



GONÇALO GABADO DA COSTA

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO NAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DE FILAMENTO CONDUCTOR FLEXÍVEL.

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2023

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO NAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DE FILAMENTO CONDUTOR FLEXÍVEL.

GONÇALO GABADO DA COSTA

Licenciado em Ciências de ENGENHARIA MECÂNICA

Orientador: Bruno Soares
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Valdemar Duarte
Professor Convidado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente:

Arguentes:

Orientador:

Membros:

Estudo da influência dos parâmetros de impressão nas propriedades elétricas de filamento condutor flexível

Copyright © Gonçalo Gabado da Costa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVAThesis Word [11].

"3D printing is already shaking our age-old notions of what can and can't be made." (Hod Lipson).

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o resultado de uma viagem de sete anos que foi o meu percurso académico. Estou profundamente agradecido aos professores, aos meus pais e amigos que me apoiaram durante estes setes anos, pois houve muitos momentos de dúvida e dificuldades que me fizeram duvidar das minhas capacidades, mas foram os professores com quem cruzei durante estes anos que me fizeram prevalecer e ganhar confiança. Foi uma viagem atribulada, mas cheguei ao meu destino.

Queria agradecer especialmente aos seguintes professores, Rui Martins, Bruno Soares e Valdemar Duarte. Queria agradecer ao professor Rui Martins pela paciência, a boa disposição e pelos conselhos que o professor me ofereceu durante o meu percurso académico. Aos professores Bruno Soares e Valdemar Duarte queria agradecer por estarem sempre disponíveis e dispostos a ajudar-me e a confiança que os professores tiveram em mim durante a duração desta dissertação.

Aos meus pais, Jorge Costa e Lurdes Gabado, queria agradecer por todo o apoio incondicional durante todo o meu percurso académico, pelas partes boas e más. Ao meu pai queria agradecer por me ter apresentado ao mundo da Impressão 3D, o que facilitou o desenvolvimento desta dissertação. Todo o que eu sou e me vou tornar é graças aos meus pais.

Aos meus melhores amigos, Diogo Natário e Ricardo Corte Real, queria agradecer pelo companheirismo e por me terem apoiado durante os momentos mais difíceis.

Aos meus colegas, Caetano Dios e João Mota, queria agradecer pela ajuda e apoio que me proporcionaram durante a realização desta dissertação. Sem eles esta dissertação teria sido muito mais difícil. Foi o João Mota que desenvolveu a Bancada de Ensaios de Tração utilizada durante esta dissertação. Ao Caetano Dios queria agradecer pela ajuda durante os ensaios de tração, assim acelerando os ensaios.

RESUMO

A facilidade ao acesso à Impressão 3D veio facilitar o acesso à produção num ambiente não industrial. Isto significa que uma pessoa pode criar e produzir um novo produto sem precisar de recorrer a outras empresas para o fabricar. Apesar desta liberdade que a Impressão 3D proporciona, tal como os outros métodos de fabrico, a mesma tem limitações. Uma desvantagem da Impressão 3D é a limitação do uso de materiais, o que limita as características mecânicas e químicas do produto final.

Tal como outros métodos de fabricação é preciso saber quais os requisitos que o produto final tem de cumprir, o que, para produtos de alta complexidade e número de elementos, vai levar ao aumento dos custos de fabricação. Uma maneira de reduzir estes custos pode ser pela redução de elementos acoplando dois ou mais elementos num só, sendo possível fabricá-los ao mesmo tempo. A Impressão 3D já permite produzir peças com mais do que um material na sua constituição e de elevada complexidade. Este tipo de Impressão 3D denomina-se por Multimaterial e permite produzir peças com uma combinação de comportamentos para cumprir um objetivo ou superar uma limitação. Com a inovação nos tipos de materiais poliméricos de Impressão 3D existem infinitas combinações de materiais possíveis. A introdução do material polimérico flexível condutor abriu novas possibilidades para a produção de equipamento eletrónico por Impressão 3D. O objetivo desta dissertação é avaliar como os parâmetros de impressão principais afetam as propriedades elétricas dos componentes impressos com o filamento condutor flexível e averiguar se é possível produzir sensores de movimento por Impressão 3D. Para realizar esta avaliação foi necessário realizar ensaios de tração com registo da variação da resistência elétrica dos provetes.

Palavras-chave: Impressão 3D, Filamento Condutor Flexível, Parâmetros de Impressão, Resistência Elétrica, Ensaio de Tração

ABSTRACT

The increase in ease of access to 3D Printing, came to revolutionize production in a personal environment. This means that a person can create and manufacture a new product without having to resort to other companies to manufacture it. Despite the freedom that 3D printing provides, like other manufacturing methods, it has limitations. One weakness of 3D Printing is the limitation of the materials you can use materials, which limits the mechanical and chemical characteristics of the final product.

As with other manufacturing methods, it is necessary to know what requirements the final product must comply with, which, for highly complex products and elements, will lead to an increase in manufacturing costs. One way to reduce these costs may be by reducing the elements coupling two or more elements into one, making it possible to manufacture them at the same time. 3D Printing now allows the production of parts with more than one material in their composition and high complexity. This type of 3Dprinting is called Multimaterial and allows to produce parts with a combination of behaviors to meet an objective or overcome a limitation. With the innovation of 3D Printing types of polymeric materials there are infinite possible material combinations. The introduction of conductive flexible polymeric material has opened new possibilities to produce electronic equipment by 3D Printing. The objective of this dissertation is to evaluate how key printing parameters affect electrical properties of components printed with flexible conductive filament and find out if it is possible to produce 3D Printing motion sensors. To carry out this evaluation, it was necessary to perform tensile tests with a record of the variation of the electrical resistance of the specimens.

Keywords: 3D Printing, Flexible Conductive Filament, Printing Parameters, Electric Resistance, Tensile Test

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Enquadramento Histórico.....	2
1.3. Objetivos	2
2. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO.....	3
2.1. Manufatura Aditiva.....	3
2.1.1. Funcionamento.....	5
2.1.2. Material de Impressão	6
2.1.3. Filamento Escolhido.....	7
2.1.4. Parâmetros de Impressão.....	8
2.1.5. Tipos de Impressoras 3D <i>FDM</i>	12
2.1.6. Impressora 3D <i>FDM</i> Escolhida.....	17
2.1.7. Impressão 3D vs. Injeção Plástica	18
2.2. Sensor.....	21
2.2.1. Sensor Resistivo.....	21
3. METODOLOGIA E PLANEAMENTO	23
3.1. DoE (Design of Experiments).....	23
3.1.1. Metodologia da Superfície de Resposta.....	25
3.1.2. Central Composite Design (CCD).....	26
3.2. Ensaio Experimentais.....	29
3.2.1. Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica.....	29
3.2.2. Provete de Ensaio de Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica	31
3.2.3. Provete de Ensaio de Histerese	33
3.2.4. Bancada de Ensaio de Tração.....	35
3.3. Ensaio de Histerese	36

3.3.1. Bancada Ensaio de Histerese.....	36
3.4. Ensaio Experimentais.....	37
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	39
4.1. Ensaio de Tração	39
4.1.1. Provete de orientação de 10°	39
4.1.2. Provete de orientação de 80°	44
4.2. Influência dos Parâmetros nos Resultados	50
4.2.1. Altura de Camadas.....	50
4.2.2. Orientação de Impressão.....	50
4.2.3. Orientação das Linhas de Impressão:	51
4.3. Provete com Variação do Multiplicador de Extrusão.....	52
4.3.1. Provete com 100% de Multiplicação de Extrusão.....	52
4.3.2. Provete com 105% de Multiplicação de Extrusão.....	54
4.3.3. Provete com 115% de Multiplicação de Extrusão.....	56
4.3.1. Provete do Ensaio de Histerese.....	60
4.2. Ensaio de Histerese.....	62
6. CONCLUSÕES.....	64
6.1. Conclusões	64
6.2. Proposta de trabalhos futuros.....	64
7. BIBLIOGRAFIA.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema simplificado de uma máquina de Impressão SLS. Adaptado de [7].	3
Figura 2.2 - Esquema funcional de uma máquina de Impressão <i>SLA</i> . Adaptado de [8].	4
Figura 2.3 - Componentes da cabeça de extrusão. Adaptado de [11].	5
Figura 2.4 - Deposição de material em camadas. Adaptado de [12].	5
Figura 2.5 - Filamento " <i>Conductive Filaflex</i> " da " <i>RECREUS</i> ". Adaptado de [21].	8
Figura 2.6 - Exemplo de peça impressa com falta de temperatura de extrusão. Adaptado de [23].	9
Figura 2.7 - Exemplo de peça impressa com excesso de temperatura de extrusão. Adaptado de [22].	9
Figura 2.8 - Peça com warping. Adaptado de [22].	9
Figura 2.9 - Impressão falhada devido ao descolamento da peça impressa. Adaptado de [25].	9
Figura 2.10 - Exemplos peças impressas com arrefecimento insuficiente (a) e (b) e em excesso (c). Adaptado de [22].	10
Figura 2.11 - Diferentes diâmetros do furo do bico de extrusão. Adaptado de [27].	10
Figura 2.12 - Diferença na resolução entre bico de extrusão de 0.4 mm e 0.25mm. Adaptado de [28].	10
Figura 2.13 - Resoluções verticais em diferentes alturas de camadas. Adaptado de [28].	11
Figura 2.14 - (a) 10% de enchimento Grid; (b) 30 % de enchimento Grid; (c) 2 perimetros; (d) 4 perimetros. Esta imagem foi criada através do programa <i>PrusaSlicer</i> .	11
Figura 2.15 - Impressora de sistema Cartesiano <i>Prusa mk3s</i> de <i>Prusa Research</i> . Adaptado de [32].	12
Figura 2.16 - Exemplo de uma impressora 3D <i>FDM CoreXY</i> . Adaptado de [35].	13
Figura 2.17 - Complexidade do sistema de movimentação de uma impressora 3D <i>FDM CoreXY</i> . Adaptado de [34].	13
Figura 2.18 - Exemplo de uma impressora 3D <i>FDM Delta</i> . Adaptado de [38].	13
Figura 2.19 - Exemplo de uma impressora 3D <i>FDM Delta</i> . Adaptado de [38].	13
Figura 2.20 - Esquema de uma impressora 3D <i>FDM Bowden</i> . Adaptado de [40].	14
Figura 2.21 - Extrusor <i>Bowden</i> da impressora <i>Creality Ender 3</i> . Adaptado de [41].	14
Figura 2.22 - Extrusor <i>Direct Drive</i> da impressora <i>Prusa mk3</i> . Adaptado de [44].	15

Figura 2.23 - Esquema de uma impressora 3D <i>FDM Direct Drive</i> . Adaptado de [40].	15
Figura 2.24 - Impressora “ <i>RAISE3D E2</i> ” com sistema de movimentação <i>IDEX</i> . Adaptado de [46].	17
Figura 2.25 - Custo de unitário de uma peça em relação ao volume de fabrico e o método de fabrico. Adaptado de [47].	18
Figura 2.26 - Exemplos impressoras 3D simples (a), profissional (b) e industrial (c). Adaptado de [49], [50] e [51] respetivamente.	19
Figura 2.27 - Exemplo de uma máquina de injeção plástica. Adaptado de [53].	19
Figura 2.28 - Custo de fabrico unitário dependendo do tamanho da produção para injeção plástica e impressão 3D. Adaptado de [55].	20
Figura 3.1 - Modelo esquemático de um sistema. Adaptado de [3].	23
Figura 3.2 - Exemplo de uma superfície de resposta. Adaptado de [66].	25
Figura 3.3 - Geração de um <i>CCD</i> . Adaptado de [68].	26
Figura 3.4 - Rotatividade no espaço fatorial.	28
Figura 3.5 - 80°; 0.2 mm.	30
Figura 3.6 - 80°; 0.3 mm.	30
Figura 3.7 - 10°; 0.3 mm.	30
Figura 3.8 - 10°; 0.2 mm.	30
Figura 3.9 - 10°; 0.2 mm; 15°	30
Figura 3.10 - 10°; 0.2 mm; 75°	31
Figura 3.11 - Provete de Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica.	31
Figura 3.12 - Cotagem do provete de Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica. Norma ISO 527-3:1995(E) type 5.	31
Figura 3.13 - Provete de tração horizontal de tração inicial.	32
Figura 3.14 - Zona de estricção do provete horizontal de tração inicial.	32
Figura 3.15 - Provete com <i>infill</i> concêntrico horizontal.	32
Figura 3.16 - Zona de estricção do provete horizontal com <i>infill</i> concêntrico horizontal.	32
Figura 3.17 - Provete com <i>infill</i> reticular com 7 perímetros.	33
Figura 3.18 - Zona de estricção do provete com <i>infill</i> reticular com 7 perímetros.	33
Figura 3.19 - Corte perpendicular do Provete de Ensaio de Histerese.	33
Figura 3.20 - Provete de Ensaio de Histerese.	33
Figura 3.21 - Corte de topo do Provete de Ensaio de Histerese.	33
Figura 3.22 - Provete de Ensaio de Histerese no programa de fatiamento (ideaMaker). <i>TPU</i> normal (branco); <i>TPU</i> condutor (amarelo).	34

Figura 3.23 - Corte de topo do Provete de Ensaio de Histerese no programa de fatiamento (ideaMaker). <i>TPU</i> normal (branco); <i>TPU</i> condutor (amarelo).	34
Figura 3.24 - Cotagem do provete de Ensaio de Histerese. Norma ISO 527-3:1995(E) type 5	34
Figura 3.25 - (a) Vários pontos de vista da Bancada de Ensaio de Tração; (b) Vista de topo;(c) Vista traseira; (d) Vista de pormenor das garras de apoio dos provetes.	35
Figura 3.26 – Resultados típicos dos Ensaio de Histerese. Adaptado de [70]	36
Figura 4.1 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros [1]	39
Figura 4.2 - Secção de fratura do provete [1].....	39
Figura 4.3 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros [2].	40
Figura 4.4 - Secção de fratura do provete [2].....	41
Figura 4.5 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros [5].	42
Figura 4.6 - Secção de fratura do provete [5].....	42
Figura 4.7 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros.....	43
Figura 4.8 - Secção de fratura do provete [6].....	43
Figura 4.9 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros [3].	44
Figura 4.10 - Secção de fratura do provete [3].	45
Figura 4.11 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros [4].	46
Figura 4.12 - Secção de fratura do provete [4].	46
Figura 4.03 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros [7].	47
Figura 4.14 - Secção de fratura do provete [7].	47
Figura 4.15 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros [8].	48
Figura 4.16 - Secção de fratura do provete [8].	49
Figura 4.17 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão dos provetes concêntricos horizontal com multiplicador de extrusão de 100%.	52
Figura 4.18 - Secção de fratura do provete CH 100%.	53
Figura 4.19 - Falha ocorrida no primeiro provete com 100% de multiplicador de extrusão.....	53

Figura 4.20 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão dos provetes impressos com os níveis ideais dos parâmetros de impressão.....	54
Figura 4.21 - Pormenor dos primeiros 40% de extensão das curvas Tensão/Extensão e Resistência Elétrica/Extensão dos provetes concêntricos horizontal com multiplicador de extrusão de 105%.....	55
Figura 4.22 - Secção de fratura de um provete impresso com os níveis ideais dos parâmetros de impressão.....	55
Figura 4.23 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência Elétrica/Extensão dos provetes concêntricos horizontal com multiplicador de extrusão de 115%.	56
Figura 4.24 - Pormenor dos primeiros 40% de extensão das curvas Tensão/Extensão e Resistência Elétrica/Extensão dos provetes concêntricos horizontal com multiplicador de extrusão de 115%.....	57
Figura 4.25 - Secção de fratura do provete concêntrico horizontal com multiplicador de extrusão de 115%.....	57
Figura 4.26 - (a) Provete de infill do tipo concêntrico; (b) Provete de infill do tipo reticular....	60
Figura 4.27 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão dos provetes impressos para os Ensaios de Histerese.....	61
Figura 4.28 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão dos provetes impressos para os Ensaios de Histerese.....	62
Figura 4.29 - Curvas Tensão/Tempo e Resistência elétrica/Tempo dos provetes impressos para os Ensaios de Histerese.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dimensões e temperaturas máximas da impressora <i>RAISE3D E2</i> . Adaptado de [46].	17
Tabela 3.1 - Tipos de <i>CCD</i> com respectivas descrições e representação para dois fatores. Adaptado de [69, 70].	27
Tabela 3.2 - Níveis dos parâmetros de Impressão.	37
Tabela 3.3 - Combinação dos diferentes níveis dos parâmetros de Impressão	38
Tabela 4.1 - Dados do gráfico a Figura 4.1	40
Tabela 4.2 - Dados do gráfico a Figura 4.3	41
Tabela 4.3 - Dados do gráfico a Figura 4.5	43
Tabela 4.4 - Dados do gráfico a Figura 4.7	44
Tabela 4.5 - Dados do gráfico a Figura 4.9	45
Tabela 4.6 - Dados do gráfico a Figura 4.11	47
Tabela 4.7 - Dados do gráfico a Figura 4.13	48
Tabela 4.8 - Dados do gráfico a Figura 4.15	49
Tabela 4.9 - Tabela Resumo dos dados dos Ensaios de Tração.	50
Tabela 4.10 - Parâmetros de impressão dos provetes para o estudo do efeito do multiplicador de extrusão.	52
Tabela 4.11 - Dados do gráfico a Figura 4.17	54
Tabela 4.12 - Dados do gráfico a Figura 4.20	56
Tabela 4.13 - Dados do gráfico a Figura 4.23	58
Tabela 4.14 - Tabela Resumo dos dados dos Ensaios de Tração no estudo do multiplicador de extrusão.	58
Tabela 4.15 - Níveis dos parâmetros de estudo.	60

SIGLAS E ACRÓNIMOS

MA	Manufatura Aditiva
FDM	Modelagem de Deposição Fundida
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
SLA	Estereolitografia
PLA	Ácido Polilático
PETG	Poliétileno Tereftalato Glicol
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
TPU	Poliuretano termoplástico
PTFE	Politetrafluoretileno
IDEX	Sistema de Extrusão Dupla Independente
CNC	Controle numérico computadorizado
DoE	Projeto de Experiências
MSR	Metodologia da Superfície de Resposta
CCD	Projeto Composto Central

SÍMBOLOS

R	Resistência Elétrica	[ohm]
V	Tensão Elétrica	[V]
I	Intensidade da Corrente Elétrica	[A]
ρ	Resistividade Elétrica	[ohm.metro]
L	Comprimento do Elétrodo	[metro]
A	Área Transversal do Elétrodo	[metro ²]
GF	Gauge Factor	
dR	Variação da Resistência Elétrica	[ohm]
R ₀	Resistência Elétrica Inicial	[ohm]
ϵ	Extensão	
dL	Variação do Comprimento do Elétrodo	[metro]
L ₀	Comprimento Inicial do Elétrodo	[metro]
k	Número de Fatores de Entrada	
N ₀	Número de Pontos Centrais	
N _e	Número de Experiências	
α	Distância entre os Pontos Estrela e os Pontos Centrais	

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo vai-se expor a motivação do estudo realizado nesta dissertação e estabelecer os objetivos que se pretendem alcançar.

1.1. Motivação

A Manufatura Aditiva (MA) é um processo de fabricação camada-a-camada para criar objetos tridimensionais. A grande vantagem da MA é a sua alta flexibilidade, principalmente devido ao elevado número de tipo de materiais que podem ser utilizados para cumprir as finalidades que o produtor ou cliente pretenda que o produto cumpra [1].

A tecnologia MA mais usada no mercado é a *FDM (Fused Deposition Modeling)*, devido ao seu baixo custo, desperdício mínimo de matéria-prima e a facilidade de utilizar materiais diferentes. No entanto, esta tecnologia é baseada numa grande variedade de parâmetros. Uma combinação destes parâmetros pode criar um produto com características mecânicas diferentes de outra combinação, sendo de interesse o estudo da influência dos diferentes parâmetros nas características do produto final [2]. Já existem vários estudos que estudam os parâmetros individualmente, mas é possível que o estudo das combinações dos parâmetros tenha comportamentos diferentes [3].

De momento o uso mais comum para o filamento condutor flexível é como elemento de ligação em circuitos onde o próprio circuito pode deformar conferindo flexibilidade ao circuito, assim evitando que o elemento de ligação se rompa. Mas é de igual interesse o estudo de outras aplicações deste tipo de filamento, por exemplo na produção de estruturas sensorizadas onde o filamento condutor é embutido na estrutura e funciona como sensor resistivo, no entanto é necessário conhecer as suas características e como os parâmetros de impressão as podem afetar.

1.2. Enquadramento Histórico

A Manufatura Aditiva é um método de fabrico que já existe há várias décadas. Em 1981, Kodama *et al* [4] publicou um estudo onde desenvolvem um método de prototipagem rápida camada-a-camada que até hoje é intrínseco com a Impressão 3D. Foi sim, em 1980, que um engenheiro físico norte-americano chamado Chuck Hull que idealizou e criou a Impressão 3D baseado em estereolitografia [4].

Em 1988 foram lançadas para o mercado as primeiras máquinas de MA que usavam a tecnologia de estereolitografia. Foi em 1989 que a primeira patente de Impressão 3D *FDM* foi registada por Scott e Lisa Crump, que posteriormente fundaram a empresa *Stratasys* [5]. Em 2005, o Dr. Adrian Bowyer criou o conceito *RepRap*, que consiste na ideia de código aberto para criar impressoras 3D capazes de se auto-replicar, impulsionando assim a MA para o mercado “civil” [6], [7]. Em 2009 a patente da *Stratasys* expirou permitindo que outros fabricantes possam produzir impressoras 3D *FDM* sem precisar de pagar licenças à *Stratasys* para poder usar esta tecnologia, assim provocando uma queda drástica dos preços das impressoras 3D. Desde então houve um grande desenvolvimento nos materiais de Impressão 3D o que abriu novas oportunidades para desenvolver novas tecnologias e facilitar a produção de tecnologias atuais que estão reservadas a produções industriais.

1.3. Objetivos

Nesta dissertação pretende-se estudar a influência dos parâmetros de impressão nas características elétricas de objetos impressos com um material condutor flexível condutor. Este estudo envolve ensaios de tração e de histerese dos provetes para averiguar a viabilidade de produzir sensores resistivos por Impressão 3D com o material condutor flexível. Para obter resultados conclusivos é necessário fazer um estudo prévio das propriedades elétricas e mecânicas do filamento.

2. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo vai-se apresentar as diferentes variantes da Manufatura Aditiva e os princípios de funcionamento e características da MA *FDM*

2.1. Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (MA), tal como o nome indica, é um processo que é caracterizado pela adição de material para formar o objeto pretendido, ao contrário de processos subtrativos onde se retira material de uma matriz, como por exemplo a maquinaria *CNC*.

Atualmente existe uma grande variedade de tecnologias de MA, que têm como principais diferenças o estado do material a depositar e o método de deposição. Neste estudo vai ser usado a tecnologia *FDM*.

Os tipos de Impressão 3D mais utilizadas no mercado são:

- *SLS (Selective Laser Sintering)*
- *SLA (Stereolithography)*
- *FDM (Fused Deposition Method)*

SLS (Selective Laser Sintering):

Esta tecnologia de MA consiste na utilização de um feixe laser para sinterizar um polímero em pó para criar um objeto camada-a-camada [8]. Na Figura 2.1 é possível observar um esquema simplificado de uma máquina de Impressão *SLA*.

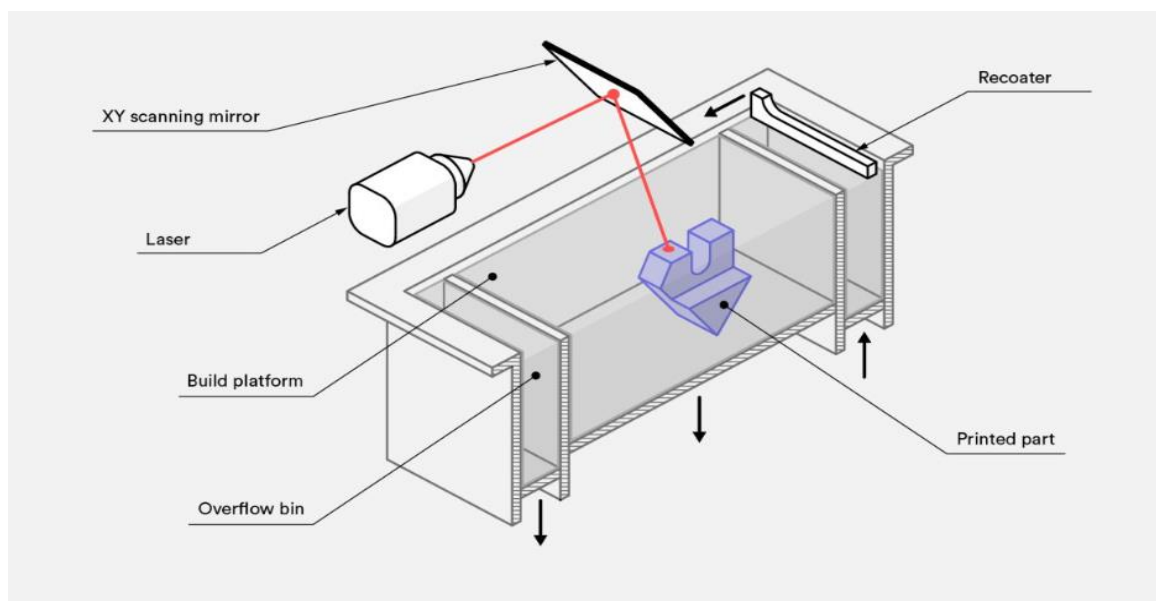
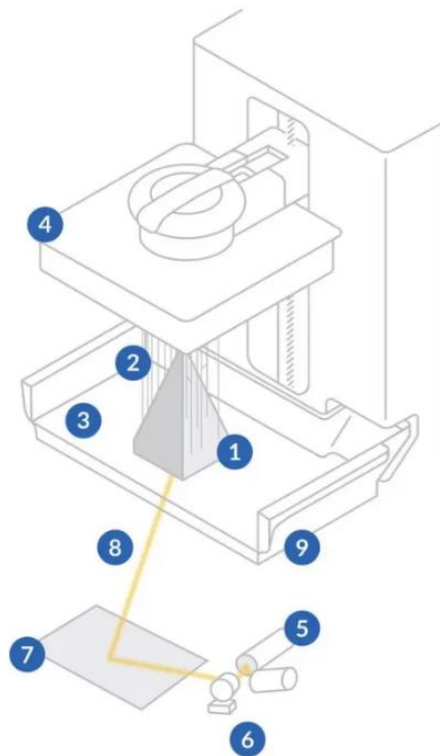


Figura 2.1- Esquema simplificado de uma máquina de Impressão SLS. Adaptado de [7].

