



Estudo termomecânico do processo de FDM de PETG com Tungsténio

Mestrado em Engenharia Automóvel

Luis Augusto Coelho Gonçalves

Leiria, março de 2025



Estudo termomecânico do processo de FDM de PETG com Tungsténio

Mestrado em Engenharia Automóvel

Luis Augusto Coelho Gonçalves

Trabalho de Projeto realizado sob a orientação da Professora Doutora Maria Leopoldina
Mendes Ribeiro de Sousa Alves e do Professor Doutor Mário António Simões Correia

Leiria, março de 2025

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, no ano letivo 2024/2025, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Durante os últimos meses foram várias as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para o bom decorrer deste projeto. Certamente não conseguirei agradecer como deveria a todos eles.

Desta forma, deixo apenas algumas palavras como forma de reconhecimento.

Muito especialmente aos meus pais e ao meu irmão, Maria Manuela Gonçalves, Armando Gonçalves e Eduardo Gonçalves, por me terem dado a possibilidade de continuar os meus estudos, por todo o incentivo, compreensão e disponibilidade ao longo do meu percurso de formação.

À Professora Doutora Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves e ao Professor Doutor Mário António Simões Correia, por terem aceitado serem meus orientadores deste projeto, pela ajuda na elaboração desta tese por todo o conhecimento e ajuda dada desde os testes realizados á procura de informação sobre o tema.

À Engenheira Fernanda Carvalho pela ajuda e acesso ao laboratório onde foram realizados os ensaios nesta tese

Aos meus colegas de universidade nomeadamente Fábio, Miguel, Marco, André, Diogo e Hélio, pela entreatajuda e amizade ao longo dos últimos 2 anos deste mestrado.

Resumo

A realização deste projeto tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de provetes construídos utilizando fabrico aditivo, nomeadamente *Fused Deposition Modeling* (FDM), comparando dois materiais, PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) e PETG com Tungsténio. A produção das peças é feita através de um processo de extrusão onde o objeto é construído depositando o material camada a camada. Os materiais utilizados são os filamentos termoplásticos puros ou misturados com metal. Estes materiais são introduzidos numa impressora 3D que é programada com a temperatura que é necessário atingir. Assim que a mesma atinge a temperatura ideal, o processo inicia-se. O material é depositado nos locais determinados onde arrefece e solidifica. Este é um processo repetitivo, que exige várias passagens até que as peças fiquem completas. Uma das vantagens deste processo é o menor custo e também o tempo reduzido com que se consegue a obtenção de uma peça ou modelo. Contudo, existem outras vantagens muito competitivas como a possibilidade de gerar peças com elevado grau de complexidade geométrica, a capacidade de obter diferentes texturas numa mesma peça bem como a capacidade da utilização de múltiplos materiais no mesmo modelo e a baixa geração de resíduos.

Os provetes foram construídos numa única orientação, com uma trajetória de construção designada de “*aligned rectilinear*”. Os ensaios realizados foram: de tração, compressão e dureza Shore. Estes ensaios permitiram analisar as propriedades mecânicas e térmicas dos provetes obtidos após a construção das peças em estudo. Também foram realizados ensaios DSC. O objetivo principal deste projeto é avaliar qual a influência da adição do metal na matriz polimérica bem como a sua utilização na indústria automóvel como substituição de materiais utilizados.

Palavras-chave: Fabrico aditivo, Ensaios mecânicos, *Fused Deposition Modeling*, PETG, Tungsténio.

Abstract

The aim of this project is to analyse the mechanical behaviour of specimens built using additive manufacturing, namely Fused Deposition Modelling (FDM), using two materials, PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) and PETG with Tungsten. The parts are produced using an extrusion process where the object is built by depositing the material layer by layer. The materials used are pure thermoplastic filaments or those mixed with metal. These materials are fed into a 3D printer which is programmed with the temperature it needs to reach. As soon as it reaches the ideal temperature, the process begins. The material is deposited in the determined locations where it cools and solidifies. This is a repetitive process that requires several passes until the pieces are complete. One of the advantages of this process is the lower cost and also the reduced time it takes to obtain a part or model. However, there are other very competitive advantages such as the possibility of generating pieces with a high degree of geometric complexity, the ability to obtain different textures in the same piece as well as the ability to use multiple materials in the same model and the low generation of waste.

The specimens were built in a single orientation, with a construction path known as a '*aligned rectilinear*'. The tests carried out were tensile, compression, DSC and Shore hardness. These tests made it possible to analyse the mechanical and thermal properties of the specimens obtained after the construction of the parts under study. The main aim of this project is to assess the influence of adding metal to the polymer matrix and its use in the automotive industry as a substitute for other materials.

Keywords: Additive manufacturing, Mechanical tests, Fused Deposition Modeling, PETG, Tungsten

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de tabelas	xi
Lista de siglas e acrónimos	xii
1. Introdução	1
2. Estado da arte	3
2.1. Fused Deposition Modeling	4
2.2. Materiais utilizados	5
2.2.1. Materiais utilizados	5
2.2.2. PETG	6
2.2.3. PETG com tungsténio.....	7
2.3. Parâmetros de impressão	8
2.4. Aplicabilidade na indústria automóvel	10
2.4.1. Coletor de admissão	10
2.4.2. Caixa do termóstato	11
3. Métodos	13
3.1. Metodologia	14
3.1.1. Caracterização térmica e mecânica.....	14
3.2. Visualização do filamento	20
4. Resultados e discussões	22
4.1. Visualização do filamento	22
4.2. Ensaio DSC	24
4.3. Ensaio de tração	27
4.4. Ensaio de compressão	29
4.4.1. Geometria tubular vertical	30
4.4.2. Geometria tubo horizontal	32
4.4.3. Geometria cilindro Vertical	35

4.4.1.	Geometria cilindro horizontal	37
4.4.2.	Comparação das geometrias de matriz de PETG	40
4.4.3.	Comparação das geometria de matriz de PETG com Tungsténio.....	41
4.5.	Ensaio de dureza Shore	43
5.	Conclusão	45
Bibliografia		47
Anexos A – Ficha técnica filamento PETG		49
Anexos B – Ficha técnica filamento PETG tungsténio		50

Lista de Figuras

Figura 1 - Impressora 3D Prusa I3 MK3 (Original Prusa I3 MK3S+ Original Prusa 3D Printers Directly from Josef Prusa, n.d.)	4
Figura 2 - coletor de admissão completo, Ilardo, R et al, 2010.....	11
Figura 3 – Fluxograma	13
Figura 4 - Equipamento Setaram DSC 131	15
Figura 5 - Provete de tração.....	16
Figura 6 - Máquina Zwick Z100.....	16
Figura 7 - Provete de compressão cilíndrico	17
Figura 8 - Provete de compressão tubular	18
Figura 9 - Durómetro utilizado no teste	20
Figura 10 - Impressão do filamento em estilo grelha	21
Figura 11 - Fotografia microscópica do filamento	22
Figura 12 - Espessura do filamento por fotografia	23
Figura 13 - Ensaio DSC PETG.....	24
Figura 14 - Zoom Transição vítrea PETG	24
Figura 15 - Ensaio DSC PETG+W	25
Figura 16 - Zoom Transição vítrea PETG+W	26
Figura 17 - Ensaio de tração do filamento PETG.....	27
Figura 18 - Ensaio de tração do filamento PETG + Tungsténio	28
Figura 19 - Ensaio de compressão no filamento PETG em tubo vertical.....	30
Figura 20 - Ensaio de compressão do filamento PETG + Tungsténio em tubo vertical	31
Figura 21 - Ensaio de compressão do filamento PETG em tubo horizontal	32
Figura 22 - Ensaio de compressão do filamento do PETG + Tungsténio em tubo horizontal	33
Figura 23 - Ensaio de compressão do filamento PETG em cilindro vertical	35
Figura 24 - Ensaio de compressão do filamento PETG + Tungsténio em cilindro vertical	36

Figura 25 - Ensaio de compressão do filamento PETG em cilindro horizontal.....	37
Figura 26 - Ensaio de compressão do filamento PETG + Tungstênio em cilindro horizontal	38
Figura 27 - Gráfico comparativo dos ensaios PETG.....	40
Figura 28- Gráfico comparativo dos ensaios PETG+Tungstênio	41
Figura 29 - Resumo dos ensaios de dureza Shore	43

Lista de tabelas

Tabela 1 - Parâmetros de impressão	21
Tabela 2 - Média Modulo elasticidade longitudinal experimental PETG.....	40
Tabela 3- Média Modulo elasticidade longitudinal experimental PETG+Tungsténio.....	41
Tabela 4 - Média dureza Shore.....	43

Lista de siglas e acrónimos

IPL	Instituto Politécnico de Leiria
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FA	Fabrico Aditivo
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>
W	Tungsténio
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
STL	<i>Standard Triangular Language</i>

1. Introdução

O processo de fabrico aditivo (FA), neste caso o *Fused Deposition Modeling* (FDM) é utilizado na indústria quer seja para a produção de um componente final, quer seja para prototipagem. É possível obter por fabrico aditivo um ou múltiplos componentes de forma rápida, geralmente num prazo de horas. Para o caso da tecnologia FDM, os materiais mais utilizados são os polímeros e compósitos compostos por polímeros e metais.

O comportamento mecânico de componentes produzidos por esta tecnologia é influenciado pela estratégia, posição de construção e material. Para tal é necessário conhecer de forma detalhada as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais. Neste projeto serão estudadas essas propriedades mecânicas, com recurso a provetes destinados a ensaios laboratoriais, para compreender o seu comportamento quando submetidos a ensaios mecânicos típicos. Em muitas situações, as peças são solicitadas num estado mais complexo de esforços, normalmente com uma conjugação de compressões, trações, impactos e aquecimento. Por essa razão, é relevante um estudo experimental que abranja alguns destes esforços mecânicos de forma a compreender o comportamento do material em diferentes situações.

A base fundamental deste estudo é analisar o comportamento mecânico e térmico em provetes construídos com a tecnologia de FDM em dois materiais, PETG e PETG com Tungstênio. Para tal foi analisada a influência da orientação de construção e a geometria utilizada no comportamento mecânico, com recurso a ensaios de tração, ensaios de compressão, ensaio DSC e ensaio de dureza Shore.

Este documento está organizado em cinco capítulos. O segundo capítulo apresenta o estado de arte, onde é realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o fabrico aditivo, em particular o processo de FDM, bem como a sua aplicabilidade na indústria automóvel, substituindo técnicas e materiais já utilizados pelos estudados neste projeto. O terceiro capítulo consiste no descritivo dos materiais e métodos utilizados, assim como as geometrias dos provetes e a visualização microscópica do filamento depois de extrudido. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e discussão dos mesmos, com enfoque nos subcapítulos referente à influência da decisão na orientação da construção e alteração da

geometria nas propriedades mecânicas. Por fim, o sexto capítulo indica as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado da arte

O fabrico aditivo é uma tecnologia que tem como base CAD (*Computer Aided Design*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*) em que um componente é fabricado camada por camada com base num modelo digital 3D utilizando materiais líquidos ou sólidos. Usar a quantidade exata de materiais para produzir cada camada e remover os materiais desnecessários para obter a forma pretendida torna este processo mais sustentável e económico em comparação com outros processos de produção convencionais.

Existem duas fases fundamentais envolvidas no pré-processamento e pós-processamento da impressão 3D. O pré-processo desta produção começa com a conceção do modelo utilizando um *software* CAD. O ficheiro é depois gravado numa extensão que é lida pelos softwares CAD e CAM, em ficheiro STL (*Standard Triangular Language*). Nesta extensão as superfícies dos objetos são convertidas em malha triangular de modo a aproximar a geometria pretendida. (Avinash Kapil et al., 2024). O *design* pode ser alterado ajustando os algoritmos computacionais para corrigir qualquer medida ou adicionar qualquer parâmetro de tamanho/forma. A próxima etapa envolve dividir o modelo em camadas horizontais e depois converter cada camada em dimensões x e y, utilizando o *software* de GCODE. A impressora define as coordenadas e imprime as camadas, fundindo o material para formar um objeto físico. Em seguida, esses dados controlados por CAD são transferidos para a impressora para estabelecer uma comunicação entre CAD e CAM. A parte CAM da impressora começa então a produzir o objeto final com base nas instruções de *design* enviadas. A fase de pós-processamento pode incluir lixamento, polimento, tingimento, impregnação ou pintura adicional que são feitos para melhorar o acabamento superficial do objeto, seguido pela remoção das bordas de impressão indesejadas. Quando uma peça pretendida não é possível fabricar de uma só vez, várias peças são impressas e depois unidas para formar a peça final (Chakraborty & Biswas, 2019).

2.1.Fused Deposition Modeling

A tecnologia FDM utiliza o material na forma de filamento termoplástico que é aquecido dentro de um bico com temperatura controlada, conectada a uma cabeça de impressão. O filamento termoplástico fundido é extrudido através do bico, camada por camada de acordo com o modelo de design CAD numa plataforma que pode ser aquecida. Este processo é realizado numa impressora igual ou similar à mostrada na Figura 1. Esta tecnologia permite produzir peças homogêneas, duráveis e dimensionalmente estáveis e com bom acabamento superficial. Os materiais utilizados são termoplásticos ou matriz termoplástica como PETG, PLA ou ABS.

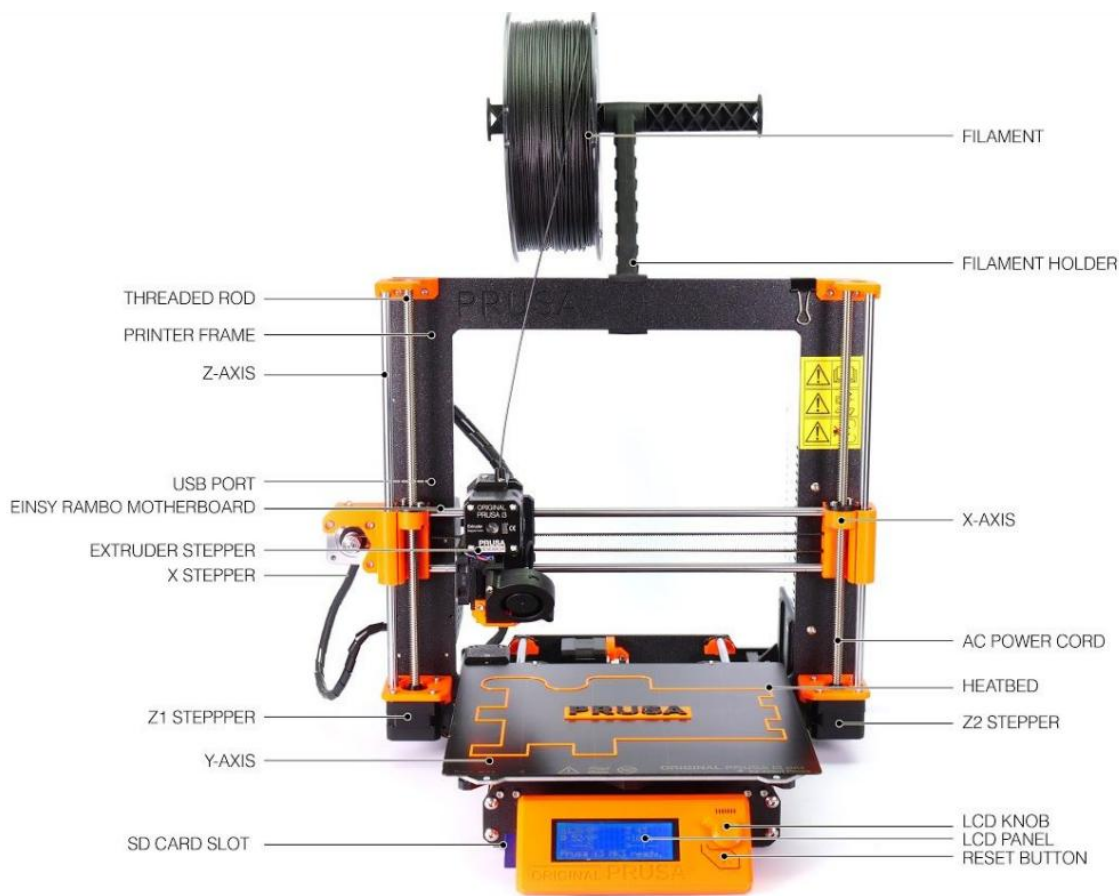


Figura 1 - Impressora 3D Prusa I3 MK3 (Original Prusa I3 MK3S+ | Original Prusa 3D Printers Directly from Josef Prusa, n.d.)

2.2. Materiais utilizados

2.2.1. Materiais utilizados

A utilização de PETG deve-se ao facto de a sua impressão ser muito similar ao ABS (boa resistência à temperatura, duradouro e boa resistência mecânica) e a facilidade de ser impresso como o PLA. Tal como o PLA, este material apresenta boa adesão entre camadas, pouca deformação durante a impressão, resistência a ambientes com temperaturas baixas durante prolongados intervalos de tempo, resistência química (bases e ácidos) e a ausência de cheiro durante a sua impressão (Que é o PETG? (n.d.)).

