre três horas e quarenta minutos a seis horas e sete minutos. Este aumenta consoante a percentagem de enchimento.

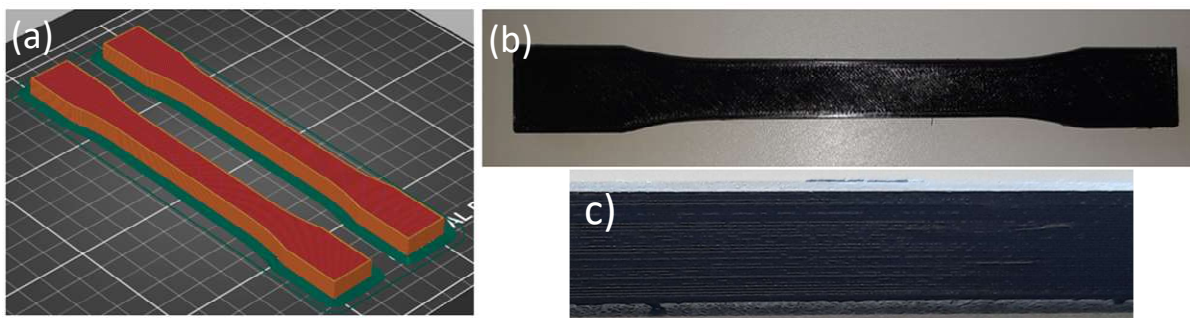


Figura 18 – (a) Modelo gerado pelo software de *slicing* para os provetes horizontais, (b) provete impresso horizontalmente, (c) pormenor das camadas da impressão

Para a produção dos provetes verticais foi necessário empregar mais cuidados. Numa primeira tentativa tentou-se realizar esta impressão sem a utilização de qualquer tipo de suporte, apenas reduzindo a velocidade dos movimentos. Mesmo assim, as vibrações nos movimentos finais tornaram o provete inutilizável, como mostrado na Figura 19. Na Figura é possível ver o aumento da irregularidade da deposição das camadas à medida que o provete é fabricado.

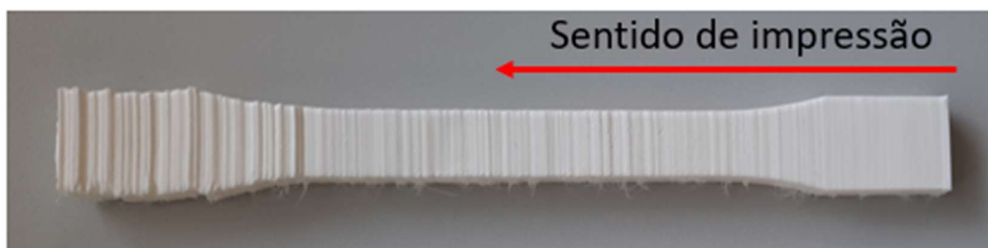


Figura 19 – Efeito das vibrações na impressão vertical sem apoios

Assim, realizou-se uma alteração ao modelo do provete de modo a criar uma estrutura que conferisse estabilidade à impressão. A solução encontrada é apresentada na Figura 20 (a). Decidiu-se acoplar dois provetes, ligados por uma pequena estrutura. A reduzida espessura desta estrutura foi pensada para tornar estes suportes facilmente removíveis, e para que estes não criem imperfeições não toleráveis na impressão. Estas estruturas de ligação irão obrigar o *slicer* a colocar suportes no conjunto, representados a verde na Figura 20 (b), conferindo-lhe melhor estabilidade. O resultado final pode ser visto em (c). Este apresenta algumas diferenças em relação ao pretendido. Ocorreu o chamado de *stringing*, devido à natureza flexível do material. Este fenómeno poderá ser devido à conjugação de alterações que foi necessário fazer para diminuir as vibrações. Apesar de imprevisto, esta deposição extra de material não comprometeu a integridade

do provete e ainda contribuiu para tornar o conjunto mais estável.

Porém ainda é possível verificar que a última camada apresenta defeitos. Apesar de esta não ser de elevada relevância, serve para demonstrar que a impressão de peças deste género, verticalmente, não é recomendada.

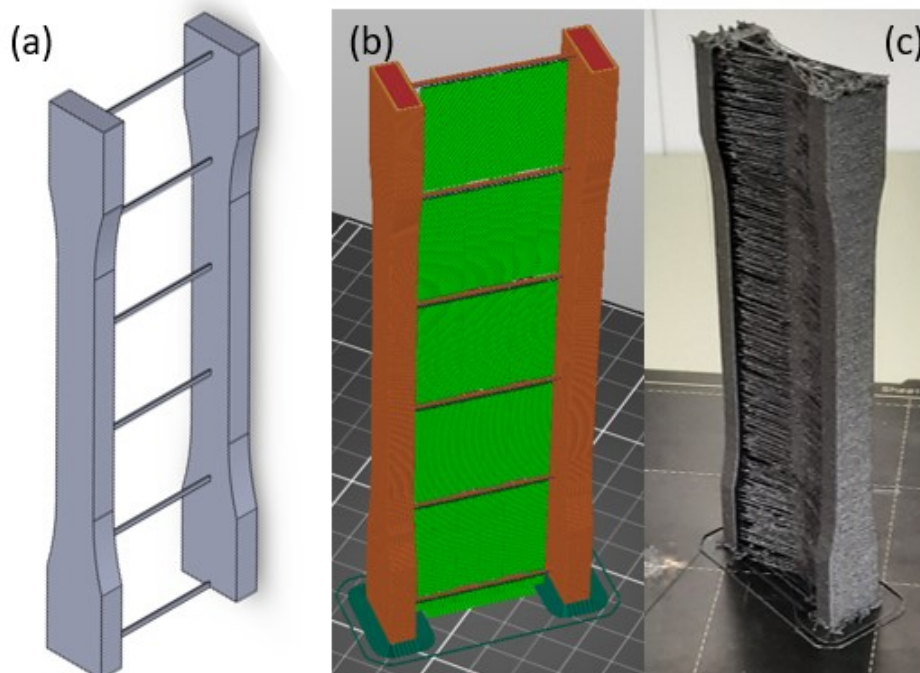


Figura 20 - Impressão vertical: modelo criado em *SolidWorks* (a), passagem pelo software de *slicing* para a criação de apoios (b), produto final (c)

Para esta orientação os tempos de produção foram entre seis horas e quarenta minutos e onze horas e dez minutos.

A distribuição de provetes pelas diversas características e ensaios encontra-se explicitado na Tabela 3. Pretende-se fabricar um total de 24 provetes, sendo estes divididos igualmente pelas três percentagens de enchimento escolhidas, resultando em 8 provetes por percentagem. Os 8 provetes são divididos pelas duas orientações de fabrico: horizontal e vertical, representadas, respetivamente, por H e V na Tabela 3.

Da totalidade dos provetes fabricados, pretende-se que metade seja sujeito ao ciclo de envelhecimento. Esta metade é composta por 4 provetes de cada percentagem de enchimento, e dentro deste 2 de cada orientação.

Todos os provetes serão submetidos a ensaios de tração de modo a conseguir comparar os resultados dos dois grupos.

Tabela 3 - Matriz de características e ensaios

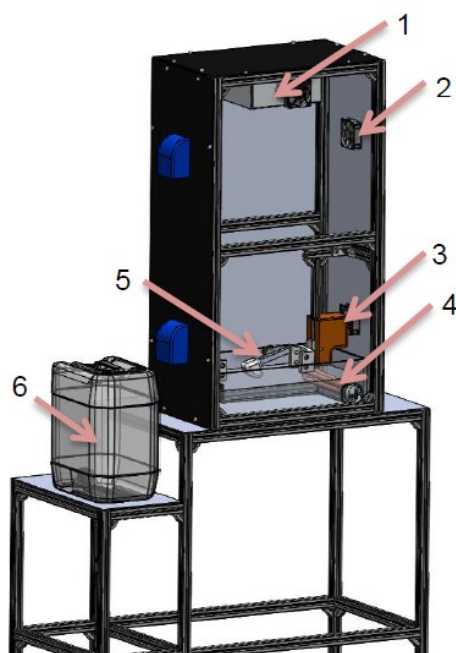
		Enchimento (%)					
		5		25		55	
Orientação de impressão		H	V	H	V	H	V
Número de provetes impressos		4	4	4	4	4	4
Número de provetes por ensaio	envelhecimento	2	2	2	2	2	2
	tração	4	4	4	4	4	4

3.2 Câmara de envelhecimento

Para a realização do envelhecimento acelerado, será usada a câmara de envelhecimento projetada e construída pelo aluno Frederico Leopoldo Moura Matos no âmbito do tópico de dissertação “Desenvolvimento de equipamento para ensaios de envelhecimento acelerado de materiais compósitos” [17]. Esta foi projetada tendo em conta os requisitos da norma ISO 4892-3 [15]. A câmara é controlada por uma placa Velleman® com um microcontrolador baseada em ATmega2560, com funcionamento e disposição de saídas equivalente a uma placa Arduino® Mega.

Recorrendo a esta placa controladora a câmara tem a capacidade de recolher dados do sensor de temperatura e humidade, controlar a temperatura, acionar o motor passo a passo e controlar a fonte de radiação UV, fornecida por uma lâmpada de alta pressão acoplada a um balastro. Apenas o sistema responsável por manter o nível da água para a criação de humidade é independente da placa controladora.

Na Figura 21 pode ser visto uma imagem do modelo da câmara projetada, com cada um dos seus componentes identificados [17].



- 1) Sistema de radiação
- 2) Ventoínhas para dissipação de calor
- 3) Motor passo a passo
- 4) Resistência para aquecer a água
- 5) Sensor de nível de água
- 6) Depósito exterior de água

Figura 21 - Modelo da câmara de envelhecimento [17]

3.2.1 Reparações e modificações

A câmara no seu estado inicial não se encontrava operacional. Alguns componentes foram retirados ao longo do tempo que esta esteve sem ser utilizada e outros apresentavam falhas no seu funcionamento. Como tal, foi necessário reparar e modificar estas falhas para que se pudesse dar seguimento ao processo de envelhecimento. Cada reparação ou modificação será listada para facilitar qualquer futuro uso deste equipamento.

3.2.1.1 Placa controladora

A placa controladora inicial da câmara não estava a funcionar corretamente. Não era possível comunicar com esta usando o computador para controlar os ciclos e no curto tempo de funcionamento verificou-se um rápido sobreaquecimento. A placa apresentava também o que parecia ser uma indentação no seu *chip* controlador. Esta placa foi por isso descartada e substituída por uma Arduino® Mega 2650. Na Figura 22 é possível a ver a placa antiga, em (b), e a placa usada em (a). Em (c) evidencia-se o pormenor do defeito da placa antiga.

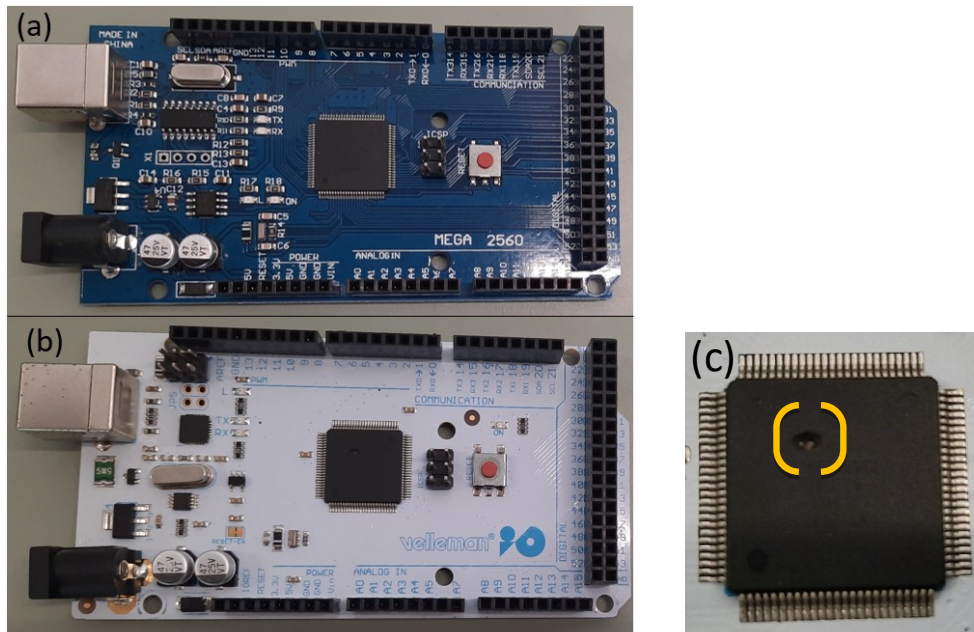


Figura 22 - Placas controladoras: Arduino ® mega usado (a), placa Velleman® substituída (b), pormenor do defeito no chip central da placa Velleman® (c)

A fonte de alimentação originalmente usada para fornecer energia à placa também não estava a funcionar corretamente, uma vez que quando ligada a placa não conseguia ativar relés ou a saída de 5 V. Foi por isso usado um transformador mostrado na Figura 23, com um output de 5 V e 2 A, idêntico ao usado para em carregadores de telemóveis. Este será acoplado à saída de tipo A/B, também usada para comunicar com o computador. É de notar que usando esta solução é impossível comunicar com a placa sem a desligar do circuito, contudo tal não se demonstrou um contratempo.