SLA (Stereolithography):

Esta variante da MA utiliza um laser para endurecer uma resina fotossensível que está inicialmente em estado líquido. Tal como as outras variantes, esta tecnologia constrói um objeto camada-a-camada [9]. Na Figura 2.2 encontra-se o esquema funcional de uma máquina de Impressão SLA.



Upside-Down (Inverted) SLA

- 1 [Atraia a atenção do seu
- 2 leitor colocando uma boa
- 3 citação no documento ou
- 4 utilize este espaço para
- 5 enfatizar um ponto chave.
- 6 Para colocar esta caixa de
- 7 texto noutro local da pá-
- 8 gina, arraste-a.]
- 9

Figura 2.2 - Esquema funcional de uma máquina de Impressão SLA. Adaptado de [8].

FDM (Fused Deposition Modeling):

Esta variante de MA é caracterizada pela extrusão e deposição seletiva de um material termoplástico em camadas para criar um objeto tridimensional [10]. Esta tecnologia vai ser explicada mais profundamente mais à frente.

2.1.1. Funcionamento

As máquinas de impressão 3D *FDM*, mais conhecidas por impressoras 3D *FDM*, consistem numa cabeça de extrusão, uma superfície de trabalho, um controlador eletrónico, elementos motores, a estrutura de suporte e outros componentes de funcionamento de menor importância. A cabeça de extrusão é o componente da máquina que realiza a extrusão do material. Na Figura 2.3 é possível observar os componentes principais de uma cabeça de extrusão. Alguns destes componentes são o bico de extrusão, o bloco de aquecimento, dissipador, ventoinha de dissipação, resistência de aquecimento, termóstato, garganta, ventoinha de arrefecimento e elemento motor de alimentação (depende do sistema de extrusão) [10].



Figura 2.3 - Componentes da cabeça de extrusão.

Adaptado de [11].

A mesa de trabalho é uma superfície plana onde o objeto que está a ser produzido se encontra. Apenas a primeira camada da peça é que é depositada diretamente na mesa de trabalho, as camadas após a primeira serão depositadas diretamente por cima das camadas anteriores. São os movimentos relativos, horizontal e vertical, entre a cabeça de extrusão e a mesa de trabalho que permitem a criação da geometria dos objetos [10].

A direção de alimentação de material também se considera um eixo de movimento, logo uma impressora 3D *FDM* convencional tem 4 eixos de movimento, o eixo X e Y no plano horizontal (paralelo à mesa de trabalho), o eixo Z (movimento vertical) e o eixo de extrusão (direção da alimentação do material). É o movimento vertical (eixo Z) relativo entre a cabeça de extrusão e a mesa de trabalho que permitem a deposição de novas camadas (Figura 2.4). É o aquecimento do material de impressão, até à temperatura que faz o mesmo entrar no estado viscoso, que torna a extrusão possível [10].

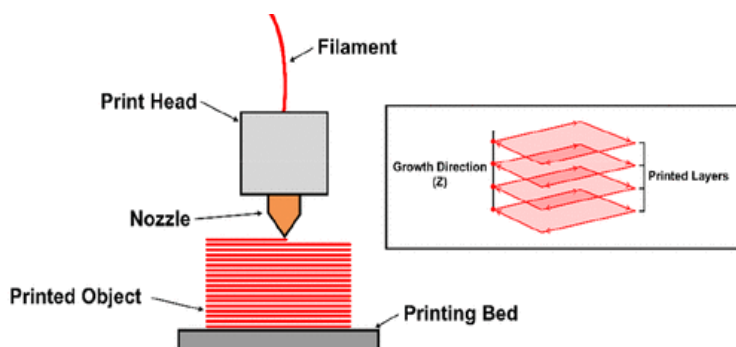


Figura 2.4 - Deposição de material em camadas. Adaptado de [12].

2.1.2. Material de Impressão

O material utilizado na impressão 3D *FDM* é designado por filamento e é um termoplástico com o formato de um fio contínuo. O filamento pode ter um diâmetro de 1.75 mm ou de 2.85 mm, mas o primeiro é o mais usado [14]. A impressão 3D *FDM* permite a utilização de uma grande variedade de materiais. Todos os materiais têm características específicas, o que permite criar peças geometricamente iguais com propriedades mecânicas diferentes. Os tipos de filamentos mais comuns no mercado são [15] [16].

- *PLA (Polylactic Acid)*
- *PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)*
- *ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)*
- *TPU (Thermoplastic Polyurethane)*
- Compósitos

PLA:

O *PLA* é o material de impressão 3D *FDM* mais usado devido à sua temperatura de impressão baixa e por não precisar superfície de trabalho aquecida, facilitando a sua utilização por principiantes com impressoras 3D *FDM* simples. O *PLA* é renovável e biodegradável, pois é derivado do milho e cana-de-açúcar permitindo uma impressão de baixo custo e com bom controlo dimensional, mas tem a desvantagem de ter uma temperatura de fusão e tensão de rotura baixas, comparando com os outros tipos de filamentos. Devido a estas desvantagens o *PLA* é mais indicado para peças que não se encontrem em ambientes quentes ou sob esforços mecânicos [15].

PETG:

O *PETG* é um material semirrígido com boas características térmicas e mecânicas com uma tensão de rotura superior que a do *PLA*. O *PETG* tem as desvantagens de necessitar de mesa de trabalho aquecida e tem tendência a ter uma qualidade superficial inferior à do *PLA* [16].

ABS:

O *ABS* foi um dos primeiros materiais a ser usado na impressão 3D *FDM*. As vantagens do uso de *ABS* são peças com propriedades mecânicas bastante apelativas, como por exemplo elevada resistência ao impacto. O *ABS* também é conhecido pela sua resistência a altas temperaturas. Apesar destas qualidades o *ABS* também tem bastantes desvantagens, sendo a principal a tendência a contrair durante o processo de impressão se a temperatura ambiente for menor que a sua temperatura de transição vítrea, logo o uso de uma superfície aquecida é obrigatório. Durante o processo de impressão o *ABS* liberta um odor intenso e desagradável sendo necessário um ambiente bem ventilado [15].

TPU:

O *TPU* é um dos muitos materiais flexíveis usados na impressão 3D *FDM*, sendo uma mistura de plástico rígido e borracha. O *TPU* destaca-se dos outros tipos de filamentos por ter um domínio elástico enorme e um domínio plástico praticamente inexistente. Este filamento é excelente para peças que tenham de absorver vibrações, impactos e em mecanismos que a sua deformação seja prevista. Devido à sua alta flexibilidade, este tipo de filamento é mais difícil de imprimir e cria defeitos de impressão mais facilmente que os outros tipos de filamento [17].

Compósitos:

Filamentos compósitos são uma mistura homogênea de dois materiais diferentes. O primeiro e em maior quantidade denomina-se por matriz e pode ser um dos materiais anteriores. O segundo material denomina-se por material de reforço e pode estar na forma de pó ou fibras curtas e é adicionado à matriz. A combinação dos dois materiais cria um material novo com propriedades mecânicas diferentes dos materiais originais procurando satisfazer uma condição que nenhum dos dois conseguia satisfazer separadamente. Os materiais de reforço mais comuns são fibras de carbono, pós de madeira ou derivados e pós metálicos [18].

2.1.3. Filamento Escolhido

Visto que o objetivo do estudo desta dissertação é averiguar a influência dos parâmetros de impressão nas características físicas e químicas de objetos impressos com um material condutor de eletricidade flexível, é necessário escolher um filamento que cumpra os requisitos funcionais do estudo.

O filamento escolhido para este estudo foi o “*Conductive Filaflex*” da “*RECREUS*” que é um TPU modificado para poder conduzir eletricidade. Na Figura 2.5 apresenta-se o aspeto deste filamento e uma sua possível utilização.

Caraterísticas do filamento [19]:

- Dureza: 92A Shore Hardness
- Módulo de Young: 8900 MPa
- Resistência à tração: 135 MPa
- Extensão à rotura: 490%
- Resistência elétrica à superfície: $<1e-1$ ohm
- Resistência elétrica volumétrica: 3.9 ohm.cm
- Temperatura de impressão: 245-250°C
- Velocidade de impressão: 20 mm/s
- Temperatura da mesa de trabalho: 50-60°C
- Distância de retração: 2-3 mm

- Velocidade de retração: 40 mm/s



Figura 2.5 - Filamento “Conductive Filaflex” da “RE-CREUS”. Adaptado de [21].

O fabricante deste filamento não refere o que torna este filamento condutor de eletricidade, mas pressupõem-se que sejam adicionadas partículas nanométricas de grafite durante o processo de fabrico do mesmo.

Tendo em consideração a natureza flexível do filamento escolhido, é possível afirmar que este material não obedece à Lei de Hooke, sendo que a curva tensão/extensão não tem um domínio elástico puramente linear [20]. Este tipo de material denomina-se por Material Elástico não-Linear ou Material Hiper-elástico e têm as seguintes características:

Domínio Elástico não-linear: Apesar da curva tensão/extensão ter zonas de comportamento não linear, o material encontra-se no domínio elástico durante toda a sua extensão.

Elevada extensão máxima: Este tipo de material tem a capacidade de alcançar extensões superiores a 100%.

Incompressibilidade: Independentemente das mudanças de forma (extensão) o volume mantém-se constante.

2.1.4. Parâmetros de Impressão

O processo de impressão 3D *FDM* tem um grande número de possíveis configurações dos parâmetros de impressão, sendo que é num programa denominado de *Slicer* (fatiador) onde o operador os define, dependendo do tipo de filamento e outras características pretendidas da peça impressa. É este programa que transforma o ficheiro de um objeto tridimensional num ficheiro de linguagem que a impressora 3D consiga interpretar. O *Slicer* cria as camadas de impressão perpendiculares ao eixo Z, este processo chama-se de fatiamento [21]. Nesta secção vão ser apresentados resumidamente os parâmetros de impressão mais importantes.

Temperatura de extrusão:

Este é o parâmetro que define a temperatura a que o bico de extrusão se encontra durante o processo de impressão. Esta temperatura depende muito do tipo de filamento, mas raramente é menor

que 200°C. Este parâmetro é um dos parâmetros de impressão 3D *FDM* mais importantes, pois a sua mal configuração pode criar problemas de deposição, dependendo se a temperatura usada for insuficiente ou em excesso, relativamente à temperatura de extrusão apropriada. Na Figura 2.6 apresenta-se um exemplo de um objeto impresso com temperatura de extrusão insuficiente, provocando falhas de deposição, que são espaços vazios onde a cabeça de extrusão não conseguiu extrudir o filamento. Na Figura 2.7 é possível observar uma consequência de usar temperatura de extrusão excessiva, criando situações onde o controlo dimensional da peça impressa é comprometido, pois após a deposição do material o mesmo “escorre” [22], [23].



Figura 2.6 - Exemplo de peça impressa com falta de temperatura de extrusão. Adaptado de [23].

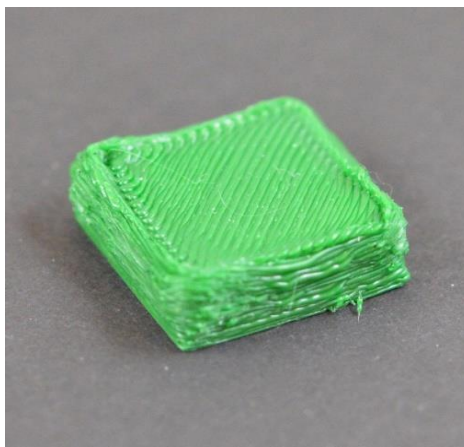


Figura 2.7 - Exemplo de peça impressa com excesso de temperatura de extrusão. Adaptado de [22].

Temperatura da mesa de trabalho:

Este é o parâmetro que define a temperatura a que a mesa de trabalho se encontra durante o processo de impressão. Este parâmetro permite aumentar a aderência entre a mesa de trabalho e a peça impressa, tornando o processo de impressão mais fiável, mas nem todos os tipos de filamentos necessitam que este parâmetro seja usado. Na Figura 2.8 observa-se o efeito chamado *warping*, que é a consequência do uso da temperatura de mesa de trabalho errada. Este efeito ocorre quando as primeiras camadas impressas arrefecem e começam a contrair, criando forças internas de tração na peça. É quando estas forças superam as forças de adesão entre a mesa de trabalho e a peça impressa que ocorre o efeito de *warping*. Este efeito pode chegar a uma situação crítica onde a peça impressa separa-se da mesa de trabalho, assim falhando o processo de impressão [25]. A Figura 2.9 mostra a consequência da separação da peça impressa da mesa de trabalho.



Figura 2.8 - Peça com warping. Adaptado de [22].

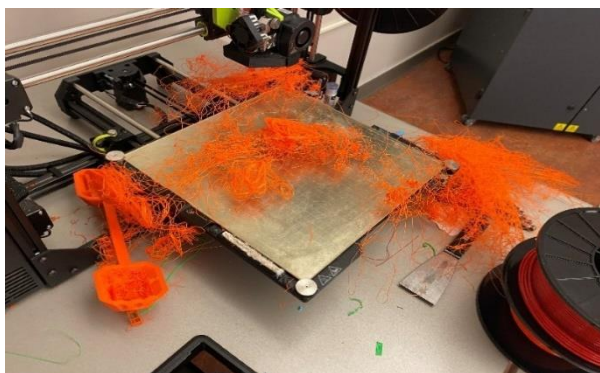


Figura 2.9 - Impressão falhada devido ao descolamento da peça impressa. Adaptado de [25].

Arrefecimento:

O arrefecimento do material depositado é uma situação de muita importância, pois após a deposição do material em estado viscoso é necessário que o mesmo entre em estado sólido para garantir o controlo dimensional. Um arrefecimento insuficiente pode comprometer a estabilidade e o controlo dimensional da peça impressa (Figura 2.10 (a) e (b)), enquanto um arrefecimento em excesso pode provocar uma situação de delaminação e/ou *warping* (Figura 2.10 (c)) onde, devido a baixa temperatura da camada anterior, as camadas vão ter uma fusão fraca [22, 26].

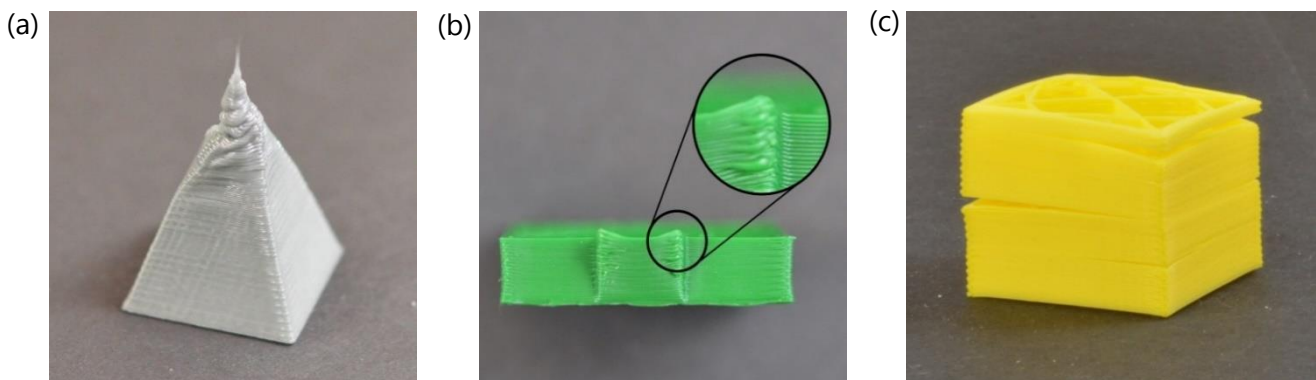


Figura 2.10 - Exemplos peças impressas com arrefecimento insuficiente (a) e (b) e em excesso (c). Adaptado de [22].

Diâmetro do bico de extrusão:

Este parâmetro é onde se define o diâmetro do furo no bico de extrusão. Este parâmetro é muito importante para a configuração do *Slicer*. A Figura 2.11 lista os diferentes diâmetros que um operador pode escolher. Quanto mais pequeno for o diâmetro do furo, melhor vai ser a resolução da peça impressa, conseguindo imprimir pormenores de menor dimensão, mas provocando o aumento do tempo de impressão e diminuindo a velocidade de extrusão máxima [28]. Este efeito é possível observar na Figura 2.12.



Figura 2.11 - Diferentes diâmetros do furo do bico de extrusão. Adaptado de [27].



Figura 2.12 - Diferença na resolução entre bico de extrusão de 0.4 mm e 0.25mm. Adaptado de [28].

Altura das camadas de impressão:

É este parâmetro que define a resolução na direção vertical da peça a ser impressa e está diretamente relacionado com o diâmetro do bico de extrusão. Como regra geral a altura das camadas não deve estar entre 10% a 80% do diâmetro do bico de extrusão [29]. A Figura 2.13 mostra o efeito da altura das camadas de impressão na resolução da direção vertical.

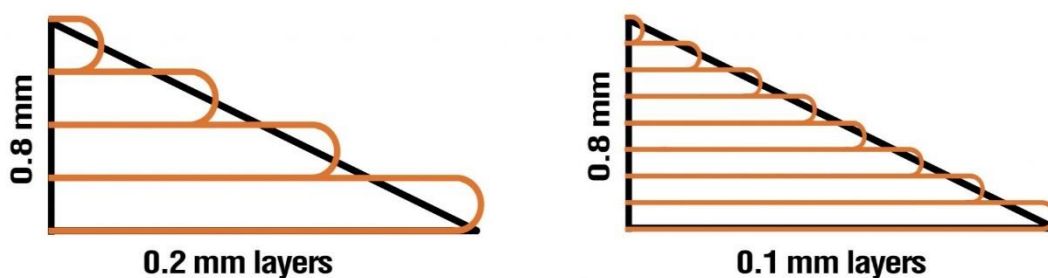


Figura 2.13 - Resoluções verticais em diferentes alturas de camadas. Adaptado de [28].

Enchimento e Número de perímetros:

Estes parâmetros definem a estrutura interna da peça impressa. O enchimento define a densidade e o tipo de padrão da estrutura interna, podendo ser oca ou completamente cheia. O número de perímetros define a grossura da parede que separa o enchimento do exterior. A grossura é controlada pelo número de perímetros interiores gerados [29]. A Figura 2.14 permite visualizar os efeitos de diferentes valores do enchimento e número de perímetros na estrutura interna da peça impressa.

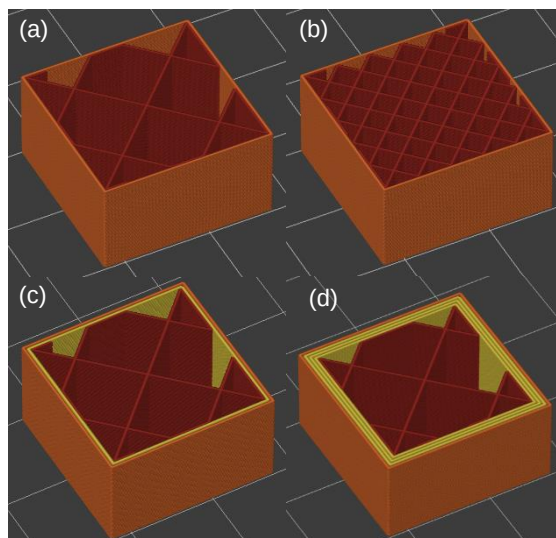


Figura 2.14 - (a) 10% de enchimento Grid; (b) 30 % de enchimento Grid; (c) 2 perímetros; (d) 4 perímetros. Esta imagem foi criada através do programa *PrusaSlicer*.

2.1.5. Tipos de Impressoras 3D *FDM*

Atualmente no mercado existe uma grande variedade impressoras 3D *FDM*, mas as diferenças mais importantes entre elas são o seu sistema de movimentação e o tipo de sistema de extrusão.

Sistemas de movimentação

Os sistemas de movimentação mais comuns no mercado são o sistema *C* artesiano, o sistema *CoreXY* e o sistema *Delta* [30].

Sistema Cartesiano:

Este tipo de impressora 3D *FDM* utiliza coordenadas cartesianas (*X*, *Y*, *Z*) para controlar os movimentos num espaço tridimensional [31]. Neste sistema a cabeça de extrusão tem movimento na direção do eixo *X* e a mesa de trabalho tem movimento na direção do eixo *Y*. As vantagens deste sistema são a sua simplicidade e facilidade de manutenção. Uma desvantagem deste sistema é necessário dar espaço extra na direção do eixo *Y* devido ao movimento da mesa de trabalho, logo a máquina ocupa mais espaço do que o seu volume total. Este sistema é indicado para quem procura um sistema simples e sem limitações de espaço [32]. A Figura 2.15 apresenta um exemplo de uma impressora de sistema *i3*.



Figura 2.15 - Impressora de sistema Cartesiano *Prusa mk3s* de *Prusa Research*. Adaptado de [32].

Sistema *CoreXY*:

Este tipo de impressora 3D *FDM* também utiliza coordenadas cartesianas (*X*, *Y*, *Z*) para controlar os movimentos num espaço tridimensional, sendo que neste sistema é a cabeça de extrusão que tem movimento nas direções do eixo *X* e *Y*. A maior vantagem deste sistema é a sua boa relação entre as dimensões do espaço de impressão e as dimensões externas da máquina. Uma desvantagem deste sistema é a sua elevada complexidade, dificultando a sua manutenção, tal como é possível observar na Figura 2.16.

Este sistema é indicado para quem procura um maior volume de impressão num espaço confinado e sem preocupações da complexidade do sistema [32, 34]. Na Figura 2.17 apresenta-se um exemplo de uma impressora 3D *FDM CoreXY*.

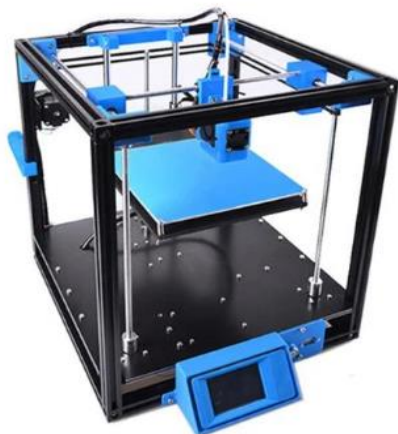


Figura 2.16 - Exemplo de uma impressora 3D *FDM CoreXY*. Adaptado de [35].

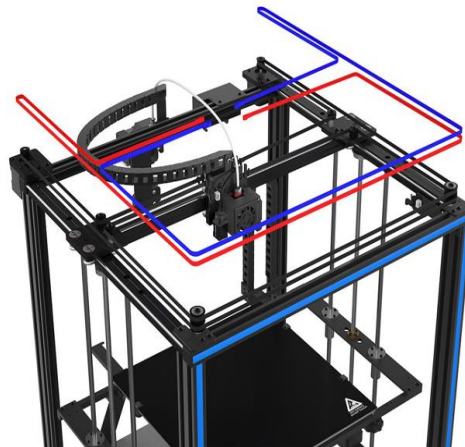


Figura 2.17 - Complexidade do sistema de movimentação de uma impressora 3D *FDM CoreXY*. Adaptado de [34].

Sistema Delta:

Neste tipo de impressora 3D *FDM* (Figura 2.18) a cabeça de extrusão é apoiada por três braços que se movimentam na vertical em três postes da estrutura. A Figura 2.19 é o esquema de movimentos deste tipo de impressora 3D *FDM*, onde é a combinação dos movimentos verticais dos três braços que permite o movimento da cabeça de extrusão num plano horizontal. Uma das vantagens deste sistema é, devido ao baixo peso da cabeça de extrusão, a possibilidade de altas velocidades de deposição de material, mas uma grande desvantagem deste tipo de máquina é, devido aos cálculos necessários para a movimentação dos três braços, é necessário um controlador eletrónico de alta velocidade, aumentando o custo de fabrico da máquina de impressão [12]. Este sistema é indicado para quem pretende fazer impressões com alta taxa de deposição, mas não pretende fazer peças de grandes dimensões [36], [37].

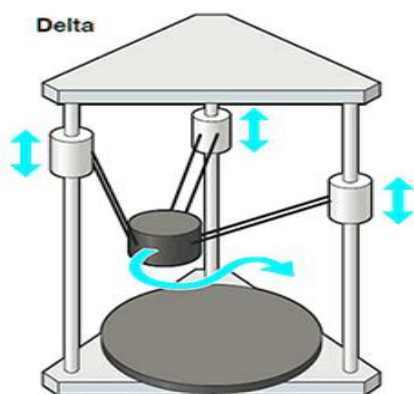


Figura 2.18 - Exemplo de uma impressora 3D *FDM Delta*. Adaptado de [38].



