



**João Pedro Lamas
Trindade da Silva**

**Aplicações de polímeros de engenharia em
componentes estruturais através do fabrico
aditivo**

Applications of engineering polymers in structural components through additive manufacturing



**João Pedro Lamas
Trindade da Silva**

Aplicações de polímeros de engenharia em componentes estruturais através do fabrico aditivo

Applications of engineering polymers in structural components through additive manufacturing

Relatório de Estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Sérgio Manuel Oliveira Tavares, Professor Auxiliar em Regime Laboral do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Doutor Daniel Filipe Oliveira Braga, Co-Founder da Spinner Dynamics.

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

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Victor Fernando Santos Neto

Professor Auxiliar em Regime Laboral da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Doutor Gonçalo Filipe Pina Cipriano

Técnico Superior Principal, Inegi- Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

Prof. Doutor Sérgio Manuel Oliveira Tavares

Professor Auxiliar em Regime Laboral da Universidade de Aveiro

Agradecimentos / Acknowledgements

O meu primeiro agradecimento é direcionado à minha família, por todo o apoio incondicional e pelos valores partilhados comigo ao longo do meu desenvolvimento e crescimento pessoal.

Ao Prof. Doutor Sérgio Tavares, pela orientação e definição de objetivos, e principalmente, pela disponibilidade que sempre foi demonstrada no desenrolar de todo o trabalho.

À SpinnerDynamics, pela oportunidade, condições fornecidas e atribuição deste desafio em especial agradecimento ao co-orientador Doutor Daniel Braga, Eng.^o Carlos Costa e Eng.^o Bruno Teixeira por todo o suporte e confiança demonstrada no trabalho desenvolvido e pela autonomia proporcionada.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, por toda a formação e cultura inculcadas pelos docentes que facilitaram a adaptação numa realidade empresarial e especial agradecimento ao Eng.^o Ricardo Beja pelo auxílio prestado nos ensaios mecânicos realizados no âmbito deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo companheirismo e amizade ao longo destes anos, onde sem vocês não teria sido o mesmo.

Palavras-chave

Fabrico Aditivo; Prototipagem Rápida; Moldação por Extrusão e Deposição; Polímeros de Engenharia; Otimização; Simulação Numérica

Resumo

O fabrico de componentes complexos, integrando múltiplas funções, de fabrico unitário ou em pequena e média séries, enquadrado numa resposta de produção flexível e competitiva é um dos desafios a que a tecnologia de Fabrico Aditivo procura dar resposta. Estando sempre presente a exigência do cliente face aos requisitos pretendidos no produto final, foram explorados polímeros de engenharia de modo a fazer face a esta exigência. Recorrendo ao processo de fabrico com filamento fundido (FFF) e tirando proveito de polímeros de engenharia foram avaliadas as características que estes conferem ao produto final. Neste trabalho, foram explorados polímeros de engenharia, da família poli(alril-éter-cetona) PAEK e Nylons reforçados como filamento de fabrico aditivo. Polímeros de engenharia distinguem-se dos termoplásticos convencionais como ácido polilático (PLA) ou acrilonitrila butadieno estireno (ABS), por serem mais resistentes e com maior tenacidade tendo no geral melhores propriedades mecânicas e químicas. De forma a avaliar as características destes materiais processados por fabrico aditivo, foi desenvolvida uma metodologia que permitisse a comparação de propriedades entre os polímeros de engenharia utilizados. Para tal, através do fabrico de provetes orientados em diferentes direções, devido as características ortotrópicas do processo. Estes provetes foram submetidos a ensaios de tração uniaxiais. Após os ensaios experimentais e através de um balanço de resultados obtidos para cada polímero, concluiu-se que para este processo de fabrico, o polímero que se evidenciou foi o PPS-CF e a direção de fabrico onde foram obtidos melhores resultados para este processo de fabrico foi na direção horizontal. De forma a avaliar a aplicação destes polímeros, foi realizado um modelo numérico de um *bracket* otimizado para fabrico aditivo de forma a avaliar o potencial destes polímeros. Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos para o *bracket* fabricado em PPS-CF, foi realizada a mesma simulação para um *bracket* em alumínio. Por fim e recorrendo então a uma comparação de resultados entre os *brackets* é concluído que este polímero não é viável para a aplicação em específico pois, face aos esforços que este seria submetido apenas seria viável se os esforços não ultrapassassem 5% das cargas reais às quais estaria submetido.

Keywords

Additive Manufacturing; Rapid Prototyping; Extrusion and Deposition Molding; Engineering Polymers; Optimization; Numerical Simulation;

Abstract

The manufacturing of complex components, integrating multiple functions, unit or in small or medium production, framed in a flexible and competitive production is one of the challenges that Additive Manufacturing technology seeks to answer.

On this project through the use of the manufacturing process of Fused Filament Fabrication (FFF) and while using engineering polymers as additive manufacturing filament, the aim of this report is to make use of the characteristics that are intrinsic to the nature of each polymer and to verify what properties they confer to the final product.

Were used engineering polymers such as PEEK, PEEK-CF, PAHT-CF and PPS-CF. Engineering polymers are different from other thermoplastics such as polylactic acid (PLA) or acrylonitrile butadiene styrene (ABS) for being more resistant having generally better mechanical and chemical properties.

A methodology was developed to allow the comparison of properties between the engineering polymers used. To this end, through the manufacture of specimens oriented in three main directions, horizontal, vertical, and longitudinal, these were subjected to uniaxial tensile tests. After the experimental tests and through a balance of results obtained for each polymer, it was concluded that for this manufacturing process the polymer that stood out was the PPS-CF and the direction of manufacture where the best results were obtained for this manufacturing process was the horizontal direction.

To finish this project and reach conclusions on possible applications for this polymer, a numerical simulation was developed for a case study where it was intended to optimize a bracket of an aircraft turbine made through additive manufacturing out of PPS-CF and subject to a set loading scenario. To facilitate the interpretation of the results obtained for the bracket made of PPS-CF, the same simulation was performed for an aluminum bracket. Upon analysis of the achieved results and comparison of the two cases it can be concluded that the approach taken is not suited for this material and manufacturing process, given that failure would only not occur if the loading did not exceed 5% of the current load case.

Índice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Contextualização | 1 |
| 1.2 | Motivação e objetivos | 1 |
| 1.3 | Estrutura do trabalho | 2 |
| 1.4 | Conceito de Fabrico Aditivo | 3 |
| 2 | Enquadramento Teórico | 5 |
| 2.1 | Processo de Fabrico Aditivo | 5 |
| 2.2 | Tipos de tecnologia de Fabrico Aditivo | 7 |
| 2.3 | Vantagens e Limitações de Fabrico Aditivo | 13 |
| 2.4 | Polímeros de Engenharia | 16 |
| 2.5 | Processo de produção de filamento - Extrusão | 21 |
| 2.6 | Aplicações em engenharia | 22 |
| 3 | Metodologia Experimental | 27 |
| 3.1 | Etapas de calibração de um novo polímero | 27 |
| 3.2 | Desenho da experiência a realizar | 30 |
| 3.3 | Desenho do provete em análise | 31 |
| 3.4 | Intamsys Funmat Pro 410 | 31 |
| 3.5 | Impressão dos provetes | 33 |
| 3.6 | Poli-éter-éter-cetona - PEEK | 36 |
| 3.7 | Poli-éter-éter-cetona - PEEK-CF | 41 |
| 3.8 | PAHT-CF | 44 |
| 3.9 | PPS-CF | 48 |
| 3.10 | Ensaio de tração | 51 |
| 4 | Resultados Experimentais | 57 |
| 4.1 | Polímero PEEK | 58 |
| 4.2 | Polímero PEEK-CF | 61 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3 | Polímero PAHT-CF | 64 |
| 4.4 | Polímero PPS-CF | 67 |
| 4.5 | Comparação entre polímeros para cada Orientação de fabrico | 70 |
| 4.6 | Resultados ensaio de tração | 73 |
| 5 | Caso de Estudo | 75 |
| 5.1 | Descrição do problema | 75 |
| 5.2 | Modelo CAD | 77 |
| 5.3 | Simulação Ansys - Materiais e <i>Load Conditions</i> | 77 |
| 6 | Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro | 87 |
| 6.1 | Conclusões | 87 |
| 6.2 | Trabalhos futuros | 88 |
| A | Anexos | 93 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------|---|----|
| 4.1 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical segundo o eixo Z (PEEK) | 58 |
| 4.2 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação horizontal (PEEK) | 59 |
| 4.3 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical no plano XZ (PEEK) | 60 |
| 4.4 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical segundo o eixo Z (PEEK-CF) | 61 |
| 4.5 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação horizontal (PEEK-CF) | 62 |
| 4.6 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical no plano XZ (PEEK-CF) | 63 |
| 4.7 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical segundo o eixo Z (PAHT-CF) | 64 |
| 4.8 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação horizontal (PAHT-CF) | 65 |
| 4.9 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical no plano XZ (PAHT-CF) | 66 |
| 4.10 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical segundo o eixo Z (PPS-CF) | 67 |
| 4.11 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação horizontal (PPS-CF) | 68 |
| 4.12 | Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical no plano XZ (PPS-CF) | 69 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Logótipo Spinner Dynamics | 1 |
| 1.2 | CI3 - Centro de Incubação e Inovação Industrial de Arouca | 2 |
| 1.3 | Processo de fabrico aditivo desde o modelo 3D até produto final [3] | 4 |
| 2.1 | Evolução de uma impressão 3D [9] | 6 |
| 2.2 | Diferentes tipos de tecnologia de fabrico aditivo [10] | 7 |
| 2.3 | Processo de Moldação por Extrusão e Deposição [10] | 8 |
| 2.4 | Processo de Sinterização Seletiva por Laser [10] | 9 |
| 2.5 | Processo de Estereolitografia [10] | 10 |
| 2.6 | Processo de Projeção Digital de Luz [17] | 11 |
| 2.7 | Processo Sinterização Direta de Metais por Laser [10] | 12 |
| 2.8 | Processo de Fusão seletiva a laser [9] | 13 |
| 2.9 | Comparação de fabrico aditivo com fabrico convencional [21] | 14 |
| 2.10 | Classificação de polímeros de engenharia [24] | 16 |
| 2.11 | Polimerização de polietileno (Exemplo adaptado de[26]) | 17 |
| 2.12 | Tipos de Cristalização em polímeros (adaptado de [28]) | 18 |
| 2.13 | Transições térmicas de termoplásticos durante uma análise calorimétrica típica (Adaptado de [27]) | 19 |
| 2.14 | Família de polímeros PAEK (adaptado de [30]) | 20 |
| 2.15 | Processo de extrusão de polímeros (adaptado de [31]). | 21 |
| 2.16 | Previsão anual de crescimento impressão 3D por indústria [32] | 22 |
| 2.17 | Processo LPBF BMW Group [34] | 23 |
| 2.18 | Otimização topológica e fabrico aditivo [35] | 24 |
| 2.19 | Brackets e invisalign [36] | 25 |
| 2.20 | Implante clavicular em PEEK[37] | 25 |
| 2.21 | Molde feito por fabrico aditivo | 26 |
| 3.1 | Intamsys funmat pro 410 - mesa de impressão | 28 |
| 3.2 | Calibração 1 - Exemplo de um cubo em PEEK sem preenchimento, para controlo dimensional | 29 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.3 | Calibração 2 - Evolução do teste para a torre de retração | 30 |
| 3.4 | Calibração 3 - Exemplo de um cubo preenchido em PAHT-CF | 30 |
| 3.5 | Provete ISO 527 5A [38] | 31 |
| 3.6 | Intamsys Funmat Pro 410 | 32 |
| 3.7 | Slicer Intamsuite - Orientação vertical segundo o eixo Z | 34 |
| 3.8 | Slicer Intamsuite - Orientação Vertical no plano XZ | 34 |
| 3.9 | Slicer Intamsuite -Orientação Horizontal linhas e concêntrico | 35 |
| 3.10 | Intamsys PEEK | 36 |
| 3.11 | Nozzle 0.4 milímetros de diâmetro em aço temperado para altas temperaturas | 36 |
| 3.12 | PEEK - Orientação Vertical segundo o eixo Z | 37 |
| 3.13 | PEEK - Orientação Vertical no plano XZ | 38 |
| 3.14 | Orientação horizontal linhas - Caminho de impressão | 39 |
| 3.15 | PEEK- Orientação horizontal linhas | 39 |
| 3.16 | Orientação horizontal com linhas -Caminho de impressão | 40 |
| 3.17 | PEEK- Orientação horizontal concêntrico | 40 |
| 3.18 | Intamsys PEEK-CF | 41 |
| 3.19 | Nozzle 0.6 milímetros de diâmetro para altas temperaturas em aço temperado | 41 |
| 3.20 | PEEK-CF -Orientação Vertical segundo o eixo Z | 42 |
| 3.21 | PEEK-CF - Orientação vertical no plano XZ | 42 |
| 3.22 | PEEK-CF -Orientação horizontal com linhas | 43 |
| 3.23 | PEEK-CF -Orientação horizontal concêntrico | 43 |
| 3.24 | Ultrafuse PAHT-CF15 | 44 |
| 3.25 | Nozzle 0.6 milímetros de diâmetro para altas temperaturas em aço temperado | 44 |
| 3.26 | PAHT-CF15 - Orientação vertical segundo o eixo Z | 45 |
| 3.27 | PAHT-CF15 - Orientação vertical no plano XZ | 45 |
| 3.28 | PAHT-CF15 - Orientação horizontal linhas | 46 |
| 3.29 | PAHT-CF15 - Orientação horizontal concêntrico | 47 |
| 3.30 | Essentium PPS-CF15 | 48 |
| 3.31 | Nozzle 0.6 milímetros de diâmetro de altas temperaturas em aço temperado | 48 |
| 3.32 | PPS-CF15 - Orientação Vertical segundo o eixo Z | 49 |
| 3.33 | PPS-CF15 - Orientação vertical no plano XZ | 49 |
| 3.34 | PPS-CF15 - Orientação horizontal com linhas | 50 |
| 3.35 | PPS-CF15 - Orientação horizontal concêntrico | 50 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.36 | Shimadzu AGS-X 10kN | 51 |
| 3.37 | Vídeo-Extensômetro | 52 |
| 3.38 | Curva típica tensão-deformação [43] | 53 |
| 3.39 | Controlo de medidas nos provetes | 54 |
| 3.40 | Comportamento esperado dos polímeros tracionados [44] | 55 |
| 4.1 | Amostra de provetes de cada polímero de PEEK, PEEK-CF, PAHT-CF e PPS-CF, respetivamente | 57 |
| 4.2 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical segundo o eixo Z (PEEK) | 58 |
| 4.3 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação horizontal (PEEK) | 59 |
| 4.4 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical no plano XZ (PEEK) | 60 |
| 4.5 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical segundo o eixo Z (PEEK-CF) | 61 |
| 4.6 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação horizontal (PEEK-CF) | 62 |
| 4.7 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical no plano XZ (PEEK-CF) | 63 |
| 4.8 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical segundo o eixo Z (PAHT-CF) | 64 |
| 4.9 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação horizontal (PAHT-CF) | 65 |
| 4.10 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical no plano XZ (PAHT-CF) | 66 |
| 4.11 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical segundo o eixo Z (PPS-CF) | 67 |
| 4.12 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação horizontal (PPS-CF) | 68 |
| 4.13 | Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical no plano XZ (PPS-CF) | 69 |
| 4.14 | Gráfico de comparação na orientação vertical segundo o eixo Z | 70 |
| 4.15 | Percentagem de alongação na orientação vertical segundo o eixo Z | 70 |
| 4.16 | Gráfico de comparação na orientação horizontal | 71 |
| 4.17 | Percentagem de alongação na orientação horizontal | 71 |
| 4.18 | Gráfico de comparação da orientação vertical no plano XZ | 72 |
| 4.19 | Percentagem de alongação da orientação vertical no plano XZ | 72 |
| 4.20 | Orientação do filamento num provete de orientação vertical segundo o eixo Z | 73 |
| 4.21 | Orientação do filamento num provete horizontal ou vertical no plano XZ | 74 |
| 5.1 | <i>Bracket</i> original | 75 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.2 | Orientação de fabrico seleccionada para o caso de estudo | 76 |
| 5.3 | <i>Bracket</i> seleccionado | 77 |
| 5.4 | Propriedades PPS-CF | 78 |
| 5.5 | Quatro tipos de <i>load conditions</i> | 79 |
| 5.6 | Caso 1 - <i>Bracket</i> em PPS-CF com <i>Load Conditions</i> iniciais | 80 |
| 5.7 | Caso 1 - Continuação | 81 |
| 5.8 | Caso 2 - <i>Bracket</i> em PPS-CF com 5% de <i>Load Conditions</i> | 82 |
| 5.9 | Propriedades do Alumínio (ALSi10Mg) [46] | 85 |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Este documento surge da oportunidade de realização de um estágio curricular na empresa Spinner Dynamics.

A Spinner Dynamics foi fundada em 2020 para fornecer soluções tecnológicas avançadas para sistemas complexos. Com sede na região centro norte de Portugal, a Spinner Dynamics, inserida num centro de inovação em Escariz tem como objetivo acrescentar valor aos seus clientes com soluções de engenharia à medida. Tendo como missão contribuir para o desenvolvimento económico e industrial através da inovação tecnológica e engenharia de sistemas complexos.

É constituída por uma equipa de peritos que cobre vários ramos de engenharia e pode fornecer soluções desde o controlo da saúde pública até à intralogística ou automação industrial sendo o alvo deste projeto o fabrico aditivo, sendo este um dos serviços mais requisitados à empresa.



Figura 1.1: Logótipo Spinner Dynamics

1.2 Motivação e objetivos

A escolha pela tipologia de estágio advém da necessidade de implementar conhecimentos e ferramentas a projetos reais, com intuito de compreender as diferentes fases inerentes a qualquer projeto de engenharia. No contexto de crescimento da Spinnerdynamics, o presente projeto surge com o objetivo da realização de um



Figura 1.2: CI3 - Centro de Incubação e Inovação Industrial de Arouca

estudo prático de diferentes polímeros de engenharia com possíveis aplicações estruturais através do fabrico aditivo.

Entende-se como objetivos do estágio, a consolidação dos conhecimentos previamente adquiridos ao longo do percurso académico e a aprendizagem de novos processos, materiais, ferramentas, tecnologias e soluções que possam contribuir para um crescimento como profissional.

O contacto diário com os diversos constrangimentos e desafios que surgem no decorrer do processo de fabrico aditivo, contribuem para uma evolução de conhecimento técnico intrínseco ao projeto assistido por computador (CAD/CAE), permitindo uma melhor abordagem e idealização de soluções com imediata testagem e validação.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos principais entre os quais, introdução, enquadramento teórico, metodologia experimental, resultados experimentais, caso de estudo e por fim, conclusão e perspetivas de trabalho futuro.

O capítulo 1 é dedicado a uma breve apresentação da empresa, dos objetivos do trabalho a ser desenvolvido e a metodologia adotada para a sua realização.

O capítulo 2 é realizada uma breve revisão dos principais conceitos, tecnologias e

metodologias que englobam o setor de fabrico aditivo.

O capítulo 3 é apresentado o intuito deste estágio curricular bem como a metodologia adotada no desenvolvimento do projeto do estágio sendo aprofundado a forma como foi projetada e desenvolvida a componente prática envolvida na tecnologia de fabrico aditivo utilizado.

O capítulo 4 onde são expostos todos os resultados práticos experimentais obtidos no desenrolar deste trabalho. É realizada uma comparação dos diferentes resultados para cada polímero para orientação de fabrico dos provetes e um resumo dos resultados obtidos para as orientações de fabrico.

No capítulo 5 é apresentado um caso de estudo realizado após o procedimento prático sendo feita uma simulação numérica recorrendo ao software de elementos finitos ANSYS e uma análise paramétrica aos resultados obtidos.

No capítulo 6 são apresentados os resultados atingidos e demonstrada a concordância entre estes e os objetivos traçados. Por fim são apresentadas as principais conclusões obtidas com este trabalho e ainda sugeridas possíveis oportunidades de melhoria para uma futura continuação deste projeto.

1.4 Conceito de Fabrico Aditivo

Os principais processos de fabrico possuem princípios baseados na moldagem do material, que envolve ou não a sua fusão (por exemplo, vários tipos de fundição de metais em moldes permanentes, moldagem por injeção de plástico, moldagem de peças em fibra de vidro etc.) na remoção (ou subtração) de material, até se chegar à forma desejada (por exemplo, torneamento, fresagem, furação, eletroerosão, maquinagem electroquímica, etc...) na conformação, que gera a geometria final da peça a partir da deformação plástica do material inicial (por exemplo, forjamento, conformação e estampagem de chapas, extrusão, laminação, entre outros) na união de componentes (por exemplo, soldadura, brasagem, colagem, entre outros), que pode promover a junção de partes mais simples para compor uma peça mais complexa.

No final da década de 1980, um novo princípio de fabrico baseado na adição de material foi apresentado, denominado atualmente de AM, *Additive Manufacturing*. O fabrico aditivo pode ser definido como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente. Normalmente, essa representação é na forma de um modelo geométrico 3D originado de um sistema CAD (Computer-Aided Design). Esse processo aditivo permite fabricar componentes físicos a partir de vários tipos de materiais, em diferentes formas e a partir de diversos princípios [1].

O fabrico aditivo é um termo que descreve qualquer tecnologia que gera partes ou estruturas por adição, gota a gota ou camada a camada, de material [2].

Assim, fabrico aditivo é toda a tecnologia capaz de conceber objetos físicos, tendo

por base as dimensões de altura, largura e profundidade de um modelo digital fornecido por um software de computador.

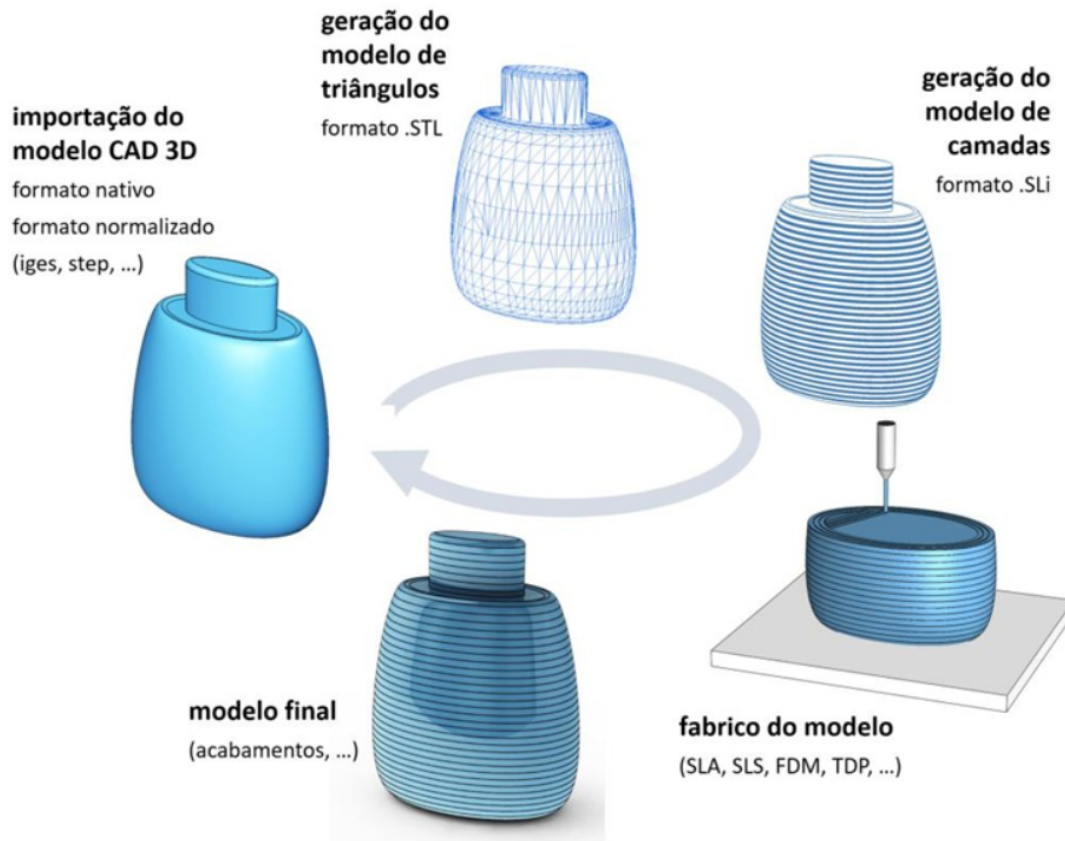


Figura 1.3: Processo de fabrico aditivo desde o modelo 3D até produto final [3]

Capítulo 2

Enquadramento Teórico

Neste capítulo é realizada uma revisão dos principais processos de fabrico aditivo, é feita uma distinção de polímeros de engenharia dos convencionais, são ainda apresentadas vantagens e desvantagens que são inerentes ao fabrico aditivo e demonstradas aplicações desta tecnologia no setor industrial.

Esta tecnologia tem merecido especial atenção e muitos consideram que estamos a atravessar uma revolução tecnológica que não só irá alterar o paradigma da conceção e do fabrico de componentes, como também dos materiais a utilizar. Dentro das suas inúmeras vantagens, podemos destacar a liberdade criativa e a elevada rapidez de concretização, permitindo a produção de peças adaptadas as necessidades do cliente ou do produto.

Neste contexto existem, atualmente, um vasto conjunto de equipamentos com diferentes tecnologias associadas, cabendo ao designer e ao engenheiro a seleção do processo mais adequado de acordo com o objetivo final.

2.1 Processo de Fabrico Aditivo

Uma parte significativa dos processos aditivos materializam a peça a produzir por camadas (*layers*), onde os modelos são construídos camada a camada (*layer oriented manufacturing*). Estes processos permitem realizar peças de elevada complexidade geométrica e “praticamente impossíveis” de obter através de meios de fabrico convencionais, nomeadamente por maquinagem.

Os processos aditivos podem ser igualmente designados por *Solid Freeform Fabrication* ou por *Layered Manufacturing*, e definem-se como um conjunto de processos tecnológicos que permitem fabricar modelos físicos tridimensionais diretamente a partir de um modelo CAD [4]. A característica comum dos processos de fabrico aditivo está no modo como os modelos são construídos, por camadas sucessivas, em que cada camada se assemelha a uma secção bidimensional que é construída uma sobre a outra até se atingir a forma final pretendida [5].

Em componentes mecânicos de pequena/média dimensão, a espessura de cada ca-



Figura 2.1: Evolução de uma impressão 3D [9]

mada é geralmente da ordem da décima de milímetro e a aproximação à geometria final do objeto tridimensional é considerada aceitável. Tal como é constatado no artigo [6], uma das vantagens dos processos de fabrico aditivo consiste no facto da geometria das peças, na maior parte das vezes, ser independente do processo de construção. Podendo uma peça complexa, constituída por uma variedade de formas e de finos detalhes, ser obtida tão facilmente como qualquer outra peça de menor dificuldade de impressão.

A peça é construída de forma automática, numa única operação e sem a necessidade de dispositivos de fixação ou operações especiais. As impressoras, ou os dispositivos que realizam o fabrico da peça que pretendemos, utilizam modelos digitais 3D provenientes de desenhos CAD ou scanners 3D para criar objetos sólidos tridimensionais num qualquer material que tenha compatibilidade com o tipo de tecnologia de fabrico aditivo que pretendemos utilizar [7].

Depois de se obter o modelo 3D da peça final, é necessário introduzir o modelo num software que realize a divisão da peça em camadas gerando um código de coordenadas, normalmente denominando G-code, que será introduzido na impressora de fabrico aditivo que iremos utilizar [8]. Neste software ou *Slicer*, podemos pré-visualizar camada-a-camada o fabrico da peça, quanto filamento iremos utilizar para aquela peça e até uma estimativa do tempo que está demorará até estar concluída. Existem muitas opções no mercado em termos de *slicers* sendo os mais utilizados neste relatório *Ultimaker Cura* e o *INTAMSUITE*.

Com a utilização destes *slicers* obtemos inúmeras possibilidades no que diz respeito à forma como pretendemos que a peça seja fabricada e até realizar pequenas alterações e melhorias que queremos fazer no modelo 3D de modo a facilitar o trabalho de impressão reduzindo o tempo e até mesmo o custo em termos de utilização de filamento. Caso seja necessário também podemos adicionar estruturas de suporte à peça de modo a garantir uma boa fixação desta à mesa de impressão como servem também de auxílio estrutural a peça que desejamos fabricar, embora exista a opção do *slicer* adicionar automaticamente, caso seja necessário, estas estruturas de suporte mas advém a possibilidade destas estruturas serem em demasia existindo um uso excessivo de filamento para a impressão destas estruturas que no fim serão removidas da peça. Caso exista um segundo *nozzle* é sempre possível especificar e utilizar um segundo filamento de menor custo para a realização destas estruturas de suporte. No decorrer deste relatório irá ser abordado de forma mais detalhada as possibilidades de gerar alterações no modelo 3D utilizando um *slicer*, mais concretamente o *INTAMSUITE 3.8.0*.

2.2 Tipos de tecnologia de Fabrico Aditivo

O fabrico aditivo é um processo que permite fabricar uma enorme variedade de artigos da mais complexa geometria a partir de modelos 3D. Na mundo da engenharia atual, existe uma vasta seleção de diferentes tipos de processos de fabrico aditivo nos quais variam o tipo de material/filamento em utilização e a forma como é adquirida a peça. A natureza deste filamento varia podendo ser um termoplásticos, resinas, pó, metal e até mesmo materiais compósitos, sendo claro que cada tecnologia de fabrico tem as suas características e naturalmente as suas limitações em termos da possibilidade de utilização de diferentes tipos de natureza dos materiais.



Figura 2.2: Diferentes tipos de tecnologia de fabrico aditivo [10]

2.2.1 Moldação por Extrusão e Deposição, *Fused Filament Fabrication (FFF)*

Fused filament fabrication também conhecido como FDM, *fused deposition modeling* é das tecnologias de fabrico aditivo mais promissoras em termos de versatilidade, fiabilidade e económicos, sendo claro que existem diversos filamentos com diversos preços e propriedades mecânicas sendo de fácil entendimento que com o aumento dos requisitos do filamento maior será o custo associado [11].

Esta tecnologia de fabrico foi desenvolvida por Scott Crump na empresa *Stratasys* [12]. É importante termos em consideração que a diferença entre as tecnologias FDM e FFF é apenas de carácter legal e não tanto tecnológico. A modelação e deposição (FDM) é uma designação para a tecnologia e marca comercial desenvolvida e patenteada pela *Stratasys*.

Num processo FFF, o primeiro passo é introduzir filamento no equipamento e garantir que não existem resíduos de outros filamentos de uma peça anterior na tubagem que serve de guia do filamento desde o enrolamento de filamento até ao extrusor. O extrusor, comum a qualquer equipamento que funcione pelo princípio de fabrico por FFF, contém geralmente um mecanismo de controlo da alimentação do filamento (tubagem), câmara de aquecimento, bico de impressora (*nozzle*) com aquecimento, plataforma com aquecimento e ventilação. Esta tecnologia permite obter protótipos com boas propriedades mecânicas, complexas e totalmente funcionais. Assim como em qualquer tecnologia de fabrico aditivo o modelo é construído camada-a-camada a partir de filamentos que são fundidos e extrudidos. A cabeça de extrusão está montada num suporte com movimentos no plano de construção efetuados a alta velocidade e controlados por um controlador. O filamento é desenrolado a partir de uma bobina por ação de um par de rodas de tração. Este passa numa zona de resistências térmicas onde é aquecido próximo do seu ponto de fusão, chegando então ao bico de extrusão. O material frio que vai sendo alimentado funciona como um êmbolo forçando a saída do material liquefeito pela extremidade do bico de extrusão [13]. Como o material é aquecido ligeiramente acima do ponto de amolecimento mas ligeiramente abaixo do ponto de fusão, este quando extrudido solidifica rapidamente aderindo à camada inferior. O bico de extrusão possui um mecanismo que permite interromper o fluxo de material fundido e está montado numa plataforma mecânica dotada de movimento nas direções horizontal e vertical. Neste processo pode haver necessidade de construção de estruturas de suporte que irão obrigar a uma remoção manual para o acabamento dos modelos [14].

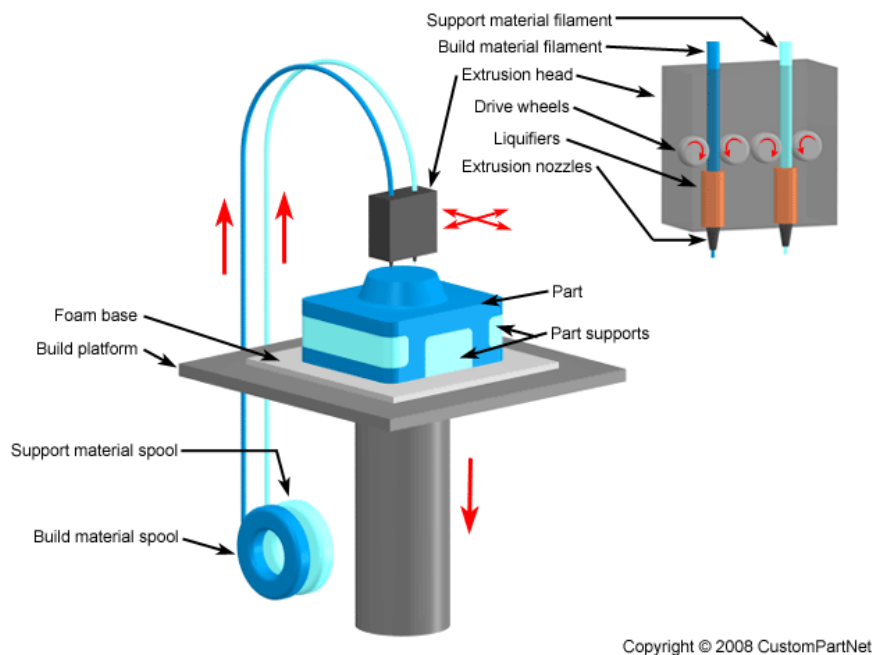


Figura 2.3: Processo de Moldação por Extrusão e Deposição [10]

2.2.2 Sinterização Seletiva por Laser (SLS)

O processo de Sinterização Seletiva por Laser (SLS) é um processo de fabrico de objetos por camadas, que recorre ao uso de um feixe de laser para produzir modelos sólidos através da sinterização de pós poliméricos, pós metálicos ou pós cerâmicos. O material de base é fornecido em pó com diâmetro entre os 20 μ m e os 80 μ m [15]. No início é depositada uma fina camada de pó sobre a área de trabalho, e um laser de CO₂ ou Nd:YAG (entre outros) faz o varrimento da superfície fazendo a sinterização das zonas em que incide, permanecendo as zonas envolventes em pó. Após a sinterização de cada camada, a plataforma de trabalho desce e é depositada uma nova camada de pó, reiniciando-se o processo de sinterização de uma nova camada e assim sucessivamente até estar produzida a peça completa.