Figura 23 - Transformador usado para fornecer energia à placa controladora

3.2.1.2 Driver do motor passo a passo e Motor

O *driver* original usado foi um Stepper-Motor-Driver-Rev2.2 do fabricante PIBot®, contudo este fora retirado. Foi por isso usado um *driver* TB6600, apresentado na Figura 24 (a). A configuração para os *microsteps* usada não foi especificada por isso admitiu-se a configuração apresentada em (b). Esta significa que o passo original do motor será dividido por quatro. Depois de testadas várias combinações, esta foi a que proporcionou o melhor equilíbrio entre movimentos fluidos e ruído produzido.

As dimensões do novo *driver* são diferentes das do original, sendo o novo de uma maior estatura. Devido a este fator o apoio projetado originalmente não consegue desempenhar a sua função. Logo o apoio teve de ser modificado de forma a permitir a fácil remoção e colocação para agilizar o processo de reparação e teste. As ligações usadas para o circuito são especificadas no capítulo 3.2.2. Depois de vários testes o *driver* apresentou conseguir comunicar sem problemas com o motor.

Relativamente ao motor, apesar de apresentar claros sinais de desgaste, decidiu-se não o substituir. O seu estado permitiu-lhe levar os ciclos até ao fim com apenas algumas paragens não previstas. Este mostrou-se incapaz de permanecer longos períodos de tempo em funcionamento e de dois em dois dias tinha de ser desligado durante aproximadamente 10 minutos. Como será referido no subcapítulo 5.2, para usos futuros é recomendável a sua troca.

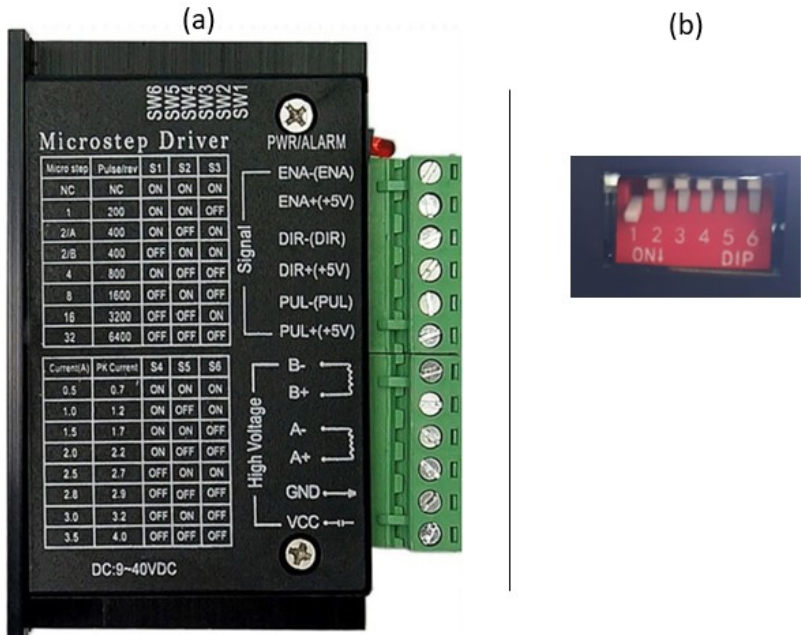


Figura 24 - Driver TB660 para o motor passo a passo (a), configuração para o *microstep* usada (b)

3.2.1.3 Ligações elétricas

De forma a perceber que componentes se encontravam a funcionar corretamente, todo o circuito elétrico foi refeito, testado e reorganizado. Tentou-se mantê-lo o mais idêntico possível ao circuito de base, contudo certas alterações foram efetuadas.

Na Figura 25 é apresentado o aspeto final do circuito. Nesta encontra-se uma numeração dos diversos componentes constituintes do circuito. Comparado com o circuito original, foram removidos dois grupos de relés, um relé individual e cabos correspondentes ao sensor não utilizado. O circuito original foi projetado tendo em conta um *driver* diferente, logo a fixação do novo *driver* teve de ser improvisada. Devido a este fator a disposição do circuito elétrico não se apresenta com a melhor organização. Para tal seria necessário refazer o circuito e alterar a cabulagem usada, decidiu-se que este processo iria tomar mais tempo que o disponível para a realização do estudo proposto. Assim, não foi possível evitar a sobreposição do circuito à placa Arduino®.

É de notar que a componente elétrica é composta por três circuitos independentes: o circuito pelo qual a placa controladora está responsável, e o circuito da manutenção do nível da água dentro da câmara para os ciclos de humidade, e o circuito que controla os ciclos de radiação e calor. Os dois últimos circuitos foram testados e aparentavam estar a funcionar corretamente, apenas foi necessário realizar uma modificação no circuito de radiação e calor.

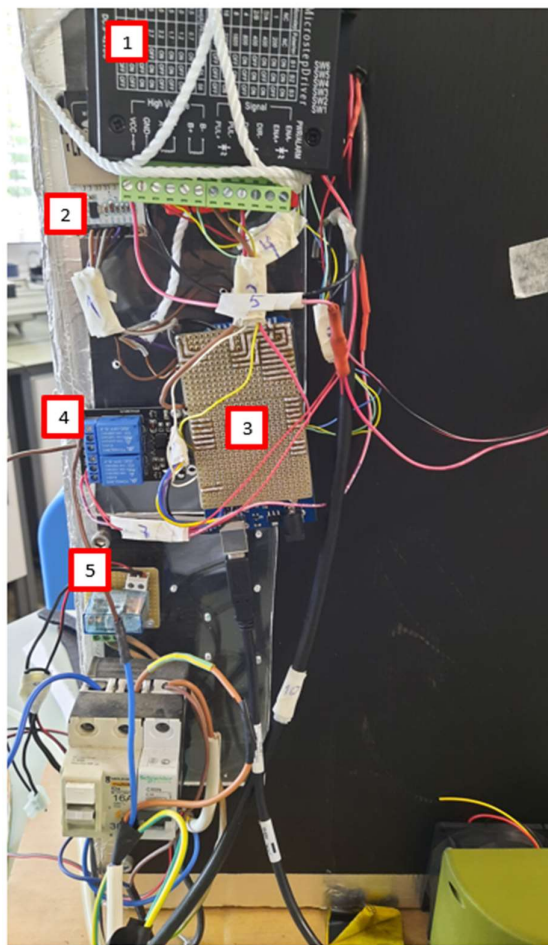


Figura 25 - Novo circuito elétrico com legenda dos componentes: 1) Driver TB660; 2) Leitor de cartões SD; 3) Placa Arduino ®; 4) Grupo de relés para o controlo do sistema de arrefecimento e humidade; 5) Relé do circuito de manutenção do nível da água

De forma a ajudar a entender o circuito, para usos futuros da câmara, as ligações foram numeradas recorrendo a fita de pintor. O modo como esta numeração foi aplicada pode ser observada na Figura 25. Na Tabela 4 todas as numerações atribuídas estão explicitadas. É de notar que esta numeração é distinta da apresentada na Figura 25 pois serve para facilmente identificar os grupos de cabos para situações em que seja preciso aceder a estes.

Tabela 4 - Numeração dos cabos constituintes do circuito

Ligação	Número atribuído
Cartão SD	1
Driver-Arduino	2
Sensor	3
Motor passo a passo	4
Fonte de alimentação do driver	5
Fonte de 12 V	6
Circuito das ventoinhas ao relé	7
Relés da resistência/Ventoinhas-Arduino	8
Sensor de nível de água ao relé	9
Alimentação da lâmpada	10

Quanto ao sensor da câmara, esta originalmente possuía dois sensores com funções distintas: para a medição da humidade e temperatura. O novo sensor utilizado tem a capacidade de medir ambas as grandezas em simultâneo, logo os sensores antigos foram removidos. O sensor novo pode ser visto na Figura 26.



Figura 26 – Sensor DFROBOT – DFR0067 de temperatura e humidade usado na câmara

A última alteração necessária para garantir o funcionamento da componente elétrica foi a criação de uma fonte de tensão. Tanto o *driver* como o sistema de arrefecimento fazem uso de uma fonte de energia de 12 V de corrente contínua. Esta estava em falta quando a câmara foi adquirida, logo foi necessário adaptar uma já existente. A fonte usada pode ser vista na Figura 27. Foi criada uma ligação especializada nas pontas dos cabos, tanto da fonte como da câmara com o objetivo de evitar que a fonte ficasse fisicamente presa ao circuito.



Figura 27 - Fonte de alimentação adaptada ao circuito

3.2.1.5 Fonte de radiação UV e calor

A fonte de radiação e calor original da câmara tratava-se de uma lâmpada de alta pressão, mais precisamente uma Osram® HTC 400-241. Esta desempenhava duas funções: produção de calor e radiações UV. Depois de testada verificou-se que se encontrava fundida. Devido ao facto de a lâmpada se encontrar descontinuada foi necessário o uso de uma lâmpada com características diferentes. Foi usada uma Cosmorrow® de 20 W e 24 V, mostrada na Figura 28, em (a). As características desta encaixam-na no ciclo 8 da norma ISO 4892-3:2016 [15], estando as respetivas especificações deste ciclo na Figura 28, em (b).

Contudo, a nova lâmpada não possui a capacidade de gerar o calor necessário para os ensaios, logo foi necessário adaptar uma nova fonte de calor para a câmara. A fonte usada foi a de um aquecedor de ventoinha, como mostrada na Figura 29. Em (a) pode ser visto o eletrodoméstico e em (b) a resistência retirada deste.

Ambos os equipamentos foram testados e verificou-se o bom funcionamento do conjunto e a sua capacidade em manter a câmara dentro dos valores reportados em [17].

Contudo, para ensaios futuros é recomendável substituir ambos os componentes por uma lâmpada semelhante à original, uma vez que é para este tipo de lâmpada que a câmara se encontra projetada.

É de notar que o controlo destes ciclos é realizado por um temporizador colocado na tomada de alimentação e não pela placa controladora, o que torna este circuito independente dos restantes.