Figura 2.19 - Exemplo de uma impressora 3D *FDM Delta*.

Sistemas de extrusão

Atualmente, no mercado, as impressoras 3D *FDM* podem ter um de dois tipos diferentes de sistemas de extrusão, estes são o sistema *Bowden* e o sistema *Direct Drive*. A maior diferença entre estes dois sistemas é a posição do elemento motor de alimentação do filamento. Cada um tem as suas vantagens e são adequados para situações diferentes [39].

Sistema de extrusão *Bowden*:

Neste sistema de extrusão o motor de alimentação é montado separadamente da cabeça de extrusão (Figuras 2.20 e 2.21). Devido ao afastamento do elemento motor de alimentação do filamento da cabeça de extrusão é necessário a utilização de um elemento de ligação mais comprido. Neste caso usa-se um tubo com baixo atrito em politetrafluoretileno (*PTFE*) e com um diâmetro interno muito próximo do diâmetro do filamento [40].

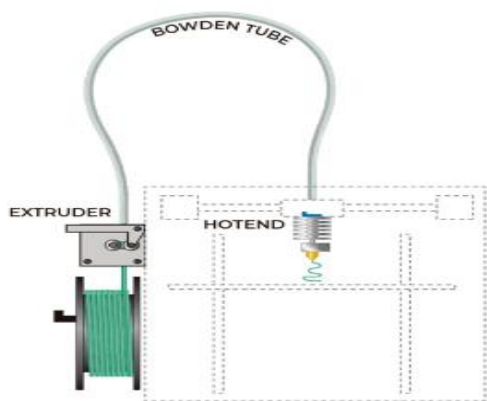


Figura 2. 20 - Esquema de uma impressora 3D FDM Bowden. Adaptado de [40].

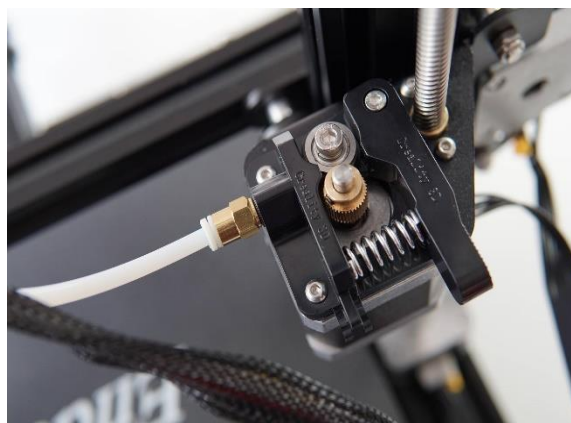


Figura 2.21 - Extrusor Bowden da impressora *Creality Ender 3*. Adaptado de [41].

As principais vantagens deste sistema são a possibilidade de construir uma cabeça de extrusão com massa baixa, assim permitindo maiores taxas de deposição sem perder qualidade de impressão e a facilidade de manutenção [42].

Este sistema de extrusão é mais sensível a erros de projeto devido ao maior percurso que o material de impressão tem de percorrer até chegar à cabeça de impressão. Por exemplo, se o extrusor tiver uma abertura indevida que permita o filamento deslocar-se por ela com menor esforço do que pela direção de alimentação desejada então vai haver uma falha de alimentação do material, nesta situação o material tem um comportamento semelhante à eletricidade num circuito elétrico, está sempre à procura do caminho de menor resistência. Esta situação é exacerbada com o uso de materiais flexíveis devido à sua facilidade de mudar a sua forma para se deslocar por aberturas indesejadas. Logo, neste sistema, há uma maior probabilidade de falha de impressão e é mais limitado no tipo de filamentos que é possível utilizar. Este tipo de sistema de extrusão também é mais sensível aos parâmetros de impressão de retração, devido à distância entre o motor extrusor e a cabeça de extrusão [43].

Sistema Direct Drive:

Neste sistema de extrusão o motor de alimentação é montado na cabeça de extrusão (Figura 2.22). Devido à proximidade do elemento motor à cabeça de extrusão o elemento de ligação entre os dois tem menor comprimento, o que facilita a passagem do material de impressão pelo elemento de ligação [42].



Figura 2.22 - Extrusor *Direct Drive* da impressora *Prusa mk3*. Adaptado de [44].

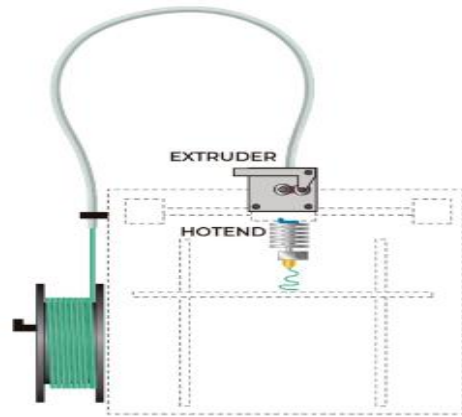


Figura 2.23 - Esquema de uma impressora 3D *FDM Direct Drive*. Adaptado de [40].

As principais vantagens deste sistema são a maior fiabilidade de impressão e o maior número de materiais que são possíveis de usar. Devido ao motor de alimentação estar montado no cabeça de extrusão este conjunto vai ter mais massa que o sistema *Bowden*, logo vai ter mais inércia o que dificulta as acelerações e as desacelerações, necessitando mais potência dos elementos motores, o que pode criar vibrações na estrutura que vão comprometer a qualidade e o controlo dimensional da peça impressa [43, 44].

2.1.6. Impressora 3D *FDM* Utilizada

Na fase de escolha da impressora 3D *FDM* a adquirir tem-se de ter em mente a grande variedade de máquinas no mercado, sendo que a escolha final deve ser fundamentada pelos requisitos que se pretendem cumprir pela máquina. Os requisitos mais importantes são: Volume de impressão, tipo de sistema de movimento, material de impressão e o tipo de sistema de extrusão.

A máquina adquirida para realizar o estudo desta dissertação foi a impressora 3D *FDM* chamada “*RAISE3D E2*”, que tem um tipo de sistema de movimentação chamado *IDEX* (*Independent Dual Extrusion System*), que é uma variante do sistema de movimentação *i3*. O sistema *IDEX* consiste no uso de duas cabeças de extrusão direta independentes que se movimentam sob o eixo X, permitindo imprimir com duas cores ou dois materiais diferentes, ou mesmo imprimir duas peças iguais ao mesmo tempo. Esta impressora é completamente fechada, o que permite minimizar os efeitos dos fatores externos [45].

Características da impressora:

- Diâmetro do filamento: 1.75 mm
- Velocidade de movimentação das cabeças de extrusão: 30 – 150 mm/s
- Materiais suportados: *PLA / ABS / HIPS / PC / TPU / TPE / NYLON / PETG / ASA / PP / PVA / Glass Fiber Infused / Carbon Fiber Infused / Metal Fill / Wood Fill*
- Altura das camadas: 0.02 – 0.25 mm
- Diâmetro do Bico de extrusão: 0.4 mm
- Filtro: filtro *HEPA* com carvão ativado
- Formato do ficheiro suportado: *GCODE*
- SLICER: *IdeaMaker*

Tabela 2.1 - Dimensões e temperaturas máximas da impressora *RAISE3D E2*. Adaptado de [46].

Volume de impressão (X; Y; Z)		Temperatura máxima da superfície de impressão	Temperatura máxima Bico de extrusão
Extrusão unitária	Extrusão dupla	110°C	300°C
330;240;240 mm	295;240;240 mm		



Figura 2.24 - Impressora “*RAISE3D E2*” com sistema de movimentação *IDEX*. Adaptado de [46].

2.1.7. Impressão 3D vs. Injeção Plástica

A impressão 3D tem várias vantagens em relação à injeção plástica, mas a impressão 3D nem sempre é a melhor escolha. Os fatores mais importantes a considerar na fase de escolha do método de fabrico mais adequado são [46]:

- Volume de fabrico: número de peças fabricadas em relação ao tempo de produção.
- Investimento inicial: capital necessário investir em máquinas, moldes, operadores, etc.
- Custo de fabrico: custo de produção por peça.
- Flexibilidade: facilidade de fazer alterações na peça a ser produzida.
- Complexidade das peças fabricadas: capacidade de fabricar peças com geometrias complexas.

Volume de fabrico:

A impressão 3D é indicada para pequenos volumes de fabrico, no máximo 100 peças por série, devido ao elevado tempo de fabrico das peças por máquina. Ao contrário à impressão 3D a injeção plástica é indicada para grandes volumes de fabrico, 1000 ou mais peças por série [46]. A Figura 2.25 representa o custo de fabrico unitário de uma peça em função do tamanho do lote para a impressão 3D, a injeção plástica e a maquinação CNC.

A injeção plástica consegue ter ciclos de produção muito mais pequenos e com melhor repetibilidade. A repetibilidade é a capacidade de o método de fabrico produzir peças com dimensões, aspeto e comportamento mecânico consistentes e aceitáveis. O volume de fabrico pretendido é a condição mais importante para fazer uma escolha informada do método de fabrico a escolher [47].

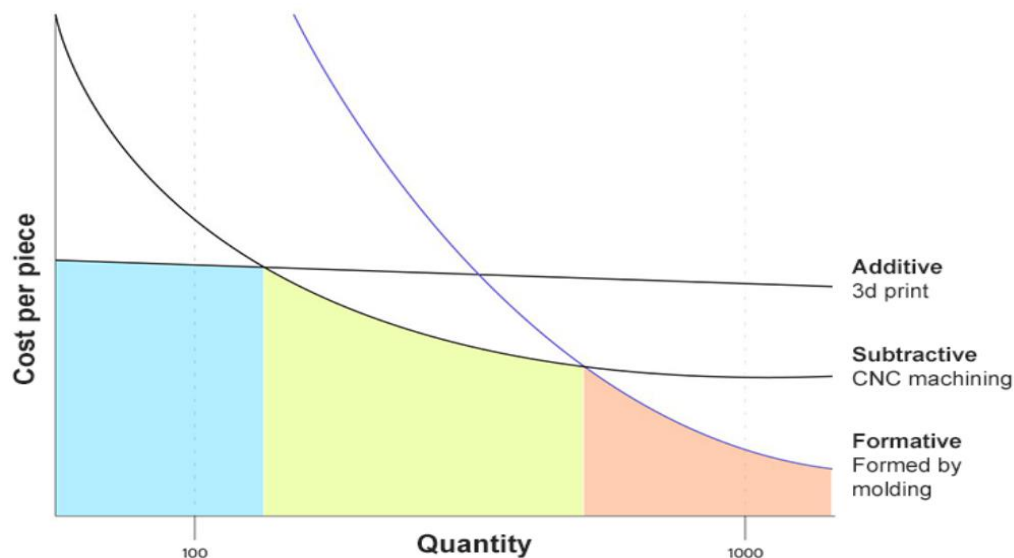


Figura 2.25 - Custo de unitário de uma peça em relação ao volume de fabrico e o método de fabrico. Adaptado de [47].

Investimento inicial:

O investimento inicial necessário para a impressão 3D *FDM* depende muito das necessidades do fabricante, mas não deixa de ser um dos métodos de produção com menor investimento inicial. O preço de uma impressora 3D *FDM* depende bastante dos tipos materiais, das dimensões das peças a produzir e da complexidade da própria impressora. O preço de uma impressora 3D *FDM* de pequenas dimensões e simples pode começar a partir dos 200€ (Figura 2.26 (a)), enquanto uma máquina profissional começa por volta dos 2500€ (Figura 2.26 (b)), sendo que as de maiores dimensões começam nos 4000€ e as industriais podem custar mais de 10000€ (Figura 2.26 (c)). Mas o preço da impressora 3D não é o único investimento que é necessário fazer, pois a mão de obra, os custos em matéria-prima, eletricidade e entre outros, também são custos que devem ser considerados [48].

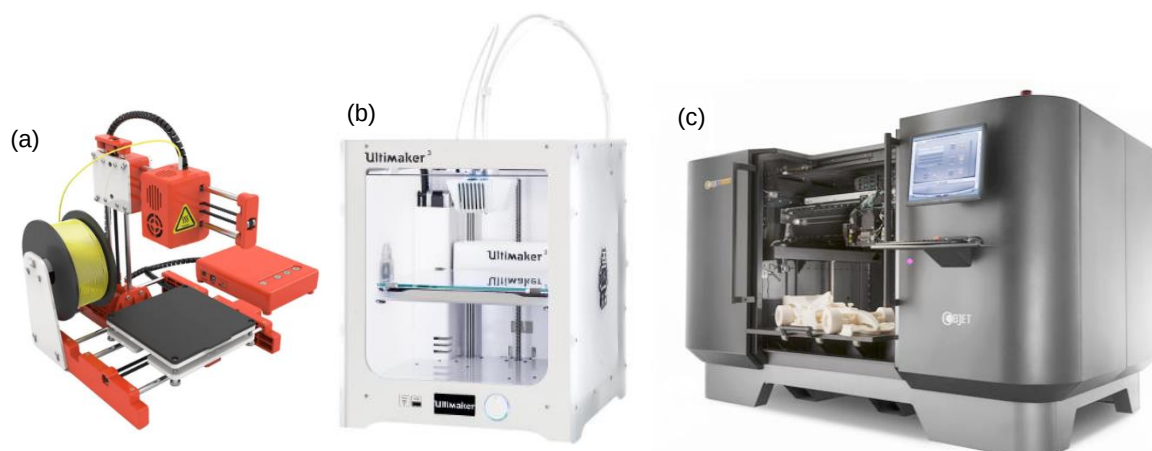


Figura 2.26 - Exemplos impressoras 3D simples (a), profissional (b) e industrial (c). Adaptado de [49], [50] e [51] respetivamente.

O investimento inicial na injeção plástica engloba a toda a infraestrutura, necessária para acolher a máquina, os moldes e os operadores qualificados. Este investimento pode rapidamente chegar às casas dos milhões devido ao alto custo das máquinas, do elevado número de moldes necessários dependendo das peças a fabricar e do alto nível de especialização dos operadores [52]. A Figura 2.27 apresenta um exemplo de uma máquina de injeção plástica, onde é visível a elevada complexidade e dimensões deste tipo de máquinas.



Figura 2.27 - Exemplo de uma máquina de injeção plástica. Adaptado de [53].

Custo de fabrico:

A impressão 3D tem a característica de ter um baixo custo de fabrico que é praticamente constante independentemente do número de peças fabricadas. No caso da injeção plástica a situação é completamente o contrário, devido ao elevado custo dos moldes necessários para iniciar a produção. Quanto maior for o número de peças fabricadas, mais facilmente se amortiza o custo dos moldes. Esta situação permite reduzir o custo de fabrico por peça, sendo possível chegar à situação da injeção plástica ter um custo de fabrico por peça inferior à impressão 3D [54, 55]. Este comportamento da injeção plástica é perceptível pela análise da Figura 2.28.

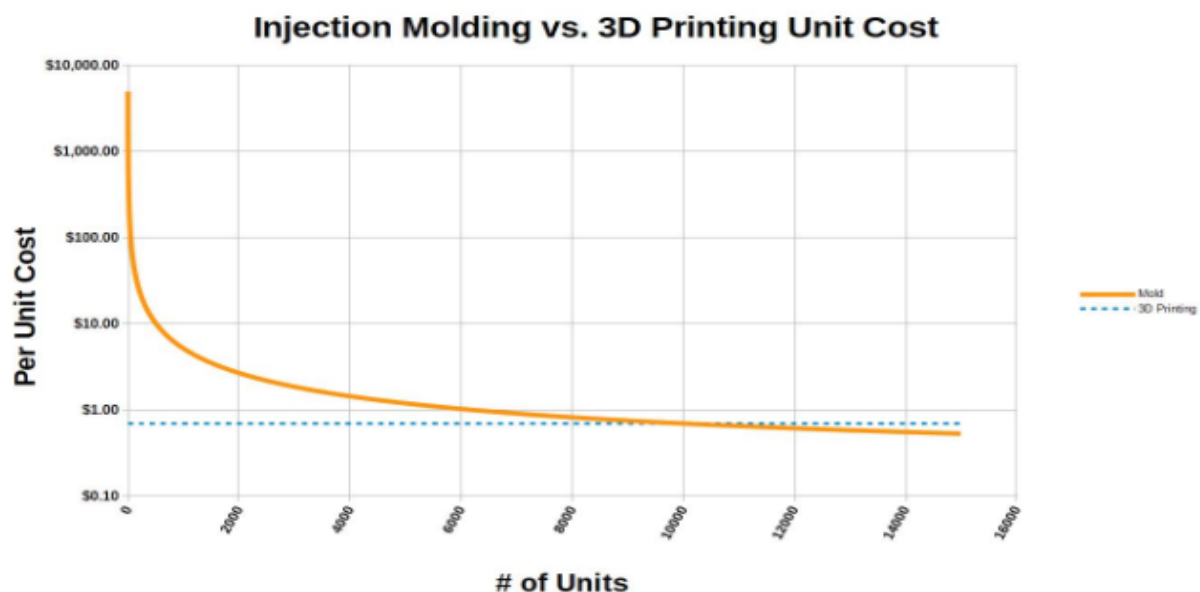


Figura 2.28 - Custo de fabrico unitário dependendo do tamanho da produção para injeção plástica e impressão 3D. Adaptado de [55].

Flexibilidade:

A impressão 3D tem a vantagem de ser bastante flexível. A mesma máquina consegue fabricar peças diferentes e/ou material diferente com tempos de preparação praticamente inexistentes. Logo, se for preciso fazer uma alteração na peça a fabricar, é muito fácil, rápido e barato de o fazer com a impressão 3D [56].

Na injeção plástica, devido ao uso de moldes, é muito pouco flexível. Se for necessário fazer uma alteração na peça vai ser necessário um novo molde, o que introduz um tempo de espera e um custo adicional [55].

Complexidade das peças fabricadas:

A capacidade de produzir peças de elevada complexidade é muito semelhante entre a impressão 3D e a injeção plástica, sendo a única diferença a alta complexidade da injeção plástica para igualar a impressão 3D. O fabrico de peças de geometrias complexas, internas ou externas, por injeção plástica necessita de moldes igualmente complexos e por vezes são necessários vários moldes diferentes, criando custos adicionais.

Por norma o método de fabrico é híbrido, sendo a impressão 3D utilizada na fase de prototipagem devido à sua alta flexibilidade e baixo investimento inicial e, quando o volume de série o permite, a injeção plástica para a produção final.

2.2. Sensor

A definição de um sensor, pela Merriam-Webster, é o dispositivo que responde a um estímulo físico (como por exemplo calor, luz, som, pressão, magnetismo, movimento particular) e transmite um impulso resultante (para medição ou controlo de operação) [57]. O sensor é um equipamento que é utilizado para medir e monitorizar estímulos externos, que podem ser de origem física, química, biológica, etc. O sensor deteta o estímulo e envia um sinal para ser interpretado por uma unidade de processamento. Dependendo do tipo de medição, os sensores podem ser de diferentes princípios físicos. Alguns tipos de sensor podem ser [58]:

- Sensor ótico
- Sensor capacitivo
- Sensor piezoelétrico
- Sensor de Hall-effect
- Sensor resistivo
- Sensor indutivo
- Sensor ultrassónico
- Sensor mecânico
- Sensor eletromagnético

Nesta dissertação o estudo dos sensores resistivos é de interesse, pois o seu funcionamento baseia-se na variação das propriedades elétricas de um dos seus componentes [58].

2.2.1. Sensor Resistivo

Atualmente este tipo de sensor é um dos mais utilizados, pois tem a capacidade de medir vários tipos de grandezas. A temperatura e deformações são exemplos de grandezas que podem ser medidas pelos sensores resistivos [59].

O funcionamento dos sensores resistivos baseia-se na leitura da variação da resistência elétrica dum eletrodo quando sujeito a um estímulo externo. A Equação (2.1) mostra a formulação da *Lei de Ohm* para calcular a resistência elétrica.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Sendo R , V e I respetivamente, resistência elétrica (ohm), tensão elétrica (volte) e intensidade da corrente elétrica (ampere).

Pela Equação (2.2) é possível observar que a resistência elétrica do elétrodo é dependente das outras variáveis. Este é o conceito do funcionamento de um sensor resistivo [60].

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

Onde R , ρ , L e A respetivamente, resistência elétrica (ohm), resistividade elétrica (ohm.metro), comprimento do elétrodo (metro), área da secção transversal do elétrodo (metro²).

O extensómetro resistivo foi inventado por *Edward E. Simmons* e pelo Professor *Arthur C. Ruge*. Eles conceberam este tipo de sensor separadamente um do outro, pois este foi um resultado secundário das investigações que estavam a realizar na altura, devido à falta de equipamentos com precisão suficiente para fazer as medições que precisavam de realizar.

A Equação (2.3) relaciona a variação da resistência do elétrodo com a extensão sofrida pelo componente a que o extensómetro está acoplado [60].

$$GF = \frac{dR/R_0}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Onde GF , dR , R_0 e ε respetivamente, *gauge factor* (adimensional), variação da resistência elétrica (ohm), resistência elétrica inicial (ohm) e extensão (adimensional).

A equação (2.4) mostra como se realiza o cálculo da extensão [60].

$$\varepsilon = \frac{dL}{L_0} \quad (2.4)$$

Onde dL , L_0 respetivamente, variação do comprimento do componente a que o extensómetro está acoplado (metro), comprimento inicial do componente a que o extensómetro está acoplado (metro).

A combinação das Equações (2.3) e (2.4) permitem chegar à Equação (2.5) que o *gauge factor* com variação da resistência do elétrodo com a variação do comprimento do componente a que o extensómetro está acoplado [60].

$$GF = \frac{dR/R_0}{dL/L_0} \quad (2.5)$$

3. METODOLOGIA E PLANEAMENTO

Neste capítulo apresentam-se as estratégias de experimentação, os métodos de análise dos dados experimentais que serão obtidos pelos ensaios realizados ao longo desta dissertação e o planeamento temporal.

3.1. DoE (Design of Experiments)

A experimentação é o ato de aplicar *inputs* (fatores) num sistema ou processo e coletar os *outputs* que saem para futura análise. Uma boa estratégia de experimentação é importante para retirar conclusões corretas, pois a qualidade dos resultados depende bastante do método de coleção dos dados experimentais [3]. A estratégia de experimentação optou-se por utilizar nesta dissertação foi o *Design of Experiments* (DoE), pois permite, com o planeamento prévio das experiências, maximizar a quantidade de informação que é possível retirar dos resultados, sendo assim possível chegar a conclusões viáveis e objetivas [61].

O DoE é um conceito do ramo da estatística aplicada que lida com o planeamento, realização, análise dos ensaios para determinar quais fatores que afetam a resposta de um sistema [62].

O DoE permite a manipulação simultânea de múltiplas variáveis independentes, *inputs*, num sistema e observar as variáveis de saída dependentes, *outputs*, de modo a determinar como os *inputs* afetam os *outputs*. Esta manipulação simultânea de múltiplos *inputs* denomina-se por totalmente fatorial e promove a identificação de combinações de *inputs* que geram uma resposta mais favorável do que uma resposta onde os *inputs* foram otimizados individualmente sem considerar as interações entre eles [3, 62]. Uma experiência diz-se totalmente fatorial se todas as combinações de fatores e níveis forem consideradas, ao contrário de uma experiência de fração fatorial onde só certas combinações e níveis são estudadas. Os sistemas podem também ser afetados por fatores externos, sendo uns controláveis e outros não controláveis [3]. A Figura 3.1 apresenta um esquema de um sistema onde são aplicados *inputs*, fatores controláveis e não-controláveis e saem *outputs*.

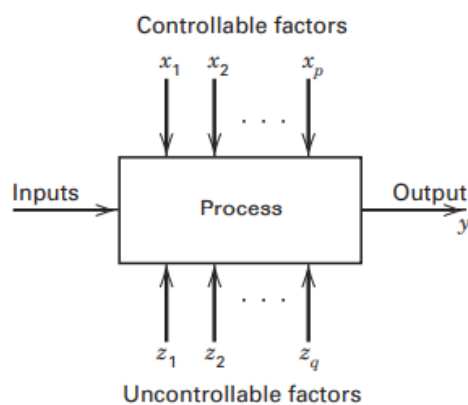


Figura 3.1 - Modelo esquemático de um sistema. Adaptado de [3].

Esta estratégia de experimentação é muito utilizada durante a fase de concepção de um novo produto e do seu fabrico, mas também é usada para melhorar e otimizar um produto já existente e o seu fabrico [3].

Os objetivos da experimentação podem ser [3, 63]:

- Identificar os *inputs* com maior impacto nos *outputs*, *screening*
- Identificar a combinação de *inputs* que gera a melhor resposta possível
- Determinar os valores dos fatores externos controláveis para estabilizar os *outputs* perto do valor ideal
- Determinar os valores dos fatores externos controláveis para minimizar os efeitos dos fatores externos não controláveis
- Desenvolver um sistema robusto, isto é, um sistema estável perante a variação de fatores externos

Existem vários tipos de *DoE* que cumprem objetivos diferentes, sendo a sua determinação altamente importante [3]. O *DoE*, dependendo dos objetivos da experiência, pode ser de um dos seguintes tipos: de comparação de hipóteses, de *screening* de fatores, de metodologia da superfície de resposta e de modelo de regressão [64].