Neste processo não são necessárias estruturas adicionais de suporte da peça durante o fabrico uma vez que o pó solto que envolve o modelo permite a sua sustentação[16].

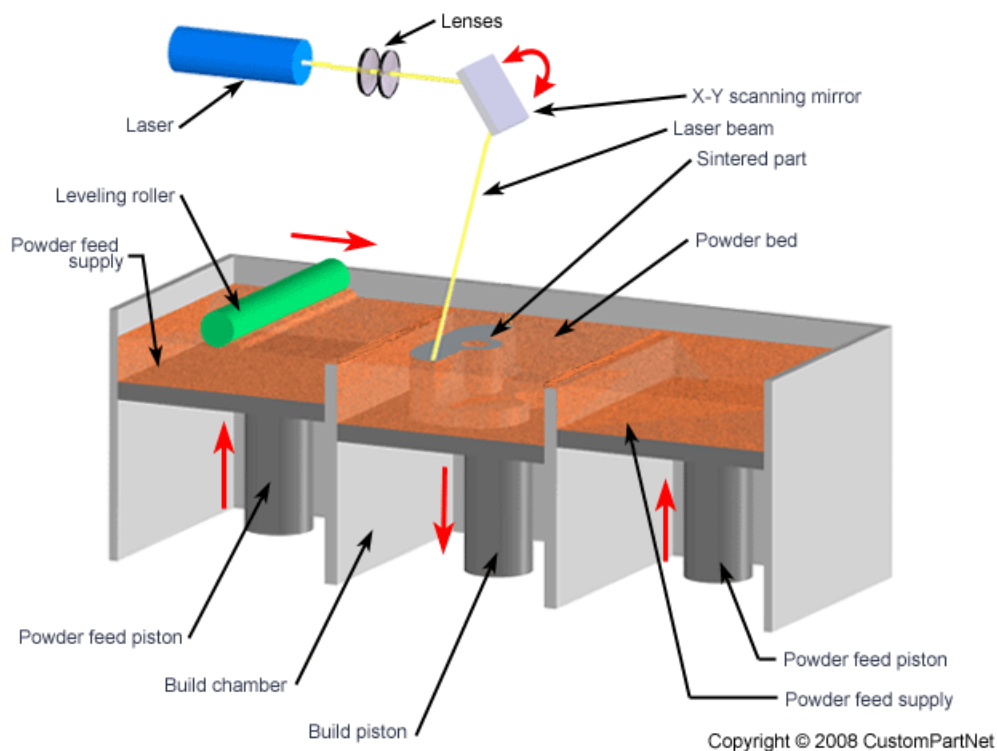


Figura 2.4: Processo de Sinterização Seletiva por Laser [10]

2.2.3 Estereolitografia (SLA)

A tecnologia de estereolitografia constrói as peças ou modelos através da fotopolimerização de uma resina líquida que é solidificada por ação de um feixe laser ultravioleta. Este processo foi considerado o processo pioneiro da prototipagem

rápida e do fabrico por camadas, tendo sido inventado em 1984 por Charles Hull e patenteado em 1986. O sistema é composto por quatro componentes principais: o computador com software que gera as camadas, o computador de controlo do sistema, o compartimento do processo e a unidade laser. Os componentes principais do compartimento do processo são a tina e a plataforma elevatória (elevador). No início do processo, a tina é preenchida com uma resina líquida fotopolimerizável (resina epóxi ou acrílica) e a plataforma de construção posiciona-se imediatamente abaixo da superfície a uma distância igual à espessura da primeira camada indo descendo sucessivamente a espessura de cada camada criada até se obter o modelo completo pretendido [17].

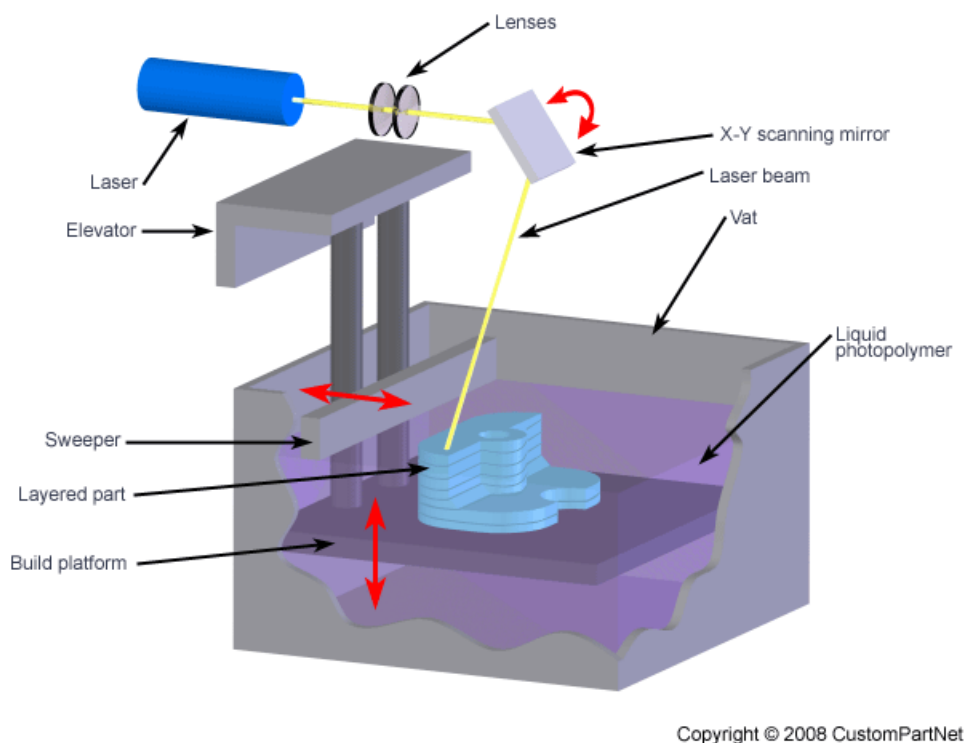


Figura 2.5: Processo de Estereolitografia [10]

2.2.4 Projeção Digital de Luz (DLP)

Esta tecnologia utiliza um projetor digital de luz (DLP) de alta resolução para solidificar uma resina líquida de fotopolímero e assim construir o modelo. A unidade de projeção digital de luz gera uma imagem inteira da camada do modelo e ao incidir sobre a resina provoca a sua polimerização. À medida que a resina de cada camada é curada, esta emerge da resina líquida, e passa-se à construção da camada seguinte até o modelo estar completamente construído [18]. Esta tecnologia processa dados voxel ao invés de píxeis e, conseqüentemente, permite uma melhor definição da superfície, maior detalhe e precisão das peças. A construção

contínua das superfícies elimina o “efeito de escada” entre as camadas. O tempo de construção do modelo depende apenas da altura total é independente da sua dimensão ou área, uma vez que a camada de resina é curada toda de uma só vez.

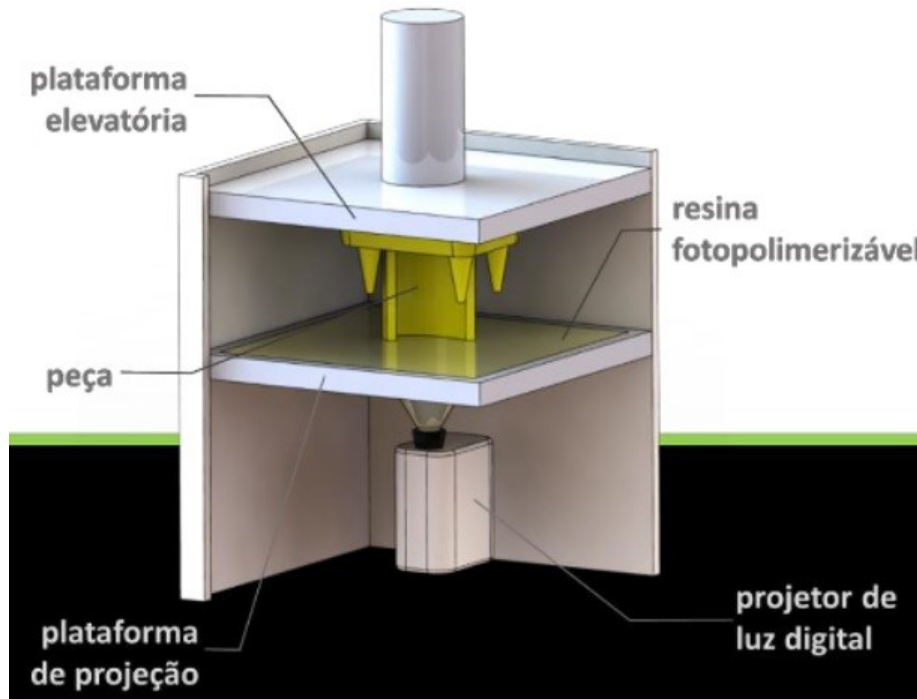


Figura 2.6: Processo de Projeção Digital de Luz [17]

2.2.5 Sinterização Direta de Metais por Laser (DMLS)

Processo idêntico ao processo de SLS com metais, mas utiliza um laser de maior potência que faz a sinterização direta de um pó metálico. O processo inicia-se com a deposição de uma camada fina de pó metálico espalhada por um rolo. A câmara de impressão é aquecida, e um laser faz o varrimento das áreas correspondentes à secção da peça, aumentando a temperatura e provocando a sinterização e solidificação dessas áreas. O restante material envolvente e onde o laser não incidiu mantém-se em pó solto. Depois de obtida a camada, a plataforma desce e é espalhada uma nova camada de pó e o ciclo repete-se sucessivamente até o modelo estar completamente construído [19]. As peças metálicas fabricadas por DMLS são obtidas a partir de pós de metal puro e apresentam propriedades e densidades idênticas ou melhores do que as peças obtidas por outros processos.

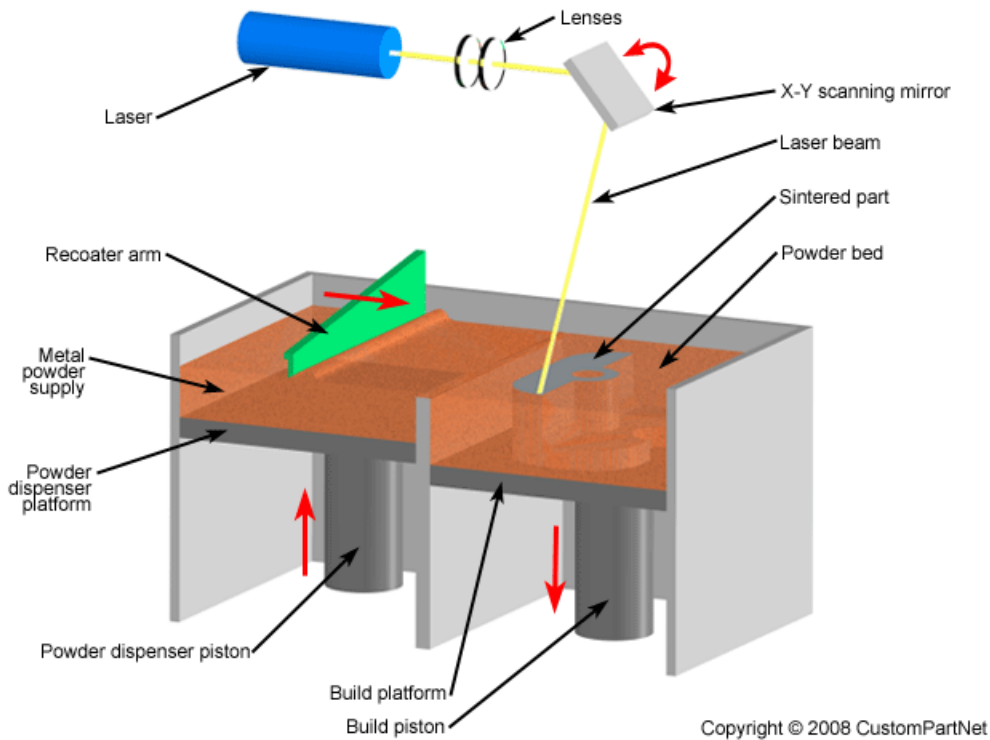


Figura 2.7: Processo Sinterização Direta de Metais por Laser [10]

2.2.6 *Selective Laser Melting (SLM)*

A tecnologia de SLM (*Selective Laser Melting*), ou Fusão seletiva a laser, é um processo de fabrico aditivo que funciona de forma similar ao processo de DMLS, mas recorre à utilização de um laser de maior potência para fazer a fusão dos materiais metálicos em ambiente inerte. O SLM ainda é um processo caro e lento. Permite a obtenção direta de peças metálicas e funcionais, com boa resolução (0,02 mm) e precisão dimensional aceitável. As tolerâncias e os acabamentos de superfície são limitados, no entanto, eles podem ser melhorados através de um processamento posterior [20]. Este processo geralmente requer estruturas de suporte, que ancoram as peças e as estruturas pendentes à plataforma de construção. Após a construção, as peças geralmente precisam de ser processadas térmicamente e as estruturas de suporte precisam de ser removidas mecanicamente.

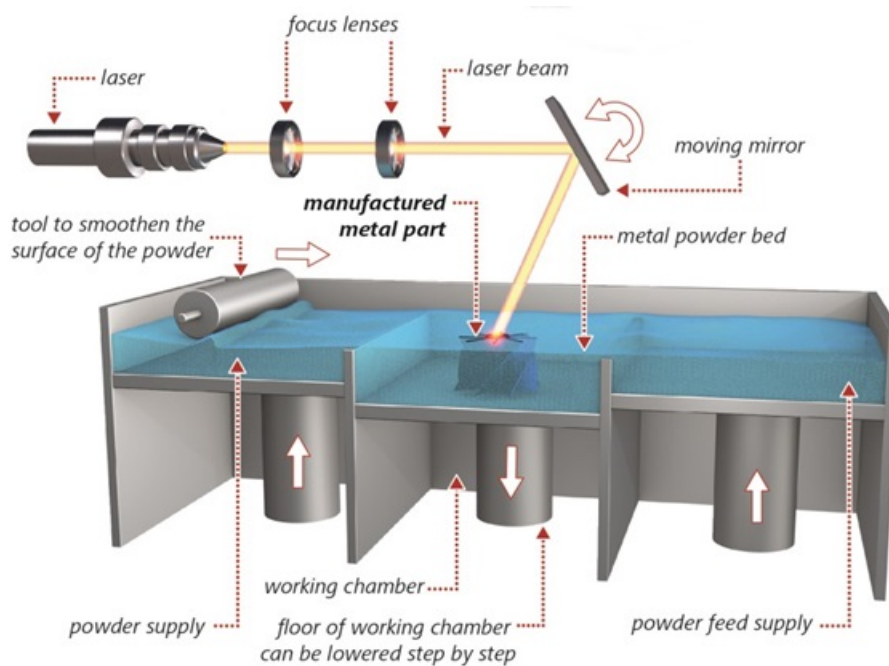


Figura 2.8: Processo de Fusão seletiva a laser [9]

2.3 Vantagens e Limitações de Fabrico Aditivo

Refletindo nos processos expostos no subcapítulo anterior, e tendo em consideração que os supra mencionados são alguns exemplos dos mais utilizados sendo que existem outros, conseguimos rapidamente encontrar alguns aspetos onde a utilização de tecnologias de fabrico aditivo oferecem múltiplos benefícios, tais como: rápida validação efetiva do design, análise formal ou funcional, comunicação rápida e eficaz de novas ideias de projeto. Permite também uma rápida realização de diferentes iterações de um produto de modo a gerar o menor número possível de defeitos de projeto sendo que tudo isto contribui para uma melhor qualidade de produção bem como melhores produtos finais.

Fazendo uma análise do conjunto total que engloba a maioria das tecnologias de fabrico aditivo, chegamos a um conjunto de vantagens e desvantagens comuns partilhados por estas tecnologias sendo os seguintes fatores os que mais contribuem para um novo conceito de processo de design e fabrico:

-Não requer montagem: Capacidade de construir montagens inteiras, em vez do fabrico em partes individuais e que necessitem de serem juntas mais tarde. Elimina custos de montagem associados ao projeto, fabrico e montagem propriamente dita.

-Baixo custo de variedade e quantidade: Qualquer objeto é virtualmente passível de ser obtido por impressão 3D. Os custos associados ao projeto são constantes para qualquer quantidade (1, 100, 10 000) tendo em conta que o custo de material usado aumenta ou diminui face ao tamanho da produção pretendida, bem como o uso de energia, tempo de fabrico e as impressoras necessárias para o

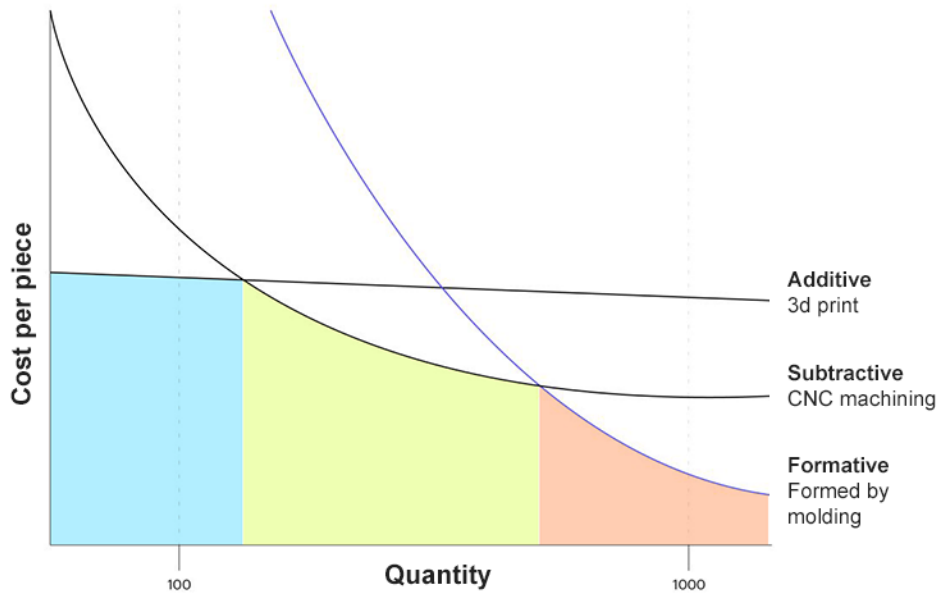


Figura 2.9: Comparação de fabrico aditivo com fabrico convencional [21]

processo de produção.

-Não necessita de qualquer conhecimento especializado: É um processo automático e acessível a todos, não sendo necessário qualquer tipo de intervenção durante o fabrico. É apenas necessário realizar uma correta calibração inicial da máquina em questão de modo a minimizar os possíveis erros de impressão. Por exemplo, em tecnologia FFF pode ocorrer um entupimento do bico extrusor o que poderá inviabilizar a impressão caso não seja detetada atempadamente.

-Redução do tempo de entrega: Num espaço de horas ou até mesmo minutos, dependendo sempre da dimensão do projeto, podemos ter em mãos o produto final do projeto sendo possível interagir com o modelo as vezes necessárias até termos um nível de satisfação pretendido.

-Inventário reduzido: Apenas é necessário garantir que existe em stock os filamentos necessários para a realização de qualquer tipo, dimensão e desempenho mecânico que é requerido para o produto final permitindo reduzir os investimentos em stock.

Estas características todas culminam numa mais rápida melhoria contínua do produto final, aumentando não só a qualidade do produto final mas também a satisfação do cliente [22].

Por outro lado, quando temos contacto direto com estas tecnologias percebemos que há sempre certas limitações durante o processo que dificultam e aumentam o tempo de impressão e muitas vezes a qualidade e acabamento da peça final.

Enumerando algumas das maiores limitações da tecnologia de fabrico aditivo, sendo algumas observadas no decorrer da componente experimental, podemos concluir que:

-Maior grau de detalhe aumenta o tempo de produção: Com o aumento do grau de precisão e da dimensão do modelo pretendido no produto final aumenta significativamente o tempo de produção sendo que pode demorar horas ou até mesmo dias.

-Má calibração dos nozzles e mesa de impressão: Diferentes filamentos de impressão requerem diferentes nozzles de impressão com diferentes diâmetros de extrusão. Isto leva a sempre que alteramos o material que iremos imprimir temos de realizar a correta calibração do conjunto nozzle e mesa de impressão. Caso esta calibração não seja feita com o maior rigor possível iremos obter peças finais com erros de impressão elevados ou iremos nem sequer obter um produto final.

-Tempo de fabrico para grandes séries de produção: Necessidades de produção em massa traduz um aumento significativo do tempo de produção, ou então um aumento do investimento em hardware sendo necessário a aquisição de mais equipamento para fazer face ao volume de encomendas realizado. Será necessário um estudo prévio se será viável ou não este investimento pois caso seja uma encomenda pontual não se justificaria.

-Resistência mecânica relativamente menor: Comparativamente ao fabrico convencional, os produtos finais poderão ter características mecânicas inferiores. É então necessário existir sempre uma avaliação previa realizando protótipos avaliando o comportamento mecânico e concluir se há condições de produção e substituição do fabrico convencional.

2.4 Polímeros de Engenharia

Polímeros de engenharia distinguem-se dos convencionais como ácido polilático (PLA) ou acrilonitrila butadieno estireno (ABS), principalmente por serem mais resistentes e dotados de maior tenacidade tendo no geral maior resistência mecânica e química. Caracterizam-se por elevada resistência mecânica, alta tenacidade, vida mais longa à fadiga, elevada estabilidade química na presença de hidrocarbonetos e ácidos, muito pouco ou praticamente não inflamáveis e elevada resistência à radiação UV. [23].

Dentro desta família de materiais existe uma grande variedade de polímeros que variam consoante os requisitos que exigimos e o seu arranjo molecular.

Entre os polímeros mais utilizados na engenharia que estão no topo a nível de performance, na pirâmide abaixo podemos observar que está dividida a meio, tendo de um lado polímeros amorfos e do outro polímeros semi-cristalinos. Importa então clarificar o que diferencia um polímero amorfo de um polímero semi-cristalino e também polímero cristalino.

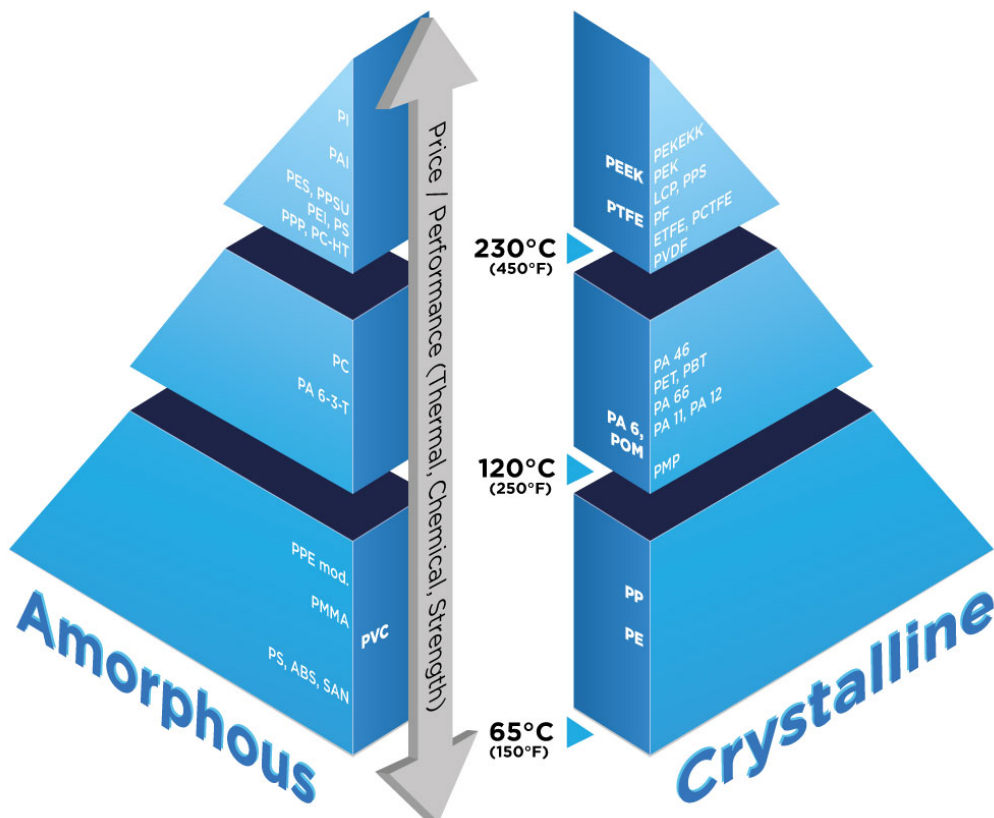


Figura 2.10: Classificação de polímeros de engenharia [24]

2.4.1 Conceito de Polímero

Um monómero é a forma molecular original a partir da qual um polímero (ou um produto plástico) é produzido. Um polímero (que também pode ser referido como uma macromolécula) consiste na repetição de unidades moleculares que são, normalmente, ligadas através de ligações covalentes.

Um polímero pode ser uma macromolécula natural ou sintética. Muitas vezes, os termos polímero e plástico são usados com o mesmo significado, mas os polímeros são uma classe que engloba os plásticos, juntamente com outros materiais, como a celulose, âmbar e borracha natural [25].

O processo de conversão de monómeros em polímeros é denominado de polimerização e os polímeros podem ser sintetizados a partir de múltiplos monómeros, como é o caso do ABS que é sintetizado a partir dos monómeros acrilonitrila, butadieno e estireno. Existem dois tipos principais de polimerização, por adição e por condensação. Na Figura (2.11), é mostrado um exemplo do processo de polimerização por adição e formação do polietileno [26].

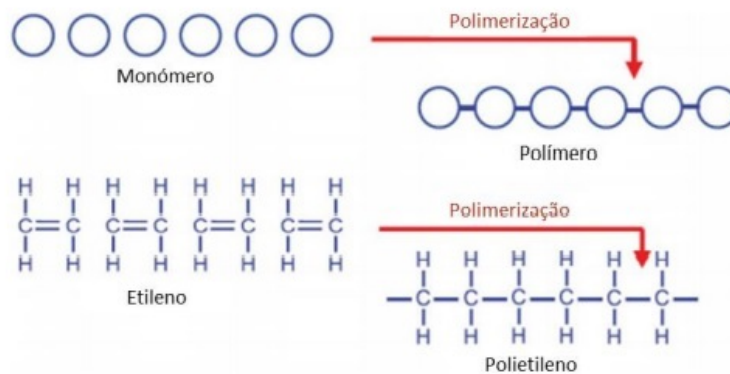


Figura 2.11: Polimerização de polietileno (Exemplo adaptado de[26])

2.4.2 Polímero Semi-Cristalino e Polímero Amorfo

A grande maioria dos plásticos pertence a um dos seguintes grupos: termoplásticos, elastómeros e termoendurecíveis. Os elastómeros são materiais que apresentam propriedades elásticas semelhantes à borracha, com características de um termoplástico e performance semelhante de um termoendurecível.

Os plásticos termoendurecíveis, geralmente apresentam maior dureza, revelando maior resistência ao impacto e mais quebradiços do que os termoplásticos e não podem ser reaproveitados, uma vez que este tipo de plástico depois de endurecido com a ação do calor, não pode voltar a ser amolecido quando exposto ao calor sem que haja degradação das ligações do material antes de ocorrer a sua fusão [27].

Os termoplásticos quando expostos a uma quantidade considerável de calor amaciam e fundem, sendo depois compactados e arrefecidos de modo a obter uma peça

sólida, este processo pode ser repetido várias vezes ao contrário dos plásticos termoendurecíveis sendo que, geralmente são menos rígidos, menos resistentes e mais dúcteis que os termoendurecíveis [26].

Tendo em conta as diferentes disposições que as moléculas podem tomar no arranjo da estrutura de um termoplástico, existem dois tipos de classificação de polímeros: amorfos ou semicristalinos. Nos termoplásticos amorfos, as moléculas estão dispostas de maneira aleatória, sem qualquer tipo de arranjo. No caso dos polímeros semicristalinos, existem certas regiões onde as moléculas estão dispostas de uma maneira organizada e estruturada [27].



Figura 2.12: Tipos de Cristalização em polímeros (adaptado de [28])

Há duas grandezas de grande importância para a caracterização dos polímeros: a temperatura de transição vítrea, T_g , e a temperatura de fusão cristalina, T_m . A temperatura de transição vítrea (do inglês, *glass transition temperature*) está associada à natureza amorfa dos polímeros. É nesta temperatura que ocorre gradualmente uma migração de um estado vítreo (sólido) para o estado líquido (plastificado) de forma gradual. Assim, abaixo de T_g , as moléculas apresentam-se quase totalmente imóveis, sem movimentação, apenas vibração parcial; acima de T_g as moléculas apresentam um aumento expressivo na movimentação sendo mais facilmente deformáveis por tensão de corte. A temperatura de fusão cristalina (do inglês, *melting temperature*) é a temperatura onde ocorre a mudança de estado, ou a mudança de fase (cristalina para amorfa) do polímero. Nesta temperatura ocorre uma alta absorção de energia para a dissolução dos cristais. Depois de T_m todo o material se encontra num estado amorfo, e caso o material seja totalmente amorfo não possuirá T_m , uma vez que não existe fase cristalina para ser transformada. Os polímeros são compostos basicamente por resinas e aditivos, sendo a resina o composto principal, conferindo nome ao polímero, e os aditivos são compostos adicionados para mudar certas propriedades do polímero, adequando-o a um uso específico.

Na seguinte figura (2.12) encontra-se as transições térmicas que ocorrem nos termoplásticos durante uma análise calorimétrica diferencial típica sendo:

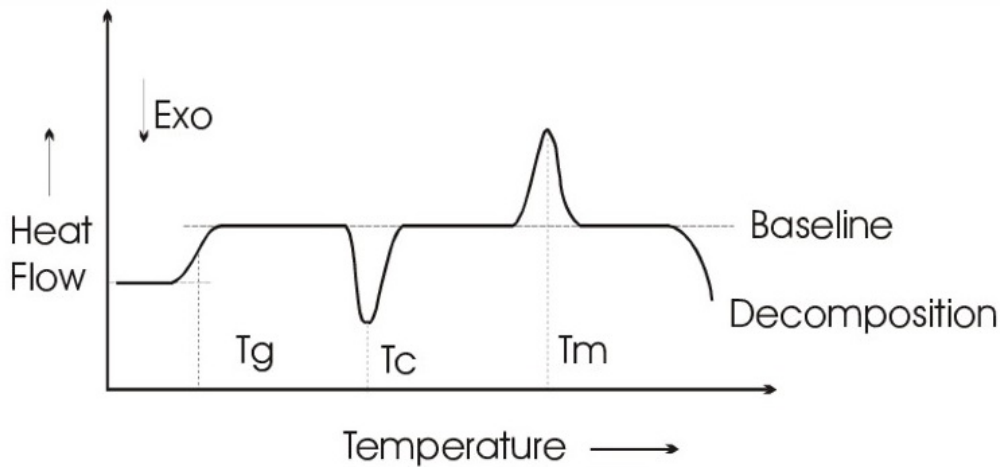


Figura 2.13: Transições térmicas de termoplásticos durante uma análise calorimétrica típica (Adaptado de [27])

2.4.3 Polímeros de Engenharia utilizados

Nesta seção do relatório estão presentes os polímeros estudados numa fase inicial do estágio. Na empresa, Spinner Dynamics, existe em stock uma grande variedade de polímeros de engenharia e de modo ao projeto ser desenvolvido era necessário fazer uma seleção. É importante voltar a lembrar que a empresa onde foi realizado este estágio é uma empresa que se dedica a Fabrico aditivo, e como tal, tem a necessidade de ter à disposição um portefólio de materiais previamente estudados de modo a estar apta a fabricar qualquer tipo de protótipo ou peça requisitada por um cliente com as mais diversas características mecânicas, desde termoplásticos de fácil impressão e a baixas temperaturas como é o caso de PLA ou ABS, até ao mais recente polímero de engenharia como por exemplo PEEK ou PEEK-CF pertencentes à família PAEK.

Então, de modo a acrescentar algo a este portefólio pré-existente da empresa, foram-me indicados 4 polímeros de engenharia que ainda não tinham sido impressos mas que existiam em stock, sendo estes PEEK, PEEK-CF, PAHT-CF, PPS-CF.

2.4.4 Polímeros de base poliaril-éter-cetona (PAEK)

No mundo da impressão 3D FDM/FFF a família PAEK (*polyaryletherketone* ou poliaril éter cetona) é a família de polímeros de engenharia que ganhou destaque. Os materiais que pertencem a esta classe são polímeros de alta temperatura, que resistem altas temperatura mantendo altos valores de resistência mecânica.