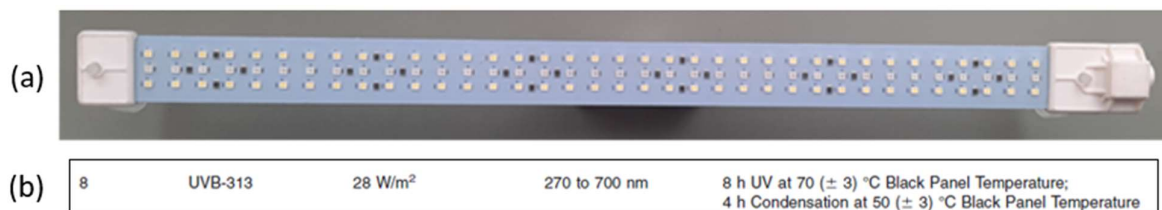


Figura 28 - (a) Lâmpada usada, (b) Ciclo de envelhecimento no qual a lâmpada se insere [15]

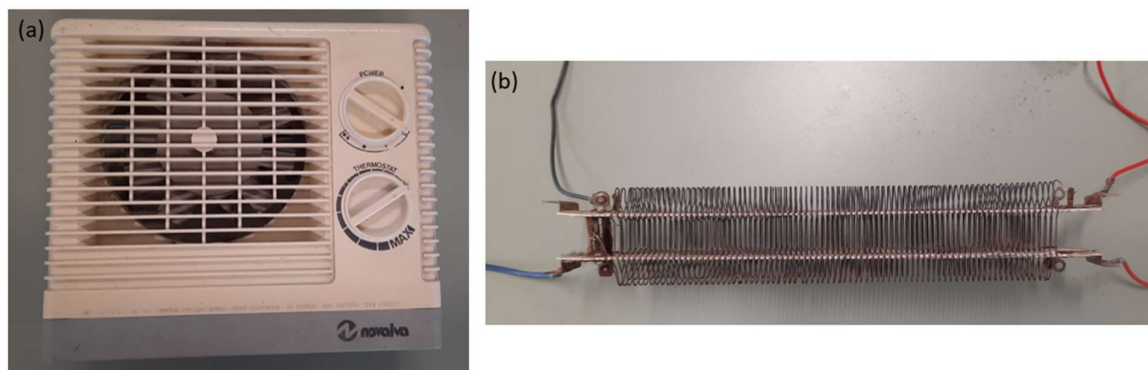


Figura 29 - (a) Aquecedor a ventoinha, (b) Resistência do aquecedor usada

3.2.2 Câmara final

Para finalizar, todos os componentes acima mencionados foram testados em simultâneo para averiguar se a câmara se encontrava em bom funcionamento. Para tal foi produzido um código que realiza os ciclos pretendidos para o envelhecimento, mas com intervalos de tempo mais reduzidos.

Verificou-se que, apesar das alterações, a câmara consegue apresentar valores dentro dos obtidos aquando da sua construção. O código utilizado com os tempos de ciclo pretendidos será apresentado em anexo.

Relativamente à componente elétrica, esta sofreu algumas alterações, o que resultou na alteração de certas ligações à placa Arduino®. Assim, para facilitar qualquer uso futuro da câmara, as saídas usadas para cada componente encontram-se listadas na Tabela 5. Um esquema representativo do sistema elétrico dependente da placa Arduino® é também apresentado na Figura 30.

É de notar que na Figura 30 é apenas apresentado o esquema do circuito referente à placa Arduino® e as funções que esta controla. Existem dois outros circuitos que não foram alterados e que são independentes da placa: o circuito que repõe a água dentro da câmara para os ciclos de humidade e o circuito que controla os ciclos de radiação e calor.

Tabela 5 - Saídas de cada componente usadas na placa Arduino®

Componente	Saídas usadas
Cartão SD	CS
	D53
	MOSI
	D51
	SCK
	D52
	MISO
	D50
Ventoinhas	D7
Resistência	D5
Sensor	D2
Driver	DIR+
	D4
	PUL+
	D3
	ENA+/ENA-
	não usada
	Restantes
	GND

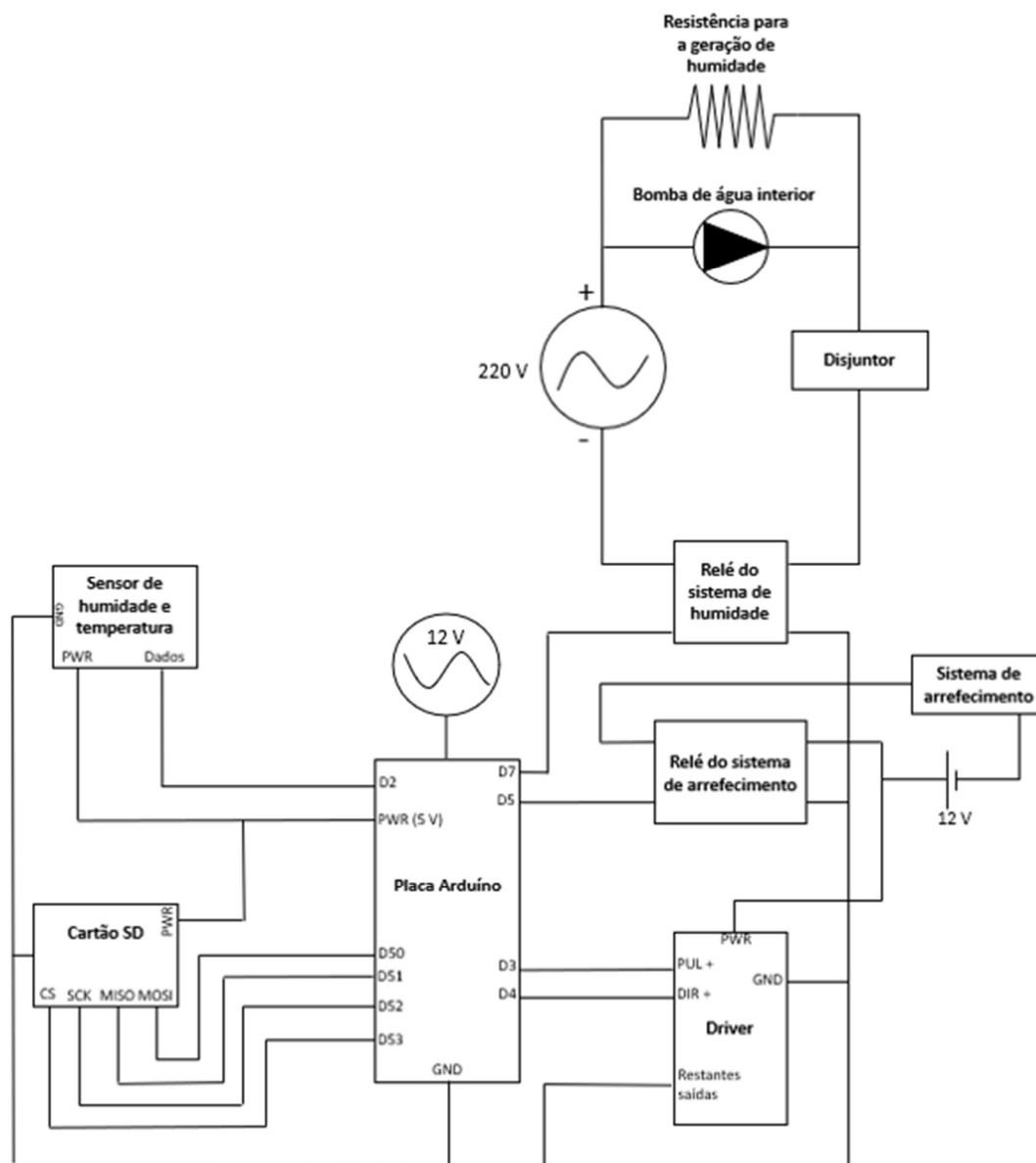


Figura 30 - Esquema do circuito elétrico do Arduino®

Foi ainda necessário projetar um apoio que tivesse a capacidade de acomodar os provetes para teste. A solução encontrada é apresentada na Figura 31. O apoio é constituído por quatro chapas, duas horizontais e duas verticais. Os provetes serão fixados pelas duas chapas horizontais, sendo pressionados entre estas. Na Figura 31 pode ver-se o modo como se pretende que os provetes sejam fixados, e o modo como estes foram inseridos dentro na câmara.



Figura 31 – Diversas vistas do apoio projetado para os provetes

3.3 Equipamentos para os ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados usando a máquina de tração uniaxial presente no laboratório do DEMI, representada na Figura 32, já com a montagem de um provete. Esta trata-se de uma MTS 312.31, com uma célula de carga de 100 kN..

A norma usada para estes ensaios foi a D 638 – 03 [16]. Nesta é especificada a dimensão dos provetes, como mencionado no subcapítulo 3.1.1, a velocidade a que os testes se devem realizar e o modo como os resultados devem ser tratados.

Para peças produzidas por fabrico aditivo, a norma não é conclusiva logo decidiu-se usar a velocidade de 5 mm/min, o que se traduz em 0,08 mm/s. Impôs-se também um deslocamento entre os apoios de 50 mm em vez da imposição de uma força, devido às baixas tensões suportadas por este material.

Foi também utilizado um extensómetro da marca MTS, modelo 632.12C – 21. Este tipo de aparelho possui um erro de $\pm 1,25$ mm no deslocamento e $\pm 0,05$ mm na extensão. A montagem deste pode ser vista na Figura 32.

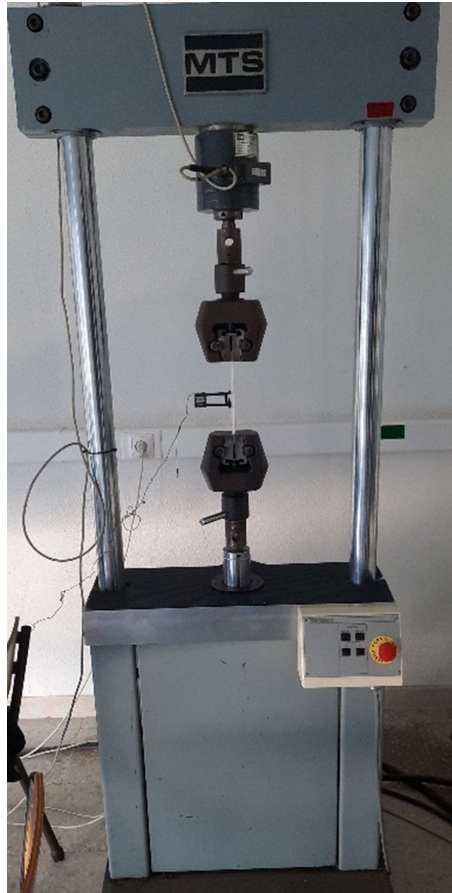


Figura 32 - Máquina de tração uniaxial usada nos ensaios

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Ensaios de provetes não envelhecidos

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração realizados aos provetes não envelhecidos.

Os valores resultantes dos ensaios foram tratados segundo os procedimentos da norma D 638 – 03 [16], recorrendo ao *software MatLab*. O objetivo será a de criar o gráfico tensão-extensão, selecionar os seus pontos iniciais e traçar uma reta que indique a cedência. Aplicando-se uma regressão linear obtém-se esta reta. Estes gráficos encontram-se apresentados nos Anexos A e B, e os seus valores apresentam-se resumidos na Tabela 6, com a tensão de cedência representada por σ e a extensão por ϵ .

Tabela 6 - Valores de tensão e extensão dos ensaios a provetes não envelhecidos

Proвете	ϵ	σ (MPa)
H	5%	0.816 ± 0.021
	25%	0.938 ± 0.003
	55%	1.044 ± 0.021
V	5%	0.71 ± 0.069
	25%	0.9275 ± 0.0625
	55%	0.987 ± 0.121

Nos gráficos correspondentes aos provetes com 5% de enchimento é possível verificar a existência de algum ruído. Este deve-se ao facto de o provete sofrer ocasionalmente um escorregamento nas amarras. Este poderá ter sido devido à baixa taxa de enchimento, o que dificulta o seu aperto nos suportes da máquina de tração. Contudo, tal não impediu a obtenção da reta para o cálculo do ponto de cedência.

Como é possível verificar, o comportamento obtido nos ensaios segue o padrão já reportado [20], a tensão aumenta proporcionalmente com a percentagem de enchimento, para ambos os modos de impressão. Relativamente à orientação, foram medidos valores superiores para os provetes impressos horizontalmente, tanto para a tensão suportada como para o alongamento.

Assim, destes ensaios é possível retirar as seguintes conclusões:

- A tensão de cedência suportada aumenta proporcionalmente com a percentagem de enchimento usada, para ambos os tipos de impressão;
- A percentagem de alongamento à cedência aumenta proporcionalmente com a percentagem de enchimento, apesar de este aumento não ser muito acentuado;
- Os provetes impressos horizontalmente apresentam extensões e tensões de cedência superiores aos impressos verticalmente;

Relativamente a falhas ou roturas, nos provetes horizontais não foram observadas em nenhuma das percentagens de enchimento. Porém, verificou-se que todos os provetes verticais apresentaram algum tipo de falha na sua integridade estrutural. Estas consistiram numa rotura completa nos provetes de 5% e apenas alguma separação de camadas nos de 25% e 55%. O tipo de falhas foi o esperado, estas ocorreram nas zonas de ligação entre camadas. Na Figura 33 podem ser vistos exemplos destes tipos de falhas. Em (a), (b) e (c) apresenta-se uma vista ampliada de pormenores de algumas das falhas dos provetes de 25% e 55%, em (d) é apresentada a falha de um dos provetes de 5%.