Hsueh et al., 2021, explorou as diferenças entre as propriedades mecânicas do PLA e PETG, com base em FDM e tecnologia de moldagem por injeção, e os resultados mostraram que o PLA possui maior rigidez e resistência mecânica que o PETG; no entanto, o PETG apresenta melhor resistência à degradação térmica e estabilidade térmica que o PLA. Após o processo de fabrico aditivo, a resistência à tração do PLA e PETG aumentam em 24% e 18%, respetivamente. Concluindo, tudo indica que o PETG terá melhor estabilidade de impressão.

Este artigo relata que o PETG apresenta melhor resistência ao calor que o PLA e, portanto, espera-se que muitos produtores utilizem PETG no futuro, a fim de compensar as desvantagens do PLA.

Os polímeros são essenciais para a vida moderna diariamente. Macromoléculas de grandes cadeias conhecidas como polímeros são compostas de várias unidades com a mesma estrutura que se repetem ao longo de uma cadeia. A reação de contacto que une essas unidades minúsculas e repetidas, conhecidas como monómeros, é a chamada reação de polimerização. Esses monómeros unem-se por meio de ligações de hidrogénio, ligações covalentes, momentos dipolares ou forças de *van der Waals*.

No caso da impressão FDM, o PLA e o ABS têm sido historicamente os dois principais polímeros aos quais os fabricantes recorrem, embora exista agora uma ampla gama de materiais disponíveis. Muitos destes estão a desempenhar papéis críticos no futuro do FDM. No entanto, vão existindo novos polímeros no mercado, fruto de grande pedido da indústria, tais como PET, Nylon, TPU (poliuretano flexível), PC, entre outros.

Escolher o polímero certo é essencial para obter as propriedades corretas para uma peça impressa em 3D, especialmente se a peça for funcional.

Existem vários fatores para determinar o melhor polímero para imprimir, tais como:

Facilidade de impressão: é um dos principais fatores a ter em conta, juntamente com a adesão à base, velocidade máxima de impressão, frequência de peças com falha, precisão do fluxo e facilidade de alimentação na impressora.

Tensão máxima: A tensão máxima que um objeto pode suportar ao ser puxado lentamente.

Alongamento na rutura: A variação entre o comprimento inicial e o comprimento alterado após a quebra de um objeto. A força correspondente a esse momento designa-se por força de rotura. Para determinar a tensão de rotura é necessário realizar a razão entre a força de rotura e a área da secção sujeita a essa força.

Resistência ao impacto: A energia necessária para quebrar um objeto com um impacto repentino.

Adesão de camadas: O quão bem as camadas de material aderem umas às outras.

Resistência ao calor: A temperatura máxima que um objeto pode suportar antes de amolecer ou deformar (FDM 3D printing materials compared, n.d.).

2.2.2. PETG

Utiliza-se o PETG como material de base pois é um polímero termoplástico composto por uma mistura de polímeros feita a partir da combinação de Polietileno Tereftalato Glicol. Este material possui uma combinação de propriedades mecânicas e térmicas que o tornam adequado para uma ampla variedade de aplicações tais como garrafas plásticas, embalagem de alimentos e tampas de sensores à prova de líquidos, entre outras.

Algumas vantagens do PETG são:

- Grande transparência e boa resistência mecânica
- Grande flexibilidade
- Boa dureza superficial
- Boa resistência ao desgaste e a corrosão por agentes oxidantes

Como desvantagens este material apresenta:

- Mais caro que ABS
- Baixa resistência ao calor
- É dificilmente maquinável
- Sensível à humidade e poeira, podendo alterar as suas propriedades químicas

2.2.3. PETG com tungstênio

Como já referido, este projeto tem como objetivo avaliar e estudar as propriedades mecânicas resultantes da adição de tungstênio no PETG, com o intuito de perceber quais as vantagens e desvantagens da adição do mesmo.

Algumas vantagens do PETG com tungstênio comparando com PETG puro são:

- Aumento da densidade
- Aumento da rigidez
- Melhor acabamento superficial

Como desvantagens este material apresenta:

- Desgaste do bico de impressão quando impresso
- Redução da flexibilidade face ao PETG puro
- Custo elevando comparando com PETG puro

2.3. Parâmetros de impressão

A utilização de parâmetros corretos em FDM resulta em melhores características mecânicas nas peças impressas. Cada material necessita que a velocidade de impressão, temperatura do extrusor e da mesa sejam as mais adequadas tendo em consideração o diâmetro do filamento. Existindo uma grande variedade de materiais possíveis de serem utilizados em FDM, será colocado o foco nas alterações destes parâmetros nas características mecânicas e físicas apenas no PETG.

Segundo Prithu Mishra R et al, 2023, os parâmetros de impressão afetam a ligação das camadas depositadas e, portanto, exercem uma influência considerável na eficiência da produção, energia consumida, custo e tempo de fabricação, características de construção da peça, como desvios dimensionais, acabamento e resistência da peça. Portanto, um estudo sobre a influência desses parâmetros e a sua otimização é de grande importância de modo a enfrentar o problema de reduzir os erros dimensionais e obter elevada qualidade superficial.

Neste processo, o calor transportado pelo material extrudido é dissipado através de condução e convecção forçada à medida que o material arrefece da temperatura de extrusão para a temperatura de transição vítrea. A redução da temperatura, como consequência deste fenômeno, força o material a solidificar rapidamente nas camadas previamente depositadas. O calor irradiado do material recém-extrudido provoca a refusão localizada do material previamente solidificado, levando à ligação entre as camadas depositadas. Esta sequência de ciclos rápidos de arrefecimento e aquecimento resulta na criação de gradientes térmicos não uniformes dentro do material depositado provocando distorção dimensional ou empenos. É necessário que a temperatura de extrusão esteja de acordo com o material a ser utilizado e o diâmetro do filamento, de modo a minimizar a refusão das camadas já arrefecidas e por consequência o empeno das peças.

A velocidade de impressão é outro parâmetro significativo. O aumento do efeito dinâmico do sistema de movimento do bico em velocidades de impressão mais altas dá origem a um movimento brusco do bico. O movimento brusco inibe a capacidade do bico de depositar camadas precisas contribuindo para erros dimensionais no plano XY. Quanto mais alta for a velocidade de impressão, mais é notado o erro pois o filamento extrudido não adere as camadas previamente depositadas, mas move-se com o bico devido ao tempo insuficiente disponível para se fundir com camadas depositadas. Assim, para maior precisão dimensional, velocidades de impressão mais baixas são recomendadas.

Prithu Mishra R et al, 2023, concluiu que a espessura da camada e diâmetro do filamento são parâmetros significativos. Em valores mais baixos de espessura da camada, a precisão dimensional melhorou à medida que o número de camadas necessárias para imprimir a peça aumentou, limitando ainda mais a configuração de gradientes térmicos não uniformes dentro do material depositado enquanto a diminuição do diâmetro do filamento permitiu a deposição mais precisa. A tendência foi atribuída a duas razões principais. Primeiramente, diâmetros do filamento mais pequenos garantiram que menos quantidade de calor entrasse no ambiente do sistema, levando a reduzir a acumulação de tensão térmica na interface durante a solidificação do material recém-depositado na camada anterior. A velocidade de impressão também foi considerada um parâmetro significativo para erros dimensionais introduzidos ao longo do comprimento, largura e espessura das peças construídas. Valores mais baixos de velocidade de impressão levaram a uma melhor precisão dimensional devido ao diminuto movimento do sistema do bico de extrusão.

Analisando a velocidade de impressão, o estudo de Mohammed Algarni et al, 2021, afirma que este parâmetro tem importância nas capacidades mecânicas das peças. Foram estudadas duas velocidades de impressão, 35mm/s e 45mm/s. Para tal foram utilizadas temperaturas de extrusão de 230-250°C e temperatura da mesa de 60-80°C. Concluiu-se com este estudo que o aumento da velocidade de impressão diminui ligeiramente a resistência à tração, resistência à flexão, mas aumenta ligeiramente a dureza (em Brinell). Outros estudos citados neste estudo indicam também estes resultados, afirmando que existe diminuição da resistência à tração e flexão à medida que a velocidade de impressão aumenta, independentemente da espessura da camada e que o módulo de Young é pouco afetado pela velocidade de impressão. As maiores resistências mecânicas foram alcançadas na velocidade de impressão mais baixa, devido principalmente às altas velocidades de impressão que não permitem existir tempo suficiente para a adesão do filamento às camadas anteriores, especialmente para peças pequenas.

No estudo de Michał Bembenek et al, 2022, realizaram-se testes com o objetivo de entender qual a influência da temperatura de extrusão na resistência à tração. Foi realizado este estudo com algumas temperaturas diferentes (210°C, 220°C, 230°C, 240°C e 250°C). Foi observado que existe um aumento considerável da resistência à tração com o aumento da temperatura, indicando que quanto mais perto a temperatura de extrusão estudada é da indicada pelo fabricante, melhor são os resultados obtidos.

A utilização de um padrão específico para a construção do preenchimento interno (*infill*) é importante pois a resistência mecânica das peças depende deste. Como estudado por Mohammadreza Lalegani Dezaki et al, 2020, utilizando um padrão de preenchimento ótimo é possível atingir a maior resistência usando o menor material possível. Foi concluído que aumentando a percentagem de preenchimento, as propriedades mecânicas das peças também aumentavam, existindo uma relação entre as propriedades e o *infill*. Existem vários padrões válidos, no entanto Miguel Vicente et al, 2016, afirma que os vários padrões estudados neste estudo causaram variações de apenas 5% na tensão máximas das peças, sendo a percentagem de preenchimento o fator mais importante para esta característica.

2.4. Aplicabilidade na indústria automóvel

A aplicabilidade dos resultados do presente estudo é importante pelo que, no presente capítulo são apresentadas algumas aplicações no sector automóvel, tendo por base estudos já realizados e identificados na pesquisa bibliográfica, bem como, o conhecimento adquirido do curso de Mestrado.

2.4.1. Coletor de admissão

Tendo por base o estudo desenvolvido por Ilardo, R et al, 2010, foi analisada a utilização de fabrico aditivo para a construção de um coletor de admissão, bem como a utilização de PETG com tungstênio tendo em vista a sua utilização na construção do mesmo.

Os coletores de admissão (Figura 2) são usados com o objetivo de distribuir a mistura ar-combustível para cada um dos cilindros de um motor de combustão. Constituem um componente crucial para aumentar o desempenho e a eficiência do motor, reduzindo poluentes e o consumo de combustível. Tanto o comprimento dos canais dos coletores de admissão, bem como os componentes, como válvulas de turbulência e válvulas de inversão de fluxo têm influência no nível de eficiência geral de um motor de combustão.

Tipicamente estas peças são construídas utilizando alumínio moldado e soldado, pois este material confere boa resistência à temperatura para as condições normais de funcionamento de um veículo de combustão e é de relativa facilidade de construção, devido à menor limitação de produção destes componentes por fabrico aditivo.

De modo a melhorar a eficiência do motor foi necessário recriar a geometria do coletor de admissão. A utilização de fabrico aditivo foi a solução utilizada por permitir o fabrico de geometrias complexas com bom acabamento superficial, bem como a capacidade de obter peças com reduzido peso, o que torna economicamente viável o processo.

Neste estudo foi utilizado como material base para a construção em FDM o ABS reforçado com fibra de carbono e resina de alta resistência. As características base do ABS e de PETG são semelhantes pelo que é uma opção viável a substituição do material base (ABS). O reforço utilizado seria o tungstênio devido à sua grande resistência à temperatura, superior ao material tradicionalmente utilizado, alumínio, e baixa densidade permitindo que a peça seja mais leve e compacta. O acabamento superficial é muito importante para não existir resistência à passagem da mistura ar-combustível, forçando a passagem do mesmo e comprometendo o rendimento do motor, pelo que a utilização da técnica de FDM e do material PETG com tungstênio culmina num bom acabamento superficial para o componente em estudo.



Figura 2 - coletor de admissão completo, Ilardo, R et al, 2010

2.4.2. Caixa do termóstato

O termóstato tem como função monitorizar a manutenção da temperatura de funcionamento mínima no motor de combustão. Quando o motor arranca, a mistura de anticongelante e refrigerante mantém-se dentro do motor pelo termóstato. Este ao alcançar

uma temperatura específica, normalmente 90°C, dilata a mola de pressão fazendo fluir líquido refrigerante, através do radiador, arrefecendo o mesmo e mantendo o motor numa temperatura próxima da temperatura ideal de funcionamento. De modo a ser possível o seu funcionamento, o termóstato encontra-se dentro de um compartimento construído em alumínio ou fibra de vidro reforçada com plástico (FRP - *Fiber Reinforced Polymer*). O FRP é utilizado como material de construção devido a sua boa estabilidade térmica, resistência á fadiga, baixo custo e fácil produção.

A substituição de FRP por PETG puro não seria viável devido à baixa resistência à temperatura, entre 70° a 80°C, que este polímero confere. No entanto é uma opção a considerar por ter tipicamente melhor resistência à fadiga e menor densidade comparando com FRP. De modo a ser possível a utilização de PETG, este terá de ser reforçado com tungstênio pois permite manter as boas características mecânicas do PETG e reforçar a resistência ao impacto e à temperatura, tendo o aumento da densidade e dos custos como pontos negativos.

3. Métodos

A Figura 3 representa o fluxograma com os passos gerais deste trabalho para ser possível analisar de forma mais sucinta os métodos base. Iniciou-se este trabalho pesquisando sobre o processo de FDM, métodos e materiais possíveis de serem utilizados. Após esta pesquisa inicial foram pensados os testes que seriam relevantes serem feitos bem como as aplicabilidades deste processo para a indústria automóvel. Antes de se iniciar os testes mecânicos e químicos, foi estudada a uniformidade de extrusão do material, de forma a determinar os melhores parâmetros de impressão para o PETG puro. Foram realizados todos os testes de acordo com as pesquisas feitas e de acordo com o material utilizado. Por fim foram analisados e discutidos os resultados obtidos e pensados os futuros passos a serem dados de forma a complementar o trabalho realizado.

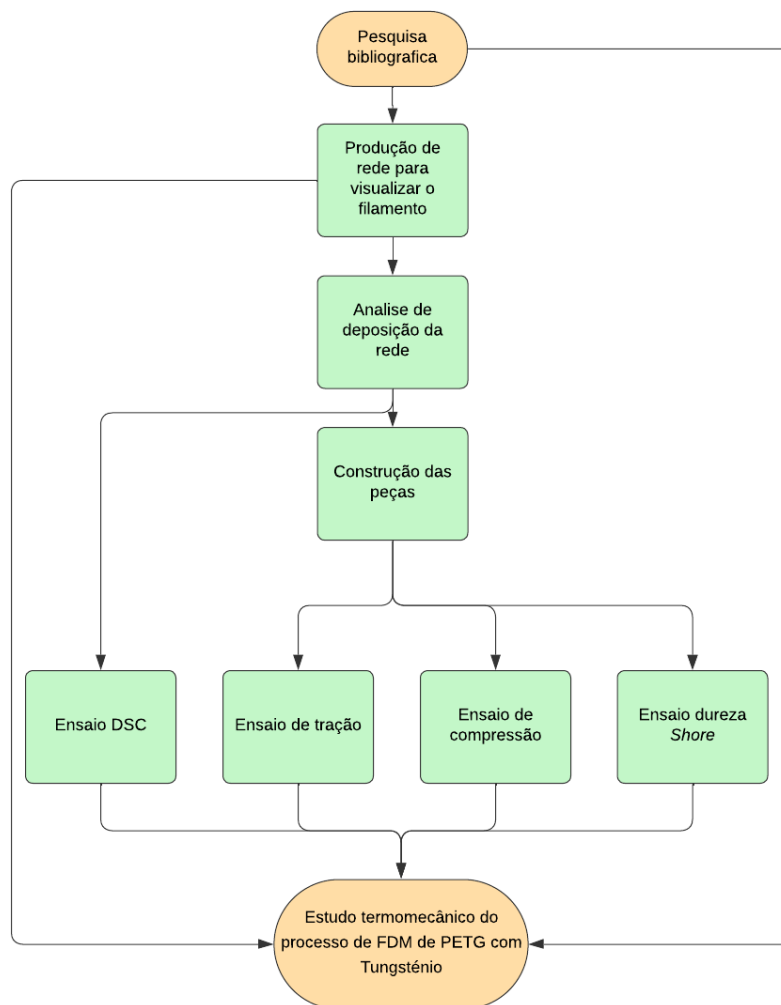


Figura 3 – Fluxograma

3.1. Metodologia

Para a realização de todos os ensaios previstos foi necessário fabricar provetes de acordo com esses ensaios. Todos os provetes seguem as normas que regem os respetivos ensaios, pelo que, neste capítulo, serão mostradas as dimensões dos mesmos.