Dentro da família PAEK existe o PEEK, o PEKK e o PEI (ULTEM 1010 e ULTEM 9085) entre outros. Todos estes apresentam alta resistência mecânica, resistência química e alta temperatura de inflamabilidade. Esta família distingue-se dos polímeros convencionas devido as seguintes características[29][28]:

-Baixa emissão de gases;

Os constituintes desta família têm emissões mais baixas de gases tóxicos comparando a qualquer outro material termoplástico.

-Excelente tenacidade e resistência ao desgaste;

Por exemplo, a resistência ao "corte" de revestimentos de fios condutores é muito superior à da maioria dos outros plásticos resistentes ao calor.

-Excelente resistência à fadiga;

-Excelente estabilidade hidrolítica;

Resistência à água quente a 125°C, em que condições outros plásticos resistentes ao calor, tais como as poliamidas, são susceptíveis de falhar.

-Boa resistência à radiação.

Sem degradação significativa abaixo de 1100 Mrad, sendo o fator de dissipação é uma característica importante a ser considerada em situações nas quais os plásticos podem potencialmente ser expostos a tais ondas eletromagnéticas e descreve a proporção de energia que pode ser absorvida pela plástico, conhecida como absorção de radiação do polímero.

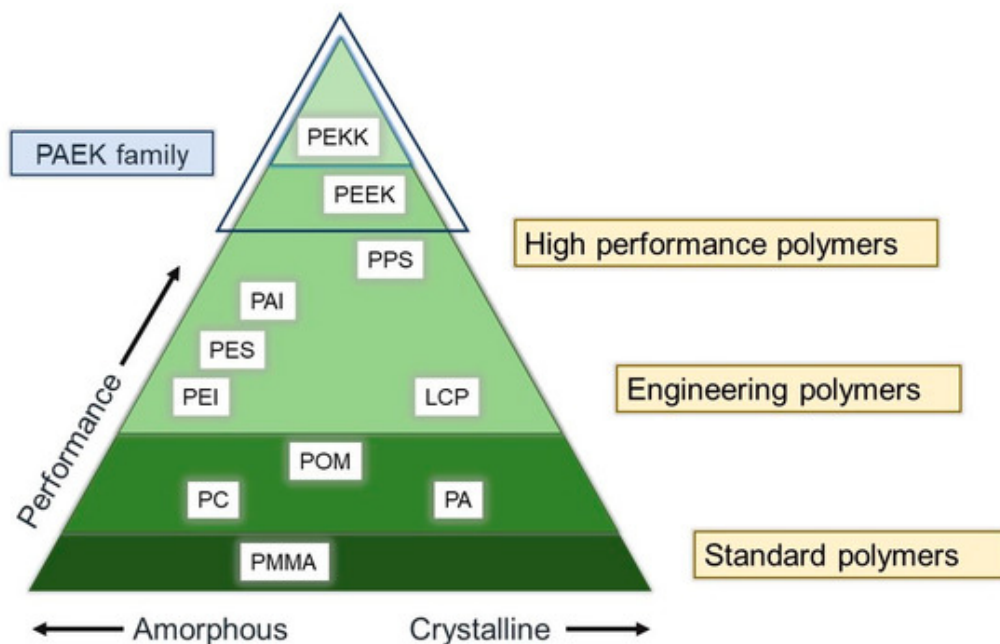


Figura 2.14: Família de polímeros PAEK (adaptado de [30])

2.5 Processo de produção de filamento - Extrusão

Como o processo de fabrico aditivo utilizado neste estágio foi moldação por extrusão e deposição, ou fused filament fabrication (FFF) foi interessante perceber então como é feita a fabricação dos filamentos utilizados.

O processo de extrusão de plástico começa com a seleção do material polimérico em forma de granulado ou pó. Este posteriormente é alimentado por um fúnil e é conduzido por um fuso, que o impulsiona ao longo de todo o processo. Esta é a parte mais importante do processo e diversas variáveis como a temperatura de processamento, tipo de fuso e a velocidade do processamento devem ser consideradas. Tais variáveis dependem, obviamente, das características do material a ser processado [31].

O fuso pode ainda ser dividida em três zonas, correspondentes às etapas do processamento. São elas a zona de alimentação, compressão e a dosagem, que representam 50, 25 e 25 % do comprimento do fuso, respetivamente. O diâmetro do fuso aumenta ao longo dessas etapas, ou seja, o raio da rosca aumenta ao longo do cilindro de plastificação, o que também proporciona a geração de calor por atrito (shear heat). Este calor gerado e o fornecido ao sistema, no cilindro de plastificação, permitem a fusão do material polimérico e o aquecimento deste até à temperatura de processamento definida para o material. No final do processo o material fundido é forçado através de um orifício com forma e dimensões desejadas para a obtenção do perfil desejado sendo este de 1.75mm de diâmetro.

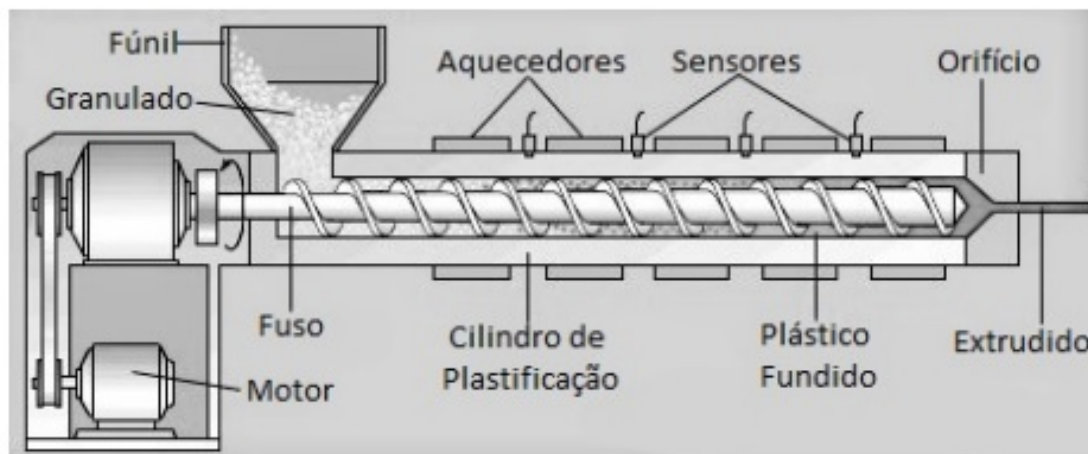


Figura 2.15: Processo de extrusão de polímeros (adaptado de [31]).

2.6 Aplicações em engenharia

O fabrico aditivo e o fabrico convencional não se diferenciam exclusivamente pelos processos de produção mas também na gestão de todo o processo, como por exemplo no investimento envolvido no fabrico até aos tempos de resposta a clientes. Citando Joe Allison, Chief Executive Officer (CEO) da Stratsys Direct, uma das maiores empresas no setor de impressão 3D, “3D printing’s greatest value is not as a technology, but as an enabler to derive greater business value.” as organizações têm a capacidade de aumentar o seu valor ao estudarem e aplicarem a tecnologia de impressão 3D nas suas atividades, não apenas pelas diferentes possibilidades de produção, redução de custo, tempo, aumento da qualidade e inovação do produto, mas, sim como um catalisador para a evolução das cadeias de abastecimento através da produção descentralizada, adoção de processos just-in-time, sendo este um conceito que permite as empresas redução de custos no armazenamento de peças ou produtos em stock, e produção adaptada ao cliente [22].

Fazendo uma análise aos setores industriais da atualidade facilmente encontramos referências a setores de produção que recorrem a tecnologia de AM. De seguida é feita uma listagem destes setores industriais dado um exemplo atual da utilização de tecnologia de AM dentro no setor.

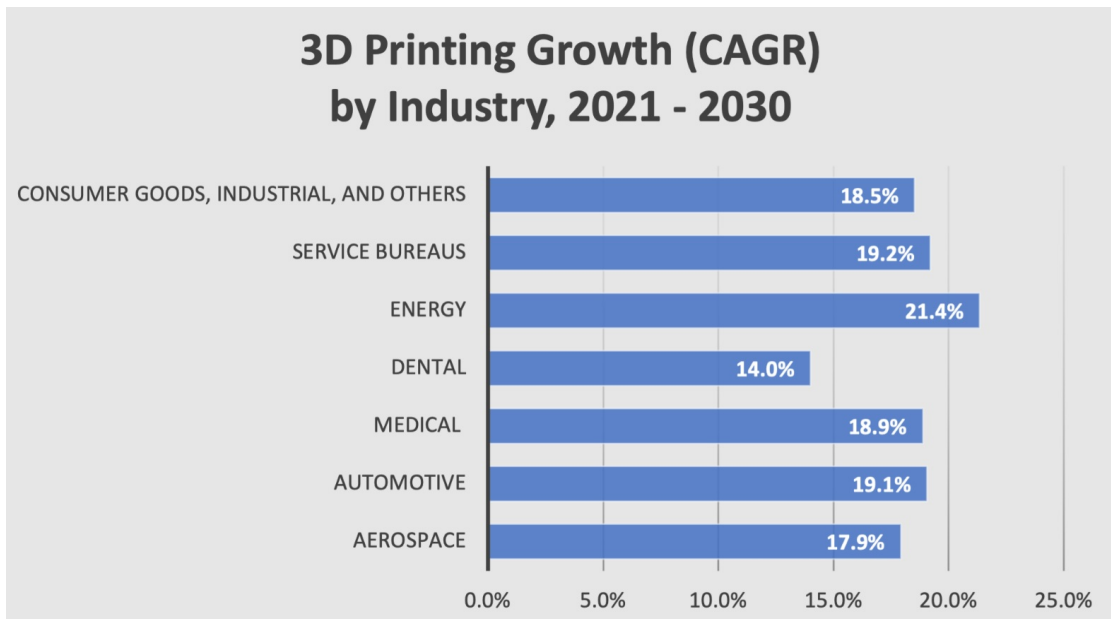


Figura 2.16: Previsão anual de crescimento impressão 3D por indústria [32]

Indústria automóvel: Em 2019 foi fundado um consórcio de 12 empresas e institutos de investigação pertencentes à associação alemã de automóveis, formando o actual IDAM, Industrialization and Digitalization of Additive Manufacturing. Este consórcio, dirigido pelo grupo alemão BMW Group, surgiu com o objetivo de revolucionar a forma estandardizada de produção de carros [33].

Recorrendo ao processo de produção de fabrico aditivo, Laser Powder Bed Fusion (LPBF), o grupo BMW afirma ter capacidade de produzir 50.000 peças anuais bem como 10.000 novas peças de design inovador graças a esta tecnologia de produção [34]. Este processo poderá a vir mais tarde ser utilizado para o setor automóvel de carros clássicos dada a capacidade de produção de qualquer tipo de peça suprimindo a necessidade da reutilização de peças antigas.



Figura 2.17: Processo LPBF BMW Group [34]

Indústria Aeroespacial: elevada complexidade de peças é algo comum neste setor industrial onde o fabrico aditivo aliado da otimização topológica que é um método matemático que otimiza um layout de uma peça ou componente permitindo melhor resistência mecânica e uma redução de peso significativa.

Facilmente se entende o porquê da utilização de fabrico aditivo neste setor onde os requisitos são rigorosos e a constante procura pela redução de peso traduz em diminuição de consumos de combustíveis uma realidade constante, faz com que os avanços tecnológicos neste setor se traduza também num avanço tecnológico no fabrico aditivo [35].

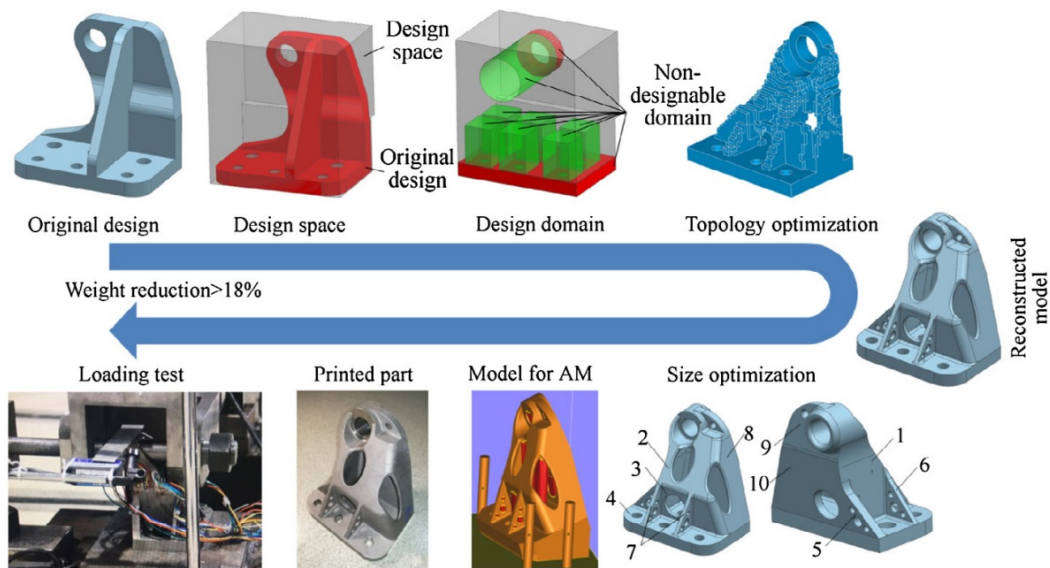


Figura 2.18: Otimização topológica e fabrico aditivo [35]

Indústria Médica e Ortodontia: No ramo da ortodontia têm sido feitos grandes avanços. O aparelho convencional, denominado de brackets foi praticamente substituído pelo aparelhos invisíveis chamados invisalign. Estes novos aparelhos de correção dentária são fabricados por estereolitografia, ou em inglês Stereolithography(SLA). De forma resumida, este processo começa por fazer um scan aos dentes do paciente e introdução num software da invisalign onde um algoritmo define quantos aparelhos serão necessários para o tratamento. Depois de serem definidos o número de aparelhos necessários a produção dos mesmos pode começar. Através do scan previamente feito, é feito em resina através do processo SLA o molde físico 3d dos dentes do paciente sendo fabricado com precisão e rigor [36].



Figura 2.19: Brackets e invisalign [36]

Dependendo dos polímeros utilizados também já começa a ser mais comum a utilização de polímeros de engenharia, como é o caso de PEEK no fabrico de implantes dentários, próteses, instrumentos cirúrgicos entre outras aplicações. Em 2018, teve lugar num hospital chinês a primeira intervenção onde foi colocado um implante clavicular em PEEK [37].

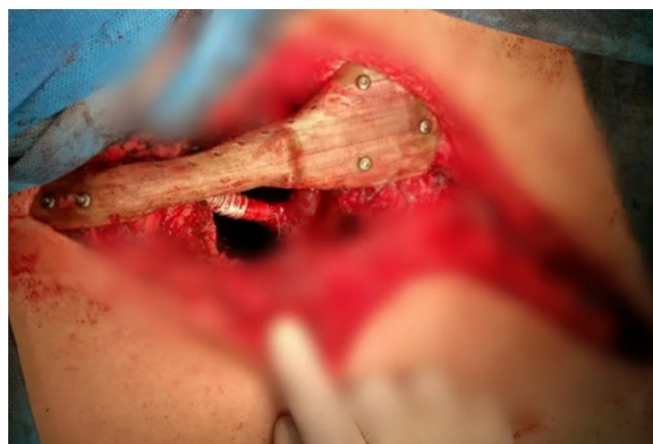


Figura 2.20: Implante clavicular em PEEK[37]

Indústria de Moldes e Ferramentas: Inovação e criação de novos e mais complexos protótipos, assim como novos moldes que permitem a criação de formas e feições dificilmente obtidos por meios convencionais são as principais características que levam cada vez mais a utilizar tecnologia de impressão 3d neste setor. No setor da cerâmica onde a utilização de moldes feitos por fabrico aditivo pode proporcionar baixo volume de produção e produtos altamente personalizados para o cliente.

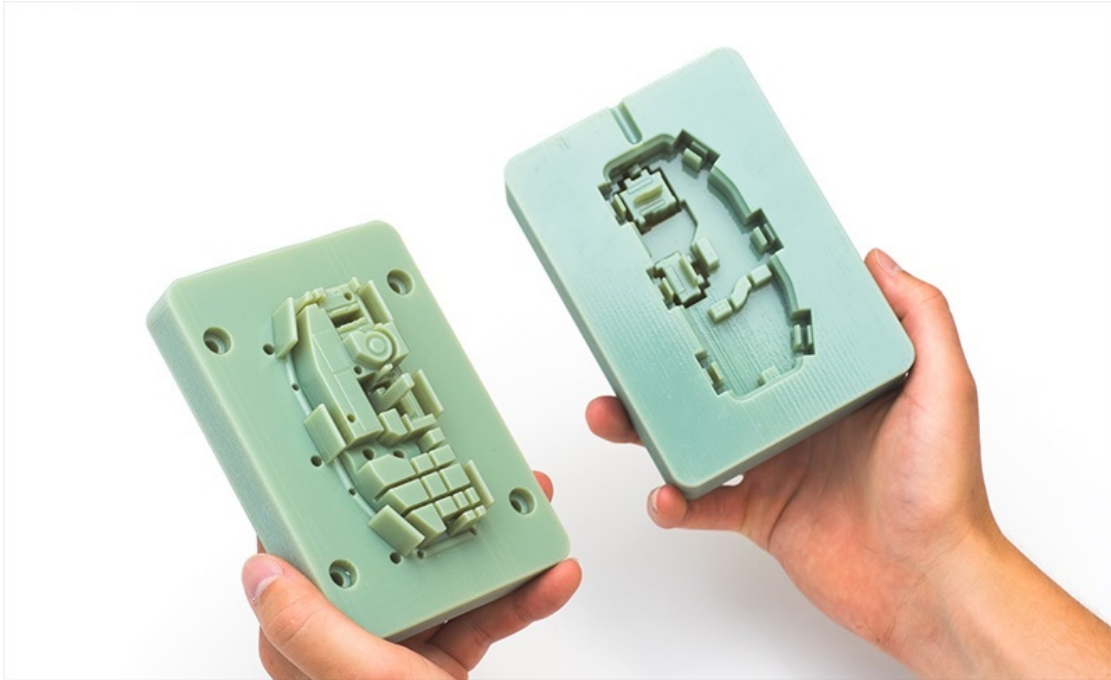


Figura 2.21: Molde feito por fabrico aditivo

Indústria de Energia: Um dos objetivos neste setor é transitar e minimizar a queima dos combustíveis fósseis como petróleo, gás natural e carvão para fontes renováveis como eólica, solar, energia das marés e hídrica. O fabrico aditivo veio ajudar nesta transição dado que permite produzir peças mais leves e com melhor desempenho; minimizar o desperdício de matéria-prima; otimizar o inventário de peças e otimizar também a gestão da cadeia de logística.

O polímero PEEK também aplicação em anéis de vedação em condutas de petróleo e gás, isoladores elétricos, componentes de bombas e compressores e até conectores elétricos.

Capítulo 3

Metodologia Experimental

No presente capítulo é apresentada a metodologia seguida para o desenvolvimento prático deste estágio. Está presente todo o processo desde a introdução do filamento a imprimir, da troca de *nozzle* de impressão apropriado para o polímero e temperatura bem como toda calibração do material através de uma sucessão de testes de impressão para garantir as corretas dimensões das peças entre outros aspetos como os equipamentos utilizados nas instalações da empresa. Neste caso, para o fabrico aditivo, foi utilizado um equipamento de FFF industrial do fabricante Intamsys, modelo Funmat Pro 410. O objetivo deste capítulo é a apresentação do procedimento experimental desenvolvido para a empresa Spinner Dynamics para a correta calibração/impressão dos polímeros.

3.1 Etapas de calibração de um novo polímero

De modo a avaliar o comportamento mecânico de algum polímeros de engenharia em uso na empresa, foi realizado um guia de procedimentos sendo este seguido para cada polímero em questão, por forma a haver uma correta impressão e minimização do desperdício de filamento juntamente com a rentabilização do tempo disponível para realizar as impressões.

Podemos então definir esta calibração dos novos filamentos em duas etapas, pré-impressão onde é verificado o correto funcionamento da impressora minimizando ao máximo a probabilidade de erros durante a impressão causados por exemplo pelo entupimento do sistema de alimentação de filamento dos nozzles da impressora; calibração da mesa de impressão juntamente com uma calibração dos nozzles (são dois que constituem a impressora); verificação ou substituição do nozzle com o diâmetro e propriedades mecânicas apropriadas ao material e temperatura de impressão; verificação da correta adesão do filamento extrudido na mesa de impressão. A segunda etapa, Impressão, é um processo iterativo (folhas de cálculos no anexo A) onde realizamos três testes de impressão até termos uma correta impressão tanto a nível de acabamento superficial, estrutural e dimensional em cada teste.

Depois de termos a realizado todos os passos da pré-impressão foram iniciados os testes que vão ser apresentados e descritos no seguinte sub-capítulo.

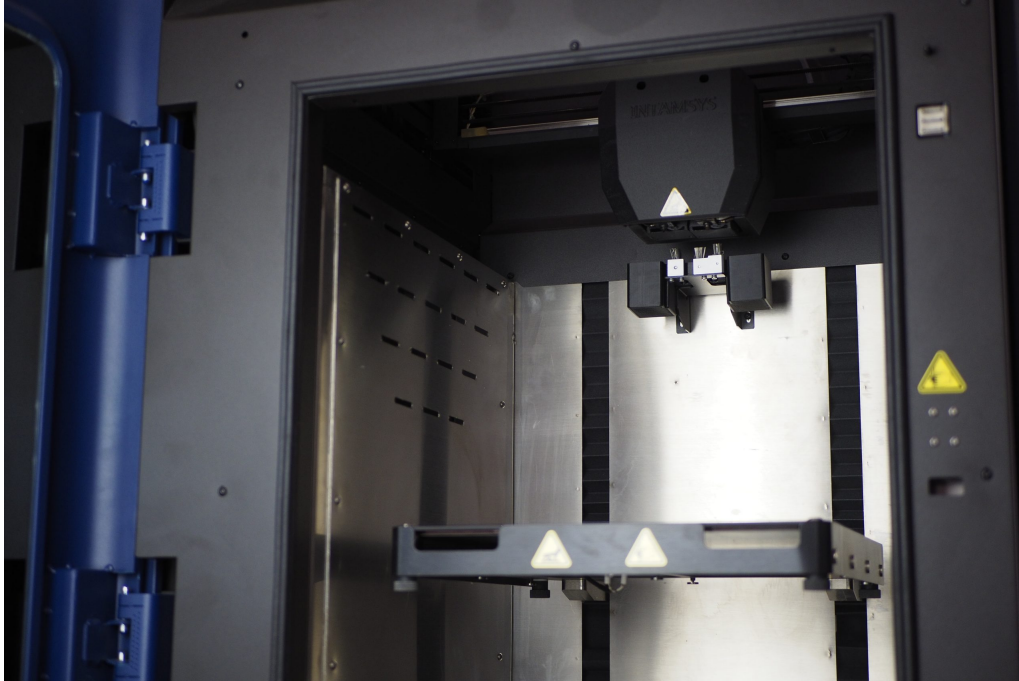


Figura 3.1: Intamsys funmat pro 410 - mesa de impressão

3.1.1 Calibração 1 - Cubo sem preenchimento 20x20x20 mm

O primeiro teste a realizar é a impressão de um cubo de dimensões 20x20x20 milímetros sem preenchimento com o objetivo de afinar os parâmetros de impressão definidos no software onde introduzimos a peça a imprimir, neste caso um cubo. Este teste também tem a finalidade de verificar se há uma boa adesão da primeira camada pois caso a peça se solte durante a impressão irá inviabilizar e acabar por não ser uma impressão bem sucedida. Na figura 3.2 o cubo é formado por 2 linhas de 0,4mm logo estão validados os parâmetros de impressão para este primeiro teste.



Figura 3.2: Calibração 1 - Exemplo de um cubo em PEEK sem preenchimento, para controlo dimensional

3.1.2 Calibração 2 - Torre de retração

Após termos validado a espessura das paredes que formam o cubo realizamos o teste onde imprimimos uma torre de retração. Tal como o nome indica esta torre serve para testar a retração de filamento durante a impressão. A retração de filamento é medida em milímetros e corresponde a quantos milímetros são recolhidos de filamento entre a impressão de diferentes camadas que constituem a peça. É um teste muito importante pois permite imprimir de forma a não existir arrasto de material desnecessário entre as diferentes camadas da peça sendo estas causadas ou pelo excesso de material a ser depositado que não é totalmente recolhido após impressão da camada, por uma temperatura de extrusão demasiado elevada para o material ou até pelo movimento ascendente de afastamento do nozzle da parte da peça já feita onde este afastamento caso seja com uma velocidade muito elevada pode fazer um efeito de arrasto de material que ainda não está totalmente depositado na camada.

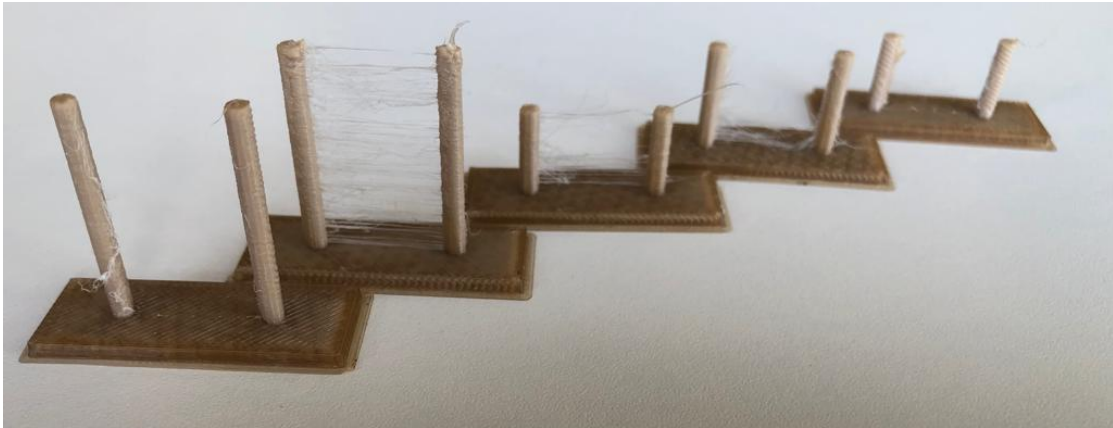


Figura 3.3: Calibração 2 - Evolução do teste para a torre de retração

3.1.3 Calibração 3 - Cubo preenchido 20x20x20 mm

Este teste final serve como confirmação dos parâmetros resultantes dos dois testes anteriores. Ao termos o cubo completo conseguimos saber com precisão quais as medidas finais de cada parede do cubo. Não é necessário o cubo ter um preenchimento de 100% até porque seria um desperdício enorme de matéria prima, um preenchimento entre 30% a 40% será suficiente.

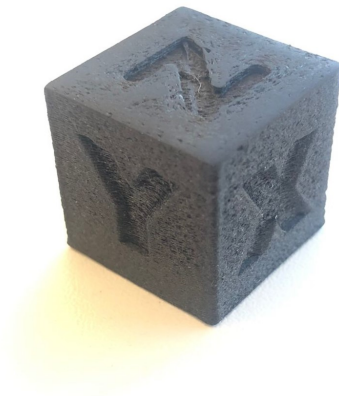


Figura 3.4: Calibração 3 - Exemplo de um cubo preenchido em PAHT-CF

3.2 Desenho da experiência a realizar

O foco destas calibrações apresentadas anteriormente é chegar aos melhores parâmetros de impressão do polímero em questão de forma a haver a maior homogeneidade possível quando avançarmos para a seguinte etapa deste procedimento expe-

rimental. Esta etapa seguinte consiste no fabrico de provetes segundo a norma ISO 527 5A, para cada polímero sobre três orientações diferentes para posteriormente serem sujeitos a ensaios de tração uniaxiais sendo possível retirar conclusões acerca do comportamento mecânico de cada polímero de engenharia, daí ser de máxima importância as calibrações realizadas anteriormente de forma a todos os provetes, embora que impressos segundo orientações diferentes, tenham as dimensões desta norma ISO com o menor erro dimensional possível.

3.3 Desenho do provete em análise

O provete selecionado como modelo de teste foi escolhido dentro dos ISO disponíveis para a realização de ensaios de tração uniaxial sendo ISO 527 5A o que tem melhor dimensão de forma a existir uma boa adesão entre nas amarras da máquina de tração axial Shimadzu AGS-X 10kN.

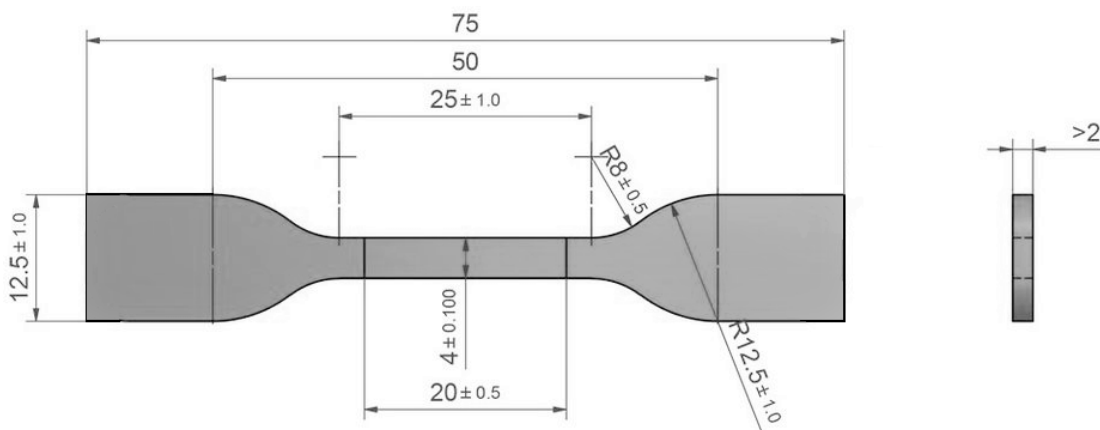


Figura 3.5: Proвете ISO 527 5A [38]

3.4 Intamsys Funmat Pro 410

Nas instalações da empresa Spinner Dynamics constam dois equipamentos de tecnologia FFF, sendo utilizada para este trabalho a Intamsys Funmat Pro 410 uma vez que é considerada e equipada como um equipamento de alto desempenho. A FUNMAT PRO 410 é uma impressora de termoplásticos de alta temperatura. Construída para peças de elevado nível de engenharia em setores como aeroespacial, automóvel e energia, o valor da impressora é derivado em grande parte de suas extensas capacidades produção utilizando polímeros de engenharia como material de filamento.

Além de imprimir praticamente qualquer material à base de polímero no mercado, a FUNMAT PRO 410 também oferece um cabeça de impressão de dupla extrusão embora não tenha sido necessário para este projeto, o que permite a realização de

uma impressão com dois filamentos distintos sendo uma grande vantagem quando temos uma peça que necessita de estruturas de suporte não sendo necessário a criação de suportes com o mesmo filamento que constitui a peça o que permite reduzir bastante o custo de impressão. Este material que servirá para construção das estruturas de suporte terá de possuir características semelhantes ao material da peça uma vez que as temperaturas de extrusão, da mesa de impressão e da câmara de aquecimento deverão ser o mais próximas possíveis. Tem também um amplo volume de construção de 305 x 305 x 406 mm. A câmara de impressão atinge um valor máximo de 90 °C, a mesa de impressão 160 °C e os bicos extrusores uma temperatura máxima de 500 °C. Estas são características conferem uma vasta capacidade de imprimir os mais recentes polímeros termoplásticos de alta temperatura que permitiu a realização deste projeto.



Figura 3.6: Intamsys Funmat Pro 410

3.5 Impressão dos provetes

Neste subcapítulo é demonstrado como foi realizada a impressão dos provetes. Foram realizadas impressões em diferentes orientações de impressão. Orientação vertical segundo o eixo Z , orientação vertical no plano XZ e orientação horizontal de forma a serem obtidas curvas de Stress-Strain passíveis de mais tarde serem utilizadas na simulação numérica abordada no último capítulo deste relatório de estágio aplicando a um caso de estudo.

O objetivo destas diferentes orientações de impressão é ser caracterizado e comparado o comportamento do polímero quer durante a impressão quer durante os ensaios de tração mecânica. Para a impressão dos provetes foi utilizado o *slicerIntamsuite*, que é o software que realiza a divisão em camadas da peça que queremos imprimir.

Neste *slicer*, é possível realizar todo o tipo de alterações na peça, desde o seu acabamento superficial, ao número de linhas que formam o interior das peças, chamado *infill* ou preenchimento, à temperatura de extrusão do material, à adição de estruturas de suporte, até à espessura de camada que queremos definir na peça, sendo claro que com a diminuição da espessura de cada camada aumenta o tempo necessário para a produção dos provetes estar finalizada.

Depois de concluir no *slicer* todas as propriedades de impressão pretendidas e as geometrias da peça é feito o upload para o equipamento de produção que iremos utilizar e ir vigiando durante a impressão se ocorre algum erro que poderá inviabilizar a impressão como por exemplo uma má adesão da primeira camada de impressão ou até mesmo um entupimento do extrusor.

3.5.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

Para ser possível o fabrico dos provetes na orientação vertical foi utilizada uma torre auxiliar circular como representado na figura 3.7.

Existem poucas diferenças entre a estrutura de suporte e os provetes, sendo o material de impressão comum. Então o que os difere é o seu *infill*, naturalmente nos provetes é de 100% e o *infill* na estrutura de suporte é de 25% de modo a haver o menor desperdício possível de material mas garantindo uma boa estrutura de fixação dos provetes ao suporte que impeça movimentações indesejadas dos provetes durante o processo de fabrico.

