



**DANIEL POLICARPO
COSTA JESUS**

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE COMPONENTES
FUNCIONAIS OBTIDOS POR FABRICO ADITIVO**



**DANIEL POLICARPO
COSTA JESUS**

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE COMPONENTES
FUNCIONAIS OBTIDOS POR FABRICO ADITIVO**

Relatório de Estágio apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, também sob a orientação científica do Professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica.

Este Relatório de Estágio foi apoiado pelos seguintes projetos (This thesis was supported by the projects):

RE-LIVE-BLADES - PROJETO DE I&DT EMPRESAS EM COPROMOÇÃO (aviso 17/SI/2019) - CENTRO-01-0247-FEDER-069820 - Centro Portugal Regional Operational Programme (Centro2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund.

UIDB/00481/2020 and UIDP/00481/2020 - Fundação para a Ciência e a Tecnologia; and **CENTRO-01-0145-FEDER-022083** - Centro Portugal Regional Operational Programme (Centro2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund

o júri

presidente

Professor Doutor António Manuel Godinho Completo
Professor Associado da Universidade de Aveiro

arguente

Professor Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes
Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda, da
Universidade de Aveiro

orientador

Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, irmã, namorada, avós e amigos.

Agradecimentos

Nestes longos e tortuosos sete anos de estudos cheios de altos e baixos, onde dediquei grande parte das minhas energias e do meu tempo quero demonstrar o meu agradecimento a todas as pessoas que ajudaram a que tornassem a realização deste mestrado possível.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família, pais, irmã e avós, que estiveram sempre ao meu lado e por me darem acima de tudo esta oportunidade e sempre acreditarem em mim.

Ao Prof. Doutor Carlos Relva e ao Prof. Doutor António Ramos, meus orientadores, que me acompanharam ao longo do desenvolvimento deste trabalho e que sempre se mostraram disponíveis para esclarecer as minhas dúvidas, dar opiniões e apoiar em todas as decisões sobre o progresso deste estudo.

À Simoldes Plásticos SA, em particular ao Eng. Pedro Alexandre, Eng. João Queirós e ao Eng. Gerson, pela oportunidade de estar mais próximo da realidade do mercado de trabalho, o que me permitiu contacto com conceitos fundamentais nesta área. Aprofundando assim, conhecimentos nas áreas do fabrico aditivo, essenciais para este trabalho.

Tenho de agradecer também aos meus amigos que me apoiaram e ajudaram, que tiveram também uma contribuição positiva neste trabalho.

Por último, mas não menos importante, tenho de agradecer especialmente à minha namorada, Lídia, que foi um apoio incondicional e não me deixou desistir nem baixar os braços nem mesmo nos momentos mais difíceis. Demonstrou muita paciência para me ouvir nesses momentos mais aborrecidos, mas teve sempre muito sentido de humor para me animar e também uma cumplicidade que renova as energias para as semanas de trabalho correrem pelo melhor. Agradecer também por todas as horas de descanso que prescindiu, para me ajudar em tudo o que consegui. Sem dúvida o pilar mais importante deste trabalho.

Palavras – Chave

Impressão 3D, FDM, PETG, Parâmetros de Impressão, Pontes, *Infill*, Método de Taguchi, Propriedades Mecânicas, Propriedades dimensionais.

Resumo

A modelagem por deposição de filamento fundido (FDM) é uma tecnologia de fabrico de aditivo em rápido crescimento para várias aplicações no campo da engenharia. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados na tecnologia FDM dependem de vários parâmetros. A literatura sugere que o padrão e a taxa de preenchimento interno (*infill*) são parâmetros que afetam as propriedades mecânicas dos componentes obtidos por impressão 3D, e também têm influência direta no tempo de impressão 3D e na quantidade de material utilizado na impressão 3D. Neste trabalho foi investigada e apresentada a influência de vários parâmetros de impressão nas propriedades de flexão, tempo de impressão 3D e quantidade de material consumido na impressão 3D. Para isso foi utilizado o método de Taguchi e de seguida o método estatístico da ANOVA para calcular a influência de cada parâmetro. Foram impressos provetes de teste de acordo com a Norma ASTM D790, em Tereftalato de polietileno glycol (PETG), com a mesma cor e sem influência de parâmetros externos ao estudo. Foram também impressos na mesma posição na plataforma de impressão para reduzir ao máximo a influência de fatores externos nas propriedades do material e dos provetes. Procedeu-se a uma inspeção visual e dimensional dos provetes para posterior análise e foi também realizado um estudo prévio do fenómeno *bridging* e da distância máxima aceitável que a impressora consegue imprimir. Os resultados obtidos dar-nos-ão uma imagem mais ampla de como poupar ao máximo o tempo de impressão 3D e a quantidade de material consumido na produção de um componente, mas ainda assim manter as propriedades de rigidez.

Keywords

3D Print, FDM, PETG, Print Settings, Bridging, Infill, Taguchi's Method, Mechanical Properties, Dimensional Properties.

Abstract

Fused deposition modelling (FDM) is a growing additive manufacturing technology for various applications in the engineering field. The mechanical properties of 3D printed materials in FDM technology depends on various parameters. Literature suggests that infill pattern and infill density are parameters that affect the mechanical properties of 3D printed materials, and also have direct influence on the 3D printing time and amount of 3D printed material. In this work the influence of various printing parameters on the bending properties, 3D printing time and amount of 3D printed material will be investigated and presented. For this purpose, the Taguchi method was used and then the statistical method of ANOVA to calculate the influence of each parameter. Test specimens were printed according to ASTM Standard D790, in Polyethylene terephthalate glycol (PETG), with the same colour and without any influence of external parameters to the study. They were also printed in the same position on the printing bed to reduce as much as possible the influence of external factors on the material and test's specimens properties. A visual and dimensional inspection of the specimens was carried out for further analysis and a prior study of the bridging phenomenon and the maximum acceptable distance that the printer can print was also carried out. The results obtained would give us a broader picture of how to save as much as possible the 3D printing time and the amount of material consumed in the specimen's production and maintain the required stiffness properties.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Metodologia	2
1.4 Organização do Documento	2
1.5 Apresentação da Empresa Simoldes Plásticos, SA	2
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1 Introdução ao Fabrico Aditivo	5
2.2 Tecnologias de fabrico aditivo	6
2.2.1 Fotopolimerização em cuba	6
2.2.2 Fabrico de objetos laminados	7
2.2.3 Fusão em cama de pó	7
2.2.4 Deposição direta de energia	8
2.2.5 Injeção de Material	9
2.2.6 Injeção de Ligante	10
2.2.7 Extrusão de material	11
2.3 FDM (<i>Fused Deposition Modeling</i>)	11
2.3.1 Funcionamento de uma impressora FDM	12
2.3.1.1 Cabeça de Extrusão	13
2.3.1.2 Plataforma de impressão	14
2.3.2 Falhas FDM	14
2.3.3 Preparação do trabalho de impressão	16
2.3.3.1 Desenho CAD	16
2.3.3.2 Slicing	18
2.3.3.4 Preparação da máquina	21
2.4 Tipos de Materiais utilizados em FDM	21
2.4.1 Políácido láctico - PLA	21

2.4.2 Acrilonitrilo estireno polibutadieno - ABS	23
2.4.3 Policarbonato - PC.....	23
2.4.4 Poliestireno - PS	23
2.4.5 Poliéter-éter-cetona - PEEK	23
2.4.6 Politereftalato de etileno glycol - PETG.....	24
2.5 Parâmetros da impressão 3D FDM	26
2.6 <i>Infill</i> (Parâmetros)	26
2.6.1 Percentagem de <i>Infill</i>	26
2.6.2 Distância entre linhas de <i>Infill</i>	27
2.6.3 Padrão de <i>Infill</i>	27
2.6.4 Ângulo do <i>Infill</i>	28
2.6.5 <i>Infill Offset</i>	29
2.6.6 <i>Infill Overlap</i>	29
2.6.7 <i>Skin Overlap</i>	29
2.6.8 <i>Infill Wipe Distance</i>	29
2.6.9 Espessura de camada do <i>Infill</i>	30
2.6.10 Gradual <i>Infill</i>	30
2.6.11 Altura do Gradual <i>Infill</i>	31
2.6.12 <i>Infill</i> antes das paredes.....	31
2.6.13 Área mínima de <i>infill</i>	31
2.7 Aspectos visuais causados pelo <i>infill</i>	32
2.7.1 Efeitos do <i>infill</i> nas propriedades das peças	33
2.8 Exemplos inovadores na impressão 3D	34
2.8.1 Impressão de 3D na textura de alimentos	35
2.8.2 Impressão 3D de comprimidos	35
3. Metodologia	36
3.1 Equipamento Utilizado	37
3.2 Material Selecionado	38

3.3 Seleção dos fatores de estudo	39
3.3.1 Método de Taguchi.....	39
3.3.1 Identificação dos fatores e Planeamento de Experiências por Taguchi.....	40
3.4 Norma ASTM D790 / ISO 178.....	42
3.4 Impressão dos provetes.....	44
3.5 Equipamento dos ensaios experimentais	45
4 Estudo Experimental	47
4.1 Estudo das Pontes “ <i>Bridging</i> ”.....	47
4.2 Impressão dos provetes de ensaio (norma ASTM D790)	50
4.3 Ensaio de Flexão	52
4.3.1 Ensaio de flexão com 51.2 mm entre suportes.....	60
4.4 Resultados geométricos dos provetes	63
5. Conclusões	65
5.1 Trabalhos Futuros	67
6. Bibliografia	68

Lista de Símbolos e Abreviaturas

3D	Tridimensional (<i>Three Dimension</i>)
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
BJ	Injeção de aglutinante/ligante (<i>Binder jetting</i>)
CAD	Desenho assistido por computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CLIP	Produção contínua de interface líquida
CNC	Controlo numérico computadorizado
DED	Deposição direta de energia (<i>Direct Energy Deposition</i>)
DLP	Processamento de Luz Digital (<i>Digital Light Processing</i>)
DMLS	Sinterização direta laser de metais (<i>Direct Metal Laser Sintering</i>)
DOD	Impressão gota a gota (<i>Drop On Demand</i>)
EBAM	Fabrico aditivo por feixe de eletrões (<i>Electron beam melting</i>)
EBM	Fusão por feixe de eletrões (<i>Electron Beam Melting</i>)
FDM	Modelagem por deposição de fundido (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
FFF	Fabrico por filamento fundido (<i>Fused Filament Fabrication</i>)
HPMC	Hidroxipropilmetilcelulose
HSS	Sinterização a alta velocidade (<i>High speed sintering</i>)
LOM	Fabrico de objetos laminados (<i>Laminated object manufacturing</i>)
MA	Manufatura Aditiva
MJF	Fusão com multi jatos (<i>Multi Jet Fusion</i>)
MVD	Micro-ondas a Vácuo
NPJ	Injeção de nano partículas (<i>NanoParticle Jetting</i>)
PC	Polycarbonato (<i>Polycarbonates</i>)
PEEK	Polieter-eter-cetona (<i>polyetheretherketone</i>)
PEI	Polieterimida (<i>Polyetherimide</i>)

PEKK	Polieter-cetona-cetona (<i>Polyetherketoneketone</i>)
PET	Tereftalato de polietileno (<i>Polyethylene terephthalate</i>)
PETG	Tereftalato de polietileno glycol (<i>Polyethylene terephthalate glycol</i>)
PLA	Poliácido láctico (<i>Polylactic acid</i>)
PS	Poliestireno (<i>Polystyrene</i>)
PVA	Acetato de polivimida (<i>Poly(vinyl alcohol)</i>)
SLA	Estereolitografia (<i>Stereolithography</i>)
SLM	Fusão Seletiva a Laser (<i>Selective laser melting</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective laser sintering</i>)
UAM	Fabrico aditivo por ultrassons (<i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i>)
UV	Ultravioleta

Índice de Figuras

Figura 1 - Componente em PETG para apoiar molde.....	4
Figura 2 - Processo FDM: a) Esquema Cinemático de uma impressora FDM; b) Esquema cinemático de uma impressão 3D.....	12
Figura 3 - Esquema cinemático da cabeça extrusora de uma FDM.....	13
Figura 4 - a – Bolhas na superfície; b – Linhas da superfície lateral; c – Grande deformação lateral.....	15
Figura 5 – a) Oozing ; b) defeitos de impressão de secções pequenas.....	15
Figura 6 - a) Defeito por sobreaquecimento; b) Defeito conhecido como pata de elefante.....	16
Figura 7 – a) Infill Visível no exterior da peça; b) Camadas em falta; c) Camadas Desalinhadas .	16
Figura 8 - Software TinkerCAD	17
Figura 9 – Fusion 360.	17
Figura 10 - Software Blender	18
Figura 11 - Preparação de impressão de uma peça exemplo no software gratuito Cura.....	20
Figura 12 - a) Peça finalizada com o tratamento à base de vapor de acetona; b) Peça que já sofreu de lixagem; c) Peça saída da impressora	22
Figura 13 – Componente funcional em PETG obtido por impressão FDM (Prusa i3)	26
Figura 14 – a) Densidade de Infill mais reduzida; b) Densidade de infill superior.....	27
Figura 15 - Padrões de infill acima referidos respetivamente da esquerda para a direita e de cima para baixo.....	28
Figura 16 - Padrão inovador de infill: Lightning	28
Figura 17 - Infill Overlap.	29
Figura 18 - Diferença entre espessuras de paredes de infill: a), tem menos espessura; b) tem mais espessura.	30
Figura 19 - Exemplos de Gradient Infill.	30
Figura 20 - Deformações visíveis nas impressões de 60° e 90°	32
Figura 21 - Qualidade de impressão a 0°	32
Figura 22 - Deformações visíveis na impressão a 75°	33
Figura 23 - Testes realizados no artigo (4), segundo as normas ASTM: Tração, compressão, flexão de 3 pontos e flexão de 4 pontos	33
Figura 24 - Vários tipos de infill testados à compressão.....	34
Figura 25 - Provete de ensaio de acordo com a norma ASTM D790 / ISO 178	36
Figura 26 - Rolo de Filamento PETG 1.75mm.	38
Figura 27 - Matriz Ortogonal de Taguchi L18.....	40

Figura 28 - Medições geométricas com Micrómetro: a) Medição da Largura do Provete; b) Medição da espessura do provete na parede; c) Medição da espessura do provete no centro	46
Figura 29 - Equipamento de ensaios mecânicos Shimadzu.....	46
Figura 30 – a) exemplo nas condições perfeitas no software prusa; b) realidade dos primeiros testes	47
Figura 31 - 2ª Experiência de ponte	48
Figura 32 - 3º Modelo teste de pontes.....	48
Figura 33 - 4º Modelo de Pontes.....	49
Figura 34 – a) Diferenças entre o antes; b) depois de melhorados os parâmetros	49
Figura 35 - Anomalia no provete de ensaio	50
Figura 36 – Falha pata de elefante presente num vértice do provete	51
Figura 37 - Falha total provete 0% densidade de infill	51
Figura 38 - Rutura superficial do provete após ensaio.	55
Figura 39 - Software Minitab para a realização da Análise ANOVA.....	56
Figura 40 - Ensaio 2 com 51,2mm entre apoios.....	60

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades do Material PLA.....	22
Tabela 2 – Propriedades do material PETG	25
Tabela 3 - Especificações Prusa I3 Mk3.	37
Tabela 4 - Fatores e Níveis Matriz de Taguchi.	41
Tabela 5 - Parâmetros dos ensaios definidos pela matriz de Taguchi.	41
Tabela 6 - Características técnicas micrómetro Mitutoyo.	45
Tabela 7 – Resultados dos Ensaios de Flexão.....	52
Tabela 8 - Tabela de Resposta para Razões Sinal-Ruído.	56
Tabela 9 - Tabela de respostas da ANOVA para médias.	57
Tabela 10 - Desvio padrão dos ensaios.	58
Tabela 11 - Resumo de resultados obtidos.....	58
Tabela 12 - Parâmetros de impressão do ensaio 10.....	59
Tabela 13 - Tabela de respostas de sinal-ruído.	61
Tabela 14 - Tabela resumo obtida no segundo ensaio de flexão.....	62
Tabela 15 - Parâmetros de impressão do ensaio 3.....	63
Tabela 16 - Parâmetros de impressão do ensaio 4.....	63
Tabela 17 - Valores obtidos das medições.	63

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Gráfico Tensão/ Deformação ensaio 1.....	53
Gráfico 2 - Gráfico Tensão deformação ensaio 16.....	53
Gráfico 3 - Tensão/Deformação ensaio 15.1.....	54
Gráfico 4 - Tensão/Deformação até 2% de deformação do ensaio 15.1.	55
Gráfico 5 - Gráfico de Efeitos Principais para Razões S/N.	57
Gráfico 6 - Tensão/Deformação ensaio 2 (51.2mm).....	61

1. Introdução

1.1 Enquadramento

As aplicações de impressão 3D permitem fazer a preparação do modelo *Computer Aided Design* (CAD) 3D selecionado e gerar o código “G”, de modo, a que o modelo possa ser obtido numa impressora 3D. A correta utilização de uma aplicação de impressão 3D e a programação dos respetivos parâmetros pode ajudar a melhorar a qualidade geométrica e dimensional do modelo e assim, a aumentar a rapidez do processo.

Os *softwares* utilizados na programação e/ou *softwares* de *slicing* são responsáveis por gerar as trajetórias que a máquina deverá percorrer para obter as camadas que irão constituir a peça e converter essas trajetórias numa linguagem inteligível pela máquina em “código G”. O código G é uma linguagem utilizada na programação de Controlo Numérico por Computador (CNC). Este é composto por todas as coordenadas e parâmetros de impressão, de modo, que a definição da peça seja, mais direta e concisa. Assim, tanto a definição de parâmetros, como o tipo de geometria dos elementos de preenchimento interior, e também a sua taxa de preenchimento, podem influenciar não só o tempo de fabrico, como o material consumido, e ainda mais importante, a resistência, a qualidade geométrica e dimensional do modelo final. Por exemplo, é importante determinar qual a geometria ideal de preenchimento e qual a taxa de preenchimento interior mais adequada para se obter uma determinada resistência no modelo, ou, por outro lado qual a influência destes parâmetros na planeza de uma superfície horizontal.

O desenvolvimento deste trabalho, foi possível devido à oportunidade dada pela Simoldes Plásticos, SA. para realização do estágio, mantendo o tema de dissertação, já anteriormente escolhido. Proporcionando assim, uma excelente forma de desenvolver os estudos pretendidos e aliar ainda, a experiência com o mercado de trabalho.

A Simoldes Plásticos, S.A., integra-se com Grupo Simoldes que conta com mais de 60 anos de história. Atualmente a Simoldes Plásticos, S.A, tem 8 empresas em todo o mundo e destaque-se na área dos moldes, trabalhando com grandes grupos empresariais, como por exemplo, o Grupo VW, Stellantis, entre outros. Atua também fora da indústria automóvel, com empresas nacionais e internacionais e em diferentes áreas.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho visam melhorar o conhecimento e posterior desempenho dos futuros engenheiros na área do fabrico de componentes mecânicos obtidos por fabrico aditivo, introduzindo novas abordagens na forma como os componentes são projetados e permitindo melhorar

a eficiência do seu fabrico. Deste modo, pretende-se estudar a influência dos parâmetros de “*infill*”, na rigidez, qualidade geométrica e dimensional dos componentes obtidos por impressão 3D.

1.3 Metodologia

Com vista à prossecução dos objetivos atrás enumerados, foi estabelecida a seguinte estratégia para a abordagem do problema:

- Realização de um estudo de estado da arte;
- Proceder a uma análise comparativa de todos os tipos de parâmetros *infill*;
- Projetar e desenhar em *software* 3D os modelos de estudo;
- Estudo e definição das características dos modelos a utilizar durante os testes;
- Impressão em FDM dos modelos de teste;
- Realização de ensaios de flexão e análise geométrica dos mesmos;
- Análise de resultados, e conclusões.

1.4 Organização do Documento

Este relatório está dividido em cinco grandes secções: a Introdução, que pretende apresentar o tema deste trabalho, a Revisão Bibliográfica, que procura fazer uma resenha teórica sobre os temas diretamente relacionados com este trabalho, a Metodologia utilizada para o estudo e respetiva justificativa, o Desenvolvimento, onde é explicado todo o progresso realizado, com o grau de pormenor entendido como necessário. Por último, após a obtenção de resultados, uma discussão dos mesmos para expressar os conhecimentos adquiridos e a ter em atenção em relação a esta matéria e também as conclusões retiradas do trabalho.

Este trabalho possui também bibliografia e anexos que ajudam a corroborar todos os aspetos abordados ao longo de todo o relatório.

1.5 Apresentação da Empresa Simoldes Plásticos, SA

Simultaneamente com a dissertação foi realizado um estágio na empresa Simoldes Plásticos, SA. Atendendo ao interesse do tema da dissertação, e apesar de se tratar de um estágio em regime curricular, a empresa não só mostrou toda a disponibilidade para a concretização da dissertação em contexto do estágio curricular, como disponibilizou todos os recursos necessários, motivo pelo qual grande parte do trabalho experimental foi realizado na empresa.

A Simoldes Plásticos enquadra-se no Grupo Simoldes, tendo sido a segunda empresa a ser criada, em 1981. (1)

Este grupo empresarial teve a sua origem em 1959, em Oliveira de Azeméis, sendo a sua primeira empresa, a Simoldes Aços. A Simoldes Aços iniciou-se por fabricar moldes para diversas áreas, como brinquedos, eletrodomésticos e utilidades domésticas e ao longo dos anos passou a atuar também nos setores da construção civil, eletrónica, telecomunicações e embalagem. No início dos anos 70, começou a fabricar moldes para as empresas de injeção de plástico, que posteriormente forneciam a indústria automóvel. Assim, na década de 80, surge a Simoldes Plásticos, iniciando a sua atividade na injeção de plásticos, aliando as sinergias existentes com o fabrico de moldes e passando a fornecer peças à indústria que fabricavam produtos com componentes plásticos. Através do seu bom desempenho nesta área, a Simoldes Plásticos, passou a ser uma empresa de referência na indústria automóvel, tendo, o Grupo Simoldes, a necessidade de expandir e criar de mais empresas.

(2)

Em 1991 foi construída a MDA, Moldes de Azeméis, Lda., para a área dos moldes de grande dimensão, entre 30 toneladas e 100 toneladas. E apenas dois anos depois, em 1993, foi construída a IMA, Indústria de Moldes de Azeméis, Lda., em 1993 surge ainda a Inplas, Indústria de Plástico, Lda., e o primeiro gabinete técnico-comercial do Grupo em Paris. Em 1995, foi construída a Plastaze, Plásticos de Azeméis, SA.(2)

Na segunda metade dos anos 90, dá-se uma nova fase do crescimento do Grupo, surgindo em 1996, a primeira empresa do grupo fora de Portugal, neste caso, no Brasil. Nos anos seguintes, até 2001, expandiram também para a França, a Alemanha e a Espanha.(1)(2)

Atualmente, o grupo conta com 32 empresas presentes em 13 países pelo mundo, no entanto, apenas de Simoldes Plásticos, existem oito empresas em todo o mundo.(1)

Este trabalho foi realizado no departamento de Engenharia do Processo Fábrica, cujo responsável é o Engenheiro Pedro Alexandre, que é responsável por todos os processos existentes na fábrica, desde otimização *layouts* da fábrica, ergonomia, agilização de processos, o cumprimento dos 5s, dimensionamento de periféricos de máquinas e gestão de *stocks*. Durante o período de estágio neste departamento, destaca-se a realização de componentes funcionais obtidos por impressão 3D FDM para melhoria de alguns processos, como por exemplo, a melhoria da pega de um molde de um componente para o Porsche Cayman, como demonstra a Figura 1.

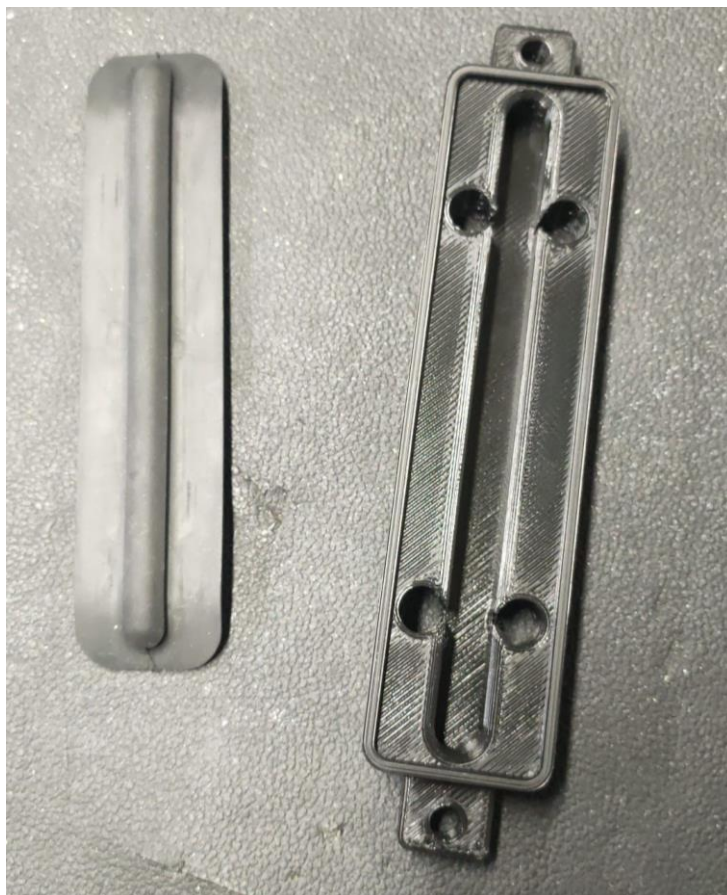


Figura 1 - Componente em PETG para apoiar molde.

Também foram realizadas algumas reparações a nível de periféricos com componentes modelados. Todos estes trabalhos foram realizados na impressora 3D onde foram impressos os provetes de ensaio, o que ajudou a familiarizar com todo o processo de impressão.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução ao Fabrico Aditivo

A impressão 3D, também conhecida como fabrico aditivo, consiste num objeto tridimensional que é construído através da sobreposição de camadas de material. Este processo permite realizar peças de elevada complexidade geométrica e extremamente difíceis de obter através de meios de fabrico convencionais, nomeadamente a maquinagem, fundição, moldagem.

O fabrico aditivo teve o seu início por volta dos anos 80, onde em 1981, Hideo Kodama, criou um sistema de prototipagem rápida que utilizava como base foto-polímeros. Já em 1986, Charles Hull, inventou e patenteou a técnica de estereolitografia. Esta técnica consiste na deposição de um material foto-polimérico, seguido da cura do mesmo, com o auxílio de uma luz ultravioleta (3).

Existem atualmente várias tecnologias e processos de fabrico aditivo, porém, todos eles têm uma característica em comum, que é, o método como os modelos são construídos, ou seja, por camadas sucessivas, em que cada camada se assemelha a uma secção bidimensional que é construída sobre a anterior até se atingir a forma final pretendida. Pode-se assim obter geometrias bastante complexas e completamente personalizáveis, constituídas por pormenores finos e grande variedade de formas. Os equipamentos utilizados para o fabrico aditivo são chamados de impressoras 3D, e estas, utilizam modelos digitais provenientes de *softwares* de CAD 3D ou até mesmo de fazer scan de objetos sólidos tridimensionais.

A tecnologia de fabrico de aditivo é amplamente utilizada na engenharia para produtos personalizados, modelos funcionais, modelos pré-cirúrgicos e modelos conceptuais. Esta tecnologia encontra a sua aplicação em muitos campos da engenharia e da indústria, tais como produtos automóveis, aeronaves, implantes médicos (próteses, biónica, ortóteses) e muito mais. Atualmente, os projetistas e engenheiros de produção enfrentam o desafio de produzir produtos mais rápido do que nunca para satisfazer as exigências dos clientes e satisfazer, também, as suas expectativas. Isto é a realidade das impressoras 3D, pois as mesmas conseguem utilizar uma grande variedade de materiais com diferentes propriedades mecânicas, características, aparência visual e acabamento, precisão e vida útil. (4)

A utilização crescente da impressão 3D como ferramenta de aprendizagem e também o aumento da necessidade de gerar peças funcionais de utilização final na indústria, gerou a necessidade de uma melhor compreensão do comportamento mecânico das peças impressas em 3D e do desenvolvimento de ferramentas analíticas e de diretrizes de conceção para os engenheiros. Foram realizados ensaios de materiais plásticos impressos em 3D, a fim de fornecer conhecimentos

às comunidades industriais e acadêmicas, servindo assim para melhorar os conhecimentos específicos acerca a tecnologia de FDM para permitir melhores resultados (5).

2.2 Tecnologias de fabrico aditivo

Existem diversas tecnologias de fabrico aditivo e, de forma a classificar as mesmas usa-se a norma ISO/ASTM 52900:15: (6)(7)

1. Fotopolimerização em cuba – SLA (Estereolitografia) e DLP (Processamento de luz digital)
2. Laminagem de folhas – LOM (Fabrico de objetos laminados) e UAM (Fabrico aditivo por ultrassons)
3. Fusão de cama de pó – SLS (Sinterização seletiva a laser), SLM (Fusão seletiva a laser), EBM (Fusão por feixe de eletrões) e DMLS (Sinterização direta laser de metais)
4. Deposição direta de energia – LBMD (Deposição de metal através de metal), EBAM (Fabrico de aditivo por feixe de eletrões)
5. Injeção de Material –DOD (Impressão gota a gota)
6. Injeção de ligante – BJ (Injeção de aglutinante/ligante)
7. Extrusão de Material – FDM (Modelação por deposição de filamento fundido) / FFF (Fabrico por filamento fundido)

Cada classificação utilizada pela norma significa que existem diferenças significativas associadas às tecnologias de fabrico aditivo. Procede-se à explicação das mesmas abaixo.

2.2.1 Fotopolimerização em cuba

A fotopolimerização em cuba produz peças curando seletivamente resinas líquidas e fotopolimerizáveis com luz, normalmente luz UV. Uma plataforma de construção é submersa num tanque que é preenchido com a resina. A luz é direcionada seletivamente através da superfície da resina com espelhos. Uma vez que uma camada é curada, a plataforma sobe ou desce um pequeno incremento para permitir que o novo líquido flua. A próxima camada é então curada e adjacente à camada previamente curada (6).

A fotopolimerização tem algumas tecnologias de impressão distintas. As três mais comuns são estereolitografia (SLA), processamento digital de luz (DLP) e sistema de luz digital (Digital Light Synthesis – DLS). Estes são muito semelhantes, diferem apenas em termos de fonte de luz e em como a luz é direcionada para a resina. O SLA é de longe o processo mais antigo de fotopolimerização (6).

- O **SLA** usa um laser de ponto único para traçar uma linha fina ao longo da superfície da resina, preenchendo a forma da camada transversal a ser curada. É altamente preciso, mas pode ser demorado.
- O **DLP** usa um projetor de luz digital para exibir uma única imagem de uma camada inteira de uma só vez. Isso torna-o mais rápido que o SLA. No entanto, como o projetor é uma tela digital, a imagem de cada camada é composta por pixels quadrados, resultando numa resolução um pouco menor.
- O **DLS** é semelhante ao DLP, excetuando a plataforma de construção, que se move num movimento contínuo. Isso permite tempos de construção ainda mais rápidos e contornos mais suaves ao longo do eixo z.

2.2.2 Fabrico de objetos laminados

A laminação de folhas produz peças empilhando e laminando folhas de material cortado para corresponder às secções transversais horizontais de uma peça. Em algumas impressoras, as folhas são primeiro cortadas e depois laminadas, mas na maioria, as folhas são primeiro colocadas, laminadas e depois cortadas à medida (6).

Este é um dos métodos mais simples de construir modelos 3D. Apesar da sua simplicidade, existem muitas tecnologias adjacentes diferentes com base no mesmo material, método de laminação e método de corte. Na maioria dos casos, o processo é uma simples variação do fabrico de objetos laminados (**LOM**). A consolidação ultrassônica (**UAM**) é a única tecnologia radicalmente diferente, pois usa soldadura ultrassônica em vez de um agente de ligação separado (6).

- A **LOM** lamina as folhas com um adesivo de ligação e, em seguida, subtrai recursos camada por camada, usando fresagem CNC, corte a laser ou corte a jato de água.
- A **UAM** segue o mesmo processo da LOM, exceto que a laminação é feita por meio de vibrações ultrassônicas como forma de soldagem por fricção.

2.2.3 Fusão em cama de pó

Esta categoria produz peças usando energia para derreter ou sinterizar seletivamente partículas em pó e formar um objeto inteiro. O material em pó é aquecido logo abaixo de seu ponto de fusão e espalhado sobre a plataforma de construção numa camada muito fina. Um laser ou feixe de elétrons é então direcionado através da superfície do pó, fundindo as partículas para formar uma única seção transversal da impressão (6).

Após cada camada, a plataforma de construção é descida e o processo repetido. Cada nova camada é fundida à anterior até que todas as camadas tenham sido fundidas num objeto.

Como as camadas são construídas umas sobre as outras, as partículas não fundidas atuam como uma estrutura de suporte para a impressão, eliminando assim a necessidade de estruturas de suporte mais separadas. Quando a impressão estiver concluída, o excesso de pó de suporte é removido e reciclado (6).

Muitas impressoras 3D usam esta tecnologia, pois é possível imprimir, utilizando muitos materiais diferentes, mas as mais comuns são sinterização seletiva a laser (SLS), sinterização direta a laser de metal (DMLS), fusão seletiva a laser (SLM), fusão multi-jato da HP (MJF), sinterização de alta velocidade (HSS) e fusão por feixe de elétrons (EBM). A SLS é a mais comum para plásticos, e a DMLS e a SLM são os mais comuns para metais (6).

- A **SLS** produz peças plásticas sólidas usando um laser para sinterizar as partículas.
- A **DMLS** produz peças metálicas porosas usando um laser para sinterizar as partículas.
- A **SLM** produz peças metálicas sólidas usando um laser para fundir as partículas, não apenas sinterizá-las. Como isso só é possível quando as partículas têm o mesmo ponto de fusão, o SLM só pode imprimir em metais simples, não em ligas.
- A **MJF** é tão semelhante à **SLS** que muitas vezes são consideradas tecnologias permutáveis. A MJF produz peças plásticas sólidas através de uma combinação de tecnologias **SLS** e injeção de materiais. Depois que uma camada de pó plástico é espalhada sobre a plataforma de construção, um cabeçote de impressão com bicos de jato de tinta deposita seletivamente agentes que estimulam e inibem a fusão. Um feixe infravermelho de alta potência passa então sobre a camada, fundindo apenas as áreas onde o agente de fusão foi dispensado.
- A **EBM** produz peças de metal sólido usando um feixe de elétrons para fundir as partículas, mas as peças devem ser produzidas no vácuo. O processo só pode ser usado com metais condutores.
- A **HSS** usa um cabeçote de impressão a jato de tinta para depositar um fluido absorvente de infravermelho diretamente numa fina camada de granulado plástico que se espalha pela superfície aquecida de uma plataforma de construção, delineando a área onde a sinterização é desejada. Uma luz infravermelha é então usada para fundir o pó sob o fluido numa camada.
- A **MJF** utiliza uma matriz de jato de tinta para aplicar seletivamente agentes de fusão e detalhamento num leito de pó de nylon, que são depois fundidos por elementos de aquecimento numa camada sólida.

2.2.4 Deposição direta de energia

A deposição direta de energia (**DED**) produz peças compostas por camadas de material fundido, que geralmente é metal. A tecnologia é muito semelhante à utilizada em impressoras de

extrusão de material plástico, mas para metal. O material a fundir, pó ou arame, é continuamente alimentado através de um bocal e derretido por um laser, um feixe de elétrons ou até mesmo por um arco, no ponto de deposição, onde esfria e solidifica (6).

O bocal move-se ao longo de vários eixos em relação à plataforma de construção. Já existem máquinas de três eixos, que por sua vez realizam secções transversais de uma impressão ao longo dos eixos x e y, sobrepondo assim, as secções transversais umas sobre as outras ao longo do eixo z para construir a peça completa. Os equipamentos **DED** de cinco eixos não se limitam a construir peças camada por camada porque conseguem depositar material em qualquer ângulo. Isso significa que eles podem fazer mais do que simplesmente construir peças do zero e são frequentemente usados para depositar material em objetos existentes que necessitam de algum tipo de reparação (6).

- A **LENS** utiliza uma cabeça de deposição que consiste num cabeçote laser, bicos dispensadores de pó e tubos de gás inerte. O laser percorre o centro da cabeça para criar uma área de fusão na área de construção e o pó é pulverizado dos lados onde é derretido e depois solidificado. O gás inerte forma uma cobertura livre de oxigênio e humidade, o que evita a oxidação da superfície e promove uma melhor adesão da camada.
- A **EBAM** é uma tecnologia que utiliza arame de solda de metal através do bocal e derrete-o com um feixe de elétrons no ponto de contato com a área de construção.

2.2.5 Injeção de Material

A injeção de material produz peças por meio do jato de pequenas gotas de material líquido na plataforma de construção e solidificando-as com calor ou luz. Muito parecido com o processo de jato de tinta 2D padrão, um cabeçote de impressão com centenas de jatos de material que se move sobre uma plataforma de construção, depositando material ao longo de um transportador do eixo x, varrendo ao longo do eixo do x, cobrindo assim uma camada inteira numa única passagem. (6)

Uma cabeça de impressão pode transportar jatos para vários materiais, permitindo impressão em vários materiais, até mesmo impressão a cores dispensando estruturas de suporte descartáveis, como cera ou outras.

Dentro da categoria de injeção de material, existem algumas tecnologias de impressão distintas. As três mais comuns são *PolyJet*, *NanoParticle Jetting* (NPJ) e *Drop-On Demand* (DOD). (6)

- A **PolyJet**, primeira tecnologia de jato de material, é patenteada e de propriedade da Stratasys. Dispensa resina fotopolimérica líquida e o material de suporte fácil de remover do cabeçote de impressão, que é então curado por uma luz UV.
- A **NPJ** é uma tecnologia patenteada pela XJet. Ao contrário da PolyJet, onde cada camada é curada antes da próxima ser depositada, as impressões NPJ são curadas quando todas as camadas são depositadas. Nanopartículas de metal ou cerâmica são suspensas num líquido, que é depositado pela cabeça de impressão junto do material de suporte. O calor na impressora faz com que o líquido da suspensão evapore à medida que cada camada é depositada, deixando apenas metal ou cerâmica e suportes levemente ligados para trás. Uma vez que a camada final está completa, o material de suporte é removido e toda a peça é sinterizada para unir todas as nanopartículas.
- A **DOD** é uma tecnologia patenteada pela *SolidScape* (adquirida pela Stratasys). É muito semelhante ao PolyJet, mas foi desenvolvido especificamente para impressão de alta precisão em cera para microfusão e o fabrico de moldes, visando a indústria joalheira. Ao contrário da PolyJet, o cabeçote de impressão pode imprimir curvas em alta resolução movendo-se nos eixos x e y. Depois das gotas de material serem depositadas, cada camada concluída é raspada com uma ferramenta própria para garantir uma superfície perfeitamente plana. Esses fatores melhoram a precisão dimensional final.