O *DoE* baseia-se em três princípios chave [3, 62]:

- Aleatoriedade: a combinação dos *inputs* e a sequência de experimentação são aleatórias, de modo que os efeitos nos *outputs* criados pelos fatores não controláveis ou desconhecidos sejam distribuídas por todas as experiências;
- Replicabilidade: a repetição de todas as combinações de *inputs* e dos ensaios assegura a replicabilidade da origem de variações internas e externas ao sistema.
- Divisão em blocos: quando não é possível garantir a estabilidade de um dos fatores ou quando a sua aplicação aleatória é impossível ou demasiado cara, é necessário dividir esse fator em dois ou mais grupos, dependendo do número de estados que esse fator toma. Fazendo a análise de cada grupo garante-se homogeneidade de condições de cada grupo, assim a variância dos resultados em cada grupo será menor, comparando com a variância dos resultados entre grupos.

A sequência de passos do *DoE* são [3]:

1. Reconhecimento e confirmação do problema
2. Seleção das variáveis de resposta
3. Escolha dos fatores, níveis e alcance
4. Escolha do design de experiência
5. Execução da experiência
6. Análise qualitativa ou estatística dos resultados
7. Conclusões e recomendações

Quando um sistema é recente e/ou não há muita informação/conhecimento sobre o mesmo é importante realizar um *screening* prévio ao passo 3, utilizando um maior número de fatores e um número de níveis menor, servindo para detetar os fatores principais e não para determinar as interações entre fatores [3, 63].

A definição do alcance dos valores que os fatores podem adotar tem grande importância, pois o uso de valores incorretos pode levar a respostas longe da zona ótima. Esta determinação deve ser fundamentada em informação disponível sobre o sistema e a experiência prévia do experimentador [65].

3.1.1. Metodologia da Superfície de Resposta

A Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que servem para criar um modelo que é uma aproximação do comportamento real de um sistema. Isto é possível através da adaptação de uma função polinomial aos fatores de entrada, *inputs*, e às respostas, *outputs*. Esta função polinomial pode ser linear, quadrática ou cúbica, sendo que as variáveis independentes representam os fatores, *inputs* [61].

Antes de aplicar a MSR é necessário saber quantos fatores vão ser estudados, de modo a saber que tipo de técnica da MSR se deve utilizar. Se o número de fatores, que têm interesse no estudo, for superior a cinco é necessário fazer um *screening* prévio à MSR [65, 66]. Esta é uma das razões pelo qual o *screening* prévio ao *DoE* é tão importante, ele não só nos diz quais os fatores de entrada mais importantes, mas possivelmente também como o sistema reage aos diferentes níveis dos fatores [69].

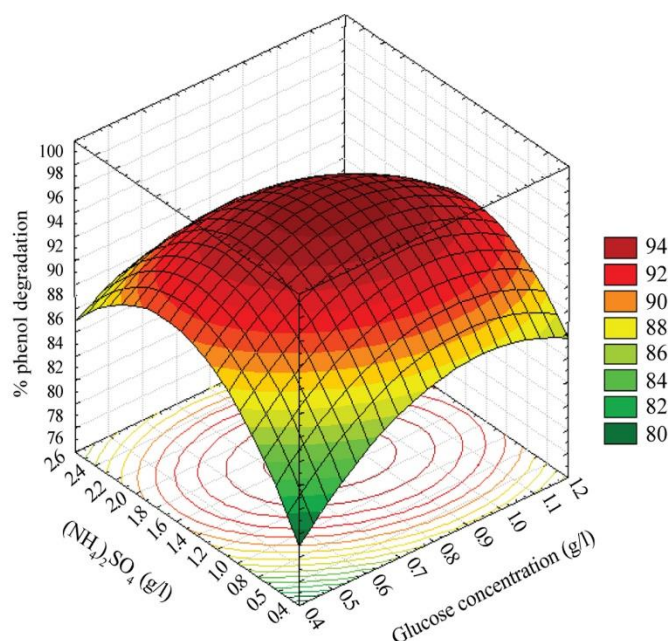


Figura 3.2 - Exemplo de uma superfície de resposta. Adaptado de [66].

Visto que os fatores vão ser aplicados de forma fatorial o método utilizado para obter a superfície de resposta vai ser o *Box-Wilson Central Composite Design*, ou mais conhecido por *Central Composite Design (CCD)* [64].

3.1.2. Central Composite Design (CCD)

Na estatística o *CCD* é um *design* de experiências muito usado para construir um modelo de segunda ordem (quadrático), que é composto por pontos fatoriais, centrais e axiais. Os objetivos do *CCD* é determinar os valores dos níveis dos fatores e todas as suas combinações possíveis. Os pontos fatoriais são as combinações possíveis dos valores limite dos fatores. Os pontos axiais são os valores de fatores que se localizam fora do seu domínio previsto. Por exemplo de a temperatura de extrusão de um dado filamento for 230°C um ponto axial pode ser 220°C. Os pontos centrais são a média dos valores limite de cada fator. Estes pontos podem ser representados num referencial de duas dimensões. Na Figura 3.3 os pontos fatoriais e os pontos axiais representam-se por pontos azuis e estrelas vermelhas, respetivamente. Os pontos centrais encontram-se no centro do círculo formado pelos pontos fatoriais e axiais [68, 69].

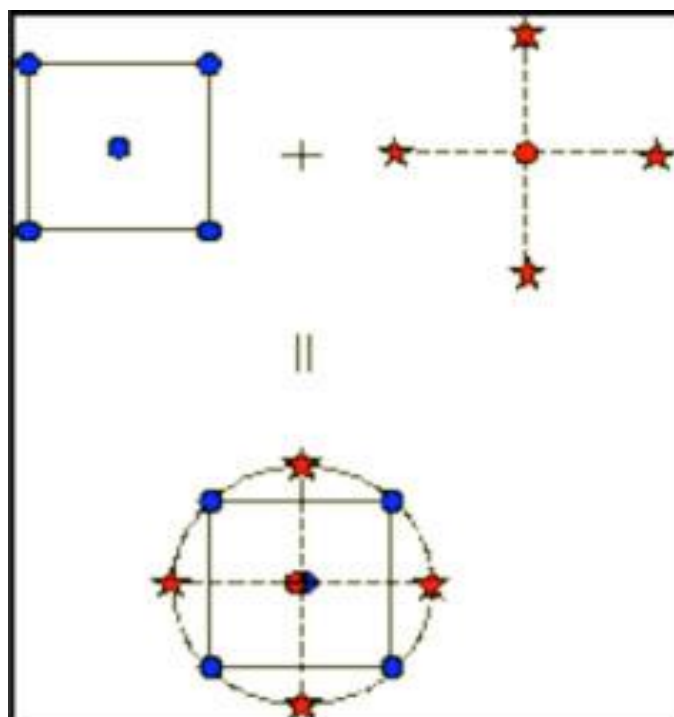


Figura 3.3 - Geração de um *CCD*. Adaptado de [68].

Sendo k o número de fatores de entrada e N_0 o número de pontos centrais, o número de experiências, N_e , a realizar é dado pela Equação (3.1) [68].

$$N_e = 2^k + 2k + N_0 \quad (3.1)$$

Considerando α como a distância entre os pontos estrela e os pontos centrais, o *CCD* pode ser de um dos três tipos apresentados na Tabela 3.1 [68, 79].

Tabela 3.1 - Tipos de CCD com respectivas descrições e representação para dois fatores. Adaptado de [67, 68].

Tipo de design	Descrição	Representação
Circunscrito (CCC)	Os pontos estrela estão fora do domínio experimental inicial. Este modelo necessita de cinco níveis por fator: $\{-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha\}$	
Face Centrada (CCF)	Neste tipo de <i>design</i> os pontos estrela estão no centro de cada face do espaço fatorial, logo é apenas necessário três níveis: $\{-1, 0, +1\}$	
Inscrito (CCI)	Este tipo <i>design</i> é usado quando não é possível sair do domínio experimental. Este modelo pode ser visto como um CCC em que todos os fatores foram divididos por α , ficando os níveis por fator: $\{-1, -\alpha, 0, +\alpha, +1\}$	

Para três fatores, os pontos do *design* de tipo CCC descrevem uma esfera que circunscreve um cubo fatorial [69]. A rotatividade é uma propriedade desejável de *design* CCD para a metodologia da superfície de resposta [68]. Esta propriedade significa que diferentes combinações dos fatores ao mesmo nível vão ter a mesma variância de resultados [68, 69]. Esta propriedade pode ser explicada a partir da Figura 3.4. Experiências que tenham as combinações dos fatores no círculo vermelho vão ter a mesma variância, o mesmo acontece no círculo verde.

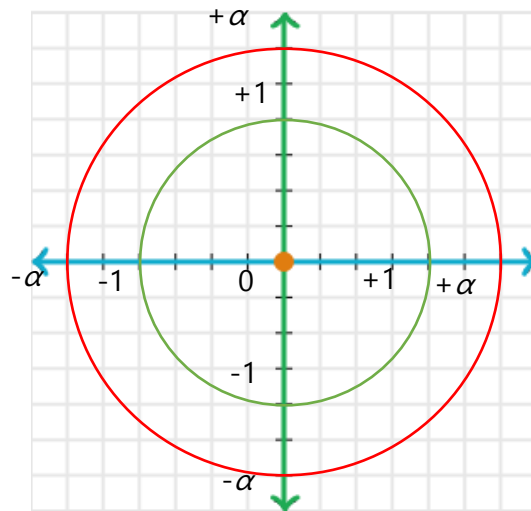


Figura 3.4 - Rotatividade no espaço fatorial.

Para manter a rotatividade, o valor de α tem de depender do número de experiências a realizar, logo se o experimentador estiver a planear uma experiência totalmente fatorial, valor de α pode ser calculado através a Equação (3.2) [68],[69].

$$\alpha = [2k]^{1/4} \quad (3.2)$$

3.2. Ensaios Experimentais

Neste subcapítulo apresenta-se os ensaios experimentais que foram realizados no decorrer desta dissertação.

3.2.1. Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica

Estes ensaios foram realizados na fase inicial para determinar como os parâmetros de impressão influenciam a condutividade elétrica dos provetes. Estes ensaios permitiram avaliar a variação da resistência elétrica dos vários provetes em função da extensão de deformação, assim determinando como os parâmetros de impressão influenciam a variação da resistência elétrica dos provetes. Devido ao grande número de parâmetros nesta fase do estudo, é vantajoso minimizar o número de ensaios a realizar.

Para minimizar o número de ensaios realizados, reduziu-se valores que os parâmetros podem assumir, por exemplo permitir o valor mínimo e máximo possíveis [3]. Para avaliar o sentido do desenvolvimento da resistência elétrica com a variação dos parâmetros de impressão é importante comparar os resultados de provetes que tenham os mesmos parâmetros de impressão exceto os que estão a ser estudados.

Parâmetros partilhados pelos três provetes:

- Aquecimento da mesa de trabalho: desabilitado
- Velocidade de ventoinha: 80%
- Diâmetro do bico de extrusão: 0.4 mm
- Enchimento: 100% Lines
- Número de perímetros: 2

Os parâmetros escolhidos para estudar foram a "Altura de Camadas", a "Orientação de Impressão" e a "Orientação das Linhas de Impressão". Após terem sido determinados o nível ideal destes três parâmetros observou-se a necessidade de estudar um quarto parâmetro de impressão, pois observou-se que era de interesse reduzir o número e tamanho dos vazios no interior dos provetes. O quarto parâmetro escolhido foi o "Multiplicador de Extrusão". Foram estes os parâmetros que foram escolhidos pois considerando conhecimento prévio e o estado da arte conclui-se serem estes os parâmetros que mais poderão afetar a curva tensão/extensão e a curva resistência elétrica/extensão dos provetes.

- Altura de Camadas: Este parâmetro afeta diretamente o número de camadas que formam os provetes. Um número menor de camadas porem também significa que vai haver menos descontinuidades entre camadas, assim teorizando-se que a altura de camadas vá afetar diretamente a resistência elétrica dos provetes. Teoriza-se que estes efeitos serão cada vez mais fortes o quanto maior for o ângulo entre o provete e o plano horizontal (Orientação de Impressão)

- Orientação de Impressão: Teoriza-se que quanto menor for o ângulo que o provete faz com o plano horizontal, maior vai ser tensão de cedência do provete, pois as camadas de impressão vão-se aproximando da direção do esforço. Mas poderá ocorrer efeitos interessantes de estudar quando a orientação de impressão é maior que 0° .

Nas Figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 é possível observar como as diferentes combinações de altura de camadas e orientação de impressão podem afetar a configuração das camadas dos provetes.



Figura 3.5 - 80° ; 0.2 mm

Figura 3.6 - 80° ; 0.3 mm



Figura 3.8 - 10° ; 0.2 mm

Figura 3.7 - 10° ; 0.3 mm

- Orientação das Linhas de Impressão: Este parâmetro poderá ter um efeito semelhante ao anterior. Teoriza-se que quando mais horizontal for o provete, maior vai ser o efeito da orientação das linhas de impressão nos resultados.

Nas Figuras 3.9 e 3.10 é possível observar como a orientação das linhas de impressão pode afetar a resistência dos provetes à tração.

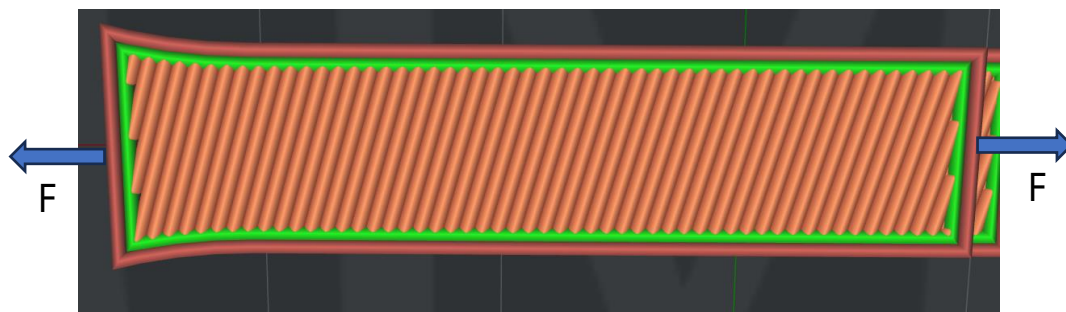


Figura 3.9 - 10° ; 0.2 mm; 15°

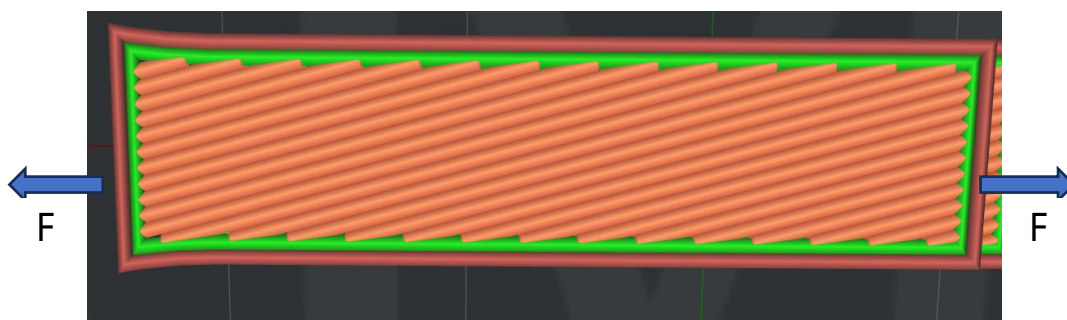


Figura 3.10 - 10°; 0.2 mm; 75°

- Multiplicador de extrusão: Este parâmetro controla deposição do material de impressão. Quanto maior for a percentagem deste parâmetro mais material vai ser depositado. Prevê-se que uma boa configuração deste parâmetro poderá minimizar os vazios no interior dos prove-tes.

3.2.2. Provete de Ensaio de Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica

Nas Figuras 3.11 e 3.12 está representado o provete utilizado durante o Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica.

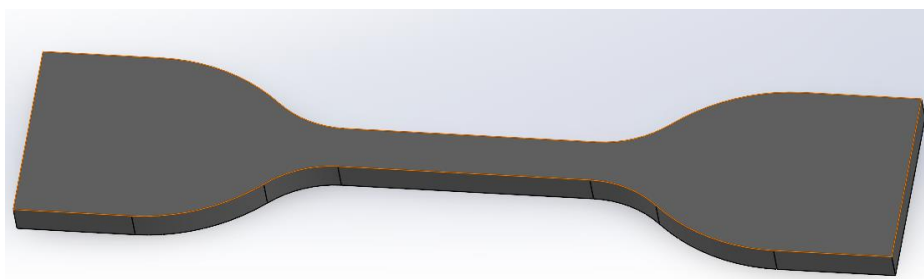


Figura 3.11 - Provete de Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica.

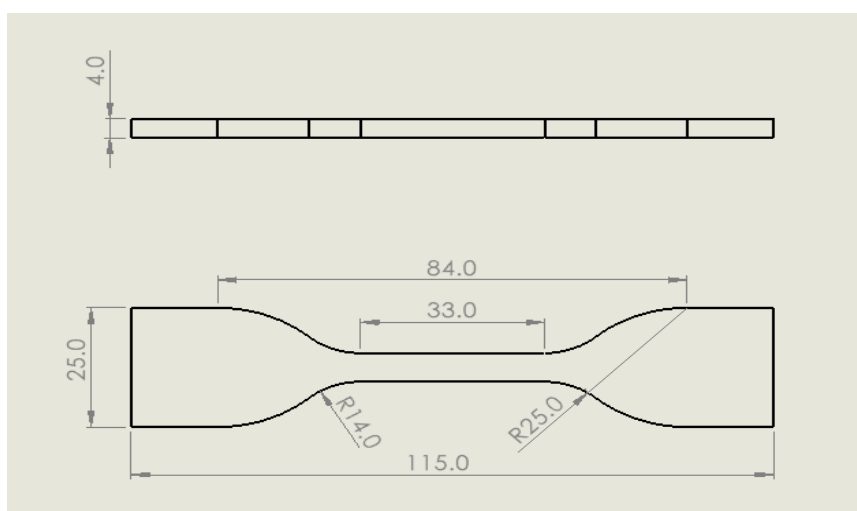


Figura 3.12 - Cotação do provete de Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica. Norma ISO 527-3:1995(E) type 5.

Inicialmente, como é observável nas Figuras 3.13 e 3.14, o *infill* dos provetes era reticular (ziguezague), mas após os ensaios conclui-se que este tipo de *infill* não proporcionava a melhor resistência mecânica e condução elétrica possíveis. Após esta observação decidiu-se realizar novos ensaios para testar os provetes com *infill* do tipo concêntrico, Figuras 3.15 e 3.16, pois previu-se que orientando as linhas de impressão do *infill* na mesma direção que a das forças de tração os provetes teriam melhor resistência mecânica.

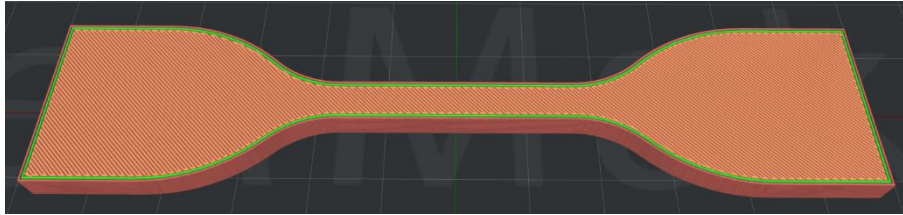


Figura 3.13 - Provete de tração horizontal de tração inicial.

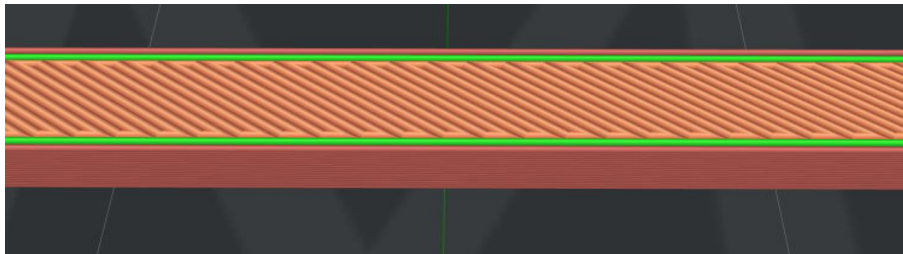


Figura 3.14 - Zona de estricção do provete horizontal de tração inicial.

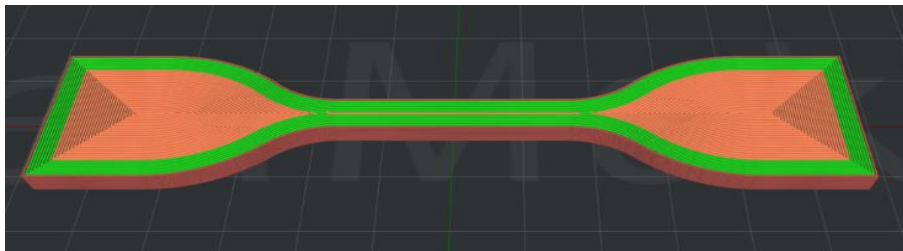


Figura 3.15 - Provete com *infill* concêntrico horizontal.

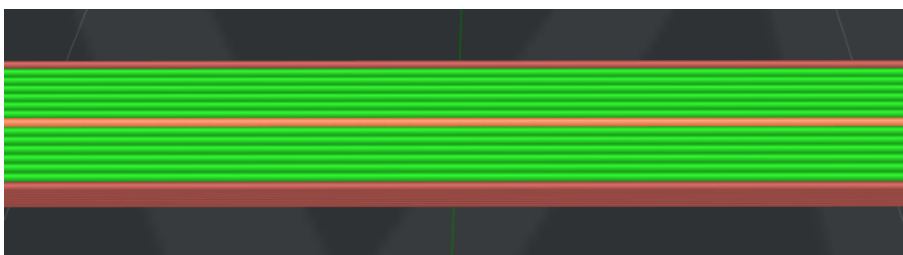


Figura 3.16 - Zona de estricção do provete horizontal com *infill* concêntrico horizontal.

Após os ensaios de tração dos provetes horizontais com *infill* do tipo concêntrico conseguiu-se obter tensões máximas muito superiores às dos provetes com *infill* do tipo reticular, mas a falha dos provetes deixou de ocorrer na zona de estricção, o que não pode acontecer pois inviabiliza os ensaios de tração. Para evitar que a falha dos provetes ocorresse fora da zona de estricção procurou-se aumentar a ligação entre as linhas de impressão da zona onde as garras da Bancada de Ensaio de Tração predomina os provetes. Como, quando se testou os provetes com *infill* reticular, a falha ocorria na zona de estricção, testou-se outra vez provetes com *infill* reticular, mas com um número de perímetros

suficientemente alto para fazer que a zona de estricção seja só composta por perímetros, assim mantendo as linhas de impressão com a mesma direção que os esforços de tração. Nas Figuras 3.17 e 3.18 observa-se os provetes com *infill* reticular com 7 perímetros.

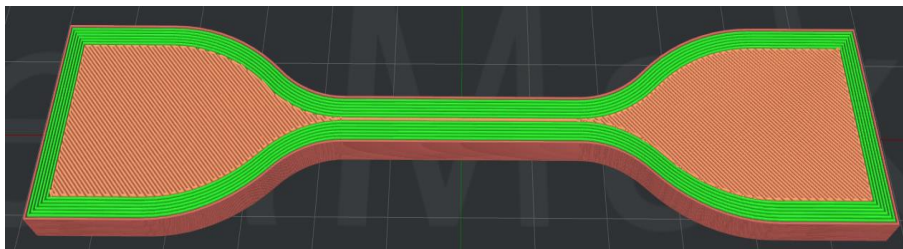


Figura 3.17 - Provete com *infill* reticular com 7 perímetros.

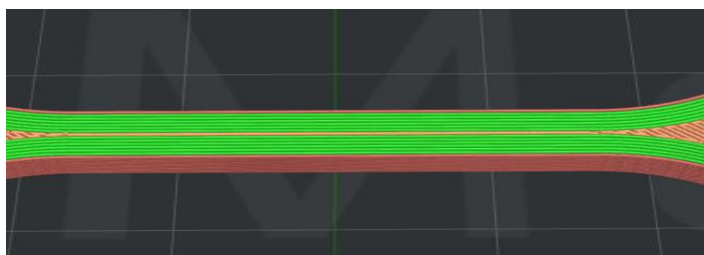


Figura 3.18 - Zona de estricção do provete com *infill* reticular com 7 perímetros.

3.2.3. Provete de Ensaio de Histerese

Os provetes utilizados para os Ensaios de Histerese são diferentes aos usados nos Ensaios De Tração, visto que apenas uma pequena parte do provete é feito do material flexível condutor, sendo que a outra parte é feita filamento flexível normal. Estes Ensaios só foram realizados após a determinação dos valores ótimos dos parâmetros de impressão em estudo. Por sua vez os provetes também são diferentes. As superfícies pretas destacadas por círculos vermelhos na Figura 3.19 permitirão a ligação entre os contactos de cobre da bancada e a componente condutora do provete durante os ensaios.

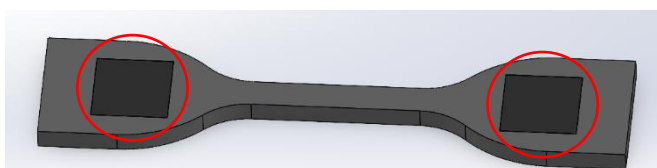


Figura 3.20 - Provete de Ensaio de Histerese.

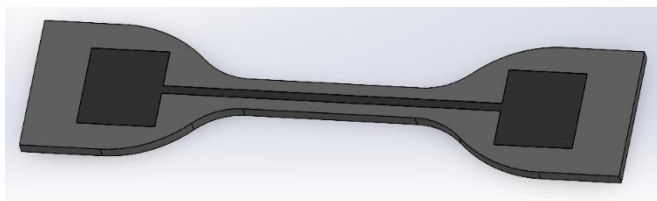


Figura 3.21 - Corte de topo do Provete de Ensaio de Histerese.