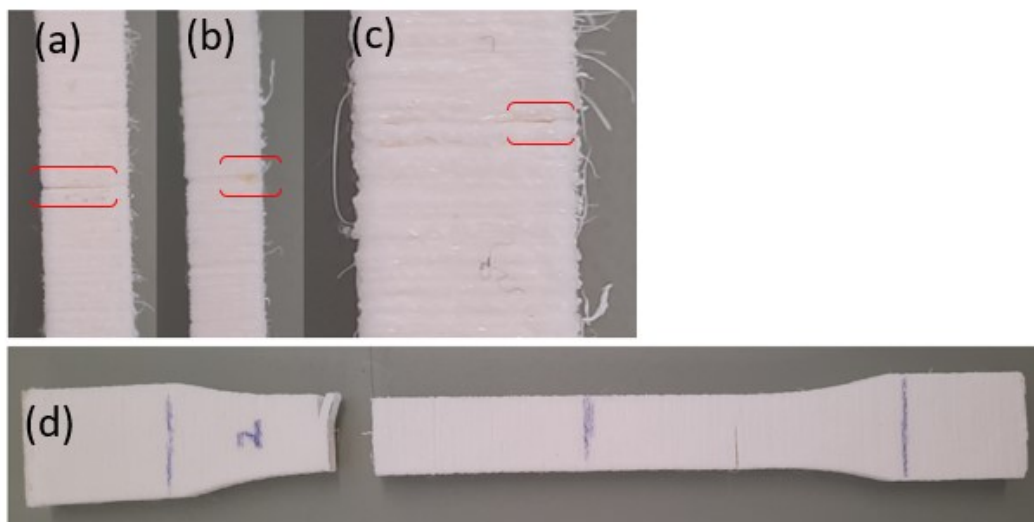


Figura 33 – Pormenor dos tipos de falhas apresentadas pelos provetes verticais: (a)(b) falhas em provetes de 25%, (c) falha num provete de 55%, (d) rotura completa de um dos provetes com 5% de enchimento

4.2 Ensaios de provetes envelhecidos

Relativamente aos ensaios dos provetes envelhecidos, decidiu-se submeter os provetes a 550 horas do ciclo 8 da norma ISO 4892-3:2016 [15], com os seus requerimentos já apresentados no capítulo 3.2.1.5, na Figura 28 (b).

Com a finalização dos ciclos de envelhecimento, foi possível observar algumas alterações nos provetes. Verificou-se que as partes dos provetes que se encontravam mais perto da fonte de calor e radiação apresentaram um aumento na rugosidade superficial, como mostrado na Figura 34. O mesmo não foi observado em provetes verticais, possivelmente devido ao facto de estes já possuírem uma elevada rugosidade superficial.

Relativamente aos ensaios de tração, os valores obtidos encontram-se expostos na Tabela 7, e os gráficos correspondentes a estes ensaios encontram-se nos anexos C e D.

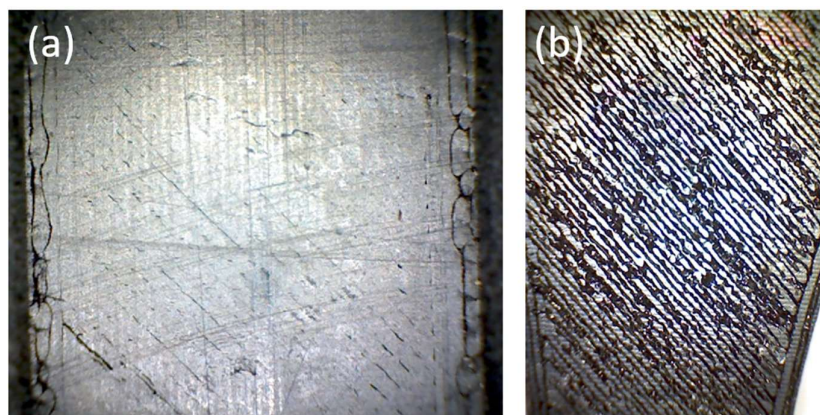


Figura 34 - Pormenor das camadas de um provete horizontal: (a) Provete não envelhecido, (b) Provete depois de um processo de envelhecimento

Tabela 7 - Valores de tensão e extensão dos ensaios a provetes envelhecidos

Provete		ϵ	σ (MPa)
H	5%	0.8315 ± 0.1635	0.776 ± 0.011
	25%	0.9455 ± 0.1095	1.56 ± 0.18
	55%	0.8325 ± 0.0175	2.211 ± 0.333
V	5%	0.6585 ± 0.066	0.661 ± 0.017
	25%	0.811 ± 0.032	1.3835 ± 0.0315
	55%	0.7385 ± 0.0765	2.115 ± 0.102

O comportamento exibido por estes provetes, tal como os não envelhecidos, segue o mesmo padrão esperado [20]. O aumento da percentagem de enchimento resulta num aumento da tensão suportada, com os provetes verticais a tolerar tensões e extensões menores. Assim, as conclusões retiradas seguem o mesmo padrão das indicadas para os provetes não envelhecidos. Contudo, o alongamento não segue o mesmo padrão.

Relativamente a falhas, nenhum dos provetes horizontais apresentou qualquer defeito na sua integridade. Contudo, é de notar que todos os provetes verticais sofreram fratura completa. Esta ocorreu no mesmo local dos provetes não envelhecidos, nas zonas de ligação entre camadas. Na Figura 35 pode ser visto um dos provetes que sofreu uma rotura, e em (b) o pormenor da separação das camadas nesta rotura.

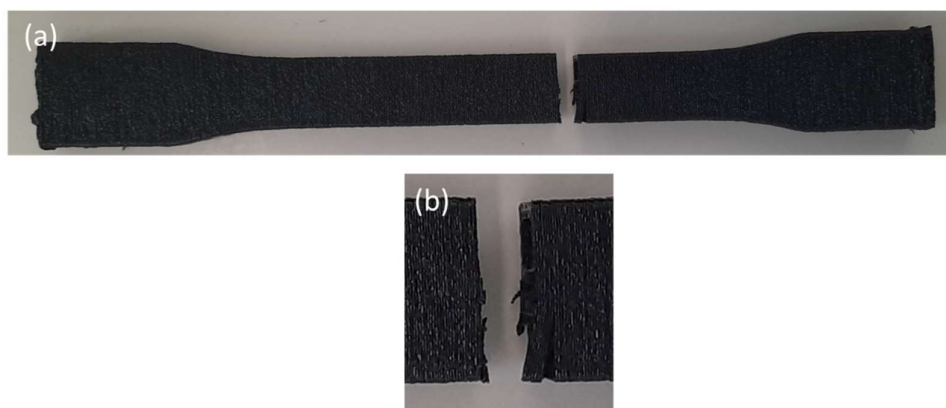


Figura 35 – (a) Fratura de um dos provetes verticais, (b) com o pormenor da separação de camadas

4.3 Comparação de resultados

Existem diversos estudos onde se averigua o impacto que condições climáticas, como radiação e humidade, têm neste material. No capítulo 2.3 é apresentado apenas um de muitos já realizados

Depois de tratados os dados originários de cada conjunto, as tensões de cedência e extensões à cedência de cada ensaio foram colocadas nas Tabela 8 e 9, respetivamente, para facilitar a sua comparação. Nestas é possível verificar a diferença existente entre cada conjunto.

Tabela 8 - Comparação entre os valores da tensão de cedência

Tipo de provete		Tensão de cedência: σ (MPa)	
		Sem envelhecimento	Com envelhecimento
H	5%	0.839 ± 0.017	0.776 ± 0.01
	25%	1.7105 ± 0.141	1.56 ± 0.18
	55%	3.858 ± 0.228	2.211 ± 0.333
V	5%	0.599 ± 0.062	0.661 ± 0.017
	25%	1.4655 ± 0.002	1.3835 ± 0.032
	55%	2.969 ± 0.211	2.115 ± 0.102

Tabela 9 - Comparação entre os valores de extensão à cedência

Tipo de provete		Extensão à cedência: ϵ	
		Sem envelhecimento	Com envelhecimento
H	5%	0.816 ± 0.021	0.8315 ± 0.164
	25%	0.938 ± 0.003	0.9455 ± 0.12
	55%	1.044 ± 0.021	0.8325 ± 0.018
V	5%	0.71 ± 0.069	0.6585 ± 0.066
	25%	0.9275 ± 0.063	0.811 ± 0.032
	55%	0.987 ± 0.121	0.7385 ± 0.077

Da análise dos resultados expressos nas tabelas é possível verificar que os valores apresentados pelos provetes envelhecidos são sempre inferiores aos não envelhecidos. O padrão exibido pelo comportamento reportado na comparação entre ensaios assemelhasse ao já previamente descrito por outros estudos [20].

É possível observar uma diminuição da tensão suportada à cedência em todos os provetes sujeitos a envelhecimento. Relativamente à extensão, também se verifica que a exibida pelos provetes envelhecidos é geralmente inferior à dos não envelhecidos. Para os provetes horizontais, apenas se verifica uma redução na extensão para o enchimento 55%. Também para os provetes verticais, o comportamento da extensão, à medida que se dá o aumento do enchimento, não segue o mesmo padrão verificado nos provetes sem envelhecimento.

Este comportamento, acoplado ao facto de os provetes envelhecidos apresentarem apenas defeitos visíveis muito reduzidos, pode levar à conclusão de que, para se obterem resultados mais conclusivos, seja necessário aumentar o tempo de envelhecimento.

É de realçar que todos os provetes verticais submetidos ao processo de envelhecimento sofreram fratura completa, e não apenas pequenos defeitos na integridade estrutural como os provetes verticais não envelhecidos. Assim, apesar de reduzidos a uma primeira vista, os efeitos do envelhecimento são claros e é possível concluir que estes causaram a degradação dos provetes.

É também importante mencionar que o modo de falha observado foi o mesmo, para todos os provetes que apresentaram rotura ou apenas falhas na integridade

estrutural. Verificou-se que esta dava-se sempre nas zonas de ligação entre as camadas. Disto é possível retirar que, independentemente do processo de envelhecimento a que uma peça produzida por FFF seja sujeita, a probabilidade de esta falhar nas zonas de ligação entre camadas é muito elevada.

Relativamente aos provetes horizontais, nenhum destes, com ou sem envelhecimento, apresentou qualquer falha na sua integridade estrutural. Para que roturas fossem observadas seria necessário aumentar o tempo de envelhecimento. O único defeito a reportar foi o aumento da rugosidade nas zonas dos provetes envelhecidos que se encontravam mais perto das fontes de calor e radiação. Os provetes verticais não apresentaram esta mudança na rugosidade, provavelmente devido ao facto de a sua superfície já ser rugosa.

Desta forma, as conclusões relativas à comparação dos ensaios podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Depois de um processo de envelhecimento por ciclos de humidade, temperatura e radiação, a tensão suportada pelos provetes diminuiu;
- Percentualmente, as diminuições nos fatores medidos foram as seguintes:
 - Tensão à cedência: valores entre 6% e 9%, para provetes com 5% e 25% de enchimento. Verificou-se um aumento exponencial para os provetes de 55% de enchimento, com uma diminuição de cerca de 40% para os horizontais, e 28% para os verticais.
 - Extensão à cedência: Para provetes horizontais não é possível reportar um comportamento linear. Para provetes verticais é possível quantificar uma diminuição de 7% para enchimento de 5%, 7% para 25% de enchimento e 25% para 55% de enchimento;
- Verifica-se que, para os valores de enchimento de 5% e 25%, as diminuições são reduzidas. Para a percentagem de 55%, tanto para a extensão como para a tensão, existe uma diminuição abrupta nas características medidas.
- Todos os provetes verticais envelhecidos fraturaram completamente;
- O modo de fratura nos provetes verticais, tanto envelhecidos como não envelhecidos, apresenta ser o mesmo: falha na zona de ligação entre camadas;

- Nenhum provete horizontal, com ou sem processo de envelhecimento, fraturou ou apresentou falhas na integridade estrutural;
- Verificou-se um aumento da rugosidade nos provetes horizontais envelhecidos nas zonas situadas mais perto das fontes de radiação e temperatura;

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

O efeito de um envelhecimento por condições climáticas, como humidade, radiação e temperatura, foi estudado, para perceber o modo como este poderá afetar peças produzidas por FFF.