2.2.6 Injeção de Ligante

A injeção de ligante produz peças depositando seletivamente um agente ligante sobre um leito de pó. A plataforma de construção é primeiramente coberta com uma camada muito fina de pó de material. Uma cabeça de impressão coberta por bicos de jato de tinta passa, depositando um agente de ligação onde a impressão deverá ser formada. As impressoras de jato de ligante também podem imprimir em cores depositando tinta colorida após o agente de ligação, antes que uma nova camada de pó cubra a anterior. (6)

Terminada a camada final, a peça é deixada a curar no pó para deixar o ligante ganhar força. Uma vez retirados do depósito de pó, alguns tipos de materiais estão prontos, no entanto, se as peças são para uso funcional, a maioria precisa ser mergulhada e sinterizada, fazendo com que elas encolham em até 40%. (6)

A injeção de ligante é obtido por apenas uma tecnologia, embora existam muitos tipos diferentes de impressoras, em que alteram consoante o tipo de material, tais como, metais, cerâmicos e polímeros. Os pós metálicos para o fabrico das peças metálicas são mais em conta que as restantes tecnologias semelhantes e mesmo os pós poliméricos são mais em conta que a tecnologia SLS e ainda permite a reciclagem de 100% dos pós não colados. (6)

É uma tecnologia que pode obter peças funcionais coloridas com custos reduzidos, não tem problemas de deformação causados por temperaturas, visto que todo o processo é realizado à temperatura ambiente. Permite também a realização de peças de grandes dimensões e com geometrias metálicas complexas pois estas não sofrem de empenamento, e por último esta tecnologia é bastante apelativa a produção em lote de baixo e médio porte. (6)

As peças metálicas obtidas por esta tecnologia têm propriedades mecânicas mais reduzidas que as obtidas por exemplo por DMSL/SLM devido à sua porosidade elevada e também este processo é um pouco limitado na quantidade de materiais apropriados. (6)

2.2.7 Extrusão de material

A extrusão de material produz peças por extrusões de camadas de filamento termoplástico fundido. Uma bobine de filamento é alimentada através de um bocal de extrusão aquecido e derretido. É depositado continuamente em locais precisos, onde arrefece e solidifica. O mecanismo funciona como uma pistola de cola quente sendo cuidadosamente movida sobre uma superfície plana. (6)

O bocal move-se ao longo de três eixos em relação à plataforma de construção, traçando assim a forma de uma única secção transversal da impressão ao longo dos eixos x e y. De seguida, sobrepõe as secções transversais umas sobre as outras ao longo do eixo z para construir uma impressão completa. (6)

Existe apenas um tipo de impressora de extrusão de material. É conhecida como uma impressora para modelação de deposição fundida (FDM) ou fabrico de filamentos fundidos (FFF). Estas impressoras 3D são baratas e amplamente disponíveis e vêm em muitas formas e tamanhos diferentes. (6)

2.3 FDM (*Fused Deposition Modeling*)

Esta tecnologia é igualmente conhecida por *Fused Filament Fabrication* (FFF) e consiste em fundir e carregar os materiais através de um ou mais bicos (extrusores), por pressão, para produzir o objeto 3D camada por camada. Depois de imprimir cada camada, a plataforma de construção afasta-se do extrusor e a próxima camada é depositada e colada no topo da anterior. Basicamente, os 3 tipos diferentes de extrusoras utilizados nesta tecnologia são à base de êmbolo, de filamento e de parafuso, onde a extrusão de material de filamentos é mais comum entre os demais. Este tipo de tecnologia de extrusão de material é chamado Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM – *Fused Deposition Modeling*). Os princípios básicos para o processo de extrusão de material podem ser mencionados da seguinte forma: carregamento de material, fusão do material, sistema de transporte para mover o material através do bocal, extrusão, programa de código G, de acordo com a peça 3D, impressão e colagem de material por camada, construindo estruturas de suporte para peças de formas

complexas e pós-processamento, se necessário. Pode-se observar o esquema cinemático do processo FDM na Figura 2.

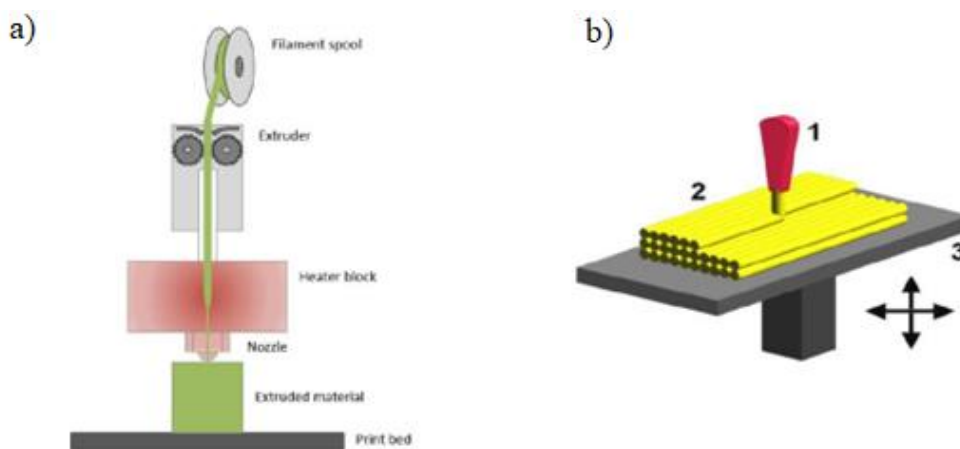


Figura 2 - Processo FDM: a) Esquema Cinemático de uma impressora FDM; b) Esquema cinemático de uma impressão 3D (5)

Embora existam 3 tipos de materiais que podem funcionar em máquinas FDM, incluindo hastes, filamentos, e pellets, o tipo mais utilizado são os filamentos. Os filamentos podem ser alimentados continuamente na extrusora por rolos elétricos, enquanto os materiais em pó ou pellet, são alimentados por gravidade ou parafuso. O material transportado para o sistema de extrusão torna-se líquido quando aquecido numa câmara para poder passar pelo bocal. A temperatura deve ser cuidadosamente escolhida para evitar queimar o material (polímero) dentro da câmara. (8) (5)

2.3.1 Funcionamento de uma impressora FDM

As impressoras de FDM são compostas por um filamento, normalmente termoplástico que é empurrado através de motores de passo, desde uma bobine onde o mesmo é armazenado, até à cabeça de extrusão, onde possui uma câmara de fusão e onde leva o filamento à temperatura de impressão indicada pelo fabricante do mesmo. Depois de aquecido é pressionado para a ponta de extrusão que também é aquecida saindo assim sob um fio semi-líquido normalmente de dimensão de 0.1mm, mas pode variar consoante a ponta extrusora (*nozzle*). Essa ponta extrusora irá percorrer todo o caminho no plano cartesiano (X, Y, Z), necessário, por camadas com auxílio de sistemas mecânico, até toda a peça ficar feita, sob uma mesa previamente aquecida também. Algumas das peças necessitam de material de suporte para serem realizadas sem que haja deformações excessivas. Esse material de suporte normalmente pode ser um material do mesmo género do utilizado na peça, de outra cor por vezes, para distinguir. Estas estruturas de suporte são automaticamente calculadas pelo *software slicer* e deve existir um equilíbrio entre o volume de material utilizado e a rigidez da estrutura. É

importante que consiga cumprir o seu efeito, porém não é favorável nem compensatório se for utilizado demasiado material para fazer essas estruturas.

2.3.1.1 Cabeça de Extrusão

A cabeça de extrusão é um dos componentes principais de uma impressora 3D FDM, pelo que é necessário conhecer o seu funcionamento. Esta é composta por duas zonas, uma zona fria e uma zona quente, como é possível observar na Figura 3.

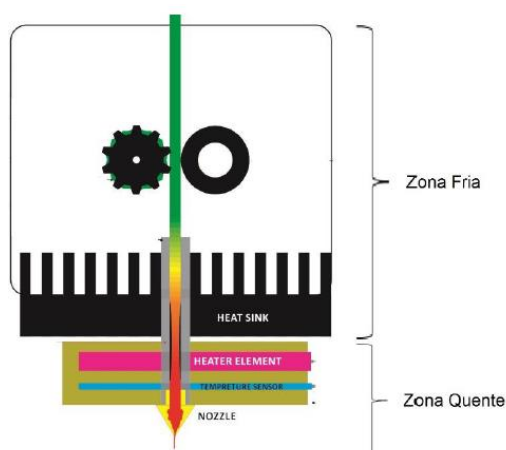


Figura 3 - Esquema cinemático da cabeça extrusora de uma FDM (3).

A zona fria é a metade superior da cabeça de extrusão, sendo que é nesta zona onde o filamento entra na cabeça de extrusão. Nem sempre esta é uma simples zona de entrada. Por vezes contém o mecanismo que alimenta o filamento à zona quente. Este mecanismo consiste numa roda de atrito (com uma rotação imposta no seu eixo) e num rolo liso, entre os quais passa o filamento. A distância entre eles não pode ser nem muito elevada (correndo-se o risco de não haver aderência suficiente e o filamento não avançar), nem muito baixa (correndo-se o risco de esmagar e deformar o filamento de tal modo que este não consiga entrar na zona quente). Tem, portanto, de existir uma distância ótima, para cada diâmetro de filamento. Nos casos em que este mecanismo não faz parte integral da cabeça de extrusão, ele é considerado um componente isolado, e situa-se logo antes da cabeça de extrusão. A zona fria é separada da zona quente por um isolador térmico. Este tem de ser projetado de tal modo, que permita a passagem do filamento de um lado para outro, mas ao mesmo tempo que não deixe passar calor de um lado para o outro.

Na zona quente é onde o filamento é derretido, e posteriormente extrudido pelo *nozzle*. Nesta zona, o furo pelo qual passa o filamento, esta rodeado por uma resistência elétrica, que emite o calor necessário para o derreter. Entre a resistência elétrica e o *nozzle* existe um termopar (sensor de temperatura) que monitoriza continuamente a temperatura associada ao calor promovido pela resistência elétrica. A informação obtida pelo termopar é dada como entrada num circuito elétrico,

que verifica se esta temperatura é a adequada para o material em causa. Caso não seja, este circuito é também capaz de regular a potência consumida pela resistência, de modo a obter-se a temperatura ideal do material (3).

2.3.1.2 Plataforma de impressão

A Plataforma de impressão, também pode ser designada por mesa ou cama de impressão e é o componente onde a peça 3D vai ser impressa, o que por isso também revela importância. Em algumas impressoras esta cama encontra-se parada, chamando-se de cama estacionária. Sendo assim, as impressoras têm como característica possuir uma cabeça de extrusão móvel nos eixos cartesianos para formar a peça. Noutros casos, é precisamente o inverso que acontece, ou seja, a cama de impressão move-se enquanto a cabeça extrusora apenas é responsável por extrudir material e o arrefecimento, se necessário, do material impresso.

A cama de impressão deverá ser resistente e robusta podendo ou não ser constituída por duas camadas. Quando assim é, a camada inferior é uma camada de suporte mais resistente e a camada superior é a camada que é responsável pelo aquecimento da mesma e pela adesão das camadas de impressão. É necessário um bom trabalho a calibrar e ajustar a cama de impressão pois assim evita muitas das falhas da FDM, principalmente todas as que signifiquem camadas distorcidas ou desalinhadas, imperfeições nas superfícies, má moldagem do material novo com camada já existente, entre outros.

O facto da cama de impressão ser aquecida é precisamente para evitar o arrefecimento rápido do plástico extrudido, que leva a empenos no objeto impresso. Os empenos ocorrem devido a contrações não-uniformes ao longo do objeto, originadas pelo processo de arrefecimento (3).

2.3.2 Falhas FDM

Este tipo de impressão 3D também possui algumas falhas e desvantagens. Essas falhas muitas vezes podem estar associadas a má manutenção ou até mesmo por má calibração. Pode ocorrer interrupção da extrusão provocada pelo bico extrusor entupido, ou filamento partido ou insuficiente, ou até mesmo condutor sobreaquecido. Esta é uma das falhas mais comuns da impressão FDM. Outra falha existente são as deformidades nas superfícies laterais ou de topo, sendo estas causadas maioritariamente pelos parâmetros de velocidade de impressão e de retração, por falta de apoios ou até mesmo por existência de folgas ou vibrações na cabeça da extrusora (9).

Observa-se na Figura 4 algumas falhas como por exemplo bolhas na superfície e deformações laterais.

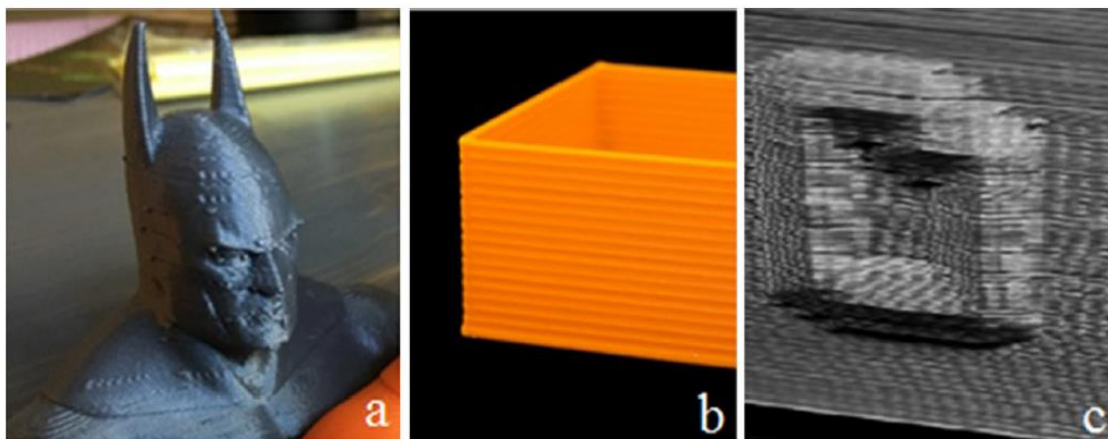


Figura 4 - a – Bolhas na superfície; b – Linhas da superfície lateral; c – Grande deformação lateral (8).

Podem também existir erros dimensionais, o chamado *oozing*, ou efeito de cabelo, causado essencialmente pela distância de retração errada, baixa velocidade de retração, temperatura demasiado alta, ou movimentos longos sem extrusão. A definição da distância de retração é relevante para a quantidade de plástico que é retraído do bocal. Ajustes curtos da distância de retração provocam escorrimento, devido à baixa velocidade de retração, o plástico não consegue retrair-se o suficiente, pelo que o plástico vai vazar do bocal. A FDM pode, também, não conseguir imprimir secções muito pequenas, se o bico (*nozzle*) for demasiado grande para a secção em questão como observado na Figura 5 (9).

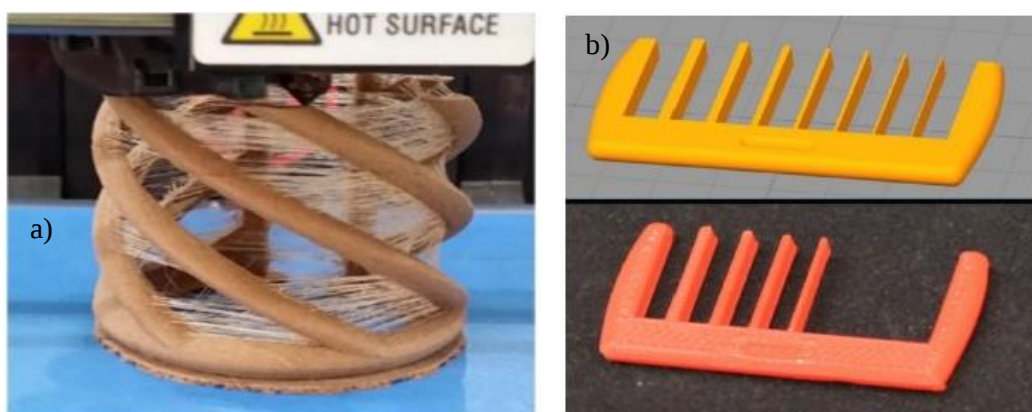


Figura 5 – a) Oozing ; b) defeitos de impressão de secções pequenas (9).

É possível de haver também arranhões na superfície superior, sobreaquecimento o que pode levar a empenos das mais variadas formas, bordos enrolados, pé de elefante e camadas tortas como na Figura 6.

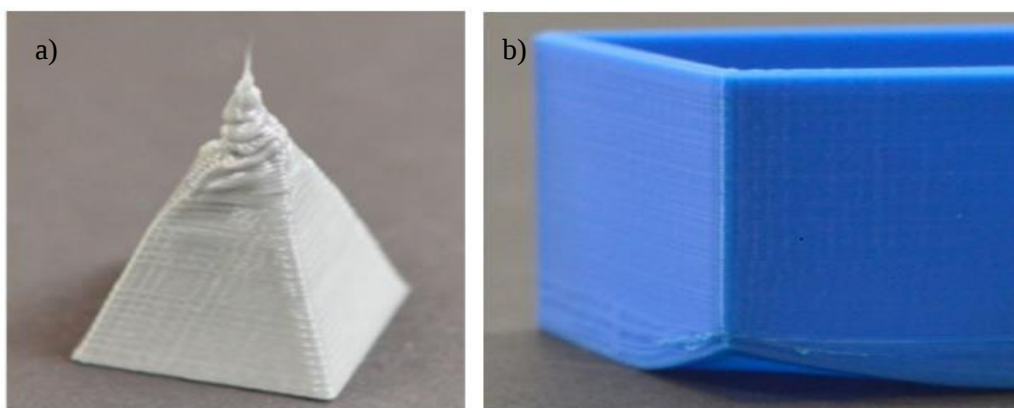


Figura 6 - a) Defeito por sobreaquecimento; b) Defeito conhecido como pata de elefante (8).

Outros dos problemas das impressoras FDM são também o *infill* visível das paredes de perímetro, problemas de suporte, buracos e desvios, também camadas desalinhadas, ou camadas em falta ou até mesmo desagregadas como na Figura 7.

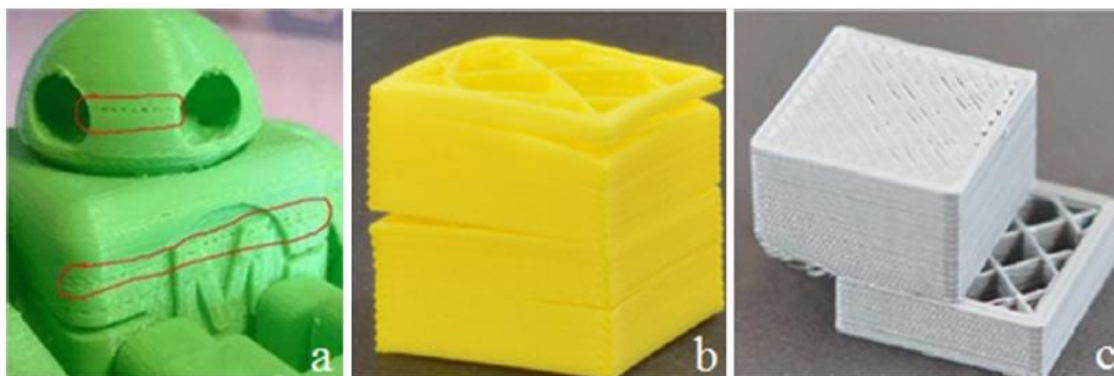


Figura 7 – a) Infill Visível no exterior da peça; b) Camadas em falta; c) Camadas Desalinhadas (8).

Devido a estas falhas podemos considerar que nem sempre se obtém a qualidade final desejada com este método, podendo até alterar as dimensões finais do objeto e isso pode causar problemas futuros (9).

2.3.3 Preparação do trabalho de impressão

2.3.3.1 Desenho CAD

Como qualquer peça, algo realizado por fabrico aditivo começa por uma ideia. Essa ideia pode servir para colmatar uma necessidade, pode ser uma melhoria, ou pode ser apenas algo que é considerado uma ideia interessante a testar. Após isso, é necessário passar essa ideia para um formato que possa ser produzido (10).

No caso do fabrico aditivo, esse formato é um CAD tridimensional, que posteriormente é processado por um *software*, denominado de *slicer*, que como o nome indica, separa o modelo em diversas camadas, com uma dada espessura, para posteriormente realizar o trabalho (10).

Existem imensas ferramentas de CAD, para as mais variadas aplicações, sendo aqui apresentadas três exemplos gratuitos, com objetivos e complexidades diferentes. Existe o TinkerCAD, mostrado na Figura 8, uma aplicação de utilização gratuita, não sendo necessária instalação de *software*. Esta escolha é mais indicada para pessoas com muito pouca experiência em desenho CAD, pois obtém objetos à base de operações booleanas de objetos base (10).

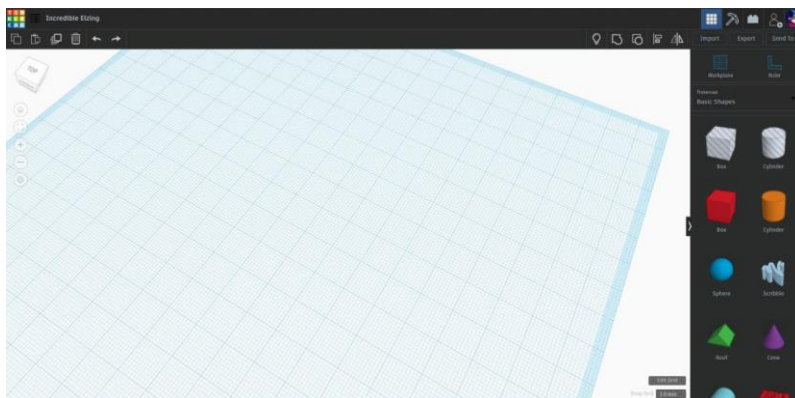


Figura 8 - Software TinkerCAD (10).

A construção de objetos nesta aplicação (TinkerCAD), embora simples, é também limitada e demorada, portanto é apenas recomendada para principiantes.

Para um nível avançado existem outros softwares CAD mais completos e capazes, como por exemplo o CATIA, SolidWorks e Inventor, porém o Fusion360 destaca-se por ser um software gratuito com o aspeto visualizado na Figura 9 (10).

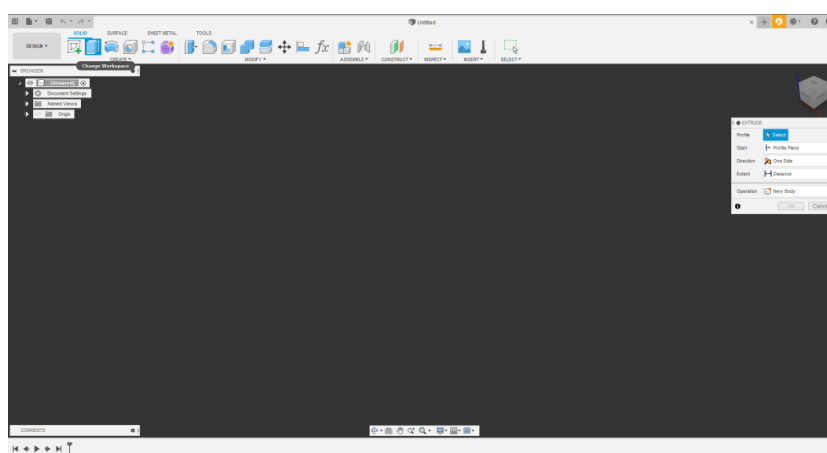


Figura 9 – Fusion 360.

Este *software* é gratuito para uso pessoal, sendo que tem algumas restrições, mas para uso não profissional, são suficientes para a grande maioria das situações. Este *software* tem uma interface de utilizador intuitiva, e para quem já tem prática na utilização de *software* CAD, terá uma adaptação muito rápida. A complexidade de modelos obtidos neste *software* é alta. Quando as medidas da peça não são exatas, como é o caso de peças para fins estéticos e artísticos uma outra opção gratuita é o *software* Blender, exemplo na Figura 10. Ao contrário dos *softwares* mencionados anteriormente, este possui uma elevada complexidade e dificuldade de utilização inicial, no entanto é uma ferramenta muito potente na execução de desenhos orgânicos (10).

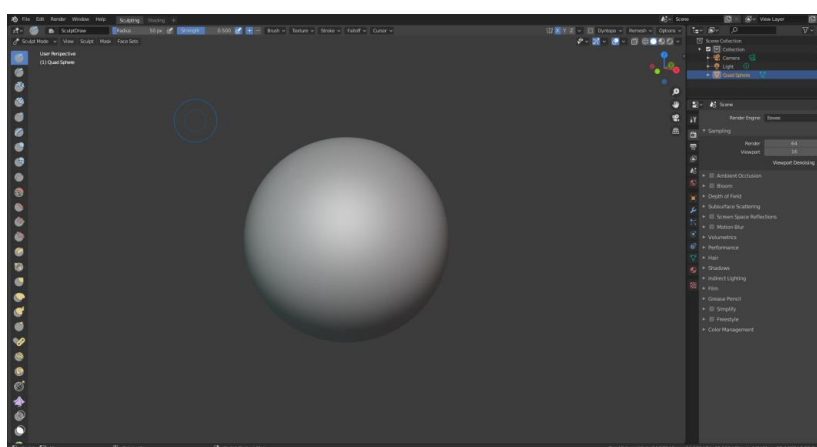


Figura 10 - Software Blender (10).

Recorrendo a uma das 3 opções indicadas, dependendo da finalidade pretendida e da capacidade de utilização do utilizador, é possível criar geometrias de grande complexidade.

Após a conclusão do desenho da peça, este necessita ser exportada para um ficheiro reconhecido pelo *slicer*, sendo os mais comuns o formato *.stl* e o *.3mf*. O formato *.stl* é mais antigo e este divide a geometria num conjunto elevado de superfícies triangulares. O formato *.3mf* foi criado mais recentemente, e consiste numa evolução do formato *.stl*, tendo a capacidade de guardar muito mais informação sobre o próprio processo, até mesmo as diferentes cores. Nos *slicers*, pode-se guardar as definições de impressão, e a posição de uma ou mais peças na mesa de impressão. É um formato muito vantajoso, mas sendo recente, ainda existem muitos *softwares* incapazes de o suportar (10).

2.3.3.2 Slicing

Quando temos a peça a ser produzida, seja esta realizada por desenho próprio ou obtida através de um dos vários repositórios existentes na *internet*, é necessário transformar o desenho em coordenadas e caminhos, tal como numa fresadora CNC. Para tal é utilizado um tipo de *software*,

normalmente conhecido como *slicer*, existindo uma grande variedade de opções gratuitas, normalmente oferecidas pelos fabricantes de equipamentos. Temos como exemplo o Cura da Ultimaker, o PrusaSlicer da Prusa, o ideaMaker da Raise3D, entre outros. A maioria destes *slicers* referidos são compatíveis com um elevado número de máquinas, incluindo máquinas construídas em casa. A maioria das máquinas construídas em casa utilizam os *firmwares* *Marlin*, *RepRap* ou *Repetier*, daí o seu vasto suporte (10).

Embora todas as opções referidas tenham a mesma função, algumas possuem capacidades diferentes uns dos outros, pelo que é aconselhável explorar todas as hipóteses.

As variáveis do processo, como a temperatura, espessura, dimensão do bico são, entre outras, responsáveis pela qualidade da impressão, pela resistência mecânica da peça e pelo tempo de trabalho, num balanço que terá de ser levado em conta a utilização pretendida para a peça.

Uma peça cuja finalidade seja, por exemplo, realizar algum esforço e em que o seu aspeto não seja um fator importante, é aconselhável utilizar as temperaturas mais altas que o normal para o material a imprimir, um bocal de extrusão maior, para que as linhas de impressão sejam mais grossas, e assim tenham uma maior área de aderência à camada anterior, o que em conjunto com a temperatura mais elevada, garantiriam que todas as linhas da peça estavam bem fundidas umas com as outras e teriam maior resistência mecânica. É também de notar que, ao utilizar camadas mais grossas e um bocal de extrusão maior, reduz-se consideravelmente o tempo de trabalho para qualquer peça.

Por outro lado, para se obter uma peça cuja qualidade mais importante fosse o seu aspeto, um bocal de extrusão mais fino, normalmente de 0,2mm, camadas de 0,05mm e temperaturas médias são aconselhadas, em conjunto com velocidades de impressão mais moderadas. Este tipo de afinação transforma-se num enorme tempo de impressão, tendo de ser considerado se vale a pena utilizar uma definição tão extrema, ou se as camadas podem ter maiores dimensões.

Os detalhes acima descritos, são apenas algumas das mais básicas a ter em conta. Com a utilização continua e uma maior experiência na utilização dos *softwares slicers*, será aconselhável experimentar a alteração de outros parâmetros de impressão e otimizar a impressão em função da aplicação, de tempo de impressão, rigidez e aspeto.

O material utilizado no processo é um aspeto onde as configurações dos *softwares* ganham grande relevância. Em função das escolhas é possível manter uma boa resistência da peça gastando menos material. Na impressão 3D, as peças não têm obrigatoriamente de ser maciças, competindo ao utilizador escolher a percentagem de volume interior preenchido, podendo ir de 0% (oco) a 100% (maciço). A forma mais habitual de poupar material, é utilizar uma percentagem de preenchimento baixa e utilizar uma espessura de parede mais elevada. A diferença de material utilizado pode ser considerável, bem como o tempo de impressão da peça necessário. Tais *nuances* e conhecimento de que parâmetros alterar para cada caso, necessitam de alguma experiência de utilização de *slicer*, bem como conhecimento das capacidades da máquina específica onde vai trabalhar. Um exemplo de *software* é o *software* gratuito Cura como mostra a Figura 11 (10).

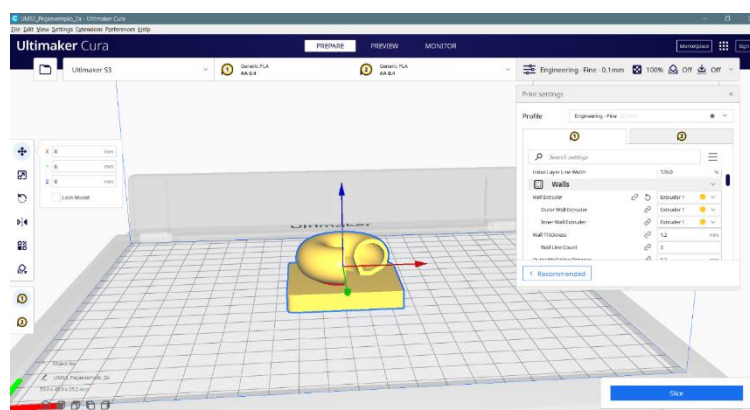


Figura 11 - Preparação de impressão de uma peça exemplo no *software* gratuito Cura.

2.3.3.3 Escolha do material

A escolha do material a utilizar é dependente do objetivo da peça e da máquina a ser utilizada. No caso específico de FDM, PLA é um material simples de imprimir, e possível imprimir com todas as máquinas. No entanto para se obterem melhores resultados, deve ser utilizada refrigeração da peça a ser impressa, pois devido à sua baixa temperatura de transição vítrea, a peça poder deformar um pouco enquanto está a ser impressa. Por outro lado, temos materiais como o ABS, que necessitam de uma base de trabalho aquecida, e de preferência uma atmosfera fechada e relativamente quente, sem correntes de ar. Isto deve-se ao facto deste material o ser impresso, cria grandes tensões internas, e caso arrefeça demasiado rápido, causa a deformação da peça (10).

Atualmente já existem plásticos de elevado desempenho, como o PEEK, PEKK e o PEI, que necessitam de impressoras com atmosferas ativamente aquecidas e bocais de extrusão capazes de atingir os 450°C. Estes materiais possuem resistências mecânicas e térmicas muito superiores quando

comparados com os materiais comuns de impressão como PLA, ABS, PLA e até mesmo com o Nylon.

Assim, deve-se ter em conta o ambiente de trabalho, a função e a solicitação à qual a peça estará sujeita quando se pretende selecionar o material mais indicado a utilizar (10).

2.3.3.4 Preparação da máquina

A preparação da máquina de impressão é um dos passos mais importantes para uma boa impressão. Do ponto de vista teórico, bastaria apenas colocar o material no extrusor, deixar a máquina aquecer e verificar se esta se encontra a extrudir. Há, no entanto, algumas considerações a ter: Dependendo do material a ser impresso e do material do qual é feito a base de impressão, poderá ser necessário a utilização de um filme aderente para que a peça não se solte, ou noutros casos, para que a peça não adira demais, o que pode danificar a máquina quando se está a extrair a peça da máquina. Os materiais utilizados para criar esse filme podem ir de materiais comuns como cola PVA, PVPVA, até materiais especificamente criados para tal efeito, como os materiais aderentes da 3DLAc ou *Dimafix* (10).

2.4 Tipos de Materiais utilizados em FDM

A impressora FDM trabalha essencialmente com a extrusão de materiais termoplásticos, porém estes podem variar significativamente em termos de propriedades. Pode-se considerar que existem 3 categorias: Termoplásticos de mercadorias (PLA, PS); Termoplásticos de Engenharia (PETG, ABS, PC, Nylon); E Termoplásticos de alto desempenho (PEEK) (3).

2.4.1 Poliacido láctico - PLA

O PLA é um polímero obtido da extração de dextrose (açúcar) de materiais de fontes renováveis, por isso é popularmente chamado de bioplástico ou biopolímero. É um material que por ser bastante flexível e elástico, e tem substituindo alguns polímeros que têm na sua composição petróleo, o que fortalece a sua utilização atualmente. Este tipo de material pode ser utilizado para a produção de garrafas, sacos plásticos, copos, entre outros e encontra-se na forma de grãos ou filamentos para o fabrico aditivo.

As propriedades do PLA, na Tabela 1, variam muito com as condições de impressão. Foi verificado que a pigmentação usada para dar cor ao PLA, influencia as propriedades mecânicas do mesmo, sendo que o PLA natural (sem pigmentação) apresenta os melhores resultados. Foi apurado igualmente que a percentagem de cristalinidade é afetada pela pigmentação, sendo o PLA natural a apresentar o menor valor (3).

O PLA quando é derretido, torna-se muito mais fluido do que a maioria dos outros plásticos. Combinando esta propriedade com um bom processo de arrefecimento, é possível obter detalhes finos com boa qualidade, quando comparado com outros plásticos (3).

Porém quando o acabamento superficial precisar de tratamentos pós impressão, este material é difícil de trabalhar no que se trata, por exemplo de lixagem, furação e outros. Portanto, posto isto, quando se quer obter um excelente acabamento superficial em vez de lixar a peça, utiliza-se um primário de enchimento para cobrir todas as saliências causadas de camada para camada. Após a colocação do primário, já é possível lixar e pintar, envernizar ou aplicar uma resina própria para ganhar resistência às intempéries. Existe também um processo para deixar um acabamento brilhante nas peças finalizadas em PLA, que é composto por um vapor de um líquido à base de acetona que vai derreter uma camada muito superficial da peça e deixá-la com um aspeto brilhante como observado na Figura 12 (11).

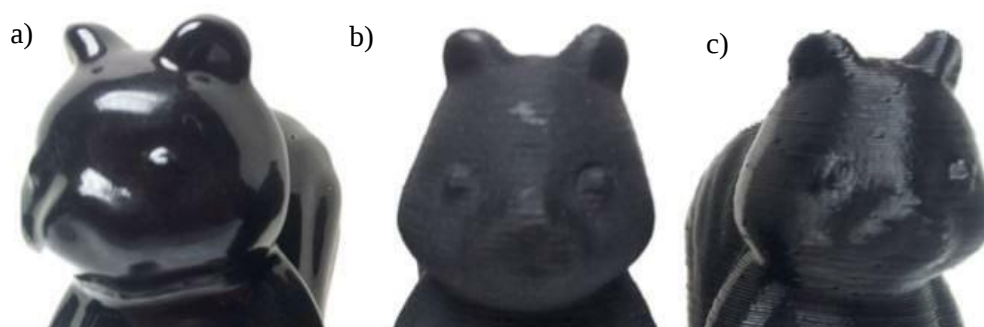


Figura 12 - a) Peça finalizada com o tratamento à base de vapor de acetona; b) Peça que já sofreu de lixagem; c) Peça saída da impressora (11).

Tabela 1 - Propriedades do Material PLA.

Módulo de Flexão (ISO 178)(12)	3500 MPa
Módulo de Young	4,3 GPa
Percentagem de elasticidade até quebra	3,69 %
Densidade	1,24g/cm ³

O PLA é um dos materiais mais utilizados em impressão 3D ao dia de hoje, pois não liberta gases nocivos e a sua impressão é fácil. A facilidade de uso deste material deriva de diferentes fatores:

- Não requer cama quente, embora em caso de dispor dela, recomenda-se utilizar aproximadamente 60 °C.
- Geralmente imprime-se a baixas temperaturas (entre 190°C e 220°C).
- É um material com um *warping* quase inexistente - *warping* é a deformação das peças com respeito à base.

2.4.2 Acrilonitrilo polibutadieno estireno - ABS

O ABS é um polímero obtido por meio de um processo de polimerização por emulsão ou massa do acrilonitrilo e estireno na presença de polibutadieno. Como resultado desta transformação, obtém-se um material com uma considerável resistência ao impacto e rigidez mecânica. Este tipo de polímero é muito utilizado para a produção de brinquedos, bens de consumo, telefones, etc. Para a utilização como matéria-prima no fabrico aditivo, este pode ser encontrado em forma de filamento ou em pó, que permite a sua utilização nos diversos tipos de impressão.

2.4.3 Policarbonato - PC

O PC (policarbonato) em termos de tensões de cedência e fratura, e de módulo de elasticidade, apresenta valores um pouco melhores, comparativamente aos materiais anteriormente apresentados. Este plástico consegue suportar elevadas deformações plásticas sem apresentar fissuras, e até mesmo sem sofrer rotura. Em alguns casos, é possível processar este material à temperatura ambiente. Este material tem também uma elevada resistência ao impacto. Isto faz com que o PC seja extremamente durável, por esta razão ele é utilizado em aplicações que requerem alta fiabilidade, e cujo tempo de vida está projetado para ser elevado. No entanto, apresenta custos bastante mais elevados.