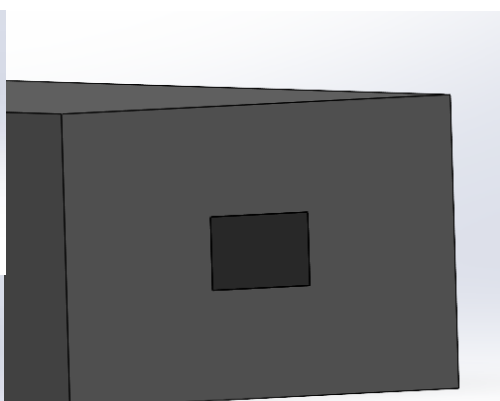


Figura 3.19 - Corte perpendicular do Provete de Ensaio de Histerese.

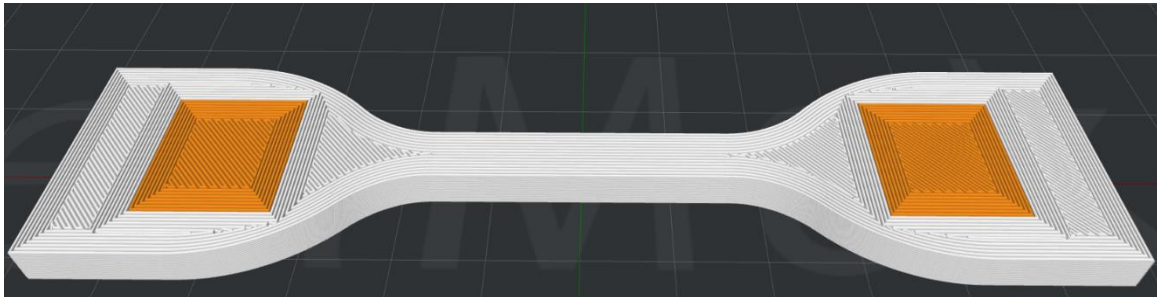


Figura 3.22 - Provete de Ensaio de Histerese no programa de fatiamento (ideaMaker). *TPU normal* (branco); *TPU condutor* (amarelo).

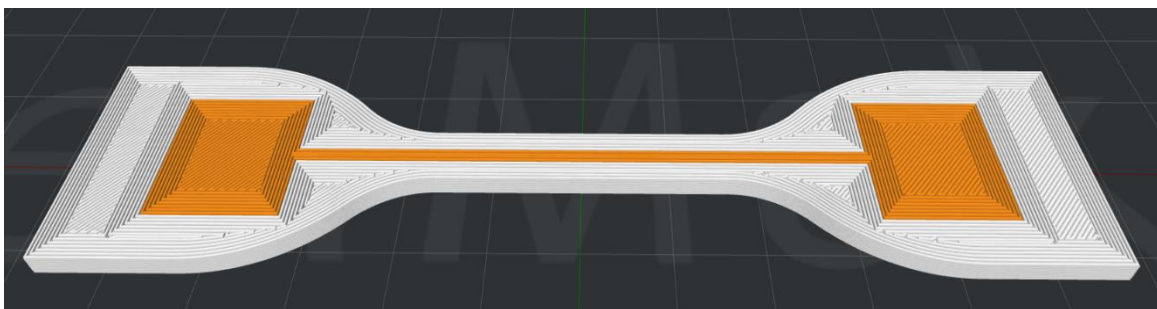


Figura 3.23 - Corte de topo do Provete de Ensaio de Histerese no programa de fatiamento (ideaMaker). *TPU normal* (branco); *TPU condutor* (amarelo).

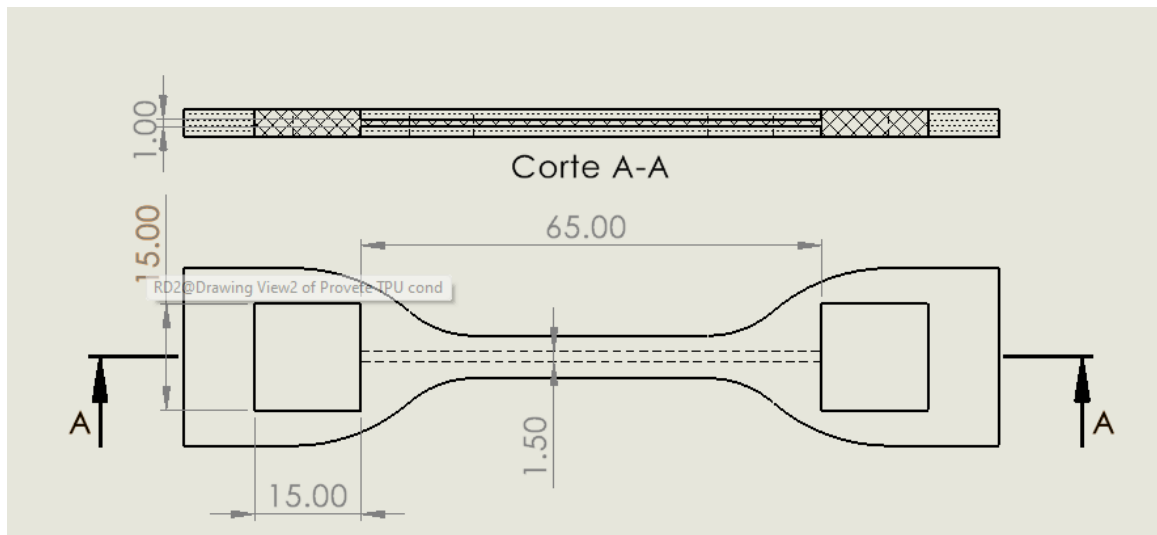


Figura 3.24 - Cotação do provete de Ensaio de Histerese. Norma ISO 527-3:1995(E) type 5

3.2.4. Bancada de Ensaio de Tração

A Bancada de Ensaio de Tração utilizada no decorrer deste estudo foi projetada pelo autor desta dissertação e pelo bolsheiro João Mota, com o objetivo de registar o valor da força de tração, da extensão da deformação do provete e da resistência elétrica do provete.

Esta Bancada é controlada por um *Arduino UNO* ligado a uma *CNC Shield* que permite controlar dois motores passo-a-passo, que estão acoplados à Bancada por uma caixa redutora com um rácio de 3.8:1. O deslocamento e a resistência elétrica são adquiridos eletronicamente, mas a força de tração é adquirida através de uma célula de carga. É possível registar a resistência elétrica devido aos contactos de cobre existentes em cada amarra da bancada.

Utilizou-se dois motores passo-a-passo e uma caixa redutora pois, após uma fase de experimentação observou-se que apenas um motor passo-a-passo direto não tinha binário suficiente para fraturar os provetes impressos com o filamento flexível. Foi utilizada uma célula de carga do tipo S para ser possível retirar os valores da força exercida pelo provete durante o Ensaio de Tração.

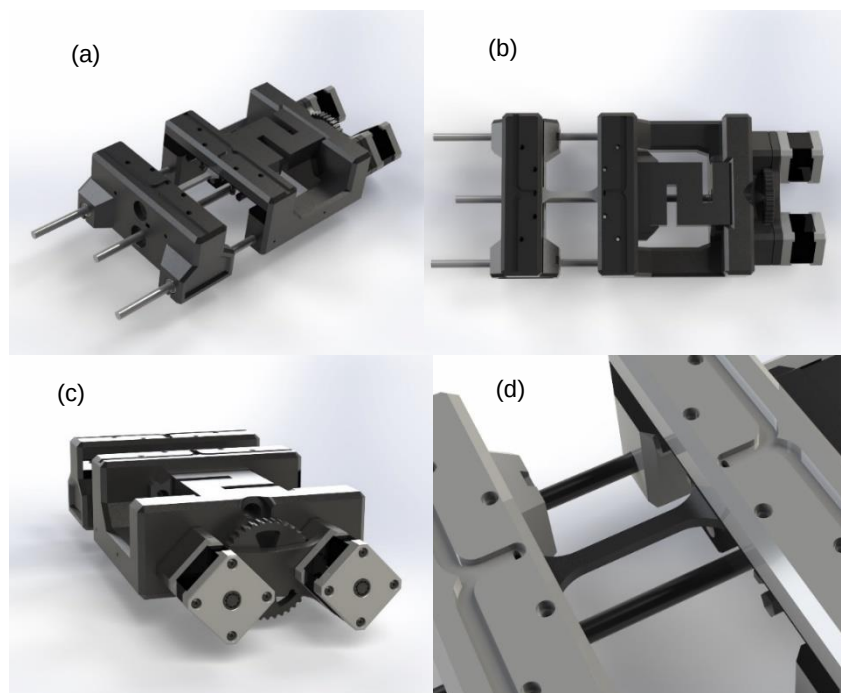


Figura 3.25 - (a) Vários pontos de vista da Bancada de Ensaio de Tração; (b) Vista de topo; (c) Vista traseira; (d) Vista de pormenor das garras de apoio dos provetes.

Devido à baixa capacidade de processamento do *Arduino UNO* não foi possível mandar comandos de movimento e de registo de dados ao mesmo tempo, portanto o movimento das garras da Bancada de Ensaio de Tração não é contínuo, isto é, a bancada movimenta as garras uma distância previamente definida e depois para e faz o registo dos dados. Os parâmetros de funcionamento da Bancada de Ensaio de Tração são o comprimento do avanço e a velocidade do avanço.

Comprimento de avanço: Este parâmetro define quantos milímetros as garras se afastam entre leituras e é igual a 0.05 mm.

Velocidade de avanço: Este parâmetro define quantos milímetros as garras se afastam durante um segundo e é igual a 0.5 mm/s.

3.3. Ensaio de Histerese

Visto que o objetivo final desta dissertação é averiguar a possibilidade de produzir extensômetros por impressão 3D *FDM*, é importante avaliar a repetibilidade da utilização deste filamento como componente resistivo, pois um extensômetro tem de ser capaz de sofrer bastantes ciclos, por vezes nas casas dos milhões, sem perder propriedades e mantendo a sua resolução.

Um sistema que sofre de histerese significa que existe um atraso na resposta do descarregamento. Isto é visível num gráfico tensão/extensão, como o apresentado na Figura 3.26, onde a curva do descarregamento não é coincidente com a curva do carregamento. Um extensômetro pode ter histerese, mas tem de ser conhecida previamente ao uso do mesmo [72].

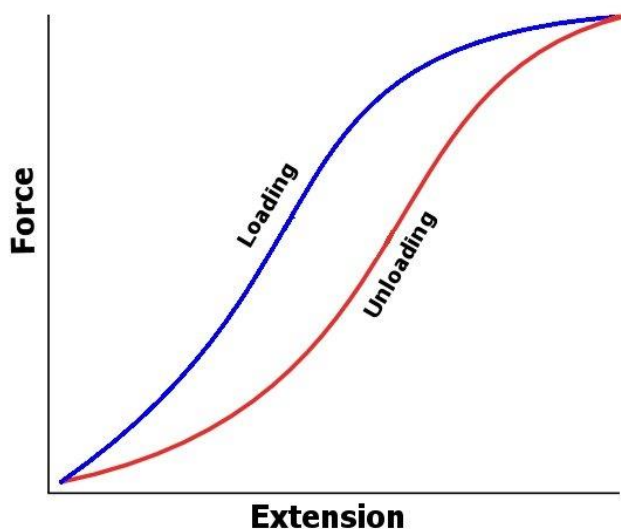


Figura 3.26 – Resultados típicos dos Ensaio de Histerese.
Adaptado de [70]

3.3.1. Bancada Ensaio de Histerese

A Bancada Ensaio de Histerese é a mesma que a utilizada no Ensaio de Tração com Aplicação de Tensão Elétrica, sendo a única diferença o comportamento das garras. Durante o Ensaio de Histerese as garras da bancada movem-se uma distância máxima e quando as garras param de se mover o movimento inverte-se. Os parâmetros de funcionamento da Bancada de Ensaio de Histerese são o comprimento do avanço, a velocidade do avanço, a extensão máxima do ciclo e o número de ciclos.

Comprimento de Avanço: Este parâmetro define quantos milímetros as garras se afastam entre leituras e é igual a 0.2 mm.

Velocidade de Avanço: Este parâmetro define quantos milímetros as garras se afastam durante um segundo e é igual a 0.2 mm/s.

Deslocamento Máximo por Ciclo: Este parâmetro define o deslocamento máximo que os provetes sofrem. Quando este deslocamento é alcançado o sentido do movimento troca. Este parâmetro é igual a 6 mm.

Número de Ciclos: Este parâmetro define quantos ciclos a Bancada executa durante o início do ensaio e é igual a 15.

3.4. Ensaio Experimentais

Antes dos Ensaio de Histerese realizou-se um screening com o objetivo de determinar quais os parâmetros de entrada que têm maior impacto na resistência elétrica.

Durante toda a realização desta dissertação todos os parâmetros de impressão que não são os parâmetros de estudo vão ser denominados por parâmetros gerais. Estes têm de ser mantidos constantes durante toda a fase de experimentação para que os dados experimentais sejam apenas afetados pelos parâmetros de estudo. Estes parâmetros gerais dependem do fabricante do filamento que está a ser utilizado. Nesta fase foram usados apenas dois níveis por parâmetro e três provetes por cada combinação de parâmetros, assim reduzindo o efeito de erros experimentais.

Visto que o número de parâmetros de estudo é baixo é viável fazer um *design* totalmente fatorial, logo o número de provetes necessários é dado pela Equação 3.1.

$$2^3 \times 3 = 24 \quad (3.1)$$

Para fazer estas avaliações foram realizados ensaios de tração nos provetes com aplicação de tensão aos terminais do mesmo. Durante os ensaios de tração registaram-se os valores da resistência elétrica, da força de tração aplicada no provete e o deslocamento linear. Com os valores registados foi possível construir a curva de tensão/extensão e a curva resistência elétrica/extensão.

Os níveis escolhidos dos diferentes parâmetros de impressão estão observáveis na Tabela 3.1.

Tabela 3.2 - Níveis dos parâmetros de Impressão

Fator	Níveis	
	-1	1
Altura de Camadas	0.2 mm	0.3 mm
Orientação de Impressão	10°	80°
Orientação das Linhas de Impressão	15°	75°

Todas as combinações possíveis dos três parâmetros de impressão e os seus dois níveis são possíveis de observar na Tabela 3.2.

Tabela 3.3 - Combinação dos diferentes níveis dos parâmetros de Impressão

Provete #	Altura de Cama- das	Orientação de im- pressão	Orientação das Linhas de Impressão
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo apresentam-se os gráficos e as secções de fratura dos provetes após os Ensaio de Tração e Histerese

4.1. Ensaio de Tração

Neste subcapítulo vão-se apresentar os gráficos tensão/extensão e resistência elétrica/extensão gerados durante os ensaios de tração e fazer observações sobre os mesmos.

4.1.1. Provetes de orientação de 10°

Na Figura 4.1 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão do tipo [1], resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.2 observa-se a secção de fratura do provete.

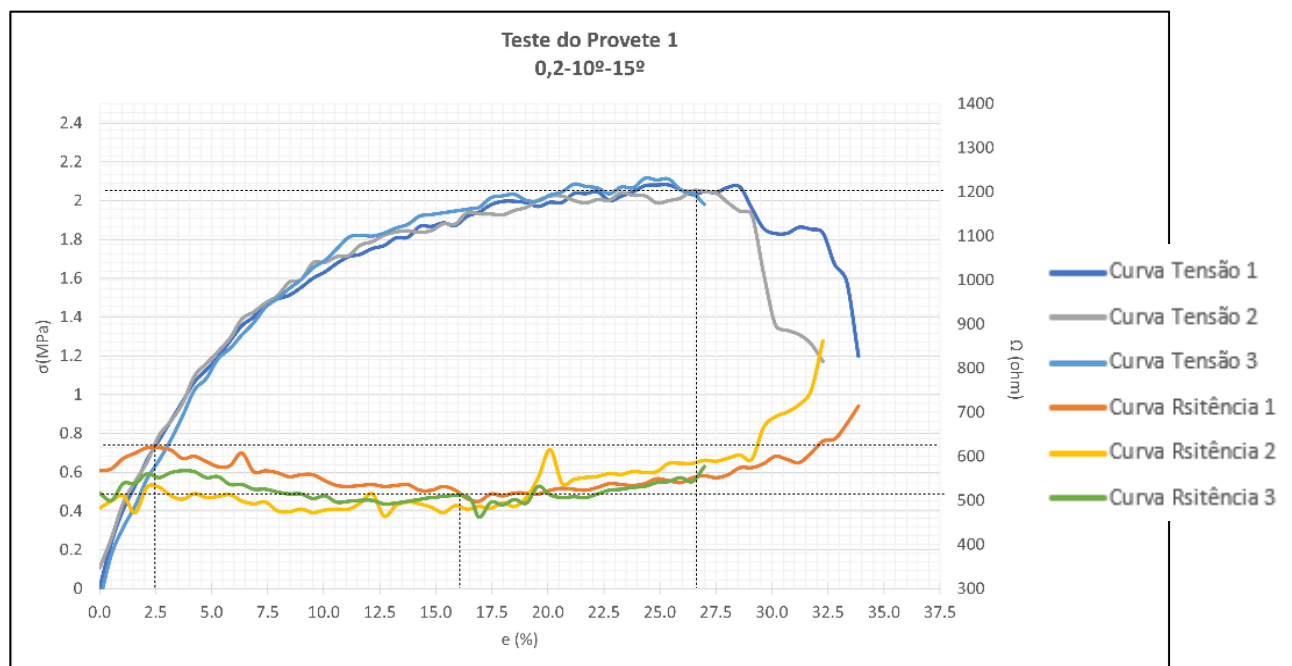


Figura 4.1 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros 1.

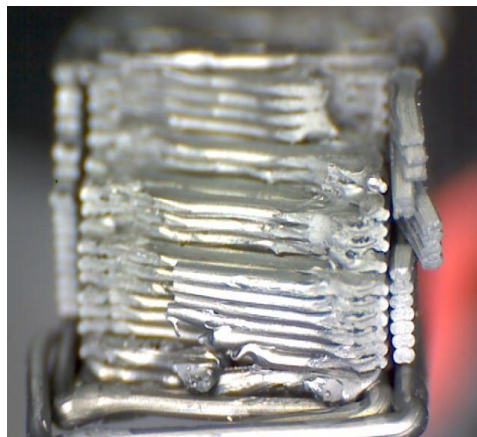


Figura 4.0.2 - Secção de fratura do provete 1.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão [1] observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 2.07 MPa e ocorreu à extensão média de 25.5% e tem um desvio padrão médio de 0.52;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 60 ohms até aos 2.5% de extensão;
- A resistência elétrica diminuiu em média cerca de 150 ohms entre os 2.5% e 16.0% de extensão;
- A resistência elétrica aumentou em média 100 ohms, desde os 16.0% de extensão até à fratura.

Na Figura 4.2 observa-se a falta de fusão entre as linhas dos perímetros e as do *infill*, o que afeta negativamente a resistência mecânica e elétrica dos provetes. Na Tabela 4.1 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Dados do gráfico a Figura 4.1

Tipo de Provette	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica		
[1] (0.2-10°-15°)	2.07	0.52	(60 ohms; 2.5%)	(150 ohms; 16.0%)	(100 ohms; 31.0%)

Na Figura 4.3 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão do tipo [2], resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.4 observa-se a secção de fratura do provete.

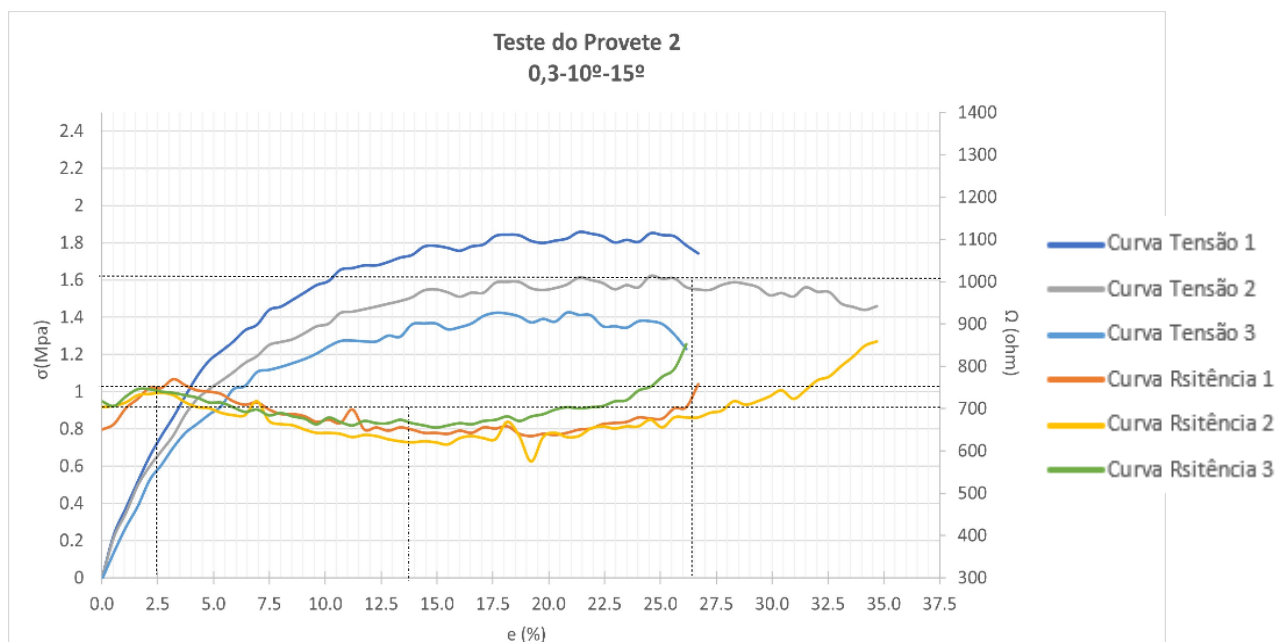


Figura 4.3 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros 2.

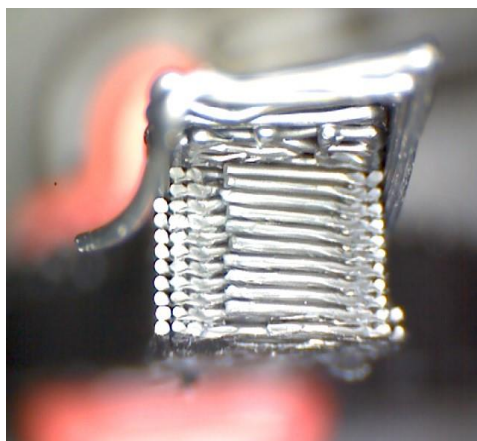


Figura 4.4 - Secção de fratura do provete 2.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão [2] observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 1.63 MPa e ocorreu à extensão média de 22.2% e tem um desvio padrão médio de 0.40;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 40 ohms até aos 2.5% de extensão;
- A resistência elétrica diminuiu em média cerca de 100 ohms entre os 2.5% e 13.5% de extensão;
- A resistência elétrica aumentou em média 100 ohms, desde os 13.5% de extensão até à fratura.

Na Figura 4.4 observa-se novamente a falta de fusão entre as linhas dos perímetros e as do *infill*, o que afeta negativamente a resistência mecânica e elétrica dos provetes. Na Tabela 4.2 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.3.

Tabela 4.2 - Dados do gráfico a Figura 4.3

Tipo de Provete	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica		
[2] (0.3-10°-15°)	1.63	0.40	(40 ohms; 2.5%)	(100 ohms; 13.5%)	(100 ohms; 26.4%)

Na Figura 4.5 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão do tipo [5], resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.6 observa-se a secção de fratura do provete.

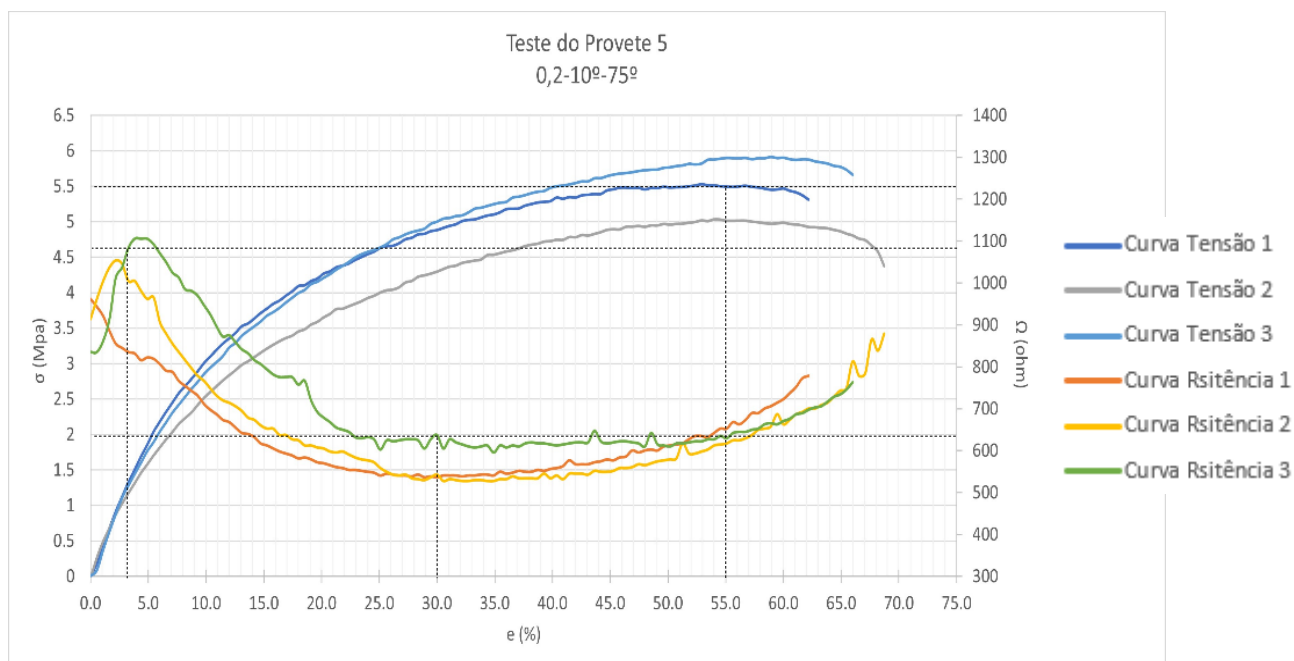


Figura 4.5 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros 5.