Numa primeira fase foram produzidos provetes, variando o seu grau de enchimento e modo de impressão. Estes provetes foram testados relativamente às suas propriedades mecânicas, e pode concluir-se que o seu comportamento se encontra de acordo com a literatura [20]. As seguintes conclusões podem ser retiradas deste teste inicial:

- A tensão de cedência exibida pelos provetes é proporcional à percentagem de enchimento;
- Os provetes com o método de produção horizontal suportaram tensões de cedência superiores aos produzidos verticalmente;
- Verificou-se a ocorrência de falhas na integridade em todos os provetes verticais, tendo os de 5 % de enchimento fraturado completamente;
- O comportamento demonstrado encontra-se dentro do previsto [20], maiores percentagens de enchimento resultaram em valores superiores;

De seguida, outros provetes, com as mesmas características, foram sujeitos a um processo de envelhecimento acelerado, conforme a norma ISO 4892-3:2016 [15]. Estes foram sujeitos a 550 horas de ciclos de humidade, radiação e temperatura. As propriedades mecânicas destes provetes foram testadas e verificou-se que o comportamento destes foi idêntico ao dos não envelhecidos. Quanto maior a percentagem de enchimento maiores as tensões suportadas, tendo estas sido exibidas pelos provetes horizontais. É de notar que todos os provetes verticais envelhecidos sofreram uma falha completa.

Comparando os dois ensaios de tração, podem retirar-se as seguintes conclusões:

- Verificou-se que os provetes envelhecidos apresentaram uma gama de tensões de cedência inferiores, em todos os ensaios realizados;
- Verificou-se uma redução da tensão à cedência de cerca de 6% e 7%, enquanto que para 55% de enchimento se verificou uma redução de 40%;
- O comportamento da extensão à cedência verificado nos provetes envelhecidos não segue o mesmo padrão verificado nos não envelhecidos, a extensão não aumenta proporcionalmente com a percentagem de enchimento;
- Para a extensão, as diminuições registadas seguem um padrão parecido ao da tensão: para valores de enchimento de 5% e 25%, a redução foi de cerca de 6%, para 55% de enchimento a redução foi de 25%;
- Nos provetes envelhecidos, ocorreu a fratura completa de todos os verticais, enquanto que nos não envelhecidos apenas se verificou a fratura dos de 5 % e algumas falhas na integridade nos restantes;
- A superfície dos provetes horizontais envelhecidos sofreu um aumento de rugosidade na zona do provete mais perto das fontes de radiação e calor, nos provetes verticais tal não se observou.

Com esta comparação é possível concluir que os ciclos de envelhecimento degradaram o material de modo a que fosse possível observar uma diminuição das suas propriedades mecânicas. O único modo de falha que se verificou foi o esperado e o já conhecido para peças, produzidas por FFF, em que a orientação da sua produção é perpendicular ao esforço aplicado. Observou-se também um aumento da rugosidade, mas não de modo uniforme pela área de superfície dos provetes.

O comportamento exibido pela extensão à cedência e o ligeiro aumento da rugosidade na superfície de alguns provetes leva a concluir que no futuro será necessário empregar um ciclo de envelhecimento mais perlongado, de modo a evidenciar mais estas características.

Relativamente à câmara, foi possível finalizar os ciclos, mas para estudos futuros será necessário realizar certas reparações para que o equipamento continue funcional. É de notar que devido ao imprevisto da necessidade de realização de reparações, o tempo disponível para a realização ou aprofundamento do tópico em estudo foi inferior ao esperado. As modificações recomendadas serão abordadas no capítulo 5, sobre Trabalhos Futuros.

5.2 Trabalhos Futuros

O estudo do envelhecimento em polímeros já é um tópico profundamente estudado. Contudo, a variante de peças de polímero produzidas por impressão 3D, mais precisamente FFF, ainda é uma área que se encontra em aberto. Devido ao tempo necessário para a reparação da câmara, inicialmente não previsto, não foi possível aprofundar mais o estudo proposto. Assim, diversas portas permanecem abertas para estudos futuros relativamente ao envelhecimento deste material para peças produzidas por FFF.

Trabalhos complementares ao estudo realizado poderiam incluir estudos para a comparação dos efeitos de vários tempos de envelhecimento. Sugeriria-se tempos superiores ao usado, para garantir que os seus efeitos seriam facilmente observados e permitindo assim possuir uma escala da deterioração deste tipo de peças ao longo do seu tempo de vida.

As zonas de ligação entre camadas poderiam também ser alvo de estudo. Sendo esta a principal fragilidade de peças produzidas por FFF. Perceber o modo como processos de envelhecimento afetam esta zona pode revelar-se importante do ponto de vista da segurança e manutenção de futuras peças produzidas deste modo.

Relativamente à câmara usada, e atendendo ao seu estado e tempo de vida,

sugeria-se um estudo detalhado de todos os seus componentes, para averiguar se estes se encontram em condições de continuar em funcionamento. Assim, poderia ser realizado um projeto de revitalização. Neste projeto, deverá ser dada prioridade aos seguintes componentes:

- O motor passo a passo necessita de ser substituído pois não se encontra capaz de permanecer longos períodos de tempo em funcionamento;
- Idealmente, a lâmpada a utilizar deve ser uma semelhante à original, caso contrário o seu encaixe terá de ser alterado;
- A resistência responsável pela criação dos ciclos de humidade também deve ser substituída pois apresenta o mesmo problema que o motor;
- As peças de PLA produzidas no projeto original encontram-se degradadas, é recomendável a produção de novas, especialmente a proteção do motor;
- O circuito elétrico e de ligações à placa Arduino® deve ser reorganizado para facilitar a sua interpretação;
- A fonte de energia atual não permite comunicar com a placa e mantê-la ligada ao circuito, recomenda-se que seja acomodado um novo transformador para fazer uso da entrada própria para a alimentação.

Em alternativa, uma câmara nova poderia ser projetada, caso a realização de tal reparação se mostre demasiado morosa ou dispendiosa.

O estudo do envelhecimento de diferentes materiais é algo imperativo para que este possa futuramente ser usado com segurança. Com estas recomendações pretende-se que o laboratório não seja privado de um equipamento que possui uma clara importância para a realização de estudos sobre o comportamento de materiais ao longo do seu tempo de vida.

BIBLIOGRAFIA

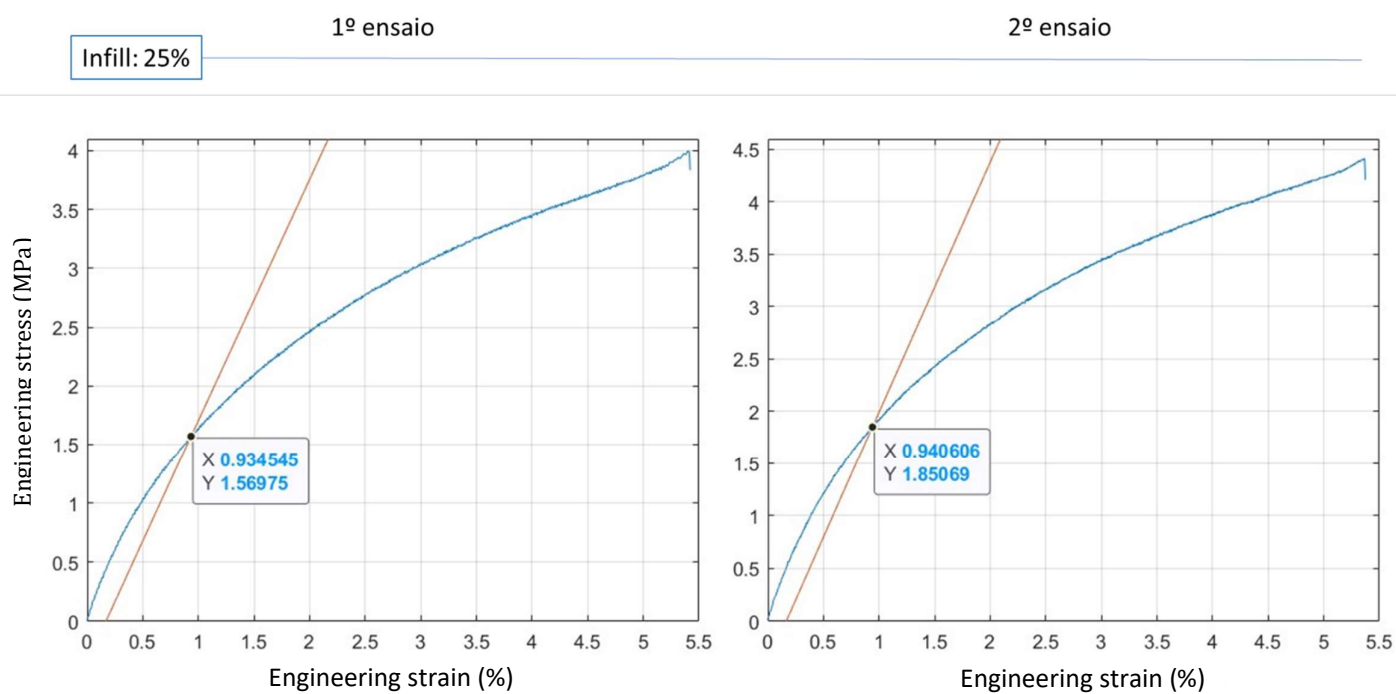
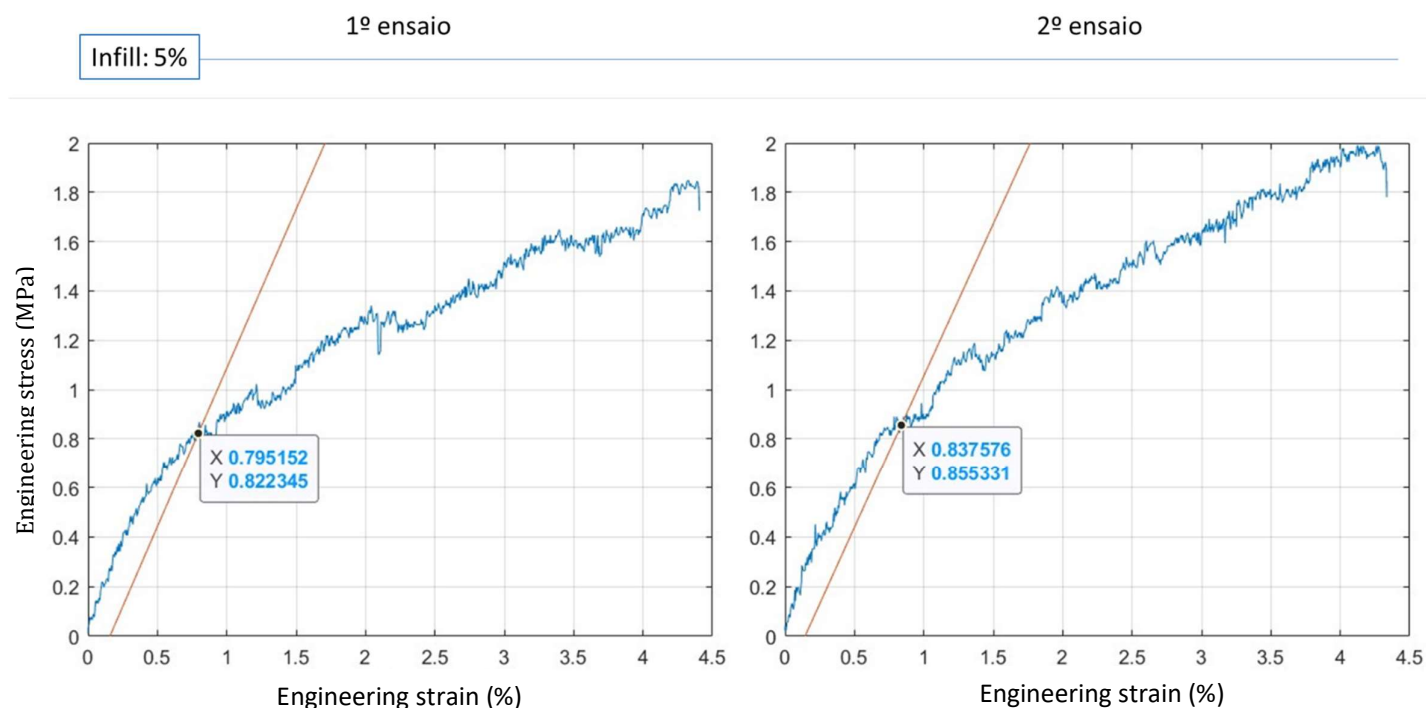
- [1] Qi, H. J., & Boyce, M. C. (2005). *Stress–strain behavior of thermoplastic polyurethanes*. *Mechanics of Materials*, 37(8), 817–839. doi: 10.1016/j.mechmat.2004.08.001
- [2] HUNTSMAN, A guide to thermoplastic polyurethanes (TPU), https://huntsman-pimcore.equisolve-dev.com/Documents/PU_Elastomers_Guide_to_TPU.pdf, Acedido a 20/01/2023
- [3] Omnexus, <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/thermoplastic-polyurethanes-tpu>, Acedido a 25/01/2023
- [4] Novakova, A. & Brožek, Milan. (2014). Selected plastics wear resistance. *Engineering for Rural Development*. 13. 187-193.
- [5] Lubrizol, <https://www.lubrizol.com/-/media/Lubrizol/Health/Literature/Shelf-Life-Document-for-Medical-Grade-TPU---Final.pdf>, Acedido a 20/01/2023
- [6] Yao, Y., Xiao, M., & Liu, W. (2021). A Short Review on Self-Healing Thermoplastic Polyurethanes. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 222(8), 2100002. doi:10.1002/macp.202100002
- [7] Martin, D. J., Osman, A. F., Andriani, Y., & Edwards, G. A. (2012). *Thermoplastic polyurethane (TPU)-based polymer nanocomposites*. *Advances in Polymer Nanocomposites*, 321–350. doi:10.1533/97808
- [8] Awasthi, P., & Banerjee, S. S. (2021). *Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities*. *Additive Manufacturing*, 46, 102177. doi:10.1016/j.addma.2021.102177