Esta orientação apenas serve para medir a adesão entre camada do polímero dada a natureza de um ensaio de tração uniaxial. Neste caso de orientação vertical segundo o eixo Z , temos a força a ser aplicada na perpendicular em relação à orientação das camadas que constituem o provete, então este será, à confirmar com os ensaios práticos, a orientação que menos resistência à tração será capaz de suportar antes da rotura.

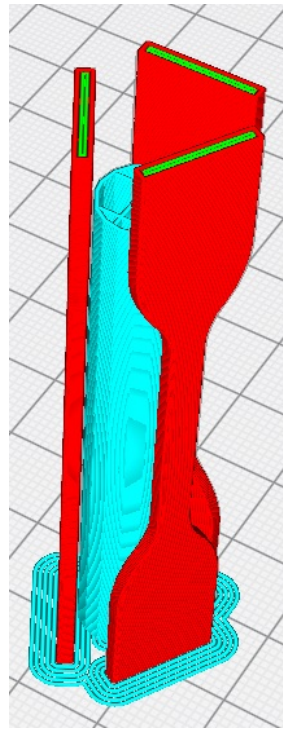


Figura 3.7: Slicer Intamsuite - Orientação vertical segundo o eixo Z

3.5.2 Orientação Vertical segundo o plano XZ

Com esta orientação vertical já é possível testar as propriedades do polímero dado que as camadas de linhas que formam o provete, como podemos ver na figura 3.8, são paralelas à direção das forças submetidas durante o teste de tração uniaxial. Como a força é paralela à direção das camadas iremos ter uma resposta do material mais realista, onde mais tarde, com as curvas de tensão-deformação será possível calcular o módulo de Young, força máxima suportada pelo provete antes da rotura e, consoante o polímero em questão, qual a % de alongamento do provete.

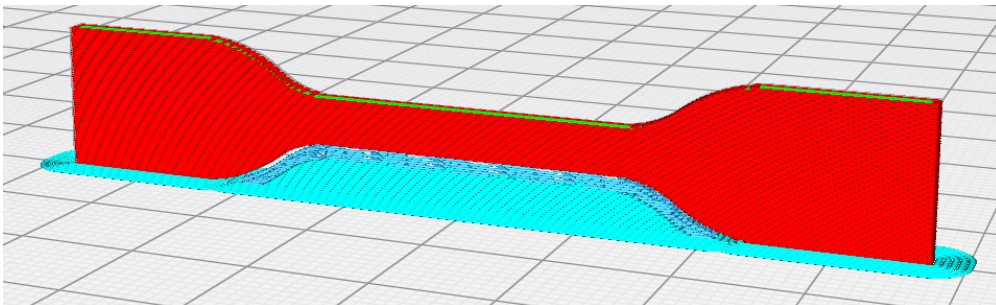


Figura 3.8: Slicer Intamsuite - Orientação Vertical no plano XZ

3.5.3 Orientação Horizontal com *infill* de linhas ou concêntrico

Tal é comum as tecnologias de fabrico aditivo é possível efetuar pequenas alterações de forma expedita que podem resultar em características muito distintas sendo estes detalhes explorados nesta última direção de impressão.

De forma a concluir se a estrutura de suporte poderá influenciar nas propriedades mecânicas do provete utilizamos estas duas últimas orientações horizontais.

Na Figura 3.9 é perceptível a diferença entre os provetes, em que a sua impressão apenas diverge na forma como é feito o preenchimento do provete. No provete de cima, um preenchimento com linhas e em baixo com um preenchimento concêntrico.

Para concluir se a estrutura de suporte na orientação vertical no plano XZ poderá influenciar nas propriedades mecânicas finais do provete utilizamos estas duas últimas orientações horizontais com estas iterações de *infill* de forma a confirmar os dados obtidos na orientação anterior dado que ambas as direções serão tracionadas com a força aplicada paralelamente à direção das linhas que formam as camadas constituintes dos provetes.

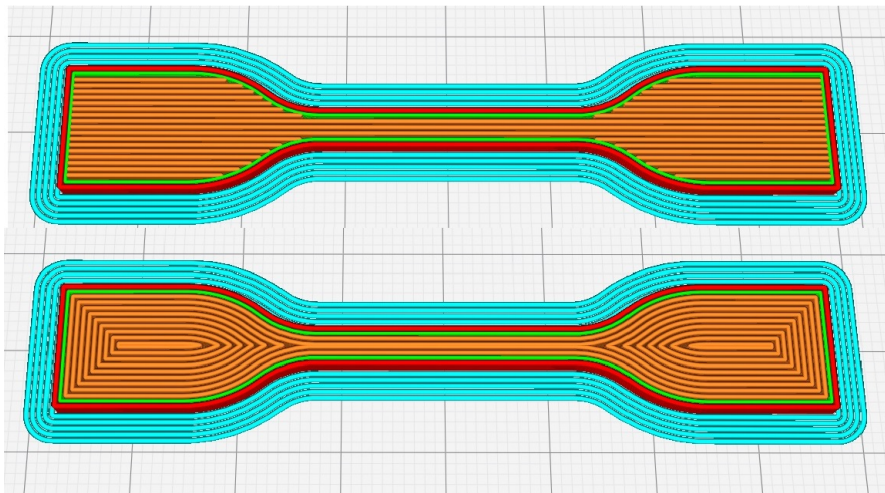


Figura 3.9: Slicer Intamsuite -Orientação Horizontal linhas e concêntrico

3.6 Poli-éter-éter-cetona - PEEK



PEEK

INTAMSYS

Figura 3.10: Intamsys PEEK

O polímero poli-éter-éter-cetona, comercializado pelo fabricante Intamsys, é um dos mais avançados filamentos comercializados pela marca.

Os filamentos são vendidos em rolos, sendo o seu preço definido naturalmente pelo peso de cada um. Normalmente em rolos de 500 gramas e o filamento com um diâmetro de 1.75 milímetros sendo que o preço de mercado deste filamento PEEK ronda os 400 euros [39], sendo um enrolamento de 500 gramas.

Mediante o polímero que vamos imprimir temos de escolher qual o nozzle de impressão adequado sabendo que caso seja desejado um bom acabamento su-

perficial quanto mais pequeno for o diâmetro deste nozzle mais precisão e detalhe será alcançado.

Neste caso de PEEK foi utilizado um nozzle de altas temperaturas, dado que a extrusão do filamento ocorre por volta dos 400 graus Celsius, com um diâmetro de 0.4 milímetros.

Tal como foi explicitado nas etapas de calibração para um novo polímero e depois de ser conseguido a validação dos diferentes tipos de teste de calibração para PEEK foi iniciado a impressão dos provetes.



Figura 3.11: Nozzle 0.4 milímetros de diâmetro em aço temperado para altas temperaturas

3.6.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

Começou-se por esta orientação uma vez que, à partida, iria implicar uma maior dificuldade pois nesta fase ainda não se sabia se esta forma de fabrico com a estrutura de suporte seria suficiente para uma boa qualidade de impressão dos provetes. Foram realizadas três versões desta orientação com o objetivo de melhorar e aproximar ao máximo as dimensões dos provetes da norma ISO utilizada. As principais diferenças entre as versões é na velocidade de impressão pois dada a orientação dos provetes ser na vertical existe muita oscilação na mudança de camada de direção de impressão entre provetes o que pode provocar um aumento do erro associado nas medidas finais dos provetes.

Na primeira versão as velocidades de impressão utilizadas foram pré-definidas pelo slicer para o polímero PEEK, sendo 60 milímetros por segundo a velocidade para a impressão das paredes exteriores e interiores sendo estas as que mais influenciavam a qualidade de impressão.

Na segunda versão, a velocidade de parede interior foi retificada para 45 mm/s e a parede exterior manteve-se a 60mm/s.

Na terceira e última versão desta orientação utilizamos a velocidade de 45mm/s tanto para a parede exterior como interior.

Estas alterações foram feitas tendo em conta a qualidade de impressão e a facilidade da mesma, mas é importante frisar que apenas iremos saber quais as velocidades mais eficazes para este polímero imprimido nesta orientação concreta quando forem realizados os ensaios de tração nos provetes.



Figura 3.12: PEEK - Orientação Vertical segundo o eixo Z

3.6.2 Orientação Vertical no plano XZ

Nesta orientação, como existe uma maior área de contacto entre a mesa e a peça o problema anterior das oscilações entre camadas não é muito preocupante dado que não só o percurso do bico extrusor durante a impressão das camadas é maior como é mais fluído uma vez que o percurso de cada camada é mais extenso comparativamente as camadas na orientação anterior.

Assim sendo criou-se duas versões de impressão.

A primeira com as velocidades pré-definidas pelo *licer*, 60mm/s para ambas as paredes interiores como exteriores e na segunda versão com velocidade de 60mm/s para a exterior e 45 mm/s para o *infill*.

De notar a existência de um suporte existente entre o provete e a mesa de impressão. Este suporte é necessário para não ocorrer um encurvamento das primeiras camadas no estreitamento do provete.

Embora pouco perceptível na figura 3.13, existe um espaçamento de 0.8 milímetros (corresponde ao espaçamento de 2 camadas) entre a estrutura de suporte e o corpo do provete de modo a ser possível e relativamente fácil a remoção desta estrutura de suporte.

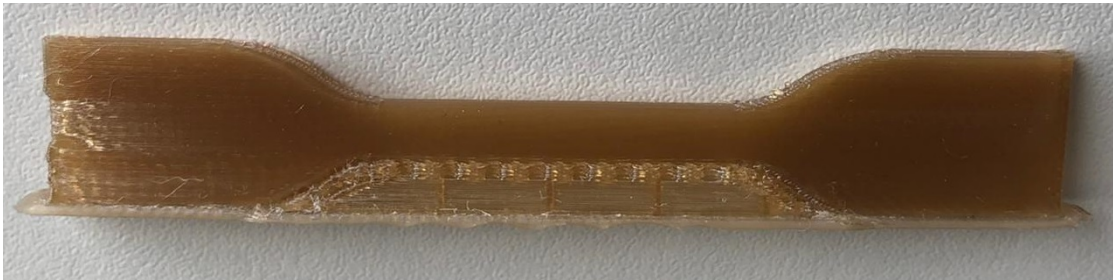


Figura 3.13: PEEK - Orientação Vertical no plano XZ

3.6.3 Orientação Horizontal

Esta orientação serve como confirmação dos resultados para a orientação anterior, dado que é na mesma um provete onde as linhas que formam as camadas são orientadas na direção das camadas da orientação anterior mas acresce a vantagem de não ser necessário estrutura de suporte entre o provete e a mesa de impressão o que poderá resultar em melhores valores no ensaio de tração, uma vez que os provetes estão na posição mais estável possível.

Dentro desta orientação horizontal existem dois tipos diferentes de provetes onde a única diferença entre eles é exclusivamente a forma como é feito o preenchimento destes, ou seja, o *infill*. Foi criada esta pequena iteração dentro desta orientação uma vez que o processo de fabrico em utilização (FFF) permite varias e complexas geometrias possíveis de serem fabricadas.

3.6.4 Orientação Horizontal com preenchimento de linhas

As linhas que formam as camadas são feitas de forma individual, não havendo uma continuidade de linha entre as camadas.

A impressão da camada começa por fazer a limitação do provete, ou seja, o contorno exterior, depois faz toda a secção estreita do provete fazendo as linhas que vão de um lado ao outro do provete. Quando acaba de fazer o estreitamento, ou a secção mais fina do provete, faz o resto do preenchimento que falta na secção das amarras com mais linhas individuais até estar preenchida toda a camada.

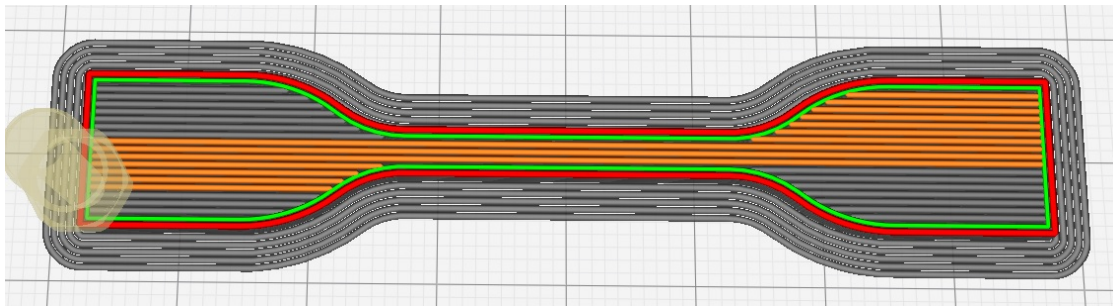


Figura 3.14: Orientação horizontal linhas - Caminho de impressão



Figura 3.15: PEEK- Orientação horizontal linhas

3.6.5 Orientação Horizontal com preenchimento concêntrico

Esta versão surge de modo a verificar se o facto das linhas continuas entre camadas pode conferir maior resistência à tração.

A impressão começa por realizar o contorno do provete tal como no infill com linhas, mas depois faz o os centros da zona do provete num dos lados do provete até completar esse lado na totalidade sendo que depois preenche a secção estreita do provete e por fim finaliza a impressão acabando de preencher o outro lado do provete onde se coloca a outra amarra.

Esta orientação horizontal com infill concentric poderá conferir mais resistência na zona das amarras podendo ser possível verificarmos que o provete será mais resistente, mas apenas será avaliado quando forem submetidos a ensaios de tração.

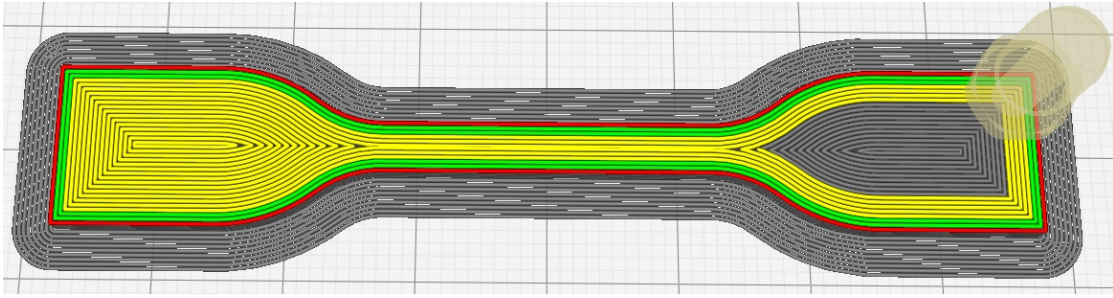


Figura 3.16: Orientação horizontal com linhas -Caminho de impressão



Figura 3.17: PEEK- Orientação horizontal concêntrico

3.7 Poli-éter-éter-cetona - PEEK-CF



Figura 3.18: Intamsys PEEK-CF

Este filamento, também é comercializado pelo fabricante Intamsys, sendo um filamento semelhante ao anterior PEEK, com a pequena diferença de ser reforçado com fibras de carbono, mais concretamente 20%. Esta diferença tem um impacto significativo durante o processo de impressão. O preço de mercado deste filamento varia consoante a percentagem de fibra de carbono, sendo que este filamento ronda os 350 euros um enrolamento de 500 gramas [40]. A adição de fibras de carbono ao PEEK torna este bem mais fácil de imprimir, notando uma grande melhoria em termos de dimensões finais de protótipos, acabamentos superficiais e maior facilidade de remoção de estruturas de suporte. Dado que se trata de um filamento reforçado com fibra de carbono

este tende a obstruir o nozzle de impressão por causa deste mesmo fator. O mesmo foi comprovado quando se testou a possibilidade de impressão utilizando o mesmo nozzle utilizado em PEEK e notamos que a meio da impressão do teste de calibração do cubo sem enchimento que o nozzle estava entupido. Mudamos então para um nozzle cujas propriedades mecânicas e térmicas são as mesmas onde apenas difere no diâmetro, sendo este utilizado um nozzle de 0.6mm.



Figura 3.19: Nozzle 0.6 milímetros de diâmetro para altas temperaturas em aço temperado

3.7.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

Assim como em PEEK, quando se acabou a calibração de PEEK-CF começamos pela impressão desta orientação com torre de suporte.

Verificou-se maior facilidade geral de fabrico comparativamente com PEEK possivelmente devido a termos fibras de carbono o que confere maior estabilidade durante a impressão na própria linha de filamento extrudido uma vez que as fibras

de carbono servem como um elemento estruturante da linha ajudando a que não ocorra muita deformação da linha extrudida durante a deposição de cada camada. Dada a boa qualidade geral de impressão apenas se realizou uma versão desta orientação não havendo necessidade de desperdiçar mais material.



Figura 3.20: PEEK-CF - Orientação Vertical segundo o eixo Z

3.7.2 Orientação Vertical no plano XZ

Comparando esta orientação em PEEK-CF com PEEK é possível afirmar que visualmente os provetes ficaram com um melhor acabamento, e em termos dimensionais mais rigorosos.

Foram feitas duas versões desta orientação pois na primeira versão pois ocorreu uma ligeira descalibração da mesa de impressão quando se retiraram os provetes da orientação anterior.

Então voltou-se a calibrar a mesa e imprimiu-se novamente e o resultado final dos provetes em termos dimensionais foram como esperado mais rigorosos nas medidas finais.

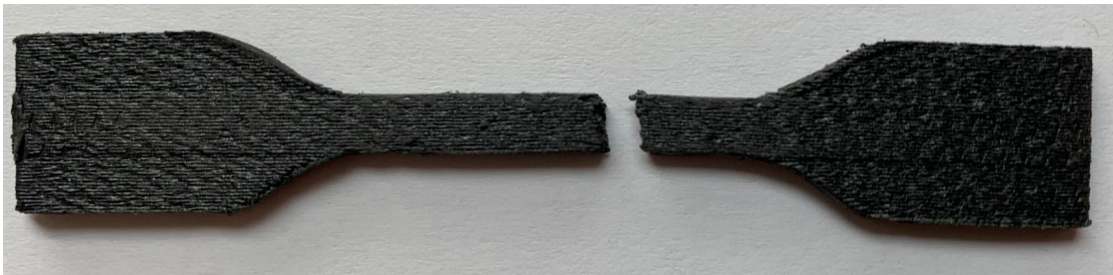


Figura 3.21: PEEK-CF - Orientação vertical no plano XZ

3.7.3 Orientação Horizontal

Como tínhamos acabado de calibrar a mesa começamos logo a imprimir orientação horizontal. Começamos por imprimir a versão linhas e depois concêntrica. Esta mudança é muito rápida de se fazer pois no slicer a única alteração a fazer é alterar o *infill* de linhas para concêntrica. Nesta orientação realizámos apenas uma versão de cada *infill* diferente dado o bom rigor qualidade final dos provetes.

3.7.4 Orientação Horizontal com preenchimento de linhas

Comparando as medidas finais dos provetes desta orientação com os provetes da mesma orientação de PEEK, com este polímero PEEK-CF as medidas foram mais precisas embora o nozzle de extrusão utilizado neste polímero seja de 0.6 milímetros de diâmetro.



Figura 3.22: PEEK-CF -Orientação horizontal com linhas

3.7.5 Orientação Horizontal com preenchimento concêntrico

Nesta orientação em concreto era esperado que o polímero não tivesse um acabamento superficial tão bom quanto o polímero PEEK, não so pela diferença de diâmetros dos nozzles de impressão mas também pela presença de um caminho de impressão mais trabalhoso, sendo que com a expansão do material devido a elevadas temperaturas de extrusão, cerca de 400°C, as camadas de impressão iriam ficar mais rugosas sendo mais difícil obter uma correta medida de provetes. Por outro lado como a estrutura nas extremidades dos provetes seria mais robusta devido também ao caminho de impressão, era esperado resistirem melhor ao ensaio de tração comparativamente ao *infill* com linhas.

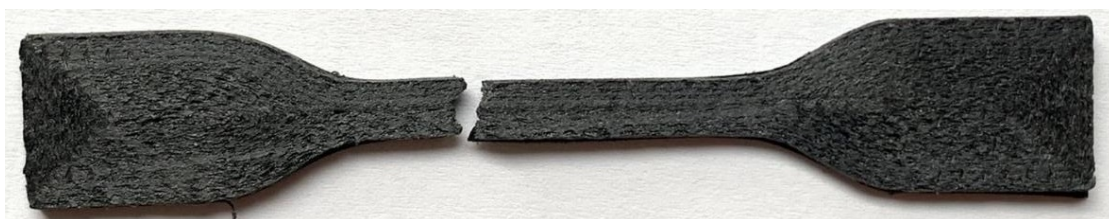


Figura 3.23: PEEK-CF -Orientação horizontal concêntrico

3.8 PAHT-CF



Figura 3.24: Ultrafuse PAHT-CF15

Este polímero, cujo filamento é constituído por poliamida juntamente com 15% de fibras de carbono custa cerca de 85 euros vendido pela marca Ultrafuse [41].

Sendo aproximadamente um quarto do preço de PEEK ou PEEK-CF a utilização deste polímero neste relatório serve para ser possível testar a viabilidade de realizar impressões num polímero de semelhante comportamento durante a impressão e verificar se há alguma semelhança de comportamento mecânico. Como se trata de um polímero reforçado com fibra de carbono, tal como PEEK-CF, iremos utilizar o nozzle de altas temperaturas termo endurecido de 0.6 milímetros de diâmetro.

Relativamente a temperaturas, a extrusão deste polímero ocorre a 270°C o que também já difere bastante das temperaturas de extrusão do PEEK-CF o que significa que iremos ter um comportamento mecânico certamente diferente com tempos de arrefecimentos entre camadas significativamente mais rápidos dado que a temperatura de extrusão é praticamente metade.

Relativamente a temperaturas, a extrusão deste polímero ocorre a 270°C o que também já difere bastante das temperaturas de extrusão do PEEK-CF o que significa que iremos ter um comportamento mecânico certamente diferente com tempos de arrefecimentos entre camadas significativamente mais rápidos dado que a temperatura de extrusão é praticamente metade.



Figura 3.25: Nozzle 0.6 milímetros de diâmetro para altas temperaturas em aço temperado

3.8.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

Este polímero, em especial nesta orientação de impressão foi dos mais difíceis de conseguir uma boa qualidade geral nos três provetes. Na calibração inicial dos cubos as paredes deste estavam a sair com alguma deformação na camada, talvez pela calibração da retração ter sido realizada antes de uma nova calibração da mesa. Ao fim de algumas impressões e com a força que se aplica na mesa para retirar a peça recém criada há sempre uns certos movimentos que criam algum

desnívelamento na mesa, então convém não só controlar sempre as medidas dos provetes após a impressão bem e se o vidro está bem encaixado nos suportes da mesa de impressão.

Após concluir que a primeira tentativa estava a ser realizada com um desnívelamento no vidro a segunda tentativa já foi feita sem problemas sendo feita apenas uma versão desta orientação.



Figura 3.26: PAHT-CF15 - Orientação vertical segundo o eixo Z

3.8.2 Orientação Vertical no plano XZ

Com esta orientação o único problema existente é se a estrutura de suporte fica na distância certa para conseguir garantir um encosto mínimo mas também garantir que é removido sem qualquer alteração na estrutura do provete, o que poderá alterar a veracidade do ensaio de tração.

Foram feitas duas versões desta orientação. A diferença entre as versões é precisamente na distância entre a estrutura de suporte e o corpo do provete. A primeira versão foi feita com uma distância de 1.2 milímetros (espaçamento de 2 camadas) e a segunda com um espaçamento de 1 milímetro.



Figura 3.27: PAHT-CF15 - Orientação vertical no plano XZ

3.8.3 Orientação Horizontal

Durante a impressão horizontal ocorreu um erro de impressão onde o bico extrusor esquerdo, que sempre foi utilizado desde início, estava com uns problemas de conexão no sensor que faz a leitura local de temperaturas, o que impedia a impressão

dos provetes. A solução encontrada foi mudar o filamento e o extrusor utilizado para o segundo extrusor do equipamento.

Para fazer esta mudança também se tem de definir no slicer qual o extrusor que vamos utilizar de modo a alterar o código gerado pelo slicer (G-code) e assim fazer a impressão com o extrusor correto.

Após fazer estas mudanças fez se uma nova calibração da mesa e iniciámos a impressão.

3.8.4 Orientação Horizontal com preenchimento de linhas

Foram feitas duas versões desta orientação com o objetivo de afinar alguns parâmetros, como a espessura da linha de impressão sendo que normalmente esta espessura deve corresponder ao diâmetro do nozzle que estamos a utilizar. Mas, caso desejado e até um certo limite, podemos alterar e diminuir a espessura desta linha, sendo que apenas reduzimos em 0.05 milímetros a espessura desta linha, passando de 0.6mm para 0.55mm o que facilitou o rigor das medidas quando foram impressos a segunda versão destes provetes.



Figura 3.28: PAHT-CF15 - Orientação horizontal linhas

3.8.5 Orientação Horizontal com preenchimento concêntrico

Nesta orientação, tal como na orientação anterior, também se reduziu 0.05mm a espessura da linha de impressão na segunda versão de provetes sendo que o resultado foi o mesmo, ou seja, provetes mais aproximados do valor esperado.



Figura 3.29: PAHT-CF15 - Orientação horizontal concêntrico

3.9 PPS-CF



Figura 3.30: Essentium PPS-CF15

O último polímero utilizado foi o PPS-CF, sulfureto de polifenileno reforçado com %15 de fibra de carbono, produzido pela marca Essentium é uma outra alternativa a polímeros de alta temperatura como PEEK-CF cujo preço é mais reduzido porém tem uma excelente relação preço-desempenho com excecional resistência, rigidez, temperatura, química e resistência ao desgaste.

No mercado atual encontramos este filamento à venda na marca por um preço que ronda 440 euros sendo este preço idêntico a PEEK-CF porém este enrolamento é de 2.5 kg [42] contrariamente as 500 gramas de enrolamento de PEEK-CF.

Durante a impressão foram utilizadas temperaturas de extrusão de 330°C e utilizado o mesmo nozzle de altas temperaturas em aço temperado de 0.6 milímetros de diâmetro tal como nos outros filamentos reforçados com fibra de carbono. Devido aos problemas de impressão que apareceram durante a impressão do polímero anterior, foi também utilizado o segundo extrusor e não o primeiro.



Figura 3.31: Nozzle 0.6 milímetros de diâmetro de altas temperaturas em aço temperado

3.9.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

De todos os polímeros utilizados até então, este foi o mais fácil de impressão nesta orientação.

Isto poderá significar que a adesão entre camada deste polímero nesta orientação foi das melhores mas isto pode não significar melhor comportamento durante o ensaio de tração. Mesmo durante a impressão não houve nenhum tipo de problema, como pequenas oscilações dos provetes durante a impressão nem demasiado material

entre a torre de suporte e os provetes que dificultasse a remoção dos provetes da torre.

Por fim em termos dimensionais os resultados destes provetes nesta orientação estavam satisfatórios o que permitiu apenas imprimir uma versão destes provetes.



Figura 3.32: PPS-CF15 - Orientação Vertical segundo o eixo Z

3.9.2 Orientação Vertical no plano XZ

Tal como foi feito para PAHT-CF, foram feitas duas versões desta orientação.

A primeira versão com uma distância entre a estrutura de suporte e o corpo do provete de 1.2 milímetros, que corresponde ao espaçamento de 2 camadas, e na segunda versão um espaçamento de 1 milímetro.

Do ponto de vista de rigor de medidas finais do provete, a segunda versão foi mais precisa mas também foi mais difícil a remoção da estrutura de suporte sem danificar o provete.



Figura 3.33: PPS-CF15 - Orientação vertical no plano XZ

3.9.3 Orientação Horizontal

A impressão desta orientação também ocorreu sem grandes problemas. Apenas surgiu um durante a impressão dos provetes de orientação com linhas que apenas foi reparado no fim da primeira versão.

Durante a impressão o vidro existente no topo da mesa de impressão, onde são impressos os provetes, estava mal encaixado nos pontos de fixação à mesa, o que poderia ter implicações nos provetes deixando pequenas falhas de material no interior dos provetes pois, se o vidro está ligeiramente inclinado as medidas não irão ser rigorosas comparativamente a um vidro nivelado.

Este desnivelamento pode ser explicado devido à força exercida no vidro para retirar os provetes da orientação anterior.

3.9.4 Orientação Horizontal com preenchimento de linhas

Nesta orientação foram realizadas duas versões onde a única diferença entre estas é apenas a nível de nivelamento do vidro, pois o código utilizado para ambas versões foi exatamente o mesmo.

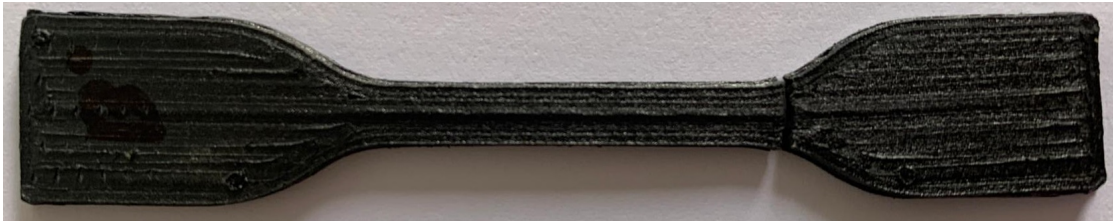


Figura 3.34: PPS-CF15 - Orientação horizontal com linhas

3.9.5 Orientação Horizontal com preenchimento concêntrico

Devido a ter em atenção o problema do desnivelamento tido nos provetes anteriores, desta vez, antes de mandar a impressora realizar a impressão desta orientação, foi garantido que os encaixes do vidro na mesa estavam bem feitos sem existir qualquer tipo de folga entre eles. Assim, as medidas dos provetes foram satisfatórias não havendo necessidade de reduzir a espessura de linha de camada nem criar uma nova versão desta orientação.



Figura 3.35: PPS-CF15 - Orientação horizontal concêntrico

3.10 Ensaio de tração

Após concluída a impressão dos provetes começou uma nova etapa do projeto. Foram realizados ensaios de tração a cada um dos provetes máquina de ensaios de tração com uma célula de carga máxima de 10kN, modelo Shimadzu AGS-X disponível no laboratório do departamento de engenharia mecânica.



10 kN

Figura 3.36: Shimadzu AGS-X 10kN

Esta máquina de ensaios de tração tem a vantagem de ser possível a utilização de um vídeo-extensômetro durante o ensaio.

Um vídeo extensômetro é um extensômetro de vídeo de alta precisão que utiliza uma medição ótica sem contato com recurso a uma câmara digital e processamento de imagens em tempo real para medir a deformação longitudinal e transversal durante os ensaios de tração.

Para a correta calibração da câmara deste vídeo extensômetro são colocados dois autocolantes no provete a testar, de modo a ser possível ao software de processamento de imagem criar a correlação da imagem com os valores da célula de carga.

Para garantir que todos os ensaios eram realizados nas mesmas condições foi definido que a velocidade de ensaio seria sempre 2mm/min e uma distância entre as amarras, que tracionam os provetes, de 35mm.



Figura 3.37: Vídeo-Extensômetro

3.10.1 Tratamento de dados após ensaios de tração

Para realizar o tratamento de dados obtidos através dos ensaios convém relembrar a teoria por detrás de uma curva de tensão-deformação de modo a serem concluídas e entendidas as diferenças esperadas que irão ocorrer dadas as diferentes propriedades polímeros utilizados e as diferentes orientações de impressão

Uma curva tensão-deformação corresponde em fazer o gráfico de tensão em função da deformação sofrida por um provete durante um ensaio de tração.

Analisando uma curva genérica de um ensaio de tração (Fig.3.38) temos uma reta inicial, onde corresponde a fase elástica. Nesta fase, o comportamento da espécie a ser tracionada tem a característica de, após ser retirada a carga aplicada, voltar à fase inicial, não sofrendo nenhum tipo de dano irreversível no corpo do provete. No fim desta reta, chegamos à zona onde há transição da fase elástica para a fase plástica. Sabemos que o valor máximo de tensão, que corresponde ao valor máximo do gráfico, é a tensão máxima que o provete consegue resistir durante o ensaio de tração cuja unidade de medida será em mega pascal [MPa].

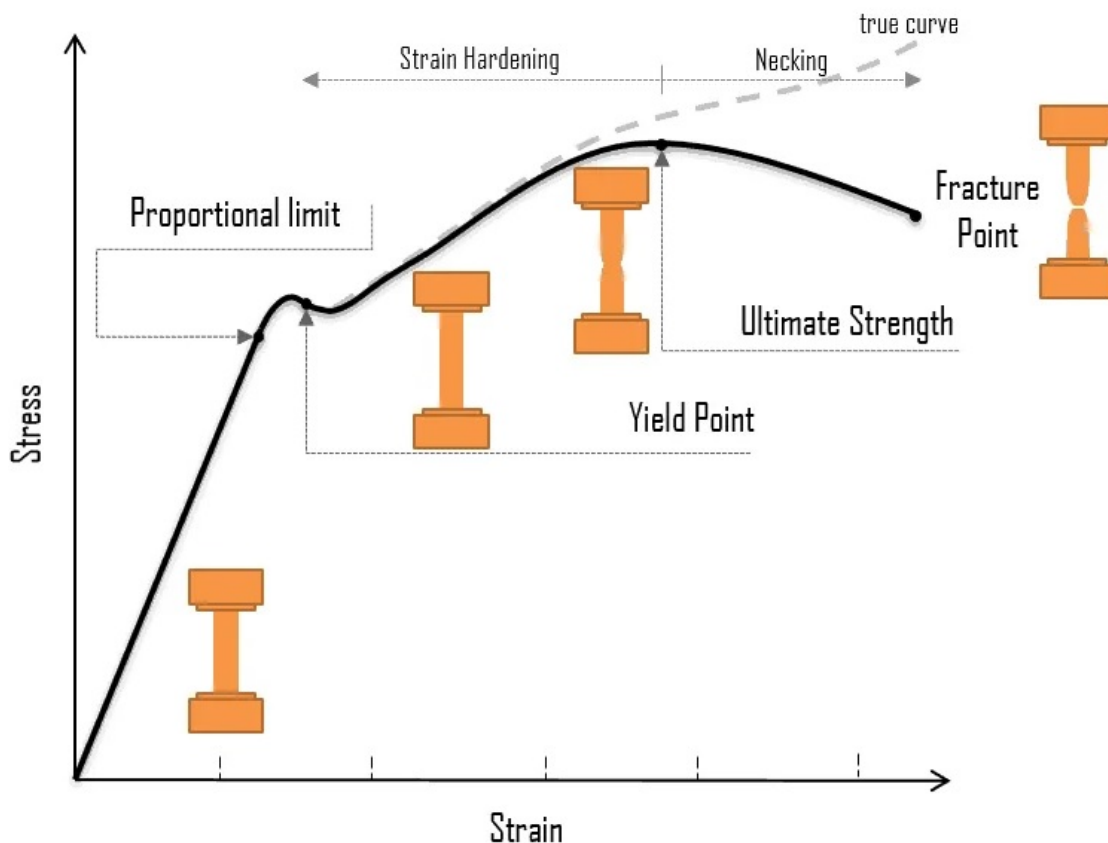


Figura 3.38: Curva típica tensão-deformação [43]

Após os ensaios de tração, os dados extraídos da máquina de tração são exportados como ficheiros de texto (.txt) e ao importar este documento para o excel temos de converter no formato (.xlsx) e guardar.