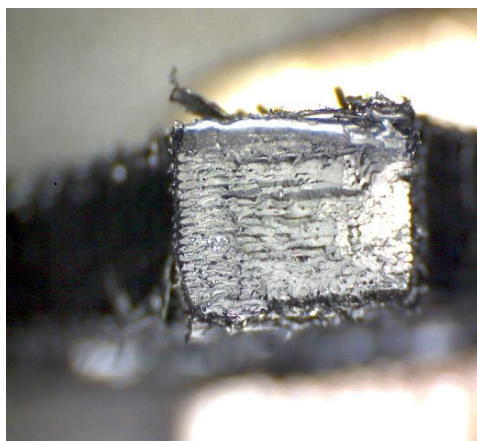


Figura 4.6 - Secção de fratura do provete 5.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão [5] observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 5.47 MPa e ocorreu à extensão média de 54.0 % e tem um desvio padrão médio de 1.38;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 140 ohms até aos 4.3% de extensão;
- A resistência elétrica diminuiu em média cerca de 430 ohms entre os 4.3% e 30.0% de extensão;

- A resistência elétrica aumentou em média 590 ohms, desde os 30.0% de extensão até à fratura.

Na Figura 4.6 observa-se que existem muitos menos vazios no interior do provete comparando com a Figuras 4.2 e 4.4. Na Tabela 4.3 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.5.

Tabela 4.3 - Dados do gráfico a Figura 4.5

Tipo de Provete	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica		
[5] (0.2-10°-75°)	5.47	1.38	(140 ohms; 4.3%)	(430 ohms; 30.0%)	(590 ohms; 30.0%)

Na Figura 4.7 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão do tipo [6], resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.8 observa-se a secção de fratura do provete.

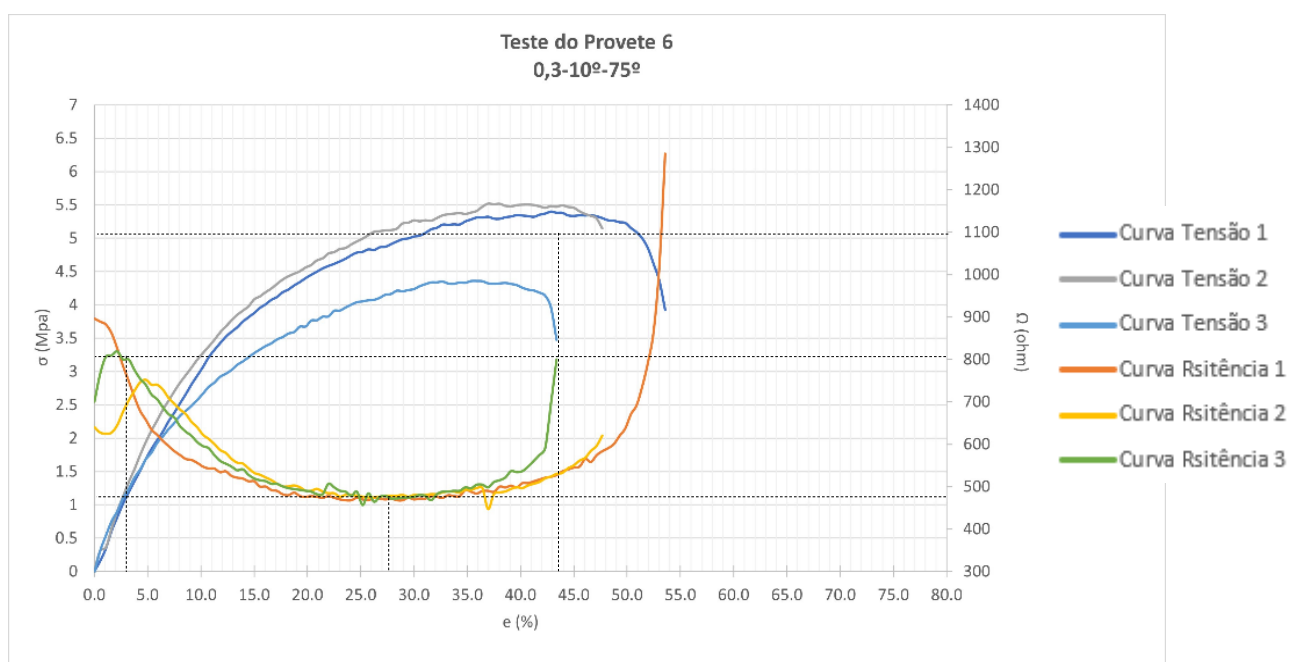


Figura 4.7 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros 6.

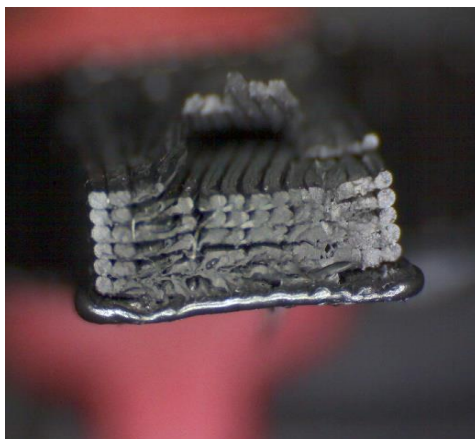


Figura 4.8 - Secção de fratura do provete 6.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão [6] observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 5.05 MPa e ocorreu à extensão média de 41.8% e tem um desvio padrão médio de 1.34;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 126 ohms até aos 4.2% de extensão;
- A resistência elétrica diminuiu em média cerca de 430 ohms entre os 3.5% e 27.0% de extensão;
- A resistência elétrica aumentou em média 320 ohms, desde os 27.0% de extensão até à fratura.

Na Figura 4.8 é visível os vazios entre as linhas de impressão. Na Tabela 4.4 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.7.

Tabela 4.4 - Dados do gráfico a Figura 4.7

Tipo de Provette	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica		
[6] (0.3-10°-75°)	5.05	1.34	(126 ohms; 4.2%)	(430 ohms; 27%)	(320 ohms; 27.0%)

4.1.2. Provetes de orientação de 80°

Na Figura 4.9 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão do tipo [3], resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.10 observa-se a secção de fratura do provete.

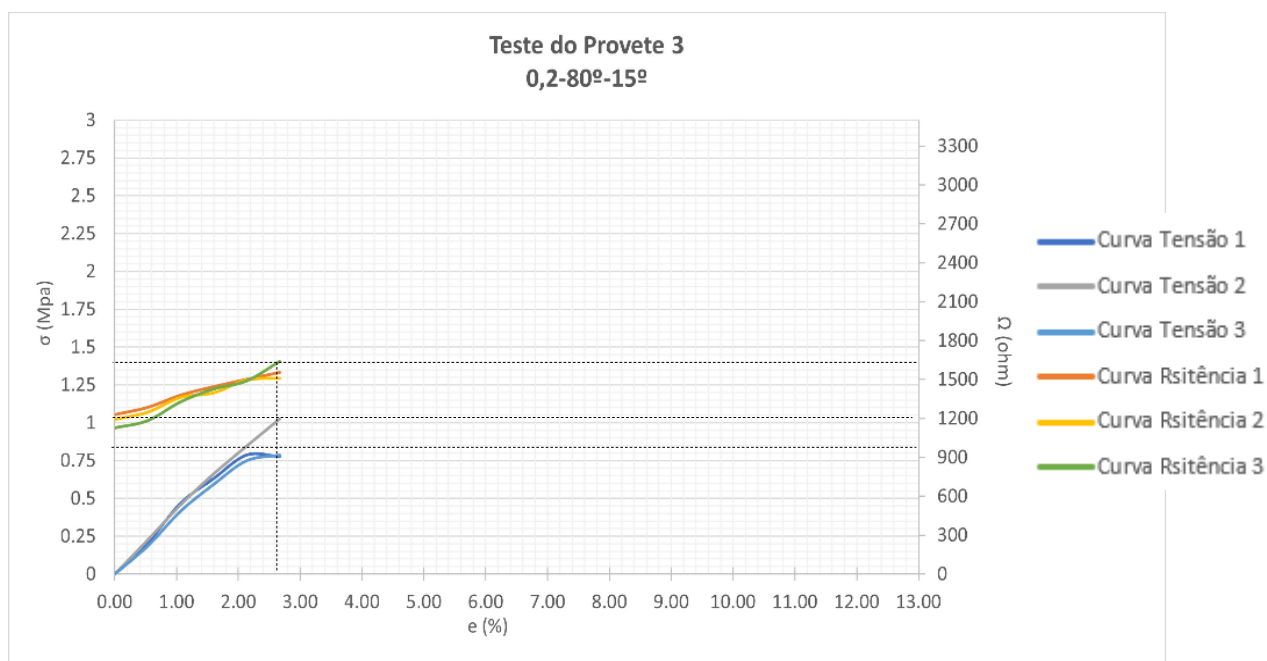


Figura 4.9 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros 3.

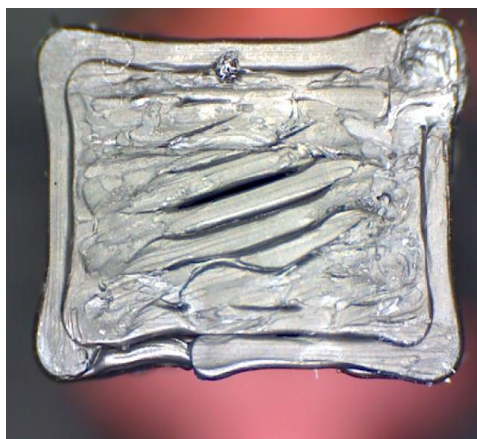


Figura 4.10 - Secção de fratura do provete 3.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão [3] observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 0.86 MPa e ocorreu à extensão média de 2.7% e tem um desvio padrão médio de 0.34;
- A resistência elétrica aumentou em média 450 ohms durante todo o ensaio;

Na Figura 4.10 é observável a falta de fusão (vazios) entre as linhas de *infill* e também a falta de controlo geométrico. Na Tabela 4.5 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.9.

Tabela 4.5 - Dados do gráfico a Figura 4.9

Tipo de Provete	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Varição da Resistência Elétrica
[3] (0.2-80°-15°)	0.86	0.34	(450 ohms; 2.7%)

Na Figura 4.11 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão do tipo [4], resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.12 observa-se a secção de fratura do provete.

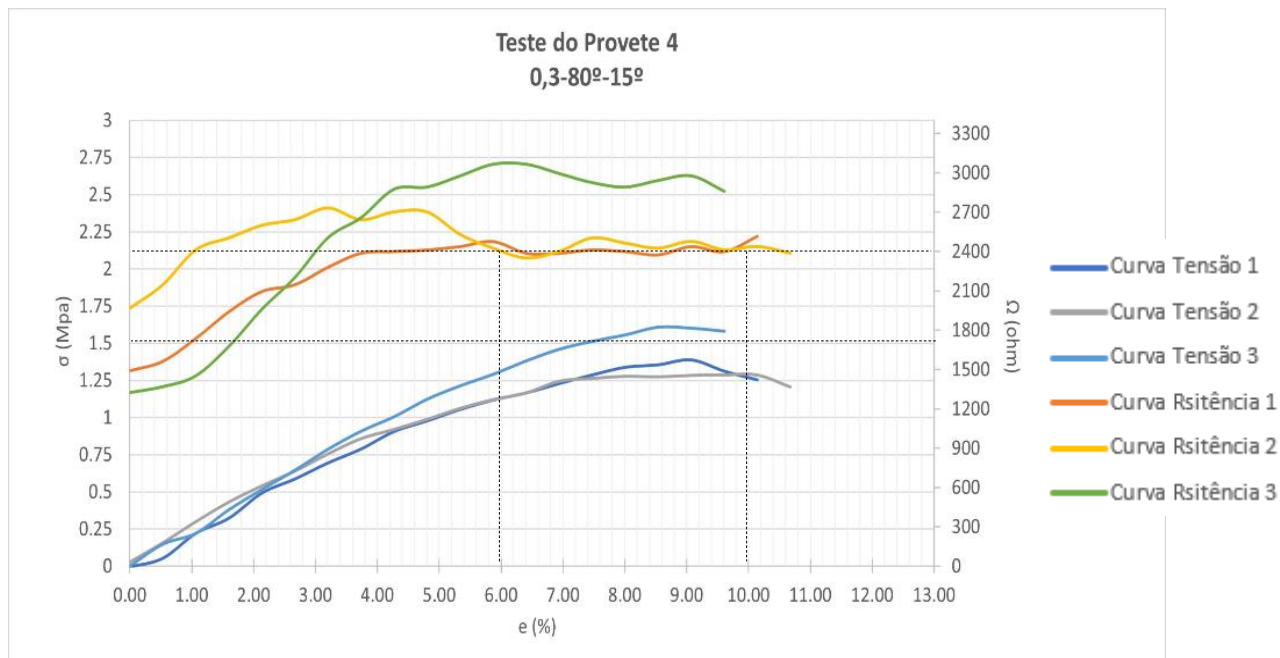


Figura 4.11 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros 4.

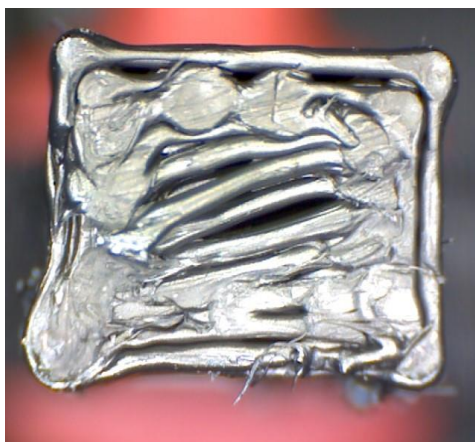


Figura 4.12 - Secção de fratura do provete 4.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão [3] observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 1.42 MPa e ocorreu à extensão média de 9.0% e tem um desvio padrão médio de 0.47;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 700 ohms até aos 6.0% de extensão;
- Após os 6.0% de extensão, a resistência elétrica estabilizou até à fratura nos 2400 ohms;
- A fratura ocorreu nos 10.0% de extensão.

Na Figura 4.12 é visível que os vazios no interior do provete são maiores quando comparados com os da Figura 4.10. Observa-se que continuou a haver falta de controlo dimensional. Na Tabela 4.6 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.11.

Tabela 4.6 - Dados do gráfico a Figura 4.11

Tipo de Provete	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica	
				
[4] (0.3-80°-15°)	1.42	0.47	(700 ohms; 6.0%)	(430 ohms; 10.0%)

Na Figura 4.13 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão do tipo [7], resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.14 observa-se a secção de fratura do provete.

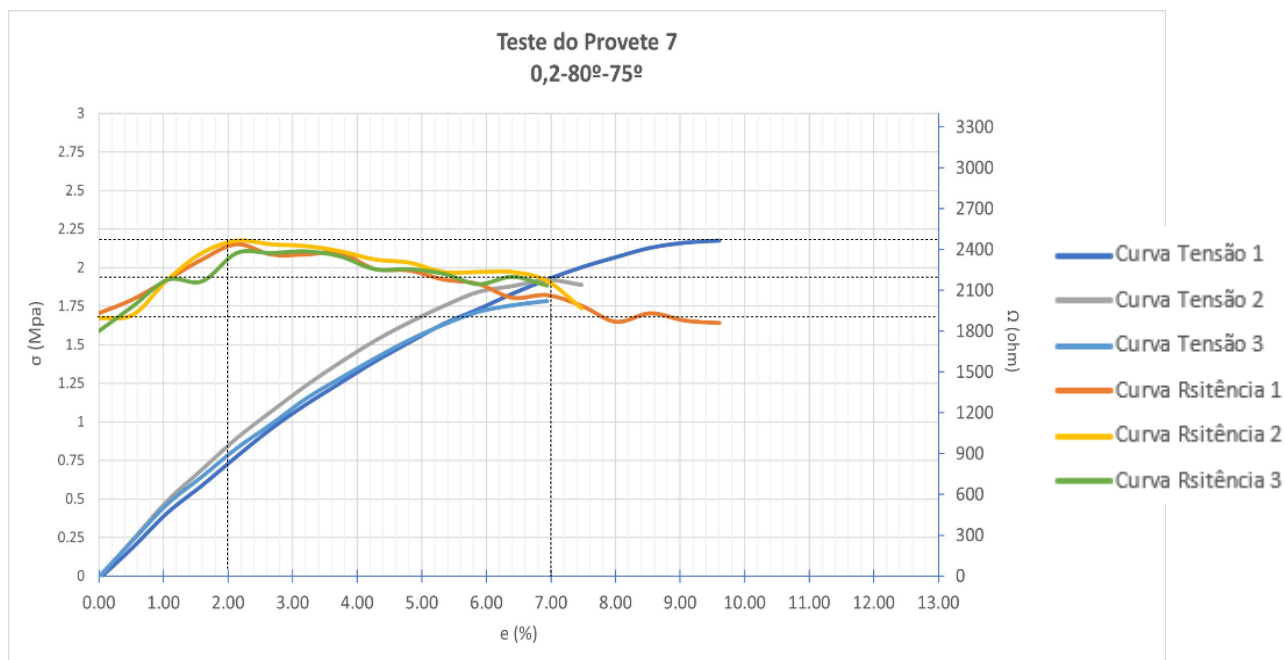


Figura 4.13 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros 7.



Figura 4.14 - Secção de fratura do provete

7.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão [7] observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 1.96 MPa e ocorreu à extensão média de 7.8% e tem um desvio padrão médio de 0.64;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 600 ohms até aos 2.0% de extensão;
- Após os 2.0% de extensão, a resistência elétrica diminuiu 300 ohms até à fratura;
- A fratura ocorreu nos 7.0% de extensão.

Na Figura 4.14 é observável que não existem vazios no interior do provete, mas ocorreu a sobreposição entre as linhas de impressão do *infill* provocando inclusões no interior dos provetes. Notou-se que continuou a haver falta de controlo dimensional. Na Tabela 4.7 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.13.

Tabela 4.7 - Dados do gráfico a Figura 4.13

Tipo de Provette	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica	
[7] (0.2-80°-75°)	1.96	0.64	(600 ohms; 2.0%)	(300 ohms; 7.0%)

Na Figura 4.15 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão do tipo [8], resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.16 observa-se a secção de fratura do provete.

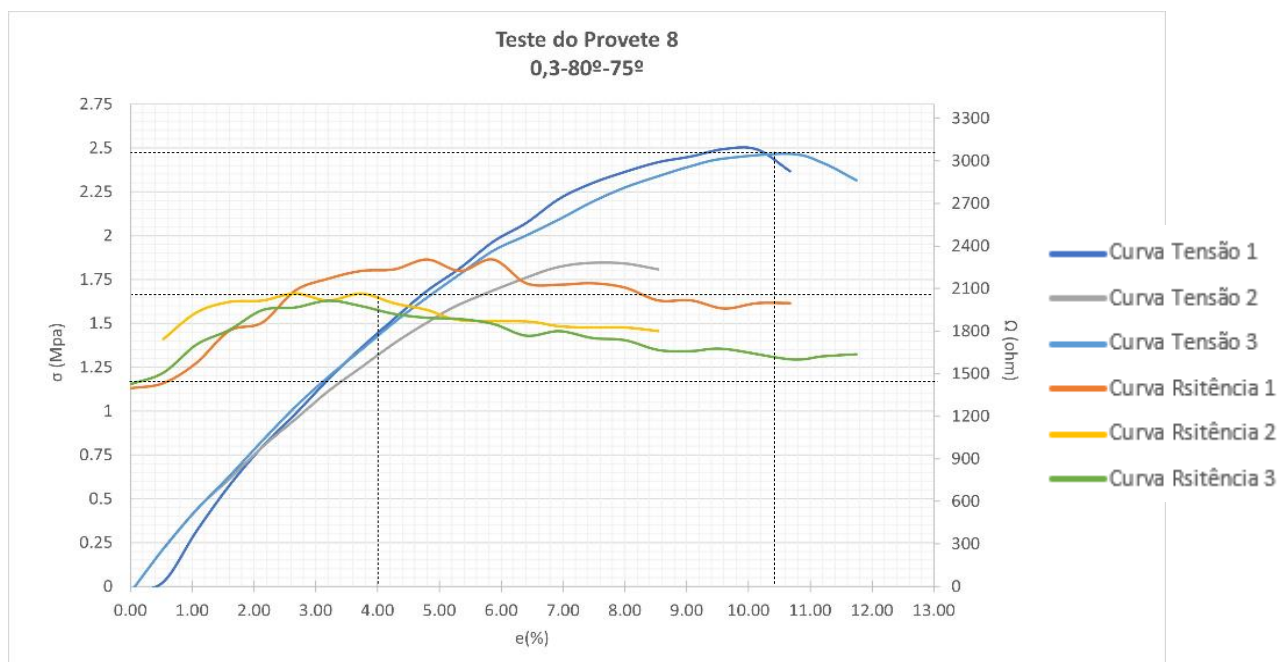


Figura 4.15 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão da combinação de parâmetros 8.

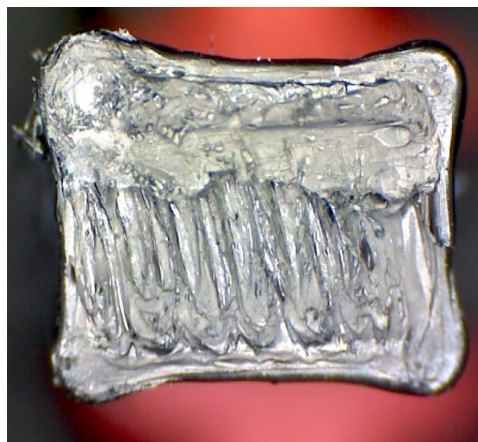


Figura 4.16 - Secção de fratura do provete

8.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão [8] observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 2.26 MPa e ocorreu à extensão média de 9.6% e tem um desvio padrão médio de 0.73;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 900 ohms até aos 4.0% de extensão;
- Após os 4.0% de extensão, a resistência elétrica diminuiu em média 300 ohms até à fratura;
- A fratura ocorreu nos 10.5% de extensão.

Na Figura 4.16 é observável que não existem vazios no interior do provete, mas ocorreu a sobreposição entre as linhas de impressão do *infill* provocando inclusões no interior dos provetes. Detetou-se que continuou a haver falta de controlo dimensional. Na Tabela 4.8 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.15.

Tabela 4.8 - Dados do gráfico a Figura 4.15

Tipo de Provete	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica	
[8] (0.3-80°-75°)	2.26	0.73	(900 ohms; 4.0%)	(300 ohms; 10.0%)

4.2. Influência dos Parâmetros nos Resultados

Após os ensaios de tração observou-se que certos valores dos parâmetros de impressão produziram efeitos indesejáveis nas curvas tensão/extensão e resistência elétrica/extensão dos provetes. Neste subcapítulo vai-se explicar como os diferentes níveis de parâmetros de impressão afetam os resultados e identificar quais são os seus valores ideais. Na Tabela 4.9 estão resumidos os dados retirados dos gráficos gerados pelos Ensaios de Tração.

Tabela 4.9 - Tabela Resumo dos dados dos Ensaios de Tração.

Tipo de Provette	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica			
[1] (0.2-10°-15°)	2.07	0.52	(60 ohms; 2.5%)		(150 ohms; 16.0%)	(100 ohms; 31.0%)
[2] (0.3-10°-15°)	1.63	0.40	(40 ohms; 2.5%)		(100 ohms; 13.5%)	(100 ohms; 26.4%)
[5] (0.2-10°-75°)	5.47	1.38	(140 ohms; 4.3%)		(430 ohms; 30.0%)	(590 ohms; 30.0%)
[6] (0.3-10°-75°)	5.05	1.34	(126 ohms; 4.2%)		(430 ohms; 27.0%)	(320 ohms; 27.0%)
[3] (0.2-80°-15°)	0.86	0.34	(450 ohms; 2.7%)			
[4] (0.3-80°-15°)	1.42	0.47	(700 ohms; 6.0%)	(430 ohm; 10.0%)		
[7] (0.2-80°-75°)	1.96	0.64	(600 ohms; 2.0%)		(300 ohms; 7.0%)	
[8] (0.3-80°-75°)	2.26	0.73	(900 ohms; 4.0%)		(300 ohms; 10.0%)	

4.2.1. Altura de Camadas

Nas Figuras 4.2 e 4.4 observar-se que nos provetes com Altura de Camadas de 0.3 mm, os vazios são maiores do que nos provetes impressos com Altura de Camada de 0.2 mm. Estes vazios podem justificar o porquê de os provetes com Altura de Camadas de 0.2 mm terem uma tensão máxima superior do que os provetes com Altura de Camada de 0.3 mm. Por outro lado, os provetes impressos com Altura de Camadas de 0.2 mm têm um aumento inicial de resistência elétrica muito superior do que os impressos com Altura de Camadas de 0.3 mm. Desta forma conclui-se que 0.2 mm é o nível ideal para o parâmetro de Altura de Camadas.