3.1.1. Caracterização térmica e mecânica

3.1.1.1 Ensaio DSC

A calorimetria diferencial de varrimento (DSC) está inserida numa análise mais geral, designada por análise térmica diferencial (DTA). A DTA consiste na variação de temperatura entre a amostra a analisar e uma substância de referência, selecionada para que esta não sofra transformações térmicas na gama de temperaturas em estudo e segundo uma temperatura controlada e atmosfera inerte, redutora ou oxidante (vácuo, argón, hélio, ar ou ar+H₂). O resultado de uma análise DTA é uma curva térmica que representa o diferencial de temperatura em função da temperatura (ou tempo), na qual se registam os fenómenos energéticos desenvolvidos durante o processo de variação de temperatura imposto à amostra.

A calorimetria diferencial de varrimento (DSC) é uma variante mais precisa da técnica de DTA, na qual se mede diretamente a quantidade de energia calorífica (fluxo de calor) trocada entre a amostra e o meio ambiente em comparação com um material de referência e associado a transições nos materiais em função da variação de temperatura. A DSC permite a determinação de parâmetros que não são possíveis de obter através de DTA.

Um material ao ser submetido a variações de temperatura sofre diversas transformações, podendo estas traduzir variações importantes de algumas das suas propriedades físico-químicas. Estas variações são particularmente importantes na vizinhança das temperaturas de transição ou de mudança de estado e são características da estrutura e composição química de cada material, fornecendo dados valiosos da intensidade das transformações sofridas, mas também sobre a estabilidade térmica e a composição química ou a constituição estrutural desse material. (Instituto Pedro Nunes, n.d.)

A realização deste ensaio foi feita no equipamento *Setaram dsc 131*, presente no Laboratório de Materiais do Instituto Politécnico de Leiria (Figura 4).



Figura 4 - Equipamento Setaram DSC 131

3.1.1.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma carga progressiva uniaxial de tração nas extremidades da amostra a ensaiar, podendo esta ser levada até à rutura, enquanto em simultâneo é registada a deformação longitudinal do material. Este processo é utilizado para caracterização de propriedades mecânicas de materiais metálicos e poliméricos, e permite obter a curva tensão/deformação revelando o comportamento do material durante as várias fases do ensaio. Os dados obtidos permitem avaliar múltiplos dados sobre os materiais, nomeadamente: tensão máxima, módulo de elasticidade, percentagem de extensão total na máxima força, percentagem de alongamento após fratura (determinado manualmente), percentagem de redução de área, entre outros (Instituto Pedro Nunes, n.d.).

Os provetes utilizados neste ensaio seguem a norma ISO 527-2 e são do tipo 1B (Figura 5)

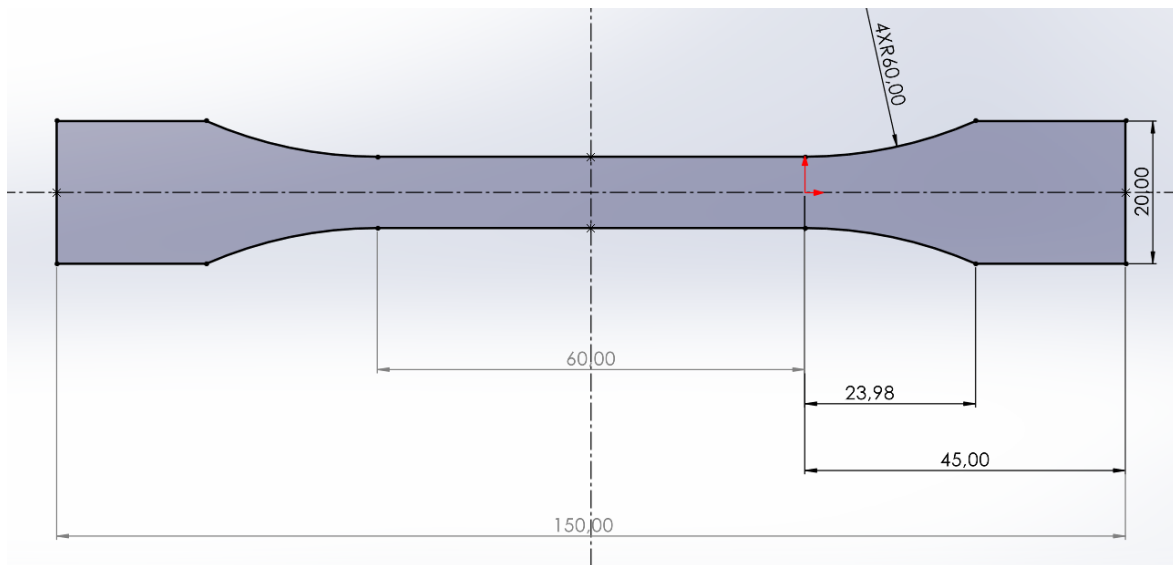


Figura 5 - Provetes de tração

Os provetes foram modelados utilizando o software *Solidworks*, tendo as dimensões apresentadas na Figura 5 e uma espessura de 4mm.

A realização deste ensaio bem como o ensaio de compressão, foram feitos na máquina *Zwick Z100* (Figura 6), presente no laboratório de Materiais do Instituto Politécnico de Leiria.

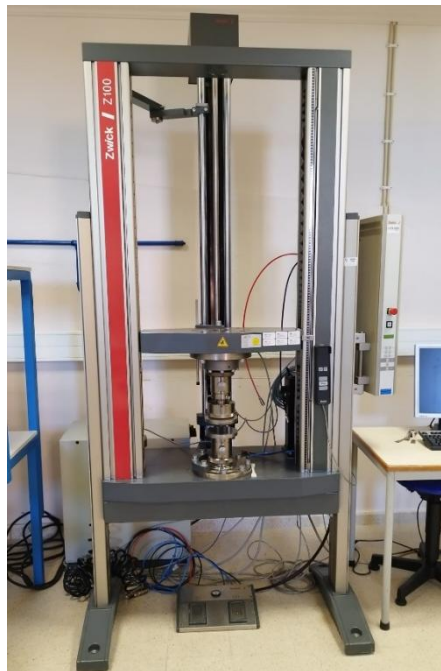


Figura 6 - Máquina Zwick Z100

3.1.1.3 Ensaio de compressão

O teste de compressão é realizado comprimindo axialmente uma amostra cilíndrica sólida entre duas placas paralelas planas e a curva característica deste ensaio é determinada pela combinação dos valores experimentais de força e deslocamento que são medidos por meio de sensores. A construção da curva é influenciada pela qualidade destas medições e pelas condições gerais de atrito na interface de contato entre a amostra e as placas. Imprecisões nas medições de força influenciam a estimativa das tensões enquanto nos valores de deslocamento influenciam tanto as tensões quanto as deformações. O atrito impede que as superfícies superior e inferior se expandam livremente e adiciona força extra que cria dificuldades na construção de uma curva de fluxo com dados que são verdadeira e exclusivamente indicativos da resposta tensão-deformação do material (Alves et al., 2011).

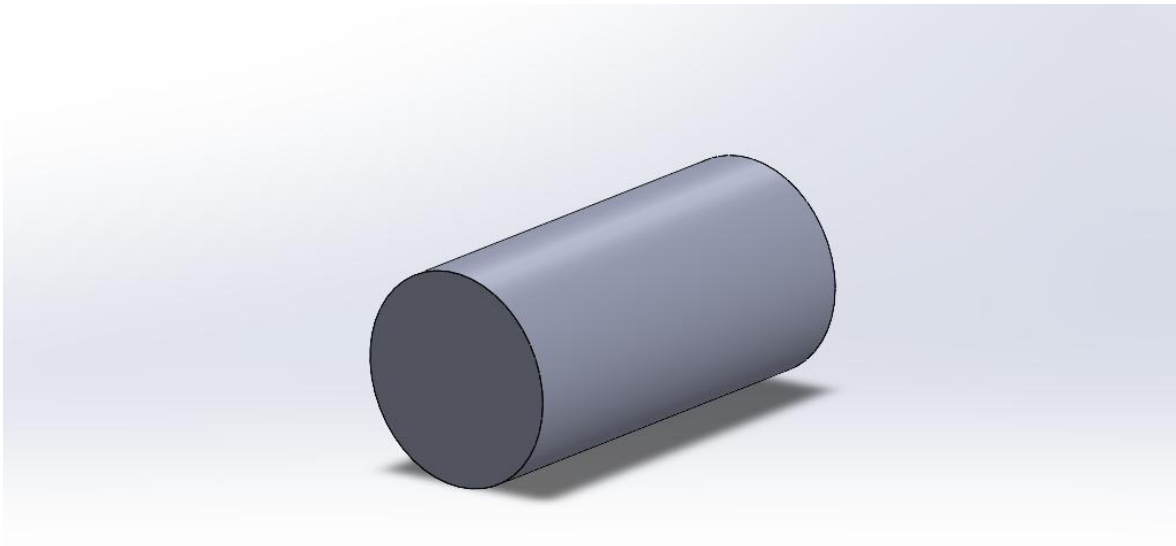


Figura 7 - Provete de compressão cilíndrico

Um dos provetes utilizados no ensaio de compressão é o que está apresentado na Figura 7. Este cilindro tem 25.45mm de comprimento por 12.60mm de diâmetro e uma área de contacto de 320.67mm²

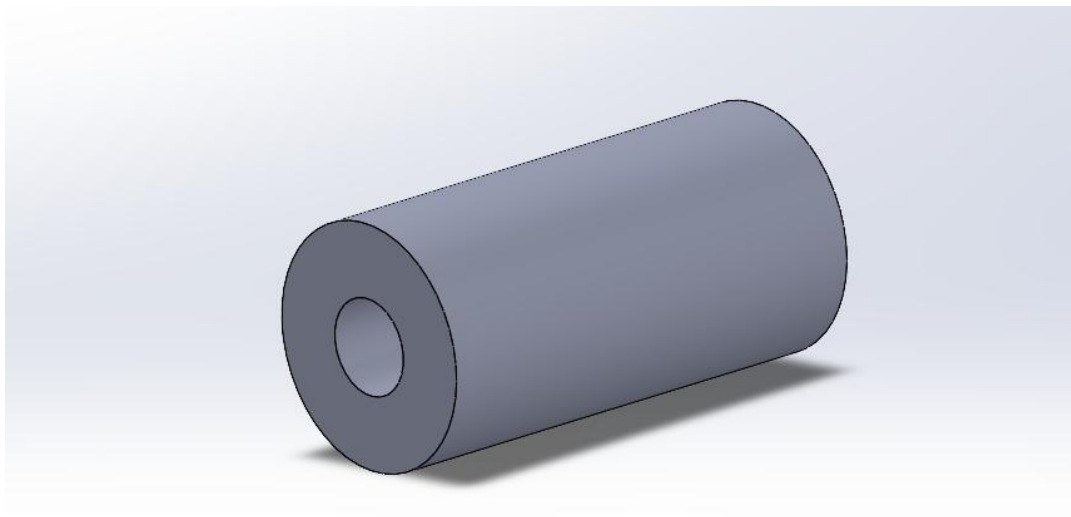


Figura 8 - Provete de compressão tubular

O outro provete utilizado no ensaio de compressão é um tubo de dimensões 13.70mm de diâmetro por 25.55mm de comprimento e área de contacto de 350.035mm^2 , apresentado na Figura 8. Ambos os provetes (cilíndrico e tubular) foram construídos na posição horizontal e na vertical fase à mesa de construção, de modo a ser possível determinar as diferenças das propriedades mecânicas entre as duas formas de construção. A utilização de 2 tipos de provetes é explicada pelo facto de as tensões aplicadas no provete totalmente preenchido serem distribuídas apenas por 2 superfícies, enquanto no provete tubular, as tensões são distribuídas por 4 superfícies, as exteriores e as interiores. Ambos os provetes têm a mesma área de secção resistente de modo a ser possível comparar os resultados obtidos.

3.1.1.4 Ensaio de dureza Shore

A dureza Shore é um ensaio que avalia a dureza superficial de polímeros ou elastómeros. Este ensaio mede a resistência do material de acordo com a penetração de uma agulha de um durómetro a partir de uma força definida, avaliando a resistência relativa, a qual varia com o tempo, principalmente porque os materiais utilizados neste tipo de ensaio têm uma grande resiliência e, portanto, uma grande capacidade para absorver a energia e de se adaptar à deformação (Instituto Pedro Nunes, n.d.).

O provete utilizado para este ensaio é uma placa quadrangular de 80mm de lado e 4mm de espessura. Para verificar se existe alguma relação entre a estratégia de construção e a dureza, entendeu-se utilizar 2 tipos de estratégias de construção distintas. Uma das placas foi contruída com uma estratégia linear onde a máquina preenche o interior da placa com um ângulo de 45° em relação à lateral da placa. A outra estratégia implementada foi o preenchimento ser realizado paralelo a 2 dos lados. As duas estratégias usaram o preenchimento de forma linear e em *aligned rectilinear*. Da mesma forma, foi também considerada a orientação de construção das placas, isto é, 2 das placas (cada uma com as estratégias acima referidas) foram construídas horizontalmente enquanto outras 2 foram contruídas verticalmente. Foi utilizada esta estratégia para que fosse possível comprar resultados sobre a orientação de construção.

A realização deste ensaio foi feita no durómetro presente no laboratório de Materiais do Instituto Politécnico de Leiria (Figura 9).



Figura 9 - Durómetro utilizado no teste

3.2. Visualização do filamento

De modo a obter a melhor qualidade possível das peças, é necessário que o material que as compõem, o filamento, seja extrudido o mais uniformemente possível. Para entender se este processo é uniforme foi realizada uma impressão de filamento de PETG em forma de grelha, de apenas uma camada, para que fosse possível tirar fotografias microscópicas do mesmo para se apurar a uniformidade da impressão realizada.

De acordo com pesquisa efetuada e dos dados fornecidos pelo fabricante do filamento, foram utilizados na impressão os parâmetros indicados na Tabela 1

Tabela 1 - Parâmetros de impressão

	PETG	PETG+W
<i>Infill</i>	100%	100%
<i>Temperatura de extrusão 1ª camada</i>	230	260
<i>Temperatura de extrusão outras camadas</i>	240	260
<i>Temperatura da mesa 1ª camada</i>	85	85
<i>Temperatura da mesa outras camadas</i>	90	85

O padrão utilizado neste trabalho foi o *Aligned Rectilinear*. Este padrão é construído por linhas de filamento paralelas em cada camada, sem alternância de ângulos. As camadas têm linhas retas que seguem o mesmo alinhamento de direção, dando a aparência de uma grade reticulada contínua e alinhada em cada camada.

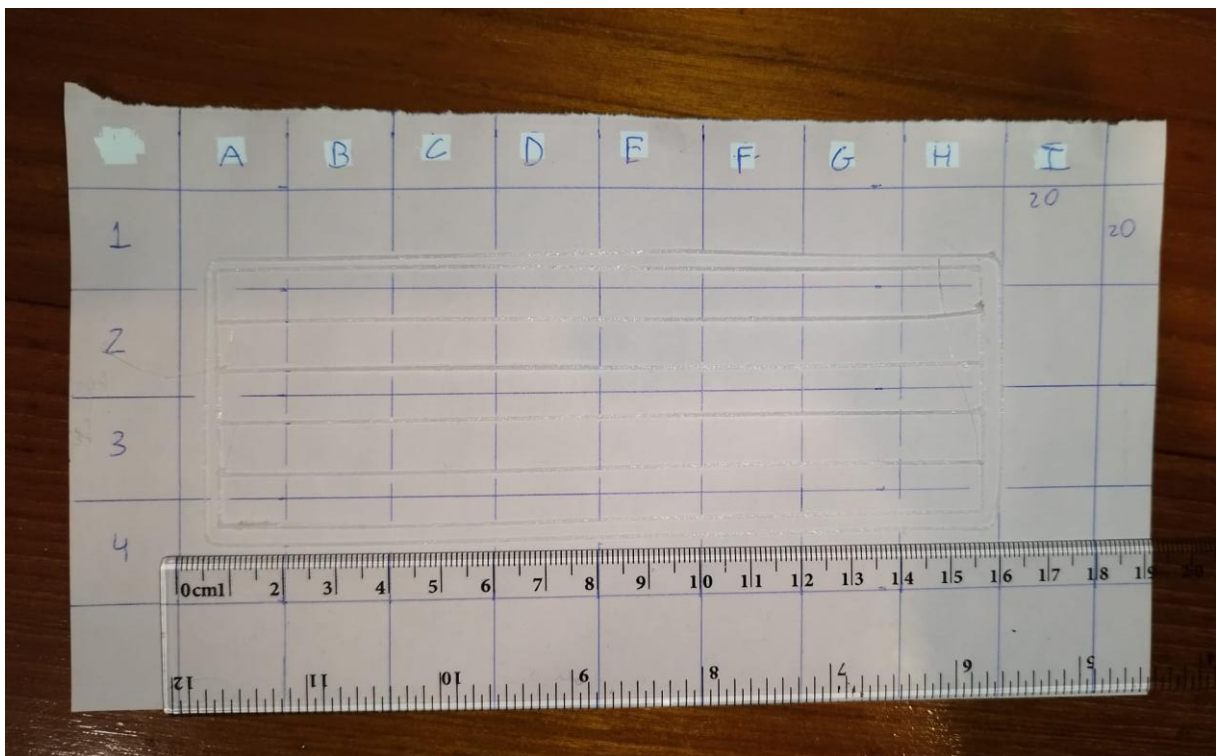


Figura 10 - Impressão do filamento em estilo grelha

Após a impressão realizada foi criada uma grelha de 20x20mm (Figura 10) para ser possível criar áreas onde fosse possível fotografar o filamento. O filamento foi fotografado usando a máquina de testes de dureza, *Envisiontec*, equipada com uma lente de 20.