2.4.4 Poliestireno - PS

O PS (poliestireno) em relação aos materiais apresentados anteriormente, é aquele que apresenta as piores propriedades mecânicas. É considerado um material frágil, e por isso é utilizado em aplicações que não estão sujeitas a esforços elevados. Este material é também facilmente inflamável, e tem uma pobre resistência a ataque químico.

2.4.5 Poliéter-éter-cetona - PEEK

O PEEK (Poliéter-éter-cetona) é um material que apresenta excelentes propriedades mecânicas, que são mantidas mesmo a elevadas temperaturas, ao contrário do que se verifica noutros plásticos. Este facto fez com que alguns subcomponentes de cabeças de extrusão sejam fabricados

neste material, mais propriamente num subcomponente responsável pelo isolamento térmico da cabeça. Uma das características que distingue o PEEK de outros materiais é o facto de ser biocompatível, sendo vastamente utilizado em implantes médicos. A juntar ao fabrico de próteses osteopáticas, já realizado há algum tempo, recentemente este material começou a ser utilizado no fabrico de próteses dentárias.

2.4.6 Politereftalato de etileno glycol - PETG

O PET (Politereftalato de etileno), nasce em 1941 pela mão dos cientistas britânicos Whinfield e Dickson, que patentearam este polímero para o fabrico de fibras, que substituiriam as fibras de algodão. Em 1946 este material, em forma de fibra, assentou-se na indústria e o seu uso no setor têxtil continua a existir. Ao início de 1952, começa a utilização do PET em forma de filme para empacotar alimentos, mas foi em 1976, quando este polímero sofreu um impulso com o fabrico de garrafas rígidas para bebidas pouco sensíveis ao oxigénio, como bebidas gaseificadas, cerveja e água mineral (13).

O PETG é o plástico mais utilizado no mundo, provém de PET (Politereftalato de etileno), e o G final significa Glycol-modificado. Esta propriedade é o que confere ao PET transparência, menos fragilidade e mais facilidade de processamento do que o PET comum. Com estas modificações tornou-se um dos materiais mais utilizados na impressão 3D devido à sua resistência, rigidez e facilidade de impressão (13).

Um dos motivos pelo qual na impressão 3D se utiliza o PETG em vez de PET é pelo problema que este último apresenta ao aquecer. Durante o sobreaquecimento, o PET transforma-se em material nebuloso e frágil, algo inviável para a sua utilização com uma impressora 3D FDM / FFF. Este problema que não ocorre ao PETG por conter glicol, também é mais duradouro graças à sua maior resistência ao desgaste e a corrosão a agentes oxidantes, aspetos que estão combinados com uma alta firmeza contra impactos. Outras vantagens que apresenta ao PETG frente ao PET é a opção de esterilizar qualquer objeto e a possibilidade de ser soldado por rádio frequência.

O PETG como material utilizado na impressão 3D é caracterizado por uma funcionalidade muito similar ao ABS (boa resistência à temperatura, duradouro, resistente como observado na

Módulo de Flexão (ISO 178) (12)	1880 MPa
Módulo de Young	2,12 GPa
Percentagem de elasticidade até quebra	7,74%

Tabela 2) e a **Densidade** 1,27g/cm³ facilidade de ser impresso como o PLA. Além disso, apresenta boa adesão entre camadas, pouca deformação durante a impressão, resistência a ambientes com temperaturas baixas durante prolongados intervalos de tempo, resistência química (bases e ácidos) e a ausência de cheiro durante a sua impressão, características essas que lhe dão o atributo por uma ampla maioria de utilizadores de "O novo PLA".

A aplicação deste material na impressão 3D concentra-se na produção de peças que precisam certa flexibilidade, boa resistência aos impactos (inclusive a baixas temperaturas), como por exemplo: peças sujeitas a pressão, peças protetoras ou recipientes para alimentos, as quais podem ser totalmente recicláveis.

Quando se inicia no uso do PETG pode aparecer uma única desvantagem, que é encontrar os parâmetros de temperatura ideais. Deve-se sempre começar pelos valores que oferece a cada fabricante, normalmente entre 210°C a 260°C de extrusor e de 60°C a 80°C de base, embora é possível utilizar com uma base fria. Para obter de forma mais rápida a configuração idónea das temperaturas é aconselhável começar com velocidades de impressão baixas (30 - 35 mm/s). Uma vez obtidos os valores ótimos para a impressora 3D pode-se aumentar a velocidade (13). Como se pode comprovar na Figura 13 o PETG tem diversas aplicações, o que revela polivalência.

Tabela 2 – Propriedades do material PETG (14).

Módulo de Flexão (ISO 178) (12)	1880 MPa
Módulo de Young	2,12 GPa
Porcentagem de elasticidade até quebra	7,74%
Densidade	1,27g/cm ³



Figura 13 – Componente funcional em PETG obtido por impressão FDM (Prusa i3) (15).

2.5 Parâmetros da impressão 3D FDM

Nos *softwares slicer* escolhem-se todos os parâmetros que alteram a impressão 3D FDM, os quais vão influenciar as propriedades finais do objeto impresso. Existe uma variedade extensa de parâmetros, dependendo do avanço tecnológico da impressora podemos ter acesso a mais ou menos parâmetros disponíveis e personalizáveis. Os parâmetros mais conhecidos e utilizados são:

- Temperatura da mesa de operação;
- Temperatura da extrusora;
- Espessura da camada;
- Nº de Perímetros;
- Camadas sólidas superiores;
- Camadas sólidas inferiores;
- Padrão de enchimento (*infill*);
- Orientação do enchimento;
- Percentagem de enchimento;
- Espessura da primeira camada;
- Velocidade de impressão;
- Suporte e/ou Enchimento;
- Arrefecimento.

Todos estes parâmetros variam consoante o que seja pedido em termos de produto final e em termos de tipo material. O parâmetro a que se irá dar maior destaque neste trabalho é o *infill*, ou seja, padrão, orientação e percentagem do mesmo, que é sem dúvida um dos parâmetros cruciais em propriedades mecânicas finais da peça. Juntamente com o *infill* existem alguns agregados que têm também influência e não podem ser deixados de lado.

2.6 *Infill* (Parâmetros)

2.6.1 Percentagem de *Infill*

A percentagem de *infill* define a quantidade de plástico usada no interior da impressão. Uma percentagem de preenchimento mais alta significa que há mais plástico no interior da impressão, resultando num objeto mais resistente. Uma densidade de preenchimento em torno de 20% é usada

para modelos com finalidade visual, densidades mais altas podem ser usadas para peças de uso funcional. Em termos de percentagem tem-se a opção de personalizar como pretendido, de 0 a 100 com intervalos de 0.1%. (16)

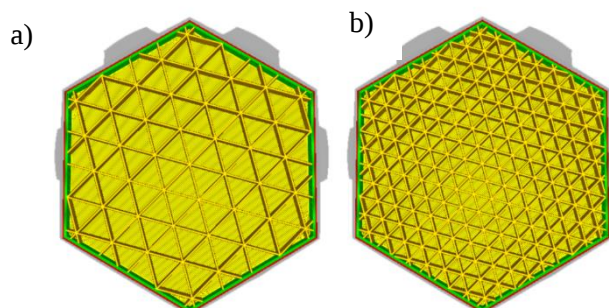


Figura 14 – a) Densidade de Infill mais reduzida; b) Densidade de infill superior.

2.6.2 Distância entre linhas de *Infill*

A densidade de *infill* pode ser definida através do distanciamento entre linhas e não só através da percentagem do mesmo, tendo o mesmo efeito de alterar a densidade de preenchimento, porém sendo mais preciso dimensionalmente.

2.6.3 Padrão de *Infill*

Cada *software slicer* tem já vários tipos de padrões de enchimento pré-definidos, como por exemplo no *software Cura*:

1. **Impressão 2D Forte** – Essencialmente usado para impressões diárias;
2. **Impressão 3D Rápido** – Usado para protótipos rápidos, propriedades mecânicas fracas;
3. **Impressão 3D Forte** – Usados para fazer objetos fortes em todas as dimensões do mesmo;
4. **Impressão 3D Flexível** – Usados para fazer objetos flexíveis com materiais mais flexíveis.

Opções de Padrão são:

- Grelha - **Impressão 2D Forte**;
- Linear - **Impressão 2D Rápido**;
- Triangular - **Impressão 2D Forte**;
- Tri-hexagonal - **Impressão 2D Forte**;
- Cubico - **Impressão 3D Forte**;
- Cubico subdividido - **Impressão 3D Forte** (Este tipo utiliza menos material que o padrão cubico);
- Octetos - **Impressão 3D Forte**;
- Cubico quadrangular - **Impressão 3D Forte**;

- Concêntrico - **Impressão 3D Flexível**;
- Zig Zag – **Impressão 3D Forte**;
- Cross - **Impressão 3D Flexível**;
- Cross 3D - **Impressão 3D Flexível**;
- Gyroid - **Impressão 3D Forte** (Impressão bastante forte relativamente ao baixo peso final da peça);

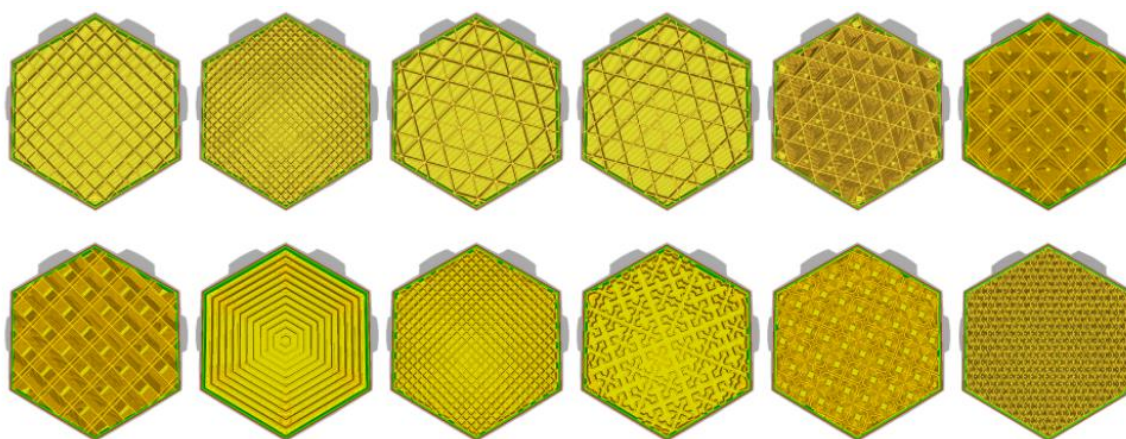


Figura 15 - Padrões de infill acima referidos respetivamente da esquerda para a direita e de cima para baixo(16).

A Figura 16 apresenta um padrão de *infill* não usual, com o nome de *Lightning*, que é utilizado apenas para artigos decorativos.



Figura 16 - Padrão inovador de infill: *Lightning* (27).

2.6.4 Ângulo do *Infill*

As linhas de *infill* geralmente são impressas num ângulo de 45°. Nesse ângulo, os motores X e Y trabalham juntos para obter a máxima aceleração e solavanco na camada sem perder a qualidade. Se as linhas precisarem de ser impressas numa direção diferente, pode-se definir este

parâmetro para 0° para vertical e 90° para horizontal. Por exemplo: [0,90] resulta num padrão horizontal-vertical superior/inferior. (17)

2.6.5 *Infill Offset*

Os padrões de *infill* são centrados para cada modelo carregado. Para mover o padrão para a esquerda, direita, superior ou inferior, pode ser usado um deslocamento X ou Y. Um valor positivo move-o para cima e para a direita, enquanto um valor negativo move-o para baixo e para a esquerda. Isso não funciona para o padrão de *infill* concêntrico, pois este terá de ser impresso sempre de forma centrada para não ocorrer deformação na peça final (17).

2.6.6 *Infill Overlap*

Através desta configuração, pode-se controlar a quantidade de sobreposição entre o *infill* e as paredes. Pode ser definido como uma percentagem ou um valor verdadeiro. Um valor mais alto geralmente resulta numa melhor ligação entre o *infill* e as paredes. No entanto, também pode reduzir a qualidade visual da impressão, pois um valor muito alto pode levar a uma extrusão excessiva (17).

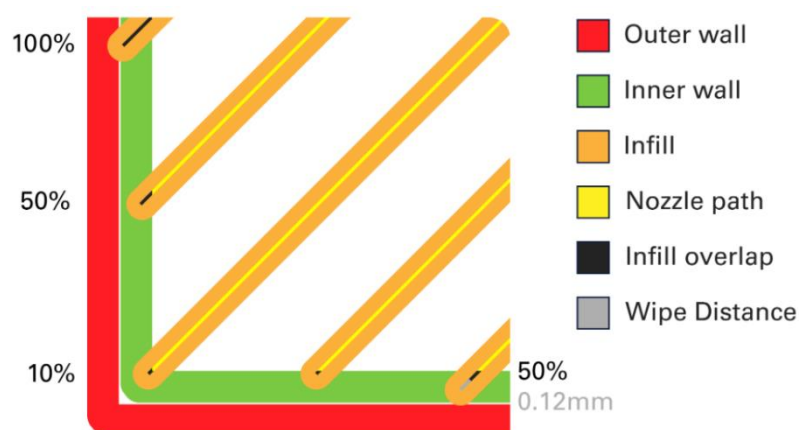


Figura 17 - *Infill Overlap*.

2.6.7 *Skin Overlap*

É exatamente o mesmo parâmetro que o *infill overlap*, mas em vez de fazer sobreposição nas paredes laterais, faz sobreposição nas superfícies de topo e inferiores (17).

2.6.8 *Infill Wipe Distance*

Esta configuração instrui a impressora a interromper a extrusão no final da impressão do *infill*, mas, antes de começar a imprimir as paredes. A impressora ainda irá deixar cair um pouco de

filamento devido à pressão no bico, mas ao interromper a extrusão antecipadamente, irá ajudar a reduzir a extrusão excessiva no invólucro (17).

2.6.9 Espessura de camada do *Infill*

Como a altura da camada do preenchimento não é importante para a qualidade visual, pode-se usar camadas mais grossas no preenchimento para reduzir o tempo de impressão. Ao ajustar esta configuração, convém certificar sempre de que é um múltiplo da altura da camada, caso contrário, o *software* irá arredondar para um múltiplo. Isso significa que pode, por exemplo, imprimir com uma espessura de preenchimento de 0,2 mm enquanto a altura da camada é de 0,1 mm. A impressora imprimirá primeiro as paredes para duas camadas e, em seguida, imprimirá uma camada de *infill* mais espessa (17).

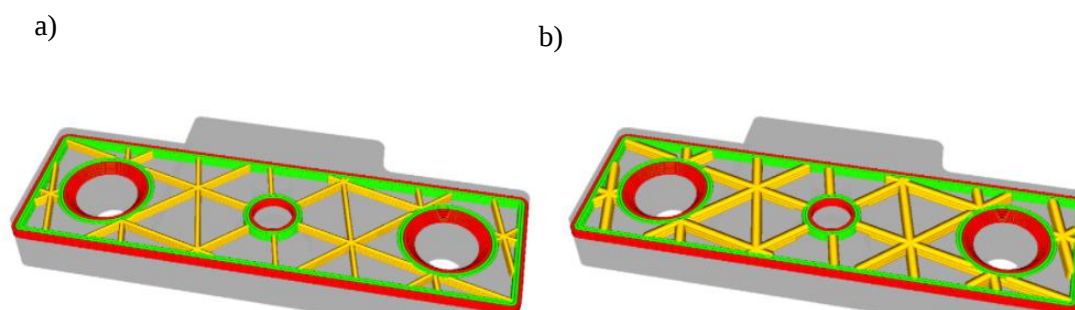


Figura 18 - Diferença entre espessuras de paredes de infill: a), tem menos espessura; b) tem mais espessura.

2.6.10 Gradual *Infill*

O *infill* gradual reduz a quantidade de preenchimento usado, diminuindo a percentagem de preenchimento nas camadas inferiores. Cada etapa de preenchimento gradual divide a percentagem de preenchimento por um fator dois. O resultado é um preenchimento denso próximo às camadas superiores, o que é essencial, para se obter um tempo de impressão reduzido (18).

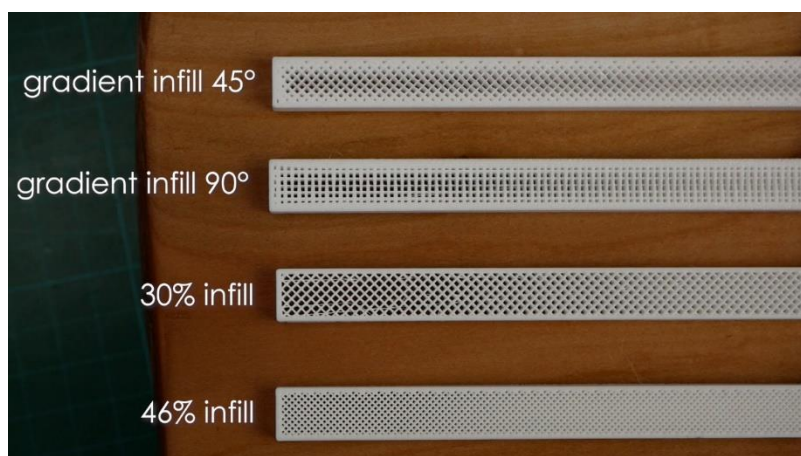


Figura 19 - Exemplos de Gradient Infill.

2.6.11 Altura do Gradual *Infill*

A altura do degrau de *infill* gradual é a altura na qual o preenchimento deve ser reduzido, conforme calculado a partir das camadas superiores. Desta forma, as camadas superiores podem ser facilmente fechadas, sem o uso de preenchimento extra na impressão (17).

2.6.12 *Infill* antes das paredes

Com esta configuração habilitada, o preenchimento será impresso antes das paredes. Isso resulta em melhores saliências porque as paredes vão soldar ao preenchimento já impresso. Imprimir deste modo também pode ter uma desvantagem, que é a possibilidade de o preenchimento ser visível através das paredes, resultando num acabamento superficial mais áspero (17).

2.6.13 Área mínima de *infill*

Esta configuração permite que pequenas áreas numa única camada sejam impressas com capa em vez de *infill* (17).

2.6.14 *Skin Removal and Expansion*

A cobertura, “*skin*”, (camadas superior e inferior) num modelo é impressa para atingir a espessura mínima definida no perfil de impressão. No entanto, alguns modelos precisam de uma geometria interna mais forte ou mais leve. Essas configurações expandem ou removem a capa horizontalmente, onde o preenchimento normalmente seria impresso. Expandir isso permite que os elementos salientes do modelo tenham melhor adesão ao resto do modelo, tornando-o mais forte ou mais leve. Superfícies planas com elementos salientes na direção Z terão uma base mais forte, tornando-a mais robusta (17).

2.6.15 *Skin removal width*

Este parâmetro está associado ao parâmetro anterior e é utilizado para definir a largura para a remoção da “pele”, parte exterior, da peça. Trabalha em conjunto com o *skin removal and expansion* (17).

2.6.16 *Skin Expand Distance*

Isso refere-se à distância pela qual a cobertura será expandida. Um valor maior resulta em impressões mais longas, mas mais resistentes. Um valor mais baixo aumentará apenas marginalmente a rigidez (17)

2.6.17 Ângulo máximo da pele para expansão

Como a cobertura está presente em todo o modelo, não é necessário expandir todas as áreas. Portanto, apenas as áreas abaixo do ângulo especificado aqui serão expandidas. Desta forma, superfícies planas com elementos salientes serão reforçadas, sem afetar o restante do modelo. Para isso, 0° é horizontal, não expande nada, enquanto 90° é vertical, e expande tudo (17).

2.6.18 Largura mínima da pele para expansão

Este parâmetro impedirá que pequenas áreas de cobertura (superior e inferior) se expandam. É usado especificamente ao direcionar apenas a força de superfícies grandes e planas do modelo (17).

2.7 Aspectos visuais causados pelo *infill*

Nos aspectos visuais causados pelo *infill* o artigo “*The Effects of Combined Infill Patterns on Mechanical Properties in FDM Process*” (19) mostra que a qualidade do padrão impresso no ângulo 0° , foi boa, e mostra, também que o processo FDM é capaz de combinar padrões, mas estes padrões devem ser concebidos em *software* CAD separadamente devido às limitações do sistema para combinar padrões. No entanto, ao aumentar a orientação da construção, a qualidade das camadas tornou-se pior, tanto no plano como na borda. Como mostra a Figura 20 a qualidade de 60° e 90° não era tão boa como a de 0° como a

Figura 21 (19).

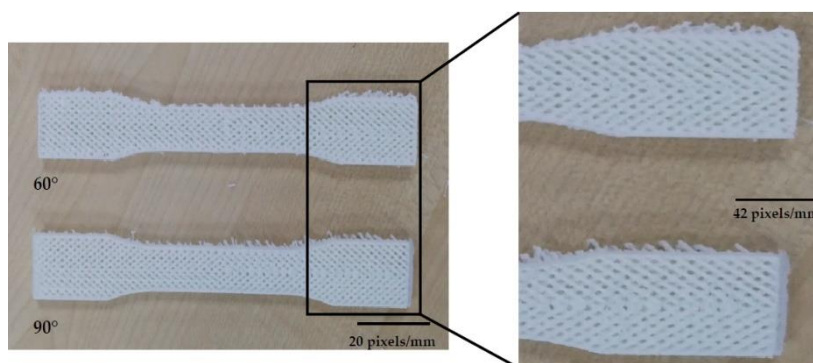


Figura 20 - Deformações visíveis nas impressões de 60° e 90° (19).

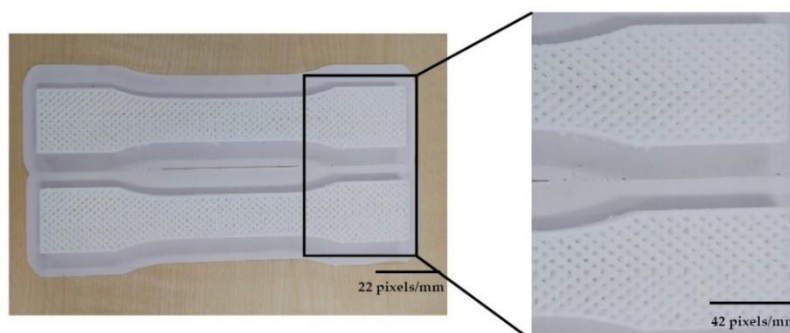


Figura 21 - Qualidade de impressão a 0° (19).

Por conseguinte, a impressão de padrões combinados tem de ser feita com alinhamento através da direção de impressão. Aconteceu um problema na orientação de 75°, mais especificamente nas partes planas. Nesta orientação a máquina não consegue aderir corretamente às camadas e o material acabou por cair ou a encadernação não era de todo boa como observado na Figura 22(19).



Figura 22 - Deformações visíveis na impressão a 75° (18).

2.7.1 Efeitos do *infill* nas propriedades das peças

Já existem vários estudos de variações de *infill* e da influência das mesmas nas propriedades das peças. Normalmente os ensaios mais realizados são os de tração, embora já se encontre ensaios de compressão, de flexão de 3 e 4 pontos.

Num estudo feito, utilizou-se os corpos de prova de acordo com as normas ASTM para polímeros. Ou seja, para os ensaios de tração utilizou-se o provete ASTM D638(20), o que permite uniformizar os estudos feitos (21) havendo um meio de comparação. Já para os ensaios de compressão existem estudos que utilizam estruturas em formato de “I” em que o *infill* é variado e dentro do *infill* existem alterações, tais como espaços com ar e outros. Também existem modelos ASTM para ensaios de compressão neste caso, ASTM D695 (22) que tem uma forma cilíndrica, como a norma ASTM D695 pretende, para facilitar na execução dos testes de compressão, Figura 23 (4).

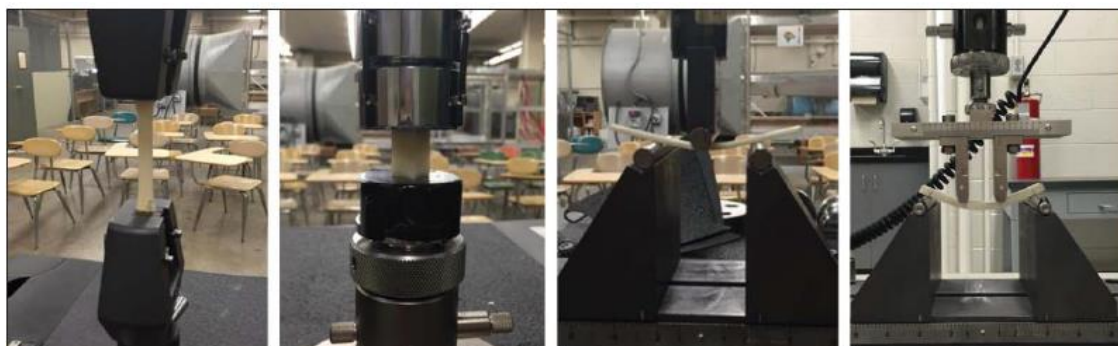


Figura 23 - Testes realizados no artigo (4), segundo as normas ASTM: Tração, compressão, flexão de 3 pontos e flexão de 4 pontos (4).

Este trabalho (4), realizou 4 diferentes testes para o material ABS de modo a realizar um estudo acerca das propriedades mecânicas do mesmo material. No teste de tração podemos observar um teste uniaxial de tração onde as amarras agarram as pontas do provete de teste e começam a exercer uma força (N) até à rutura do mesmo. O segundo teste, de compressão, é então um componente com uma forma cilíndrica onde é comprimido numa máquina até à deformação de paragem. Os últimos dois são ensaios de flexão de 3 e 4 pontos respetivamente (4).

Na Figura 24 pode-se verificar a execução de um teste à compressão onde existem grandes diferenças entre os vários modelos de teste, o que mostra a influência do *infill* na resistência mecânica à compressão. Na Figura 24 (a) e (b) as paredes do padrão do *infill* têm espessura de 0,5mm, porém no exemplo (b) possui espaço com ar dentro do padrão de *infill*, ao contrário do exemplo (a). No perfil da Figura 24 (c) está na sua composição um *infill* de parede de 1 mm com caixa de ar dentro, podemos observar que não existe deformação nenhuma após o teste de compressão. No último perfil da Figura 24 (d) este está sobredimensionado com paredes internas de 1,5mm com espaço com ar apenas nos nós do *infill*. Também não apresenta nenhum tipo de anomalia, porém é uma peça que levou mais tempo e mais material para ser contruída o que não é vantajoso para o produtor da mesma (21).

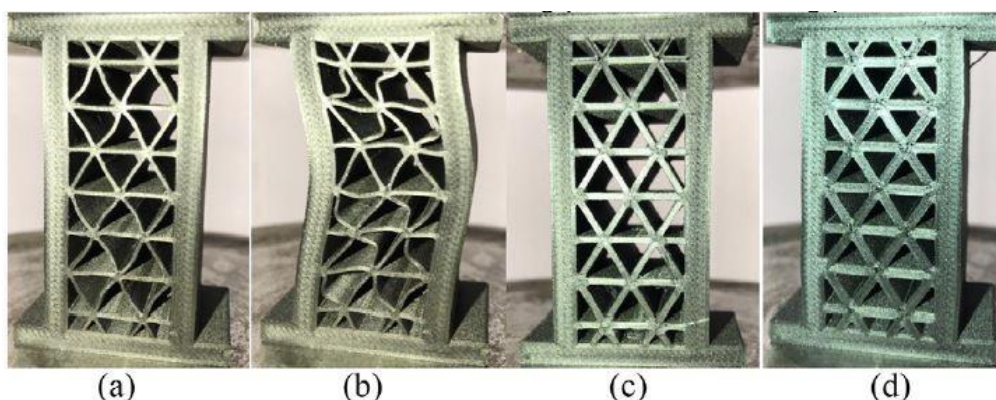


Figura 24 - Vários tipos de *infill* testados à compressão (21).

2.8 Exemplos inovadores na impressão 3D

A impressão 3D está em constante desenvolvimento, e por isso, já se dispõe de *softwares* gratuitos e bem intuitivos de maneira a qualquer pessoa poder utilizar os mesmos. Isto faz com que existam mais pessoas a querer inovar e a experimentar novas tipologias na impressão 3D FDM.

2.8.1 Impressão de 3D na textura de alimentos

A impressão em 3D tem a vantagem de modificar a textura dos alimentos, regulando a estrutura interna. Neste estudo, a impressão 3D foi utilizada para conceber a estrutura *infill* e a secagem por micro-ondas a vácuo (MVD) foi utilizada para pós-processar o *snack* à base de batata. Os resultados indicaram que o MVD era um método promissor de pós-processamento com uma secagem de alta eficiência que tem um bom impacto na estrutura das amostras impressas em 3D. O aumento da percentagem de *infill* aumentou a dureza das amostras. As amostras fundidas e as amostras impressas com preenchimento de 100% não eram adequadas para o pós-processamento MVD. Finalmente, o produto com várias texturas dentro de uma amostra foi produzido através do ajuste da estrutura *infill* de cada peça. Este estudo fornece um novo tema para modificar a textura dos alimentos através da alteração da estrutura *infill* na impressão 3D, com a MVD como método de pós-processamento (23).

2.8

.2 Impressão 3D de comprimidos

O objetivo deste estudo (24) era investigar o impacto dos padrões de infusão na libertação de comprimidos impressos em 3D e a possibilidade de adaptar a libertação de fármacos através da utilização de excipientes. Além disso, foi avaliada a influência da espessura da parede. Foi utilizada amlodipina como droga modelo, álcool polivinílico (PVA) como polímero e excipientes, incluindo glicolato de sódio (SSG) e hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) HME 4 M. Foram preparadas quatro formulações diferentes. Primeiro, as substâncias foram misturadas e depois extrudidas através de extrusão a quente para formar filamentos. Os filamentos obtidos foram utilizados para imprimir comprimidos de amlodipina por FDM. Cada formulação foi impressa em quatro padrões diferentes de *infill*: zig-zag, cúbico, tri-hexágono e concêntrico, enquanto a densidade de *infill* permaneceu constante (20%) (24).

Os comprimidos de amlodipina foram impressos com espessura de parede variável (1 mm, 2 mm e 3 mm) e padrões de *infill* variáveis. No que diz respeito aos padrões de *infill*, foi alcançada uma maior libertação de fármacos com padrão de *infill* em zig-zag (24).

3. Metodologia

O objetivo deste trabalho visa aumentar a eficiência, ou seja, despende menos tempo e menos material, do fabrico de componentes obtidos por fabrico aditivo, variando os parâmetros na impressão 3D FDM, tentando não afetar demasiado a sua resistência e a qualidade geométrica e dimensional dos componentes. Para isso foram definidos, os seguintes fatores a testar:

- Percentagem de *infill*;
- Padrão de *infill*;
- Orientação do *infill*;
- Espessura das camadas;
- Nº de Camadas de Topos;
- Perímetros;
- Velocidade de impressão;
- Tempo de Impressão;
- Pontes.

Este trabalho baseia-se na Norma ASTM D790 / ISO 178 (12) que visa a normalização dos provetes de ensaio para todas as entidades que realizem estes ensaios de flexão a polímeros, de modo a haver também a certificação de que este tem base e pode ser considerado para outros estudos. Nesta norma é indicado o tamanho dos provetes, neste caso, 127 mm x 12,7 mm x 3,2 mm conforme representado na Figura 25.

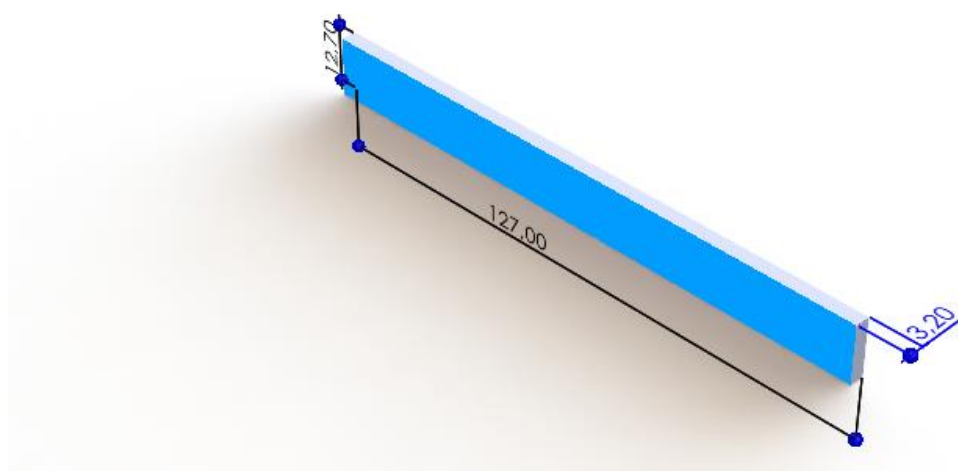


Figura 25 - Proвете de ensaio de acordo com a norma ASTM D790 / ISO 178 (12).

De acordo com norma, para cada tipo de provete, deve-se fazer 5 provetes ensaio com a mesma configuração para a precisão do trabalho ser considerada alta, a rondar os 95%.

3.1 Equipamento Utilizado

A impressora disponibilizada pela empresa Simoldes Plásticos foi a Prusa i3 Mk3 que é uma impressora bastante utilizada e recomendada pelas suas qualidades a preços moderados. Esta impressora é das poucas no mercado que vem quase pronta para utilizar, ou que padece de menos tempo de preparação para iniciar a sua utilização. É apenas necessário proceder à calibração automática e a própria impressora pede um *check-up* a todos os componentes do conjunto da mesma e realiza-o na primeira utilização.

A impressora tem muitas qualidades acima da média como por exemplo, rolamentos e guias de grande qualidade que revelam boa precisão, possui folhas de trabalho magnéticas e amovíveis para melhor remoção dos objetos impressos e substituição em caso de desgaste das mesmas. Possui rolamentos *Misuri* de maior qualidade. A impressora tem também um sensor SuperPinda que é utilizado para autocalibrar a mesa/cama de impressão. A extrusora bem como outros componentes são feitos de materiais de qualidade para uma maior durabilidade, estabilidade e rigidez, tem um sensor de quebra de filamento que deteta quando há uma quebra ou quando acaba o filamento e para a impressão não comprometendo a mesma. É capaz de reutilizar o ficheiro que estava a ser impresso em caso de perda de energia, recomeçando onde parou, o que é muito útil. É uma impressora de *open-source*, ou seja, estão disponíveis todos os componentes para sua substituição sem custos na página da marca, bem como atualizações de *firmware* e *software*, e por último possui um *software* específico e melhorado para trabalhar com as impressoras da sua marca com boa qualidade e mais simples e intuitivo.

As especificações da mesma são:

Tabela 3 - Especificações Prusa i3 Mk3.

Volume de impressão	25×21×21 cm
Altura de camadas	0,05 – 0,35 mm
Bico Extrusor	0,6 mm
Diâmetro do Filamento	1,75 mm
Materiais Suportados	Grande variedade de termoplásticos, por exemplo, PLA, PETG, ASA, ABS, PC (Polycarbonate), CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP (Polypropylene), Flex, nGen, Nylon, Carbon filled, Woodfill, entre outros.

Velocidade máxima	200+ mm/s
Temperatura máxima bico extrusor	300 °C
Temperatura máxima cama de impressão	120 °C
Extrusora	Direct Drive, Bondtech gears, E3D V6 hotend
Superfície de impressão	Folhas de aço magnético removíveis, com diferentes acabamentos
Dimensões da impressora (sem Bobine)	7 kg, 50×55×40 cm (X×Y×Z)
Consumo Energético	Configurações do PLA: 80W / Configurações do ABS: 120W

3.2 Material Selecionado

O material escolhido para este estudo foi o PETG da loja Filament PM, feito na Chéquia, que foi disponibilizado pela empresa Simoldes Plásticos. Alimenta a impressora com bobines de 1 KG de PETG de cor preta. Este PETG tem como temperatura de operação entre os 220°C e os 250°C de acordo com a Figura 26, sabe-se também que a espessura do filamento é de 1,75mm com erro de $\pm 0.05\text{mm}$ e ainda que a bobine tem um peso aproximado de 1kg. A ficha técnica para mais informações acerca deste material encontra-se no anexo 2.



Figura 26 - Rolo de Filamento PETG 1.75mm.

3.3 Seleção dos fatores de estudo

3.3.1 Método de Taguchi

Genichi Taguchi foi um engenheiro japonês que desenvolveu uma filosofia e uma metodologia para a melhoria contínua da qualidade. Para Taguchi, a perda de qualidade começa a partir do momento em que o valor da variável em análise se afasta do valor nominal. Desta forma, a qualidade de um produto deve ser avaliada pelo desvio das suas características em relação ao valor nominal, devendo, nesse caso, os artigos do mesmo lote apresentar uma variação mínima relativamente ao valor nominal da variável de controlo (25).

O método de Taguchi é uma abordagem da engenharia da qualidade em busca de aumentar a robustez dos produtos por meio de uma diminuição dos efeitos dos parâmetros “ruído” no seu desempenho. Os fatores chamados de ruído, tais como, temperatura, humidade, poeira, entre outros, causam os tais desvios e resultam em perda de qualidade do produto. Isso causa prejuízo que pode ser avaliado através de uma função perda que foi proposta por Taguchi.

“O preço representa para o consumidor uma perda na hora da compra, e a baixa qualidade representa uma perda adicional para ele durante o uso do produto. Um dos objetivos da engenharia da qualidade deve ser a redução da perda total para o consumidor.” (Taguchi, 1990)

O método de Taguchi está dividido em etapas de realização:

1. Identificação dos Fatores – Realiza-se a identificação dos fatores (ruído e fatores principais do processo de fabrico) e os parâmetros de produto relevantes. Esta é uma etapa importante pois a não consideração de algum determinado fator ou parâmetro pode distorcer ou impedir de obter a função perda.
2. Planeamento de Experiências – Depois de finalizado o projeto e protótipo do produto é realizada a etapa de planear a obtenção de dados experimentais. Para realizar esta etapa é necessário escolher o tipo de planeamento, neste caso, qual a matriz ortogonal que mais se adequa ao problema. Esta escolha das matrizes está dependente do número de fatores e da quantidade de ensaios, conforme também, a disponibilidade de tempo e custos.
3. Previsão dos níveis ótimos dos parâmetros – É realizada uma otimização dos parâmetros do produto tendo em conta a relação sinal/ruído. No final desta etapa obtém-se um conjunto de valores de parâmetros do produto que o tornam mais robusto e fiável.
4. Validação dos Resultados – Com os níveis dos parâmetros obtidos anteriormente deve-se realizar uma etapa de validação dos resultados encontrados, ou seja, verificação dos níveis ótimos especificados para os parâmetros. Os resultados destes ensaios devem estar aproximados com os resultados considerados modelo, claro que com a respetiva margem de segurança (25).