4.2.2. Orientação de Impressão

Durante o processo de impressão dos provetes, verificaram-se várias situações importantes de referir.

Material de sacrifício:

Devido à necessidade de utilizar material de suporte quando o ângulo de Orientação de Impressão ser diferente de 0°, é necessário retirar esse material de suporte após o processo de impressão terminar. Isto provoca um aumento no custo de produção, um aumento do tempo de impressão e

necessidade de tratamento pós-impressão. Esta situação é evitável se o ângulo de Orientação de Impressão for 0° ou 90° .

Probabilidade de sucesso de impressão:

Devido ao comportamento flexível do material de impressão, quanto maior for o ângulo da Orientação de Impressão mais instáveis os provetes se vão tornar durante o processo de impressão, o que pode provocar a falha da impressão. Esta instabilidade também prejudica o controlo dimensional e geométrico do provete. Nas Figuras 4.10, 4.12, 4.14 e 4.16 é possível observar as consequências da instabilidade no controlo dimensional e geométrico do provete.

Curva Tensão/Extensão:

Após a análise das Curvas Tensão/Extensão dos provetes verificou-se que as tensões e extensões máximas dos provetes impressos com ângulo de Orientação de Impressão de 80° é muito inferior do que as dos impressos com ângulo de Orientação de Impressão de 10° . Conclui-se que quanto menor for o ângulo de Orientação de Impressão, minimiza-se o material de sacrifício, aumenta-se a probabilidade de sucesso de impressão e tem-se uma resistência mecânica superior. Logo o nível ideal para o parâmetro de Orientação de Impressão é 0° .

4.2.3. Orientação das Linhas de Impressão:

Comparando as curvas tensão/extensão dos gráficos nas Figuras 4.1 e 4.7 é possível observar que os provetes impressos com o ângulo de Orientação das Linhas de Impressão de 75° têm tensão e extensões máximas superiores do que os impressos com ângulo de Orientação das Linhas de Impressão de 15° . Também, os provetes com 75° de ângulo de Orientação das Linhas de Impressão têm um aumento inicial de resistência elétrica muito superior do que os impressos com 15° de ângulo de Orientação das Linhas de Impressão. Desta forma conclui-se que quanto maior for o ângulo de Orientação das Linhas de Impressão melhor vai ser os resultados dos ensaios de tração. Logo o nível ideal para o parâmetro de Orientação das Linhas de Impressão é 90° , denominado por Concêntrico.

4.3. Provetes com Variação do Multiplicador de Extrusão.

Apesar de inicialmente o multiplicador de extrusão não ter sido considerado para estudo, verificou-se que a sua manipulação poderá promover a redução do tamanho e do número dos vazios no interior dos provetes. Na Tabela 4.10 apresentam-se os níveis com que os novos provetes foram impressos. Observa-se que estes níveis dos parâmetros de impressão são os considerados ideais no capítulo anterior.

Tabela 4.10 - Parâmetros de impressão dos provetes para o estudo do efeito do multiplicador de extrusão.

Parâmetro	Nível
Altura de Camadas	0.2 mm
Orientação de Impressão	0° (horizontal)
Orientação das Linhas de Impressão	90° (concêntrico)

4.3.1. Provetes com 100% de Multiplicação de Extrusão.

Na Figura 4.17 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão ideais com 100% multiplicador de extrusão, resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.18 observa-se a secção de fratura do provete.

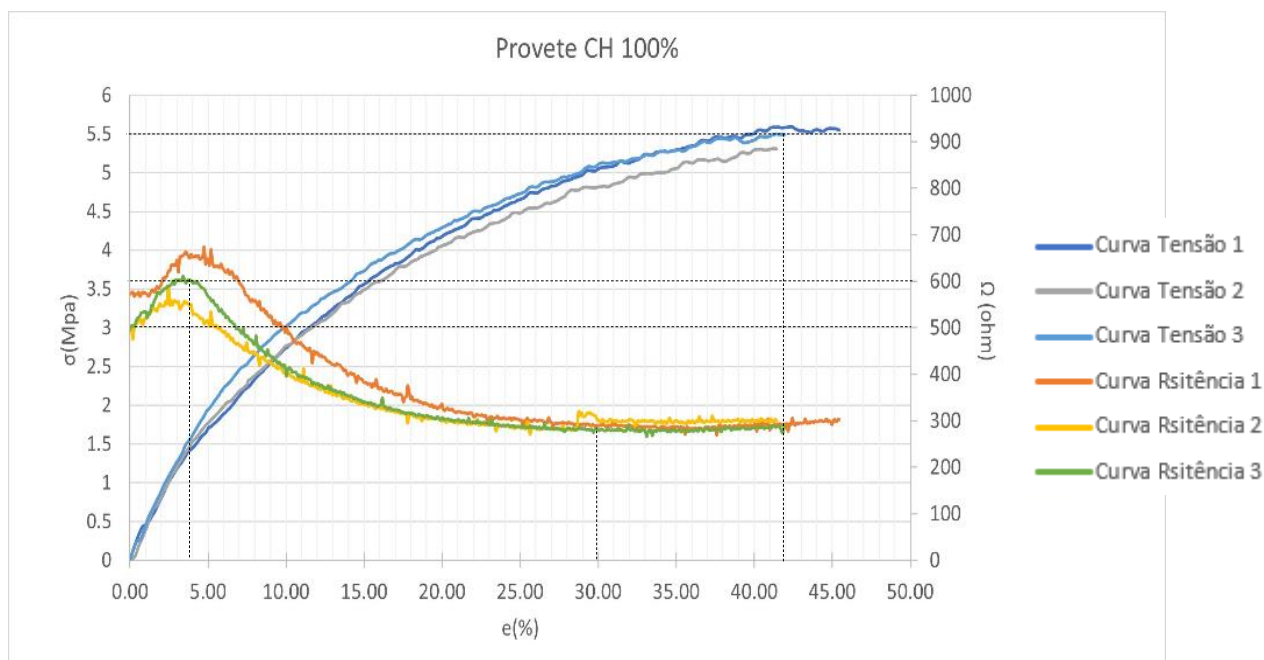


Figura 4.17 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão dos provetes concêntricos horizontal com multiplicador de extrusão de 100%.

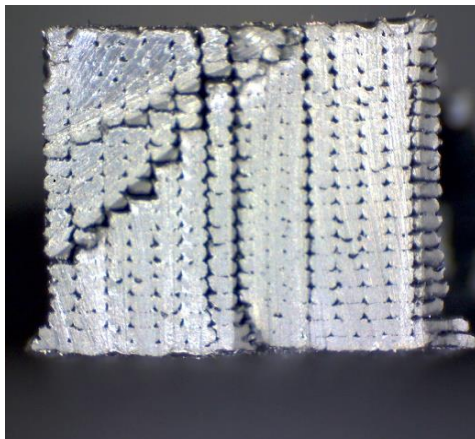


Figura 4.18 - Secção de fratura do provete CH 100%.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com combinação de parâmetros de impressão ideais com 100% multiplicador de extrusão, observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 5.45 MPa e ocorreu à extensão média de 42.5% e tem um desvio padrão médio de 1.45;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 100 ohms até aos 3.0% de extensão;
- Após os 3.0% de extensão, a resistência elétrica diminuiu em média 350 ohms até 30.0% de extensão;
- A partir dos 30.0% de extensão a resistência elétrica manteve praticamente constante até à falha do provete nos 43.3% de extensão.

Como é observável na Figura 4.19, os provetes falharam fora da zona de estricção, por sua vez invalidando o ensaio. Embora o ensaio tenha sido invalidado pode-se observar que a resistência elétrica continua a ter um aumento até aos 3% de extensão. Na Tabela 4.11 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.17.

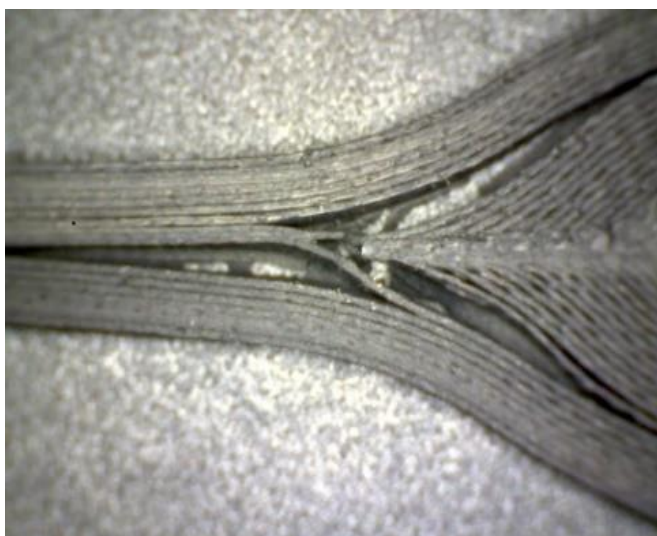


Figura 4.19 - Falha ocorrida no primeiro provete com 100% de multiplicador de extrusão.

Tabela 4.11 - Dados do gráfico a Figura 4.17					
Tipo de Provete	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica		
Concêntrico 100% (0.2-0°-90°)	5.45	1.45	(100 ohms; 3.0%)	(350 ohms; 30.0%)	(320 ohms; 43.3%)

4.3.2. Provetes com 105% de Multiplicação de Extrusão.

Na Figura 4.21 observam-se curvas tensão/extensão dos provetes com combinação de parâmetros de impressão ideais com 105% multiplicador de extrusão, resistência elétrica/extensão. Na Figura 4.22 observa-se a secção de fratura do provete.

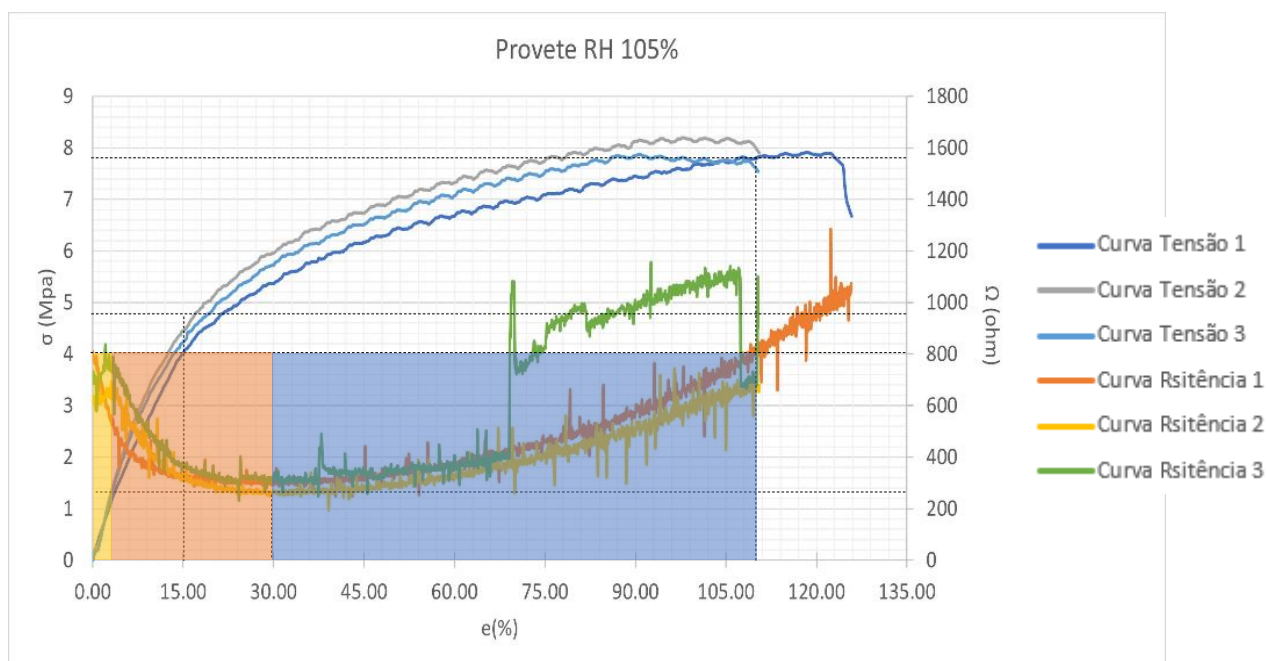


Figura 4.20 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão dos provetes impressos com os níveis ideais dos parâmetros de impressão.

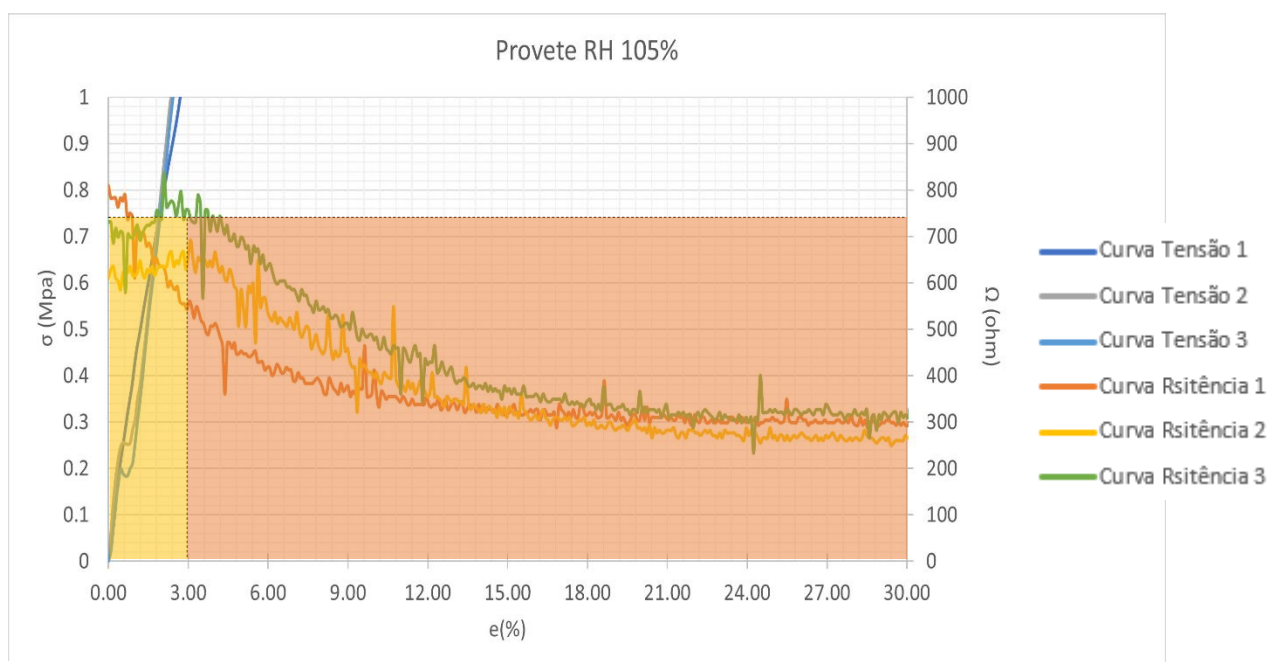


Figura 4.21 - Pormenor dos primeiros 40% de extensão das curvas Tensão/Extensão e Resistência Elétrica/Extensão dos provetes concêntricos horizontal com multiplicador de extrusão de 105%.



Figura 4.22 - Secção de fratura de um provete impresso com os níveis ideais dos parâmetros de impressão.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com combinação de parâmetros de impressão ideais com 105% multiplicador de extrusão, observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 7.92 MPa e ocorreu à extensão média de 113.2% e tem um desvio padrão médio de 1.81;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 60 ohms até aos 2.5% de extensão;
- A resistência elétrica diminui em média 300 ohms entre os 2.5% e os 30.0% de extensão;
- Após os 30% de extensão, a resistência elétrica diminuiu 450 ohms até à paragem do ensaio;
- A paragem do ensaio ocorreu nos 115.0% de extensão.

Na Figura 4.23 é observável que existem vazios entre as linhas de impressão do *infill* que vão diminuindo de tamanho com o aumento da altura de impressão.

Na Figura 4.21 identificou-se três campos de comportamento da resistência elétrica. No primeiro domínio, amarelo, a resistência elétrica tem tendência a aumentar. Este comportamento inicial da resistência elétrica não foi possível explicar. No domínio seguinte, domínio laranja, a resistência elétrica diminui. Este domínio existe desde 2.5% até aos 30% de extensão. Esta diminuição da resistência elétrica pode ser explicada pelo colapso dos vazios no interior do provete, assim aumentando a secção condutora eficaz. No domínio azul a resistência elétrica aumenta conforme seria esperado devido à diminuição da secção e ao aumento do comprimento do provete, conforme a Equação (2.2). Na Tabela 4.12 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.20.

Tabela 4.12 - Dados do gráfico a Figura 4.20.

Tipo de Provete	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica		
Concêntrico 105% (0.2-0°-90°)	7.92	1.81	(60 ohms; 2.5%)	(300 ohms; 30.0%)	(450 ohms; 115.0%)

4.3.3. Provete com 115% de Multiplicação de Extrusão.

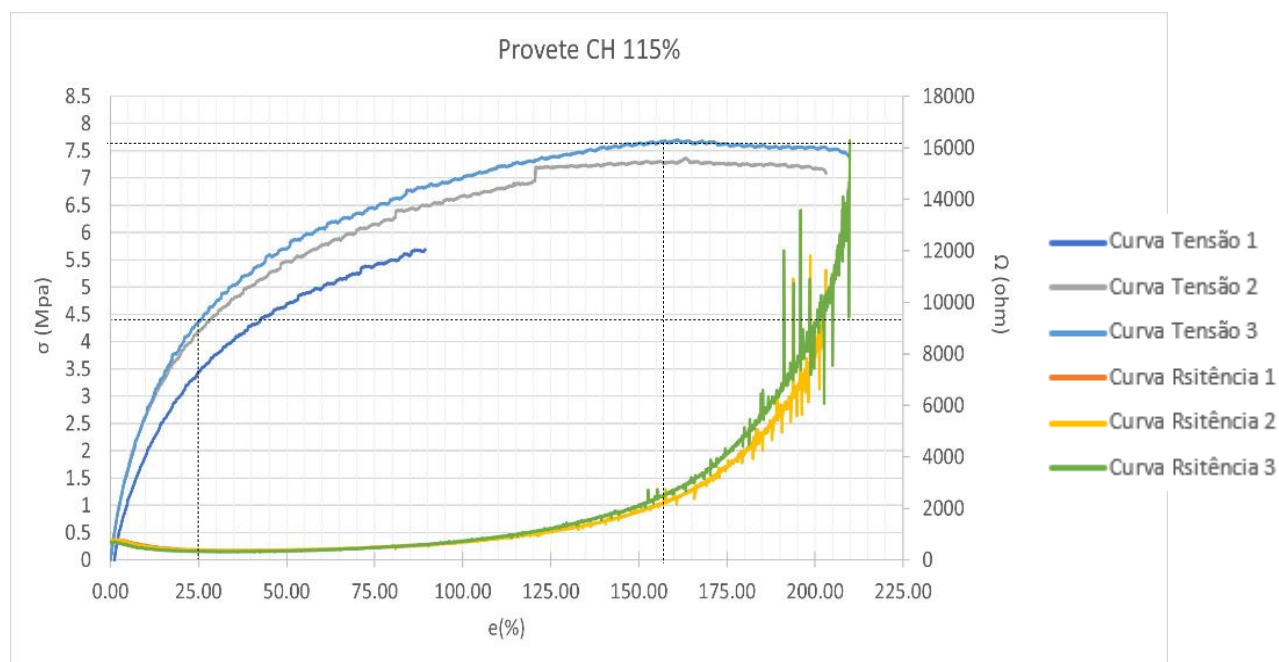


Figura 4.23 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência Elétrica/Extensão dos provetes concêntricos horizontal com multiplicador de extrusão de 115%.

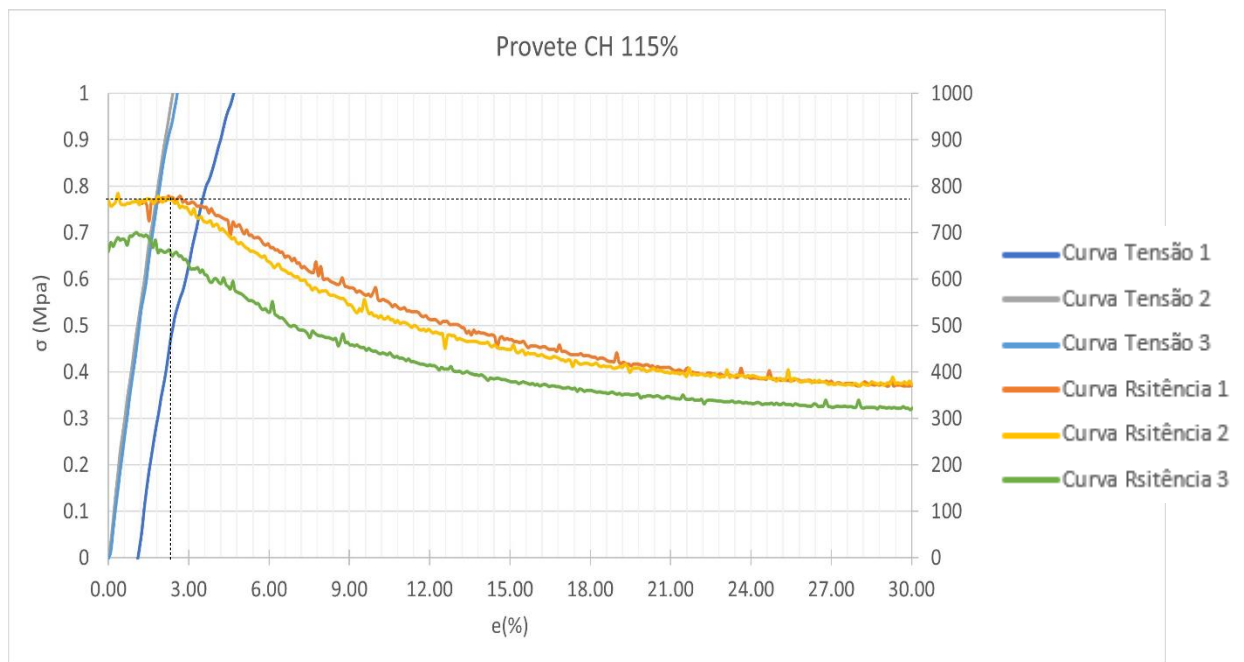


Figura 4.24 - Pormenor dos primeiros 40% de extensão das curvas Tensão/Extensão e Resistência Elétrica/Extensão dos provetes concêntricos horizontal com multiplicador de extrusão de 115%.



Figura 4.25 - Secção de fratura do provete concêntrico horizontal com multiplicador de extrusão de 115%.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com combinação de parâmetros de impressão ideais com 115% multiplicador de extrusão, observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 7.47 MPa e ocorreu à extensão média de 160.6% e tem um desvio padrão médio de 1.51;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média 12 ohms até aos 2.9% de extensão;
- Após os 2.9% de extensão, a resistência elétrica diminuiu em média 6900 ohms até aos 25.0% de extensão;
- A paragem resistência elétrica aumentou em média 10000 ohms do ensaio ocorreu nos 205% de extensão.

Pela Figura 4.23 foi possível inferir que os provetes impressos com 115% de Multiplicador de Extrusão conseguiram alcançar tensões e extensões máximas muito superiores aos dos provetes impressos com 100% de multiplicador de extrusão, mas menor que os provetes com 105%. Neste caso não houve falha do provete fora da zona de estricção, por sua vez nem houve fratura, a máquina de ensaios de tração chegou ao seu limite de deslocamento das garras antes do provete fraturar. Após terminar os ensaios, mas antes de retirar os provetes da Bancada de Ensaios, usou-se uma lâmina de x-ato para provocar a fratura dos mesmos, assim sendo possível ter a Figura 4.25. Durante o processo de impressão verificou-se que estava a ocorrer o excesso de deposição de material quando se configurou o Multiplicador de Extrusão para 115%, sendo necessário intervir e retirar o excesso de material que se estava a acumular na camada superior do provete. Visto isto, propõem-se testar provetes impressos com 105% de Multiplicador de Extrusão, pois quando se testou com 107% (valor intermédio entre 100 e 115%) continuava a ocorrer a deposição em excesso do material.

Comparando as Figuras 4.19, 4.23 e 4.26 observou-se que os vazios presentes no interior do provete da Figura 4.23 são praticamente não inexistentes. Devido às complicações que aparecem quando se imprime com 115% de multiplicador de extrusão decidiu-se escolher estudar os provetes impressos com multiplicador de extrusão. Também se observou que os provetes impressos com 115% de multiplicador de extrusão têm 10 vezes mais resistência elétrica que os provetes impressos com 105% de multiplicador de extrusão. Apenas um aumento de 5% no multiplicador de extrusão permite passar a tensão máxima dos provetes de 5.45 MPa para 7.92 MPa e a extensão máxima de 42.5% para 113.2%. Na Tabela 4.13 apresenta-se os dados retirados do gráfico da Figura 4.23.

Tabela 4.13 - Dados do gráfico a Figura 4.23.

Tipo de Provette	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica		
Concêntrico 115% (0.2-0°-90°)	7.47	1.51	(12 ohms; 2.9%)	(6900 ohms; 25.0%)	(10000 ohms; 205.0%)

Na Tabela 4.14 estão resumidos os dados retirados dos gráficos gerados pelos Ensaios de Tração no estudo do multiplicador de extrusão.

Tabela 4.14 - Tabela Resumo dos dados dos Ensaios de Tração no estudo do multiplicador de extrusão.