- [9] Wallin, T. J., Pikul, J., & Shepherd, R. F. (2018). *3D printing of soft robotic systems. Nature Reviews Materials*, 3(6), 84–100. doi:10.1038/s41578-018-0002-2
- [10] Awasthi, P., & Banerjee, S. S. (2021). Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities. *Additive Manufacturing*, 46, 102177. doi:10.1016/j.addma.2021.102177
- [11] Arifvianto, B., Iman, T. N., Prayoga, B. T., Dharmastiti, R., Salim, U. A., Mahardika, M., & Suyitno. (2021). *Tensile properties of the FFF-processed thermoplastic polyurethane (TPU) elastomer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-021-07712-0
- [12] White, J. R. (2006). *Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect. Comptes Rendus Chimie*, 9(11-12), 1396–1408. doi:10.1016/j.crci.2006.07.008
- [13] Boubakri, A., Guermazi, N., Elleuch, K., & Ayedi, H. F. (2010). *Study of UV-aging of thermoplastic polyurethane material. Materials Science and Engineering: A*, 527(7-8), 1649–1654. doi:10.1016/j.msea.2010.01.014
- [14] Boubakri, A., Elleuch, K., Guermazi, N., & Ayedi, H. F. (2009). *Investigations on hygrothermal aging of thermoplastic polyurethane material. Materials & Design*, 30(10), 3958–3965. doi:10.1016/j.matdes.2009.05.038
- [15] British Standards Institution 2016, *ISO 4892-3:2016, Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources, Part 3: Fluorescent UV lamps*, BSI Standards Limited 2016.
- [16] ASTM International, D 638 – 03: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- [17] Matos F, Desenvolvimento de equipamento para ensaios de envelhecimento acelerado de materiais compósitos, (2019), Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de ciências e Engenharias.

- [18] Rodríguez-Parada, L.; de la Rosa, S.; Mayuet, P.F. Influence of 3D-Printed TPU Properties for the Design of Elastic Products. *Polymers*, 2021, 13, 2519. [https://doi.org/ 10.3390/polym13152519](https://doi.org/10.3390/polym13152519).
- [19] Beloshenko V, Beygelzimer Y, Chishko V, Savchenko B, Sova N, Verbylo D, Voznyak A, Vozniak I, (2021), Mechanical properties of flexible tpu-based 3d printed lattice structures: Role of lattice cut direction and architecture, *Polymers*, doi: 10.3390/polym13172986
- [20] Elmrabet, N., & Siegkas, P. (2020). Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts. *Polymer Testing*, 106656. doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106656
- [21] Awasthi, P., & Banerjee, S. S. (2021). Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities. *Additive Manufacturing*, 46, 102177. doi:10.1016/j.addma.2021.102177
- [22] Rui Tian, Kaitao Li, Yanjun Lin, Chao Lu, and Xue Duan, Characterization Techniques of Polymer Aging: From Beginning to End, *Chemical Reviews* 2023 123 (6), 3007-3088 DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00750
- [23] D. Tabuani, F. Bellucci, A. Terenzi, G. Camino, Flame retarded Thermoplastic Polyurethane (TPU) for cable jacketing application, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 97, Issue 12, 2012, Pages 2594-2601, ISSN 0141-3910, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.011>

ANEXOS

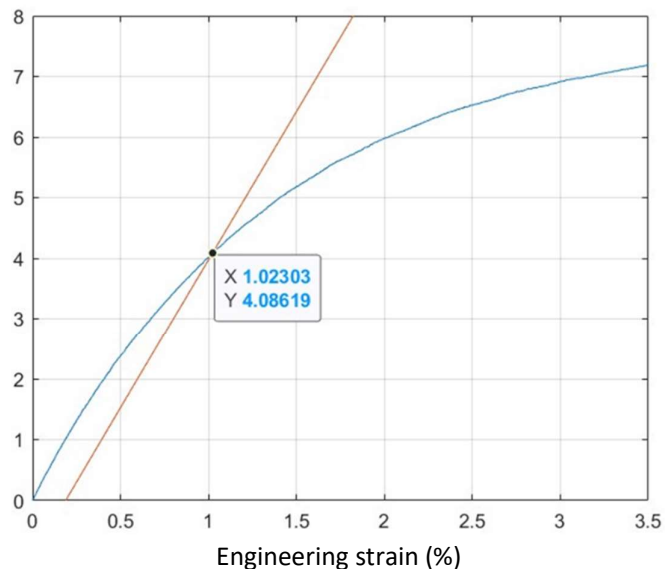
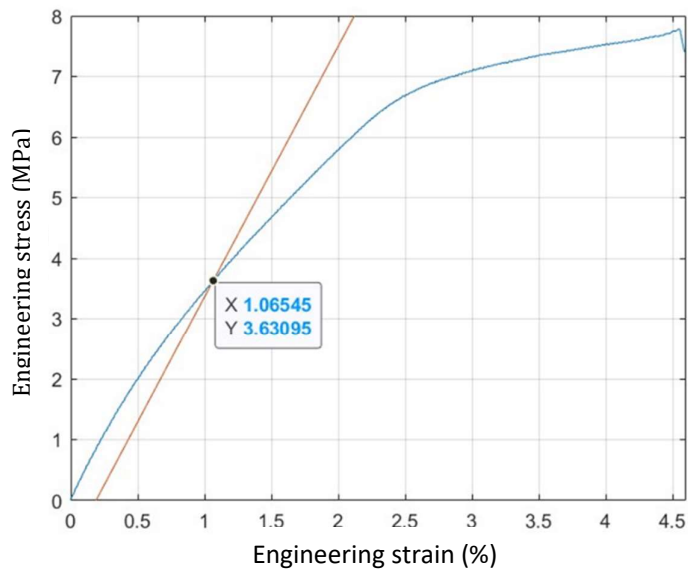
A - Gráficos tensão- extensão dos provetes impressos horizontalmente



Infill: 55%

1º ensaio

2º ensaio

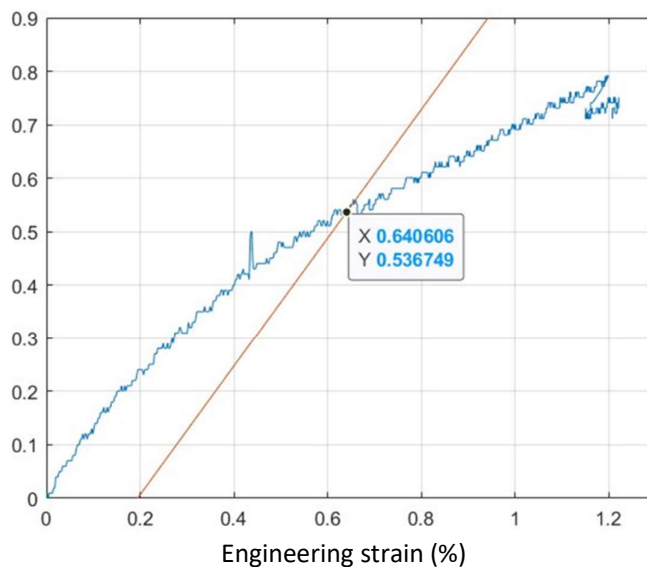
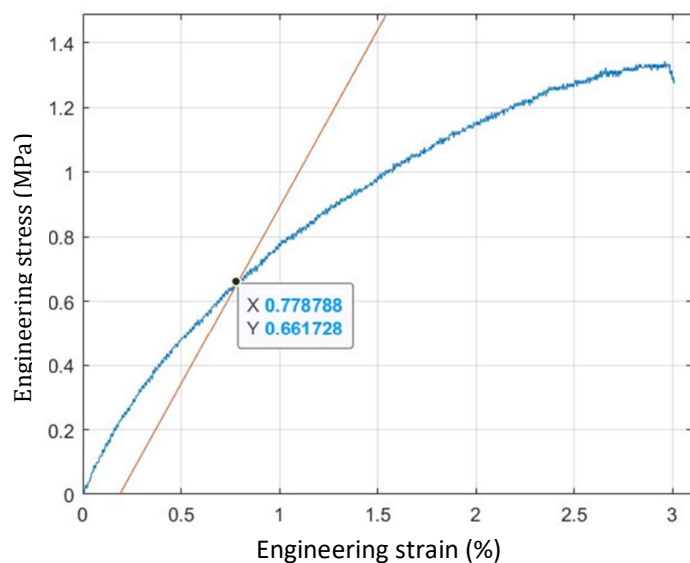


B - Gráficos tensão- extensão dos provetes impressos verticalmente

Infill: 5%

1º ensaio

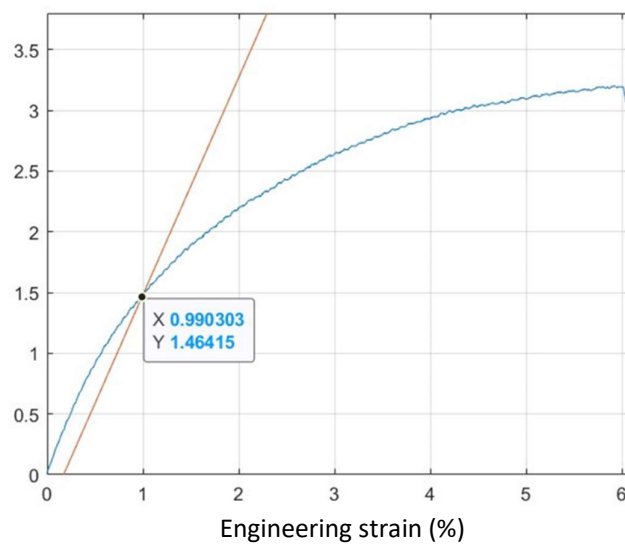
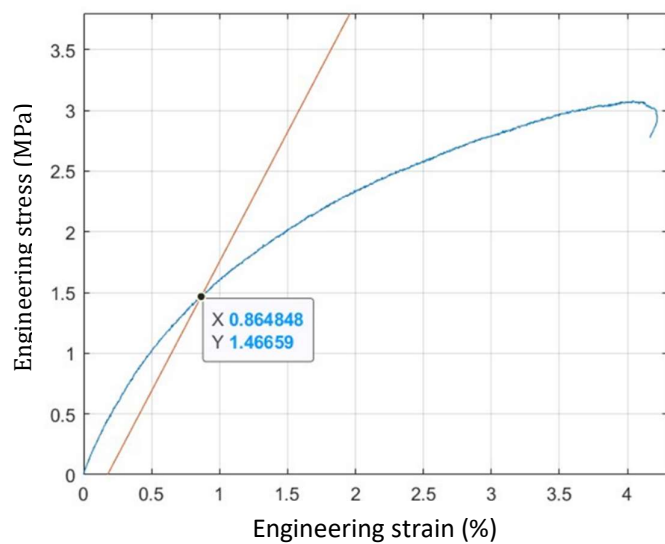
2º ensaio