3.3.1 Identificação dos fatores e Planeamento de Experiências por Taguchi

Para o planeamento de experiências foi necessário numa primeira fase determinar todos os fatores a avaliar que desempenham funções significativas para este estudo. Neste caso depois de escolhidas procedeu-se a uma avaliação entre esses fatores, para determinar o ruído. Entre estes destacam-se os parâmetros de temperaturas de operação e de mesa, que dariam ao trabalho proporções que não eram pretendidas. Através do método de Taguchi então considerou-se uma matriz ortogonal L18 como demonstra a Figura 27, ou seja, com 18 ensaios no total, 7 fatores com 3 níveis e um último fator com apenas 2 níveis.

Experiment	Factor							-
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	2	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	3	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Figura 27 - Matriz Ortogonal de Taguchi L18.

Os fatores e os níveis escolhidos são os apresentados na Tabela 4. Estes foram cuidadosamente selecionados de forma a tentar obter equilíbrio entre tempo, material gasto e rigidez dos provetes, como dito anteriormente. Optou-se por considerar o fator de dois níveis no número de camadas nos topos da peça, sendo os níveis 3 ou 4. Seguido temos os perímetros que se variou entre 1, 2 e 3, temos também a velocidade de impressão dos perímetros que se variou entre 45mm/s, 50mm/s ou 60mm/s, sendo que normalmente a velocidade padrão que é definida por defeito é 45mm/s. A altura das camadas da peça podem variar consoante o acabamento que o utilizador quiser dar à peça, porém isso poderá influenciar na rigidez da peça e no tempo de execução portanto decidiu-se inserir também este fator com os níveis de 0,1mm, 0,15mm e 0,20mm. O *infill* que é o cerne do trabalho teve importância para os restantes 4 fatores, neste caso, o padrão, a densidade, a orientação do mesmo e a percentagem. Foram escolhidos os padrões de *infill* mais robustos no que toca à rigidez e aos testes de flexão, segundo o estado de arte. Quanto à densidade de *infill* foi escolhida através de um estudo previamente realizado de pontes, ou seja, a determinação de comprimento máximo entre apoios. As orientações utilizamos as três orientações mais frequentes e universais. Quanto à robustez da peça é diretamente afetada pela percentagem de adesão entre camadas e paredes, porque se houver

falhas nas conexões a peça irá ceder com mais facilidade. Foi escolhido então as percentagens de *infill overlap* de 25% inicial, pois é a predefinida pelo programa da Prusa e aumentou-se 10% nos seguintes níveis.

Tabela 4 - Fatores e Níveis Matriz de Taguchi.

Níveis			
Fatores	1	2	3
A - Nº Camadas Topos	3	4	-
B - Perímetros	1	2	3
C - Velocidade de Perímetro	45 mm/s	50 mm/s	60 mm/s
D - Altura de Camada	0,1 mm	0,15 mm	0,2 mm
E - Padrão de <i>Infill</i>	Concêntrico	<i>Gyroid</i>	<i>Honeycomb</i>
F - Densidade de <i>Infill</i>	5 %	15 %	25 %
G - Orientação de <i>Infill</i>	30°	45°	90°

Na Tabela 5 consegue-se observar todos os ensaios devidamente organizados com os parâmetros distribuídos de acordo com os fatores e níveis da Tabela 4.

Tabela 5 - Parâmetros dos ensaios definidos pela matriz de Taguchi.

Ensaio	Nº Camadas Cima/Baixo	Perímetros	Velocidade	Espessura da camada	Padrão	Densidade do <i>infill</i>	Orientação <i>Infill</i>	<i>Infill Overlap</i>
1	3	1	45	0,1	Gyroid	5	30	25
2	3	1	50	0,15	Honeycomb	15	45	35
3	3	1	60	0,2	Concêntrico	25	90	45
4	3	2	45	0,1	Honeycomb	15	90	45
5	3	2	50	0,15	Concêntrico	25	30	25
6	3	2	60	0,2	Gyroid	5	45	35
7	3	3	45	0,1	Gyroid	25	45	45
8	3	3	50	0,15	Honeycomb	5	90	25
9	4	3	60	0,2	Concêntrico	15	30	35
10	4	1	45	0,1	Concêntrico	15	45	25
11	4	1	50	0,15	Gyroid	25	90	35
12	4	1	60	0,2	Honeycomb	5	30	45
13	4	2	45	0,1	Concêntrico	5	90	35
14	4	2	50	0,15	Gyroid	15	30	45
15	4	2	60	0,2	Honeycomb	25	90	25
16	4	3	45	0,1	Honeycomb	25	30	35
17	4	3	50	0,15	Concêntrico	5	45	45
18	4	3	60	0,2	Gyroid	15	90	25

3.4 Norma ASTM D790 / ISO 178

Esta norma estabelece as especificações dos testes padrão de flexão para plásticos, sejam eles não reforçados ou materiais isolantes elétricos. Em suma esta norma é um documento que possui na sua íntegra todos os cálculos e parâmetros para a realização de testes de flexão com vista em determinar as propriedades de flexão do material. Para isso foi usada uma barra de secção quadrangular como visualizamos na metodologia, que repousa sobre dois suportes de secção circular e é carregada por meio de um punção de carga a meio da distância entre suportes. Existem várias regras e padrões a seguir como por exemplo, o nariz deve percorrer uma distância igual a uma razão de 16:1 para a espessura do provete de teste. A amostra é então fletida até que ocorra a rutura na superfície exterior do provete de ensaio ou até ser atingido uma deformação máxima de 5%.

De modo, a distinguir os materiais mais rígidos e menos dúcteis dos materiais menos rígidos e mais dúcteis, existem dois principais procedimentos. São eles o procedimento A e o procedimento B, em que o procedimento A emprega uma taxa de deformação de 0,01mm/mm/min para materiais menos resistentes à deformação enquanto que o procedimento B emprega 0,10mm/mm/min. No entanto os testes podem ser realizados de acordo com qualquer um dos procedimentos, desde que o procedimento seja considerado satisfatório para o material a ser testado. A norma obriga também, a que sejam testados, pelo menos 5 amostras para cada ensaio para se obter um grau de precisão mais elevado.

Na secção 7.2.1, da norma, encontram-se os princípios para materiais com espessura maior ou igual a 1,6mm, em espessura, que se enquadra neste caso de estudo. É referido também que para provetes com 3,2mm ou menos de espessura devem ter 12,7mm de largura como observado na figura 24. O suporte inferior deve ter até 90% do comprimento total do provete, o que representa 116mm. Porém foi utilizada uma margem de segurança de 10% e utilizei a largura de suporte de 100mm.

Para o cálculo do procedimento de teste para amostras que se enquadram no tipo de procedimento B, primeiramente é necessário determinar o vão de suporte conforme descrito acima com uma precisão de 0,3 mm, para vãos maiores ou iguais a 63mm. De seguida calculou-se a taxa de movimento da cabeça de teste pela Eq 1:

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (1)$$

R= Taxa de movimento da cabeça, mm/min

L=Vão de Suporte, mm

d=Espessura do provete, mm

Z=Taxa de deformação, mm/mm/min

Portanto, utilizando o procedimento B obtém-se uma taxa de deformação de 0,1 mm/mm/min, um vão do suporte de 100mm e a espessura do provete de 3,2mm, assim calculou-se:

$$R = \frac{0,1 \times 100^2}{6 \times 3,2} = 52,08 \cong 50 \text{ mm/min} \quad (2)$$

A cabeça de carga deve estar devidamente alinhado com os suportes de modo que os eixos dos suportes estejam paralelos com os da cabeça de carga. Esse paralelismo tem de ser verificado antes de executar os testes de flexão.

Após o procedimento anterior, a norma exige que seja feito o cálculo da deformação máxima na superfície externa da amostra até se atingir um limite de tensão de 0,05mm/mm. A fórmula para o cálculo deste procedimento é:

$$D = \frac{r \times L^2}{6 \times d} \quad (3)$$

D= Deslocamento máximo da superfície, mm

r= Deformação, mm/mm (%)

L=Vão de Suporte, mm

d=Espessura do provete, mm

$$D = \frac{0,05 \times 100^2}{6 \times 3,2} = 26 \text{ mm}$$

Depois de todos os parâmetros calculados tem-se todas as ferramentas para a realização dos ensaios de flexão.

Os valores dos testes devem ser cuidadosamente recolhidos e sempre que houver uma rutura, os resultados não poderão ser contabilizados para cálculos posteriores, a não ser que essa falha constitua uma variável em estudo.

De seguida, realiza-se o tratamento de dados e os respetivos cálculos. Esta fase é uma parte crucial do trabalho pois exige um cuidado extra para não serem cometidos erros. Normalmente o primeiro procedimento será a “*Toe Compensation*”, que deve ser feita de acordo com a norma ASTM D790-10, Anexo 1 da mesma, a menos que se consiga demonstrar que a região que forma o dedo não se deve à absorção de folga, ao assento do provete ou a outro produto, mas sim a uma resposta material que se deva ter em conta. Após esta compensação calcula-se a tensão de flexão, para

materiais elásticos homogêneos, a tensão máxima ocorre no ponto médio do comprimento do provete. Esta tensão pode ser calculada para cada ponto da curva carga/deformação através da seguinte equação:

$$\sigma_f = \left(\frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \right) \times \left[1 + 6 \times \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 4 \times \left(\frac{d}{L} \right) \times \left(\frac{D}{L} \right) \right] \quad (4)$$

σ =Tensão de Flexão, MPa

P=Carga exercida pela máquina de ensaios, N

L=Vão de Suporte, mm

D= Deslocamento máximo da superfície, mm

b=Largura do provete, mm

d=Espessura do provete, mm

Para a obtenção do gráfico tensão/deformação é necessária também a deformação ϵ , portanto, para calcular a deformação usa-se a seguinte fórmula presente na norma:

$$\epsilon_f = \frac{6 \times D \times d}{L^2} \quad (5)$$

Todos os pertencentes nesta fórmula, D, d, L, são os já conhecidos anteriormente na fórmula 4.

Para o cálculo da rigidez, podemos considerar o *Secant Modulus*, presente no capítulo 12.9.3 da norma ASTM D790, que calcula o declive da subida da curva tensão/deformação. Ora para isso precisa-se de escolher dois valores nessa reta de subida e retirar os valores da tensão e da deformação, para aplicar na fórmula seguinte:

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\epsilon_{f2} - \epsilon_{f1}} \quad (6)$$

3.4 Impressão dos provetes

Depois dos parâmetros devidamente organizados e definidos, procedeu-se à impressão dos provetes de teste. Para isso foi modelado um provete em CAD, de acordo com a norma ASTM 790/ISO 178. De seguida, este foi gravado em formato .stl, e foram colocados no *software slicer* os 5

provetes por cada ensaio como explicado anteriormente e por fim procedeu-se à colocação dos parâmetros para cada ensaio. Após os ficheiros todos preparados e nomeados, exportou-se o código G para o cartão SD da impressora e assim, iniciaram-se as impressões 3D dos provetes.

Já na impressora é necessário verificar alguns aspetos, como por exemplo, a quantidade de filamento ainda presente na bobine, se é suficiente ou não, se tem quebras ou nós aparentes, e se for este o caso, é estritamente necessária a sua reposição. De seguida, deve-se limpar bem a mesa de impressão e o bico extrusor e se necessário colocar um pouco de cola para prevenir o defeito conhecido como pata de elefante ou má adesão da primeira camada. Fazer o pré-aquecimento da impressora para o material PETG também é um requisito que aumenta a qualidade de impressão, pois a impressora encontrasse mais estável nas temperaturas que necessita para uma impressão ideal.

É de frisar que as impressões foram realizadas todas à mesma temperatura e humidade relativa para evitar fatores externos às impressões e problemas de qualidade. Neste caso, a sala estava equipada com ar condicionado sempre à temperatura de 25°C e com desumidificador sempre a garantir os 47±1% de humidade relativa. Como podemos visualizar abaixo as impressões foram realizadas nas seguintes condições.

3.5 Equipamento dos ensaios experimentais

Procedeu-se a dois tipos de testagem com o objetivo testar a rigidez e a precisão geométrica dos provetes impressos. Para isso realizou-se uma avaliação da geometria com um micrómetro digital da Mitutoyo, que tem como características técnicas a Tabela 6:

Tabela 6 - Características técnicas micrómetro Mitutoyo.

<i>Características técnicas micrómetro</i>	
Tecnologia:	Digital
SPC saída:	Não
Peso:	270g
Força de medição:	5-10N
Faces de medição:	Carbonetos retificados
Monitor:	LCD
Bateria:	SR44 (1pc.) 938882
Tempo de vida bateria:	Aproximadamente 2.4 anos em uso normal

Em anexo 3, tem a respetiva ficha técnica onde se encontra as informações mais detalhadas acerca do mesmo micrómetro. Pode-se visualizar na Figura 28 o mesmo em operação.

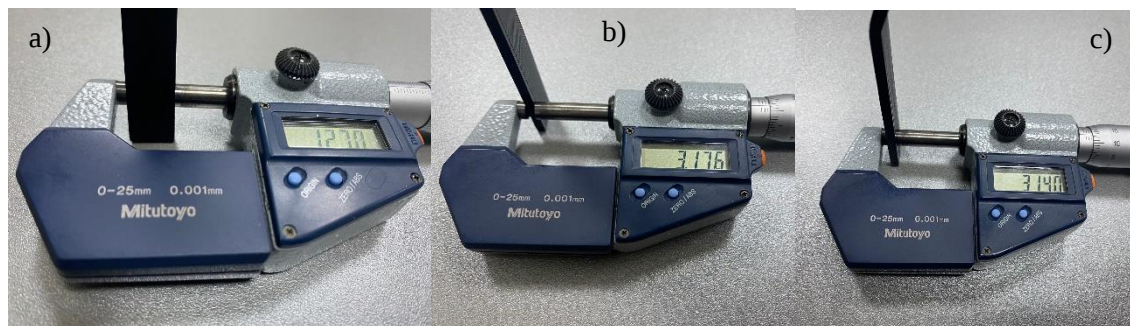


Figura 28 - Medições geométricas com Micrómetro: a) Medição da Largura do Provete; b) Medição da espessura do provete na parede; c) Medição da espessura do provete no centro

As medições regeram-se principalmente pelo cálculo de secção transversal e pelo cálculo do abaulamento. Ou seja, mediu-se a largura do provete, e a espessura tanto na parede como no centro do provete.

Para determinar a rigidez foi efetuado foi um teste de flexão de 3 pontos (*bending test*), em que o objetivo foi medir a rigidez de cada provete realizado nos 90 ensaios. O equipamento de ensaios mecânicos utilizado encontra-se na Universidade de Aveiro no laboratório de caracterização de propriedades termomecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica. É um Shimadzu AGS-X-10kN com a seguinte configuração da Figura 29.

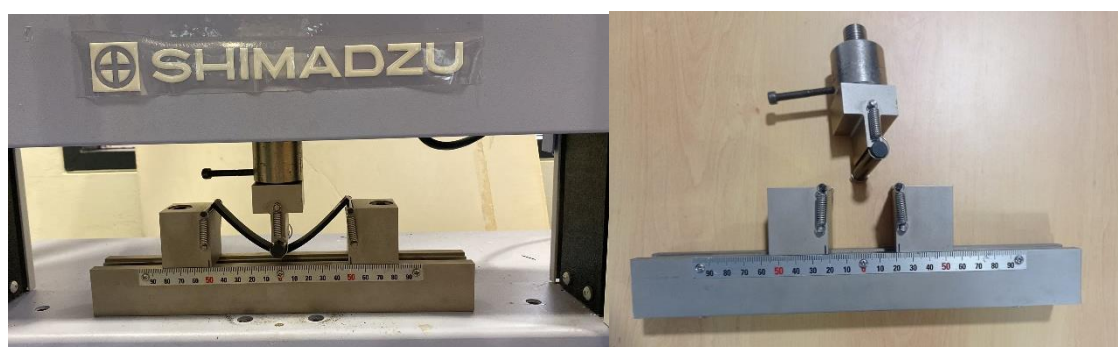


Figura 29 - Equipamento de ensaios mecânicos Shimadzu

Os ajustes que foram realizados neste equipamento foram os estabelecidos pela norma ASTM 790/ISO 178, desde a largura de apoio entre roletes, deslocamento máximo do centro do provete e a velocidade do teste.

4 Estudo Experimental

4.1 Estudo das Pontes “*Bridging*”

Previamente aos ensaios da norma ASTM D790 / ISO 178, foi efetuado um estudo para determinar o comprimento máximo que a impressora consegue depositar material sem que ocorra demasiado abaulamento, rotura do filamento ou outra falha que ponha em causa deposição das camadas e consequentemente a funcionalidade da peça. Este é um problema de elevada complexidade, pois podem existir várias resoluções possíveis dependendo de utilizador para utilizador e dos equipamentos e *softwares* de *slicing*. Com vista à obtenção dos parâmetros considerados ideais, foram modeladas no *software* CAD Solidworks, pontes cujo objetivo foi testar vários comprimentos, começando num comprimento menor, subindo gradualmente até a impressão começar a perder as suas qualidades. Os primeiros protótipos de impressão de pontes foram umas pontes simples como mostra a Figura 30.

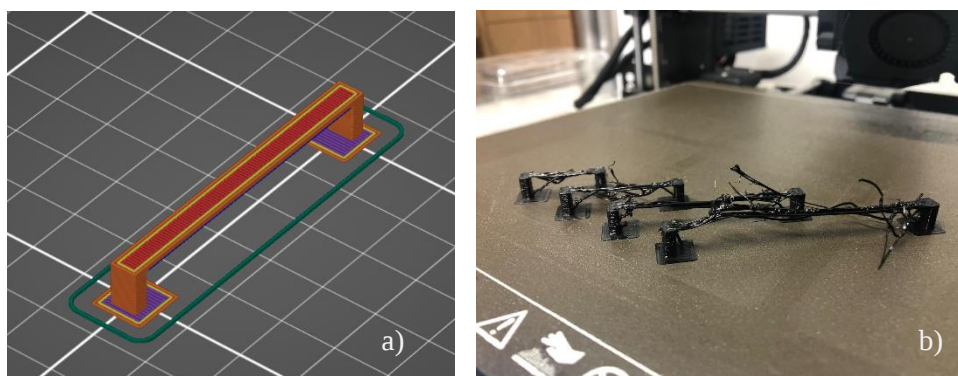


Figura 30 – a) exemplo nas condições perfeitas no *software* prusa; b) realidade dos primeiros testes

Uma impressão tem de cumprir certas funções, podendo estas ser estéticas ou funcionais, porém com pontes de má qualidade não se consegue obter nenhuma delas. No exemplo apresentado está uma demonstração das predefinições da Prusa para a obtenção de pontes. Estas pontes foram respetivamente de 30mm, 50mm, 75mm e 100mm, de comprimento.

Depois de uma pesquisa rápida aos fóruns de impressão 3D foram consideradas algumas alterações das definições dos parâmetros que deveria utilizar para melhorar o *bridging*. O primeiro parâmetro é o *bridge flow ratio*, que é um parâmetro utilizado para programas e utilizadores mais experientes.

O *bridge flow ratio* é um fator que influência a quantidade de plástico para fabricar a ponte, isto ajuda a evitar o abaulamento da ponte e a redução deste parâmetro ajuda a puxar o filamento extrudido, esticando-o e melhorando assim o aspeto visual. Embora por defeito normalmente são

valores aceitáveis, para uma utilização mais intensiva é necessário ajustar. Portanto foi decidido aplicar 0.90 para verificar a melhoria do parâmetro e efetuada a reimpressão com um modelo um pouco diferente de ponte, pode-se verificar rapidamente uma melhoria conforme é visível na Figura 31.



Figura 31 - 2ª Experiência de ponte

Como o caminho parecia correto foi diminuído o rácio para 0.85. Conjuntamente com a alteração deste parâmetro é aconselhado que seja utilizado uma velocidade de ventilação na extrusora maior. Esta vem com a predefinição de 50% de velocidade do ventilador ao que foi aumentado um pouco para 80% e os resultados foram melhorados substancialmente. Foi impresso um 3º modelo de pontes, desta vez, retirado de um repositório de impressões 3D com um aspeto mais apelativo e com mais pontes de teste como demonstra a Figura 32.

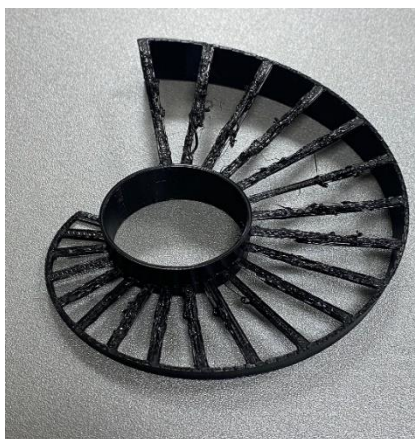


Figura 32 - 3º Modelo teste de pontes

Para aprimorar um pouco depois de uma análise atenta à impressão deste modelo de ponte, percebeu-se que se poderia reduzir mais ainda o rácio de extrusão de material em pontes, pois ainda

se notava flacidez nas pontes e para estas solidificarem na forma pretendida mais rapidamente optou-se por colocar a ventilação nas pontes em 100% e foram criados dois outros modelos de teste que vão de 4 a 80 mm em pontes, e que são de impressão rápida para conseguir economizar tempo e material gasto até aprimorar os parâmetros. Os resultados foram perto de ideais não havendo falhas estéticas nas pontes todas, porém não eram muito funcionais pois nota-se alguma fragilidade a partir de um determinado valor como pode-se observar na Figura 33.

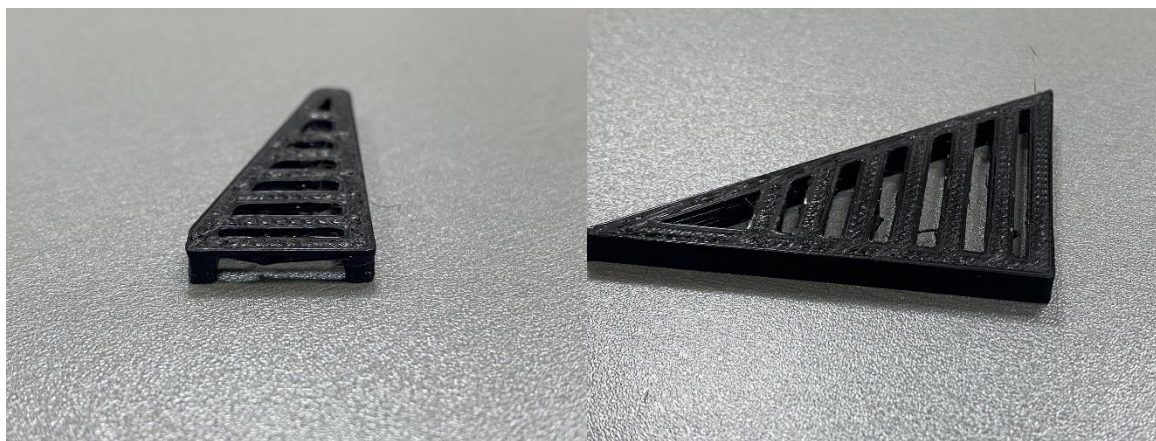


Figura 33 - 4º Modelo de Pontes

Considerado um bom *bridging*, estes valores foram utilizados como padrão no *software PrusaSlicer* para as impressões dos provetes. Para finalizar foram impressos dois provetes com 0% de densidade de *infill*, mas o primeiro com os parâmetros base e outro com os parâmetros já ideais. Neste caso os parâmetros ideais foram o *flow bridge ratio* de 0.8 e a ventilação a 100% que foram significantes para as diferenças apresentadas na Figura 34.

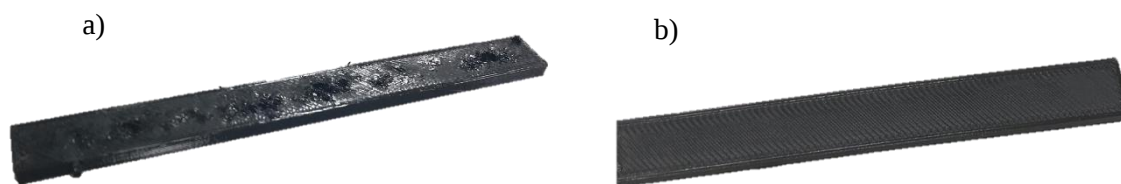


Figura 34 – a) Diferenças entre o antes; b) depois de melhorados os parâmetros

4.2 Impressão dos provetes de ensaio (norma ASTM D790)

A impressão dos provetes foi feita em série, ou seja, conjuntos de 5 provetes para cada ensaio definido pelo critério de Taguchi em 3.3.1. Porém, existem alguns ensaios que tiveram falhas na impressão. Estas falhas podem resultar de inúmeros fatores internos e externos, alguns mais simples como a falta de limpeza ou até mesmo mais difíceis como a alteração de parâmetros de impressão até que se acerte no conjunto ideal. Algumas das falhas passam pelo extrusor que pode estar um pouco obstruído e durante a purga, antes do início da impressão, não consegue expelir os restos de material existentes na mesma. Observa-se a primeira falha na impressão dos provetes na Figura 35.



Figura 35 - Anomalia no provete de ensaio

Esta figura mostra ainda que há uma má formação da camada inferior do provete, causando depósitos de material onde não é necessário e causando também falta de material em algumas partes do mesmo provete. Consegue-se observar a falha conhecida como “pata de elefante” num dos vértices do provete na Figura 36, o que mais uma vez remete para a falta de adesão da primeira camada de impressão, provavelmente causada por alguma falta de limpeza ou de aplicação de cola.

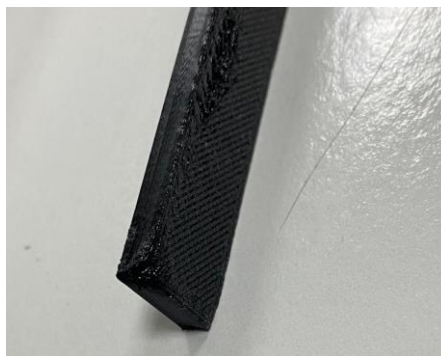


Figura 36 – Falha pata de elefante presente num vértice do provete

A maior parte das anomalias deste género noutro tipo de impressoras remete-se ao facto de uma calibração não suficiente, ou até mesmo deficiente da mesa de impressão. Porém nesta marca de impressoras, Prusa, a calibração da mesa é feita de forma automática e eletrónica sempre que inicia um programa, o que significa que a hipótese de erro humano é de descartar.

Já noutro ensaio ocorreu várias falhas conjuntas, que resultou num provete completamente estragado. Porém aqui, como demonstra a Figura 37, dá para entender que é de descartar uma falha apenas por parte da impressora. Algum parâmetro de impressão tinha de estar mal configurado para acontecer. E foi o que se sucedeu, a velocidade das pontes estava excessivamente alta, ou seja, 60 mm/s, o que não permite um *bridging* capaz de suportar as camadas superiores e assim finalizar o provete.



Figura 37 - Falha total provete 0% densidade de infill

Assim sendo, durante a impressão do provete com a velocidade tão elevada não existe ligação entre o filamento que está a ser impresso e as paredes do provete. As soluções para este caso passariam por aumentar o *infill overlap*, no caso de baixar a velocidade não fosse opção, poder-se-ia também aumentar o fluxo do *bridging* para não correr o risco de romper devido à elevada velocidade, ou então a solução mais simples e correta seria baixar a velocidade para o padrão de 45mm/s.

4.3 Ensaios de Flexão

Pelo método de Taguchi eram precisas 18 condições de ensaio com a variação de parâmetros como explicado na matriz L18 acima representada. Depois dos ensaios realizados os resultados foram os da Tabela 7:

Tabela 7 – Resultados dos Ensaios de Flexão

Ensaio	Tempo (min)	Material Gasto (g)	Rigidez 1 (MPa)	Rigidez 2 (MPa)	Rigidez 3 (MPa)	Rigidez 4 (MPa)	Rigidez 5 (MPa)
1	102,00	4,23	1423,84	1435,59	1422,16	1414,02	1436,44
2	85,00	4,638	1556,23	1557,01	1570,70	1563,42	1579,42
3	65,00	5,026	1726,88	1718,67	1738,89	1720,07	1720,31
4	125,00	4,962	1705,32	1720,94	1706,46	1718,24	1726,05
5	81,00	4,858	1603,17	1624,46	1616,21	1588,61	1601,90
6	65,00	4,552	1508,46	1494,22	1498,55	1498,37	1636,49
7	139,00	5,44	1785,20	1756,27	1778,60	1766,38	1760,39
8	80,00	4,712	1552,22	1557,09	1571,59	1578,36	1553,87
9	69,00	5,148	1665,16	1649,83	1674,70	1652,18	1653,15
10	109,00	4,698	1649,03	1611,15	1633,07	1611,03	1640,19
11	83,00	4,742	1569,73	1572,54	1597,38	1581,79	1574,12
12	67,00	4,708	1492,23	1501,17	1488,86	1480,08	1487,93
13	106,00	4,712	1492,99	1465,48	1514,93	1498,52	1476,44
14	76,00	4,778	1531,18	1494,30	1502,65	1501,89	1494,90
15	78,00	6,152	1831,56	1807,26	1832,83	1818,49	1823,78
16	145,00	7,422	1693,75	1658,47	1656,24	1655,84	1670,81
17	83,00	4,898	1503,09	1497,76	1484,86	1483,40	1518,81
18	69,00	5,294	1647,94	1645,70	1643,22	1647,90	1636,49

Nesta tabela consegue-se perceber que existe uma variância de cerca de 400MPa no que toca a rigidez, por exemplo, entre o ensaio 1 (1426,41 MPa) e o ensaio 15 (1822,78 MPa). No geral foi obtido um desvio padrão entre ensaios curto, o que significa que os valores obtidos foram coerentes e não houve nenhum resultado fora da média. Os tempos foram bastante discrepantes entre eles visto que alteramos alguns parâmetros que influenciam diretamente o tempo de impressão, como por exemplo a altura de camada a 0.1mm aumenta em cerca de 2x mais o tempo de impressão relativamente a uma impressão com altura de camada de 0.2mm, ou seja, no ensaio 1 tem-se cerca

de 102 minutos com densidade de *infill* de 5 % e 0,1mm de espessura de camada e no ensaio 6 com a mesma densidade de *infill* e com 0,2mm de espessura de camada reduz-se o tempo para 65 minutos. Temos também a velocidade dos perímetros no fator C o que influencia diretamente o tempo de impressão e por último, mas não menos importante a quantidade de *infill* presente nos provetes é também uma variante que altera o tempo de impressão.

Dos ensaios de flexão foram retirados os valores de força aplicada (em Newton) e o deslocamento do punção (em mm). Foi realizado um tratamento de dados conforme a norma específica e daí retiramos os valores de Tensão e Deformação necessários para o Gráfico 1 e Gráfico 2.

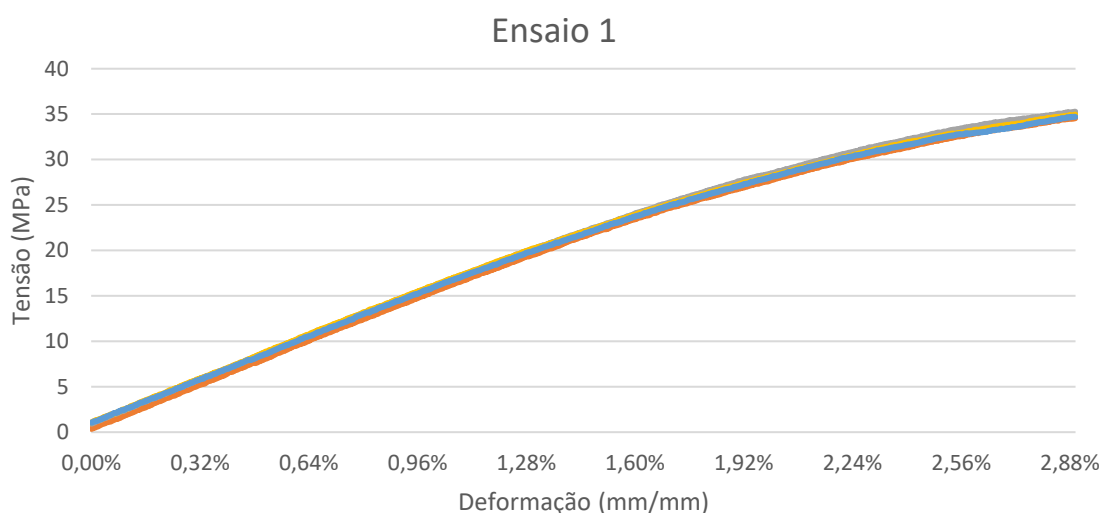


Gráfico 1 - Gráfico Tensão/ Deformação Ensaio 1

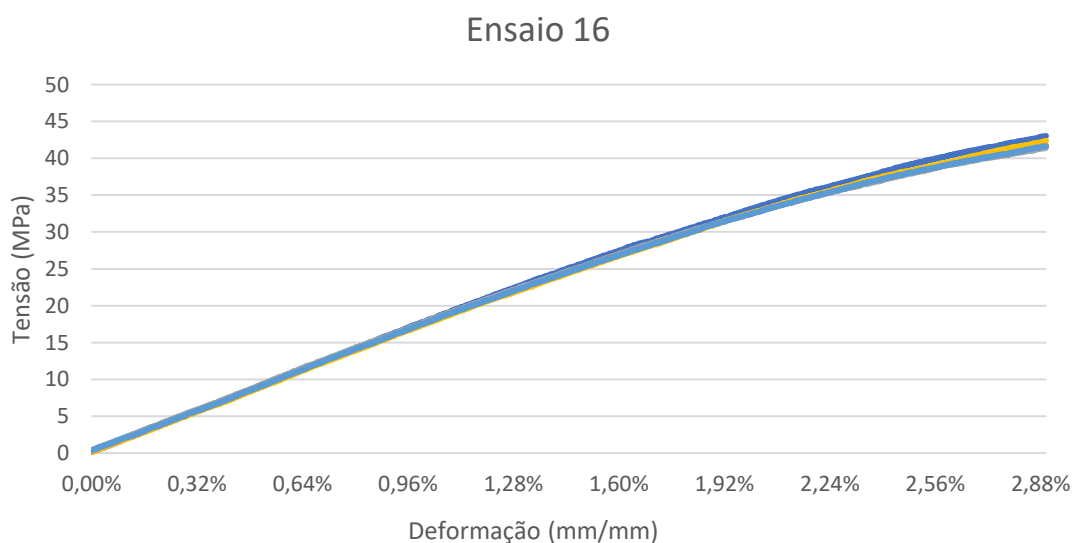


Gráfico 2 - Gráfico Tensão deformação ensaio 16

Estes dois gráficos são os que apresentam o pior valor de rigidez, ensaio 1 (1426,41 MPa), e o ensaio 15 (1822,78 MPa) é o que tem maior valor de rigidez. Estes gráficos foram realizados para observar a coerência das 5 repetições de cada ensaio, para poder entender se haveriam valores díspares que ter-se-ia de considerar ruído ou fora de alcance para o nosso estudo. Os ensaios procederam-se até aos 12% de deformação, porém o que interessa para calcular a rigidez é a subida dos gráficos até aos 2% com tolerância de 0.2%.

Após estes gráficos, que se encontram em anexos, serem analisados, partiu-se para a individualização dos mesmos para obter a reta de tendência de crescimento de cada um dos ensaios para completar então a Tabela 7 já anteriormente mencionada. Exemplo de Gráfico 3 e da sua respetiva reta de tendência no Gráfico 4.

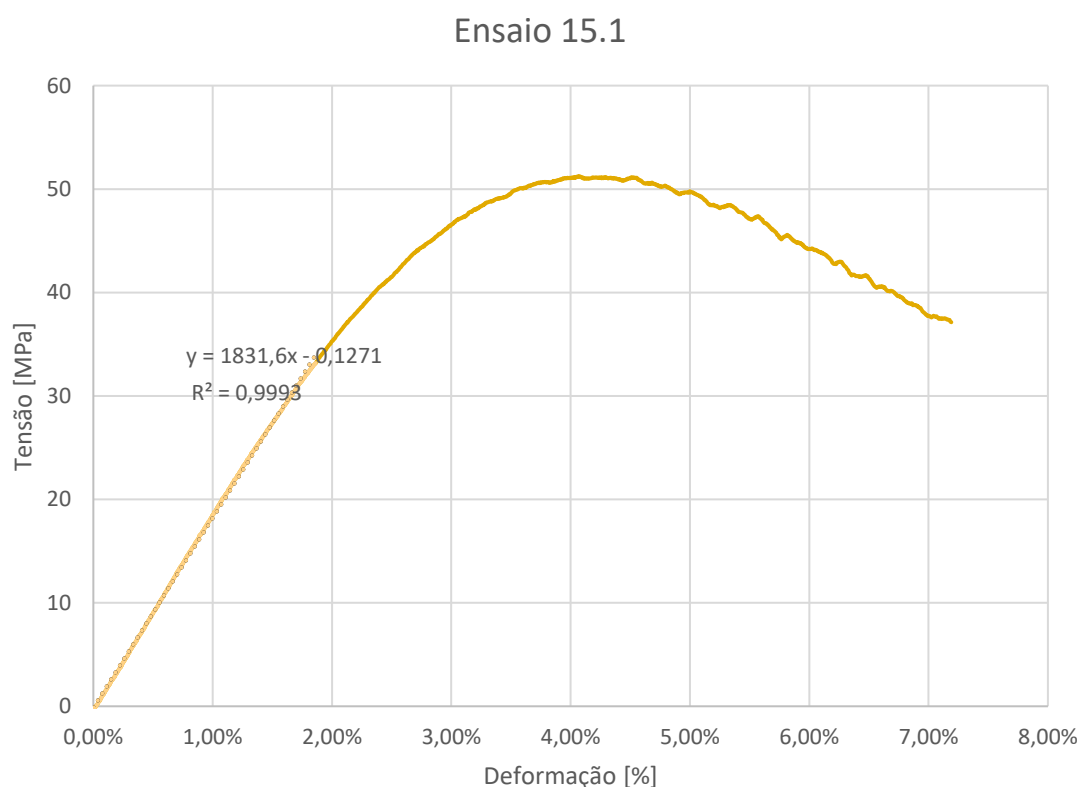


Gráfico 3 - Tensão/Deformação ensaio 15.1

Como o Gráfico 3 demonstra não houve quebra total neste ensaio, como se pôde verificar em todos os outros também. Considerando a fase crucial para o teste de rigidez até aos 2% de deformação, pois a partir desse número começamos a entrar num registo elástico que não é pretendido para este trabalho. Em alguns casos, ocorreu uma rutura da camada exterior já acima dos 5% de deformação, portanto, ainda conta como valor válido para a obtenção de resultados. Na Figura 38 pode-se ver um exemplo desse efeito.