Tipo de Provette	Tensão máxima (MPa)	Desvio Padrão	Variação da Resistência Elétrica		
Concêntrico 100% (0.2-0°-90°)	5.45	1.45	(100 ohms; 3.0%)	(350 ohms; 30.0%)	(320 ohms; 43.3%)
Concêntrico 105% (0.2-0°-90°)	7.92	1.81	(60 ohms; 2.5%)	(300 ohms; 30.0%)	(450 ohms; 115.0%)
Concêntrico 115% (0.2-0°-90°)	7.47	1.51	(12 ohms; 2.9%)	(6900 ohms; 25.0%)	(10000 ohms; 205.0%)

Pela Tabela 4.14 é possível concluir que quanto maior for o multiplicador de extrusão menor vai ser o aumento inicial da resistência elétrica e maior vai ser a resistência elétrica, isto é, a resistência

elétrica do provete sem estar tracionado aumenta com o aumento do multiplicador de extrusão. Pode-se concluir que com a diminuição do número e o tamanho dos vazios no interior dos provetes o aumento da resistência elétrica inicial vai desaparecendo, mas não se encontrou uma justificação para este comportamento. Considerando a necessidade de intervir durante o processo de impressão quando o multiplicador de extrusão é superior a 105% e pelas observações feitas pelos gráficos das Figuras 4.17, 4.20 e 4.23 o multiplicador de extrusão escolhido para ser utilizado no resto dos ensaios nesta dissertação foi 105%.

Visto que foi possível fazer deduções objetivas sobre os efeitos dos parâmetros de impressão que foram confirmadas pelos resultados dos ensaios de tração, conclui-se que não será necessário realizar o estudo estatístico dos dados. Estas deduções vão ser apresentadas a seguir.

4.3.1. Provetes do Ensaio de Histerese

Antes da realização dos Ensaios de Histerese considerou-se importante verificar se os provetes impressos para os Ensaios de Histerese (Figuras 3.23, 3.24 e 3.25) têm o mesmo comportamento que os provetes dos Ensaios de Tração.

Para promover a fusão entre os perímetros e o infill alterou-se o tipo de infill utilizado, passando de concêntrico, Figura 4.20 (a), para reticular, Figura 4.20 (b), mas com um número de perímetros grande o suficiente para a zona de estricção ser só constituído por linhas de impressão com a mesma direção que os esforços. Esta mudança evita que a falha, visível na Figura 4.19 volte a acontecer.

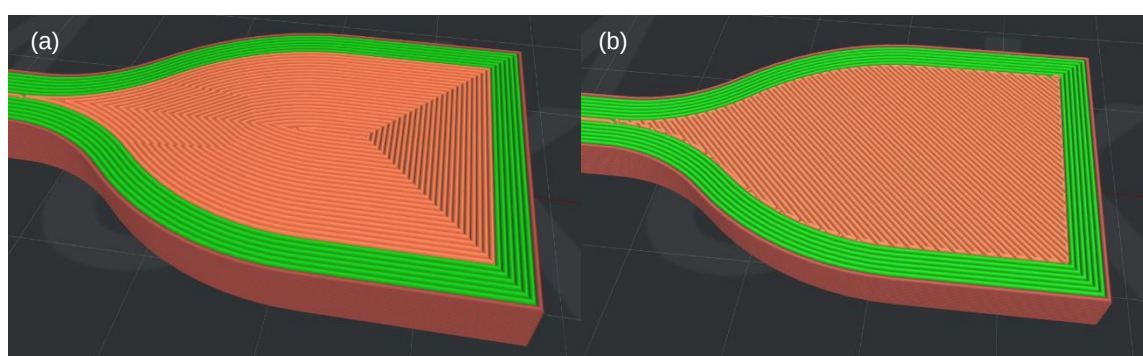


Figura 4.26 - (a) Provede de infill do tipo concêntrico; (b) Provede de infill do tipo reticular.

Na Tabela 4.15 identificam-se os níveis dos parâmetros de estudo dos provetes do Ensaio de Histerese.

Tabela 4.15 - Níveis dos parâmetros de estudo.

Parâmetro	Nível
Altura de Camadas	0.2 mm
Orientação de Impressão	0° (horizontal)
Orientação das Linhas de Impressão	90° (reticular)
Multiplicador de Extrusão	105%

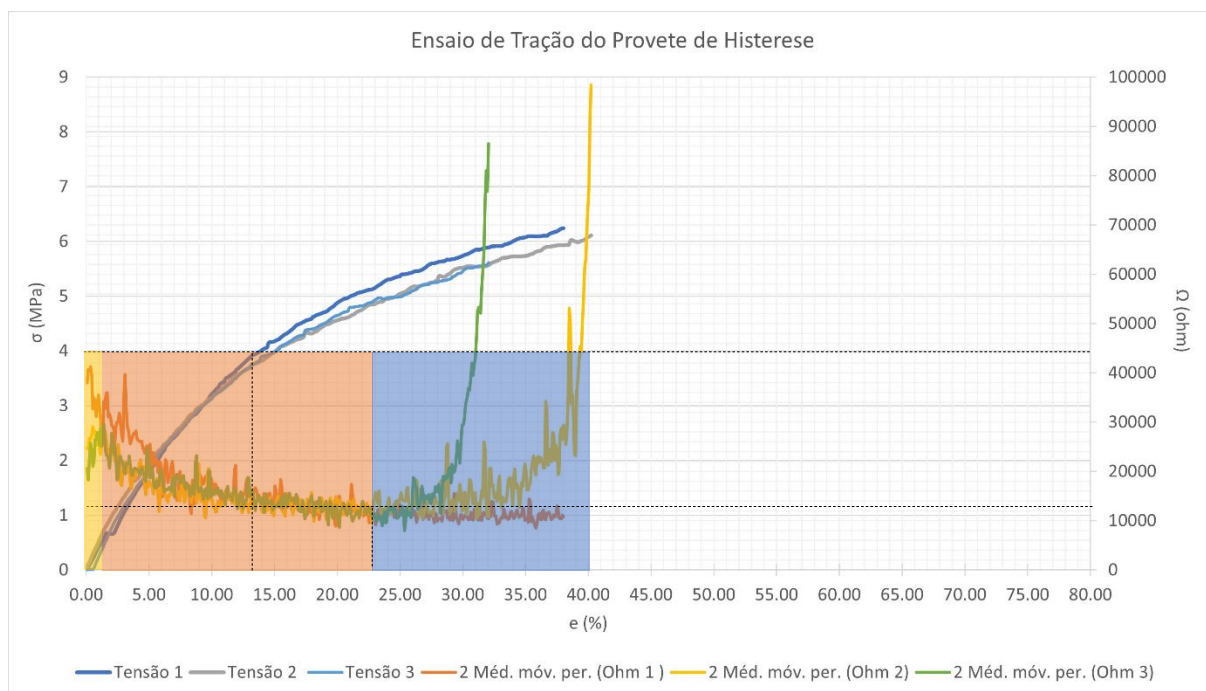


Figura 4.27 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão dos provetes impressos para os Ensaios de Histerese.

Após a realização do Ensaio de Tração dos provetes com a configuração de parâmetros de impressão do provete observou-se o seguinte:

- A tensão máxima média foi 6.55 MPa e ocorreu à extensão média de 37.2% e tem um desvio padrão médio de 1.67;
- Inicialmente a resistência elétrica aumentou em média até aos 2.5% de extensão;
- Após os 2.5% de extensão, a resistência elétrica diminuiu em média até à paragem do ensaio;
- A paragem do ensaio ocorreu nos 40% de extensão.

Comparando os gráficos das Figuras 4.24 e 4.27 verifica-se que as curvas tensão/extensão são muito semelhantes, sendo as únicas diferenças as tensões máximas e as resistências elétricas máximas. Isto pode ter ocorrido pois a resistência mecânica dos provetes de Ensaio de Histerese é comprometida devido à descontinuidade provocada pela presença das superfícies de ligação. A resistência elétrica inicial dos provetes de Ensaio de Histerese é muito superior pois a secção do elemento condutor é muito menor, logo, considerando a Equação (2.2), é perceptível porque a resistência elétrica é maior. Apesar destas diferenças entre os tipos de provetes, as curvas tensão/extensão e resistência elétrica/extensão são idênticas no domínio elástico linear. No domínio de colapso a resistência elétrica tem uma diminuição menor do que o da Figura 4.24, pois, devido à secção condutora ser menor, existem menos vazios para colapsarem. A justificação para o aumento inicial da resistência elétrica continua não ser possível, devido à limitação dos aparelhos de medida e de inspeção.

4.2. Ensaio de Histerese

Após o Ensaio de Tração dos provetes impressos para os Ensaios de Histerese com os níveis ideais dos parâmetros de impressão verificou-se que a extensão máxima por ciclo do Ensaio de Histerese não deve ser superior a 20% (11 mm de deformação). Para reduzir o tempo dos Ensaios de Histerese decidiu-se definir o Deslocamento Máximo por Ciclo para 6 mm (11% de extensão).

A Figura 4.28 apresenta as curvas tensão/extensão e resistência elétrica/extensão geradas durante o Ensaio de Histerese. Na Figura 4.29 observa-se as curvas tensão/tempo e resistência elétrica/tempo geradas pelo Ensaio de Histerese.

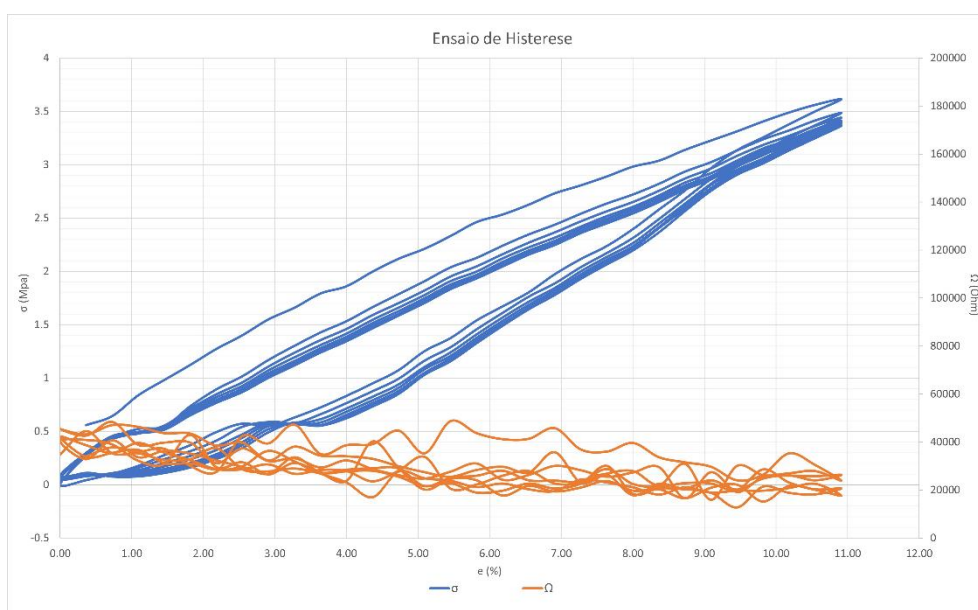


Figura 4.28 - Curvas Tensão/Extensão e Resistência elétrica/Extensão dos provetes impressos para os Ensaios de Histerese.

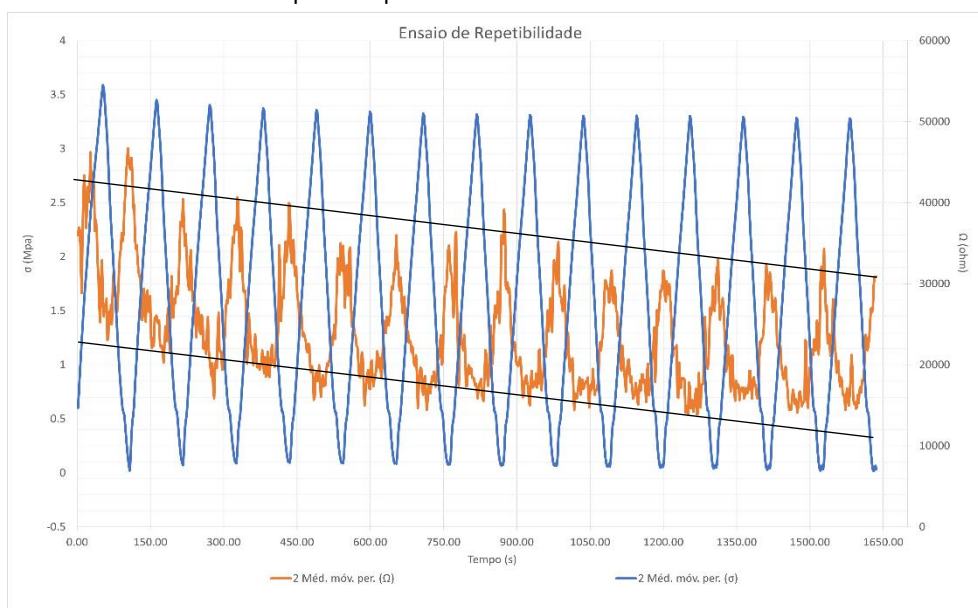


Figura 4.29 - Curvas Tensão/Tempo e Resistência elétrica/Tempo dos provetes impressos para os Ensaios de Histerese.

Observando as curvas tensão/extensão da Figura 4.28 verifica-se que o provete sofre histerese, pois existe um atraso da tensão no descarregamento das forças. Apesar disto a repetibilidade das curvas tensão/extensão do provete é bastante boa. Por outro lado, apesar da resistência elétrica ter um comportamento consistente (diminui com o avanço e aumenta com o retorno), a sua variação não é consistente. Esta situação também é visível nas curvas representadas na Figura 4.29 (a resistência máxima vai diminuindo ao longo do ensaio de Histerese)

6. CONCLUSÕES

Neste capítulo vão-se apresentar as conclusões retiradas pelos resultados obtidos pelos ensaios de tração e de histerese.

6.1. Conclusões

Observando os resultados obtidos ao longo desta dissertação pode-se concluir que é possível detetar deformação através de um sensor construído através de Impressão 3D *FDM* com filamento condutor flexível.

Após a análise das curvas tensão/extensão e resistência elétrica/extensão avaliou-se como os três primeiros parâmetros de impressão em estudo afetam as curvas dos gráficos e quais eram os seus níveis ideais. Analisando os gráficos também se verificou a existência de um domínio onde a resistência elétrica diminuía, o que não foi um resultado que era esperado, sendo que o próximo passo foi explicar a existência deste domínio.

Quando se escolheu os níveis ideais dos parâmetros de impressão não se teve só atenção aos resultados dos ensaios, mas também como os parâmetros de impressão afetavam o processo de impressão. Um exemplo de como os parâmetros de impressão podem afetar o processo de impressão pode ser como a Orientação de Impressão afetou a probabilidade de sucesso de impressão.

Depois da fratura dos provetes dos ensaios de tração analisou-se as secções de fratura dos provetes, detetando-se vazios entre as linhas de impressão. Durante os ensaios de tração o colapso destes vazios podem explicar a diminuição da resistência elétrica no início do ensaio. A este domínio onde a resistência elétrica diminuía denominou-se por domínio de colapso. Para tentar reduzir o tamanho e o número de vazios no interior dos provetes escolheu-se o Multiplicador de Extrusão para controlar a quantidade de material depositado durante o processo de impressão. Após o estudo da influência do multiplicador de extrusão no tamanho e número de vazios no interior dos provetes chegou-se à conclusão de que 105% do mesmo era o valor que proporcionava a criação de um domínio de colapso mais estável, e sem criar problemas durante o processo de impressão.

6.2. Proposta de trabalhos futuros

Durante esta dissertação estudou-se como os principais parâmetros de impressão afetavam a condução dos provetes impressos com filamento condutor durante um ensaio de tração. Após verificar a existência de uma combinação destes parâmetros que possibilitava uma variação de resistência elétrica que era consistente conclui-se que era possível construir sensores de movimento por impressão 3D *FDM* com filamento flexível condutor, mas é de grande importância estudar o aumento inicial da resistência elétrica, para ser possível construir sensores de movimento precisos. Também é interessante estudar a possibilidade de criar sensores de flexão e torção por

Propõem-se o estudo futuro da possibilidade da construção dos seguintes sensores impressos com filamento condutor:

- Temperatura;
- Pressão;
- Som.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Abid Haleem and Mohd Javaid, "Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review," *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 04, no. 04, October 2019, doi: 10.1142.
- [2] N. Naveed (2020): "Investigate the effects of process parameters on material properties and microstructural changes of 3D-printed specimens using fused deposition modelling (FDM), *Materials Technology*," DOI: 10.1080/10667857.2020.1758475.
- [3] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8 th. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [4] <https://openpress.universityofgalway.ie/designingthedigitalworld/chapter/brief-history-3d-printing/>
- [5] Brian Wachwicz, "Stratasys For a 3D World, Microsoft Word - stratasys.docx (cmu.edu)
- [6] L. Romero, A. Guerrero, M. M. Espinosa, M. Jiménez, I.A. Domínguez, M. Domínguez, "Additive manufacturing with RepRap methodology: current situation and future prospects", Microsoft Word - Additive manufacturing with RepRap methodology (utexas.edu)
- [7] Hönnunar & Arkítektúrdeild, Vöruhönnun, "What is the RepRap? Origins and influences," Microsoft Word - ritgerdir_snidmat_2014_2015.doc (skemman.is)
- [8] Nesma T. Aboulkhair, Marco Simonelli, Luke Parry, Ian Ashcroft, Christopher Tuck, Richard Hague, "3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting," <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>
- [9] Muslin Mukhtarkhanov, Asma Perveen, Didier Talamona, "Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting," <https://doi.org/10.3390/mi11100946>
- [10] Katarzyna Bryll, Elżbieta Piesowicz, Paweł Szymański, Wojciech Ślączka, Marek Pijanowski, "Polymer Composite Manufacturing by FDM 3D Printing Technology," <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823702006>
- [11] "3D Printer Extruder Kit", <https://pt.aliexpress.com/item/32555566677.html> (accessed Jan 31, 2023)
- [12] Joshua J. Tully, Gabriel N. Meloni, "A Scientist's Guide to Buying a 3D Printer: How to Choose the Right Printer for Your Laboratory," DOI: 10.1021/acs.analchem.0c03299
- [15] Thirunahary Swetham, Ketham Madhana Mohan Reddy, Akhil Huggi, Mavoori Naveen Kumar, "A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM"
- [16] Ksawery Szykiedans, Wojciech Credo, Dymitr Osiński, "Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints," <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.245>

- [17] Juan Wang, Bin Yang, Xiang Lin, Lai Gao, Tao Liu, Yonglai Lu, Runguo Wang, "Research of TPU Materials for 3D Printing Aiming at Non-Pneumatic Tires by FDM Method," <https://doi.org/10.3390/polym12112492>
- [18] Sachini Wickramasinghe, Truong Do, Phuong Tran, "FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments," <https://doi.org/10.3390/polym12071529>
- [19] RECREUS, "Conductive Filaflex," <https://recreus.com/gb/filaments/3-filaflex-conductivo.html>
- [20] T.C. Doyle, J.L. Ericksen, "Nonlinear Elasticity," [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70371-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70371-5)
- [21] Ruben Bayu Kristiawan , Fitriani Imaduddin, Dody Ariawan , Ubaidillah and Zainal Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
- [22] SIMPLIFY3D, "Print Quality Troubleshooting Guide," <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/>
- [23] #3DBENCHY, "Under-Extrusion-Side", <https://www.3dbenchy.com/under-extrusion-side/>
- [24] Ken Douglas, ALL3DP, "3D Printer Heated Bed – The Advantages," Jul 27, 2021
- [25] Posted SpiritRoam, "When the First Layer doesn't stick," https://www.reddit.com/r/3dprinting-fail/comments/mmu5rv/when_the_first_layer_doesnt_stick/
- [26] Kerry Stevenson, Fabbaloo, "The Critical Importance of Cooling During Plastic 3D Printing,"
- [27] Digital Manufacturing News and Research, "3D Printer Nozzle Guide," Dec 30, 2020
- [28] Mikolas Zuza, PRUSA RESEARCH, "Everything about nozzles with a different diameter,"
- [29] PRUSA RESEARCH, "What are perimeters good for?," November 10, 2015
- [30] MANUFACTUR3D, "What are the Four Types of FDM 3D Printers? Cartesian, Delta, Polar & Scara,"
- [31] Jackson O'Connel, ALL3DP, "CoreXY vs Cartesian 3D Printers: The Differences,"
- [32] PRUSA RESEARCH, "Original Prusa i3 MK3S+,"
- [33] Emmett Grames, ALL3DP, "CoreXY 3D Printer Design: Why It Makes a Difference,"
- [34] Gearbest, "COREXY 3D PRINTER STRUCTURE," <https://www.gearbest.com/products/new-tronxy-x5sa-pro-3d-printer-corexy-structure-with-industrial-linear-guide-design-titan-extruder-auto-leveling-cube-printer?VariantsId=20215>
- [35] AliExpress, "COREXY 3D Printer," <https://pt.aliexpress.com/item/32943721293.html?gatewayAdapt=glo2bra>

- [36] Tian Ooi, ALL3DP, "What Is a Delta 3D Printer? – Simply Explained,"
- [37] B. Madeira, C. Fraga, Cassiano Bonin, D.Lohmann, D.Castoldi, A. Da Costa, "A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts," doi: 10.1590
- [38] AL3DAN 3D research lab, "Principle of Operation," <https://www.corexz.com/theory.html>
- [39] Clevercreations, "The 5 Best 3D Printer Extruders for All Filaments,"
- [40] RECREUS, "Direct extrusion vs. bowden type,"
- [41] Pranav Gharge, "Ender 3 (V2/Pro) Extruder Skipping: 7 Tips to Fix It,"
- [42] Tobias Hullette, "Direct Drive vs Bowden Extruder: The Differences,"
- [43] 3DJAKE, "Direct-drive extruder vs. Bowden extruder," <https://www.3djake.com/info/guide/direct-drive-extruder-vs-bowden-extruder>
- [44] E3D, "Prusa V6 HotEnd (MK2 & MK3 variants)," <https://e3d-online.com/products/prusa-v6-hotend>
- [45] RAISE3D, "E2 3D Printer," <https://www.raise3d.com/products/e2/>
- [46] TWI Global, "WHAT IS THE DIFFERENCE BETWEEN 3D PRINTING AND INJECTION MOULDING?," <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/3d-printing-vs-injection-moulding>
- [47] Filament2Print, "What 3D printing can contribute to mold making," May 7, 2020, https://filament2print.com/gb/blog/87_manufacturing-molds-3d-printing.html
- [48] FormLabs, "How Much Does a 3D Printer Cost?," <https://formlabs.com/eu/blog/how-to-calculate-3d-printer-cost/>
- [49] 3D&PRINT, "3D Printer Easythreed Model X1," <https://3dandprint.eu/en/3d-printers/3d-printer-easythreed-model-x1/>
- [50] PTROBOTICS, "Ultimaker 3 3D Printer," <https://www.ptrobotics.com/impressora-3d/6163-ultimaker-3-3d-printer-impressora-3d.html>
- [51] mepits, "How a 3D Printer Works With a Revolutionary Mechanism,"
- [52] FormLabs, "How to Estimate Injection Molding Cost?," <https://formlabs.com/blog/injection-molding-cost/>
- [53] BNTMachinery, "How does injection moulding machine work? What is its structure?," <https://bnt-machinery.com/how-does-injection-moulding-machine-work-what-is-its-structure.html>
- [54] Slant3D Blog, "The Price of 3D Printing vs Injection Molding,"
- [55] Dennis McGuigan, Kaysun Blog, "Plastic Injection Molding vs 3D Printing – Which is Better?,"

- [56] TWI Global, "WHAT ARE THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF 3D PRINTING?," <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>
- [57] Merriam-Webster, "Definition of Sensor," <https://www.merriam-webster.com/dictionary/sensor>
- [58] tacterion, "RESISTIVE SENSING: DEFINITION, EXAMPLES & SENSORS," <https://www.tacterion.com/wiki/resistive-sensing>
- [59] I.B De Paula, "Medição de Deformação e Força," Capítulo V 2015
- [60] Encardio Rite, "Strain Gauge: Principle, Types, Features and Applications," <https://www.encardio.com/blog/strain-gauge-principle-types-features-and-applications>
- [61] "5.1.1. What is experimental design?," <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section1/pri11.htm>,
- [62] ASQ, "WHAT IS DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)?," <https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>
- [63] "5.3.3. How do you select an experimental design?," <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri33.htm>
- [64] "5.3.2. How do you select and scale the process variables?," <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri32.htm>
- [65] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escaleira, "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry," *Talanta*, vol. 76, no. 5. Elsevier, pp. 965–977, Sep. 15, 2008. doi: 10.1016/j.talanta.2008.05.019.
- [66] NASAT Labs, "Design of Experiment II – Response Surface Methodology (RSM) (DOE102)," <https://nasatlabs.com/design-of-experiment-ii-response-surface-methodology-rsm-doe102/>
- [67] "5.3.3.6.1. Central Composite Designs (CCD)," <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3361.htm>
- [68] Bouzid Ait-Amir, Philippe Pougnet, Abdelkhalak El Hami, "6 - Meta-Model Development," bdelkhalak El Hami, Philippe Pougnet, *Embedded Mechatronic Systems 2*, Elsevier, 2015, Pages 151-179, ISBN 9781785480140, doi: 10.1016
- [69] "5.7. A Glossary of DOE Terminology," <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section7/pri7.htm#Rotatability>
- [70] Ideal elastic hysteresis. | Download Scientific Diagram (researchgate.net)