4. Resultados e discussões

Este capítulo apresenta e discute os resultados para os diferentes ensaios realizados, referidos nos capítulos anteriores.

4.1. Visualização do filamento

Foram tiradas 18 fotografias na escala dos micrómetros, e através dessas imagens foi possível calcular o diâmetro do filamento em 3 pontos da mesma imagem. Após estes dados serem adquiridos foram processados para calcular a média dos mesmos em cada imagem, bem como o respetivo desvio padrão. Foi usado o filamento de PETG puro.

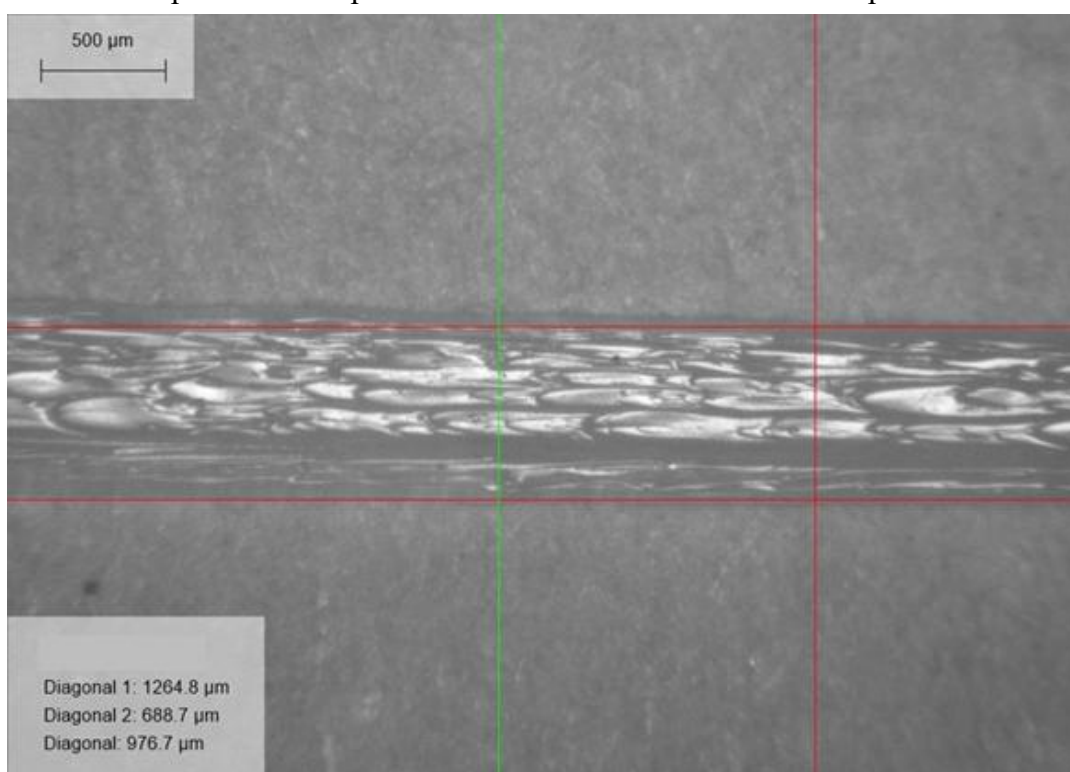


Figura 11 - Fotografia microscópica do filamento

Como é possível ver na Figura 11, o filamento não foi impresso de forma uniforme. Nesta figura apresenta-se o filamento em que o desvio entre o ponto mais estreito e o mais largo do diâmetro do filamento é maior. A não uniformidade da impressão do filamento pode ser causada por vários fatores, como a variação da temperatura de extrusão do filamento ou da temperatura da mesa, a adesão do filamento ao bico de extrusão, causando aglomeração de material que numa primeira fase deixa o filamento extrudido muito estreito e depois todo o material a mais no bico é extrudido causando sobreposição de material na peça.

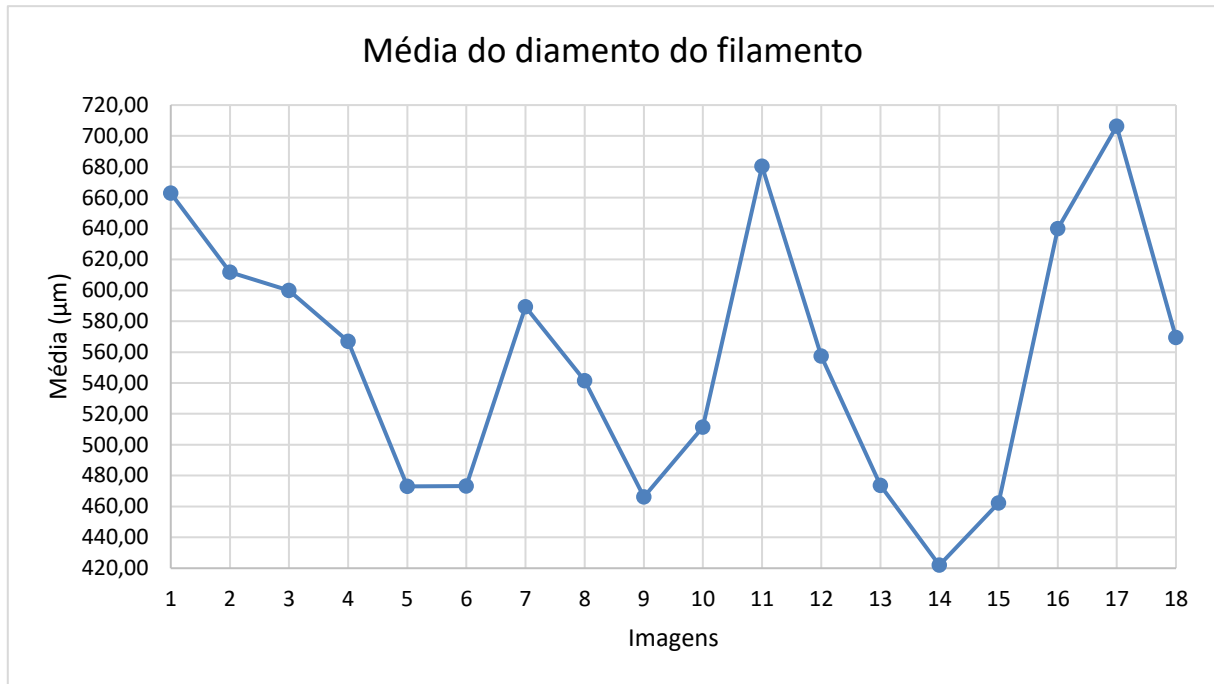


Figura 12 - Espessura do filamento por fotografia

O filamento utilizado tem 0.6mm (600µm) de diâmetro e analisando o gráfico das médias de diâmetros do filamento extrudido é possível ver que o desvio sobre esse valor na maioria da impressão foi baixo. Na Figura 12 retira-se que na fotografia 3, a média do diâmetro foi exatamente a medida do diâmetro do filamento não extrudido. No entanto, na imagem 17 existiu um problema de sobreposição do material, isto é, o diâmetro médio nesta zona do filamento foi superior ao diâmetro do filamento antes de ser extrudido, resultando numa média do filamento extrudido muito acima do diâmetro do filamento não extrudido, com 706.30µm.

4.2. Ensaio DSC

O ensaio de DSC foi realizado com duas amostras, uma de PETG com 27.3mg de material e outra com 91.4mg de PETG com tungsténio de modo a perceber se existe alguma alteração no comportamento químico do material (Figura 13). Foi realizado apenas um ensaio para cada material.

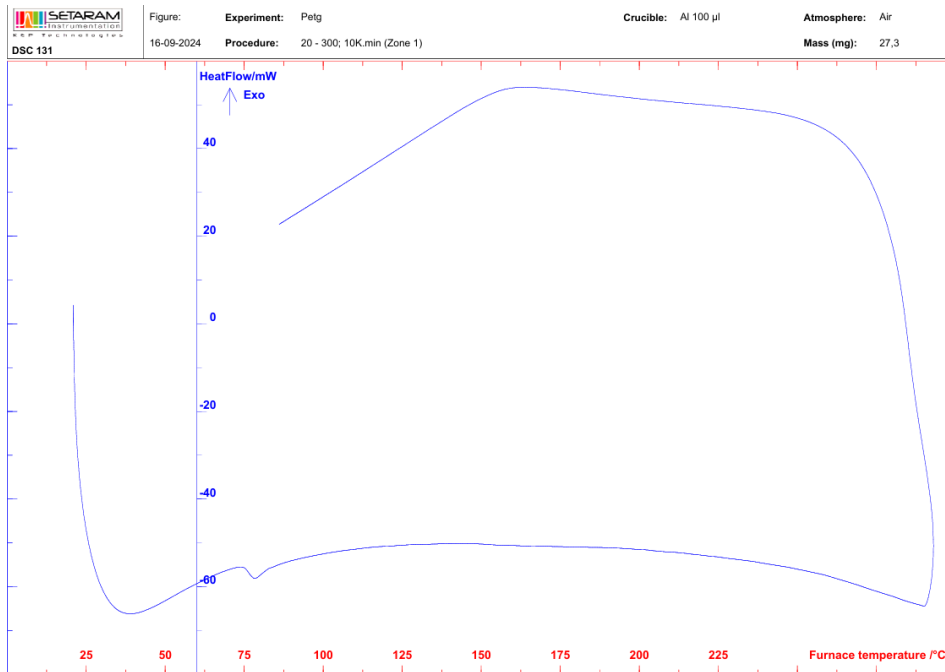


Figura 13 - Ensaio DSC PETG

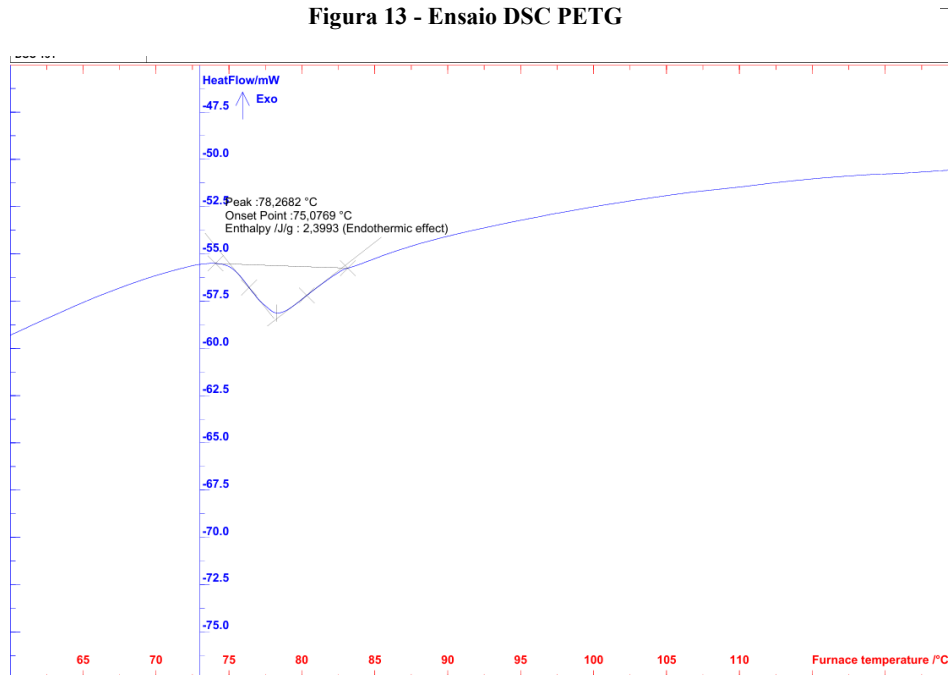


Figura 14 - Zoom Transição vítrea PETG

A Figura 14 é a ampliação da Figura 13 na zona de alteração de estado físico do material. Analisando esta figura, nota-se uma alteração no processo de aquecimento da amostra de PETG. Esta anomalia indica a transição vítrea do material. A transição vítrea, típica de materiais amorfos, é o início de alteração do estado sólido para o estado líquido, sendo que nesta fase o material se encontra num estado ultra-viscoso. No caso deste ensaio, a temperatura de transição vítrea (T_{g1}) ocorreu aos 75,08°C. De notar também que este processo é endotérmico, isto é, liberta energia. Esta energia foi dissipada sob a forma de calor, o que explica a diminuição da temperatura do material após a transição

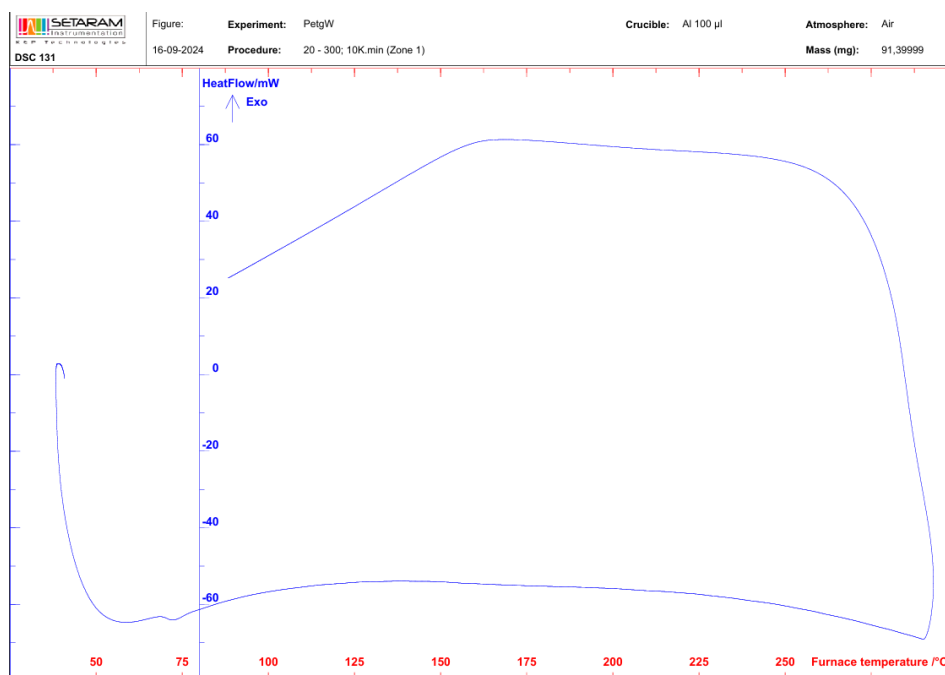


Figura 15 - Ensaio DSC PETG+W

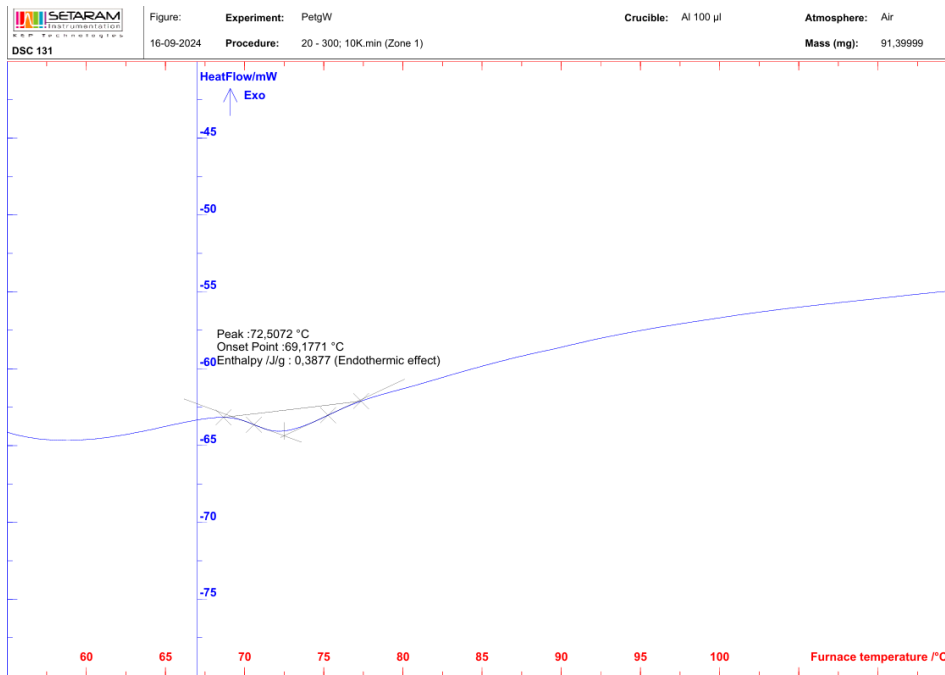


Figura 16 - Zoom Transição vítrea PETG+W

A Figura 16 é a ampliação da Figura 15 na zona de alteração de estado físico do material. Analisando esta figura, nota-se uma alteração no processo de aquecimento da amostra de PETG+W. No caso deste ensaio a temperatura de transição vítrea (T_{g2}) ocorreu aos 69,18°C.