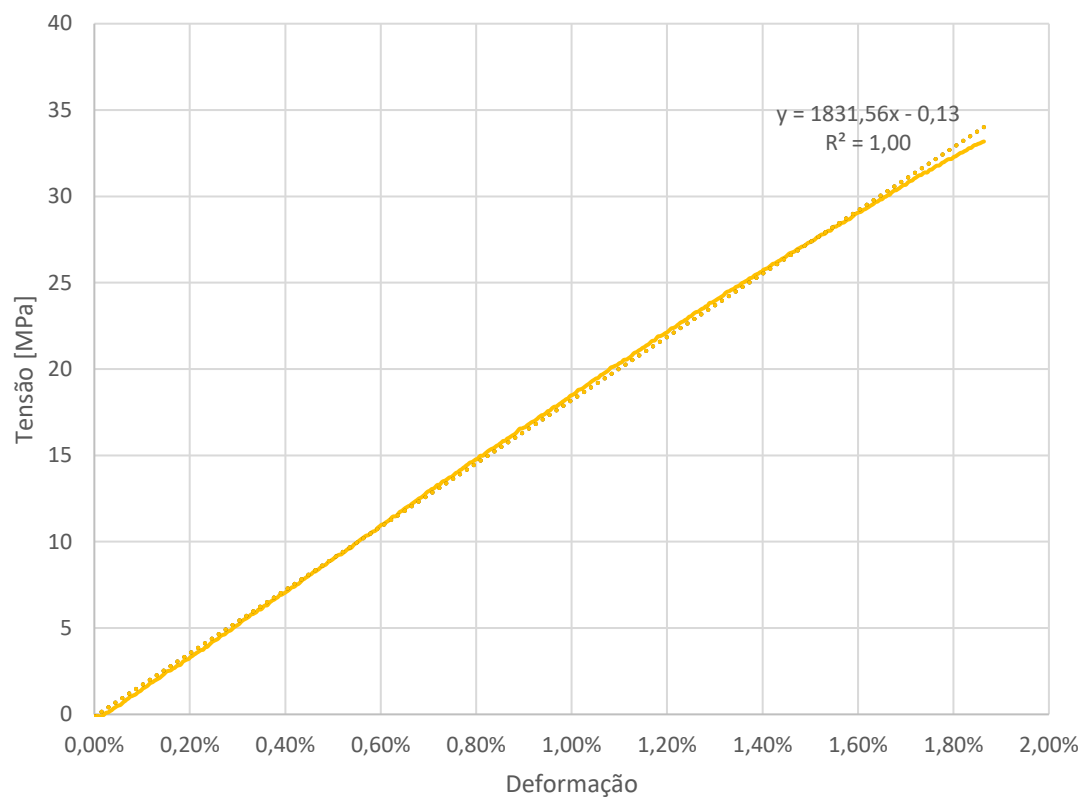


Gráfico 4 - Tensão/Deformação até 2% de deformação do ensaio 15.1.

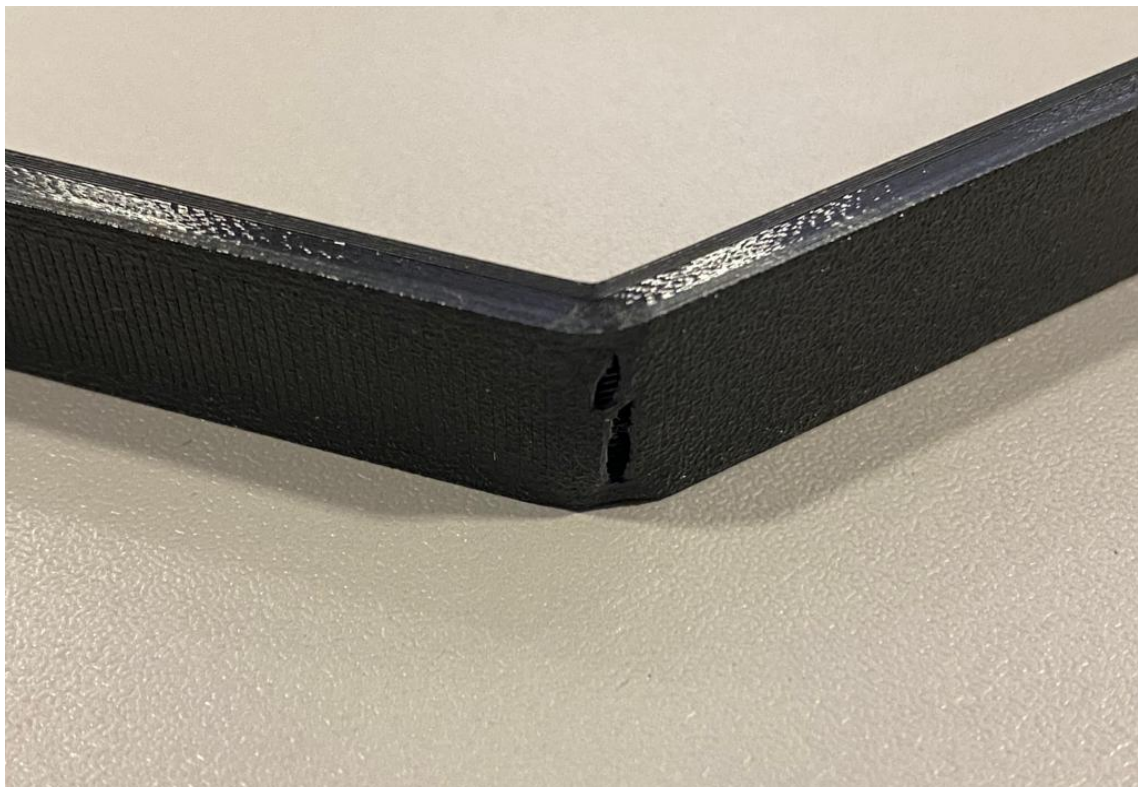


Figura 38 - Rutura superficial do provete após ensaio.

No tratamento de dados, após a etapa de recolha dos mesmos, procede-se a uma análise estatística ANOVA para verificar quais foram os fatores e os níveis em Taguchi que mais influenciaram a rigidez dos provetes.

Para isso recorri ao software de estatística MiniTab, no qual introduzi a matriz ortogonal de Taguchi L18 e os respetivos resultados como demonstra a Figura 39.

The screenshot shows the Minitab interface for an ANOVA analysis. The 'Experimento Taguchi' worksheet is active, displaying a summary of the experiment and a table of results. The summary indicates a matrix of Taguchi L18(2⁸ 3⁷) with 8 factors and 18 trials. The results table lists 18 trials with columns for factors A through H and corresponding numerical values.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C2
	A	B	C	D	E	F	G	H						
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1423,84	1435,59	1422,16	1414,02	1436,44	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	1556,23	1557,01	1570,70	1563,42	1579,42	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	1726,88	1718,67	1738,89	1720,07	1720,31	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	1705,32	1720,94	1706,46	1718,24	1726,05	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	1603,17	1624,46	1616,21	1588,61	1601,90	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	1508,46	1494,22	1498,55	1498,37	1636,49	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	1785,20	1756,27	1778,60	1766,38	1760,39	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	1552,22	1557,09	1571,59	1578,36	1553,87	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	1665,16	1649,83	1674,70	1652,18	1653,15	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	1649,03	1611,15	1633,07	1611,03	1640,19	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	1569,73	1572,54	1597,38	1581,79	1574,12	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	1492,23	1501,17	1488,86	1480,08	1487,93	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	1492,99	1465,48	1514,93	1498,52	1476,44	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	1531,18	1494,30	1502,65	1501,89	1494,90	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1831,56	1807,26	1832,83	1818,49	1823,78	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	1693,75	1658,47	1656,24	1655,84	1670,81	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	1503,09	1497,76	1484,86	1483,40	1518,81	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	1647,94	1645,70	1643,22	1647,90	1636,49	
19														

Figura 39 - Software Minitab para a realização da Análise ANOVA.

Este software já vem com um menu definido próprio para a realização de análises ANOVA, onde após uma pesquisa penso ser o mais eficaz e assertivo. (26)

Conseguí retirar a tabela de resposta para razões sinal-ruído da ANOVA para valores de rigidez de quanto maior melhor, como demonstra a Tabela 8.

Tabela 8 - Tabela de Resposta para Razões Sinal-Ruído.

Nível	A	B	C	D	E	F	G	H
1	64,16	63,90	64,14	64,14	63,92	63,51	63,84	64,14
2	64,02	64,12	63,82	64,03	64,26	64,18	64,24	63,97
3		64,25	64,30	64,08	64,08	64,57	64,17	64,15
Delta	0,14	0,35	0,48	0,11	0,34	1,06	0,40	0,18
Posição	7	4	2	8	5	1	3	6

Com esta tabela pressupõe-se então que os fatores mais influenciadores dos resultados da rigidez, são em primeiro lugar a densidade de *infill* como seria de esperar. Em segundo lugar tem-se a velocidade de impressão dos perímetros, em terceiro lugar o fator G que representa a orientação das camadas de *infill*, em quarto lugar ficou o número de perímetros que colocamos nos provetes, em quinto lugar estão os padrões de *infill* e em sexto lugar a percentagem de *infill overlap*. Nas duas últimas posições ficaram o número de camadas dos topos e a espessura de camadas.

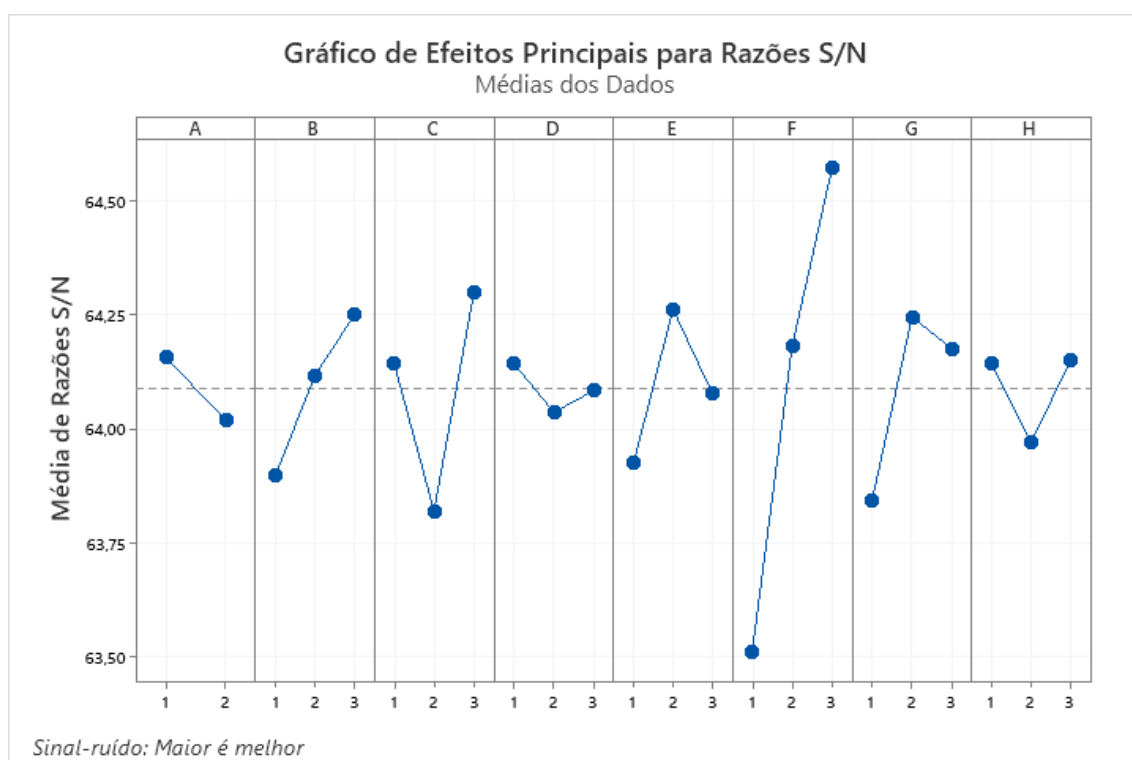


Gráfico 5 - Gráfico de Efeitos Principais para Razões S/N.

Neste Gráfico 5 consegue-se observar mais detalhadamente onde variam mais os valores de rigidez e para que fatores.

Tabela 9 - Tabela de respostas da ANOVA para médias.

Nível	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1617	1569	1616	1617	1575	1499	1559	1615
2	1592	1611	1553	1594	1637	1620	1635	1581
3		1633	1645	1603	1601	1695	1619	1617
Delta	26	64	92	22	62	196	76	36
Posto	7	4	2	8	5	1	3	6

Além da análise através de sinal-ruído da análise estatística da ANOVA, realizou-se também uma análise através das médias dos resultados da Rigidez, como mostra a Tabela 9 que veio consolidar os resultados anteriormente mostrados e veio dar consistência ao trabalho.

Após essa análise retirou-se também os desvios padrões de cada um dos ensaios como pode-se observar na Tabela 10.

Tabela 10 - Desvio padrão dos ensaios.

Ensaio	Razão S/N	Média	Desvio Padrão
1	63,1468	1436,24	12,5830
2	63,9542	1575,18	12,8417
3	64,7977	1734,79	11,4648
4	64,7159	1723,00	4,2422
5	64,1477	1614,47	8,9689
6	63,6912	1534,81	56,4173
7	64,8646	1751,95	14,0522
8	63,7853	1545,21	13,4923
9	64,3053	1641,58	12,4335
10	64,1743	1619,07	14,1521
11	63,9054	1569,29	8,0910
12	63,4014	1480,23	4,5879
13	63,4312	1482,08	24,1764
14	63,5207	1497,39	20,0334
15	65,1855	1815,19	15,3602
16	64,5291	1684,44	14,3133
17	63,5981	1515,00	12,6900
18	64,4105	1661,67	2,9162

Os ensaios tiveram no geral um bom desvio padrão como referido anteriormente, porém existiu uma repetição do ensaio 6 que fugiu um pouco da normalidade de resultados criando aquele desvio padrão único e massivo de 56,41 MPa. Este valor pode ter sido causado por algum erro humano ou no fabrico de algum provete.

Após estes resultados, é apresentada, abaixo, na Tabela 11, uma taxa de média de rigidez por grama de material impresso. É uma taxa para ir ao encontro do pretendido neste trabalho, ou seja, com o menor tempo de impressão e com a menor quantidade de material criar uma peça igualmente rígida. Não interessa realizar uma peça que para obter uma certa rigidez, seja utilizada uma grande quantidade de material. Atualmente, todos esses pormenores, todas essas reduções e poupanças a longo prazo têm boas consequências.

Tabela 11 - Resumo de resultados obtidos.

Ensaio	Tempo de Impressão	Material Gasto (g)	Rigidez (MPa)	Taxa Rigidez/Material
1	01:42:00	4,23	1423,84	336,61
2	01:25:00	4,638	1556,23	335,54

Ensaio	Tempo de Impressão	Material Gasto (g)	Rigidez (MPa)	Taxa Rigidez/Material
3	01:05:00	5,026	1726,88	343,59
4	02:05:00	4,962	1705,32	343,68
5	01:21:00	4,858	1603,17	330,01
6	01:05:00	4,552	1508,46	331,38
7	02:19:00	5,44	1785,20	328,16
8	01:20:00	4,712	1552,22	329,42
9	01:09:00	5,148	1665,16	323,46
10	01:46:00	4,698	1649,03	351,01
11	01:23:00	4,742	1569,73	331,26
12	01:07:00	4,708	1492,23	316,96
13	01:46:00	4,712	1492,99	316,85
14	01:26:00	4,778	1531,18	320,46
15	01:18:00	6,152	1831,56	297,72
16	02:25:00	7,422	1693,75	228,21
17	01:23:00	4,898	1503,09	306,88
18	01:09:00	5,294	1647,94	311,28

Com esta tabela conseguimos perceber que o ensaio número 10, apesar de não ser o melhor resultado em termos de rigidez média obtida nos ensaios, é o que tem melhor taxa de rigidez/material. Isto significa que os parâmetros usados para a realização desse ensaio podem ser considerados os melhores dos 18 ensaios. O ensaio 10 conseguiu um valor de 351,01 MPa por grama utilizada no provete. Este ensaio contém os seguintes parâmetros de impressão presentes na Tabela 12:

Tabela 12 - Parâmetros de impressão do ensaio 10.

Número de Camadas de Topos	4
Número de Perímetros	1
Velocidade de Perímetros	45 mm/s
Espessura da camada	0,1 mm
Padrão de Infill	Concêntrico
Densidade do Infill	15%
Orientação do Infill	45°
Infill Overlap	25%

4.3.1 Ensaio de flexão com 51.2 mm entre suportes

Depois de analisar outros trabalhos idênticos, de ensaios de flexão regidos pela norma ASTM D790, que usaram uma medida diferente que foi a medida mínima entre suportes. Após a realização dos cálculos, obtém-se o valor de 51,2mm entre apoios, como exemplifica a Figura 40.

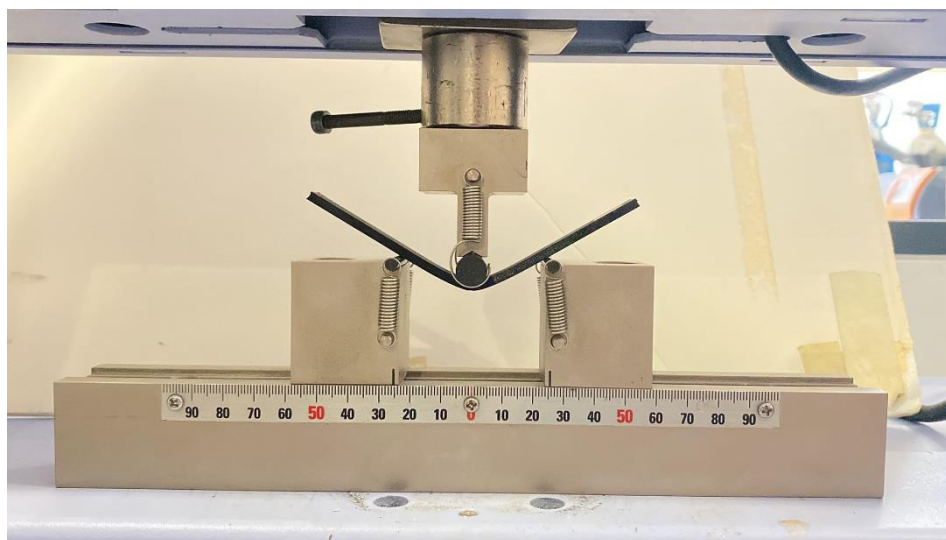


Figura 40 - Ensaio 2 com 51,2mm entre apoios.

Após o cálculo desta medida, foi necessário rever as restantes medidas para efeitos de ensaios de flexão que usam a medida do vão de suporte para calcular a velocidade da descida e o deslocamento total. Ora o deslocamento total resultante foi 7 mm para atingir os 5% de deformação, porém foi utilizado um valor de 15 mm como margem de segurança de resultados e a velocidade foi de 14 mm/min. Foi testado um provete de cada ensaio para perceber se fazia realmente influência a mudança dos parâmetros de teste.

Pelo Gráfico 6, apresentado abaixo, consegue-se perceber que os resultados são mais estáveis, ou seja, não há tanta distorção de pontos. A própria curva aproxima-se de uma curva ideal e consegue-se mais precisão devido à velocidade mais baixa. Ainda assim os resultados de rigidez foram aproximadamente iguais, e não houve ruturas no processo de ensaio dos mesmos.

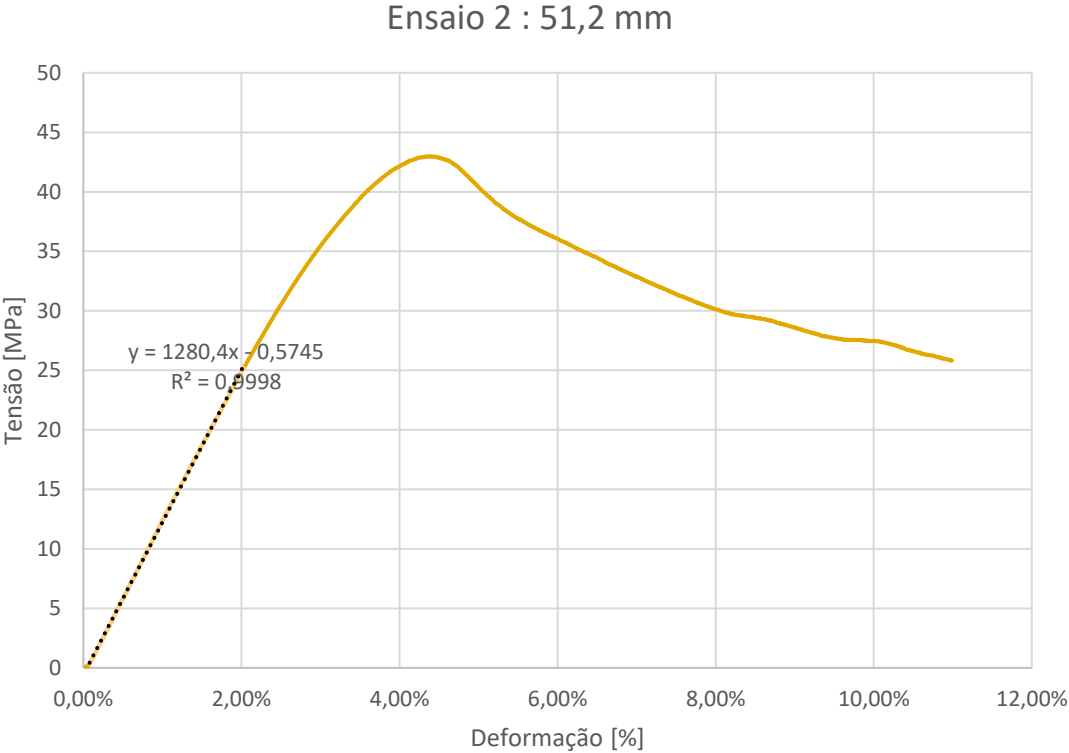


Gráfico 6 - Tensão/Deformação ensaio 2 (51.2mm).

Como demonstrado os valores de rigidez apesar de semelhantes, não chegaram a valores tão elevados como os recolhidos no primeiro ensaio. Isto deve-se à mudança de parâmetros do próprio ensaio de flexão. Porém depois de analisado na análise estatística da ANOVA podemos perceber que o fator mais importante para a rigidez dos provetes é sem dúvida o fator F que representa a densidade de *infill* presente nos provetes. O fator B e C também são fatores de grande importância como se viu anteriormente, que respetivamente correspondem ao nº de perímetros e à velocidade de impressão.

Tabela 13 - Tabela de respostas de sinal-ruído.

Nível	A	B	C	D	E	F	G	H
1	63,76	63,31	63,75	63,87	63,54	62,85	63,54	63,74
2	63,71	63,64	63,43	63,60	63,87	64,00	63,82	63,54
3		64,24	64,02	63,74	63,79	64,35	63,85	63,92
Delta	0,04	0,93	0,58	0,27	0,33	1,49	0,31	0,37
Posto	8	2	3	7	5	1	6	4

Todos os restantes gráficos e tabelas estão presentes em anexo para, se necessário, a realização de uma análise mais cuidada dos mesmos. Fica a Tabela 14 com o resumo dos valores obtidos neste ensaio de flexão.

Tabela 14 - Tabela resumo obtida no segundo ensaio de flexão ().*

ENSAIO (*)	TEMPO DE IMPRESSÃO	MATERIAL GASTO (G)	RIGIDEZ (MPA)	TAXA RIGIDEZ/MATERIAL
1	01:42:00	4,23	1280,42	302,70
2	01:25:00	4,63	1431,39	308,62
3	01:05:00	5,02	1678,68	334,00
4	02:05:00	4,96	1698,2	342,24
5	01:21:00	4,85	1546,2	318,28
6	01:05:00	4,55	1388,6	305,05
7	02:19:00	5,44	1744,6	320,70
8	01:20:00	4,71	1469,6	311,88
9	01:09:00	5,14	1702,6	330,73
10	01:46:00	4,69	1549,5	329,82
11	01:23:00	4,74	1505,9	317,57
12	01:07:00	4,70	1375,1	292,08
13	01:46:00	4,71	1335,9	283,51
14	01:26:00	4,77	1464,1	306,43
15	01:18:00	6,15	1737,2	282,38
16	02:25:00	7,42	1698,6	228,86
17	01:23:00	4,89	1494,7	305,17
18	01:09:00	5,29	1690,7	319,36

(*) – Segundo a norma ASTM D790 pode-se utilizar o vão de suporte a 16 vezes a altura do provete de ensaio, portanto este segundo ensaio foi realizado numa perspetiva de perceber as alterações que isso iria implicar na rigidez dos provetes.

Neste segundo ensaio de flexão os resultados, apesar dos valores da rigidez aproximados, podemos ver que os ensaios que tiveram a melhor taxa de rigidez/material foram o provete 4, 3 e 9 que tiveram valores acima dos 330 MPa por grama de material. Com este facto, pode-se concluir que este material tem uma resistência menor à flexão em baixas velocidades e menores deslocamentos.

Posto isto conseguimos retirar os parâmetros ideais para provetes sujeitos a maiores velocidades e deslocamentos no ensaio de flexão, como também os parâmetros para os provetes mais resistentes em condições menos severas, ou seja, com apenas 14 mm/min de velocidade de teste e menor deslocamento.

Tabela 15 - Parâmetros de impressão do ensaio 3.

Número de Camadas de Topos	3
Número de Perímetros	1
Velocidade de Perímetros	60 mm/s
Espessura da camada	0,2 mm
Padrão de Infill	Concêntrico
Densidade do Infill	25%
Orientação do Infill	90°
Infill Overlap	45%

Tabela 16 - Parâmetros de impressão do ensaio 4.

Número de Camadas de Topos	3
Número de Perímetros	2
Velocidade de Perímetros	45 mm/s
Espessura da camada	0,1 mm
Padrão de Infill	Honeycomb
Densidade do Infill	15%
Orientação do Infill	90°
Infill Overlap	45%

4.4 Resultados geométricos dos provetes

O objetivo deste trabalho era conseguir entender também se a variação dos parâmetros de *infill* influenciava a precisão geométrica dos mesmos. A olho nu conseguiu-se perceber logo que são todos idênticos, porém foi realizada uma análise mais cuidada aos provetes impressos de cada ensaio. Essa análise foi composta por três medições com o micrómetro como explicado anteriormente na metodologia. A tabela 16 mostra os resultados obtidos em mm com tolerância de 3 casas decimais como previsto pelo micrómetro utilizado.

Tabela 17 - Valores obtidos das medições.

<i>Ensaio n°</i>	<i>Largura</i>	<i>Espessura paredes</i>	<i>Espessura Meio</i>	<i>Diferença de espessuras</i>
1	12,737	3,191	3,187	0,004
2	12,679	3,163	3,13	0,033

Ensaio n°	Largura	Espessura paredes	Espessura Meio	Diferença de espessuras
3	12,785	3,32	3,241	0,079
4	12,811	3,282	3,263	0,019
5	12,726	3,125	3,125	0
6	12,619	3,245	3,189	0,056
7	12,706	3,242	3,251	0,009
8	12,889	3,116	3,12	0,004
9	12,799	3,174	3,14	0,034
10	12,652	3,206	3,196	0,01
11	12,791	3,2	3,185	0,015
12	12,714	3,223	3,104	0,119
13	12,763	3,194	3,134	0,06
14	12,742	3,182	3,175	0,007
15	12,8	3,282	3,274	0,008
16	12,86	3,127	3,136	0,009
17	12,734	3,133	3,095	0,038
18	12,818	3,162	3,181	0,019

Como observado acima a largura dos provetes foi bastante afetada de ensaio para ensaio, isto depende também da altura das camadas, e do *infill overlap* que acaba por ajudar a aumentar a largura. Porém isso não se verifica em todos os casos, como por exemplo no ensaio 14 que tem o valor mais alto usado nos níveis de *infill overlap*, não se obtiveram valores de largura muito díspares do pretendido. Portanto as larguras não variaram mais de 0,1 mm do valor nominal do provete que era de 12,7 mm. Podemos dizer que este é de facto um bom resultado para uma impressão 3D em FDM.

Quanto ao cálculo do abaulamento no centro dos provetes que era um objetivo do estudo pode-se dizer que o abaulamento máximo foi de 0,1mm o que não é uma diferença substancial para uma peça impressa em 3D com requisitos de precisão dimensional médios ou de outra forma de precisão corrente para trabalhos de um nível de exigência não muito elevado. Fora o caso do ensaio 12 que teve o maior abaulamento, temos o segundo maior no ensaio 3 que foi de apenas 0,079 mm. Ora este valor, numa apreciação meramente visual torna se quase impercetível e pode-se considerar que a peça não tem defeitos. Estes abaulamentos registaram-se em ensaios que contêm menos *infill*, apresentando menos suporte interno para o efeito de *bridging* que é realizado na primeira camada de cobertura/fecho após o término do *infill*. Como os parâmetros de *bridging* foram personalizados e trabalhados ajuda a que estes valores de abaulamento possam ser considerados desprezíveis.

5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo paramétrico de componentes funcionais obtidos por fabrico aditivo. Neste inclui-se também o estudo das pontes e determinação do respetivo comprimento máximo, o estudo dos parâmetros que afetam a rigidez dos componentes e ainda o estudo da qualidade dimensional e geométrica dos provetes. Assim foi possível concluir que todos os objetivos foram cumpridos e realizados com sucesso.

Através da realização do estado de arte foi possível consolidar os conhecimentos anteriormente adquiridos acerca dos processos de impressão 3D e mais particularmente a tecnologia de FFF. Foi possível também compreender melhor todos os parâmetros ajustáveis do software de programação de uma impressora 3D, mais especificamente, os relacionados com o *bridging* e o *infill*.

O estudo das pontes consistiu em modelar pontes de formatos aleatórios para posterior impressão, de modo a conseguir entender quais os fatores determinantes para a obtenção de pontes com maior distância entre apoios. Sendo que, era pretendido a redução de material gasto por impressão, automaticamente remete para um *infill* menos denso, o que por sua vez significa que a distância entre apoios do *bridge infill* aumenta. Para a obtenção de componentes sem defeitos era de grande necessidade que os parâmetros relacionados com o *bridging* fossem bem analisados e ajustados. Com isto, foi possível realizar provetes com densidade de *infill* 5%, que é considerado baixo, e até mesmo com 0%. Deste modo, este estudo contribuiu de forma generosa para a obtenção de grandes distâncias entre apoios de 80 mm, com boa qualidade, e assim a impressão bem-sucedida dos provetes para posterior análise de flexão.

A utilização do método de Taguchi, permitiu escolher a matriz ortogonal adequada para o estudo dos fatores e níveis desejados, tendo permitido minimizar a quantidade de trabalho experimental deste estudo. Neste trabalho o foco centrou-se em aumentar a eficiência das impressões, ou seja, com menos material e menos tempo de impressão tentando manter a rigidez dos componentes. Foram escolhidos parâmetros a analisar para esse efeito, entre eles, número de perímetros externos e camadas de topo, velocidade de perímetro, altura de camada, densidade, padrão e orientação de *infill* e por último *infill overlap*.

Com o plano de impressões estruturadas por Taguchi procedeu-se à impressão dos provetes onde se verificaram algumas falhas como, por exemplo, a falha conhecida como pata de elefante e a má união de *layers* o que fez com que se pudesse perceber quais os motivos das mesmas acontecerem. Chegou-se à conclusão de que a falta de limpeza do bico extrusor é um aspeto determinante para uma impressão de qualidade. Uma outra solução passa por aumentar a área de purga também é uma solução bastante viável.

Após a impressão realizaram-se os ensaios de flexão de três pontos, onde se retiraram os resultados de força exercida pela célula de carga e o deslocamento da mesma, de modo, a ser possível a realização dos cálculos de tensão e deformação para posterior análise. Nesta análise, retiraram-se os valores de rigidez dos provetes testados para a comparação de resultados, pois o valor de rigidez do material PETG a 100% de *infill* (2100 MPa) foram bastante bons tendo em conta que a densidade de enchimento (*infill*) foi variada de 5% a 25%. Conseguiu-se obter 1815,19 MPa no ensaio 15 com 25% de *infill* e padrão de *infill* de favo de abelha (*Honeycomb*).

Numa primeira perspetiva, seria de concluir que é possível obter valores elevados de rigidez, para o material em questão, para uma densidade baixa de *infill*, *no entanto*, de modo a ser feita uma análise imparcial e correta dos resultados obtidos, recorreu-se ao método estatístico ANOVA. Assim, concluiu-se que o fator mais decisivo para uma maior rigidez é efetivamente, a densidade, no entanto, o número de perímetros e a orientação do *infill* são também de extrema importância para uma maior rigidez. Tendo em conta estes fatores todos, foi usado um rácio entre material usado e rigidez obtida, e com isto pode-se fazer as conclusões necessárias para este trabalho, que é obter o maior número de rigidez com a menor quantidade de material impresso possível. Concluiu-se então que por sua vez o ensaio 10 tem então a melhor combinação entre material e rigidez, com 350 Mpa/g. Este ensaio por sua vez foi composto por 15% de densidade de *infill* desta vez com o padrão de concêntrico e com orientação de 45°, com 4 perímetros e espessura de camada de 0,1 mm e velocidade de 45mm/s. Quanto ao tempo de impressão foram necessários 109 minutos. O segundo melhor ensaio foi o 4º que contava com 15% de *infill* também, o que se pressupõe que a melhor densidade de *infill* para se manter uma boa rigidez sem que a peça seja exageradamente pesada em termos de material são os 15% de *infill*, e que os resultados melhoram ainda quando esta é impresso com espessura de camada de 0,1 mm. Sendo possível assim perceber que não são obrigatoriamente os provetes com 25% de *infill* que tem melhor rigidez

Por fim, no estudo da qualidade geométrica e dimensional dos componentes obtidos foi possível concluir que a impressão 3D FDM tem uma variância de 0,1mm em todas as medidas teóricas do provete. Conclui-se assim que as impressões obtiveram boa qualidade e precisão. Na medição do abaulamento do interior dos provetes obteve-se resultados positivos uma vez que o maior desvio do valor teórico foi de 0,1 mm, dos perímetros para o centro do provete. Este resultado foi díspar dos demais uma vez que nos outros provetes testados esta diferença não ultrapassou os 0,07 mm.

Este trabalho contribui positivamente para a evolução da impressão 3D através da tecnologia FDM, pois, foram determinados valores ideais para a obtenção de pontes com grandes distâncias entre apoios sem abaulamentos significativos. Deste modo é possível evoluir para a impressão de componentes com pontes de maiores dimensões sem que a impressão fique com defeitos.

5.1 Trabalhos Futuros

A tecnologia de impressão 3D FDM, é atualmente bastante utilizada na indústria e como consequência encontra-se em constante evolução.

Especificamente na área de atuação da impressão de componentes funcionais ainda há alguma investigação a precisar de ser feita, como analisar outros parâmetros menos explorados, como por exemplo a compensação de pata de elefante, que foi uma das anomalias que ocorreram na impressão dos provetes testados e até mesmo a exploração de velocidades mais elevadas de impressão com as respetivas compensações.

Existe também a necessidade de otimizar os softwares *slicer*, pois atualmente não é possível explorar o *infill* gradiente ou densidade de enchimento gradiente. O *infill* gradiente consiste nas zonas mais próximas aos perímetros dos componentes ter uma densidade de enchimento mais elevada e nas zonas mais a centro do componente, mas dependendo sempre de que funcionalidade, menor densidade de *infill*. Podendo assim utilizar menos material nas zonas da peça onde a rigidez não tem tanta influência no comportamento da mesma.

Atualmente para se conseguir este tipo de *infill*, só através de processos alternativos como, dividir a peça em partes e definir diferentes percentagens de densidade de *infill* para as mesmas.

Em termos de *bridging* e de comprimento máximo conseguido entre apoios, neste trabalho não foi estudada a influência de temperatura de extrusão, deste modo, seria interessante perceber se a mesma tem algum tipo de impacto e/ou benefício no mesmo.