Deste ficheiro surgem quatro colunas distintas com informação; a primeira com o tempo de ensaio medido em segundos (s); a segunda com a força aplicada em Newton (N); deslocamento medido em milímetros (mm); o valor lido pelo vídeo-extensómetro em milímetros (mm).

Para traçar as curvas de tensão-deformação apenas são necessárias as colunas do tempo (s), força (N) e o valor lido pelo vídeo-extensómetro (mm).

Previamente a cada teste realizámos medições no provete a testar e medimos com o auxílio de um paquímetro digital três medições para a largura do corpo do provete e outras três medições para a espessura do provete, tal como vemos na seguinte figura. Com estas medições fazemos a média ponderada para a largura e para a espessura obtendo assim o valor médio para a área inicial do corpo do provete, A_0 , em milímetros quadrados. No momento exato antes de se iniciar apontamos o valor de L_0 , que corresponde ao valor do comprimento entre as amarras com o provete já inserido nestas, medido em milímetros.

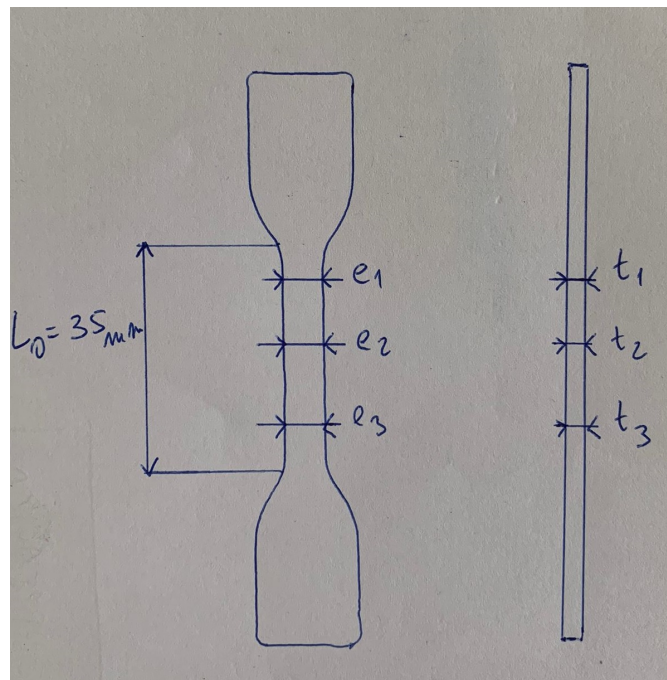


Figura 3.39: Controlo de medidas nos provetes

As fórmulas utilizadas para foram as seguintes:

Engineering Stress [Pa]:

$$\sigma_E = F/A \quad (3.1)$$

Engineering Strain:

$$\varepsilon_E = \Delta L/L_0 \quad (3.2)$$

True Stress [Pa]:

$$\sigma_{tr} = \sigma_E(1 + \varepsilon_E) \quad (3.3)$$

True Strain:

$$\varepsilon_{tr} = \ln(1 + \varepsilon_E) \quad (3.4)$$

Sabendo que os ensaios realizados foram feitos em materiais poliméricos, o comportamento destes é expectável que não se assemelhe com o comportamento típico de um aço ou de um alumínio. Assim, dependente do polímero em questão e das orientações que foram imprimidos os provetes, é esperado que a curva de tensão-deformação não seja idêntica com a curva apresentada na figura (3.38) mas sim com uma das próximas curvas apresentadas na Figura 3.40 retiradas de [44] dependendo das características mecânicas adquiridas pelo provete durante o processo de impressão.

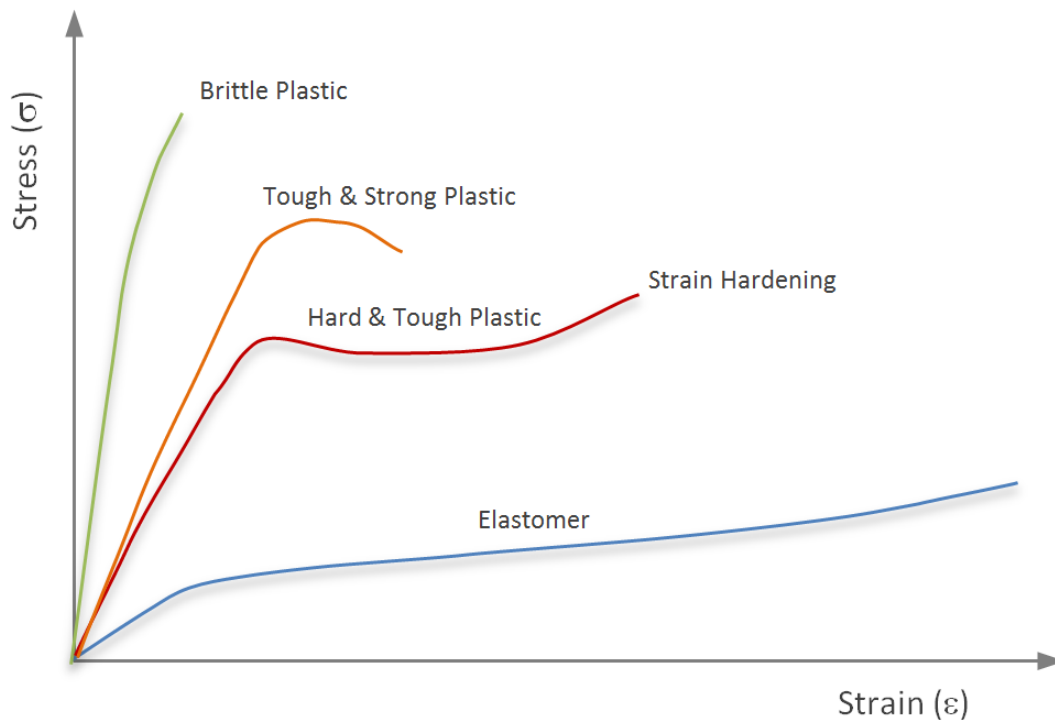


Figura 3.40: Comportamento esperado dos polímeros tracionados [44]

Capítulo 4

Resultados Experimentais

Neste capítulo expõem-se os resultados obtidos com base na metodologia seguida. A apresentação de resultados vai estar dividida em diferentes subcapítulos, organizados por material de impressão sendo estes resultados apresentados para cada orientação de impressão.

De forma a resumir de forma mais clara os resultados apresentados individualmente para cada polímero, é feita uma análise comparativa para cada orientação de impressão entre os polímeros utilizados no desenvolvimento deste relatório.

Por fim, e face aos resultados demonstrados da componente prática experimental, é apresentado um caso de estudo onde é testada a viabilidade da substituição de um componente estrutural (*bracket*) por um polímero utilizado neste trabalho que é o PPS-CF.



Figura 4.1: Amostra de provetes de cada polímero de PEEK, PEEK-CF, PAHT-CF e PPS-CF, respetivamente

4.1 Polímero PEEK

4.1.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

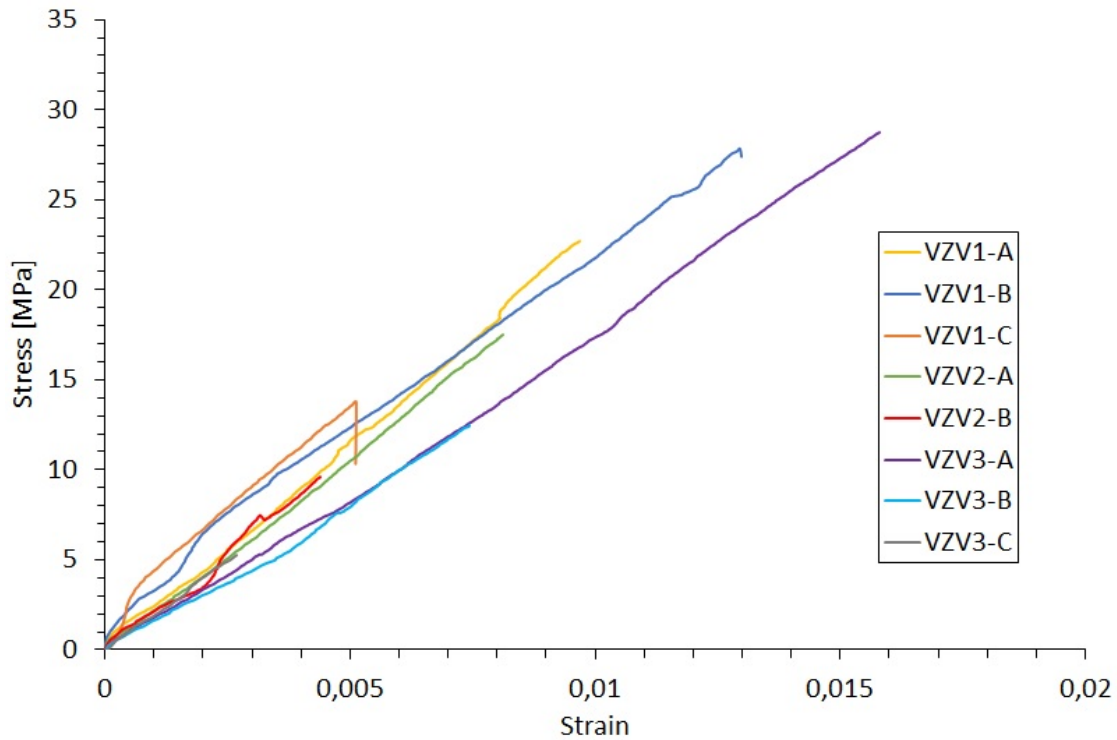


Figura 4.2: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical segundo o eixo Z (PEEK)

Tabela 4.1: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical segundo o eixo Z(PEEK)

| Proвете | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| VZV1-A | 2,34 GPa | 22,72 MPa | 0,90% |
| VZV1-B | 2,06 GPa | 27,86 MPa | 1,29% |
| VZV1-C | 2,32 GPa | 13,81 MPa | 0,50% |
| VZV2-A | 2,16 GPa | 17,54 MPa | 0,80% |
| VZV2-B | 1,64 GPa | 9,60 MPa | 0,40% |
| VZV3-A | 1,84 GPa | 28,71 MPa | 1,50% |
| VZV3-B | 1,69 GPa | 12,48 MPa | 0,70% |
| VZV3-C | 1,97 GPa | 5,28 MPa | 0,20% |
| Média | 2,01 GPa | 15,67 MPa | 0,75% |

4.1.2 Orientação Horizontal

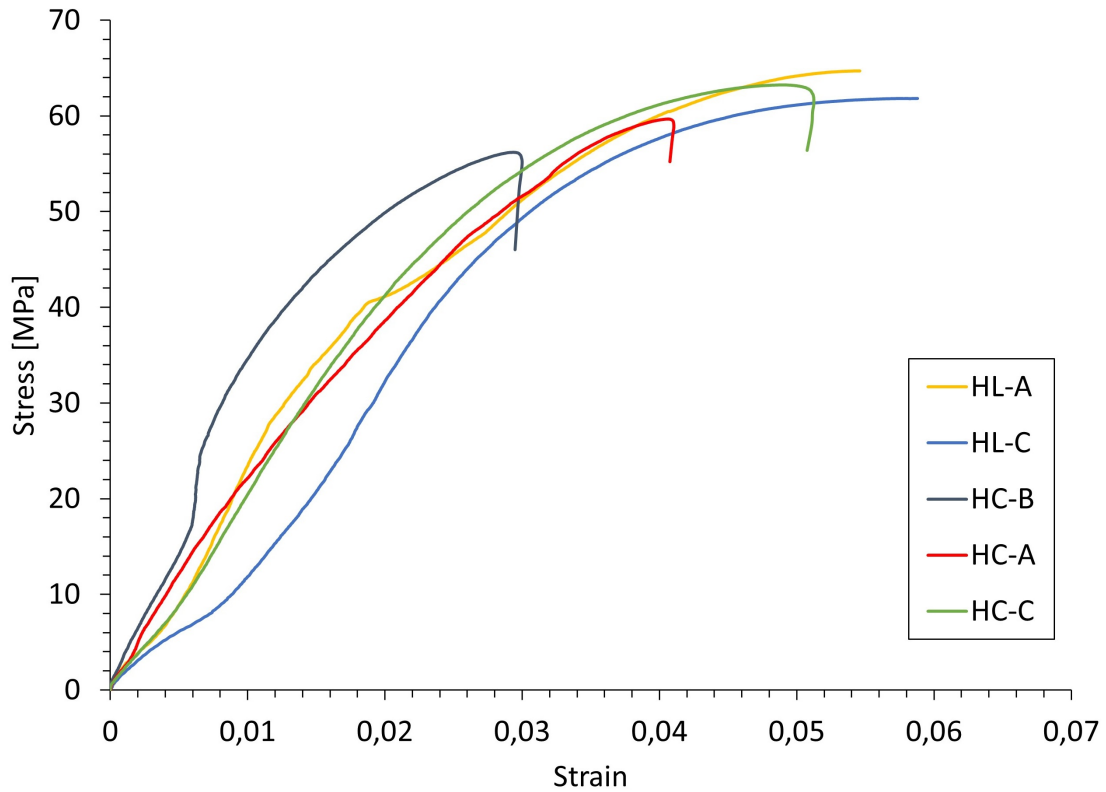


Figura 4.3: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação horizontal (PEEK)

Tabela 4.2: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação horizontal (PEEK)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| HL-A | 2,34 GPa | 64,71 MPa | 5,40% |
| HL-C | 1,55 GPa | 61,80 MPa | 5,80% |
| HC-A | 2,03 GPa | 59,60 MPa | 4,06% |
| HC-B | 2,70 GPa | 56,18 MPa | 2,90% |
| HC-C | 2,34 GPa | 63,23 MPa | 5,07% |
| Média | 2,34 GPa | 62,52 MPa | 4,57% |

4.1.3 Orientação Vertical no plano XZ

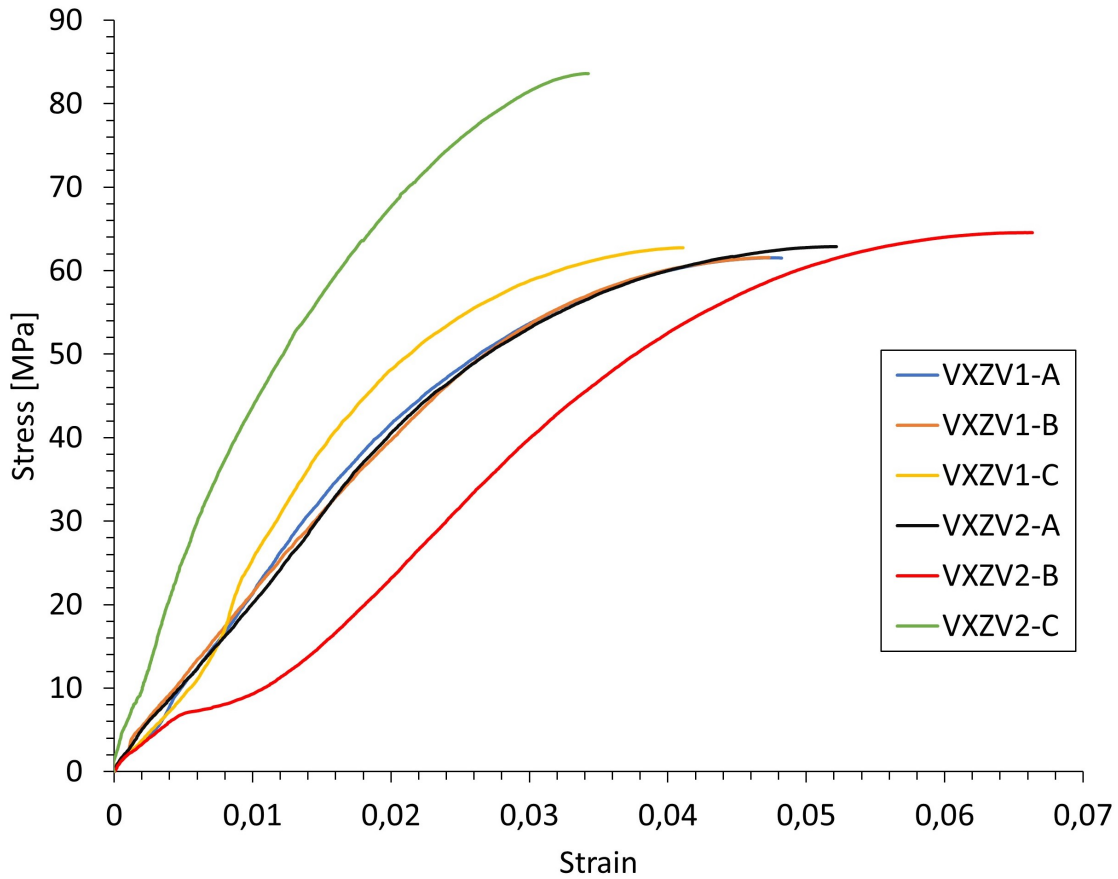


Figura 4.4: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical no plano XZ (PEEK)

Tabela 4.3: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical no plano XZ (PEEK)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|-----------|--------------|------------------|-----------------------|
| VXZV1-A | 2,25 GPa | 61,5 MPa | 4,82% |
| VXZV1-B | 2,02 GPa | 61,58 MPa | 4,73% |
| VXZV1-C | 2,64 GPa | 62,74 MPa | 4,10% |
| VXZV2-A | 2,07 GPa | 62,88 MPa | 5,21% |
| VXZV2-B | 1,59 GPa | 64,55 MPa | 6,61% |
| VXZV2-C * | 4,88 GPa | 83,60 MPa | 3,42% |
| Média | 2,11 GPa | 62,65 MPa | 5,1% |

O provete VXZV2-C está assinalado pois foi realizada uma tentativa de *annealing* onde o provete foi introduzido trinta minutos num forno doméstico a 100 °C para se perceber a forma como as propriedades do provete se poderiam alterar face aos restantes e por este motivo também não foi considerado.

4.2 Polímero PEEK-CF

4.2.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

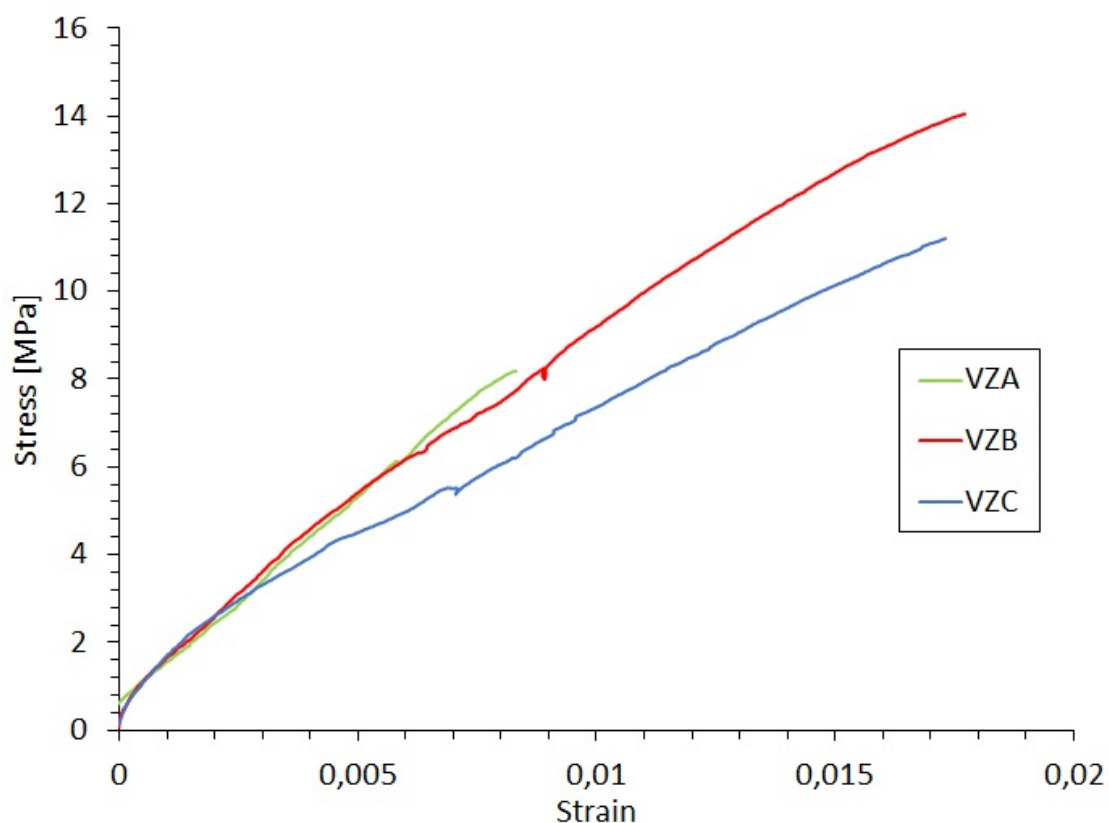


Figura 4.5: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical segundo o eixo Z (PEEK-CF)

Tabela 4.4: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical segundo o eixo Z (PEEK-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| VZ-A | 0,94 GPa | 8,18 MPa | 0,80% |
| VZ-B | 0,76 GPa | 14,04 MPa | 1,77% |
| VZ-C | 0,59 GPa | 11,18 MPa | 1,73% |
| Média | 0,78 GPa | 11,13 MPa | 1,43% |

4.2.2 Orientação Horizontal

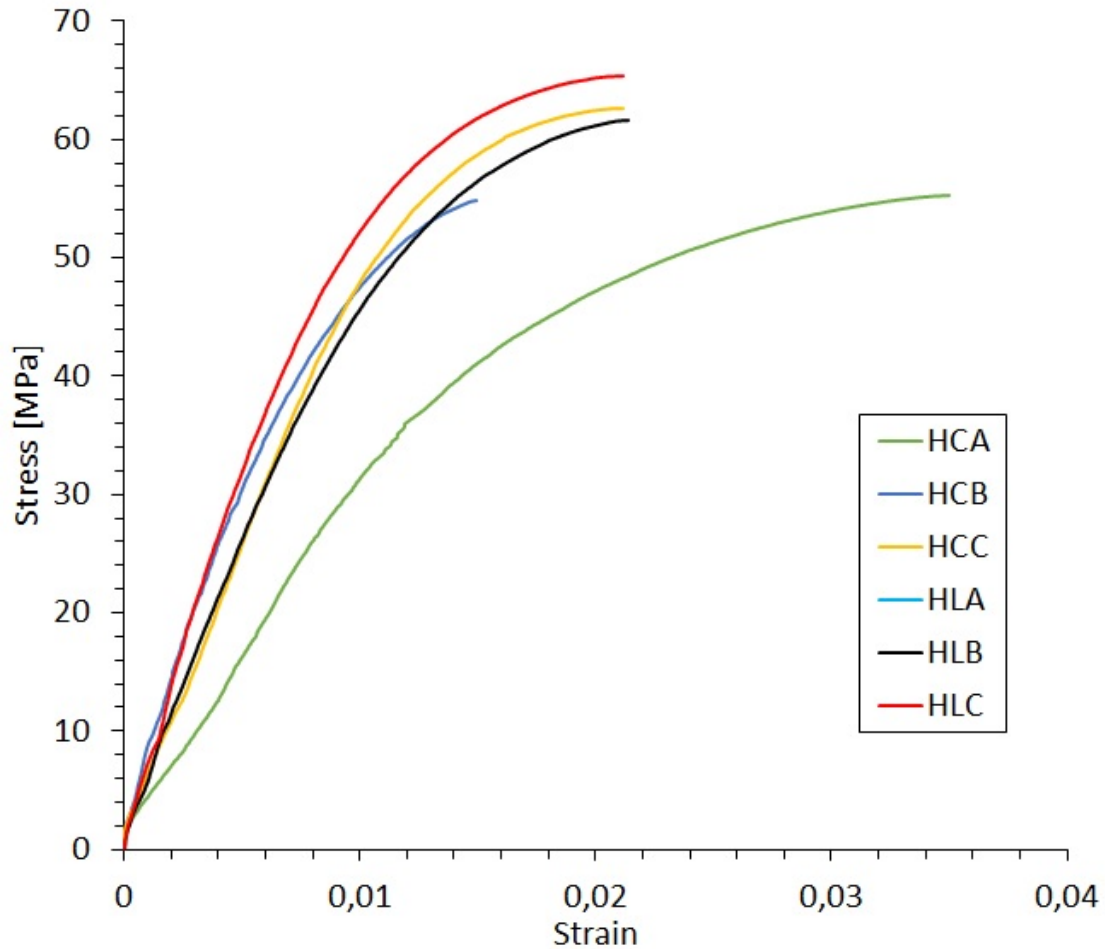


Figura 4.6: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação horizontal (PEEK-CF)

Tabela 4.5: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação horizontal (PEEK-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| HC-A | 3,25 GPa | 55,26 MPa | 3,50% |
| HC-B | 5,57 GPa | 54,8 MPa | 1,49% |
| HC-C | 5,17 GPa | 62,65 MPa | 2,11% |
| HL-A | 4,96 GPa | 62,74 MPa | 2,60% |
| HL-B | 4,85 GPa | 61,61 MPa | 2,13% |
| HL-C | 6,42 GPa | 65,36 MPa | 2,11% |
| Média | 5,03 GPa | 62,13 MPa | 2,12% |

4.2.3 Orientação Vertical no plano XZ

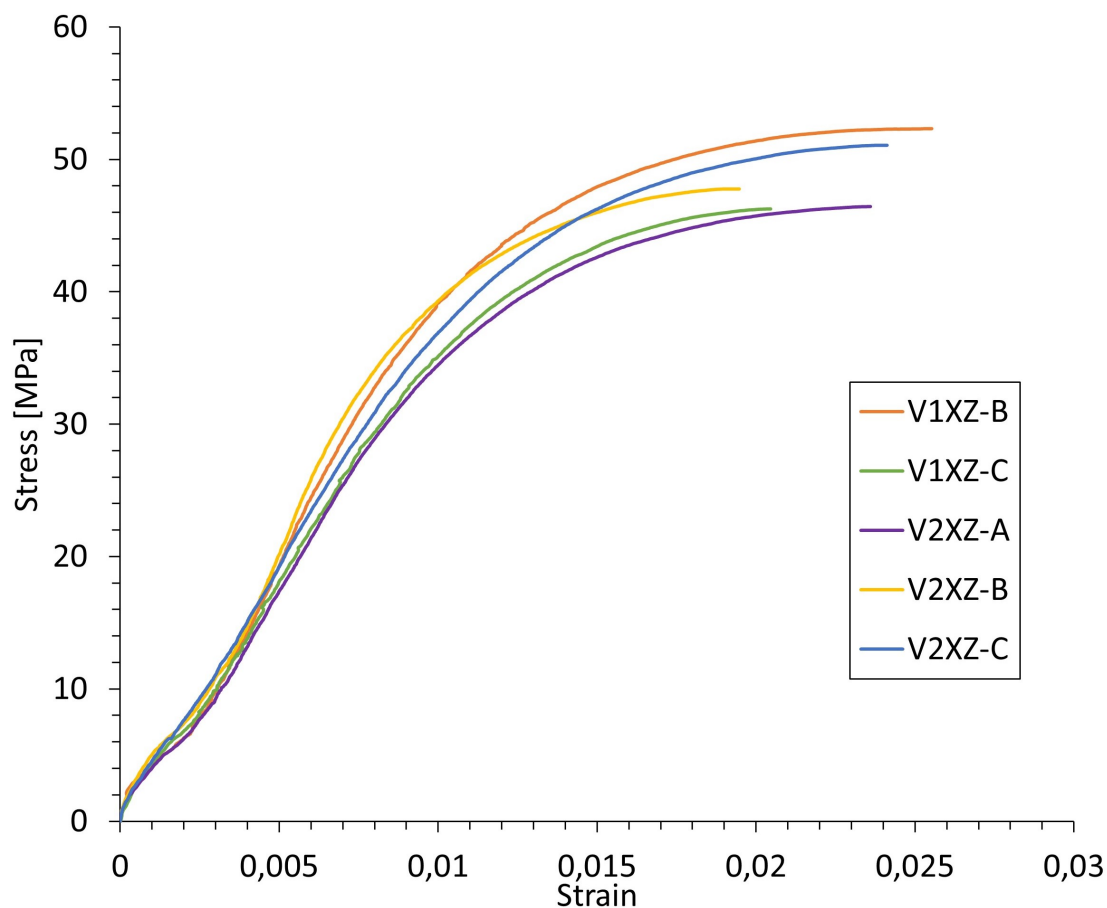


Figura 4.7: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical no plano XZ (PEEK-CF)

Tabela 4.6: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical no plano XZ(PEEK-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| V1XZ-B | 4,86 GPa | 52,3 MPa | 2,55% |
| V1XZ-C | 4,02 GPa | 46,27 MPa | 2,04% |
| V2XZ-A | 3,99 GPa | 46,42 MPa | 2,36% |
| V2XZ-B | 5,21 GPa | 47,75 MPa | 1,94% |
| V2XZ-C | 4,05 GPa | 51,06 MPa | 2,41% |
| Média | 4,45 GPa | 48,76 MPa | 2,36% |

4.3 Polímero PAHT-CF

4.3.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

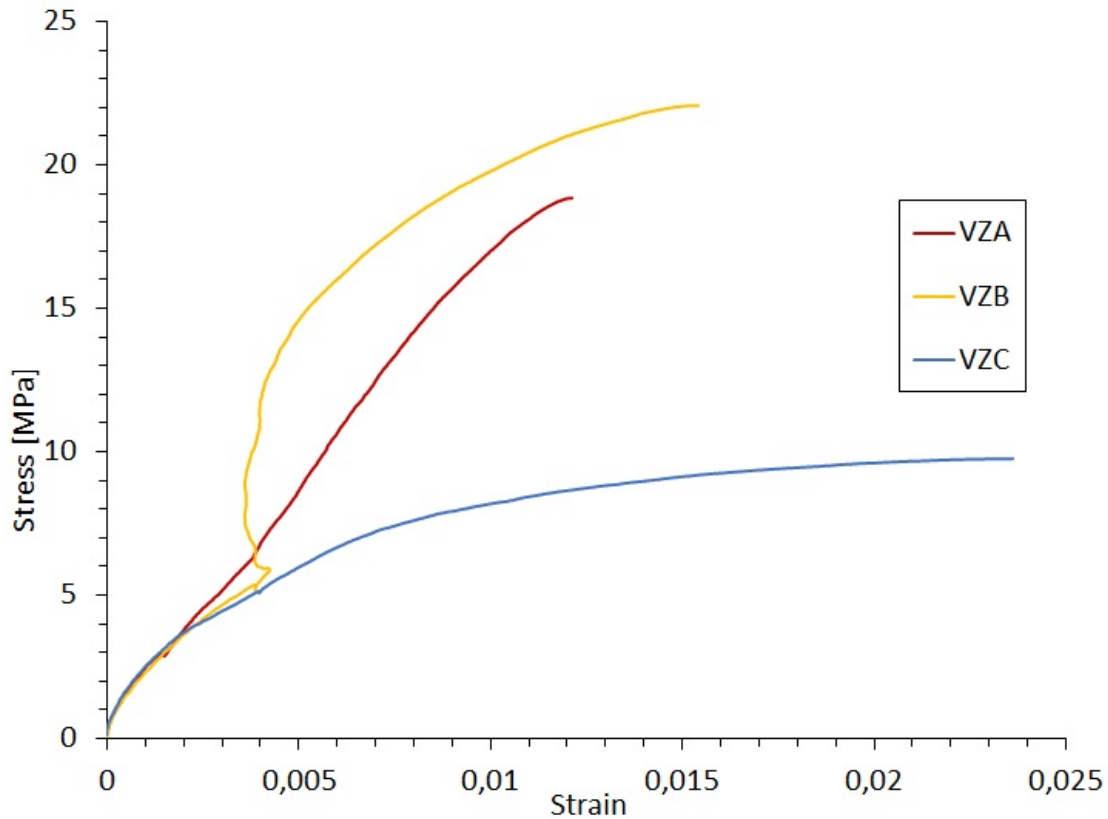


Figura 4.8: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical segundo o eixo Z (PAHT-CF)

Nesta orientação foi detetado um ensaio com uma curva anómala (VZ-B), então por motivos de coerência não será considerado. Poderá ser um erro da célula de carga do equipamento que realiza o ensaio de tração uma vez que após fabrico destes provetes não foi detetada nenhuma anomalia. Os valores para o provete aparecem na tabela seguinte mas não foram considerados.