Comparando os dois ensaios conclui-se que o PETG+W tem a temperatura de transição mais baixa, o que indica uma alteração intrínseca do material. A diferença entre T_{g1} e T_{g2} é 7.8% e é consequência da adição de tungsténio na matriz de PETG. Esta adição desorganizou a matriz polimérica alterando as suas propriedades, criando assim, em termos químicos, um novo material com características semelhantes ao PETG puro

A adição de tungsténio na matriz polimérica alterou também o comportamento do fluxo de calor, que diminuiu de -56 mW para -64mW, cerca de 14.3%, o que indica menor estabilidade térmica.

Conclui-se então que a adição de tungsténio na matriz de PETG não altera significativamente a T_g , indicando que para o seu uso em aplicações que impliquem grandes diferenças de temperatura não existe necessidade desta adição. Situação diferente quando se analisa a capacidade de fluxo de calor, onde a adição de tungsténio altera esta capacidade diminuindo a estabilidade térmica do PETG e, portanto, não será aconselhável o seu uso nestas condições comparando com uma peça fabricada com PETG puro.

4.3. Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em três provetes de cada material em estudo, PETG e PETG + Tungstênio. As figuras seguintes mostram o comportamento de cada ensaio feito compilados de forma a facilitar a sua análise.

A utilização de gráficos Tensão-deformação permite o cálculo do módulo de elasticidade de cada peça testada. O módulo de elasticidade é a relação entre a tensão aplicada numa determinada peça e a sua deformação quando submetido a essa tensão no regime elástico, sendo, neste caso, o método mais adequado para a comparação entre a matriz de PETG e PETG + W.

A máquina utilizada foi a Zwick z100, com uma célula de carga usada para a realização destes testes de 10KN.

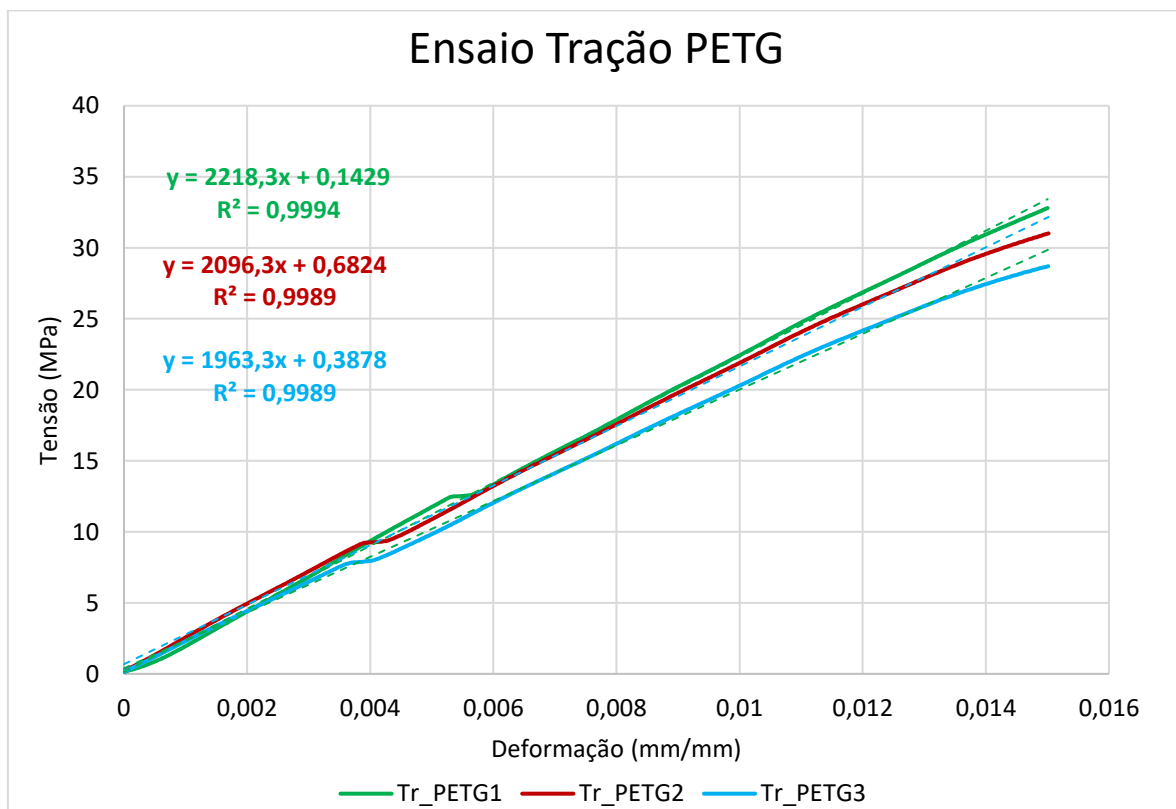


Figura 17 - Ensaio de tração do filamento PETG

Pela análise da Figura 17, nomeadamente as equações de regressão linear, conclui-se que o módulo de elasticidade longitudinal experimental calculado através dos ensaios de tração, varia de acordo com a peça estudada. Existe aproximadamente 255MPa de diferença,

cerca de 13%, entre o valor superior e o inferior. Este valor não é significativo pois a variação é muito pequena comparando com os valores globais. A média do módulo de elasticidade longitudinal é $E_1=2092.63$ MPa.

O comportamento dos provetes entre 0,003 e 0.005 mm/mm é normal em provetes construídos em FDM quando sujeitos a ensaios de tração. A alteração do declive em cada ensaio (modulo de elasticidade longitudinal) deve-se ao facto de existir rotura em alguns filamentos dos provetes alterando a sua resistência e como tal, alterando momentaneamente o modulo de elasticidade.

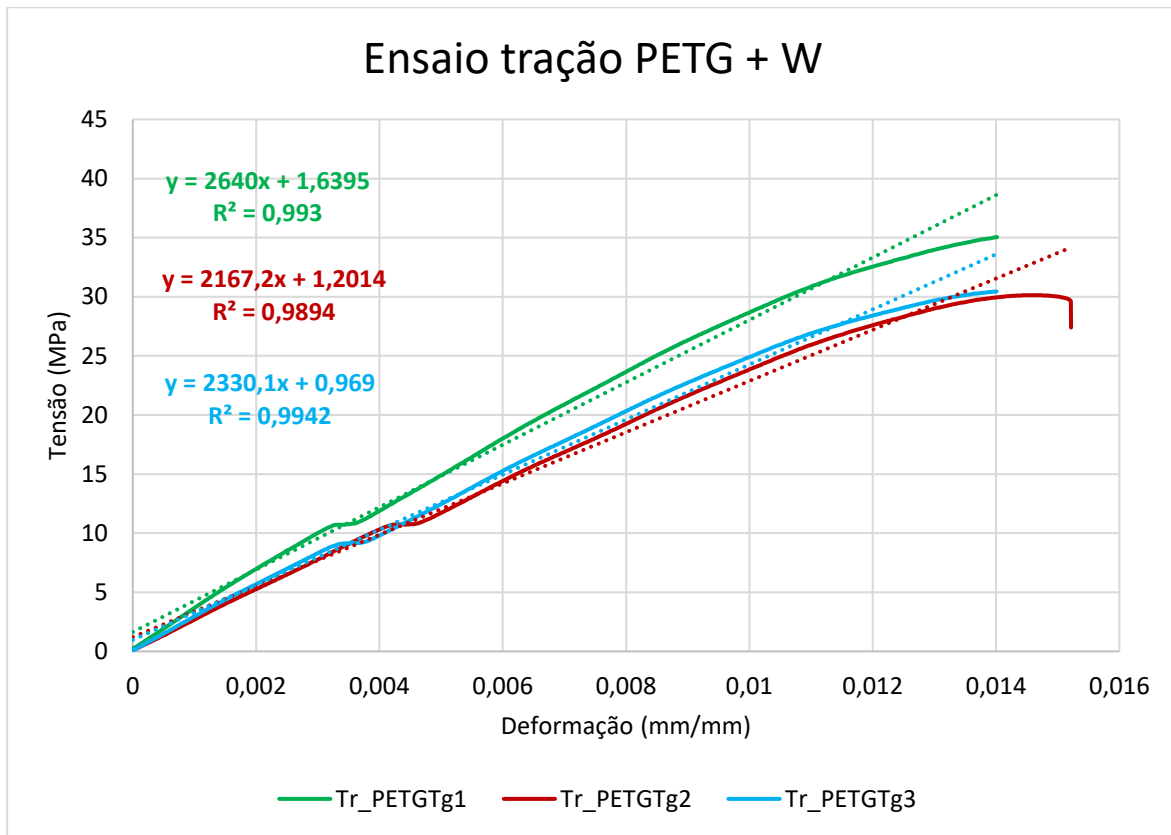


Figura 18 - Ensaio de tração do filamento PETG + Tungsténio

Com a adição de tungsténio na matriz de PETG, regista-se um aumento do módulo de elasticidade na generalidade das peças estudadas, comparando com a matriz de PETG puro, sendo a média do mesmo de $E_2= 2379,1$ MPa. Tal como visualizado no ensaio com a matriz de PETG puro, neste ensaio no intervalo de 0.003 a 0.005 mm/mm, existe a rotura de alguns filamentos do provete, comportamento típico de peças construídas em FDM quando sujeitos em ensaios de tração.

O comportamento das peças de PETG+W é muito semelhante às peças com a matriz de PETG puro. Analisando a Figura 17 e Figura 18, verifica-se que, para as mesmas condições, a adição de tungsténio altera as propriedades mecânicas da peça, visto que, com a matriz de PETG puro, o alongamento estende-se para além de 0.014mm/mm, comparando com a matriz de PETG+W, onde existe rutura logo após 0.014mm/mm. Analisando as médias das tensões calculadas, é possível entender que as peças constituídas por PETG+W possuem maior módulo de elasticidade, aumento este cerca de 13%.

Conclui-se que a adição de Tungsténio na matriz polimérica aumenta a resistência à tração em 13%, e pode-se afirmar que o alongamento máximo dos provetes é comprometido, isto é, a adição de tungsténio na matriz polimérica reduz as características elásticas típicas destes materiais. Esta diferenciação deve-se ao facto de o metal apresentar menor capacidade elástica.

4.4. Ensaios de compressão

O ensaio de compressão foi realizado em doze provete, com 2 geometria e 2 estratégias de construção diferentes, como explicado no capítulo 3.1.1.2 Ensaio de compressão.

Pela equação seguinte determina-se que o módulo de elasticidade (E), o qual depende diretamente da razão entre a tensão (σ) e a deformação (ϵ).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Interpretando a equação acima, é possível explicar que os declives das retas correspondem ao módulo de elasticidade longitudinal de cada ensaio realizado.

Normalmente, a apresentação do módulo de elasticidade é feita nas unidade de GPa, no entanto, como os valores experimentais observados não possuem grande variação, decidiu-se que essa apresentação será feita em MPa.

Os gráficos seguintes mostram o comportamento de cada ensaio feito compilados por geometrias de forma a facilitar a sua análise.

4.4.1. Geometria tubular vertical

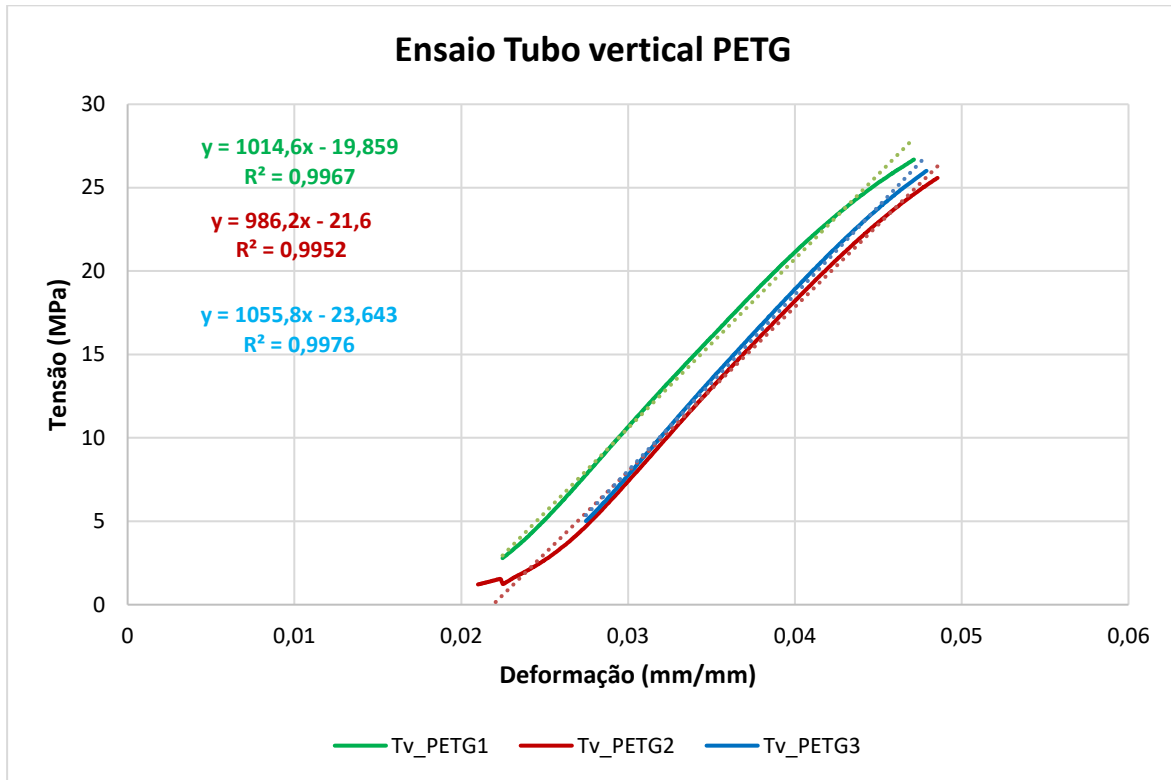


Figura 19 - Ensaio de compressão no filamento PETG em tubo vertical

Pela análise da Figura 19, nomeadamente as equações de regressão linear, conclui-se que o módulo de elasticidade longitudinal experimental varia de acordo com a peça estudada. Existe aproximadamente 70MPa de diferença, cerca de 7%, entre o valor superior e o inferior. Este valor não é significativo pois a variação é muito pequena comparando com os valores globais. A média do módulo de elasticidade longitudinal é de $E_1=1018.867$ MPa.

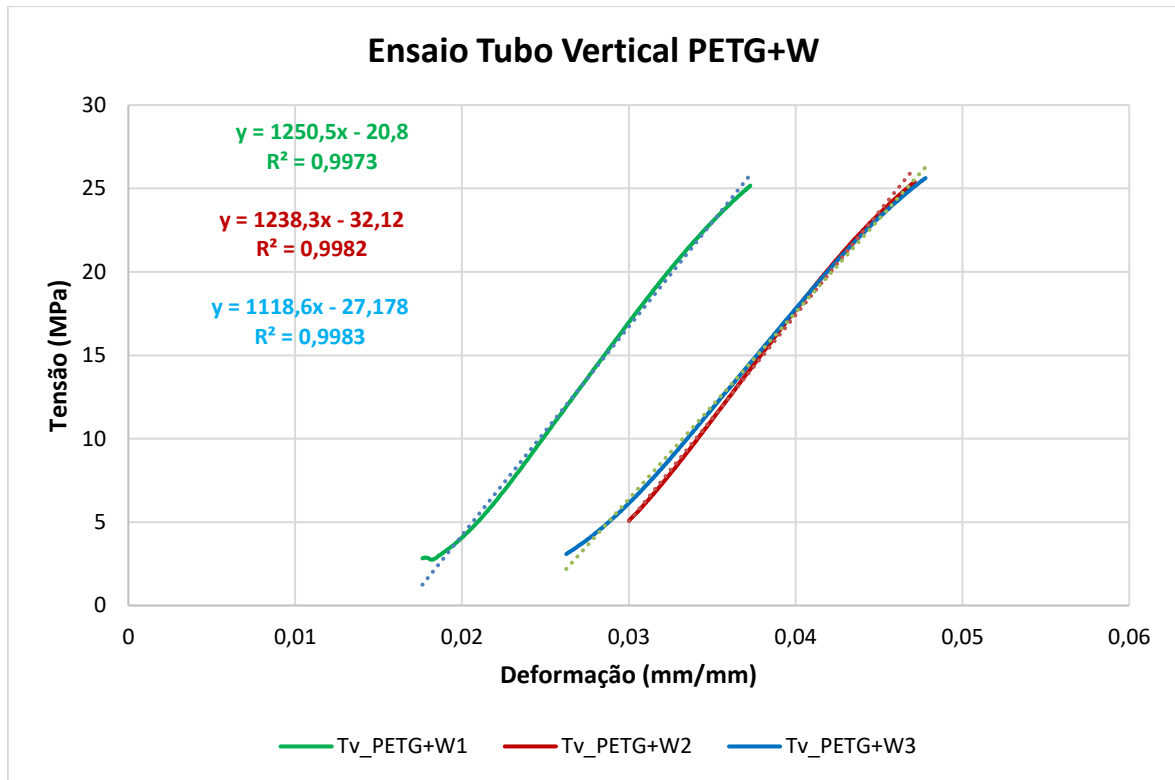


Figura 20 - Ensaio de compressão do filamento PETG + Tungsténio em tubo vertical

Com a adição de tungsténio na matriz de PETG, regista-se um aumento do módulo de elasticidade nas três peças ensaiadas, comparando com a matriz de PETG puro, sendo a média dos mesmo de $E_2 = 1202.467$ MPa.