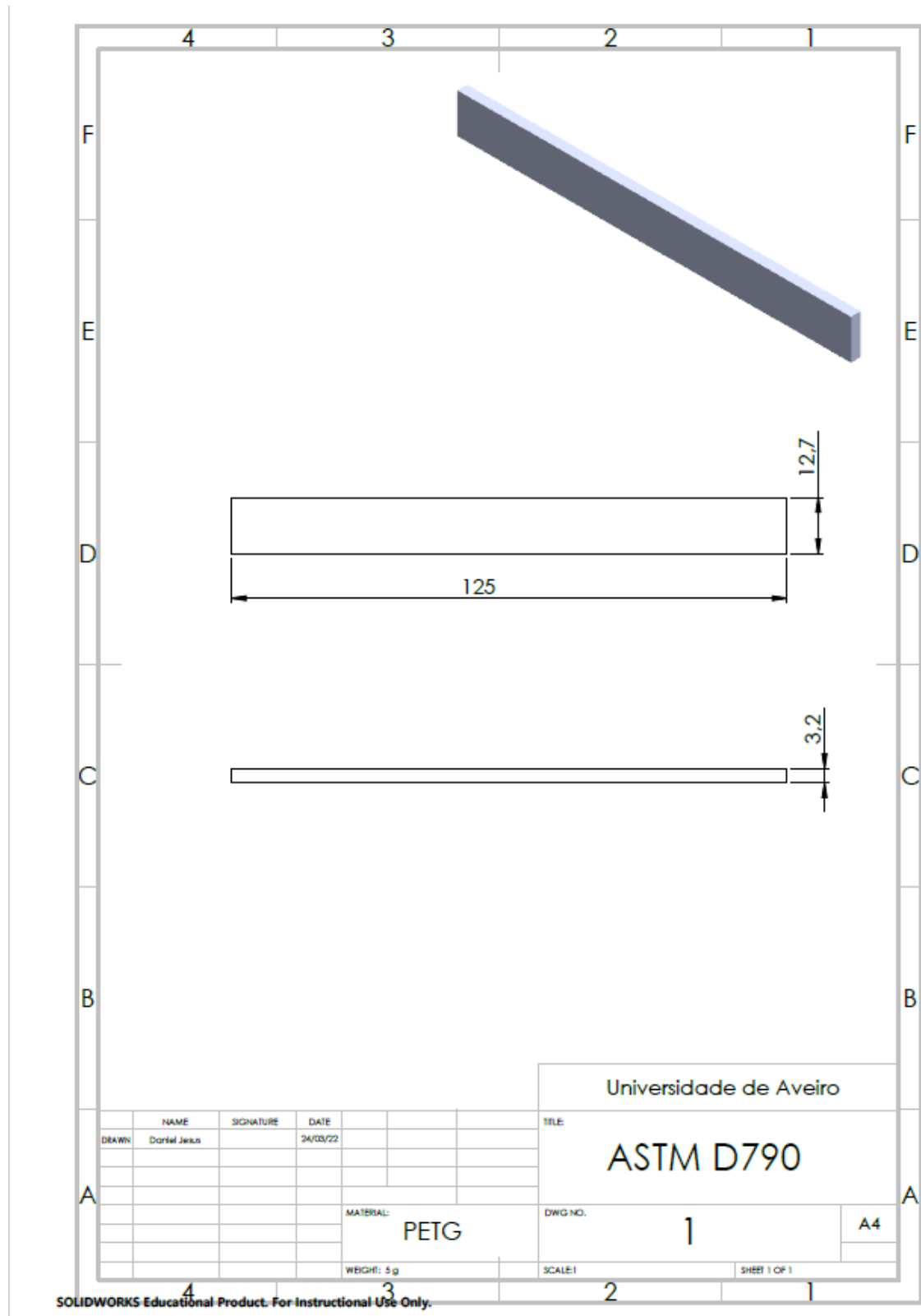
6. Bibliografia

1. Simoldes. Grupo Simoldes [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 3]. Available from: <https://www.simoldes.com/>
2. Lourenço A, Sopas L. A INTERNACIONALIZAÇÃO DO GRUPO SIMOLDES : UM ESTUDO DE CASO DE UM FORNECEDOR DE COMPONENTES PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL. 2003;5–60.
3. Francisco Miranda Fernandes J. Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA Engenharia Mecânica. 2016.
4. Baich L. Impact of Infill Design on Mechanical Strength and Production Cost in Material Extrusion Based Additive Manufacturing. 2016.
5. Pandzic A, Hodzic D, Milovanovic A. Effect of infill type and density on tensile properties of pla material for fdm process. In: Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium. Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM; 2019. p. 5–554.
6. Hubs. Knowledge Base [Internet]. 2022 [cited 2022 Mar 15]. Available from: <https://www.hubs.com/>
7. ISO Standards. ISO/ASTM 52900 [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 25]. Available from: <https://www.iso.org/standard/69669.html>
8. Mousapour M. Multi-metal 3D printing with extrusion method Supersolidus liquid phase sintering of copper base alloys (brass and bronze) [Internet]. 2020. Available from: www.aalto.fi
9. Baş H, Elevli S, Yapıcı F. Fault Tree Analysis for Fused Filament Fabrication Type Three-Dimensional Printers. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2019 Oct 1;19(5):23–1400.
10. Leitão Reis RF. Fabrico Aditivo. Abrantes; 2021 Nov.
11. Impressoras 3D. Impressoras 3D [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 6]. Available from: <https://www.impresoras3d.com/pt/como-mejorar-el-acabado-de-piezas-impresas-en-3d/>
12. ISO. ISO 178 [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 25]. Available from: <https://www.iso.org/standard/70513.html>

13. Bit Fab. Bit Fab [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 6]. Available from: <https://bitfab.io/pt-pt/blog/imprimir-petg/>
14. Filament PM. PETG Black 1kg [Internet]. 2022 [cited 2022 Mar 24]. Available from: <https://shop.filament-pm.com/petg-black-1-75-mm-1-kg/p58>
15. Filament 2 Print. Filament 2 Print [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 6]. Available from: https://filament2print.com/pt/blog/49_petg.html
16. Ultimaker Support. Infill settings [Internet]. Print Settings. 2022 [cited 2022 Mar 18]. Available from: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012607079-Infill-settings>
17. Prusa. Prusa Knowledge Base [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 6]. Available from: <https://help.prusa3d.com/>
18. CNC Kitchen. GRADIENT INFILL FOR 3D PRINTS [Internet]. 2020 [cited 2022 Mar 18]. Available from: <https://www.cnckitchen.com/blog/gradient-infill-for-3d-prints>
19. Dezaki ML, Mohd Ariffin MKA. The effects of combined infill patterns on mechanical properties in fdm process. *Polymers (Basel)*. 2020 Dec 1;12(12):1–20.
20. ASTM. ASTM D638 [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 25]. Available from: <https://www.astm.org/d0638-14.html>
21. Mauricio Guajardo-Trevino A, Ahuett-Garza H, Orta-Castanon P, Daniel Urbina-Coronado P, Saldana C, Kurfess TR. Effects of deposition - strategy - induced raster gaps and infill voids on the compressive strength of 3D printed isogrid structures. *Manufacturing Letters*. 2022 Jan 1;31:1–19.
22. ASTM. ASTM D695 [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 25]. Available from: <https://www.astm.org/d0695-15.html>
23. Liu Z, Zhang M. Texture properties of microwave post-processed 3D printed potato snack with different ingredients and infill structure. *Future Foods*. 2021 Jun 1;3.
24. Obeid S, Madžarević M, Ibrić S. Tailoring amlodipine release from 3D printed tablets: Influence of infill patterns and wall thickness. *International Journal of Pharmaceutics*. 2021 Dec 15;610.

25. Pereira D, Ribeiro J, Queijo L. OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE FRESAGEM USANDO O MÉTODO DE TAGUCHI COM A ANÁLISE RELACIONAL DE GREY. Vol. 19, Iberoamerican Journal of Industrial Engineering. 2018; 1-15.
26. Minitab. Support Minitab [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 12]. Available from: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/21/>
27. Printer Bee T 3D. Cura Lightning Infill [Internet]. 2022 [cited 2022 Mar 18]. Available from: <https://the3dprinterbee.com/cura-lightning-infill/>

Anexo 1



Anexo 2



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

PETG FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Polyetylenetefталat - polyester, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/petg		
Solvents	Acetaldehyde, benzene		
Printing Properties:			
Temperature HE	230 – 250 °C		
Temperature HB	60 - 80 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	85 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	70 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	11 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1880 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,27 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	11 g/10 min

Filament-PM by Plasty Mladec, Hanovice 18, 78321, VAT: CZ00147346
 Tel.+420 585 100 308, email: info@plastymladec.cz <http://www.filament-pm.com>

Anexo 3

AGS-X Series Specifications



AGS-10kNX



AGS-20kNX

Model			Table-top	
			AGS-10kNX	AGS-20kNX
Max. Load Capacity			10 kN	20 kN
Lineup of Models Differing by Load Cell Capacity			1 N / 2 N / 5 N / 10 N / 20 N / 50 N 100 N / 500 N / 1 kN / 5 kN / 10 kN	20 kN
Force Measurement	Accuracy	High-Precision Type (1/500, ±0.5%)	Within ±0.5% indicated test force (at 1/500 to 1/1 load cell rating)	
		Conforms to EN 10002-2 Grade 0.5, ISO 7500-1 Class 0.5, BS 1610 Class 0.5, ASTM E4, and JIS B7721 Class 0.5. * ¹		
	Standard-Precision Type (1/500, ±1%)	Within ±1% indicated test force (at 1/500 to 1/1 load cell rating)		
		Conforms to EN 10002-2 Grade 1, ISO 7500-1 Class 1, BS 1610 Class 1, ASTM E4, and JIS B7721 Class 1. * ¹		
Calibration		Automatic test force calibration: select tensile, compression, or tensile and compression		
Crosshead	Speed Range	0.001 to 1000 mm/min (stepless)	0.001 to 1600 mm/min (stepless)	
	Max. Return Speed	1500 mm/min	2200 mm/min	
Crosshead Speed Accuracy * ²			±0.1%	
Crosshead Speed and Permitted Test Force			To load cell capacity across entire speed range	
Crosshead – Table Distance (Tensile stroke) * ³			1200 mm (760 mm, MWG)	1250 mm (765 mm, MWG)
Effective Test Width			425 mm	
Crosshead Position Detection	Measurement Method	Optical encoder		
	Display Method	Digital display (display resolution: 0.001 mm)		
	Positional Accuracy	±0.1% indicated value or ±0.01 mm, whichever is larger		
Data Capture Rate			1000 Hz max. * ⁴	
Test Method Files			40 files (PC link: 20 files, standalone controller: 20 files)	
Standard Functions			• Automatic reading of load cell characteristic values • Test force display, stress display, stroke display, position display • External analog output (2 channels) • External analog input (2 channels) *⁴ • External digital input (2 channels) *⁴ • Analog recorder (option) output • Dataletty (option) output *⁴ • Automatic test force / stress control (Autotuning) • Automatic strain control (Autotuning) *⁴ • Test force auto-zeroing • Test force auto-calibration • Break detection, auto-return • Load cell overload detection • Touch-load detection function	
Accessories			Load cell (with CAL cable), Power cable (2.5 m), turning rod, cable clamps, instruction manual	Load Cell (with CAL cable), Power cable (5 m), turning rod, cable clamps, instruction manual
Dimensions			W653 × D520 × H1603 mm	W718 × D641 × H1633 mm
Weight			85 kg	235 kg
Power Requirements			Single phase 100/120/220/240 V AC (switching type) 50/60 Hz 1.2 kVA	Single phase AC 200–230 50/60 Hz 4.0 kVA
			Supply voltage fluctuations within ±10% of the set value. D-class (100 Ω max.) grounding resistance.	
Operating Environment			Temperature: 5 °C to 40 °C; Humidity: 20% to 80% (no condensation) Floor vibrations: frequency 10 Hz max., amplitude 5 μm max.	

^{*1} Official certification after installation is recommended to comply with EN 10002-2, ISO 7500-1, ASTM E4 standards, and JIS B7721.

^{*2} Crosshead speed accuracy is calculated from the crosshead travel within a prescribed time at a constant speed between 0.5 mm/minute and 500 mm/minute.

^{*3} The tensile stroke is the effective stroke when SCG (screw-type flat grips) or MWG (non-shift wedge-type grips) are mounted.

^{*4} TRAPEZIUM X or TRAPEZIUM LITE X is needed for these functions. Moreover, when automatic test force/stress control (auto tuning) and the automatic strain control (auto tuning) are used, the sampling speed becomes 10 msec.

Anexo 4

Ratchet Thimble type that has improved operability with one hand



293-335-30




SPECIFICATIONS

Metric	Order No.	Range	Accuracy	Flatness	Measuring force	constant-force device	Mass	
With SPC data output	293-230-30	0 - 25mm	±1µm	1µm	5 - 10N	With ratchet stop	270g	
	293-231-30	25 - 50mm	±1µm	1µm			330g	
	293-232-30	50 - 75mm	±1µm	2µm			470g	
	Without SPC data output	293-233-30	75 - 100mm	±2µm	2µm	7 - 12N*	With ratchet thimble	290g
		293-234-30	0 - 25mm	±1µm	1µm			290g
		293-235-30	25 - 50mm	±1µm	1µm			350g
Without SPC data output		293-236-30	50 - 75mm	±2µm	2µm	5 - 10N	With ratchet stop	400g
		293-237-30	75 - 100mm	±2µm	2µm			600g
		293-238-30	0 - 25mm	±1µm	1µm			210g
	Without SPC data output	293-241-30	25 - 50mm	±1µm	1µm	7 - 12N*	With ratchet thimble	290g
		293-242-30	50 - 75mm	±2µm	2µm			470g
		293-243-30	75 - 100mm	±2µm	2µm			620g
Without SPC data output		293-244-30	0 - 25mm	±1µm	1µm	7 - 12N*	With ratchet thimble	280g
		293-245-30	25 - 50mm	±1µm	1µm			350g
		293-246-30	50 - 75mm	±2µm	2µm			480g
	293-247-30	75 - 100mm	±2µm	2µm	620g			



An inspection certificate is supplied as standard.
(50mm/2" or less range model)




These marks indicate that a product has successfully passed IP65-level testing, which is carried out by the independent German certification organization TUV Rheinland.

Micrometer Set

Range	Order No.	Included in set
0-50mm (2pcs. Set)	293-966-30	293-230-30, 293-231-30, 25mm CERA block, plastic case
0-75mm (3pcs. Set)	293-962-30	293-230-30, 293-231-30, 293-232-30, 2 standard bars, plastic case
0-100mm (4pcs. Set)	293-963-30	293-230-30, 293-231-30, 293-232-30, 293-233-30, 3 standard bars, wooden box

Inch/Metric

Order No.	Range	Accuracy	Flatness	Measuring force	constant-force device	Mass	
293-330-30	0-1"	±0.0005"	0.0004"	5-10N	With ratchet stop	270g	
293-331-30	1-2"	±0.0005"	0.0004"			330g	
293-332-30	2-3"	±0.001"	0.0008"			470g	
With SPC data output	293-333-30	3-4"	±0.001"	7-12N*	With ratchet thimble	290g	
	293-334-30	0-1"	±0.0005"			0.0004"	290g
	293-335-30	1-2"	±0.0005"			0.0004"	330g
	Without SPC data output	293-336-30	2-3"	±0.001"	5-10N	With friction thimble	330g
		293-337-30	3-4"	±0.001"			470g
		293-338-30	0-1"	±0.0005"			0.0004"
Without SPC data output		293-341-30	1-2"	±0.0005"	5-10N	With ratchet stop	330g
		293-342-30	2-3"	±0.001"			470g
		293-343-30	3-4"	±0.001"			620g
	Without SPC data output	293-344-30	0-1"	±0.0005"	7-12N*	With ratchet thimble	290g
		293-345-30	1-2"	±0.0005"			340g
		293-346-30	2-3"	±0.001"			480g
Without SPC data output		293-347-30	3-4"	±0.001"	5-10N	With friction thimble	620g
		293-348-30	0-1"	±0.0005"			270g
		293-349-30	1-2"	±0.001"			280g

* Measuring force in the case of using the Speeder ratchet
Prior to measurement, apply a measuring force in the same condition to align the index line with the thimble zero line.

Inch/Metric Micrometer Set 0.0005" / 0.001mm graduation model

Range	Order No.	Included in set
0 - 3" / 0 - 76.2mm (3 pcs. set)	293-960-30	293-330-30, 293-331-30, 293-332-30, 2 standard bars, plastic case
0 - 4" / 0 - 101.6mm (4 pcs. set)	293-961-30	293-330-30, 293-331-30, 293-332-30, 293-333-30, 3 standard bars, wooden box

IP Codes

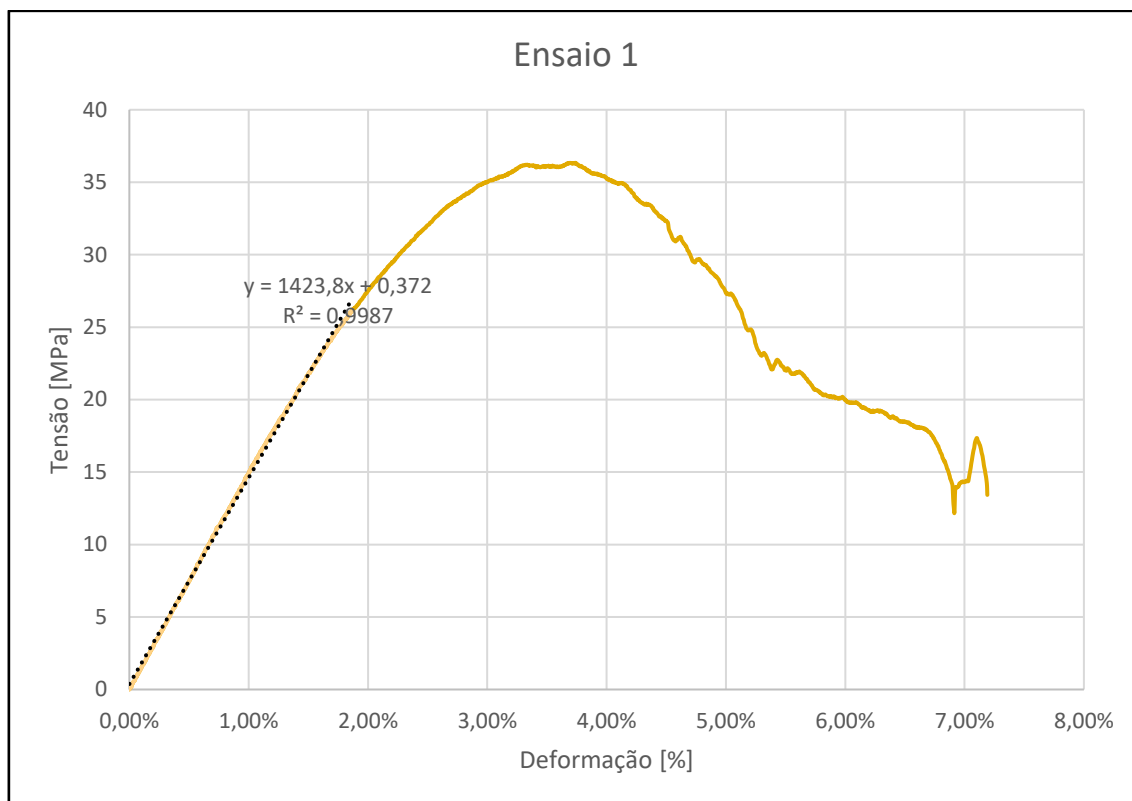
Level 6: Dust-proof.
No ingress of dust allowed.

Level 5: Protected against water jets.
Water projected in jets against the enclosure from any direction shall have no harmful effects.

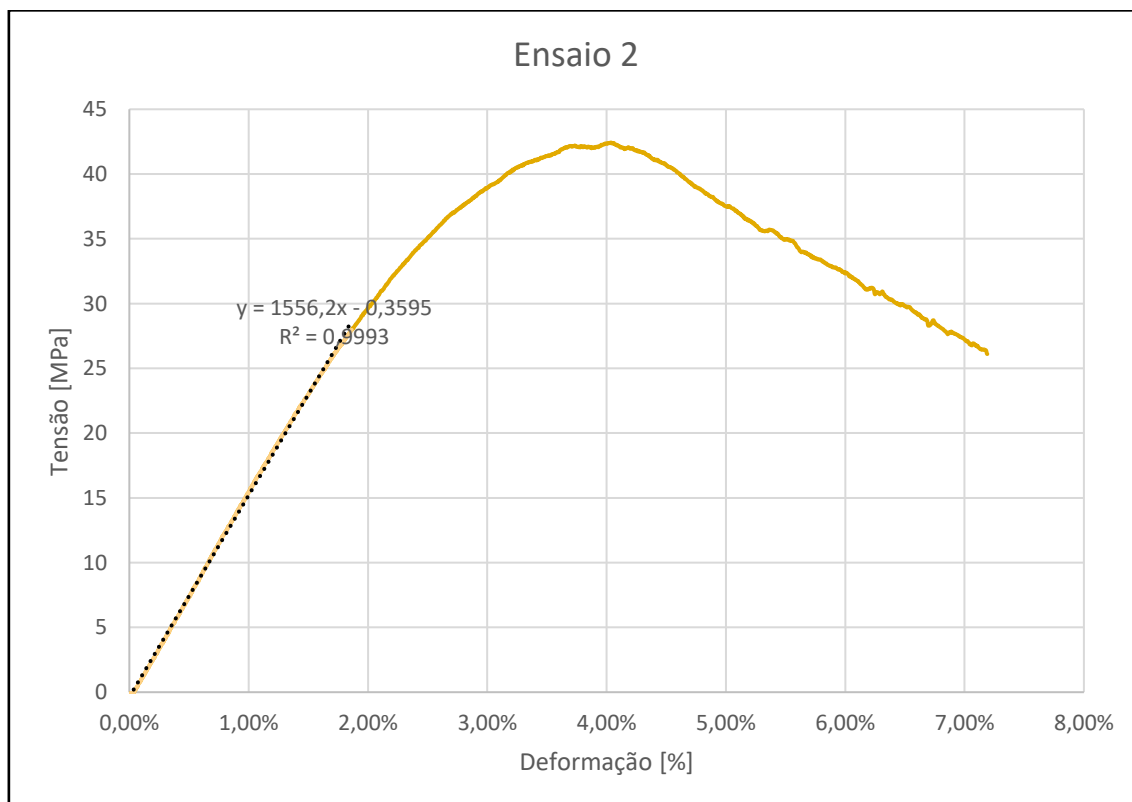
Technical Data

- **Resolution:** 0.0005"/0.001mm
- **Quantizing error:** ±1 is not included.
- **Flatness:** 0.00012"/0.3µm
- **Dust/water protection level:** IP65 (IEC60529) *
- **Measuring system:** Electromagnetic induction type rotary sensor
- **Battery:** SR44 (1 pc), 938882, for initial operational checks (standard accessory)
- **Battery life:** Approx. 2.4 years under normal use
- **Standard accessories:** Reference bar, 1 pc (except for 0-25mm (0-1") models) Spanner (301336), 1 pc
- * 2 Rustproofing shall be applied after use.