Tabela 4.7: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical segundo o eixo Z (PAHT-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| VZ-A | 1,87 GPa | 18,84 MPa | 1,21% |
| VZ-B | 1,05 GPa | 9,74 MPa | 1,54% |
| VZ-C | 0,84 GPa | 9,75 MPa | 2,36% |
| Média | 1,35 GPa | 14,30 MPa | 1,78% |

4.3.2 Orientação Horizontal

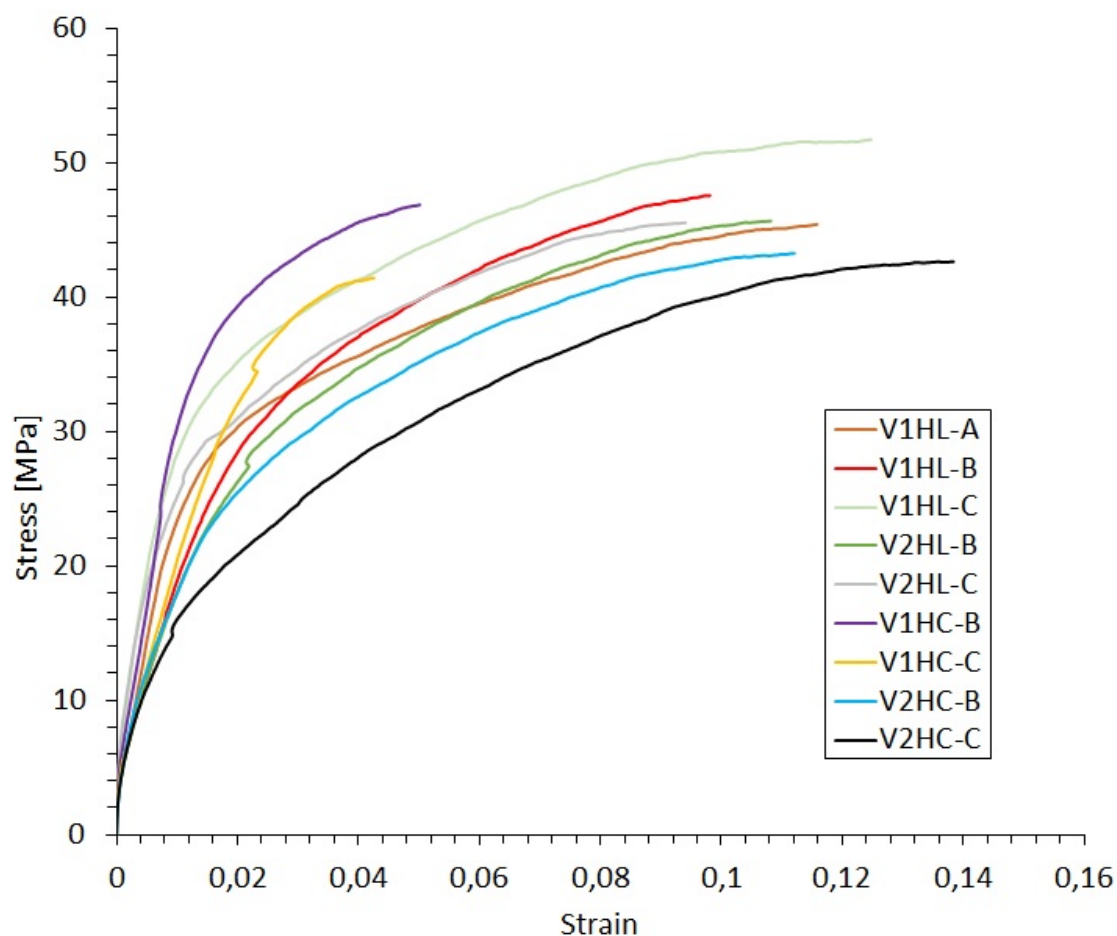


Figura 4.9: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação horizontal (PAHT-CF)

Tabela 4.8: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação horizontal (PAHT-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| V1HL-A | 1,82 GPa | 45,42 MPa | 11,50% |
| V1HL-B | 1,33 GPa | 47,51 MPa | 9,80% |
| V1HL-C | 2,55 GPa | 51,73 MPa | 12,40% |
| V2HL-B | 1,11 GPa | 45,62 MPa | 10,80% |
| V2HL-C | 1,73 GPa | 45,54 MPa | 9,30% |
| V1HC-B | 2,64 GPa | 46,85 MPa | 5,00% |
| V1HC-C | 1,73 GPa | 41,43 MPa | 4,20% |
| V2HC-B | 1,12 GPa | 43,22 MPa | 11,20% |
| V2HC-C | 1,17 GPa | 42,73 MPa | 13,70% |
| Média | 1,65 GPa | 45,51 MPa | 9,80% |

4.3.3 Orientação Vertical no plano XZ

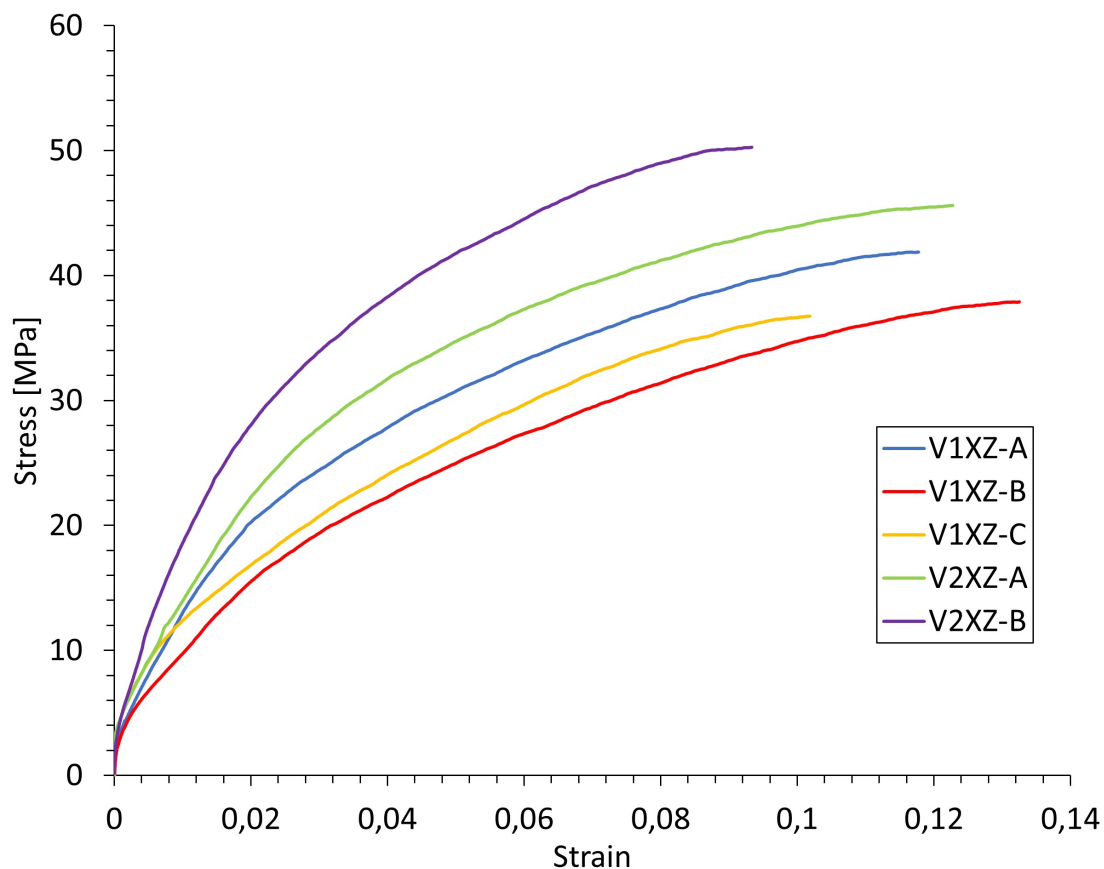


Figura 4.10: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical no plano XZ (PAHT-CF)

Tabela 4.9: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical no plano XZ (PAHT-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| V1XZ-A | 0,96 GPa | 41,93 MPa | 11,70% |
| V1XZ-B | 0,60 GPa | 37,92 MPa | 13,20% |
| V1XZ-C | 0,41 GPa | 36,74 MPa | 10,10% |
| V2XZ-A | 0,93 GPa | 45,62 MPa | 12,20% |
| V2XZ-B | 1,42 GPa | 50,33 MPa | 9,30% |
| Média | 0,86 GPa | 42,48 MPa | 11,30% |

4.4 Polímero PPS-CF

4.4.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

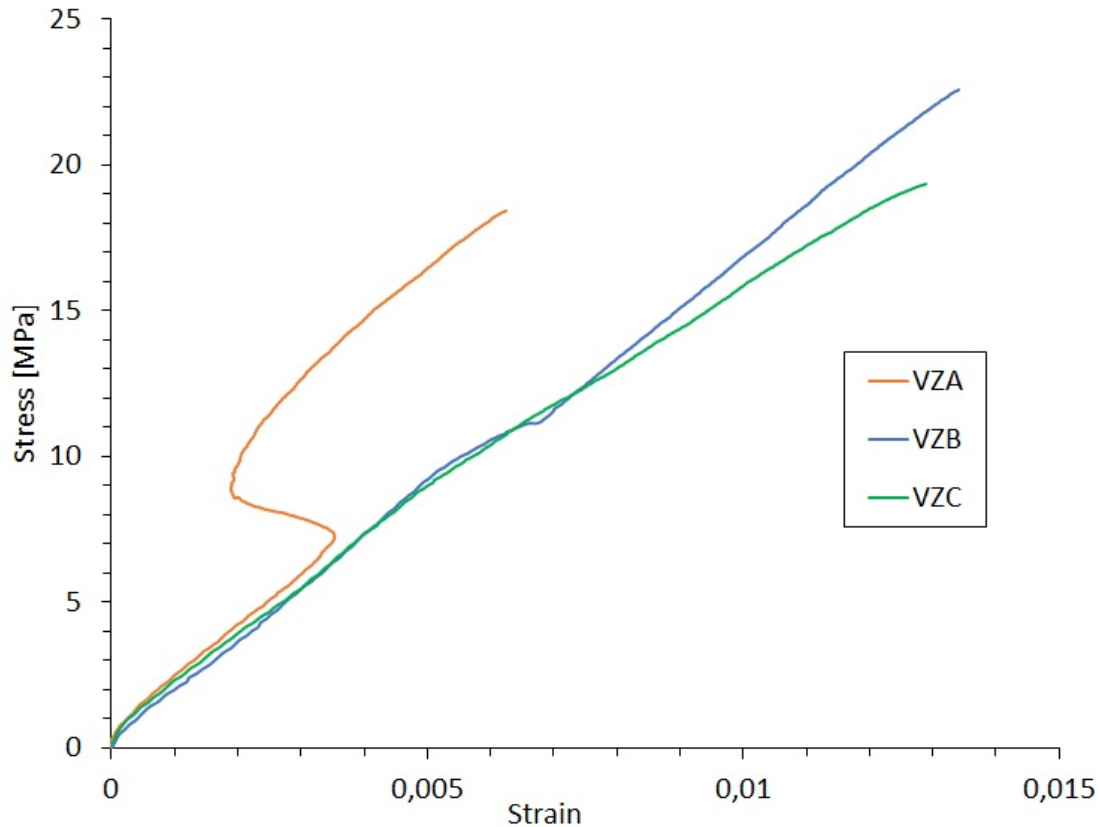


Figura 4.11: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical segundo o eixo Z (PPS-CF)

Observando a amostra VZA, reparamos que a curva de tensão-deformação tem um comportamento anômalo na resposta ao ensaio de tração uniaxial. Este comportamento poderá ser explicado com a existência de um escorregamento do provete durante o ensaio de tração, uma vez que, observando então esta curva, vemos que existe uma diminuição da deformação para uma força praticamente constante.

Tabela 4.10: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical segundo o eixo Z (PPS-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| VZ-A | 1,82 GPa | 18,43 MPa | 0,62% |
| VZ-B | 1,65 GPa | 22,62 MPa | 1,34% |
| VZ-C | 1,46 GPa | 19,33 MPa | 1,28% |
| Média | 1,64 GPa | 20,11 MPa | 1,08% |

4.4.2 Orientação Horizontal

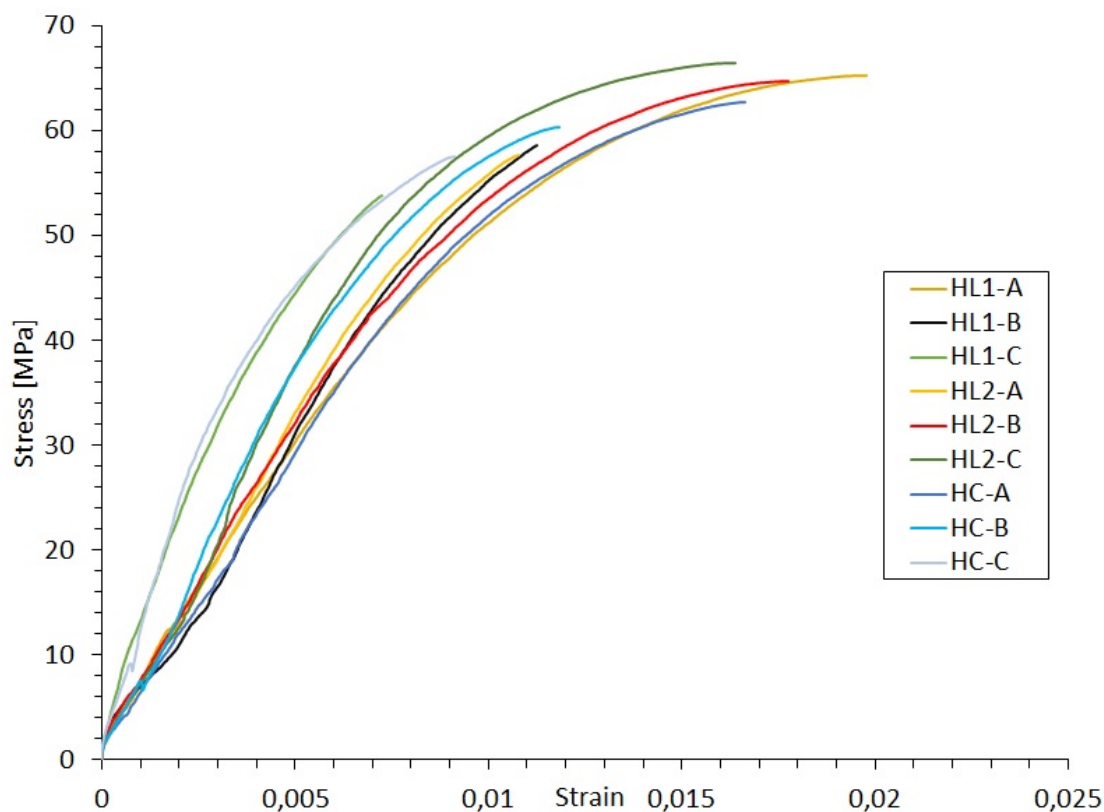


Figura 4.12: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação horizontal (PPS-CF)

Tabela 4.11: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação horizontal (PPS-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| HL1-A | 5,52 GPa | 65,24 MPa | 1,90% |
| HL1-B | 6,71 GPa | 58,73 MPa | 1,11% |
| HL1-C | 7,13 GPa | 53,84 MPa | 0,72% |
| HL2-A | 6,53 GPa | 57,76 MPa | 1,07% |
| HL2-B | 6,35 GPa | 64,75 MPa | 1,77% |
| HL2-C | 8,63 GPa | 66,42 MPa | 1,63% |
| HC-A | 5,86 GPa | 62,71 MPa | 1,66% |
| HC-B | 8,55 GPa | 60,34 MPa | 1,18% |
| HC-C | 11,91 GPa | 57,55 MPa | 0,90% |
| Média | 7,43 GPa | 60,75 MPa | 1,32% |

4.4.3 Orientação Vertical no plano XZ

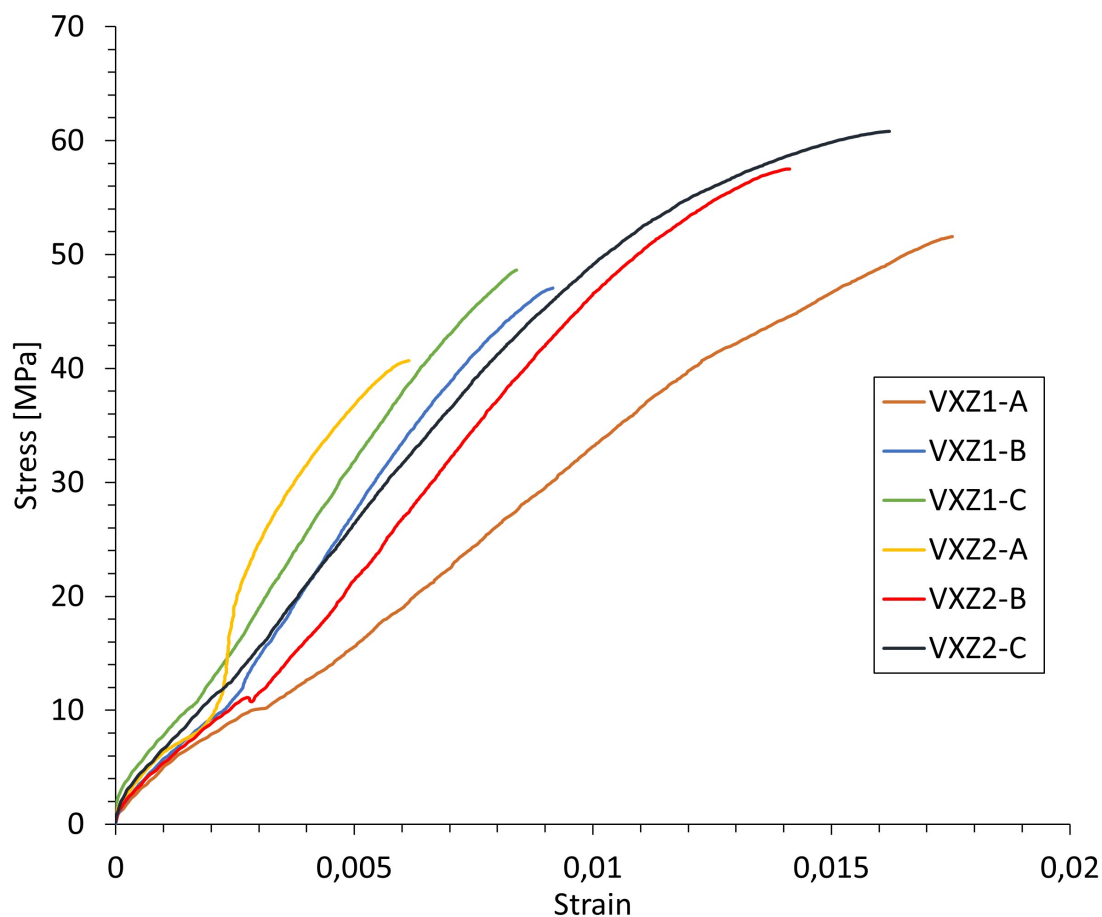


Figura 4.13: Gráfico Tensão-Deformação - Orientação vertical no plano XZ (PPS-CF)

Tabela 4.12: Valores obtidos após ensaio de tração para orientação vertical no plano XZ (PPS-CF)

| Provete | Módulo Young | Tensão de Rotura | Alongamento na Rotura |
|---------|--------------|------------------|-----------------------|
| VXZ1-A | 3,35 GPa | 51,62 MPa | 1,75% |
| VXZ1-B | 5,65 GPa | 47,11 MPa | 1,00% |
| VXZ1-C | 5,81 GPa | 48,75 MPa | 0,84% |
| VXZ2-A | 3,63 GPa | 40,72 MPa | 0,61% |
| VXZ2-B | 3,82 GPa | 57,55 MPa | 1,41% |
| VXZ2-C | 5,32 GPa | 60,82 MPa | 1,62% |
| Média | 4,57 GPa | 51,13 MPa | 1,20% |

4.5 Comparação entre polímeros para cada Orientação de fabrico

4.5.1 Orientação Vertical segundo o eixo Z

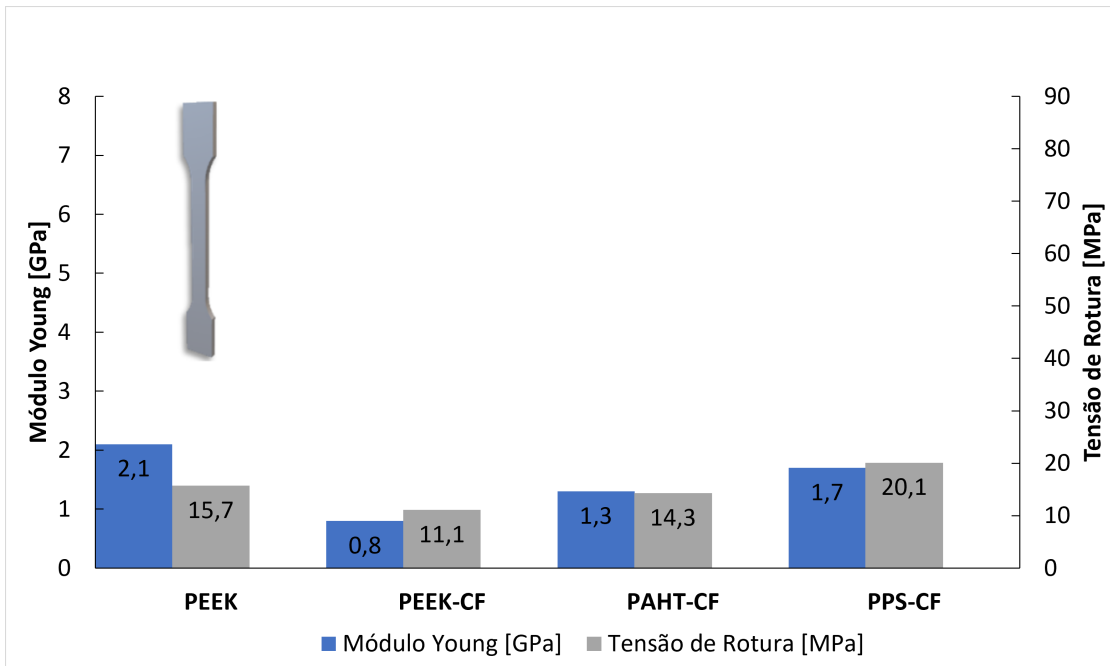


Figura 4.14: Gráfico de comparação na orientação vertical segundo o eixo Z

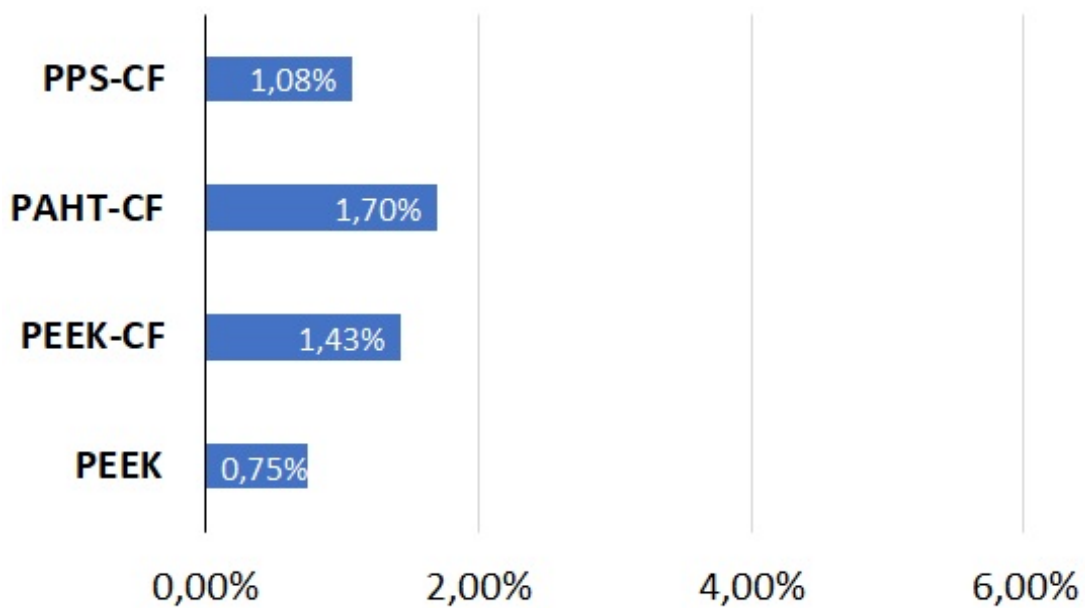


Figura 4.15: Percentagem de alongação na orientação vertical segundo o eixo Z

4.5.2 Orientação Horizontal

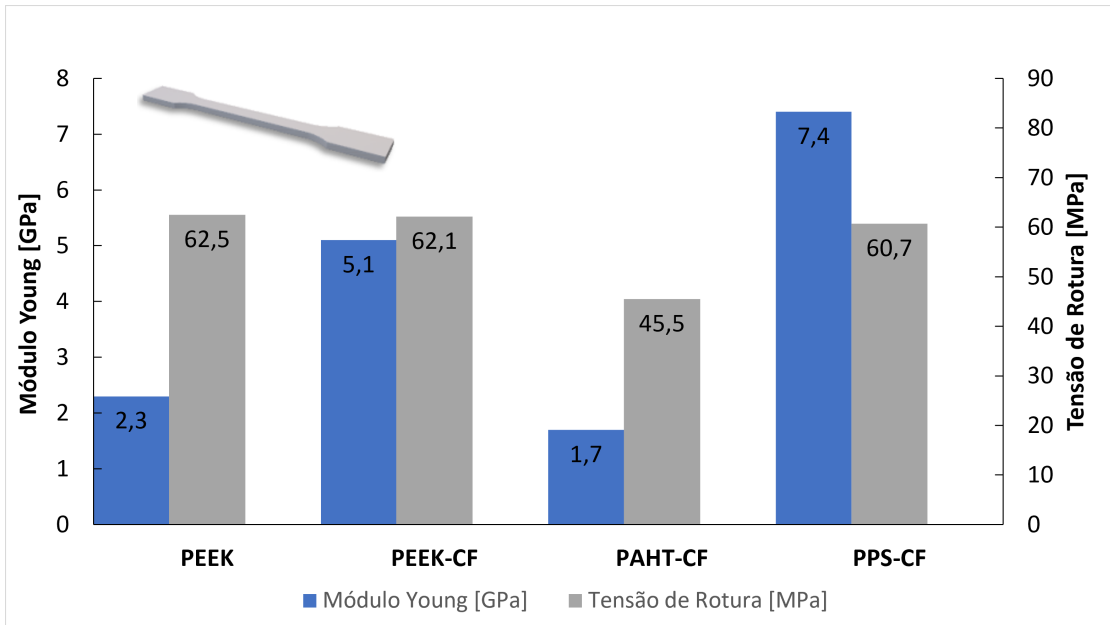


Figura 4.16: Gráfico de comparação na orientação horizontal

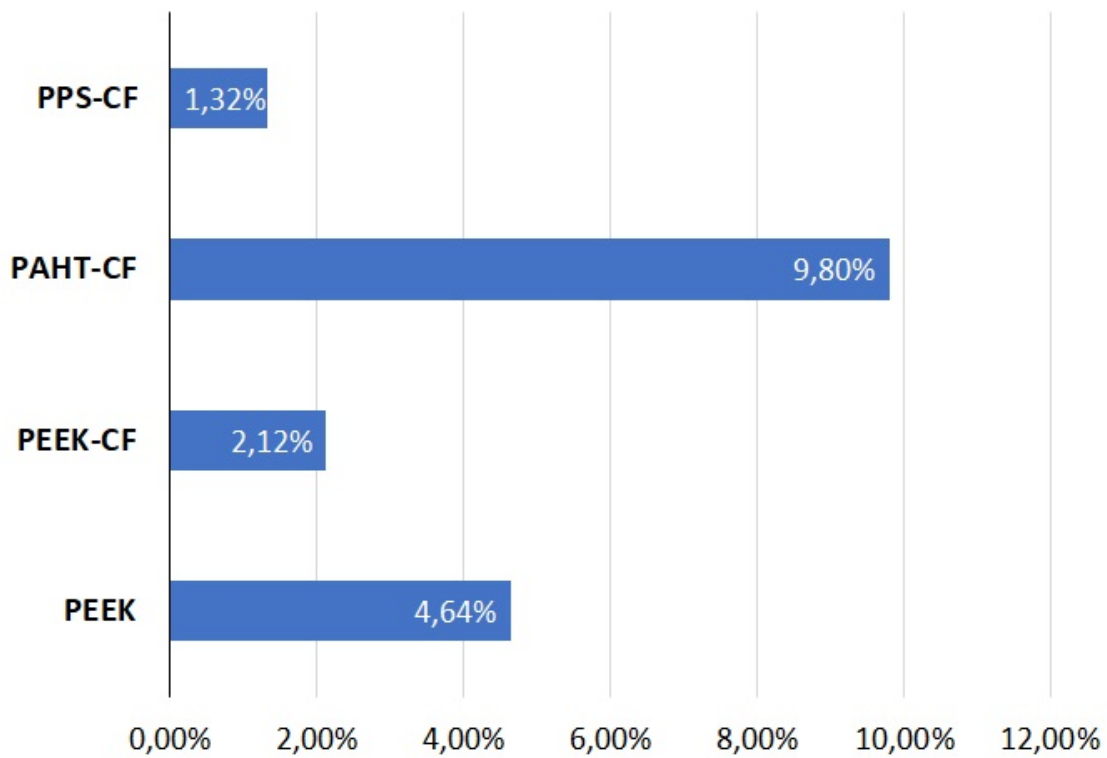


Figura 4.17: Percentagem de alongação na orientação horizontal

4.5.3 Orientação Vertical no plano XZ

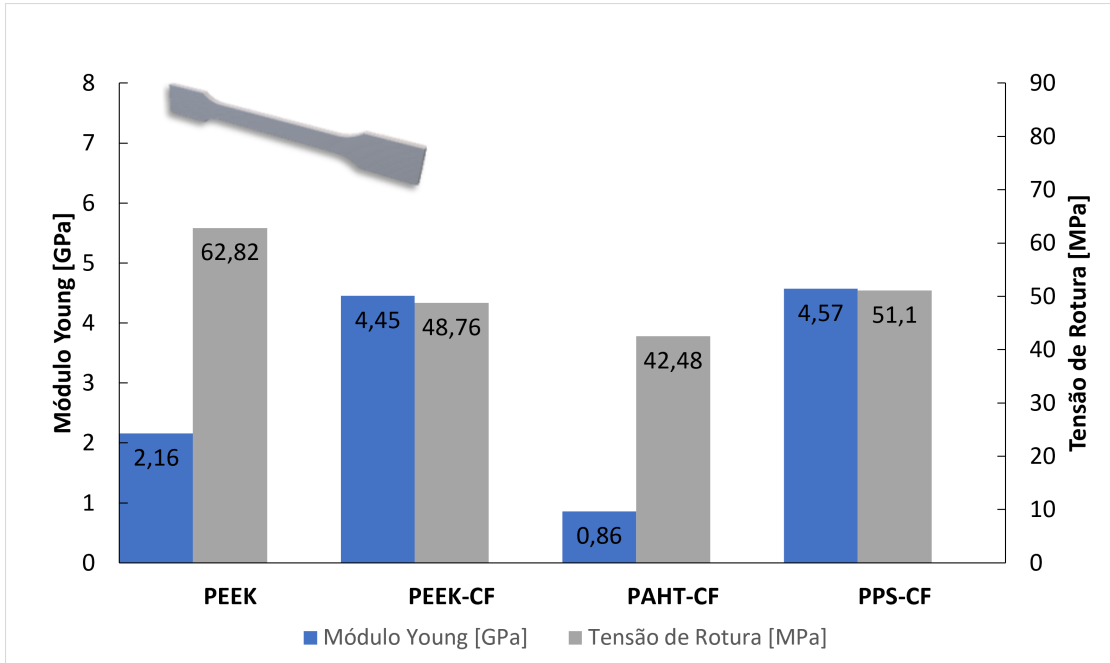


Figura 4.18: Gráfico de comparação da orientação vertical no plano XZ

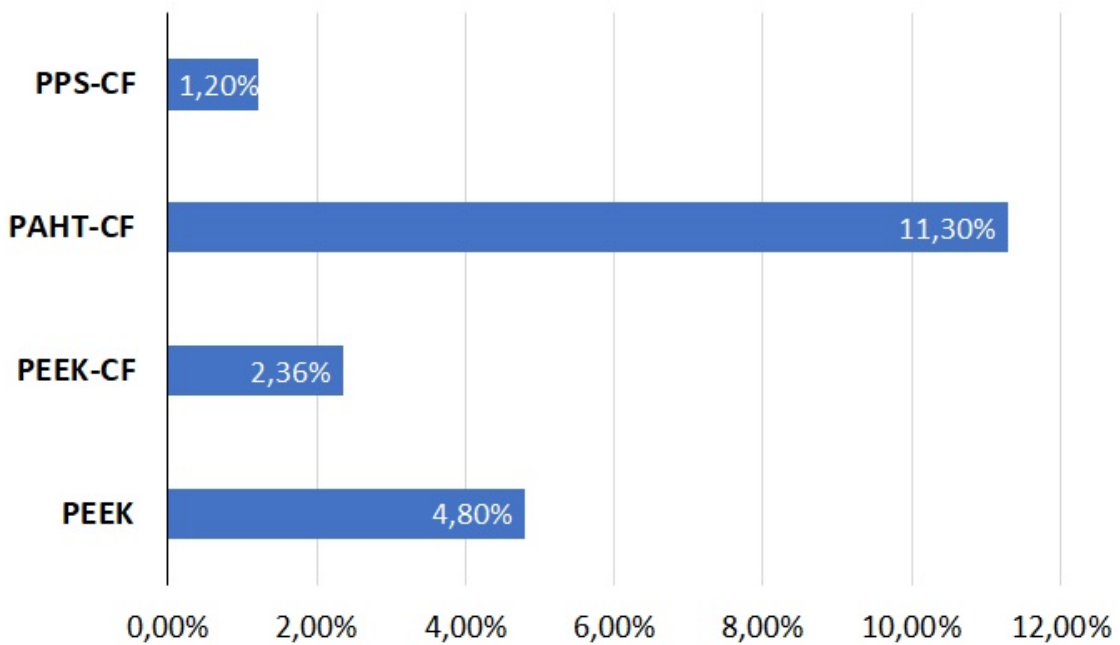


Figura 4.19: Percentagem de alongação da orientação vertical no plano XZ

4.6 Resultados ensaio de tração

Começando pela **orientação vertical segundo o eixo Z** , tal como esperado, é a direção de impressão com piores resultados a nível de comportamento mecânico. O motivo principal pelo qual esta direção não é de todo viável é, tal como foi dito no capítulo anterior, a direção das fibras que formam o provete face ao ensaio a realizar. Na seguinte figura (4.19) facilmente se entende este detalhe que faz os provetes desta direção de impressão serem pouco resistentes à tração, pois tal como podemos observar, a força exercida durante um ensaio é perpendicular as fibras, sendo a única característica a ser avaliada nesta ensaio a adesão entre camada para cada polímero. Face aos resultados resumidos na figura (4.13) os polímeros que apresentaram melhor adesão entre camada é o PEEK e o PPS-CF. Estes apresentaram maior resistência à tração o que se traduziu numa menor alongação, figura (4.14) contrariamente ao polímeros restantes PEEK-CF e PAHT-CF. O facto do módulo de Young ser maior para PEEK e PPS-CF significa que estes provetes destes polímeros são mais rígidos que os restantes para esta direção de impressão.