Comparando os resultados obtidos para cada peça na Figura 20, é de registar o comportamento semelhante aos registados nas peças de matriz de PETG puro, em que existe uma diferença de 132MPa, 11,7% entre o valor superior e inferior do módulo de elasticidade experimental. Esta diferença é superior á registada nos ensaios da mesma geometria de PETG puro, devendo-se este facto a ser mais complexa a impressão do material PETG+W, carregando assim, mais risco de falhas de impressão e assim maior diferença entre peças semelhantes.

Conclui-se que a adição de Tungsténio na matriz polimérica aumenta o módulo de elasticidade longitudinal em 18%, não existindo alteração significativa de registo do deslocamento elástico e plástico de todas as peças. Conclui-se então que nestas condições a adição do metal melhorou significativamente os resultados obtidos, em linha com o esperado.

4.4.2. Geometria tubo horizontal

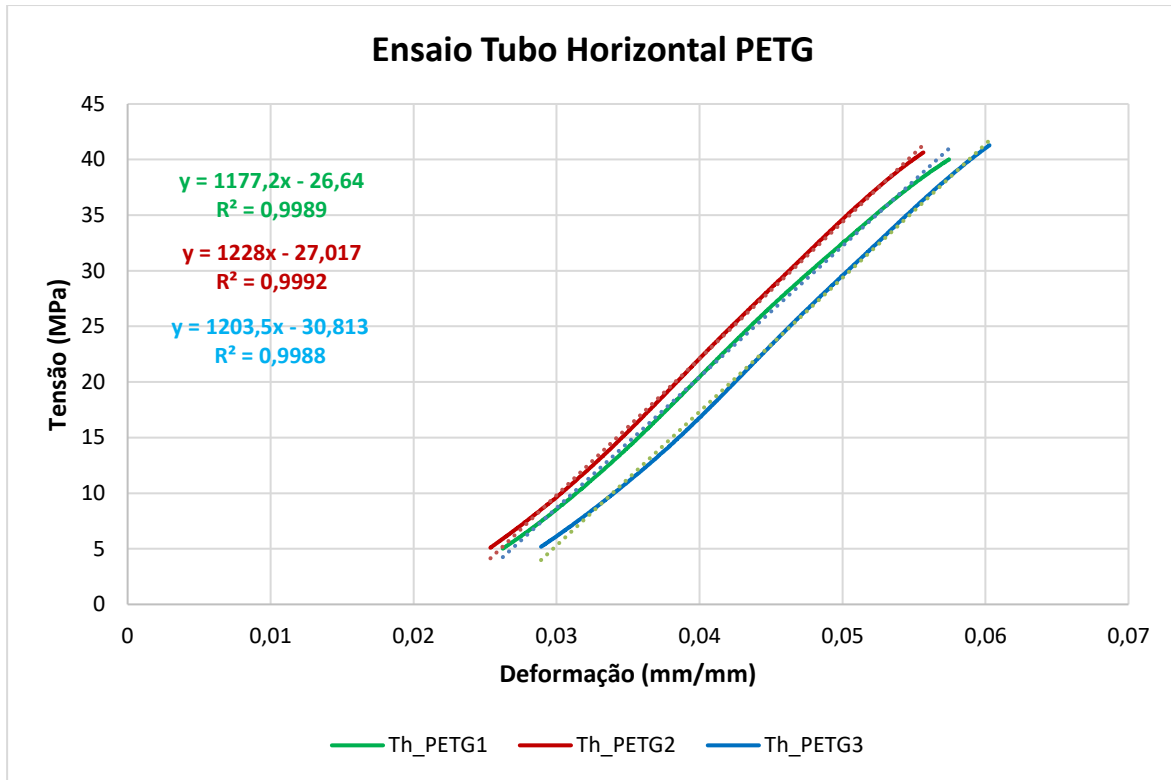


Figura 21 - Ensaio de compressão do filamento PETG em tubo horizontal

Pela análise da Figura 21, nomeadamente as equações de regressão linear, conclui-se que o módulo de elasticidade longitudinal experimental varia de acordo com a peça estudada. Existe aproximadamente 51MPa de diferença, cerca de 4%, entre o valor superior e o inferior. Este valor não é significativo pois a variação é muito pequena comparando com os valores globais. A média do módulo de elasticidade longitudinal é de $E_1=1202.9$ MPa.

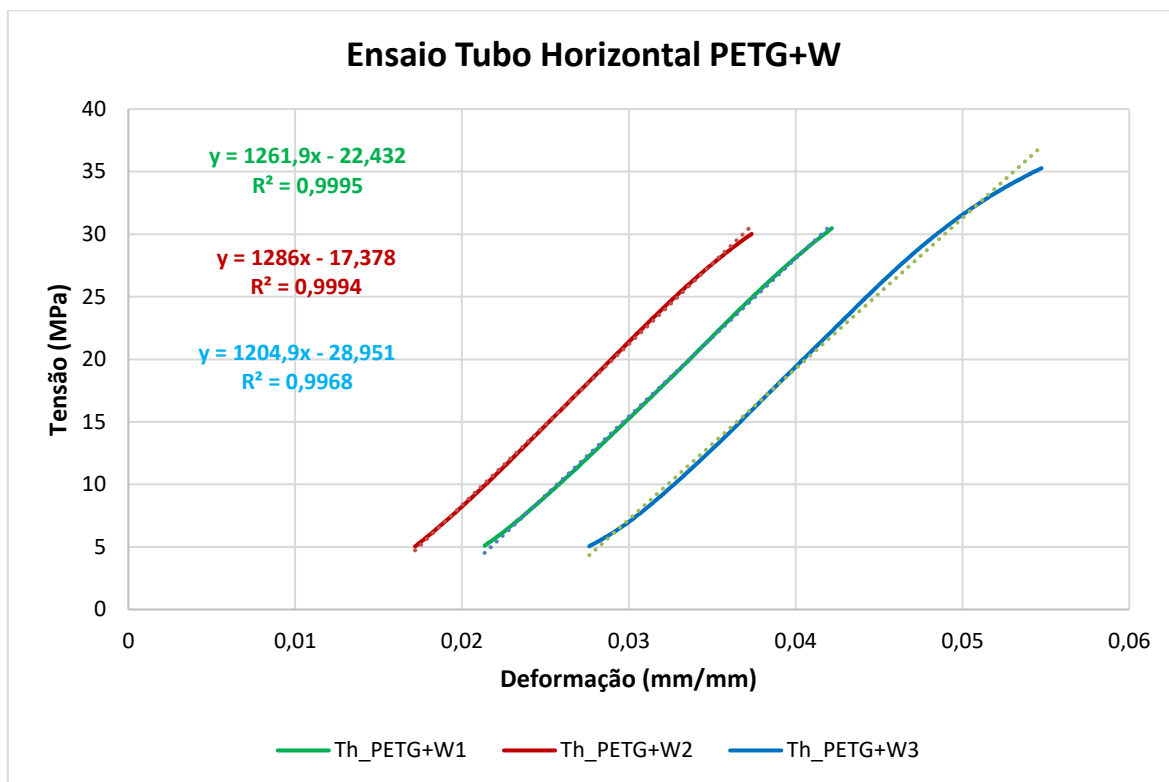


Figura 22 - Ensaio de compressão do filamento do PETG + Tungstênio em tubo horizontal

A incorporação de tungstênio na matriz de PETG resultou num aumento do módulo de elasticidade nas três peças analisadas, quando comparadas com a matriz de PETG puro, sendo a média obtida de $E_2 = 1250.933$ MPa. Observando os resultados individuais na Figura 22, verifica-se um comportamento semelhante ao registado nas peças com matriz de PETG puro, com uma variação de 81 MPa, correspondente a 6.7% entre o maior e o menor valor do módulo de elasticidade experimental. Essa variação é ligeiramente superior à observada nas peças de PETG puro, o que pode estar relacionado com a maior complexidade na impressão do material PETG+W, aumentando o risco de falhas e, conseqüentemente, a dispersão dos resultados.

Conclui-se que a adição de tungstênio na matriz polimérica resulta num aumento de 4% no módulo de elasticidade longitudinal, sem impacto significativo no comportamento elástico e plástico das peças testadas. Assim, verifica-se que, nestas condições, a introdução do metal levou a uma melhoria reduzida das propriedades mecânicas. Esse aumento discreto do módulo de elasticidade pode ser justificado pelo facto de a matriz de PETG puro já apresentar valores relativamente elevados, tornando a diferença entre os dois materiais pouco expressiva.

Analisando a matriz puramente de PETG, conclui-se que o módulo de elasticidade longitudinal é superior na geometria de construção de tubo horizontal em comparação com a geometria de tubo vertical, passando de 1018.867 MPa para 1202.9 MPa, aumentando 18%. Este aumento é explicado pela forma como as camadas foram realizadas. Na geometria de tubo vertical, a tensão aplicada foi distribuída vectorialmente entre camadas de cima para baixo, enquanto na geometria horizontal, a tensão aplicada vectorialmente foi aplicada na mesma camada. Tipicamente no FDM a adesão entre camadas não é ideal devido à diferença de temperatura do material extrudido e o aplicado, pelo que existe espaços entre elas, o que compromete a resistência à compressão. Esta situação não é verificável em adesão na mesma camada, pois a diferença de temperatura entre o material extrudido e o aplicado é baixa. Este facto também é visualizado quando comparando a dispersão entre ensaios da mesma geometria. Com a geometria horizontal a diferença entre o valor do módulo de elasticidade foi menor do que na geometria vertical, não sendo, no entanto, essa diferença muito expressiva.

Similarmente, na matriz de PETG com Tungstênio, a alteração de construção das peças afeta os resultados quando submetidas a teste de compressão. Neste caso, para a tensão aplicada, a deformação causada na geometria de tubo horizontal é menor comparando com a geometria de tubo vertical. Como tal o módulo de elasticidade longitudinal é maior na geometria horizontal, passando de 1202.467 MPa para 1250.933 MPa, aumentando 4%. Com a adição de tungstênio o aumento não é tão notado como na matriz de PETG pois a adição do metal afeta mais a resistência à força aplicada do que a alteração de construção da geometria.

4.4.3. Geometria cilindro Vertical

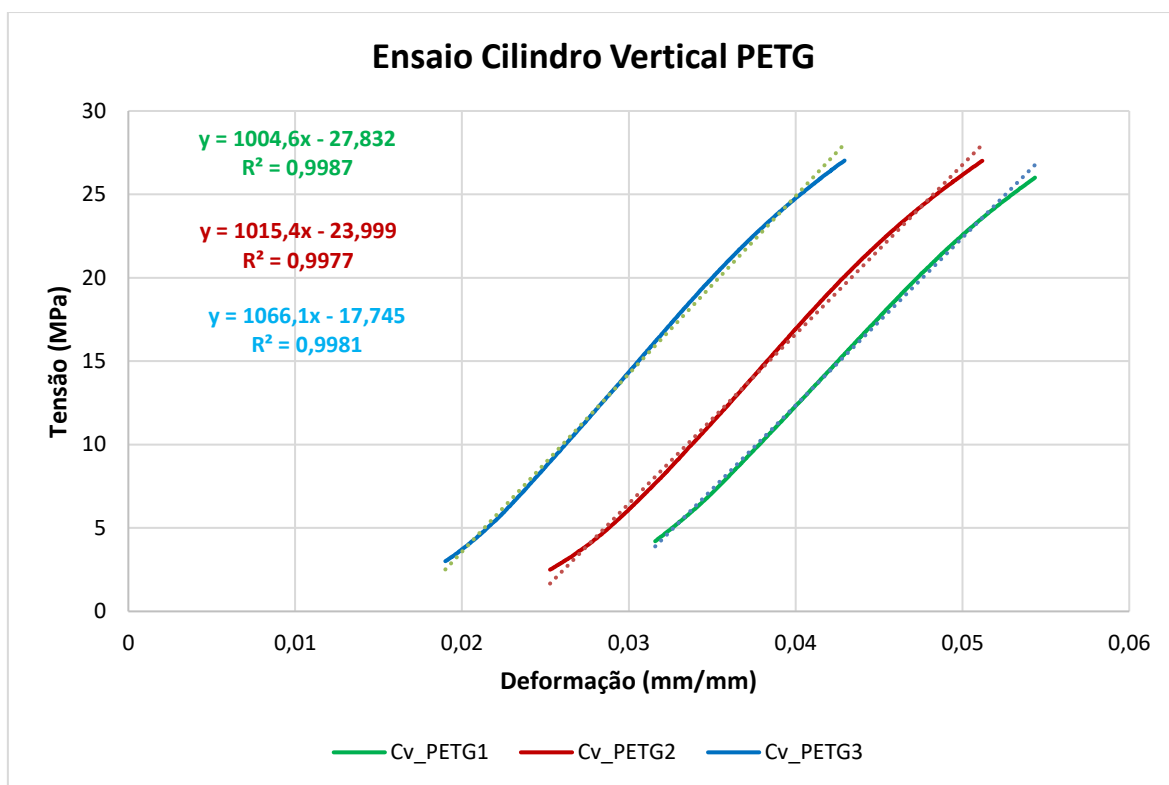


Figura 23 - Ensaio de compressão do filamento PETG em cilindro vertical

Analisando a Figura 23, focando nas equações de regressão linear, conclui-se que o módulo de elasticidade longitudinal experimental varia entre ensaios. Existe 61.5 MPa de diferença, cerca de 6.1%, entre o valor superior e o inferior do módulo de elasticidade de cada ensaio. Este valor não é significativo pois a variação é muito pequena comparando com os valores globais atingidos, sendo a média do módulo de elasticidade longitudinal de $E_1=1028.7$ MPa.

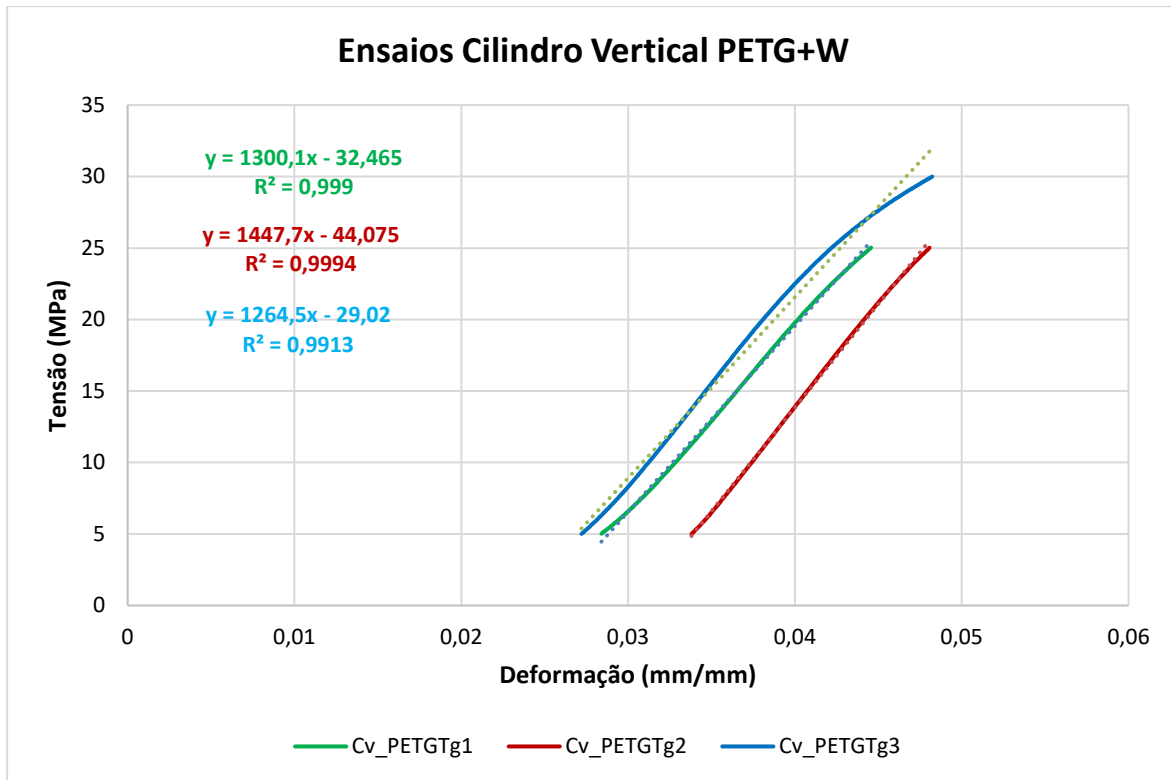


Figura 24 - Ensaio de compressão do filamento PETG + Tungstênio em cilindro vertical

A adição de tungstênio na matriz de PETG resultou num aumento do módulo de elasticidade generalizado nos três ensaios, em comparação com o PETG puro, sendo a média obtida de $E_2 = 1337.433$ MPa. Ao comparar os resultados apresentados na Figura 24, observa-se um comportamento semelhante ao das peças compostas pela matriz de PETG puro. Regista-se uma diferença de 183 MPa, cerca de 14.5% entre o maior e o menor valor do módulo de elasticidade experimental. Esta variação é superior à verificada nos ensaios das peças de mesma geometria fabricadas com PETG puro bem como de outras geometrias. Estes resultados reforçam a teoria de que a impressão deste composto é mais complexa, demonstrando com mais facilidade os pontos negativos deste processo.