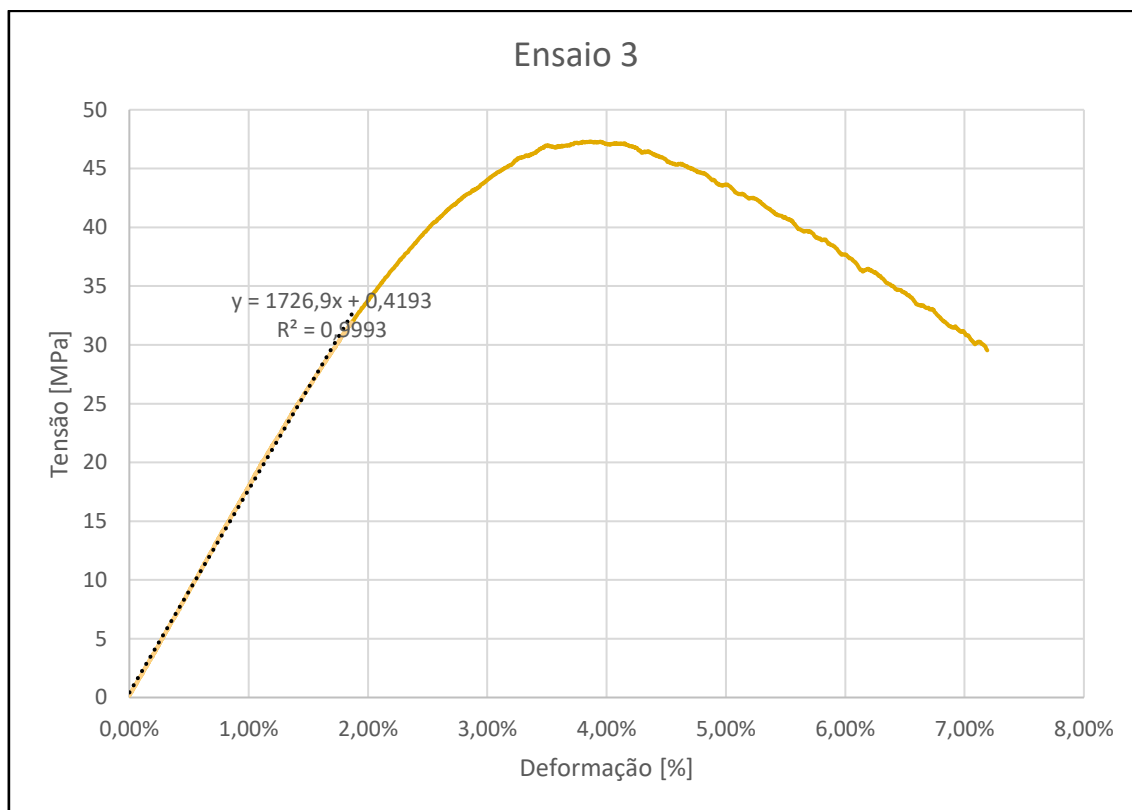
Anexo 5



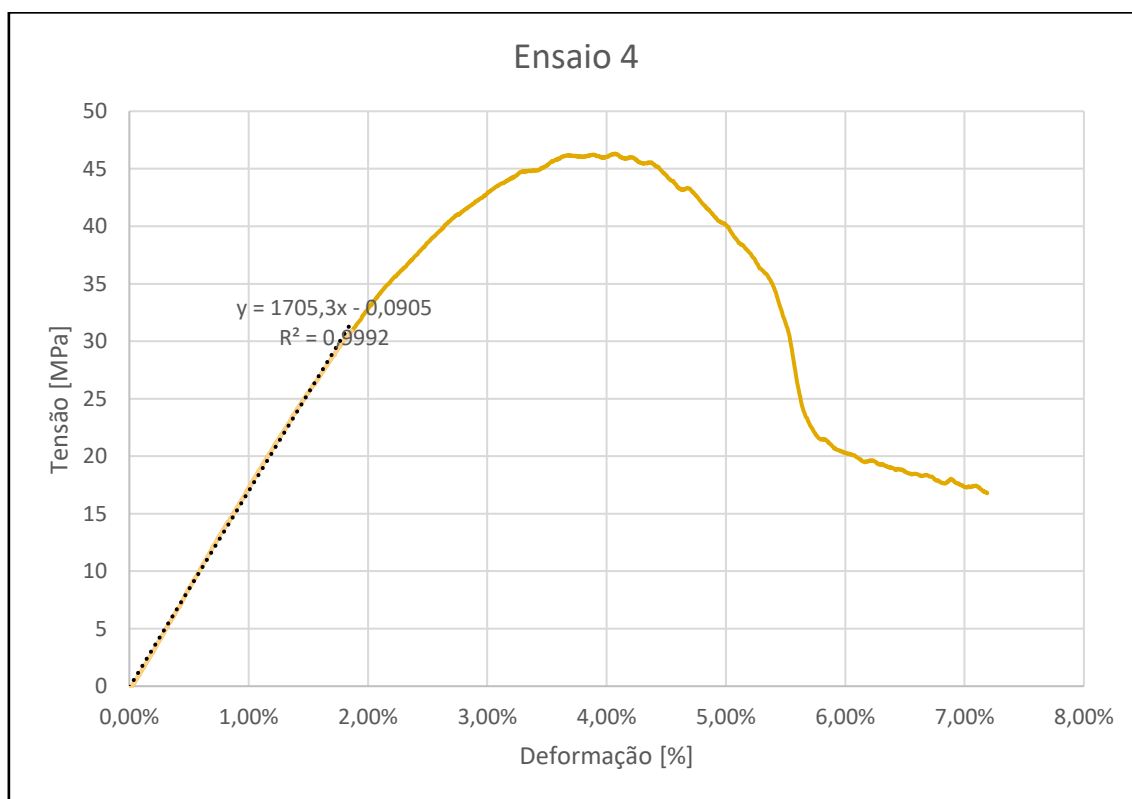
Anexo 6



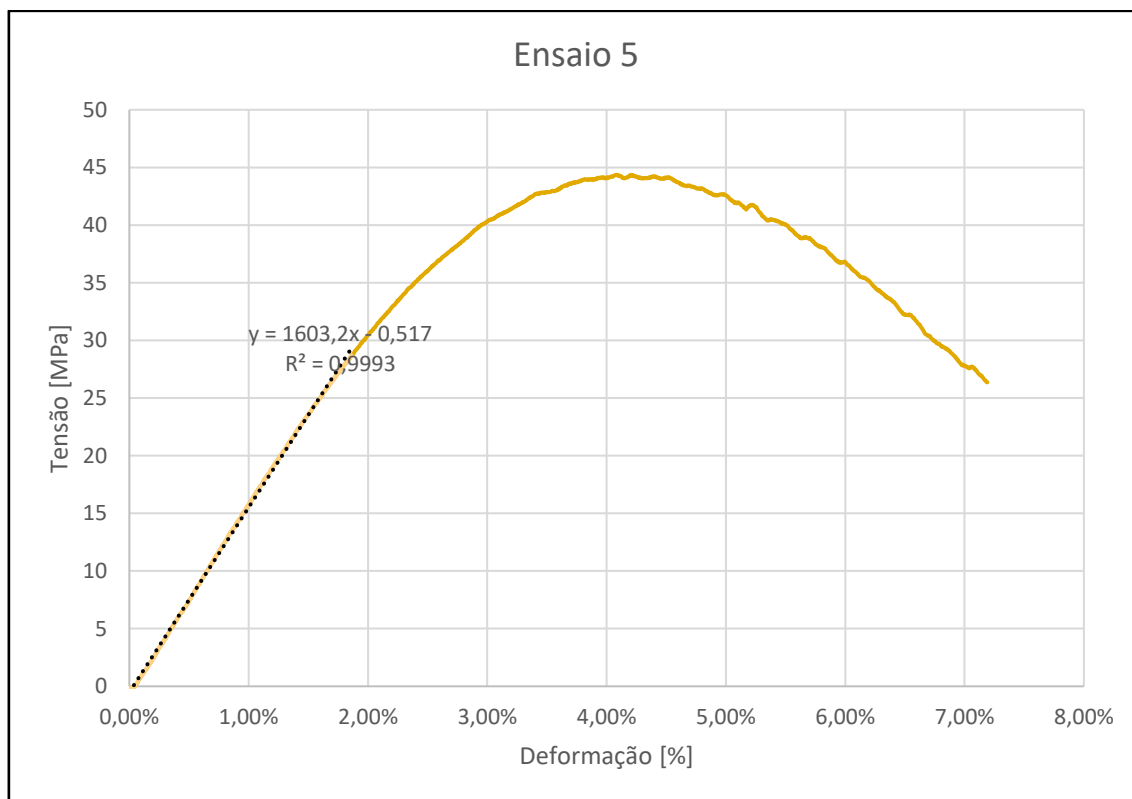
Anexo 7



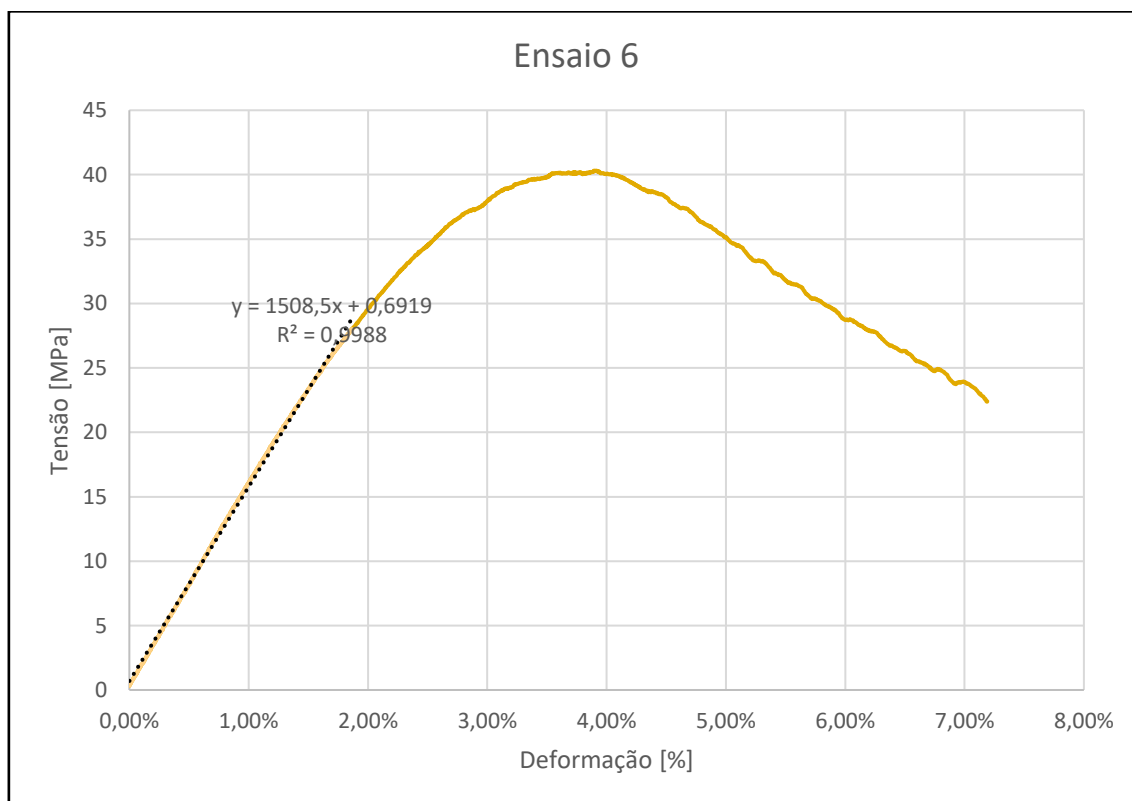
Anexo 8



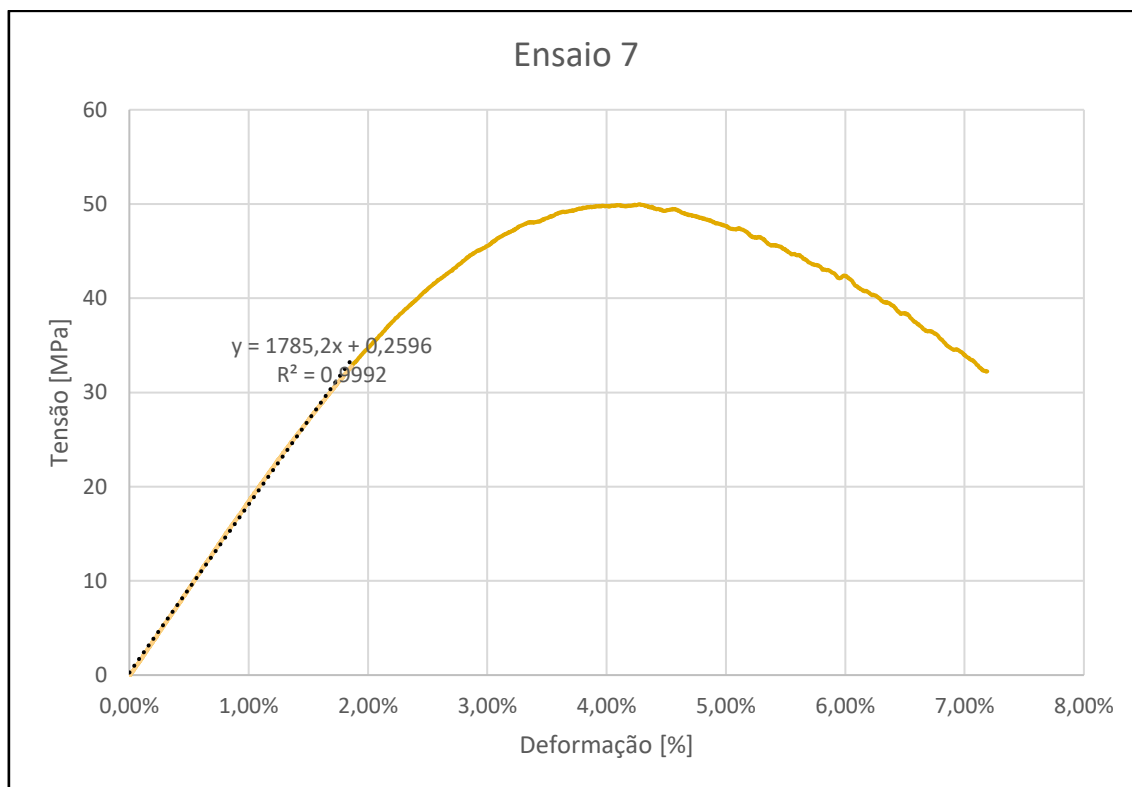
Anexo 9



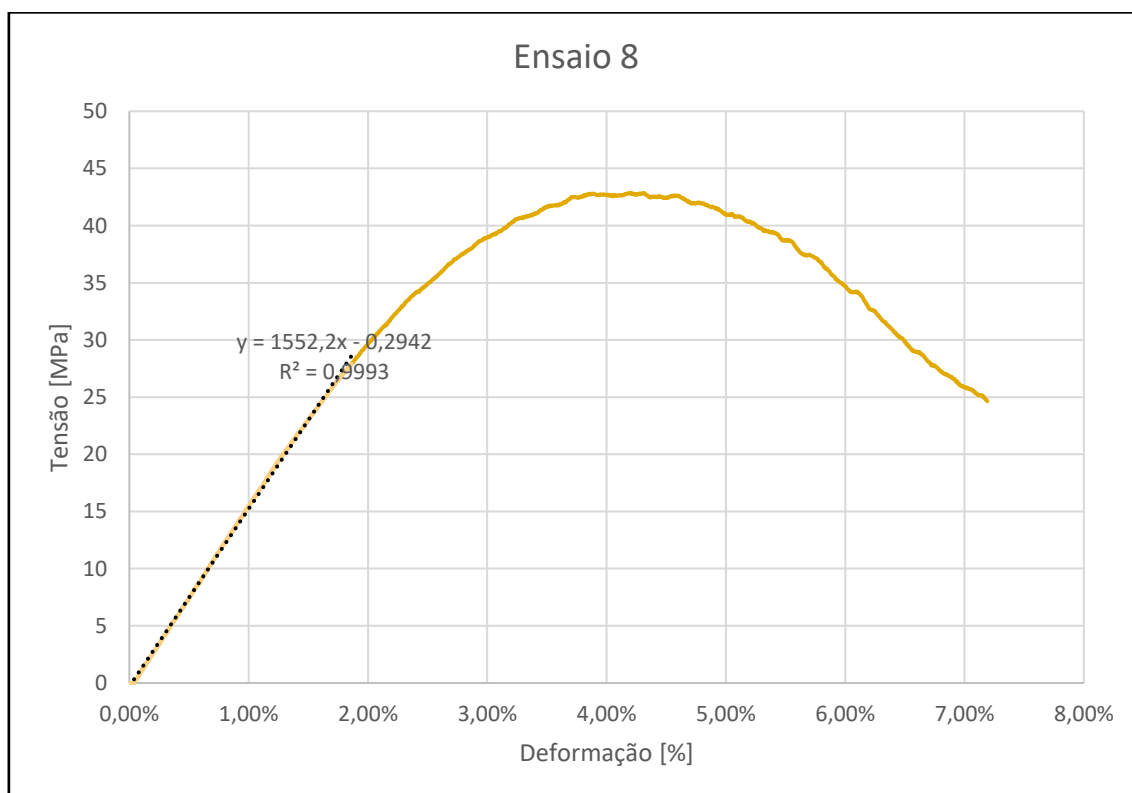
Anexo 10



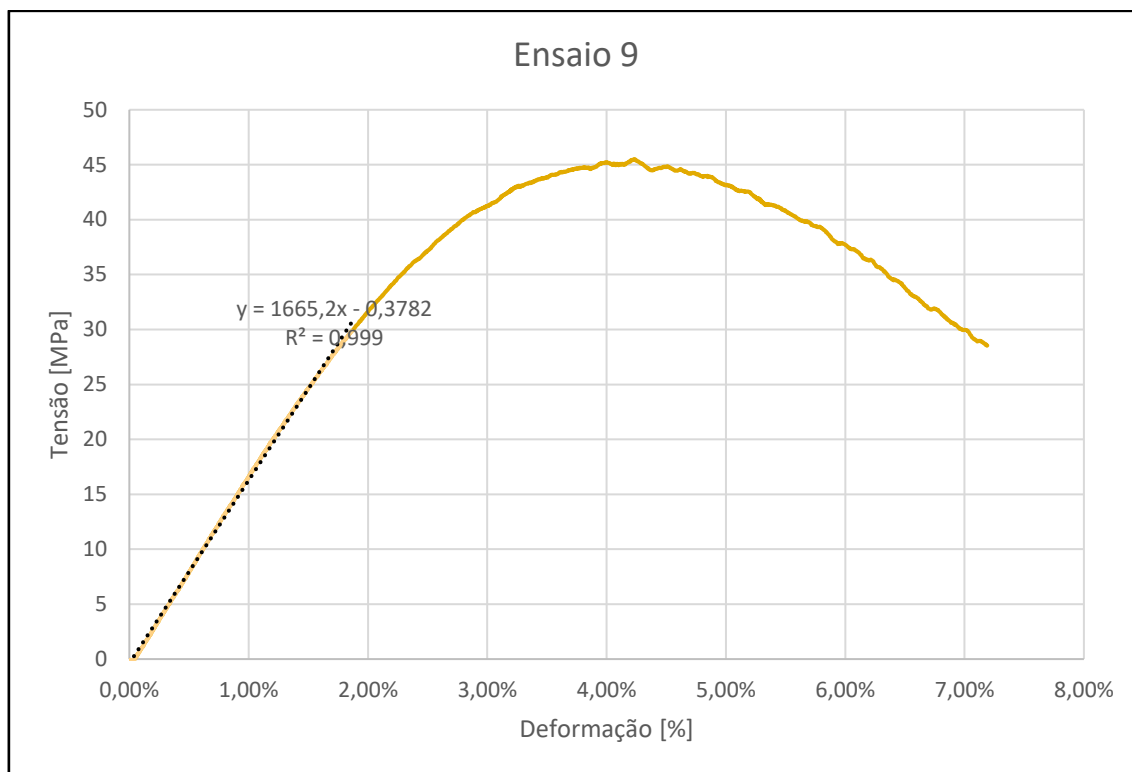
Anexo 11



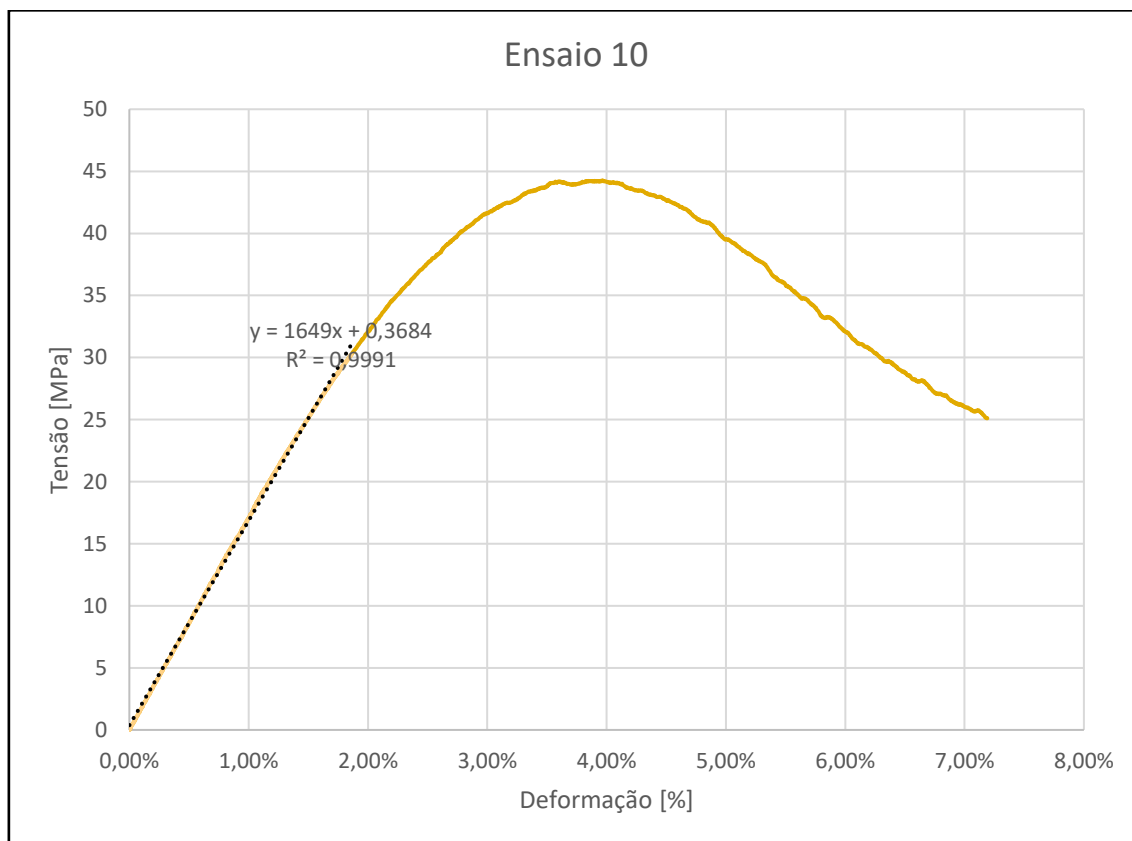
Anexo 12



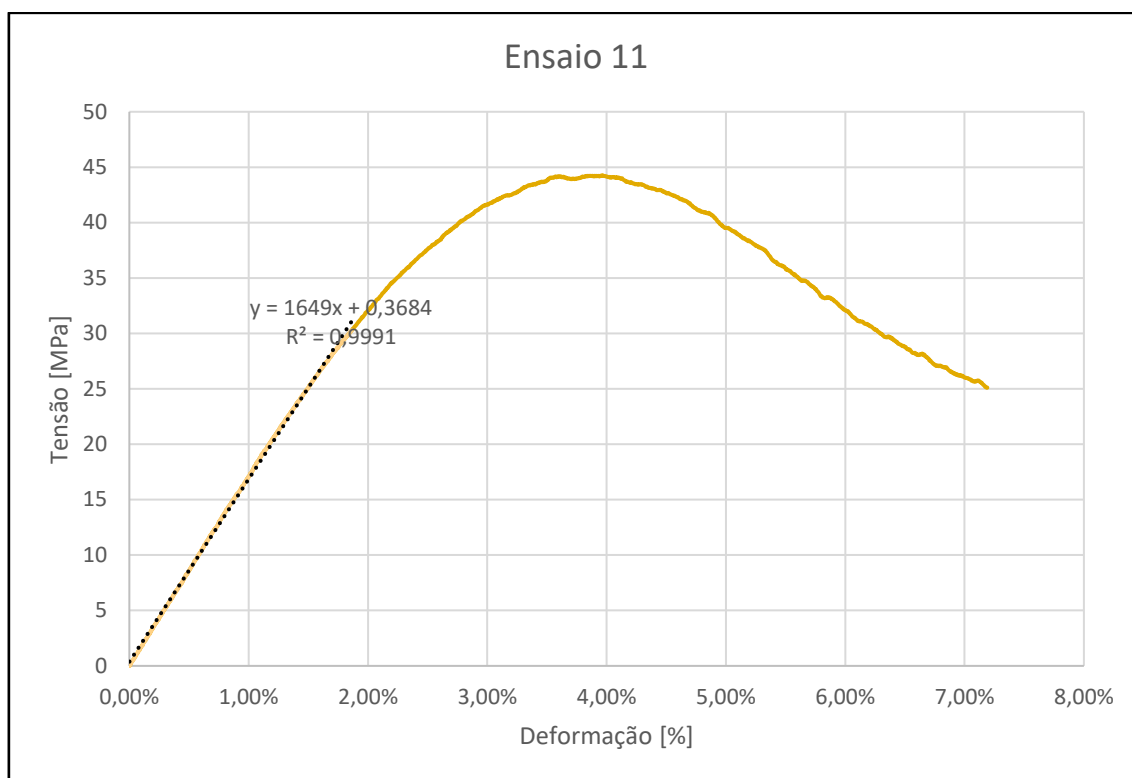
Anexo 13



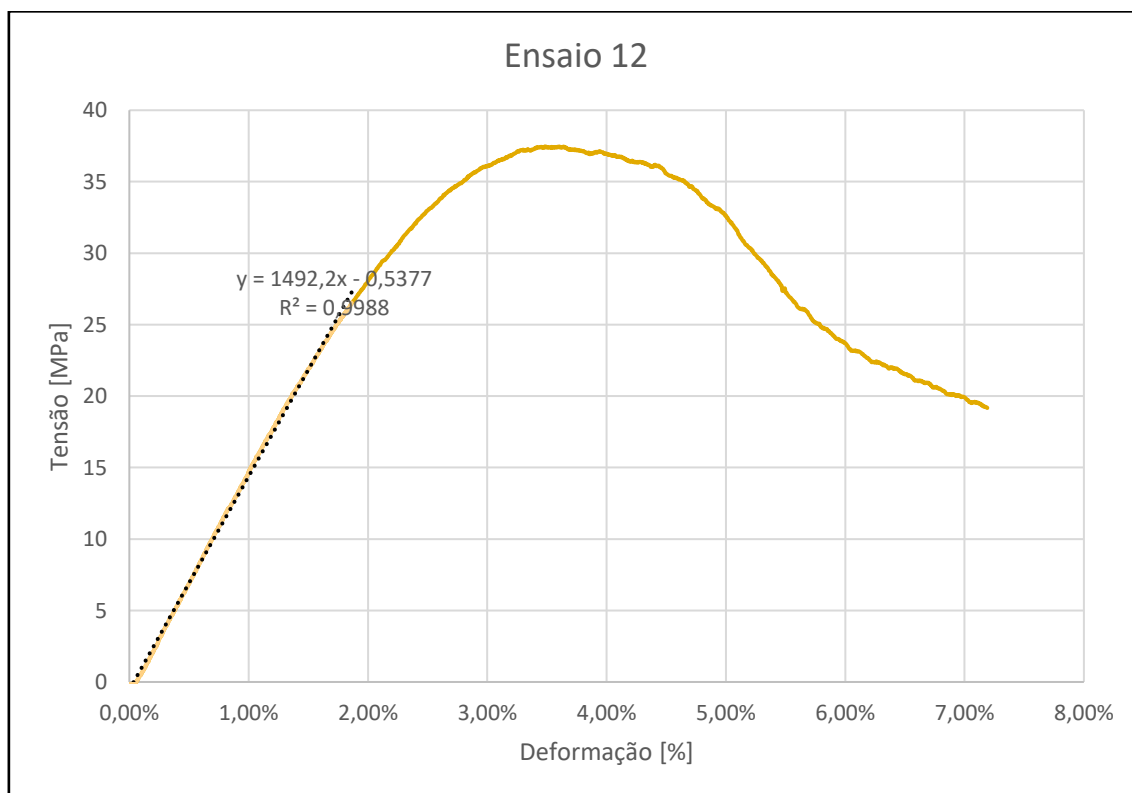
Anexo 14



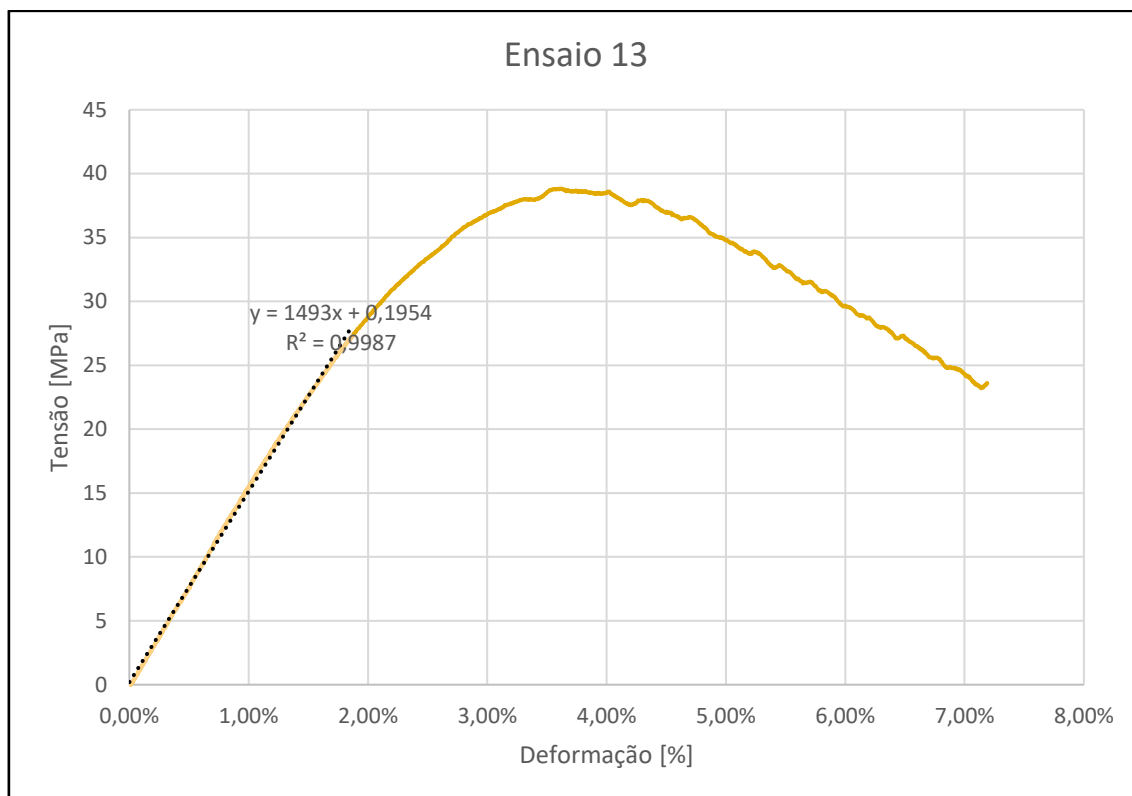
Anexo 15



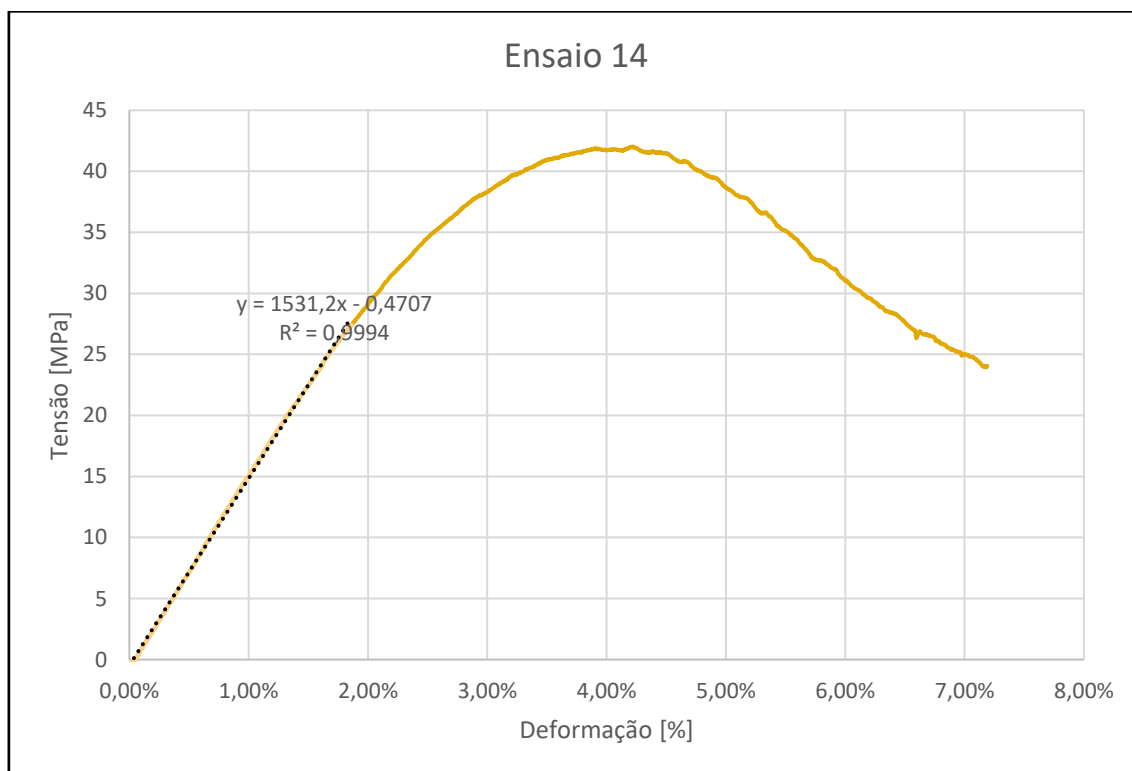
Anexo 16



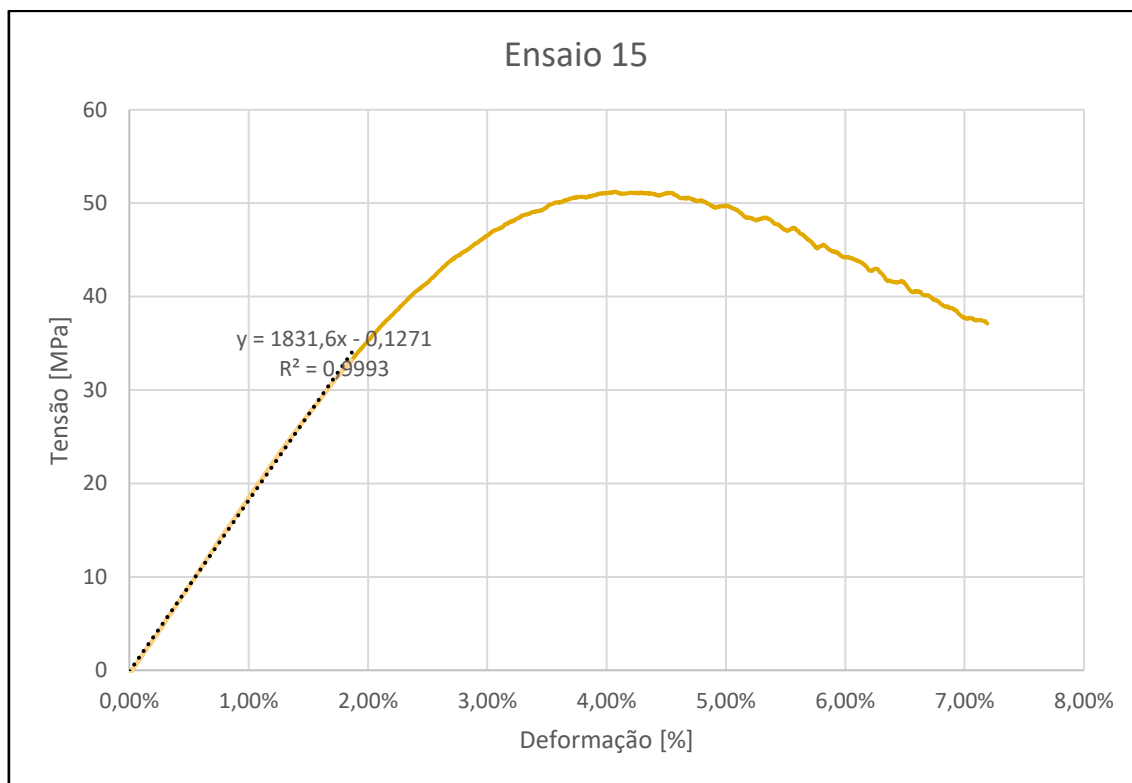
Anexo 17



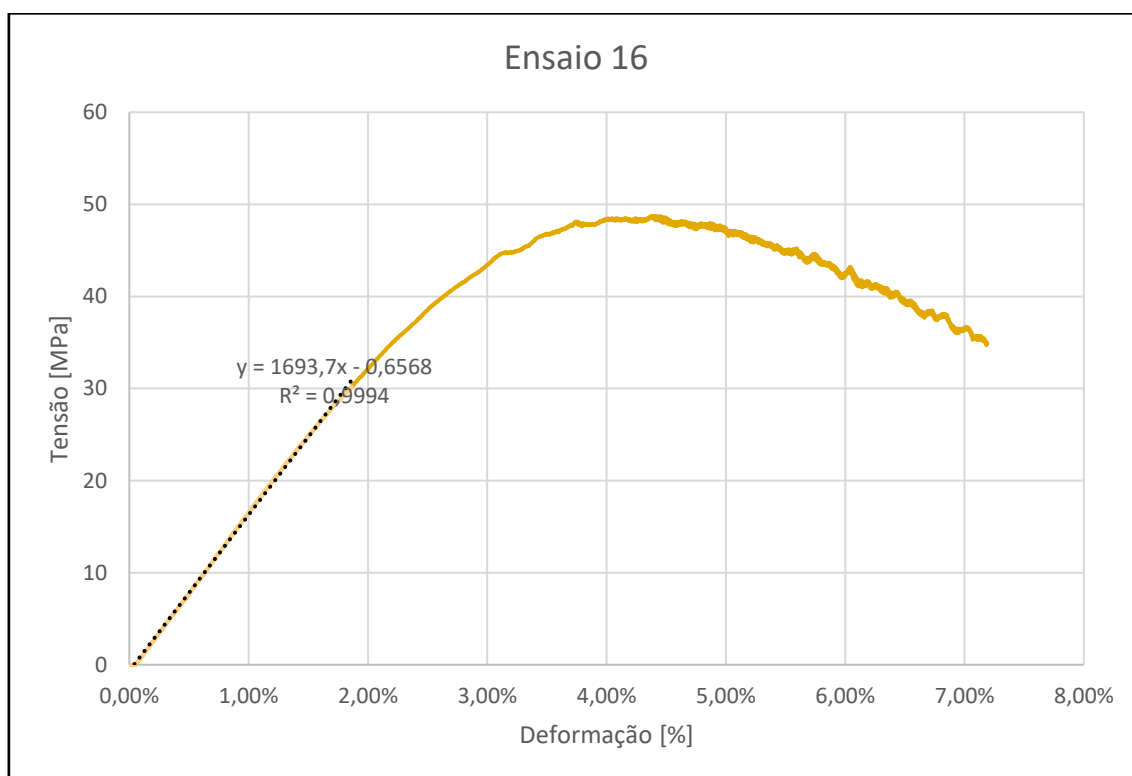
Anexo 18



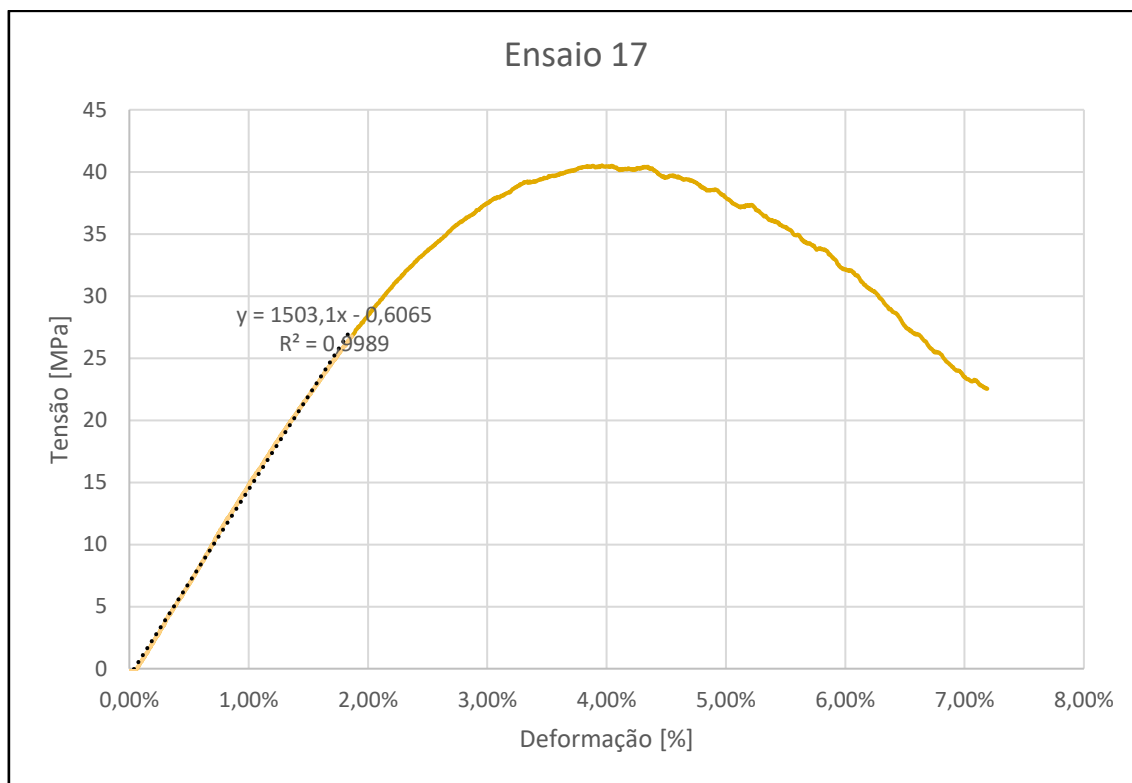
Anexo 19



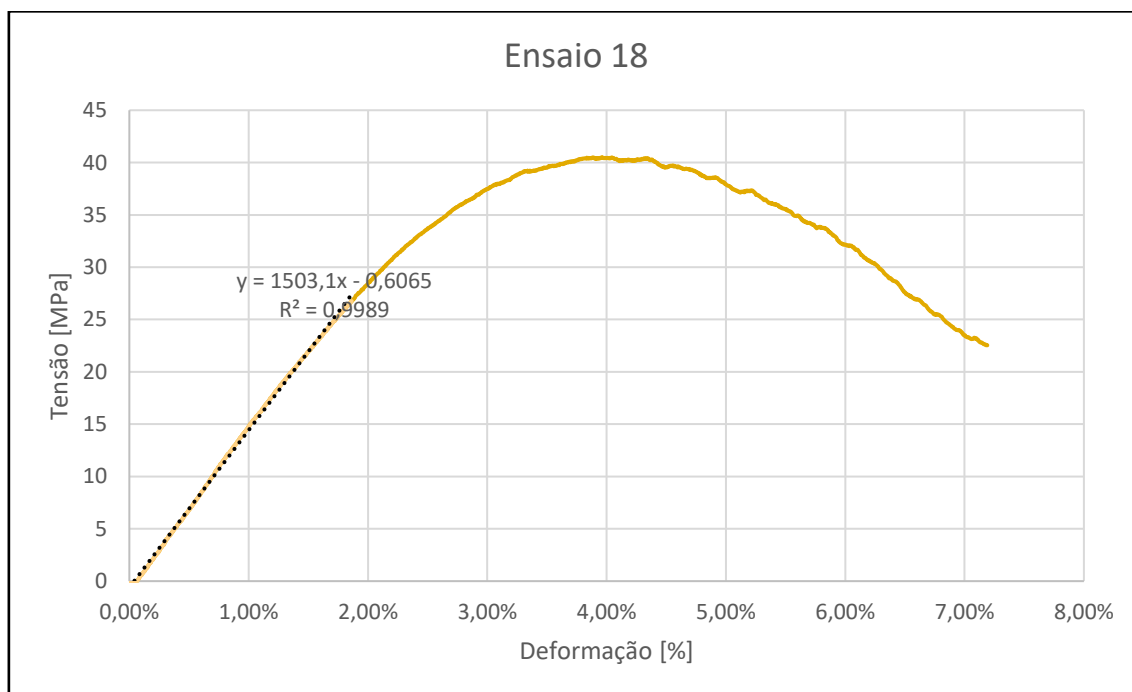
Anexo 20



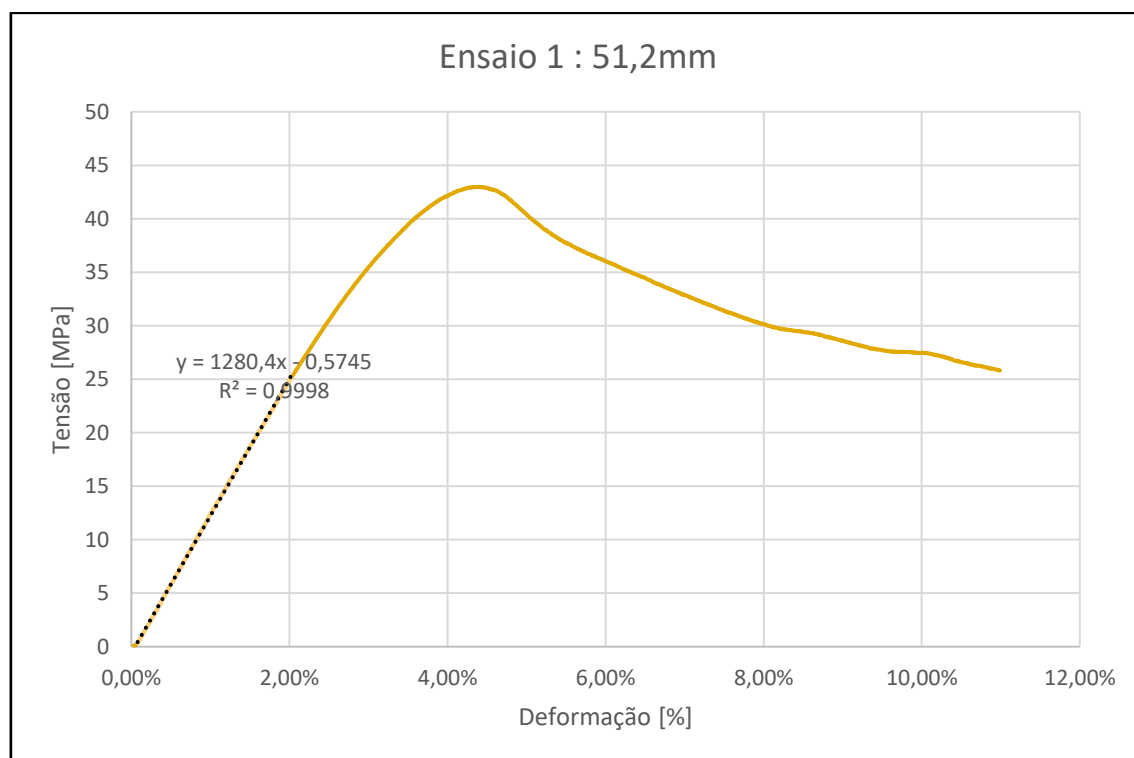