Infill: 25%

1º ensaio

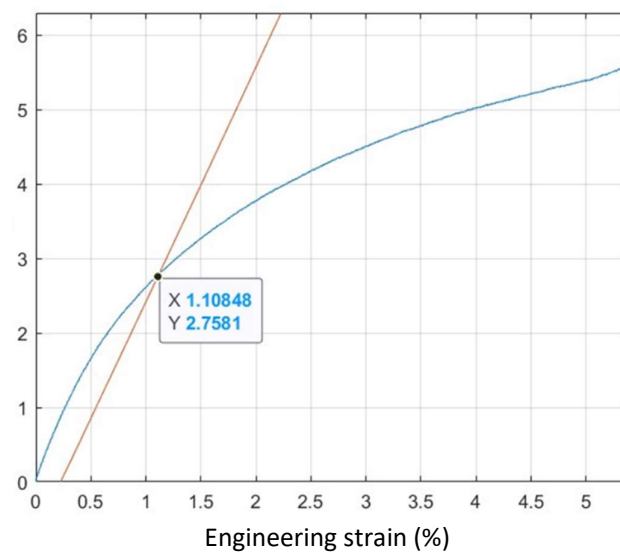
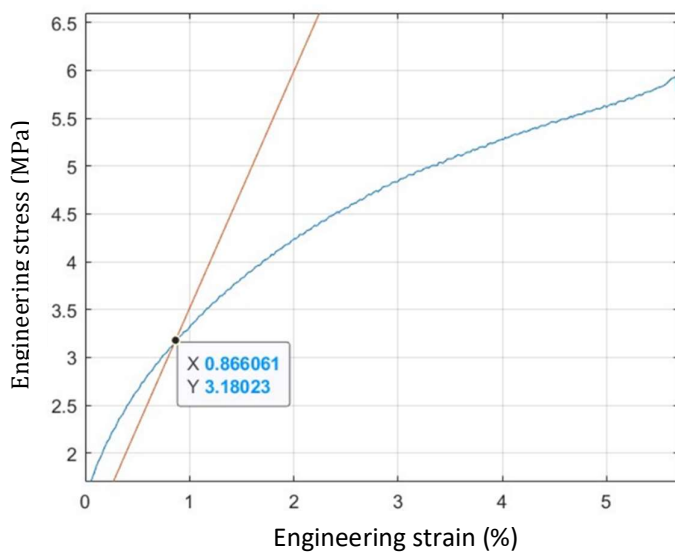
2º ensaio



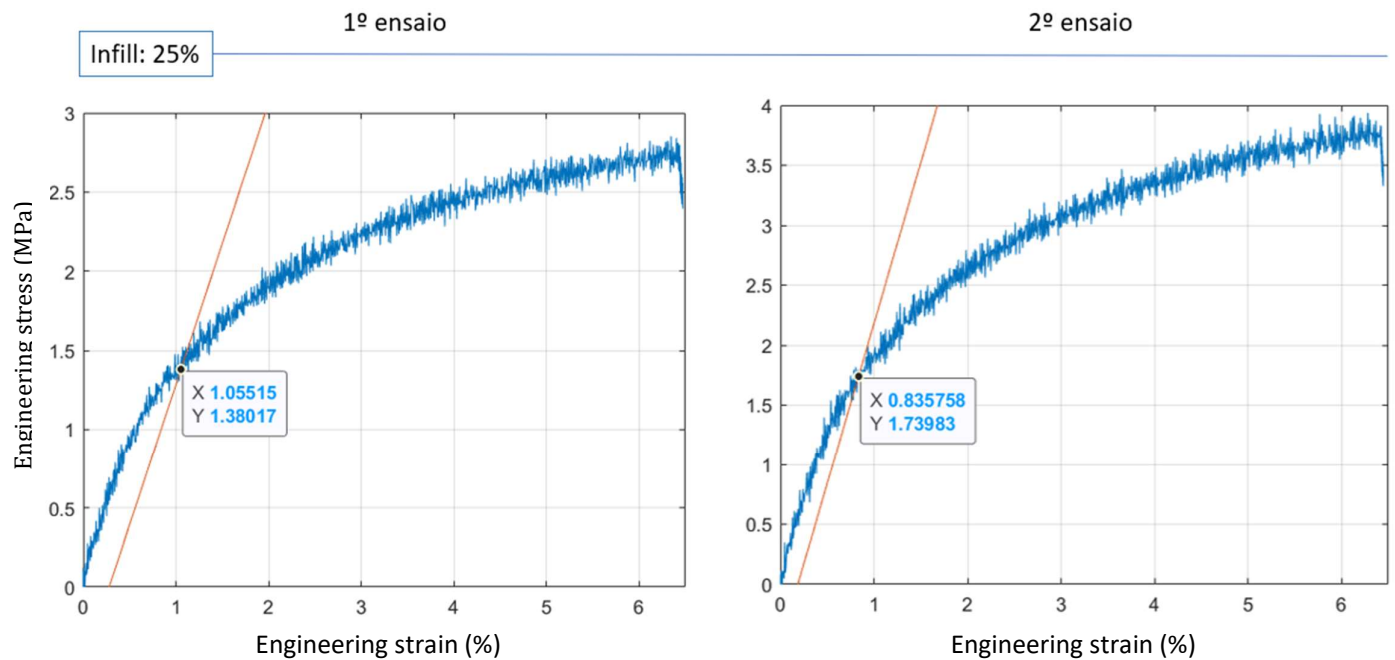
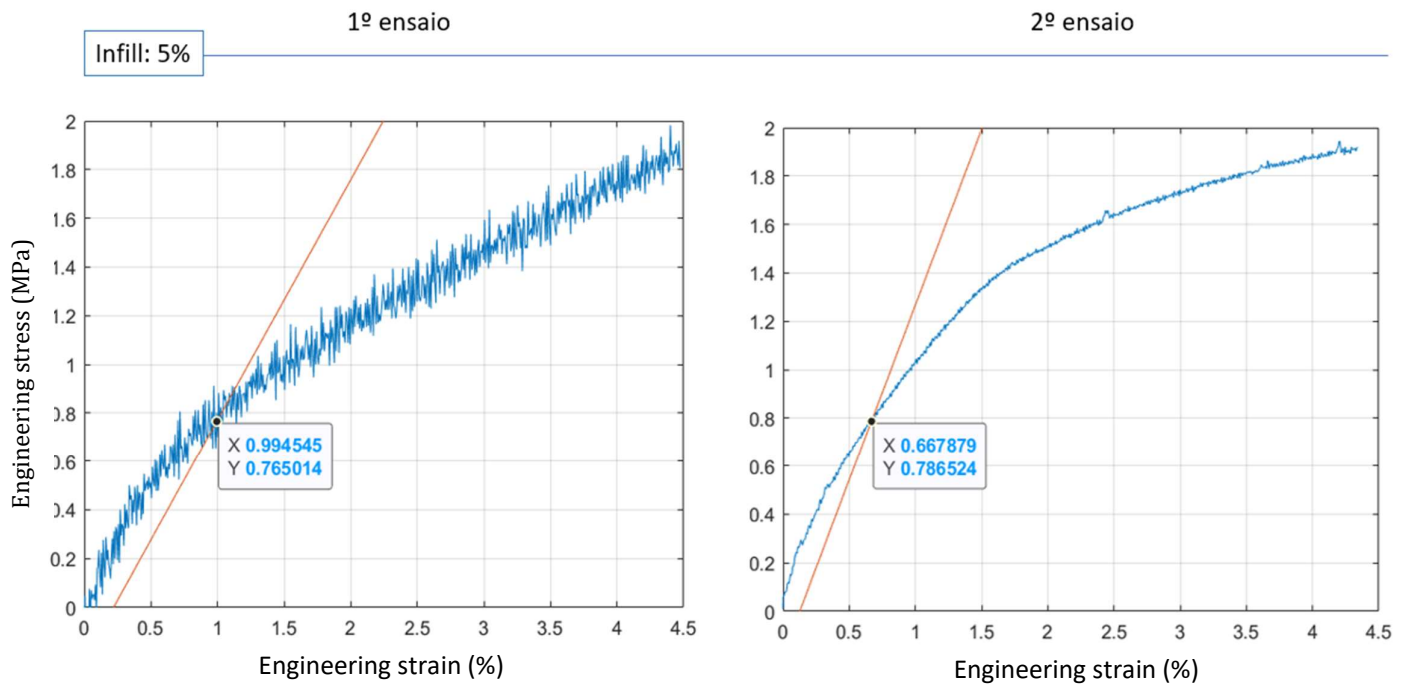
Infill: 55%

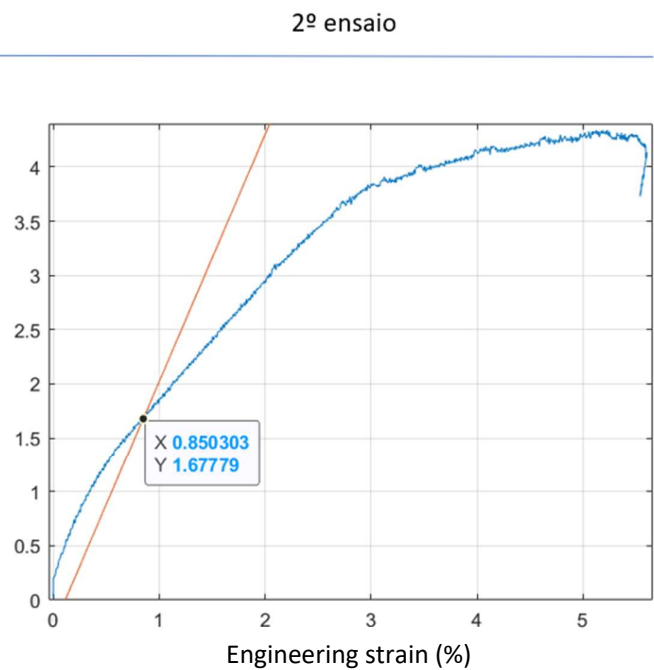
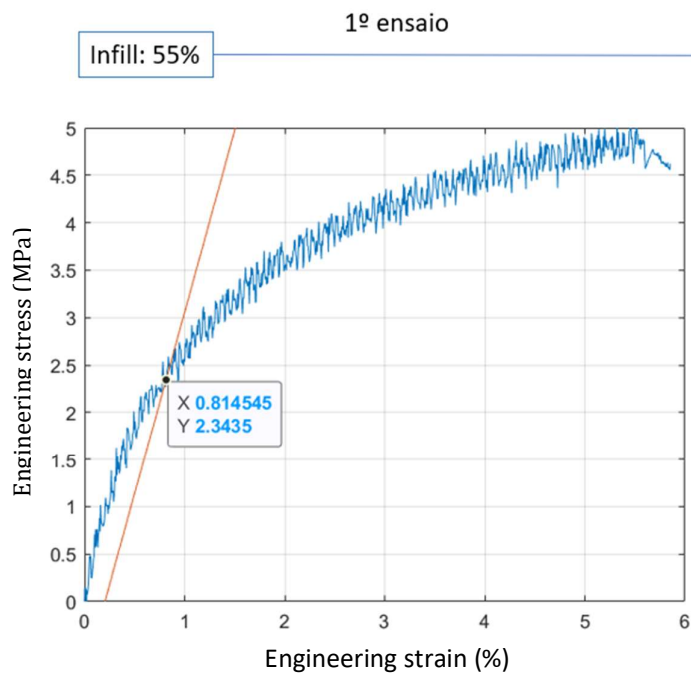
1º ensaio