Refletindo sobre as conclusões apresentadas anteriormente, afirma-se que a adição de tungstênio na matriz polimérica aumentou o módulo de elasticidade longitudinal em 30%, sendo a maior diferença registada na análise dos ensaio de compressão. Assim, verifica-se que, dentro destas condições, a introdução do metal melhorou significativamente os resultados obtidos, em concordância com o esperado.

4.4.1. Geometria cilindro horizontal

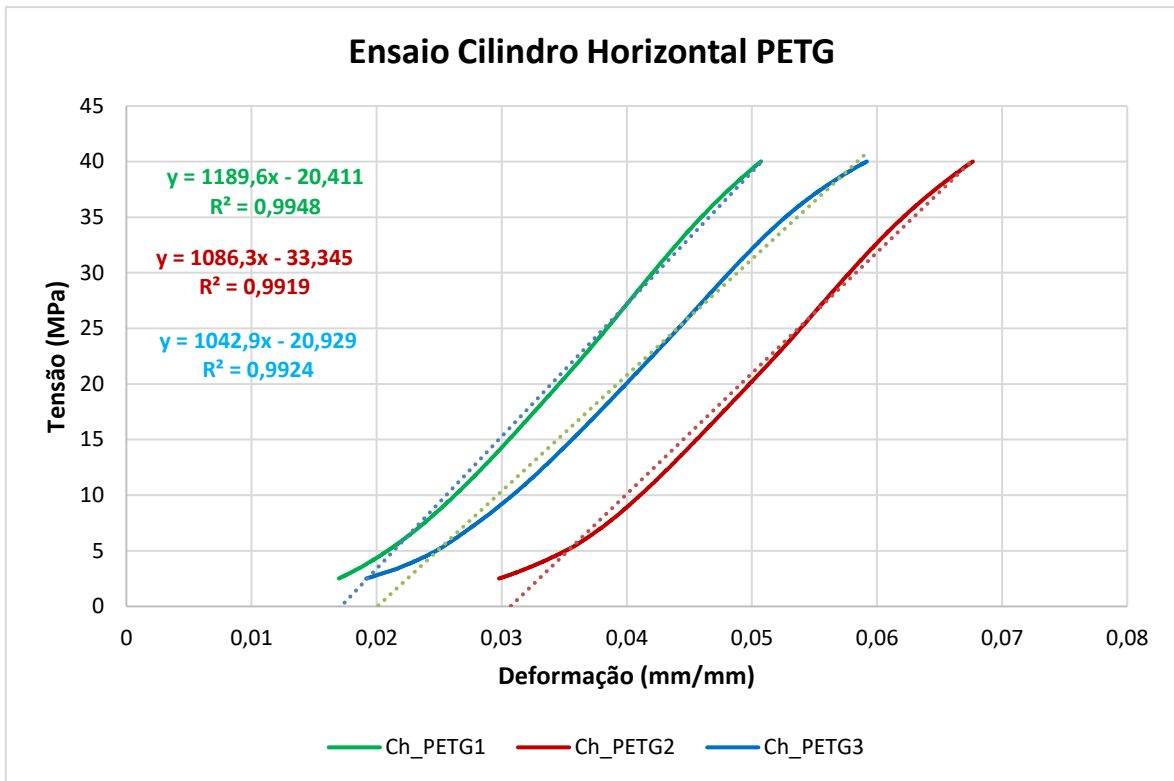


Figura 25 - Ensaio de compressão do filamento PETG em cilindro horizontal

Com base na análise da Figura 25, em particular das equações de regressão linear, verifica-se que o módulo de elasticidade longitudinal experimental apresenta variações conforme a peça analisada tal como experienciado nos ensaios anteriores. A diferença entre o maior e o menor valor registrado é de aproximadamente 146.7 MPa, correspondendo a 14%. Apesar da

diferença ser significativa, comparando com valores globais, esta não é tão relevante. A média do módulo de elasticidade longitudinal obtida é de $E_1 = 1106.267$ MPa.

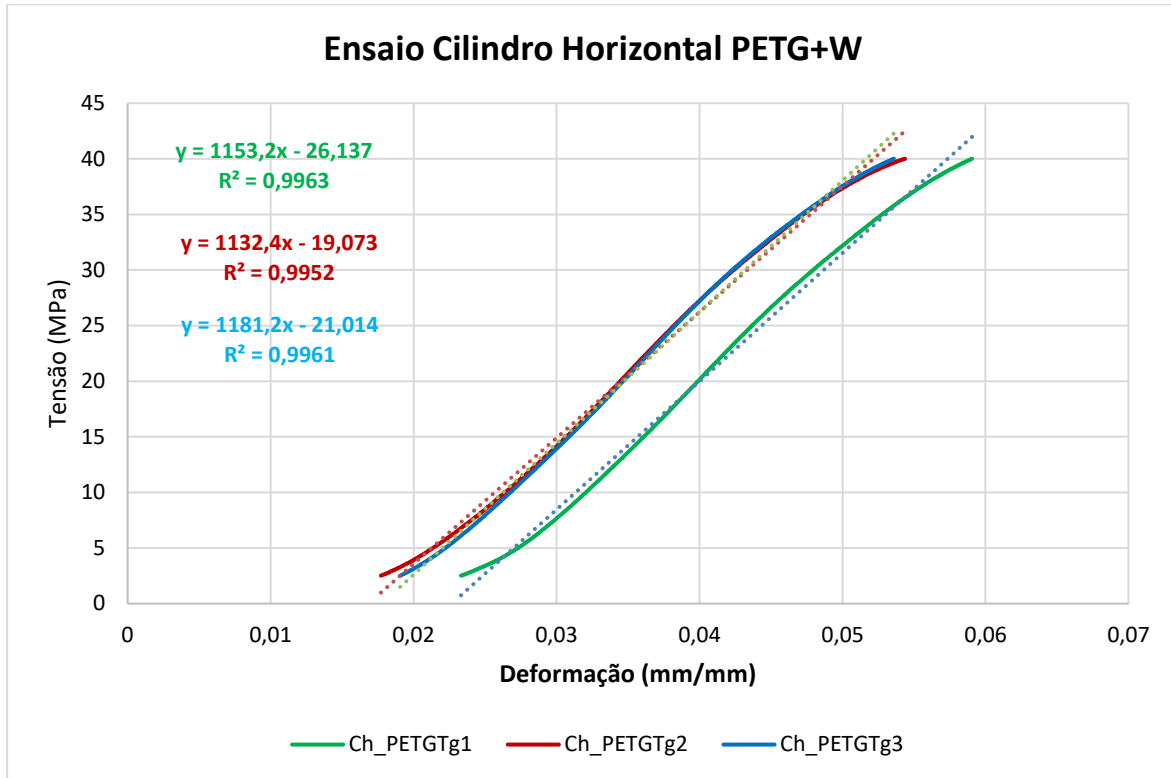


Figura 26 - Ensaio de compressão do filamento PETG + Tungstênio em cilindro horizontal

A introdução de tungstênio na matriz de PETG resultou num aumento do módulo de elasticidade nos três ensaios, em comparação com o PETG puro, tendo como média $E_2 = 1155.6$ MPa. Comparando os resultados individuais apresentados na Figura 26, observa-se um comportamento semelhante destes ensaios e dos ensaios com a matriz de PETG puro. Regista-se uma diferença de 48.8 MPa, cerca de 4.3% entre o maior e o menor valor do módulo de elasticidade experimental. Esta variação é muito reduzida, sendo um resultado ao contrário do verificado noutros ensaios realizados.

Comparando os valores médios E_1 e E_2 , confirma-se que a adição de tungstênio na matriz polimérica aumenta o módulo de elasticidade longitudinal, neste caso em 4.5%, sendo a menor diferença registada na análise dos ensaios de compressão. Assim, verifica-se que, dentro destas condições, a introdução do metal melhorou ligeiramente os resultados obtidos, então, dependendo da aplicação, a adição de tungstênio pode não ser viável.

Como visualizado no ponto anterior, alterando a forma de construção da peça, mas mantendo a geometria, é possível comparar alguns aspetos.

Analisando os resultados da matriz de PETG puro, conclui-se que o módulo de elasticidade longitudinal é superior na geometria de construção de cilindro horizontal em comparação com a geometria de cilindro vertical, aumentando de 1028.7 MPa para 1106.267 MPa, com 7.5% de aumento. Este aumento é consequência do mesmo processo da geometria tubular, isto é, a forma como as camadas foram realizadas. Na geometria de cilindro vertical, a tensão aplicada foi distribuída vectorialmente entre camadas, enquanto na geometria horizontal, a tensão aplicada vectorialmente foi aplicada na mesma camada. Tipicamente no processo FDM a adesão entre camadas não é ideal devido a diferença de temperatura do material extrudido e o aplicado, pelo que existe espaços entre elas, o que compromete a resistência á compressão. Esta situação não é aplicável em adesão na mesma camada, pois a diferença de temperatura entre o material extrudido e o aplicado é baixa. Este facto também é visualizado quando comparando a dispersão entre ensaios da mesma geometria. Com a geometria horizontal a diferença entre o valor do módulo de elasticidade foi menor do que na geometria vertical, não sendo, no entanto, essa diferença considerável.

Contrariamente, na matriz de PETG com Tungstênio, a alteração de construção das peças afeta os resultados quando submetidas a teste de compressão. Neste caso, o módulo de elasticidade longitudinal é superior na geometria de cilindro vertical comparando com a geometria de cilindro horizontal. Existiu um aumento de 15.7%, de 1155.6 MPa para 1337.433 MPa. Com a adição de tungstênio o aumento é maior do que o aumento registado na matriz de PETG, mas na geometria diferente.

4.4.2. Comparação das geometrias de matriz de PETG

De forma semelhante à utilizada na comparação por geometrias, agora será analisada cada peça segundo o material que a constitui, para que se conclua qual a melhor forma de construção e material para se obter a peça com melhor características mecânicas. Foi comparado o módulo de elasticidade longitudinal experimental de cada ensaio bem como foi feita a sua comparação com o valor tabelado.

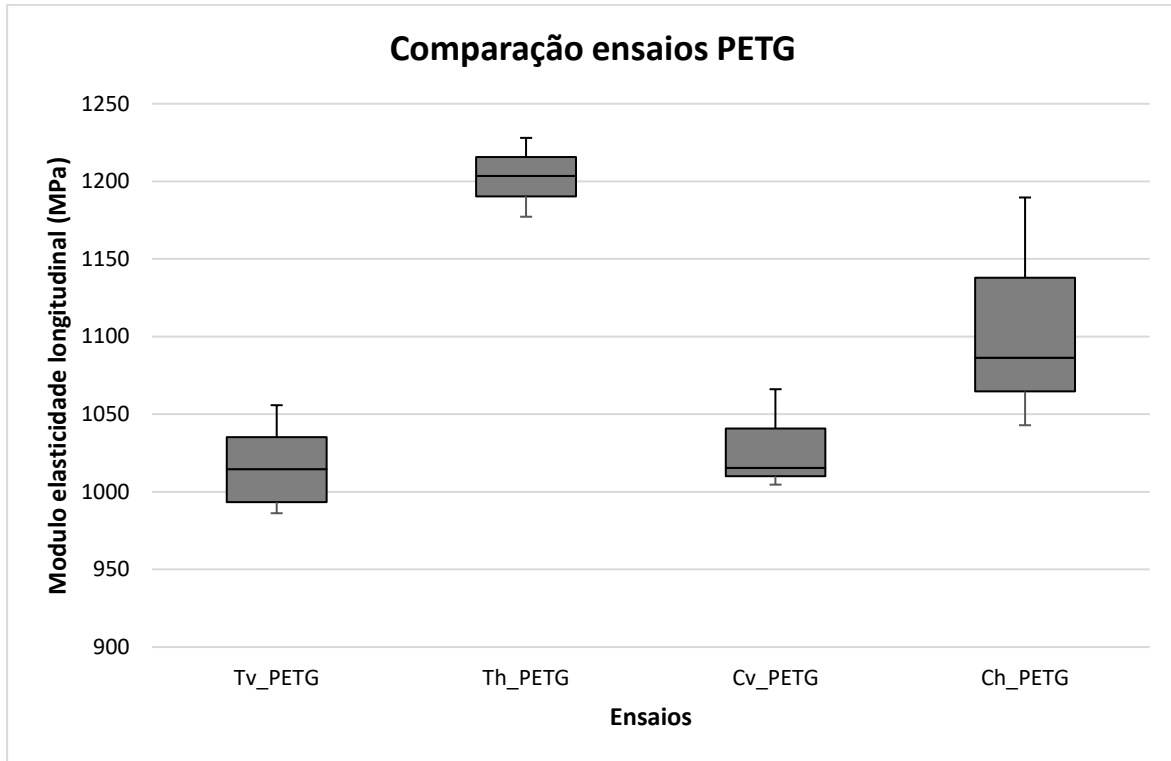


Figura 27 - Gráfico comparativo dos ensaios PETG

Tabela 2 - Média Módulo elasticidade longitudinal experimental PETG

	Tv_PETG	Th_PETG	Cv_PETG	Ch_PETG
<i>Média</i>	1018,867	1202,9	1028,7	1106,267

Pela análise da Figura 27 (Gráfico *Boxplot*) e da Tabela 2 verifica-se que a geometria de Tubo Horizontal é o que obtém melhores resultados comparando com todos os ensaios realizados. Pela figura verifica-se ainda que esta geometria é a que apresenta o desvio padrão mais uniforme. Comparando com o valor tabelado deste material em filamento, o Tubo Horizontal apresenta o valor do módulo de elasticidade longitudinal experimental mais próximo do tabelado, de 1700MPa.

Os valores do módulo de elasticidade experimental não apresentam grande variação entre ensaios, indicando que as condições de realização dos ensaios foram semelhantes, bem como não existiu falhas estruturais nas peças produzidas, tais como sobreposição de filamento extrudido ou falha momentânea de extrusão do mesmo.

4.4.3. Comparação das geometria de matriz de PETG com Tungstênio

Usando o mesmo método para a comparação das geometrias de PETG puro, será analisada cada peça pelo material para que se conclua qual a melhor forma de construção e material para se obter a peça com melhores características mecânicas. Irá ser comparado o módulo de elasticidade longitudinal experimental de cada ensaio bem como a sua comparação com o valor tabelado.