Anexo 21



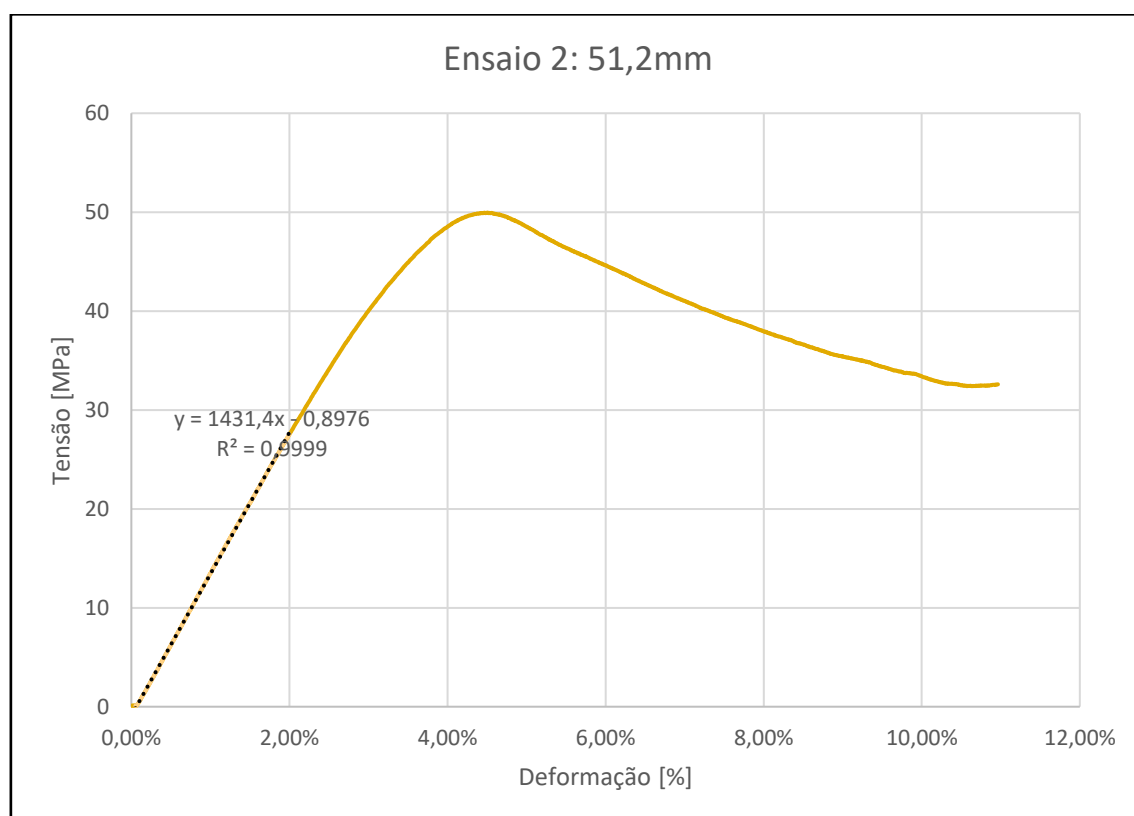
Anexo 22



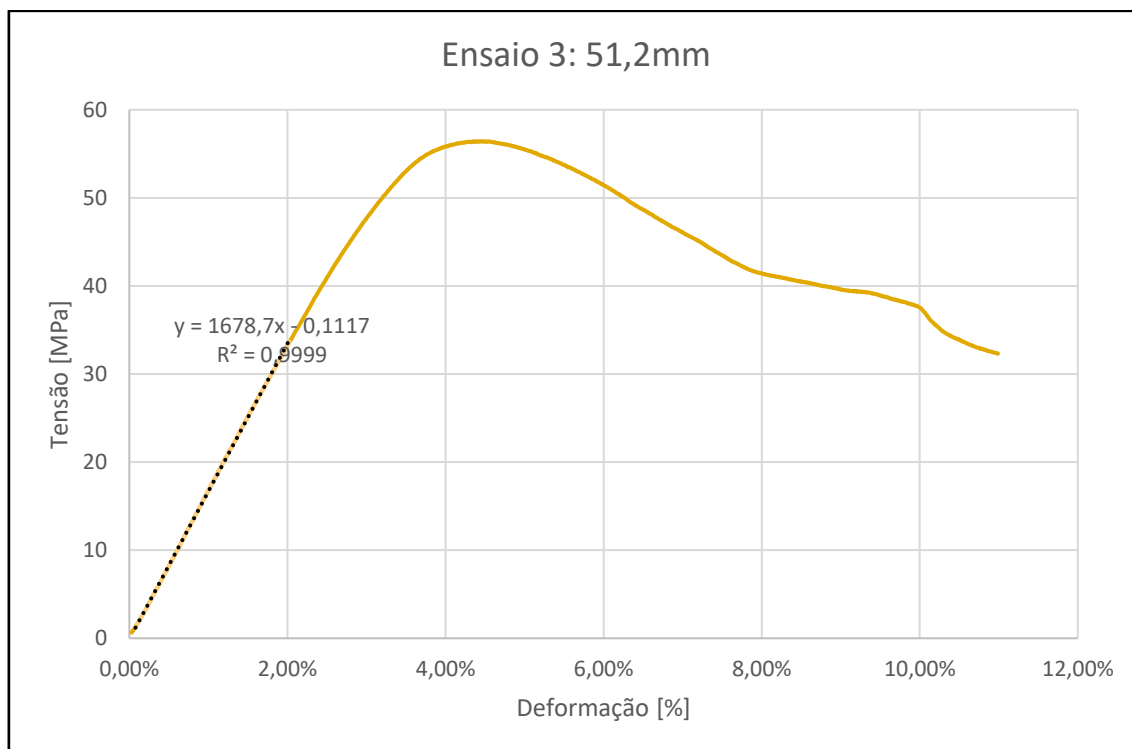
Anexo 23



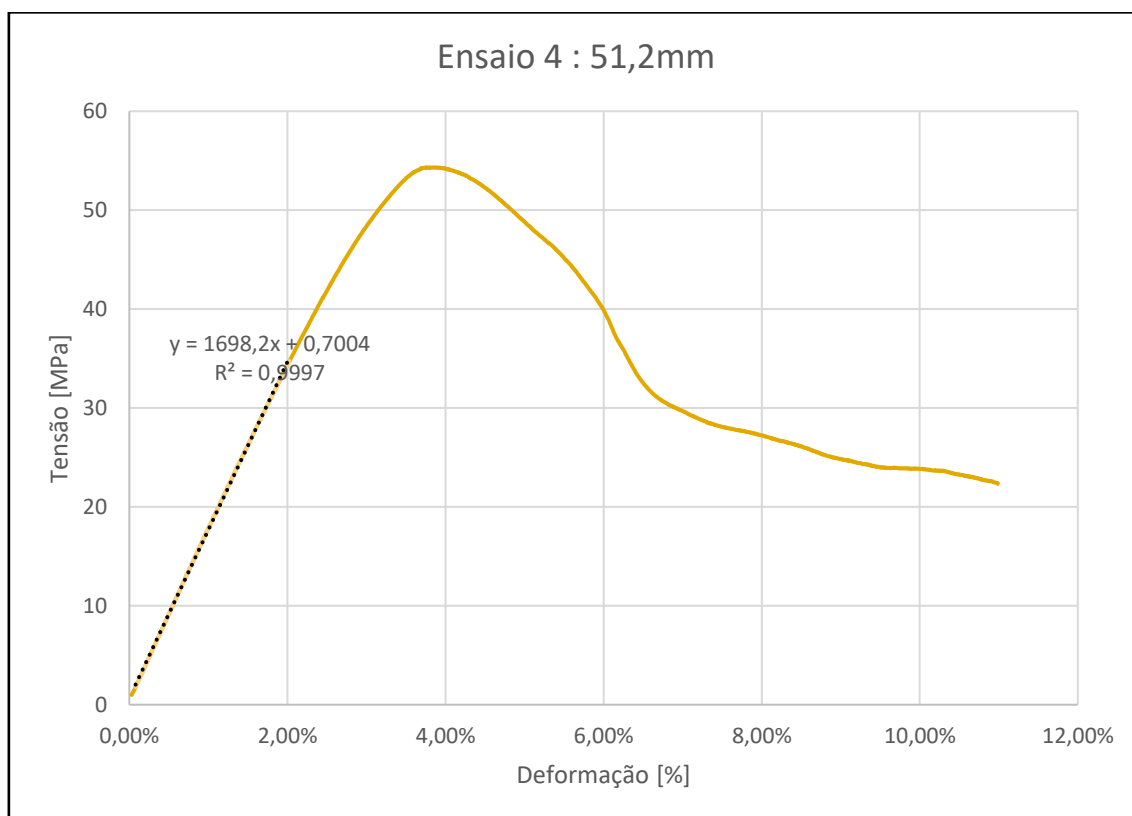
Anexo 24



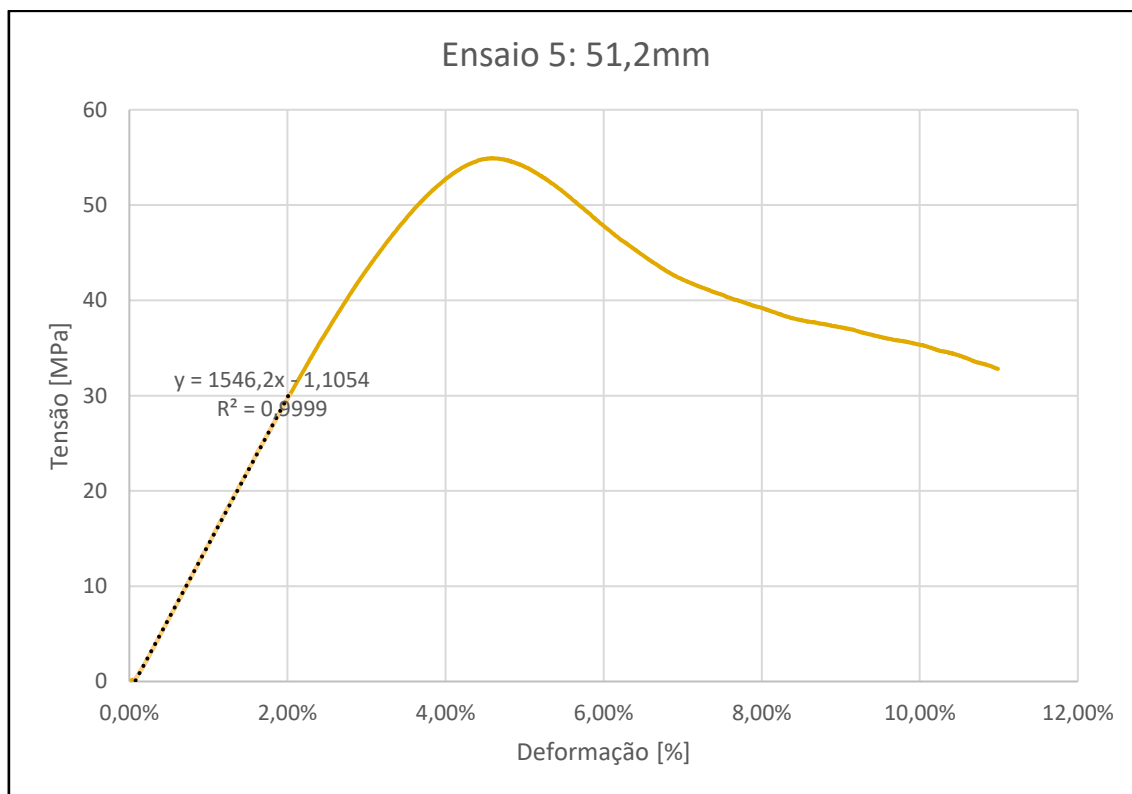
Anexo 25



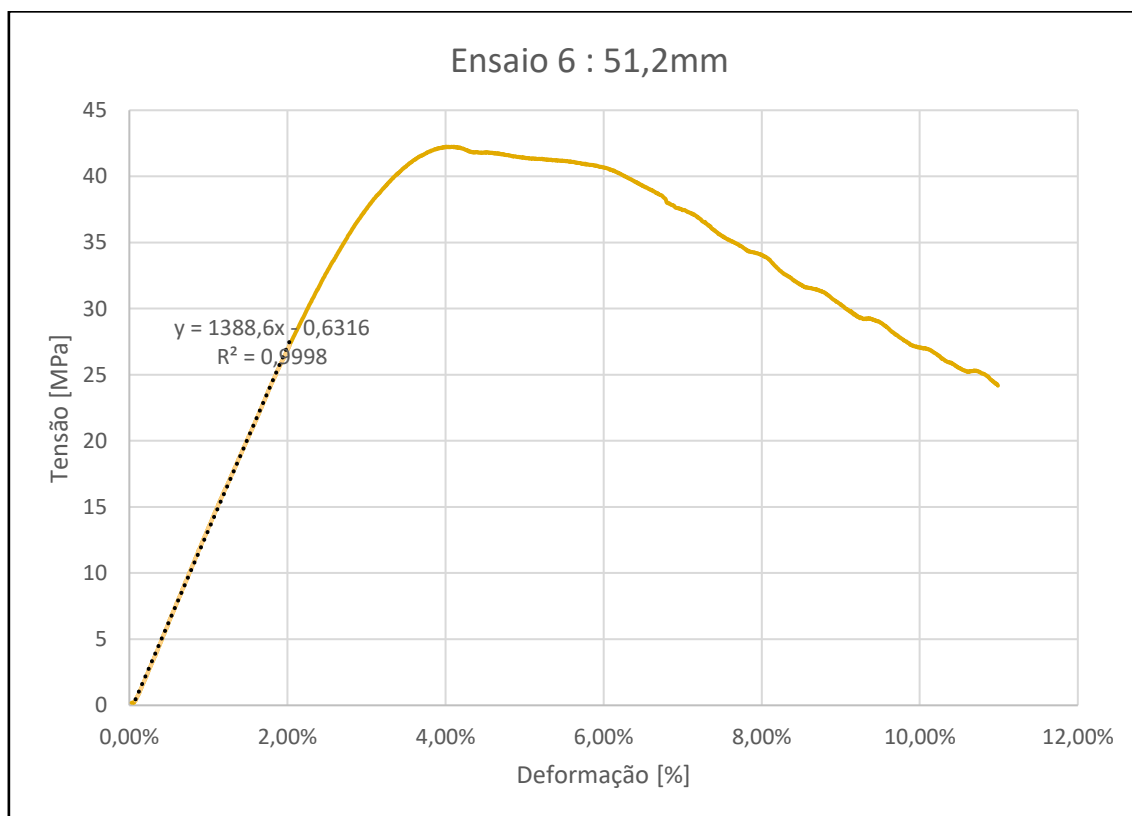
Anexo 26



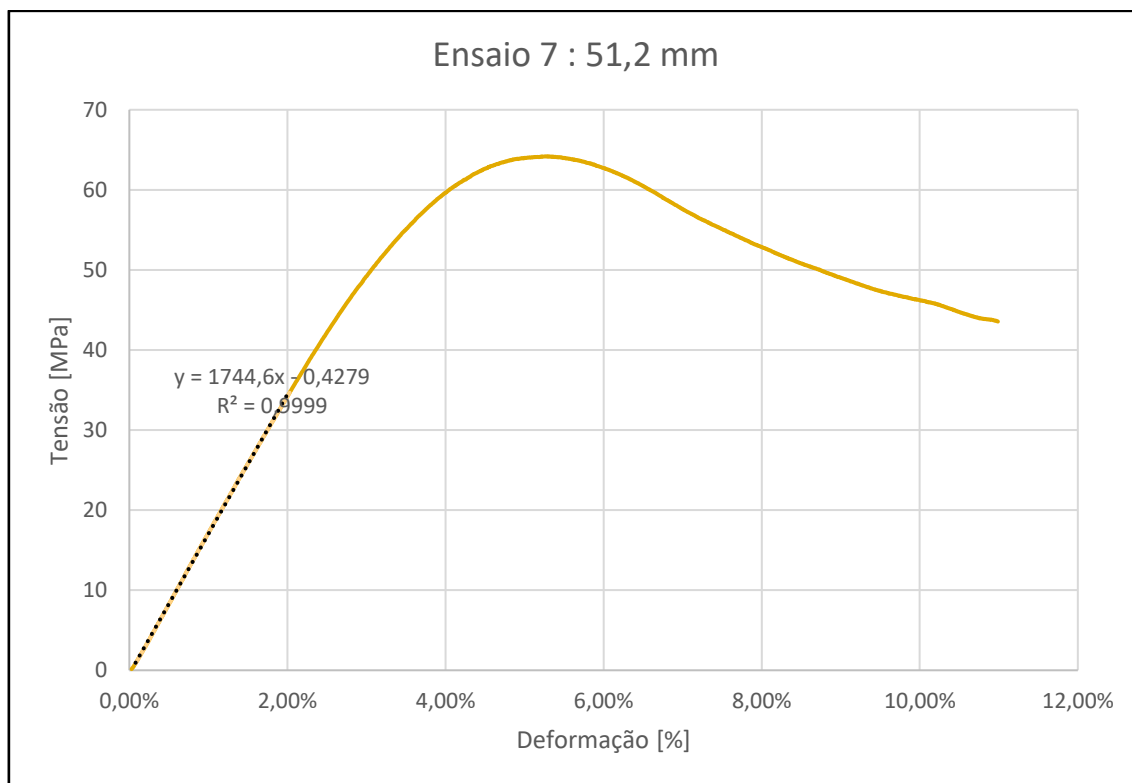
Anexo 27



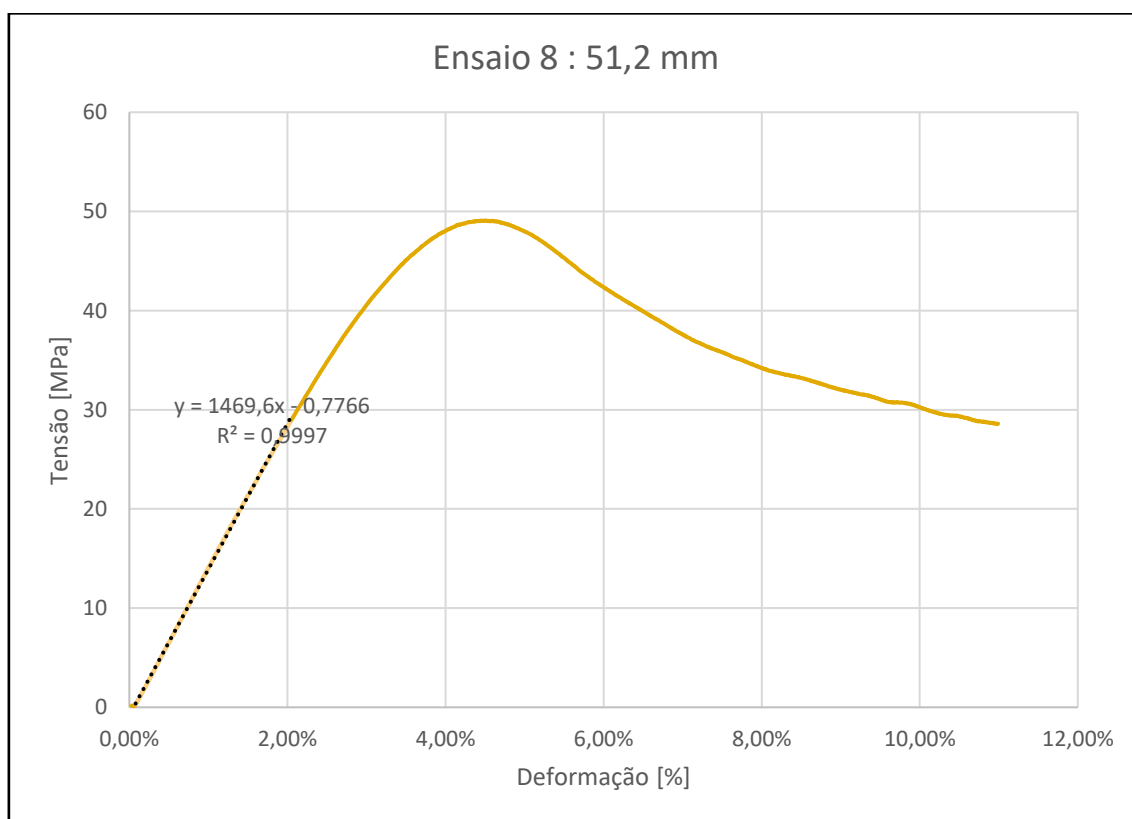
Anexo 28



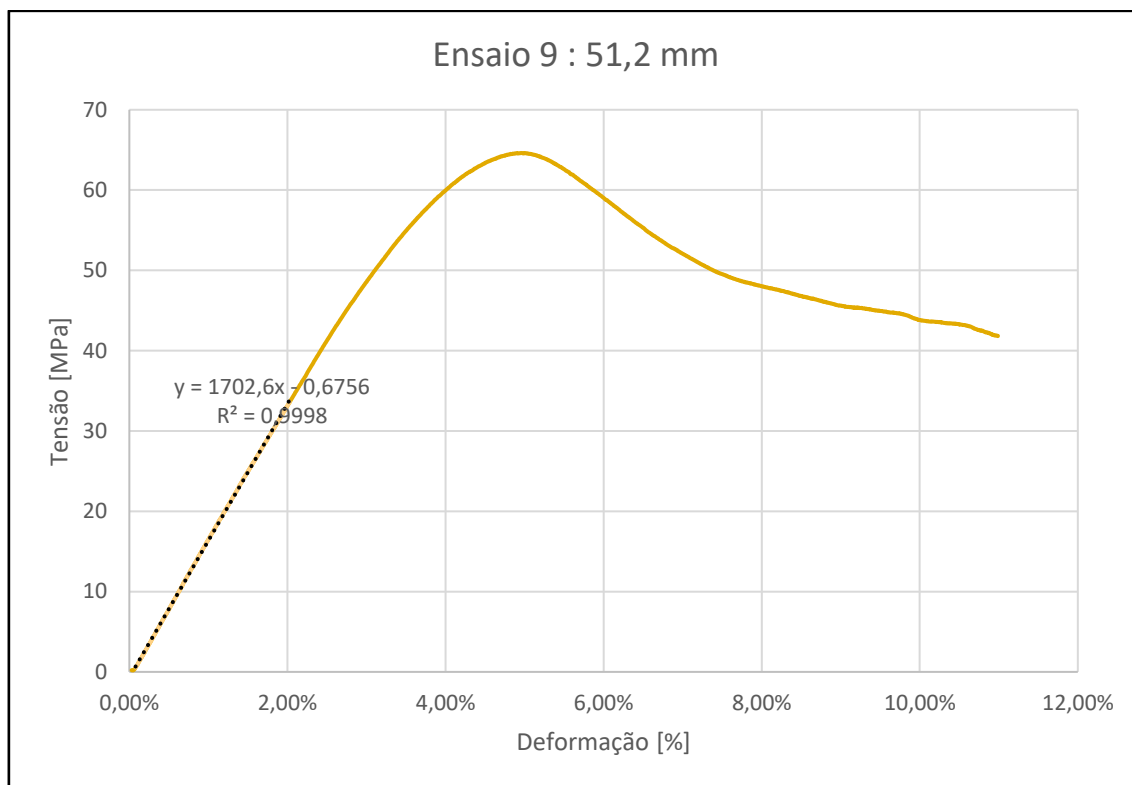
Anexo 29



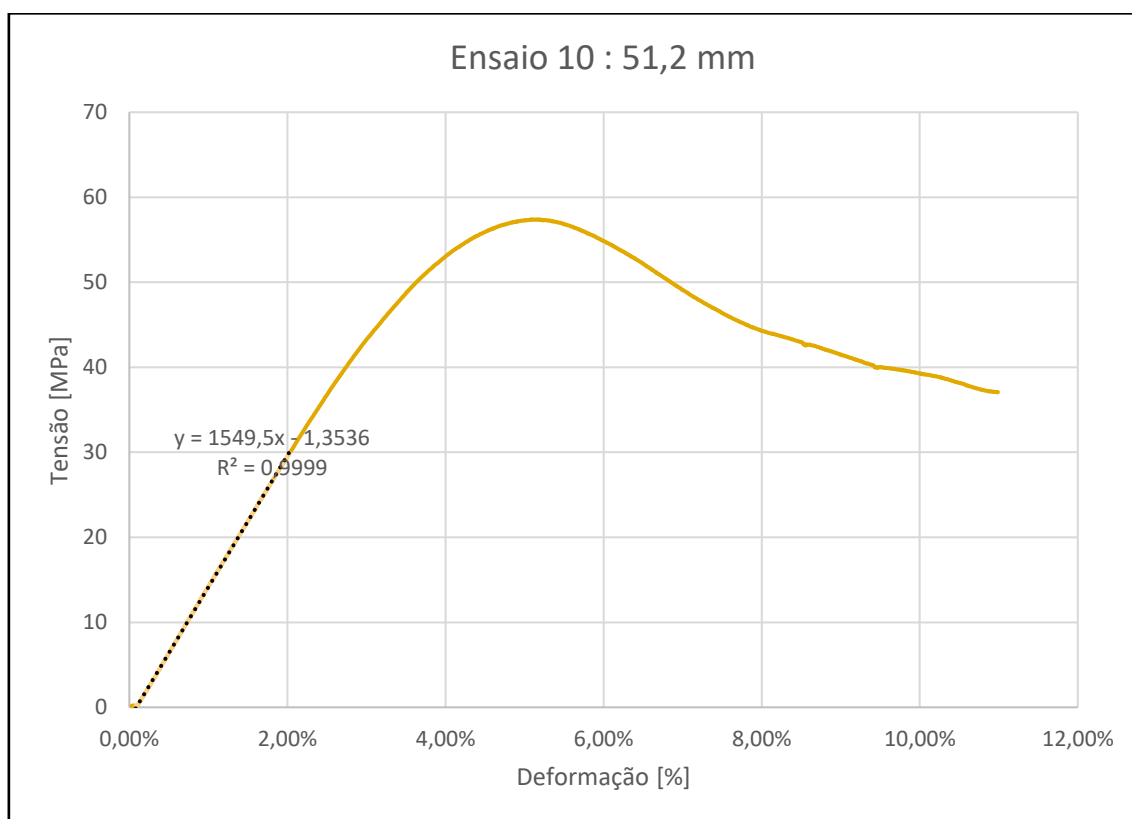
Anexo 30



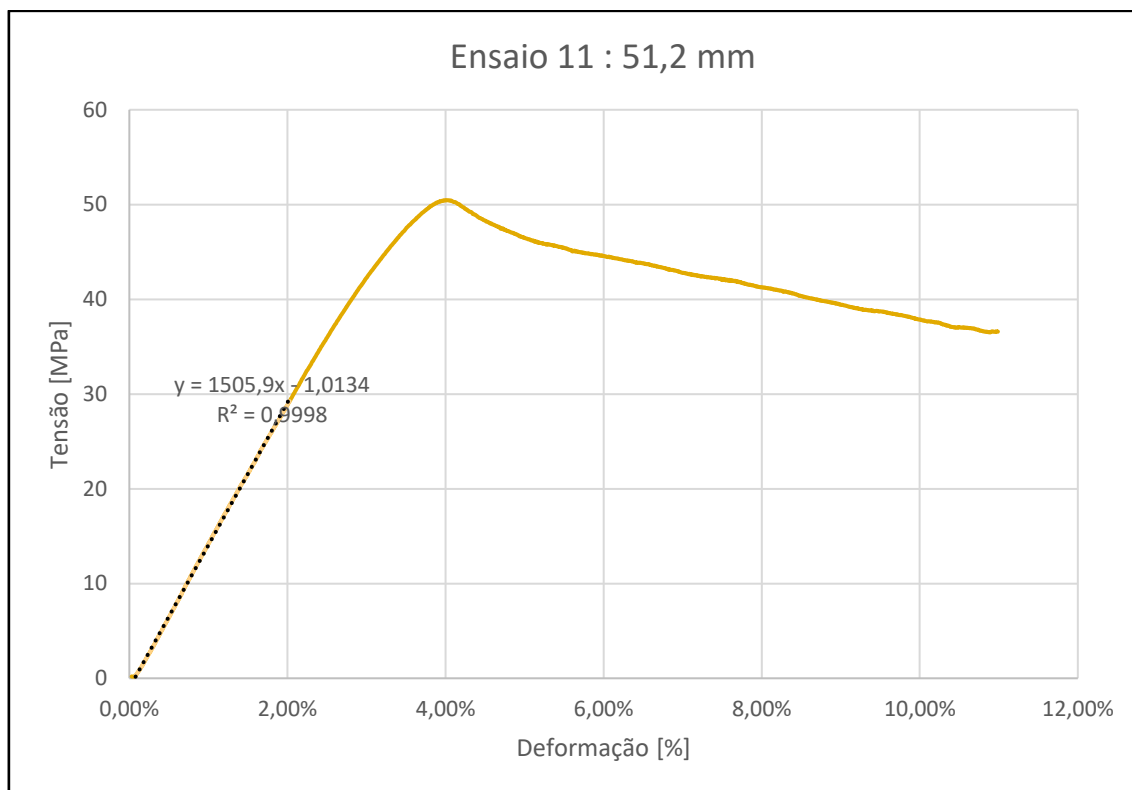
Anexo 31



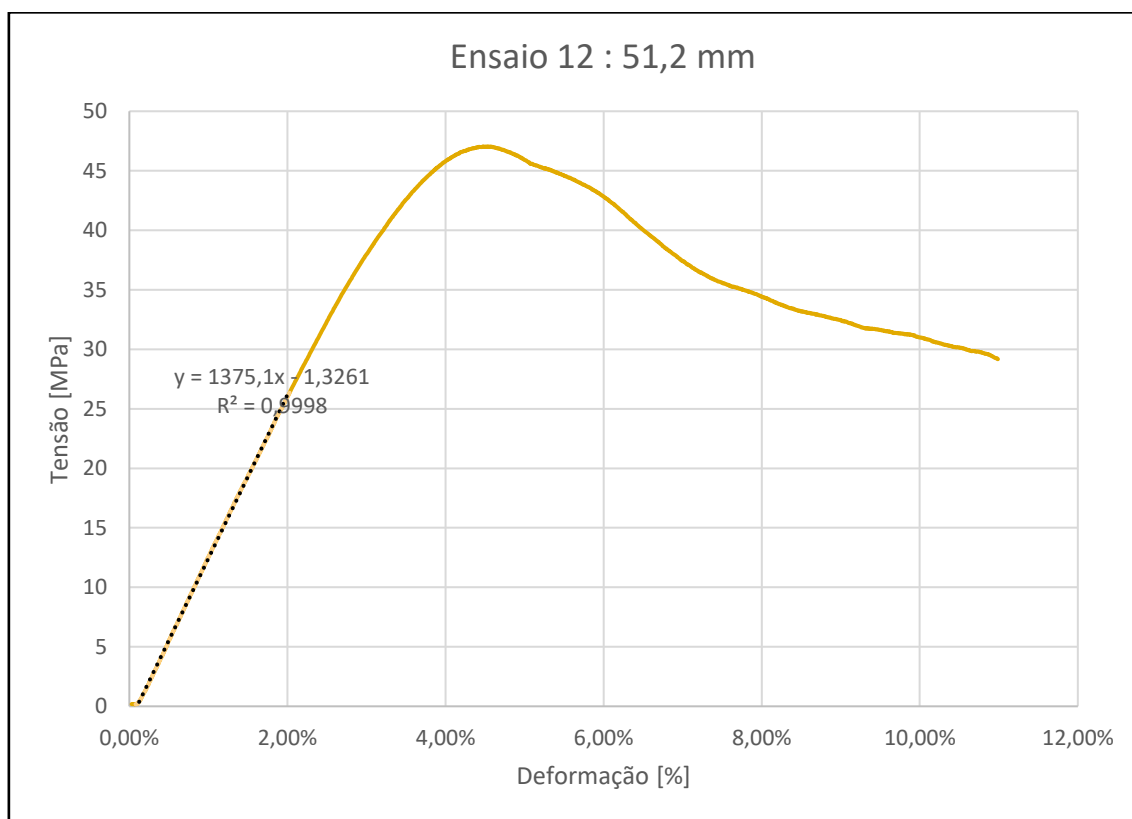
Anexo 32



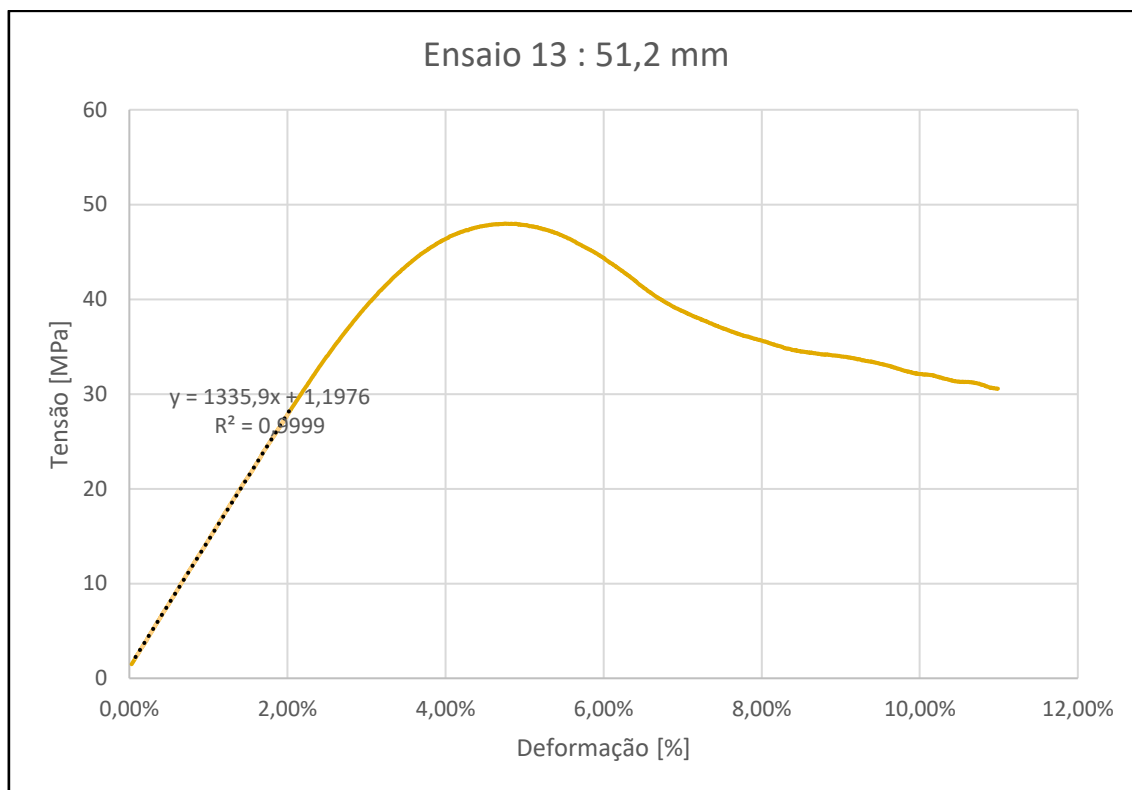
Anexo 33



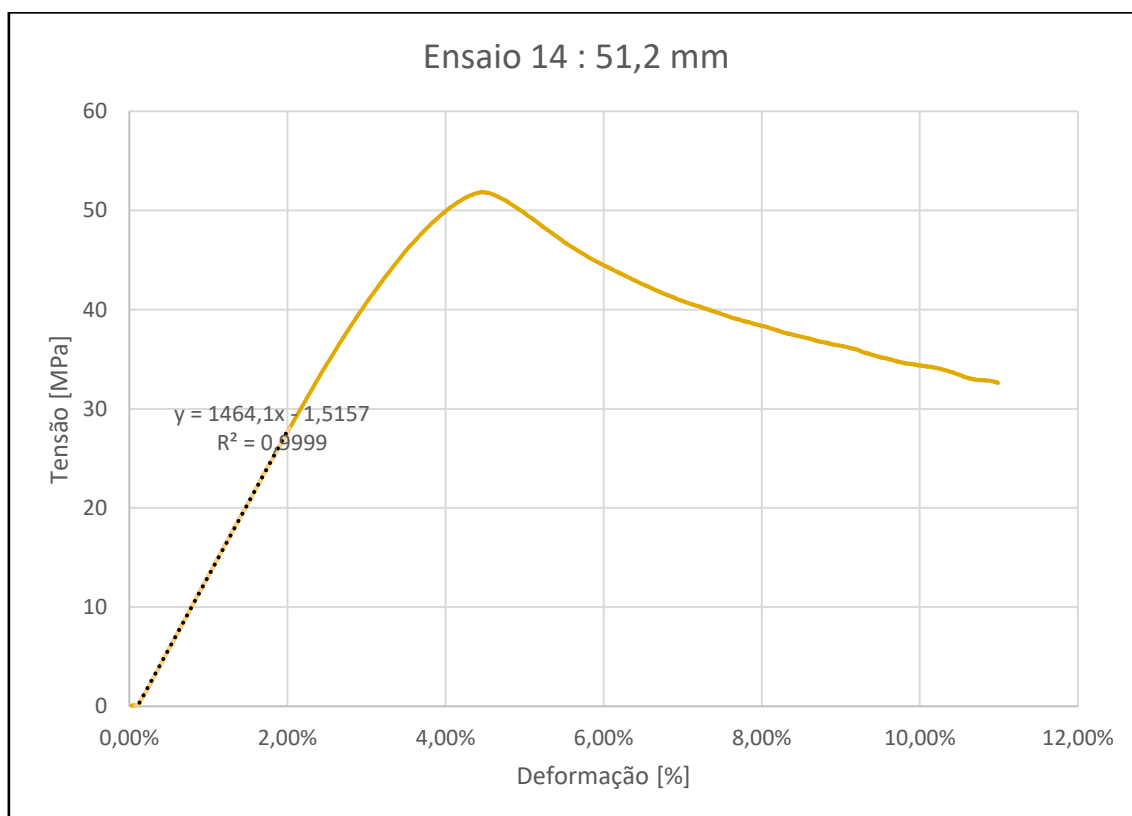
Anexo 34



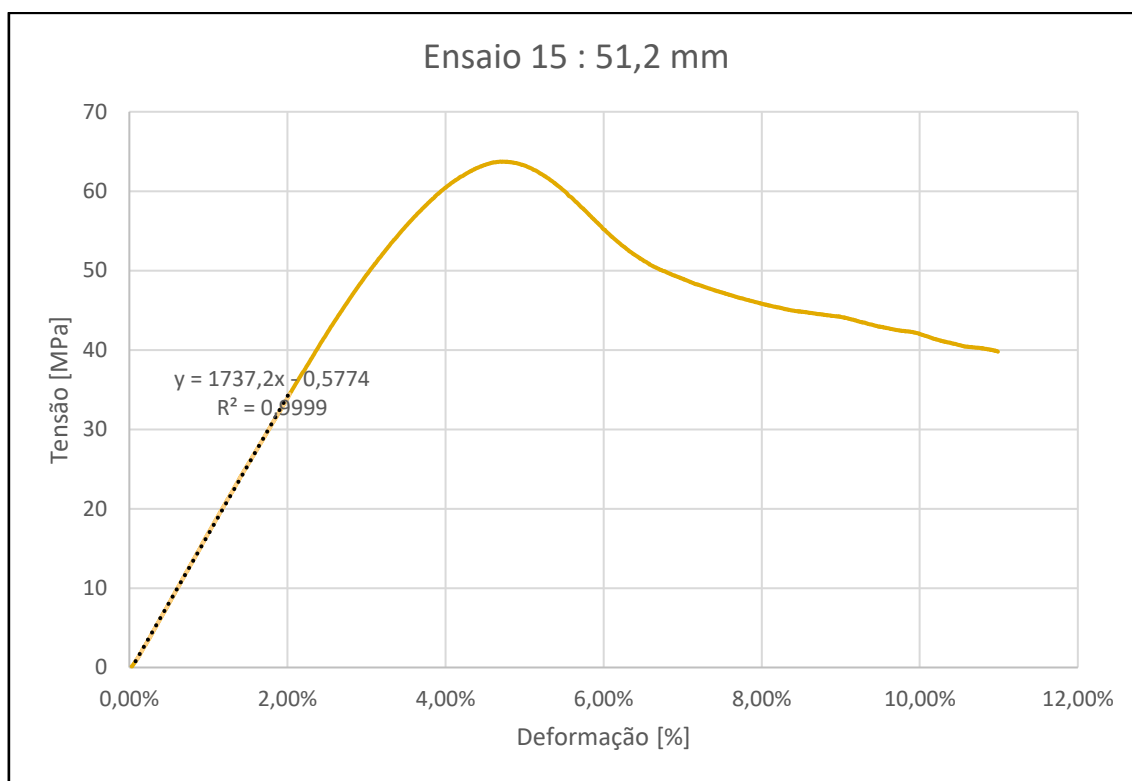
Anexo 35



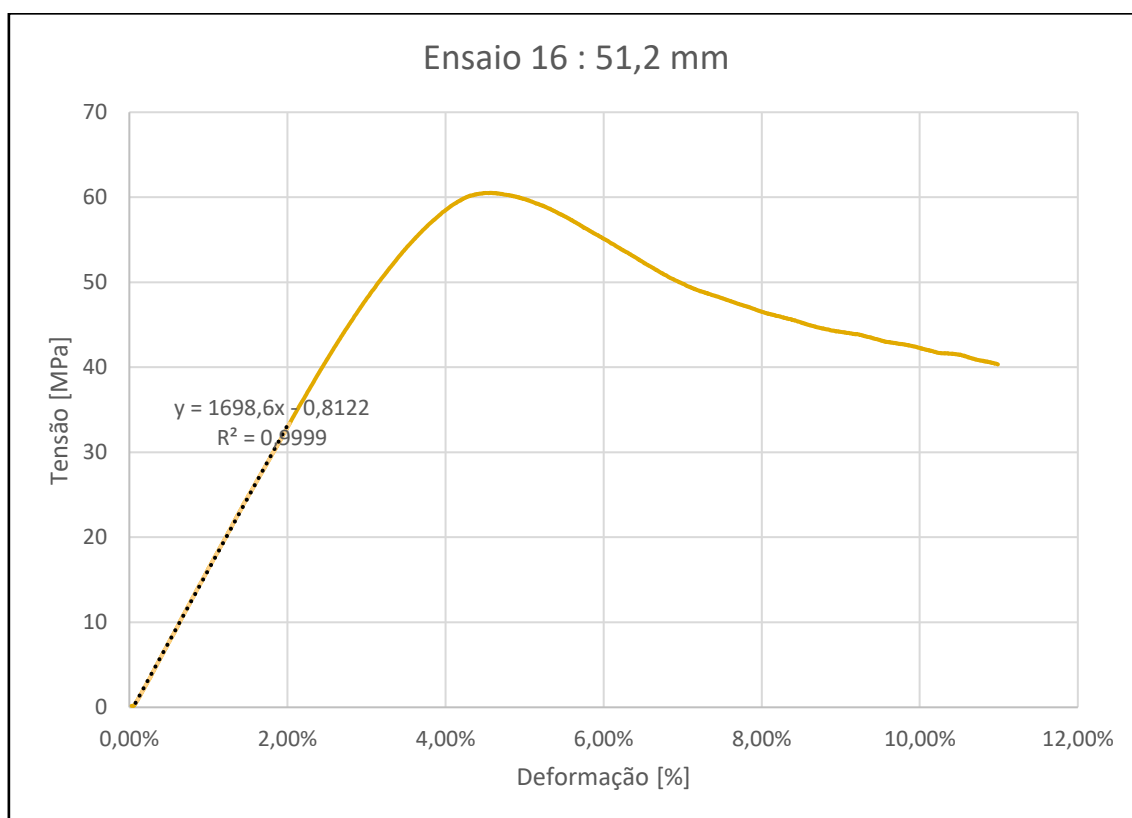
Anexo 36



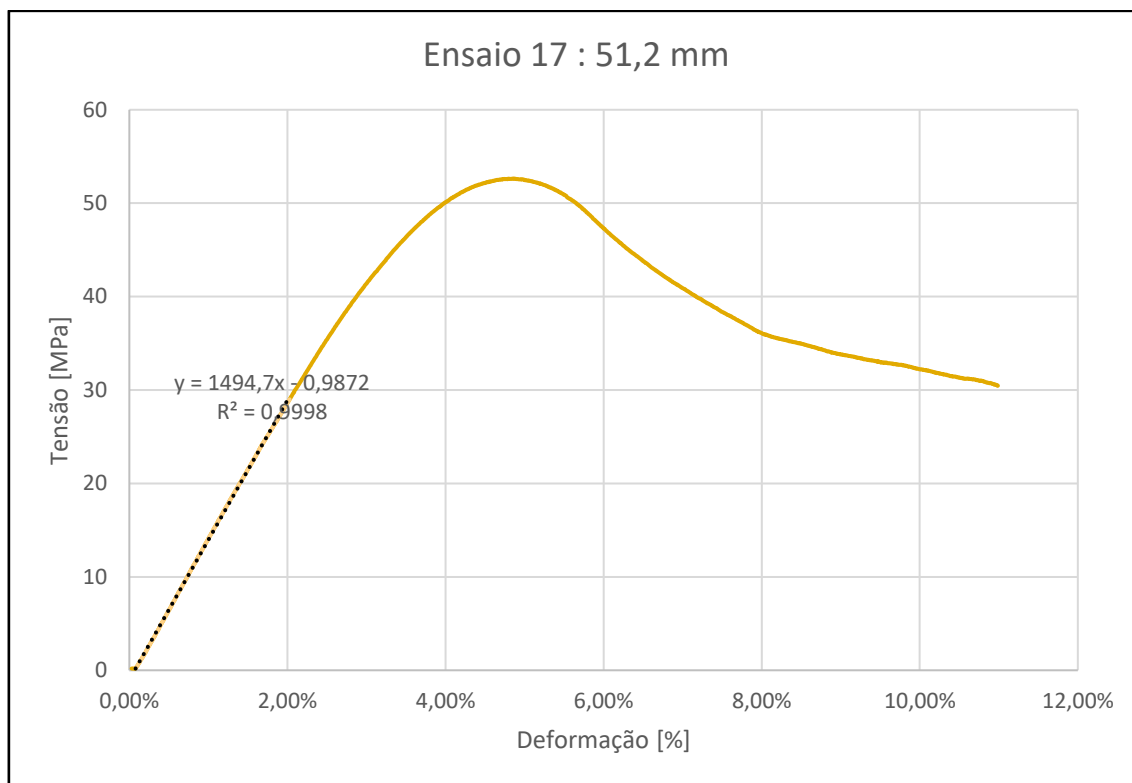
Anexo 37



Anexo 38



Anexo 39



Anexo 40