2º ensaio

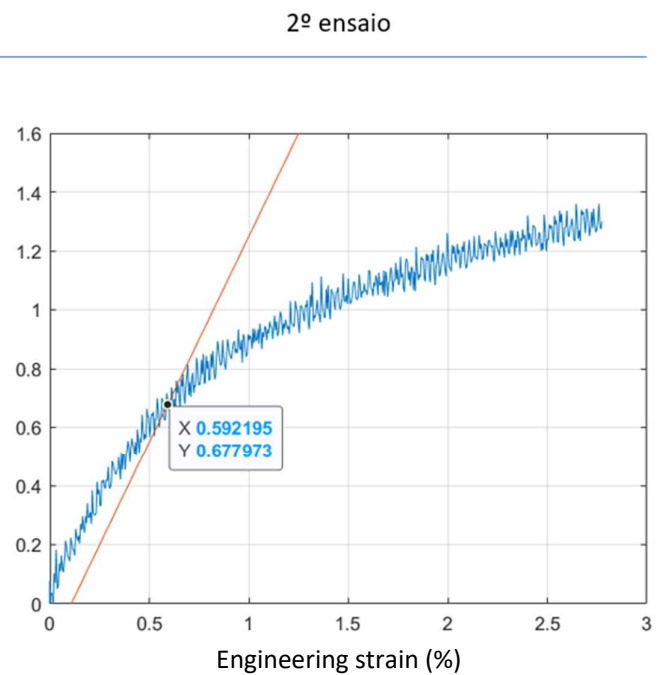
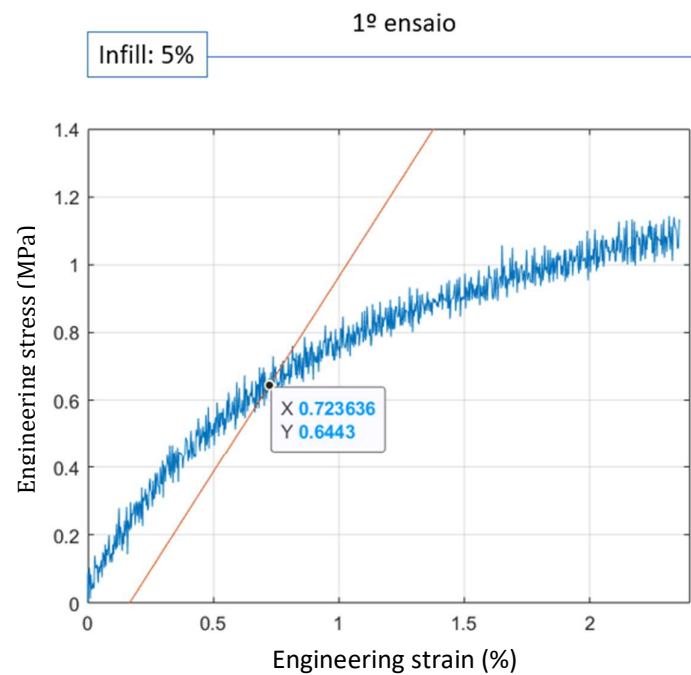


C – Gráficos tensão- extensão dos provetes horizontais envelhecidos





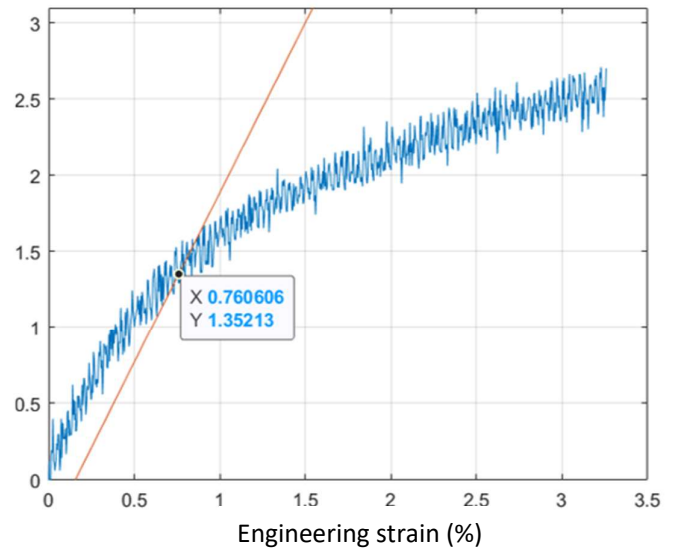
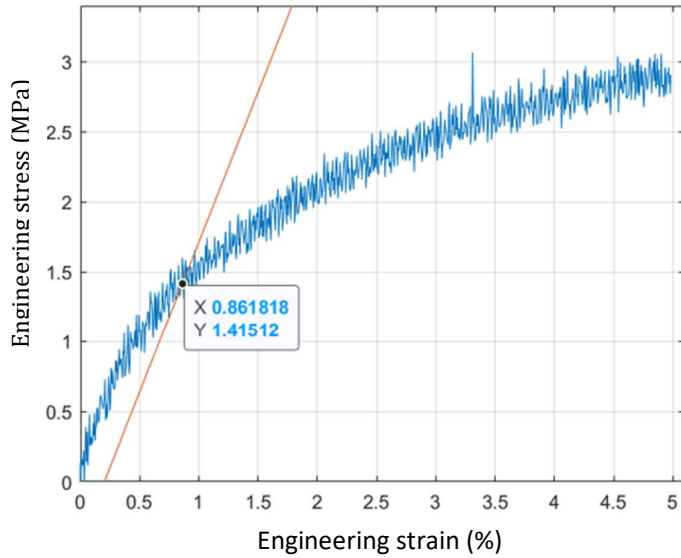
D – Gráficos tensão- extensão dos provetes verticais envelhecidos



Infill: 25%

1º ensaio

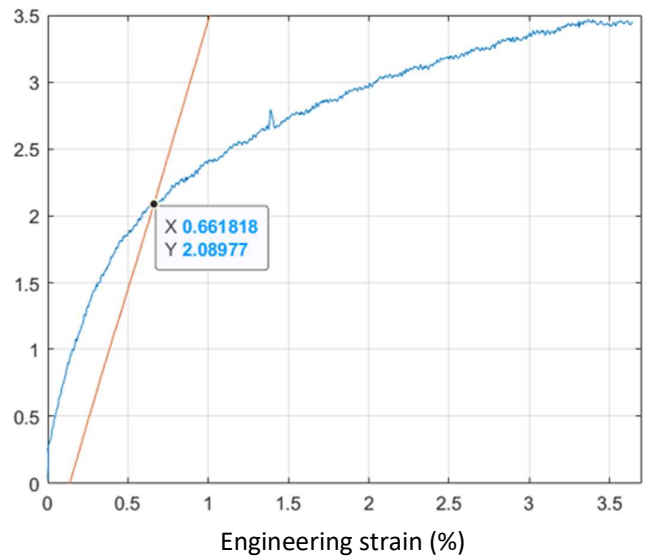
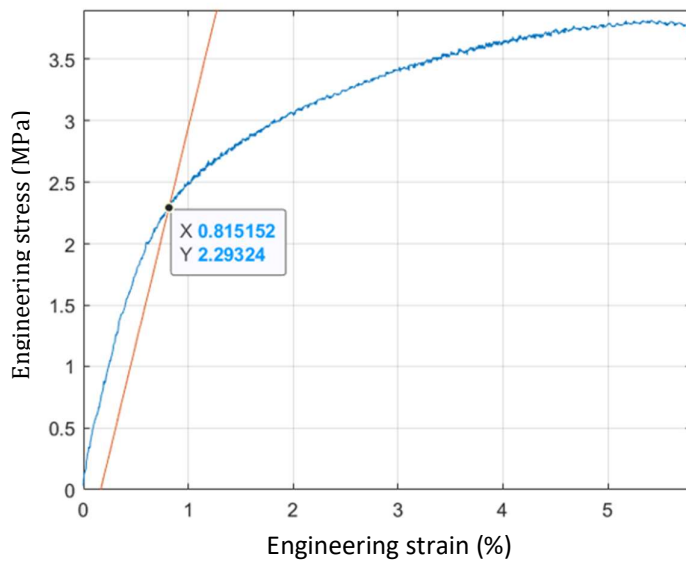
2º ensaio



Infill: 55%

1º ensaio

2º ensaio



E – Código usado para o controlo dos ciclos de envelhecimento

```
//-----código de controlo dos ciclos de envelhecimento-----
#include <dht.h>
#include <SD.h>
#include <Stepper.h>

#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11

#define RELAY1 5 // Pin for relay 1 - ventilação
#define RELAY2 7 // Pin for relay 2 - humidade

dht DHT;
File dataFile;

//-----tempos entre medições de temperaturas-----

unsigned long previousMillis = 0;
const unsigned long interval = 2000; // interval in milliseconds

//-----gama de temperaturas para o sistema de arrefecimento-----

float minTemp = 52; // Minimum temperature for relay 1 to turn on
float maxTemp = 49; // Maximum temperature for relay 1 to turn off

//-----duração ciclos de humidade-----

unsigned long cycleStart = 28800000; // Start time of the current cycle
unsigned long cycleInterval = 28800000; // Interval of each cycle in milliseconds
(18000000) 5h
unsigned long relay2Duration = 14400000; // Duration for which Relay 2 stays on in
milliseconds (14400000) 4h
bool relay2Active = false; // Flag to track the state of Relay 2
unsigned long relay2StartTime = 0; // Start time of Relay 2 activation
int cycleCount = 0; // Count of cycles completed so far

//-----tempo entre autosaves dos valores no cartao SD-----

unsigned long intervalSD = 20000; // interval between autosaves in milliseconds
unsigned long previousMillisSD = 0;

//-----variaveis do motor-----
```

```

const int stepsPerRevolution = 100; // Change this according to your motor's
specification
const int dirPin = 4;           // DIR+ pin connected to Arduino pin 4
const int pulPin = 3;           // PUL+ pin connected to Arduino pin 7
Stepper stepper(stepsPerRevolution, dirPin, pulPin);

//-----função para fechar o ficheiro-----
-

void closeFile() {
  dataFile.close();
  Serial.println("File closed.");
}

//-----função para abrir o ficheiro-----

void openFile() {
  dataFile = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);
  delay(1000);
  if (!dataFile) {
    Serial.println("Error opening data file.");
    return;
  }
  Serial.println("File opened.");
}

//----- função setup-----

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {}

  pinMode(RELAY1, OUTPUT);
  pinMode(RELAY2, OUTPUT);

  digitalWrite(RELAY1, LOW);
  digitalWrite(RELAY2, LOW);

  if (!SD.begin(53)) {
    delay(1000);
    Serial.println("SD card initialization failed!");
    return;
  }

  Serial.println("SD card initialized.");

  dataFile = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);

```

```

if (!dataFile) {
  Serial.println("Error opening data file.");
  return;
}

Serial.println("Writing data to file...");
dataFile.println("Time,Temperature,Humidity");

stepper.setSpeed(50); // Adjust the speed value (in steps per minute)

delay(10000);
}

//----- função loop-----

void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();
  unsigned long currentMillisSD = millis();
  stepper.step(1); // Step the motor by 1 step (clockwise)

  // Check temperature every 2 seconds
  if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
    previousMillis = currentMillis;

    int chk = DHT.read11(DHTPIN);

    float temp = DHT.temperature;
    float hum = DHT.humidity;

    dataFile.print(millis()/(3600*1000));
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(temp);
    dataFile.print(",");
    dataFile.println(hum);

    Serial.print(millis()/(3600*1000));
    Serial.print(" h ");
    Serial.print(millis()/1000);
    Serial.print(" s ");
    Serial.print(temp);
    Serial.print(" *C ");
    Serial.print(hum);
    Serial.println(" %");

    // Control relay 1 by temperature
    if (temp >= minTemp && temp <= maxTemp) {

```

```

    digitalWrite(RELAY1, HIGH);
  } else {
    digitalWrite(RELAY1, LOW);
  }
}

// Control relay 2 by time cycles
if (currentMillis - cycleStart >= cycleInterval) {
  cycleStart = currentMillis;

  // Switch on Relay 2
  digitalWrite(RELAY2, HIGH);
  relay2Active = true;
  relay2StartTime = currentMillis;
}

// Check if Relay 2 duration has elapsed
if (relay2Active && currentMillis - relay2StartTime >= relay2Duration) {
  // Switch off Relay 2
  digitalWrite(RELAY2, LOW);
  relay2Active = false;
}

// Open and close the file
if (currentMillisSD - previousMillisSD >= intervalSD) {
  previousMillisSD = currentMillisSD;
  closeFile();
  openFile();
}
}

```