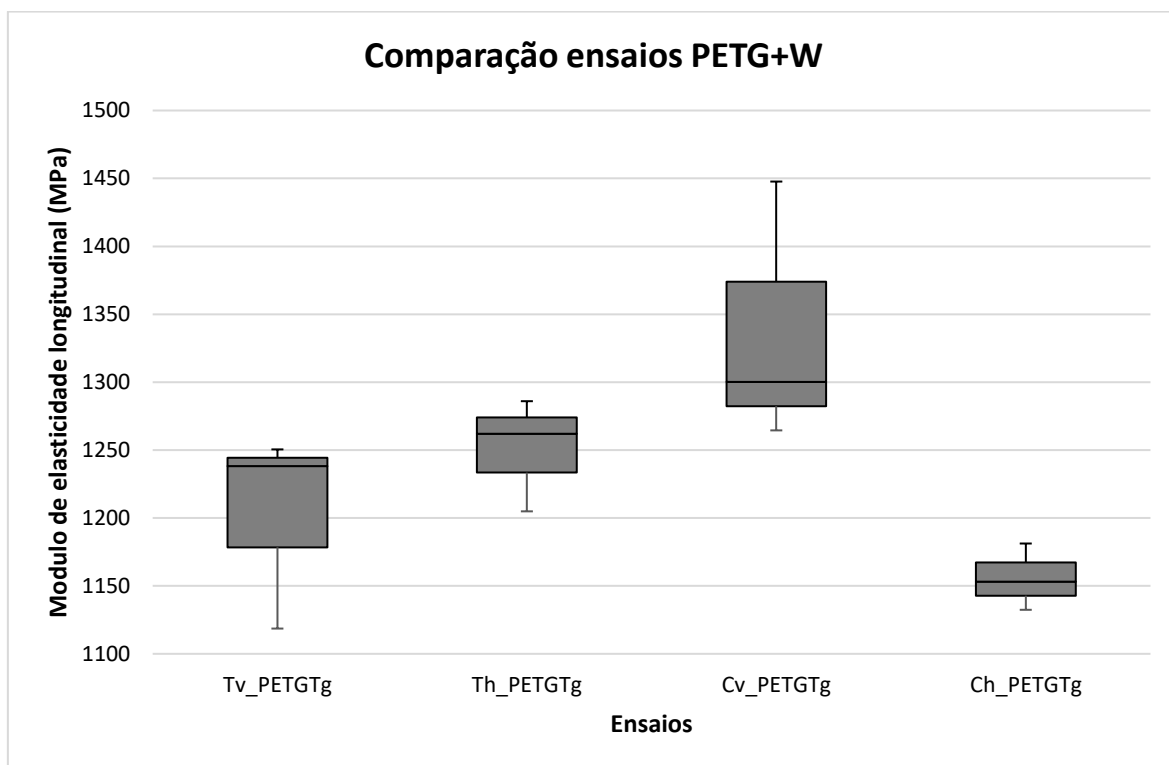


Figura 28- Gráfico comparativo dos ensaios PETG+Tungstênio

Tabela 3- Média Modulo elasticidade longitudinal experimental PETG+Tungstênio

	Tv_PETGTg	Th_PETGTg	Cv_PETGTg	Ch_PETGTg
Média	1202,467	1250,933	1337,433	1155,6

Pela análise da Figura 28 (Gráfico *Boxplot*) e da Tabela 3 afirma-se que a geometria de Cilindro Vertical é o que obtém melhores resultados comparando com todos os ensaios realizados. Pela análise da figura verifica-se que esta geometria não é a que apresenta o desvio padrão mais uniforme demonstrando que os valores experimentais do módulo de elasticidade foram dispersos, no entanto, não é um fator limitador da análise. A geometria de Cilindro Horizontal é a geometria que apresenta um desvio padrão mais uniforme, no entanto o seu valor de módulo de elasticidade é o mais baixo, como tal, a geometria que apresenta pior resultado. Comparando com o valor tabelado deste material em filamento, o Cilindro Vertical apresenta o valor do módulo de elasticidade longitudinal experimental mais próximo do tabelado, de 2800 MPa.

Os valores do módulo de elasticidade experimental não apresentam grande variação entre ensaios, indicando que as condições de realização dos ensaios foram semelhantes, bem como não existiram falhas estruturais nas peças produzidas, tais como sobreposição de filamento extrudido ou falha momentânea de extrusão do mesmo.

A conclusão sobre qual a geometria com maior resistência global não é linear, pois para a matriz de PETG puro, a geometria com maior módulo de elasticidade é a de Tubo Horizontal e para a matriz de PETG com Tungstênio, a geometria com maior módulo de elasticidade é a de Cilindro Vertical. Se forem comparados os dois valores experimentais do módulo de elasticidade constata-se que a adição de tungstênio aumenta este valor em 11,1%, sendo um aumento considerável em relação à matriz de PETG puro. Contrariamente à geometria, o material com melhores resultados independentemente da geometria é a matriz com adição de tungstênio, pois o módulo de elasticidade experimental aumentou em todas as quatro geometrias utilizadas.

4.5. Ensaio de dureza Shore

O ensaio de dureza foi realizado em seis placas, três de cada material em estudo, PETG e PETG + Tungstênio. A Figura 29 mostra o comportamento de cada ensaio feito compilados de forma a facilitar a sua análise. Foram analisados dois instantes na realização destes ensaios, t_0 que corresponde ao valor da dureza no instante em que o indentador inicia a pressão na placa e o instante t_{15} que corresponde ao valor da dureza 15s após o início da aplicação de pressão. Nesta análise utiliza-se o valor t_{15} pois é o valor real da dureza do material.

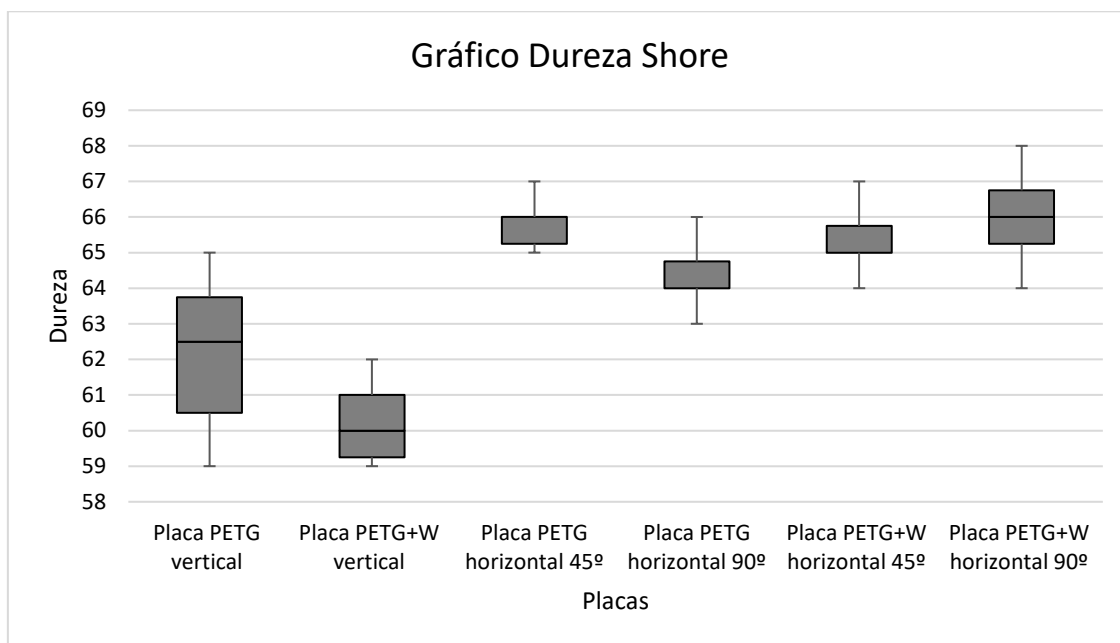


Figura 29 - Resumo dos ensaios de dureza Shore

Tabela 4 - Média dureza Shore

Placa	Placa PETG vertical	Placa PETG+W vertical	Placa PETG horizontal 45°	Placa PETG horizontal 90°	Placa PETG+W horizontal 45°	Placa PETG+W horizontal 90°
Média	62,1	60,3	65,8	64,3	65,3	66

Pela análise da Figura 29 e da Tabela 4 verifica-se que a placa constituída por PETG+W com a construção horizontal e preenchimento a 90° é a que demonstra maior dureza. Pela comparação é possível registrar um aumento de 9.5% entre a placa com menor e a maior dureza, não sendo este aumento muito expressivo. Na globalidade, as durezas de todas as placas são muito semelhantes, o que indica que a adição de tungstênio na matriz de PETG

não influencia a dureza geral da peça. Da mesma forma, a alteração da orientação de construção, horizontal e vertical, bem como o ângulo de preenchimentos das peças, 45° e 90°, também não influencia a dureza geral das mesmas. A diferença reduzida entre a dureza menor e maior deve-se ao facto de o indentador ter a capacidade de atravessar entre os filamentos, podendo não produzir resultados idênticos a outras técnicas de produção das peças.

5. Conclusão

O processo de FDM é um método muito viável em termos de otimização de tempo de produção e de material, apresenta elevada facilidade na construção de peças muito complexas, permite a utilização de diversos tipos de termoplásticos para o fabrico do processo, como por exemplo, ABS, PLA e PETG, apresentando-se a matéria-prima base no estado de filamento sólido. Este processo pode ser utilizado para gerar modelos funcionais e protótipos, verificar dimensões e testar características das peças. Uma característica que por vezes não é tido em consideração é a análise das propriedades que melhor se adequam à peça que se pretende construir, dado que de uma forma geral apenas se valoriza o aspeto superficial da peça. Neste processo existem variáveis que influenciam as propriedades mecânicas do material, como é o caso da espessura de camada, das trajetórias de construção, da orientação escolhida para a construção dos provetes ou a geometria dos mesmos. Foram estudados de forma mais exaustiva os últimos três pontos, de acordo com os objetivos deste projeto. Foram escolhidas 2 orientações de construção diferentes e 2 geometrias diferentes nos testes de compressão e apenas 2 orientações de construção nos testes de dureza.

Analisando os ensaios relativos à deposição do filamento, conclui-se que esta deposição não é uniforme ao longo do tempo. Esta não uniformidade é consequência direta dos parâmetro de impressão, bem como da capacidade física de deposição. Este material (PETG+W) é complexo de ser impresso pois as partículas de tungstênio deterioram rapidamente o bico de impressão, comprometendo a linearidade de deposição. Também os parâmetros de deposição, nomeadamente a temperatura de impressão, têm um papel fundamental na deposição contínua e linear. Apesar disto, conclui-se também que as diferenças entre os diâmetros do filamento impressos e antes de ser impresso não possuem uma variação significativa que inviabilize o processo.

Conclui-se que a adição de Tungstênio na matriz polimérica aumenta a resistência á tração em 13%, sendo que o alongamento máximo dos provetes é comprometido, isto é, a adição de tungstênio na matriz polimérica reduz as características elásticas típicas destes materiais. Esta diferenciação deve-se ao facto de o metal ter menor capacidade elástica. Com estes resultados conclui-se que para a utilização de peças que estão sujeitas a grandes tensões, a incorporação de tungstênio na matriz de PETG é uma solução viável, no entanto, esta adição reduz a capacidade de alongamento. Para utilizações onde o alongamento elástico predomina, a matriz de PETG pura é o mais indicada, segundo os testes realizados.

Analisando os ensaios de compressão existem alguns pontos a considerar. Examinando a matriz 100% de PETG, a geometria que confere melhores resultados à compressão é a geometria de Tubo Horizontal pois é a que apresenta o maior valor do módulo de elasticidade longitudinal. Contrariamente, na análise da matriz de PETG+W a geometria que confere melhores resultados à compressão é a geometria de Cilindro Vertical pois é a que apresenta o maior valor do módulo de elasticidade longitudinal. Na globalidade, a adição de Tungsténio na matriz polimérica melhora substancialmente as propriedades mecânicas das peças, sejam estas sujeitas a forças de compressão ou de tração.

Se for analisada a geometria dominante não existe uma conclusão clara pois os resultados obtidos nas duas matrizes não são uniformes, pelo que a análise da geometria mais resistente irá depender da sua utilização e forma de aplicação da mesma.

Relativamente aos ensaios DSC, verifica-se que a adição de tungsténio na matriz de PETG não altera significativamente a T_g . Analisando a capacidade de fluxo de calor, a adição de tungsténio altera esta capacidade diminuindo a estabilidade térmica do PETG e, portanto, não será aconselhável o seu uso nestas condições comparando com uma peça fabricada com PETG puro.

Os ensaios de impacto denotaram que a placa constituída por 100% PETG com a construção horizontal e preenchimento a 45°, bem como a placa constituída por PETG+W com a construção horizontal e preenchimento a 90° têm a mesma dureza. Na globalidade, as durezas de todas as placas são muito semelhantes, o que indica que a adição de tungsténio na matriz de PETG não influencia a dureza geral da peça. Da mesma forma, a alteração da orientação de construção, horizontal e vertical, bem como o ângulo de preenchimentos das peças, 45° e 90°, também não influencia a dureza geral das mesmas.

A falta de conclusão exata sobre qual a melhor geometria a utilizar deve-se ao facto de não existir muita informação documentada sobre a utilização do material, o que deixou algumas perguntas por responder. Pelo que, como sugestão de trabalho futuro seria a realização de testes mais aprofundados ao material e utilizando outros materiais, realizar uma extensa comparação de forma a ser possível obter conclusões mais concisas.

Bibliografia

1. Avinash Kapil, Sk., Harika Chowdary, M., Babji, A., Prabhuchand, K., & Kumar, P. P. (2024). Exploration into assessing the mechanical characteristics of PETG pieces through the use of 3D printed material element tribology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2837(1), 012089. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2837/1/012089>
2. Chakraborty, Samit and Biswas, Manik Chandra, Fused Deposition Modeling 3D Printing Technology in Textile and Fashion Industry: Materials and Innovation (November 13, 2019). Modern Concepts in Material Science, Iris Publishers, 2019, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3612939>
3. *Original Prusa i3 MK3S+ | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa.* (n.d.). Prusa3D by Josef Prusa. <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/>
4. Hsueh, M.-H., Lai, C.-J., Wang, S.-H., Zeng, Y.-S., Hsieh, C.-H., Pan, C.-Y., & Huang, W.-C. (2021). Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling. *Polymers*, 13(11), 1758. <https://doi.org/10.3390/polym13111758>
5. FDM 3D printing materials compared. (n.d.). Hubs.
Acedido em 10-08-2024 <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
6. Mishra, P.; Sood, S.; Bharadwaj, V.; Aggarwal, A.; Khanna, P. Parametric Modeling and Optimization of Dimensional Error and Surface Roughness of Fused Deposition Modeling Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Parts. *Polymers* 2023, 15, 546. <https://doi.org/10.3390/polym15030546>
7. Algarni, M.; Ghazali, S. Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. *Crystals* 2021, 11, 995. <https://doi.org/10.3390/cryst11080995>

8. Bembenek, M.; Kowalski, Ł.; Kosoń-Schab, A. Research on the Influence of Processing Parameters on the Specific Tensile Strength of FDM Additive Manufactured PET-G and PLA Materials. *Polymers* 2022, 14, 2446. <https://doi.org/10.3390/polym14122446>
9. Lalegani Dezaki M, Mohd Ariffin M. The Effects of Combined Infill Patterns on Mechanical Properties in FDM Process. *Polymers*. 2020; 12(12):2792. <https://doi.org/10.3390/polym12122792>
10. Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 183–192. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>
11. Que é o PETG? (n.d.). Filament2print.com.
Acedido em 21-08-2024 https://filament2print.com/pt/blog/49_petg.html
12. Instituto Pedro Nunes. (n.d.). [Www.ipn.pt](http://www.ipn.pt).
Acedido em 12-08-2024 <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/68>
13. Alves, L. M., Nielsen, C. V., & Martins, F. (2011). Revisiting the Fundamentals and Capabilities of the Stack Compression Test. *Experimental Mechanics*, 51(9), 1565–1572. <https://doi.org/10.1007/s11340-011-9480-5>
14. Instituto Pedro Nunes. (n.d.). [Www.ipn.pt](http://www.ipn.pt).
Acedido em 12-08-2024 <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/2>
15. Ilardo, R. & Williams, C.B. (2010), Design and manufacture of a Formula SAE intake system using fused deposition modeling and fiber-reinforced composite materials, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 16 No. 3, pp. 174-179
16. Instituto Pedro Nunes. (n.d.). [Www.ipn.pt](http://www.ipn.pt).
Acedido em 12-08-2024 <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/57>

Anexos A – Ficha técnica filamento PETG

Version: 1.1
Last update: 16-02-2022

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

Technical datasheet Prusament PETG by Prusa Polymers



Identification

Trade Name	Prusament PETG
Chemical Name	Polyethylene Terephthalate Glycol Copolymer
Usage	FDM/FFF 3D printing
Diameter	1.75 ± 0.02 mm
Manufacturer	Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic

Recommended print settings

Nozzle Temperature [°C]	250 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	80 ± 10
Print Speed [mm/s]	up to 200
Cooling Fan Speed [%]	50
Bed Type	satin sheet; powder coated sheet; smooth PEI sheet*
Additional Info	The brim is not necessary in general.

*) with a glue stick

Anexos B – Ficha técnica filamento PETG tungsténio



Version: 1.0
Last update: 15-03-2023

Technical datasheet
Prusament PETG Tungsten 75% by Prusa Polymers



Identification

Trade Name	Prusament PETG Tungsten 75%
Chemical Name	Polyethylene Terephthalate Glycol Copolymer filled with tungsten powder (75 % in mass)
Usage	FDM/FFF 3D printing
Diameter	1.75 ± 0.03 mm
Manufacturer	Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic

Recommended print settings

Nozzle Temperature [°C]	260 ± 10
Heatbed Temperature [°C]	80 ± 10
Print Speed [mm/s]	up to 200
Cooling Fan Speed [%]	50
Bed Type	satin sheet; powder coated sheet; smooth PEI sheet*
Additional Info	The brim is not necessary in general.

* with a glue stick