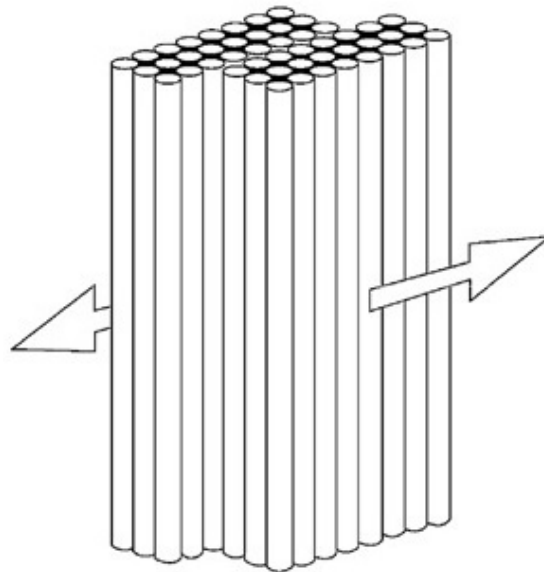


Figura 4.20: Orientação do filamento num provete de orientação vertical segundo o eixo Z

Em relação as direções horizontais pouca diferença existe entre o preenchimento com linhas e o preenchimento concêntrico. Por outro lado pode ser concluído que foram obtidos melhores resultados para o preenchimento com linhas pelo simples facto de não existir tanta probabilidade de defeito na zona das amarras como no preenchimento concêntrico, dado que para este último preenchimento é onde o caminho da impressão tem mais dificuldade no preenchimento sem *gap* entre as linhas. Isto é bem observado na figura (3.14) e na figura (3.16).

Para a **orientação horizontal** e **orientação vertical no plano XZ** os resultados obtidos foram semelhantes embora seja possível identificar diferenças. Dado que a direção das forças durante o ensaio de tração é paralelo aos filamentos constituintes dos provetes destas duas direções, os resultados são reflexo das propriedades mecânicas de cada polímero em questão. Mas embora que os resultados destas duas direções de impressão sejam semelhantes, foram obtidos melhores resultados para a direção horizontal. Isto pode ser explicado com o facto do provete, durante a impressão horizontal, estar mais estável pois existe uma maior área de contacto com a mesa de impressão comparativamente à impressão na posição vertical no plano XZ , traduzindo-se em melhores valores de resistência mecânica.

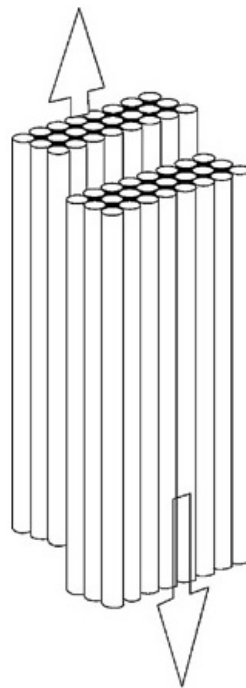


Figura 4.21: Orientação do filamento num provete horizontal ou vertical no plano XZ

Fazendo uma análise dos gráficos apresentados no sub-capítulo 4.5 facilmente se pode concluir que o polímero com melhores resultados foi o PPS-CF. Embora os resultados sejam semelhantes aos resultados para PEEK e PEEK-CF, este polímero diferencia-se dos restantes não só pela relação custo/qualidade mas também pela facilidade de fabrico.

Por estes motivos, e face aos resultados obtidos após os ensaios de tração uniaxiais, foi escolhido este polímero de engenharia PPS-CF, como o polímero a utilizar na próxima etapa deste trabalho.

Capítulo 5

Caso de Estudo

5.1 Descrição do problema

Tal como referido na introdução deste trabalho, após a avaliação das características mecânicas dos polímeros utilizados, foi desenvolvido um caso de estudo que considera as propriedades mecânicas num componente desenvolvido e otimizado para fabrico aditivo, embora que para materiais metálicos com maior resistência mecânica.

O caso de estudo escolhido para este relatório surgiu durante uma pesquisa sobre casos reais onde são de aplicação e utilizados de técnicas de fabrico aditivo. Assim surgiu o *GE jet engine bracket challenge* [45], que consiste na otimização e simulação de um *bracket* existente numa turbina de um dado avião. Este *bracket* tem como função suportar todo o peso do motor em situações de manutenção ou simplesmente manuseamento do motor. Dada a importância deste *bracket*, este não é amovível sendo parte integral do motor mesmo durante os voos.

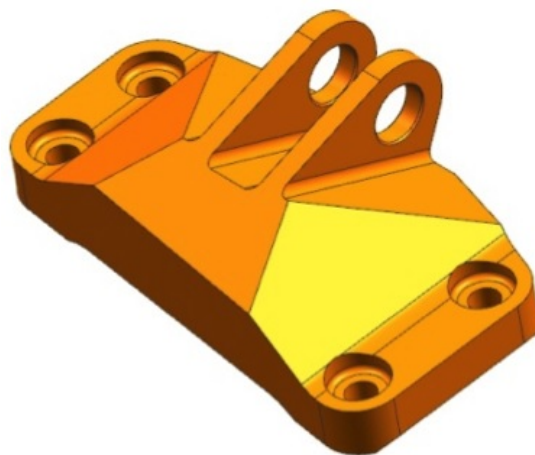


Figura 5.1: *Bracket* original

Entre este setor de aviação e o ramo da engenharia estrutural um objetivo comum é a procura de materiais e formas que possam suportar cargas estruturais específicas. A falha mecânica das peças metálicas ocorre se a tensão máxima de von Mises em qualquer ponto interior da peça exceder o valor do ponto numa curva de tensão-deformação, chamado limite de escoamento, que indica o fim do comportamento elástico e o início do comportamento plástico. Um segundo objetivo comum passa pela maximização da rigidez da peça/componente, que passa pela minimização do deslocamento máximo resultante da carga aplicada. Sendo a redução de massa outro objetivo aliado aos anteriores, o desafio reside então em encontrar formas de fabricação que proporcionem o equilíbrio ótimo entre estas necessidades.

Assim, tal como escolhido anteriormente e pelos resultados obtidos nos ensaios realizados, o polímero com melhores características aplicáveis neste caso de estudo será o PPS-CF. Observando os gráficos obtidos para a direção de impressão horizontal, direção esta onde foram obtidos os melhores resultados neste trabalho, percebemos que o polímero escolhido tem um comportamento semelhante ao seu homólogo polímero PEEK-CF sendo que o seu custo é cerca quatro vezes menos.

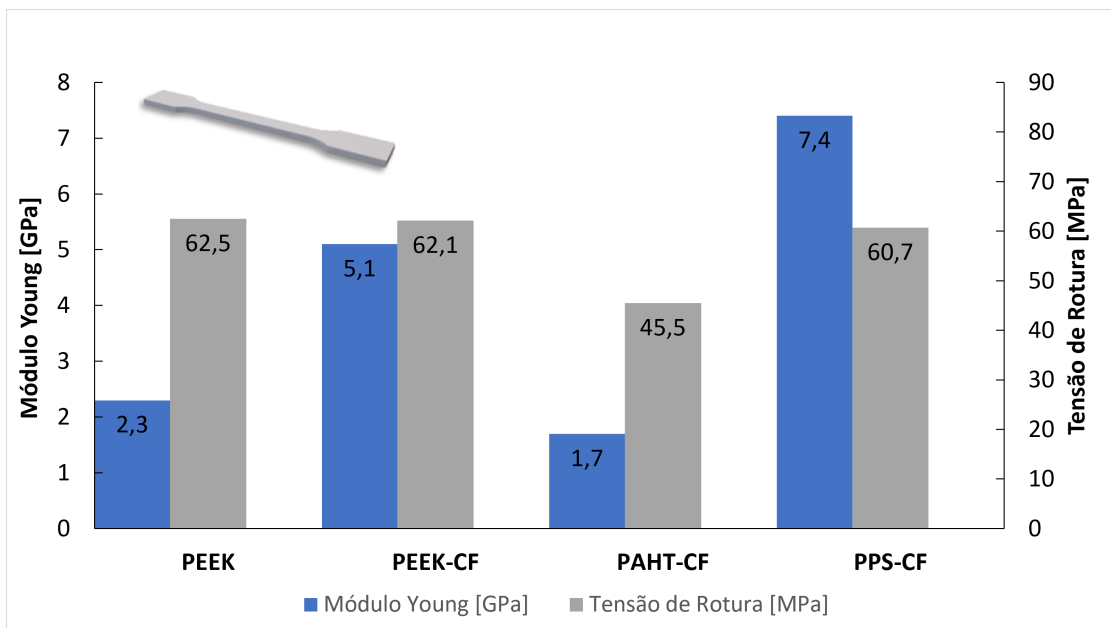


Figura 5.2: Orientação de fabricação selecionada para o caso de estudo

Embora o valor da tensão de ruptura seja semelhante, o valor do módulo de Young é superior no polímero PPS-CF, sendo esta grandeza o valor que reflete a rigidez de cada material.

5.2 Modelo CAD

Como este concurso foi realizado em 2020 os resultados finais estão publicados e, dos cerca de 447 modelos que foram a concurso fez sentido a escolha ser feita tendo em conta o vencedor deste concurso. O modelo seguinte, modelado por Dr.Thomas Johansson, professor na Universidade de Lund na Suécia, foi dos modelos mais pontuados neste concurso, sendo este o motivo de escolha.

Este modelo, representado na Figura 5.3, apresentou uma redução de massa em 83,4% face ao *bracket* original.



Figura 5.3: *Bracket* selecionado

5.3 Simulação Ansys - Materiais e *Load Conditions*

Para a realização da simulação utilizou-se o software Ansys. Embora estejam disponíveis inúmeras bibliotecas de materiais neste software, não constava o polímero escolhido para a realização da simulação. Assim, e através dos dados extraídos dos ensaios de tração foi adicionado o PPS-CF. Primeiro, para conseguirmos recriar o

mais real possível o comportamento do material, temos de definir as propriedades que serão atribuídas ao material, e sendo um material ortotrópico tem propriedades diferentes nas três direções perpendiculares. Selecionando a opção no ansys de que queremos criar um material com propriedades ortotrópicas foi preenchida a seguinte tabela.

| A | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|------------|----|
| 1 | Contents of Engineering Data | | |
| 2 | Material | | |
| 3 | PPS-CF | | |
| Properties of Outline Row 3: PPS-CF | | | |
| | A | B | |
| 1 | Property | Value | |
| 2 | Material Field Variables | Table | |
| 3 | Orthotropic Elasticity | | |
| 4 | Young's Modulus X direction | 7,43E+09 | Pa |
| 5 | Young's Modulus Y direction | 7,43E+09 | Pa |
| 6 | Young's Modulus Z direction | 1,64E+09 | Pa |
| 7 | Poisson's Ratio XY | 0,4 | |
| 8 | Poisson's Ratio YZ | 0,85 | |
| 9 | Poisson's Ratio XZ | 0,07 | |
| 10 | Shear Modulus XY | 2,65E+09 | Pa |
| 11 | Shear Modulus YZ | 2,65E+09 | Pa |
| 12 | Shear Modulus XZ | 1,61E+09 | Pa |
| 13 | Orthotropic Stress Limits | | |
| 14 | Tensile X direction | 6,07E+07 | Pa |
| 15 | Tensile Y direction | 6,07E+07 | Pa |
| 16 | Tensile Z direction | 2,011E+07 | Pa |
| 17 | Compressive X direction | -6,07E+07 | Pa |
| 18 | Compressive Y direction | -6,07E+07 | Pa |
| 19 | Compressive Z direction | -2,011E+07 | Pa |
| 20 | Shear XY | 3,5E+07 | Pa |
| 21 | Shear YZ | 3,5E+07 | Pa |
| 22 | Shear XZ | 1,16E+07 | Pa |

Figura 5.4: Propriedades PPS-CF

Para efeitos de comparação, foi escolhido um segundo material para repetição da simulação feita para o PPS-CF. O material escolhido foi um Alúminio, AlSi10Mg que é utilizado noutro processo de fabrico aditivo também referido neste trabalho DMLS.

A decisão de escolha deste material tem por base o concurso escolhido para este

caso de estudo, pois os primeiros dez lugares desta concurso foram selecionados para a impressão destes componentes via este processo DLMS que, normalmente, utiliza este alumínio com material de impressão. Para além destes fatores é um material já existente nas bibliotecas de materiais no ansys não existindo a necessidade de o acrescentar manualmente a esta lista de materiais.

Cada *bracket* foi simulado de acordo com as quatro condições de carga especificadas pelo concurso (Fig 4.25), sendo avaliados pelos resultados extraídos para os valores do deslocamento segundo as direções X,Y,Z, a magnitude de deslocamento e tensão de Von Mises.

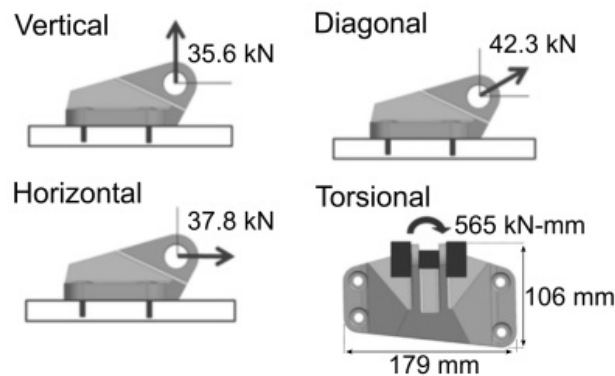
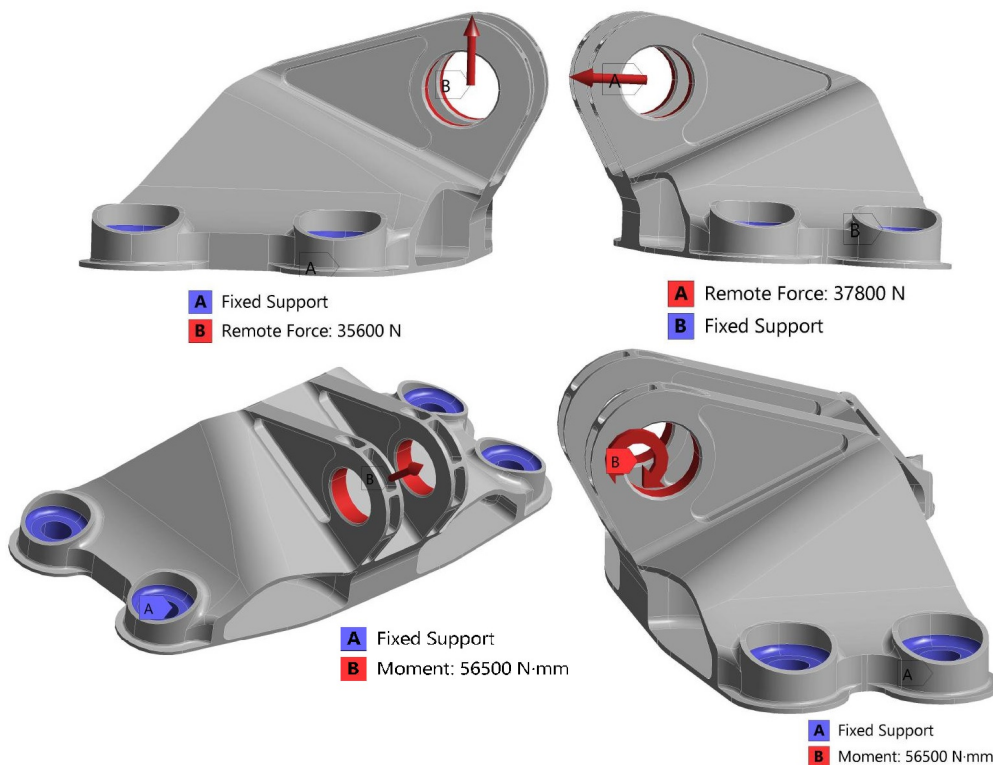


Figura 5.5: Quatro tipos de *load conditions*



5.3.1 Resultados de simulação - PPS-CF

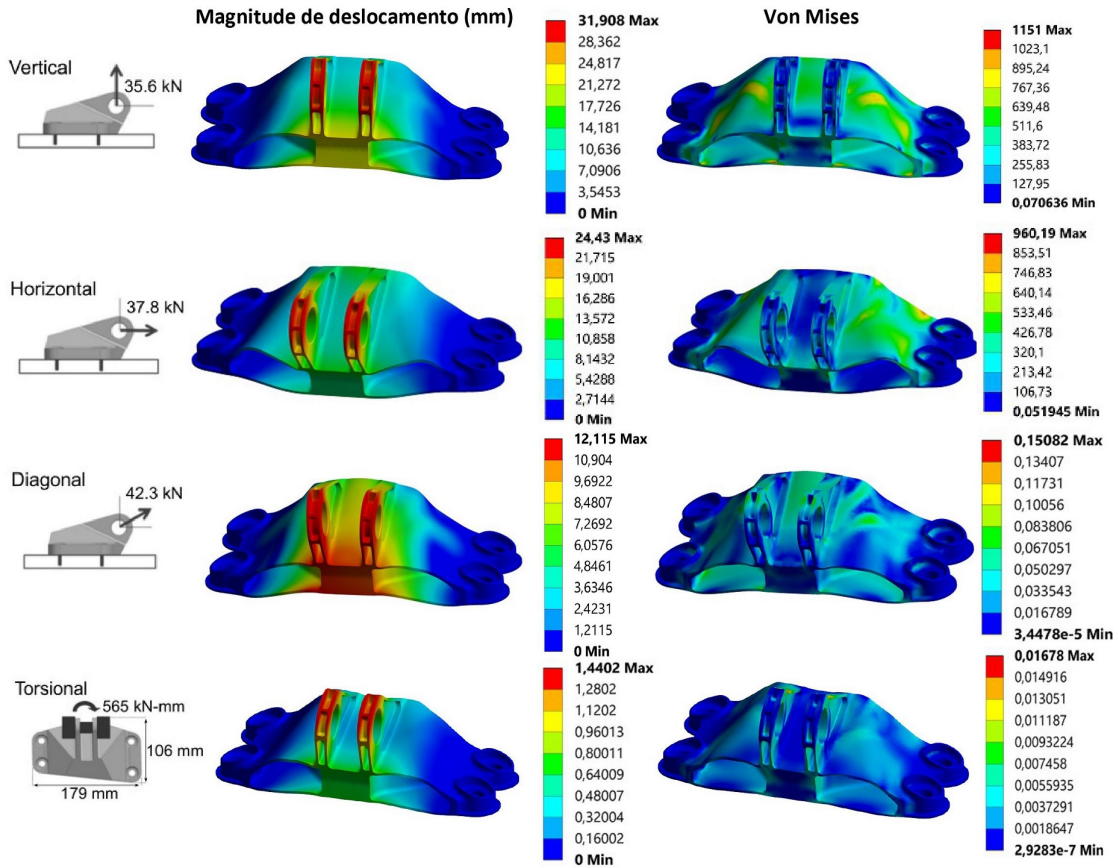
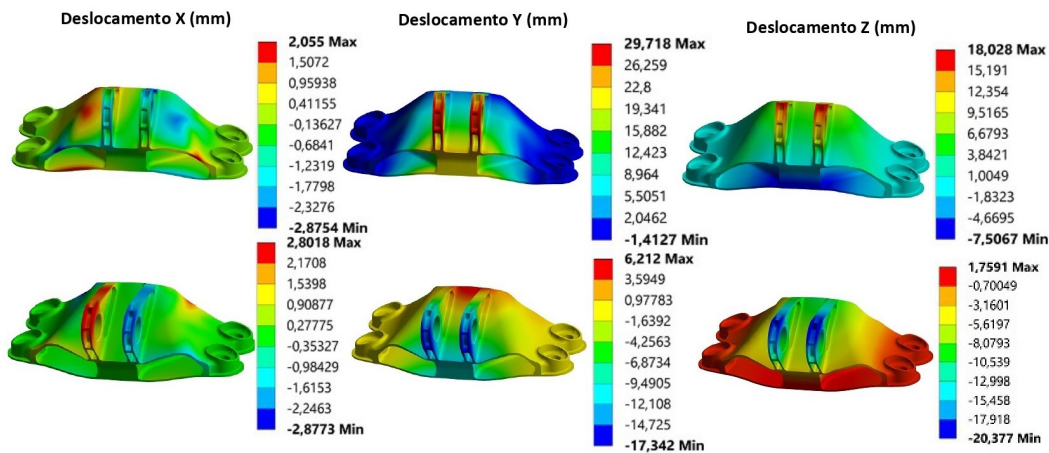


Figura 5.6: Caso 1 - Bracket em PPS-CF com Load Conditions iniciais



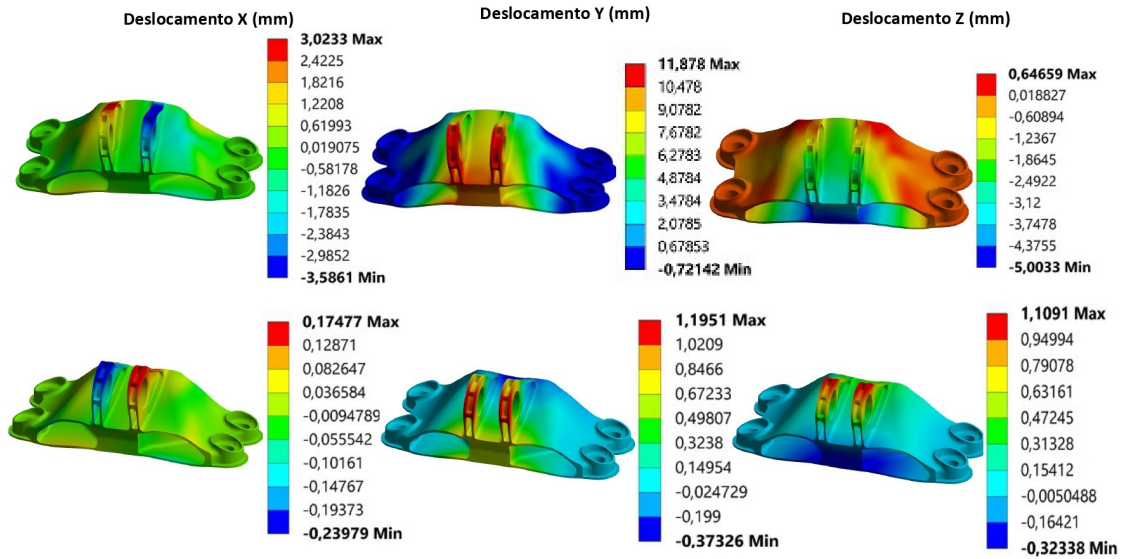


Figura 5.7: Caso 1 - Continuação

Face aos resultados obtidos para este primeiro caso, era expectável que as forças que são aplicadas fossem de uma magnitude em que o *bracket* não tem rigidez suficiente para as suportar sem entrar em rotura.

O facto do material PPS-CF ser um material ortotrópico, sendo ortotrópico um material em que o comportamento mecânico difere nos três eixos perpendiculares entre si, a simulação feita pelo ansys fica complexa para este caso específico deste *bracket* não existindo coerência para os valores obtidos.

Isto é possível entender fazendo uma comparação de resultados com os resultados de simulação para o alumínio AlSi10Mg, onde por exemplo, a tensão máxima de von Mises para o caso da força de 35,6kN aplicada na vertical para o PPS-CF obtemos um valor máximo de 1151 MPa e no alumínio 572,76 MPa, sendo este valor praticamente metade do obtido no PPS-CF.

É então interessante arranjar um valor de cargas máximas para que este *bracket* seja capaz de suportar antes de transitar da região elástica para a região plástica.

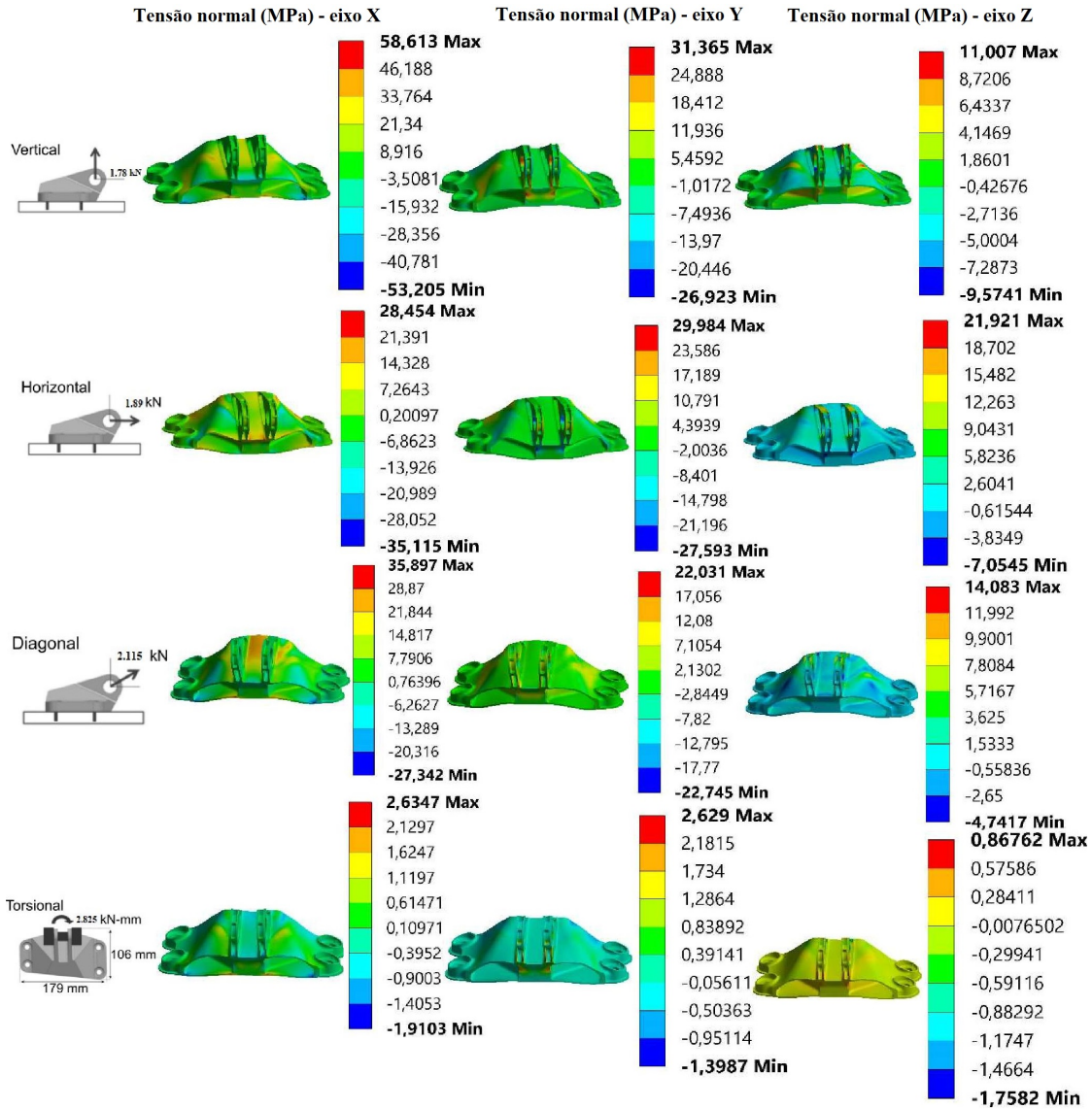
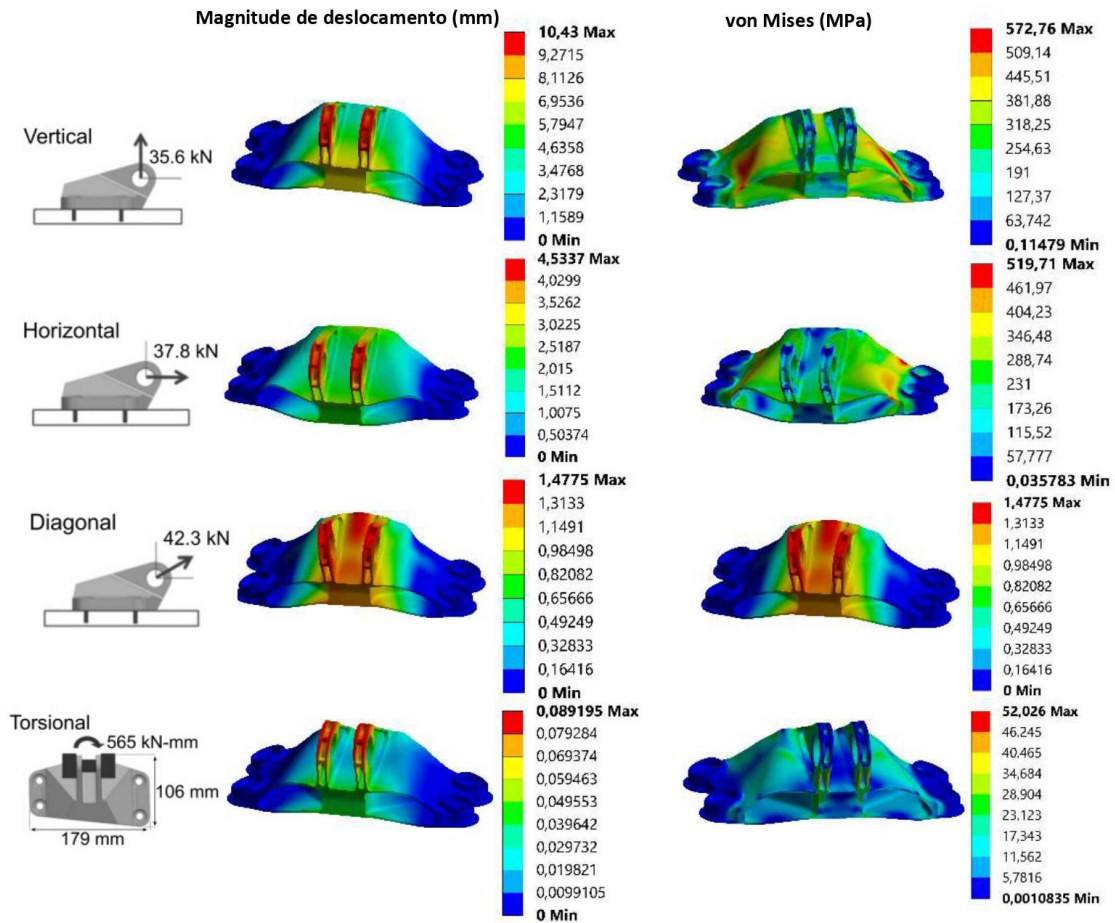


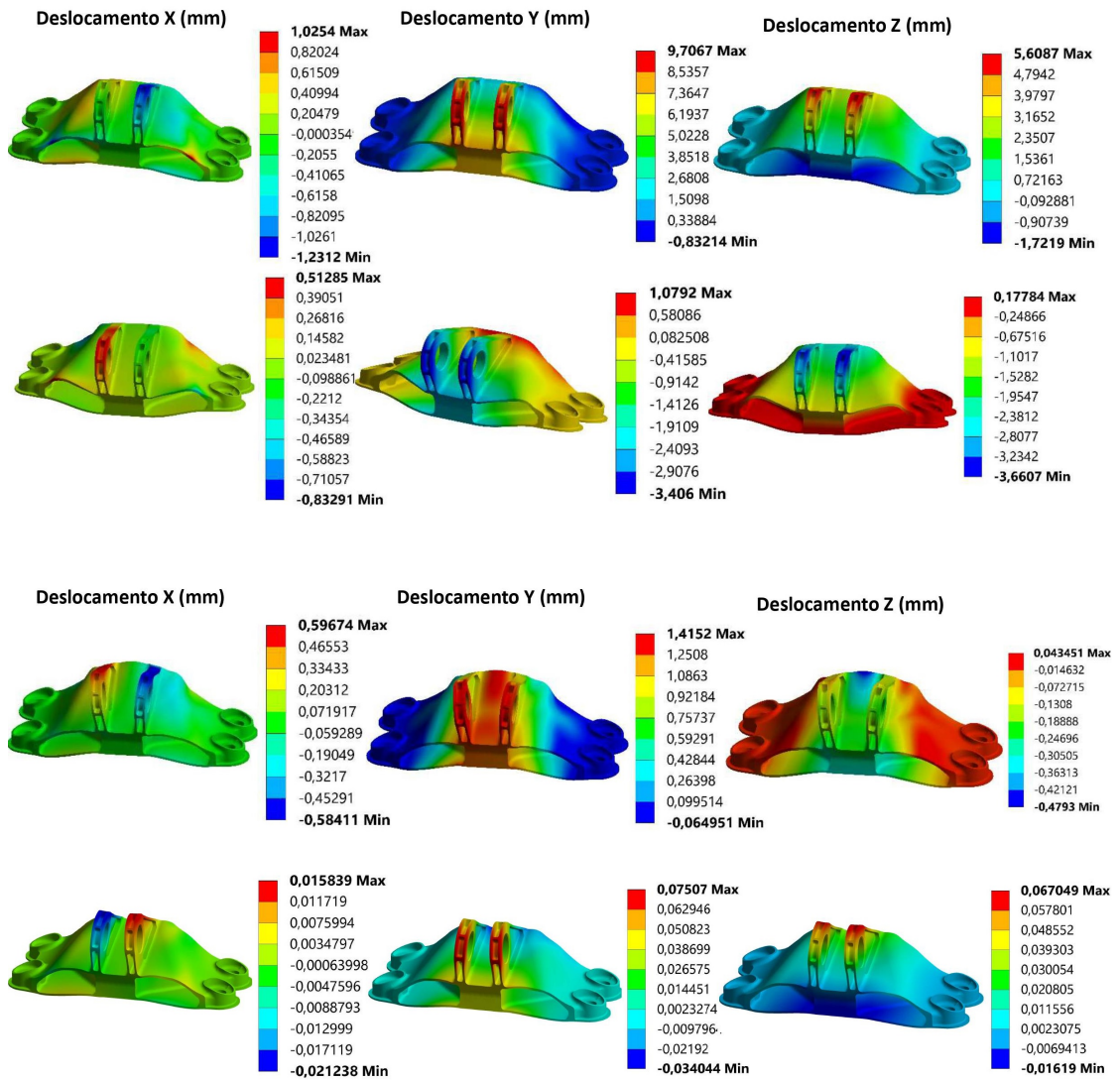
Figura 5.8: Caso 2 - *Bracket* em PPS-CF com 5% de *Load Conditions*

Para este design de *bracket* e recorrendo ao método de fabricação moldação por extrusão e deposição, tendo em conta os resultados obtidos já seria plausível a utilização deste material. Sabendo as tensões de cedência obtidas para cada direção axial facilmente se entende que para este caso específico onde foram aplicadas 5% das cargas aplicadas no caso 1, seria possível a produção deste *bracket* utilizando este polímero como filamento de fabrico.

Seria interessante realizar alterações no *bracket* aproveitando as possibilidades proporcionadas pelo método de fabrico (por exemplo elevando a espessura do mesmo) aumentando a rigidez deste o que levaria a uma maior capacidade de suportar os esforços minimizando os deslocamentos que a peça sofre aumentando a resistência geral do *bracket*.

5.3.2 Resultados de simulação - AlSi10Mg





| Properties | As Built |
|--------------------------------|--------------------|
| Tensile Strength | 460±20 MPa (XY) |
| | 460±20 MPa (Z) |
| Yield Strength (Rp 0.2%) | 270±10MPa (XY) |
| | 240±10 MPa (Z) |
| Modulus of Elasticity | 75±10 GPa (XY) |
| | 70±10 GPa (Z) |
| Elongation at Break | (9±2)% (XY) |
| | (6±2)% (Z) |
| Hardness | 119±5 HBW |
| Fatigue Strength | 97±7 MPa (Z) |
| Thermal Conductivity (at 20°C) | 103 ± 5 W/m°C (XY) |
| | 119 ± 5 W/m°C (Z) |

Figura 5.9: Propriedades do Alumínio (ALSi10Mg) [46]

Foi realizada uma segunda simulação com um alumínio de modo a ser possível a comparação de resultados e avaliação da veracidade dos resultados obtidos para o polímero PPS-CF e avaliar se através de outra tecnologia de fabrico aditivo o comportamento da peça suportaria os esforços requisitados.

Assim foi escolhido em específico este alumínio AlSi10Mg pois, como este trabalho é alusivo a técnicas de fabrico aditivo, entendeu-se que faz sentido a comparação de resultados com um material que seja passível de ser fabricado através do uso de outra tecnologia de fabrico aditivo.

Através do fabrico por fusão seletiva a laser (DMLS) poderíamos obter facilmente esta peça e analisando os resultados obtidos nesta segunda simulação embora a peça seja mais resistente aos esforços comparativamente ao polímero PPS-CF, ainda não seria viável a utilização deste material como método de fabrico para este caso de estudo.

Conclui-se assim que, para este caso de estudo, seria necessário recorrer a técnicas de fabrico tradicionais capazes de produzir este *bracket* numa liga de aço reforçado ou, sendo que este caso de estudo seria para utilizar num ramo da aviação, utilizar uma liga de titânio embora este aumente o custo diminuía o peso.

Capítulo 6

Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

O processo de fabrico aditivo veio possibilitar a utilização de vários materiais para a produção de geometrias complexas, incluindo a utilização de materiais poliméricos reforçados com fibras, que permite a obtenção de componentes com resistência específica elevada. Estes materiais podem ser explorados em várias aplicações permitindo o fabrico de peças com geometrias inovadoras e com resistência específica interessantes para várias aplicações e, tal como foi observado neste trabalho, já permitem resultados satisfatórios onde, com iterações e aperfeiçoamento da geometria da peça se consiga alcançar valores próximos de peças obtidas em metal com a vantagem deste processo ter um custo menor de projeto.

Através destas iterações do processo de fabrico, alterando por exemplo a forma como as peças são orientadas durante o processo de produção permite a exploração de diferentes características que serão obtidas num produto final. Tal como foi observado, em diferentes orientações de fabrico para o mesmo provete, este adquire propriedades mecânicas distintas o que se traduz num comportamento mecânico diferente quando submetidos a um mesmo ensaio mecânico.

Assim, a direção de fabrico onde foram obtidos melhores resultados práticos foi na *orientação horizontal*. Embora os resultados entre a *orientação vertical no plano XZ* e a *orientação horizontal* sejam semelhantes, avaliando os resultados individualmente para cada polímero, nesta *orientação horizontal*, os valores da tensão de rotura e do módulo de Young obtidos são ligeiramente superiores.

Relativamente aos polímeros utilizados, concluiu-se que o polímero para este tipo de fabrico FFF com melhores resultados neste trabalho foi sulfureto de polifenileno reforçado com 15 % de fibra de carbono (PPS-CF). O facto dos resultados para os polímeros PEEK e PEEK-CF, que são considerados dos polímeros de engenharia com melhores propriedades mecânicas, terem ficado aquém dos resultados obtidos para o PPS-CF poderá significar que para esta tecnologia de fabrico (FFF) para

estes polímeros específicos, seria necessário procurar uma forma de fazer realçar estas características. Uma das formas que iria fazer diferença nestes resultados seria o recozimento destes provetes imediatamente após impressão, através de estágios ou estágio de recozimento (*annealing*).

Para finalizar, com o caso de estudo foi concluído que o polímero PPS-CF ainda não é viável de se utilizar nesta aplicação para o *bracket*, onde este iria substituir ligas metálicas, embora que para outros componentes, e com alteração do projeto, seja possível usar estes polímeros reforçados.

6.2 Trabalhos futuros

Apesar do ensaio de tração axial ser um bom indicador do comportamento mecânico de um material, deverão ser realizados ensaios de flexão, novos ensaios de tração e ensaios de impacto. Estes ensaios iriam permitir uma melhor classificação do polímero em questão, obtendo mais propriedades para formarem o modelo do material a criar num software como o ANSYS.

Outro fator que poderá influenciar os resultados é o recozimento dos provetes pós fabrico. Sendo recozidos por estágios de temperatura, as propriedades das peças fabricadas são alteradas uma vez que ajuda o provete na consolidação da forma final anulando tensões interiores da peça que poderão ser um ponto de menor resistência a forças externas permitindo melhorar as propriedades dos provetes. Esta prática iria envolver o estudo de temperaturas de cozimento de cada polímero bem como o tempo ideal para cozimento e se será possível colocar a peça em questão diretamente num forno pré aquecido ou se é necessário existir um aumento gradual de temperatura dadas as dimensões dos provetes.

Bibliografia

- [1] N. Volpato. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Editora Blucher, 2017.
- [2] J. Horvath. A brief history of 3d printing. In *Mastering 3D Printing*, pages 3–10. Springer, 2014.
- [3] C. Relvas. *O mundo da impressão 3d e do fabrico digital*. Engebook-Conteúdos de Engenharia e Gestão.
- [4] T. J. Horn and O. Harrysson. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science progress*, 95(3):255–282, 2012.
- [5] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani. *Additive manufacturing technologies*, volume 17. Springer, 2021.
- [6] M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang. A review on 3d micro-additive manufacturing technologies. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 67(5):1721–1754, 2013.
- [7] J. Horvath and R. Cameron. *Mastering 3D printing*. Springer, 2014.
- [8] J. Hiemenz. 3D printing with FDM: How it Works. *Stratasys Inc*, 1:1–5, 2011.
- [9] R. Noorani. *3D printing: technology, applications, and selection*. CRC Press, 2017.
- [10] Print It 3D. Tipos de impressora 3d e suas aplicações. <https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-impressora-3d>. [Online; accessed 08-June-2022].
- [11] A. Rashid and M. Koç. Fused filament fabrication process: A review of numerical simulation techniques. *Polymers*, 13(20):3534, 2021.
- [12] S. S. Crump. Apparatus and method for creating three-dimensional objects, 1992. US Patent 5,121,329.
- [13] P. K. Venuvinod. *Rapid prototyping: laser-based and other technologies*, 2004.
- [14] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani. *Additive manufacturing technologies*, volume 17. Springer, 2021.
- [15] M. Schmid, A. Amado, and K. Wegener. Polymer powders for selective laser sintering (sls). *AIP Conference Proceedings*, 1664(1):160009, 2015.
- [16] F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, and A. W. Basit. Selective laser sintering (sls) 3d printing of medicines. *International Journal of Pharmaceutics*,

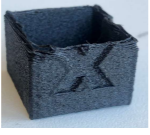
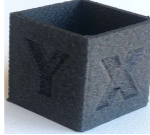






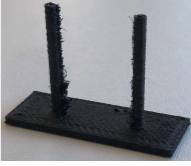

- 529(1):285–293, 2017.
- [17] A. Ramos, C. Relvas, J. Simoes, and L. Mota. *Engenharia + Design: da ideia ao produto*. PUBLINDUSTRIA, 2017.
- [18] WhiteClouds. Digital Light Processing (DLP). <https://www.whiteclouds.com/3dpedia/dlp/>. [Online; accessed 08-June-2022].
- [19] P. G. Martinho. Chapter 9 - rapid manufacturing and tooling. In Antonio Sergio Pouzada, editor, *Design and Manufacturing of Plastics Products*, Plastics Design Library, pages 381–456. William Andrew Publishing, 2021.
- [20] D. Ratna. Chapter 2 - properties and processing of thermoset resin. In *Recent Advances and Applications of Thermoset Resins (Second Edition)*, pages 173–292. Elsevier, second edition edition, 2022.
- [21] Filament2print. What 3d printing can contribute to mold making. https://filament2print.com/gb/blog/87_manufacturing-molds-3d-printing.html. [Online; accessed 20-July-2022].
- [22] M. Attaran. The rise of 3-d printing: the advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60, 08 2017.
- [23] L. Robeson, W. Burgoyne, M. Langsam, A. Savoca, and C. Tien. High performance polymers for membrane separation. *Polymer*, 35, 1994.
- [24] Nylacast. Classificação de polímeros de engenharia. <https://www.nylacast.com/engineering-polymers>. [Online; accessed 12-June-2022].
- [25] J. G Speight. Handbook of industrial hydrocarbon processes. pages 597–649. Gulf Professional Publishing, 2020.
- [26] S Kulkarni. Properties of polymers and plastics that influence injection molding. In *Robust Process Development and Scientific Molding (Second Edition): Hanser*, pages 13–40. 2017.
- [27] P. Kennedy and R. Zheng. “*Material Properties of Polymers*,”. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013.
- [28] E. A. Campo. *The Complete Part Design Handbook: for Injection Molding of Thermoplastics*. Hanser Gardner Publications, Cincinnati, USA, 2006.
- [29] L. McKeen. 12 - high temperature/high performance polymers. In Laurence W. McKeen, editor, *Permeability Properties of Plastics and Elastomers (Fourth Edition)*, Plastics Design Library, pages 289–303. William Andrew Publishing, fourth edition edition, 2017.
- [30] S. Suphangul, D. Rokaya, C. Kanchanasobhana, P. Rungsiyakull, and P. Chaijareenont. Peek biomaterial in long-term provisional implant restorations: A review. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(2), 2022.
- [31] Petervaldivia. Processo de extrusão de polímeros. <https://www.petervaldivia.com/fabrication-of-plastics/>. [Online; accessed 29-June-2022].
- [32] Smart Tech Analysis. 3D Printing growth (CAGR) by industry. <https://www.smartechanalysis.com/reports/>. [Online; accessed 19-July-2022].

- [33] 3Dprint.com. BMW creates fully automated production lines for 3D printed car parts. <https://3dprint.com/291527/bmw-creates-fully-automated-production-lines-for-3d-printed-car-parts/>, May 2022. [Online; accessed 19-July-2022].
- [34] BMW Group. Additive manufacturing developed by bmw group. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0392573EN/successful-industrialisation-and-digitalisation-of-additive-manufacturing?showMedia=video>. [Online; accessed 19-July-2022].
- [35] G. Shi, C. Guan, D. Quan, D. Wu, L. Tang, and T. Gao. An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33, 10 2019.
- [36] Invisalign. How does invisalign® treatment work. <https://www.invisalign.com/how-invisalign-works>. [Online; accessed 19-July-2022].
- [37] IEMEI3D. First clinical case of 3d printed peek clavicle implantation. <https://www.iemai3d.com/index.php/first-clinical-case-of-3d-printed-peek-clavicle-implantation/>. [Online; accessed 19-July-2022].
- [38] A. Romero, M. Tulio Piovan, C. Mainetti, D. Stechina, S. Mendoza, H. Martín, and N. Maggi. Tensile properties of 3d printed polymeric pieces: Comparison of several testing setups. *Ingeniería e Investigación*, 41:e84467, 03 2021.
- [39] Crea3D. Intamsys PEEK - 500G . <https://www.crea3d.com/en/intamsys-materials/636-intamsys-peek-175mm-500g.html>. [Online; accessed 12-October-2022].
- [40] 3DXtech. Intamsys PEEK-CF - 500G . <https://3dprintersdepot.com/products/intamsys-peek-cf-1-75mm-filament-1>. [Online; accessed 12-October-2022].
- [41] Ultrafuse. Ultrafuse PAHT-CF - 750G. <https://www.ultrafusefff.com/product/ultrafuse-paht-cf-175mm-750g/>. [Online; accessed 12-October-2022].
- [42] Essentium. Essentium PPS-CF - 2.5 kg. <https://essentium.com/product/essentium-pps-cf/>. [Online; accessed 12-October-2022].
- [43] M. F. Ashby, H. Shercliff, and D. Cebon. *Materials: engineering, science, processing and design*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [44] Polymer data base. Stress strain behavior of polymers. <https://polymerdatabase.com/polymer/20physics/Stress-Strain/20Behavior.html>. [Online; accessed 20-July-2022].
- [45] E. Whalen, A. Beyene, and C. Mueller. SimJEB: Simulated Jet Engine Bracket Dataset. *Computer Graphics Forum*, 2021.
- [46] Proto3000. Propriedades alsil0mg. <https://proto3000.com/materials/dmls-aluminum-2/#technicalspecifications>. [Online; accessed 12-

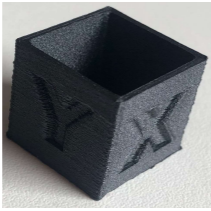
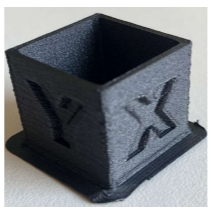
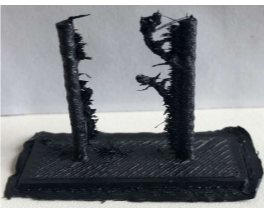
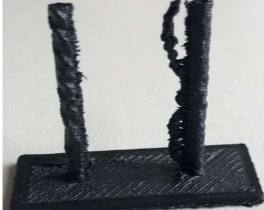
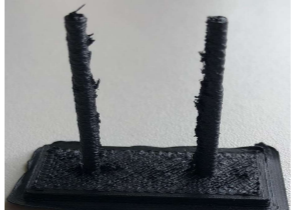

October-2022].

Apêndice A

Anexos

| Calibração PEEK-CF | | Iteração | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---------------------|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| Material | PEEK-CF | | | | | | | | | | | |
| Marca filamento | Intamsys | | | | | | | | | | | |
| Diâmetro | 1,75mm | | | | | | | | | | | |
| Slicer | Intamsuite 3.8.0 | | | | | | | | | | | |
| Impressora | Intamsys Funmat Pro 410 | | | | | | | | | | | |
| Nozzle | HT 0,6mm | | | | | | | | | | | |
| Quality | Layer Height [mm] | 0,25 | | | | 0,25 | 0,25 | | | 0,25 | 0,25 | |
| | Initial Layer Height [mm] | 0,2 | | | | 0,25 | 0,25 | | | 0,25 | 0,25 | |
| | Line Width [mm] | 0,6 | | 0,25 | | 0,6 | 0,6 | | | 0,6 | 0,6 | |
| Shell | Wall Thickness [mm] | 1,2 | | | | 1,2 | 1,2 | | | 1,2 | 1,2 | |
| | Wall Line Count | 2 | | | | 2 | 2 | | | 2 | 2 | |
| | Top Surface Layers | 0 | | | | 5 | 5 | | | 5 | 5 | |
| | Top/Bottom Pattern[lines/concentric/zig zag] | lines | | | | lines | lines | | | lines | lines | |
| Infill | Infill Density [%] | 0 | | | | 100 | 100 | | | 100 | 100 | |
| | Infill Pattern | - | | | | lines | lines | | | lines | lines | |
| | Infill Layer Thickness [mm] | 0,25 | | | | 0,25 | 0,25 | | | 0,25 | 0,25 | |
| Material | Printing Temperature [°C] | 440 | 410 | | | 410 | 410 | | | 410 | 410 | |
| | Printing Temperature Initial Layer [°C] | 440 | 410 | | | 410 | 410 | | | 410 | 410 | |
| | Initial Printing Temperature [°C] | 440 | 410 | | | 410 | 410 | | | 410 | 410 | |
| | Build Plate Temperature [°C] | 130 | | | | 130 | 130 | | | 130 | 130 | |
| | Chamber Temperature [°C] | 90 | | | | 90 | 90 | | | 90 | 90 | |
| | Diameter of filament [mm] | 1,75 | | | | 1,75 | 1,75 | | | 1,75 | 1,75 | |
| | Flow [%] | 103 | 98 | 96 | 93 | 92 | 92 | | | 92 | 92 | |
| | Initial Layer Flow [%] | 103 | 98 | 96 | 93 | 92 | 92 | | | 92 | 92 | |
| | Enable Retraction [ON/OFF] | on | | | | on | on | | | on | on | |
| | Retraction Distance [mm] | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | 3 | | 1 | 1 |
| | Retraction Speed [mm/s] | 45 | | | | 45 | 45 | | | 45 | 45 | |
| | Retraction Extra Prime Amount [mm-3] | 0 | | | | 0 | 0 | | | 0 | 0 | |
| Speed | Print Speed [mm/s] | 60 | | 45 | 45 | 45 | 45 | | | 45 | 45 | |
| | Infill Speed [mm/s] | - | | | | 45 | 45 | | | 45 | 45 | |
| | Inner Wall Speed [mm/s] | 60 | | 45 | 45 | 45 | 45 | | | 45 | 45 | |
| | Outer Wall Speed [mm/s] | 30 | | 45 | 45 | 45 | 45 | | | 45 | 45 | |
| | Support Speed [mm/s] | - | | | | 45 | 45 | | | 45 | 45 | |
| | Travel Speed [mm/s] | 250 | | | | 250 | 250 | | | 250 | 250 | |
| | Initial Layer Speed [mm/s] | 30 | | 30 | 45 | 45 | 45 | | | 45 | 45 | |
| Travel | Z Hop When Retracted [ON/OFF] | on | | | | on | on | | | on | on | |
| | Z Hop Only Over Printed Parts [ON/OFF] | on | | | | on | on | | | on | on | |
| | Z Hop Height [mm] | 0,5 | | | | 0,5 | 0,5 | | | 0,5 | 0,5 | |
| Support | Support Placement [touching bulplate/ everywhere] | - | | | | - | - | | | - | - | |
| | Support Pattern | - | | | | - | - | | | - | - | |
| | Support Density [%] | - | | | | - | - | | | - | - | |
| | Support Z Distance [mm] | - | | | | - | - | | | - | - | |
| Build Plate Adhesion | Type [skirt, brim, raft, none] | brim, 5 lines, 3mm | | | | brim | brim | | | brim | brim | |
| Fotografia Cubo sem preenchimento (20x20x20mm) | |  |  |  |  |  | | | | | | |
| Cubo sem preenchimento (20x20x20mm) | Face X (mm) | | 1,38 | 1,32 | 1,26 | 1,24 | | | | | | |
| | Face oposta X (mm) | | 1,27 | 1,31 | 1,27 | 1,2 | | | | | | |
| | Face Y (mm) | | 1,3 | 1,32 | 1,29 | 1,24 | | | | | | |
| | Face oposta Y (mm) | | 1,35 | 1,35 | 1,29 | 1,24 | | | | | | |
| | Comentário Final | | melhorar fluxo, e velocidades de impressão | aprimorar dimensões paredes com fluxo e eixos | aprimorar fluxo | medidas aceitáveis a serem confirmadas com o cubo de infill 100% | | | | | | |
| Fotografia Torre de Retraction | | | | | |  |  |  |  | | | |
| Torre de Retraction | Comentário Final | | | | | mudar retraction de 1 para 3 para reduzir strings | Z hop when retracted off | manter retraction em 1 e manter z hop | Retraction satisfatória | | | |
| Cubos com preenchimento | | | | | | | | | |  | | |
| Cubos com preenchimento | Face X (mm) | | | | | | | | | | 19,94 | |
| | Face Y (mm) | | | | | | | | | | 19,98 | |
| | Face Z (mm) | | | | | | | | | | 19,96 | |
| | Comentário Final | | | | | | | | | | Dimensões validadas | |

| Calibração PAHT-CF | | Iteração | | | | | | | | | |
|--|---|--|--|--------------------|--|--|--|--|---------------------------|---|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Material | PAHT-CF | | | | | | | | | | |
| Marca filamento | Ultrafuse | | | | | | | | | | |
| Diâmetro | 1,75mm | | | | | | | | | | |
| Slicer | Intamsuite 3.8.0 | | | | | | | | | | |
| Impressora | Intamsys Funmat Pro 410 | | | | | | | | | | |
| Nozzle | HT 0,6mm | | | | | | | | | | |
| Quality | Layer Height [mm] | 0,2 | | | | 0,2 | 0,2 | 0,2 | | | 0,2 |
| | Initial Layer Height [mm] | 0,25 | | | | 0,25 | 0,25 | 0,25 | | | 0,25 |
| | Line Width [mm] | 0,6 | | | | 0,6 | 0,6 | 0,6 | | | 0,6 |
| Shell | Wall Thickness [mm] | 1,2 | | | | 1,2 | 1,2 | 1,2 | | | 1,2 |
| | Wall Line Count | 2 | | | | 2 | 2 | 2 | | | 2 |
| | Top Skin Surface Layers | 0 | | | | 0 | 0 | 0 | | | 0 |
| | Top/Bottom Pattern (lines/concentric/zig zag) | concentric | | | | concentric | concentric | concentric | | | concentric |
| Infill | Infill Density [%] | 0 | | | | 0 | 0 | 0 | | | 0 |
| | Infill Pattern | 0 | | | | 0 | 0 | 0 | | | 0 |
| | Infill Layer Thickness [mm] | 0 | | | | 0 | 0 | 0 | | | 0 |
| Material | Printing Temperature [°C] | 260 | | | | 260 | 260 | 260 | | | 260 |
| | Printing Temperature Initial Layer [°C] | 255 | | | | 255 | 255 | 255 | | | 255 |
| | Initial Printing Temperature [°C] | 250 | | | | 250 | 250 | 250 | | | 250 |
| | Build Plate Temperature [°C] | 60 | | | | 60 | 60 | 60 | | | 60 |
| | Chamber Temperature [°C] | 40 | | | | 40 | 40 | 40 | | | 40 |
| | Diameter of filament [mm] | 1,75 | | | | 1,75 | 1,75 | 1,75 | | | 1,75 |
| | Flow [%] | 97 | 92 | 93 | 92 | 85 | 85 | 85 | | | 85 |
| | Initial Layer Flow [%] | 97 | | | | 85 | 85 | 85 | | | 85 |
| | Enable Retraction [ON/OFF] | on | | | | on | on | on | | | on |
| | Retraction Distance [mm] | 6 | | | | 6 | 6 | 6 | 4 | | 3 |
| | Retraction Speed [mm/s] | 35 | | | | 35 | 35 | 30 | | 2 | 30 |
| | Retraction Extra Prime Amount [mm-3] | 0 | -1 | -0,4 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | 0 | 0 | 0 |
| Speed | Print Speed [mm/s] | 60 | | | | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| | Infill Speed [mm/s] | | | | | | | | | | |
| | Inner Wall Speed [mm/s] | 30 | | | | 45 | 45 | 45 | 25 | 20 | 20 |
| | Outer Wall Speed [mm/s] | 30 | | | | 45 | 45 | 45 | 25 | 20 | 20 |
| | Support Speed [mm/s] | 45 | | | | 45 | 45 | 45 | 25 | 20 | 20 |
| | Travel Speed [mm/s] | 100 | | | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | Initial Layer Speed [mm/s] | 20 | | | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Travel | Z Hop When Retracted [ON/OFF] | on | | | | on | on | on | | | on |
| | Z Hop Only Over Printed Parts [ON/OFF] | on | | | | on | on | on | | | on |
| | Z Hop Height [mm] | 0,5 | | | | 0,5 | 0,5 | 0,5 | | | 0,5 |
| Support | Support Placement [touching buildplate/ everywhere] | - | | | | - | - | - | | | - |
| | Support Pattern | - | | | | - | - | - | | | - |
| | Support Density [%] | - | | | | - | - | - | | | - |
| | Support Z Distance [mm] | - | | | | - | - | - | | | - |
| Build Plate Adhesion | Type [skirt, brim, raft, none] | brim | | | | brim | brim | brim | | | brim |
| Fotografia Cubo sem preenchimento (20x20x20mm) | | | | | | | | | | | |
| Cubo sem preenchimento (20x20x20mm) | Face X (mm) | 1,32 | 1,29 | 1,26 | 1,28 | 1,22 | 1,22 [20 mm] | | | | |
| | Face oposta X (mm) | 1,36 | 1,29 | 1,28 | 1,29 | 1,23 | 1,22 | | | | |
| | Face Y (mm) | 1,38 | 1,28 | 1,28 | 1,28 | 1,21 | 1,22 [19,98 mm] | | | | |
| | Face oposta Y (mm) | 1,35 | 1,29 | 1,29 | 1,3 | 1,25 | 1,24 | | | | |
| | Comentário Final | Falta de precisão nas medidas pretendidas. Medida suposta 1,2mm. Mudar retraction extra prime e fluxo. | Muito retraction extra prime fez pior acabamento nas ajudou nas medidas. Reduzir para metade o retraction. | Reduzir retraction | Reduzir fluxo para acertar medidas da espessura de parede e aumentar velocidade para possivelmente ter melhor acabamento | As medidas obtidas já são válidas, se necessário ajustar apenas necessário compensar o eixo Y. | Resultados satisfatórios para o avanço do próximo teste | | | | |
| Fotografia Torre de Retraction | | | | | | | | | | | |
| Torre de Retraction | Comentário Final | | | | | | Pilares muito mal definidos, velocidade muito elevada e retraction distance muito elevado que faz com que ocorra 'buracos' nos pilares | Pilares ainda com pouca qualidade de impressão, velocidade ainda pode ser ajustada e diminuir ainda mais o retraction distance | pior qualidade de pilares | melhor acabamento de pilares dentro do possível dado que estamos a utilizar um nozzle de 0,6 mm | |
| Cubo com preenchimento | Fotografia cubo | | | | | | | | | | |
| | Face X (mm) | | | | | | 19,98 | | | | |
| | Face Y (mm) | | | | | | 20,04 | | | | |
| | Face Z (mm) | | | | | | 19,95 | | | | |
| | Comentário Final | | | | | | avançar para provetes | | | | |

| Calibração PPS-CF | | Iteração | | | | | |
|--|---|--|---|---|--|---|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Material | PPS-CF | | | | | | |
| Marca filamento | Essentium | | | | | | |
| Diâmetro | 1,75mm | | | | | | |
| Slicer | Intamsuite 3.8.0 | | | | | | |
| Impressora | Intamsys Funmat Pro 410 | | | | | | |
| Nozzle | HT 0,6mm | | | | | | |
| Quality | Layer Height [mm] | 0,2 | 0,2 | 0,2 | | | 0,2 |
| | Initial Layer Height [mm] | 0,27 | 0,32 | 0,32 | | | 0,32 |
| | Line Width [mm] | 0,6 | 0,6 | 0,6 | | | 0,6 |
| Shell | Wall Thickness [mm] | 1,2 | 1,2 | 1,2 | | | 1,2 |
| | Wall Line Count | 2 | 2 | 2 | | | 2 |
| | Top Surface Layers | 0 | 0 | 0 | | | 0 |
| | Top/Bottom Pattern[lines/concentric/zig zag] | lines | lines | lines | | | lines |
| | Infill | Infill Density [%] | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| | Infill Pattern | - | - | - | lines | lines | lines |
| | Infill Layer Thickness [mm] | - | - | - | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Material | Printing Temperature [°C] | 330 | 330 | 330 | | | 330 |
| | Printing Temperature Initial Layer [°C] | 330 | 330 | 330 | | | 330 |
| | Initial Printing Temperature [°C] | 335 | 335 | 335 | | | 335 |
| | Build Plate Temperature [°C] | 100 | 100 | 100 | | | 100 |
| | Chamber Temperature [°C] | 75 | 75 | 75 | | | 75 |
| | Diameter of filament [mm] | 1,75 | 1,75 | 1,75 | | | 1,75 |
| | Flow [%] | 98 | 98 | 98 | | | 98 |
| | Initial Layer Flow [%] | 98 | 98 | 98 | | | 98 |
| | Enable Retraction [ON/OFF] | on | on | on | | | on |
| | Retraction Distance [mm] | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 1 | 3 | 3 |
| | Retraction Speed [mm/s] | 3 | 3 | 3 | 45 | 45 | 45 |
| | Retraction Extra Prime Amount [mm³] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Speed | Print Speed [mm/s] | 60 | 60 | 60 | | |
| Infill Speed [mm/s] | | - | - | - | | | 30 |
| Inner Wall Speed [mm/s] | | 60 | 60 | 60 | | | 30 |
| Outer Wall Speed [mm/s] | | 30 | 30 | 30 | | | 30 |
| Support Speed [mm/s] | | - | - | - | | | 30 |
| Travel Speed [mm/s] | | 250 | 250 | 250 | | | 250 |
| Initial Layer Speed [mm/s] | | 30 | 30 | 30 | | | 30 |
| Travel | | Z Hop When Retracted [ON/OFF] | on | on | on | off | on |
| | Z Hop Only Over Printed Parts [ON/OFF] | on | on | on | off | on | on |
| | Z Hop Height [mm] | 0,5 | 0,5 | 0,5 | off | 0,5 | 0,5 |
| Support | Support Placement [touching buildplate/ everywhere] | - | - | - | | | - |
| | Support Pattern | - | - | - | | | - |
| | Support Density [%] | - | - | - | | | - |
| | Support Z Distance [mm] | - | - | - | | | - |
| Build Plate Adhesion | Type [skirt, brim, raft, none] | brim, 5 lines, 3mm | brim, 5 lines, 3mm | brim, 5 lines, 3mm | | | brim |
| Fotografia Cubo sem preenchimento (20x20x20mm) | |  |  | | | | |
| Cubo sem preenchimento (20x20x20mm) | Face X (mm) | 1,2 | 1,2 | | | | |
| | Face oposta X (mm) | 1,22 | 1,21 | | | | |
| | Face Y (mm) | 1,24 | 1,21 | | | | |
| | Face oposta Y (mm) | 1,24 | 1,21 | | | | |
| | Comentário Final | defeito na impressão da primeira layer, aumentar 0,05 a initial layer height | boa dimensão de parede | | | | |
| Fotografia Torre de Retraction | | | |  |  |  | |
| Torre de Retraction | Comentário Final | | | aumentar retraction de modo a não haver strings, foram copiados os parametros de retraction usados em PEEK-CF | melhor que a versão anterior mais ainda não é satisfatório. Acrescentamos Z hop e altura de 0,5 mm e também foi aumentada a retraction distance para 3mm | boa retraction | |
| Cubo com preenchimento | | | | | | |  |
| Cubos com preenchimento | Face X (mm) | | | | | | 20,05 |
| | Face Y (mm) | | | | | | 20,05 |
| | Face Z (mm) | | | | | | 20,03 |
| | Comentário Final | | | | | | cubo validado, acabamento superficial pode ser melhorado diminuindo o fluxo (98% para 90%) |